

**PROBLEMAS RESUELTOS**

**DE**

**CORTOCIRCUITOS**



**ELOY BELTRAN BELTRAN**

FEB 2015

**3.2 CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO ALIMENTADO POR POTENCIA INFINITA.-**

Por motivos didácticos empezaremos por estudiar el cortocircuito trifásico o tripolar a sabiendas de que es el menos frecuente y dentro del mismo cabe distinguir:

3.2.1) Régimen permanente.

3.2.2) Régimen transitorio

**3.2.1) Régimen permanente en cortocircuito tripolar.-**

La corriente permanente de cortocircuito viene dada por la ecuación:

$$\vec{I}_{CC} = \frac{\vec{U}_f}{\vec{Z}_t} \quad (A) \quad (3.1)$$

en donde:

-  $U_f$  = Tensión simple o de fase en V.

-  $Z_t$  = Impedancia del tramo de fase hasta el punto de falta en  $\Sigma$ .

En el caso de que en principio de línea exista un transformador, cuya impedancia combinada referida al secundario sea  $Z_{c2}$ , la impedancia total será:

$$\vec{Z}_t = \vec{Z}_L + \vec{Z}_{c2} \quad (\Omega) \quad (3.2)$$

siendo:

-  $Z_L$  = Impedancia de la línea en  $\Sigma$ .

-  $Z_{c2}$  = Impedancia combinada del transformador referida al nivel eléctrico del secundario en  $\Sigma$ .

**3.2.2) Régimen transitorio en cortocircuito tripolar.-**

Suponiendo una línea de potencia infinita, es decir que alimenta un punto de tensión y frecuencia invariable, este punto será alimentado por un sistema trifásico de tensiones, es decir:

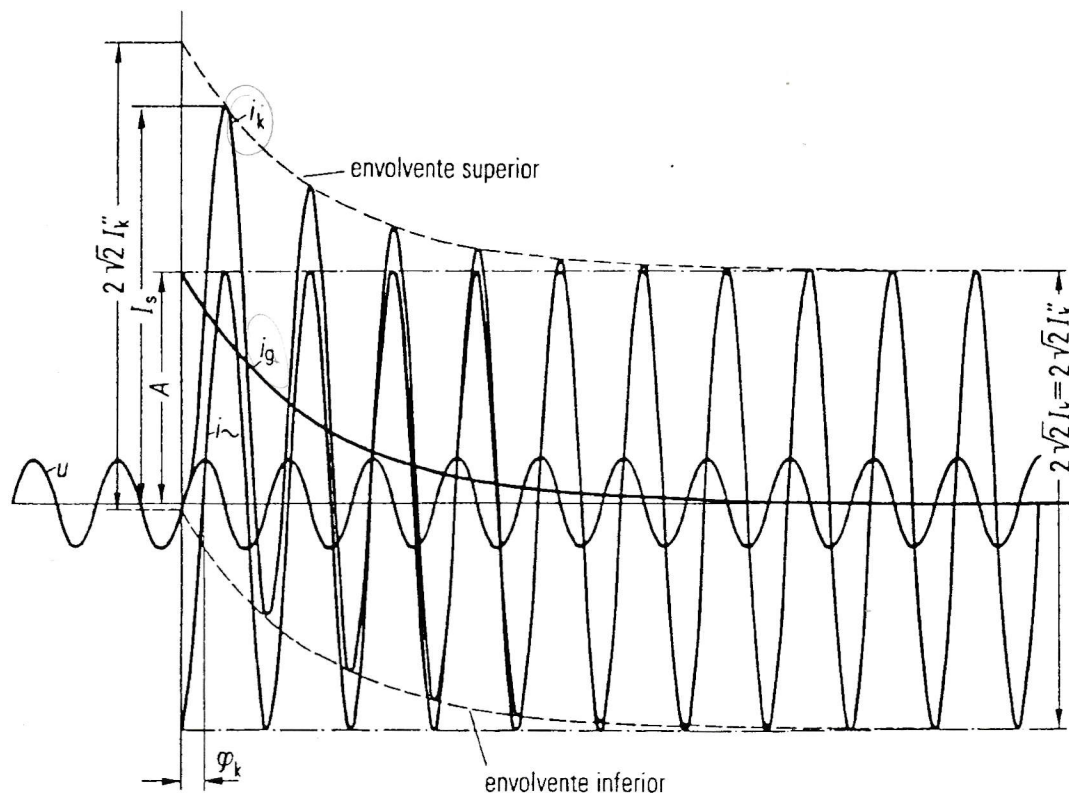
$$u_R = \sqrt{2} U_f \text{ sen } (wt)$$

$$u_S = \sqrt{2} U_f \text{ sen } \left( wt + \frac{4\pi}{3} \right)$$

$$u_T = \sqrt{2} U_f \text{ sen } \left( wt + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Consideremos que se produce un cortocircuito tripolar, en el instante en que en la fase R la tensión en valor instantáneo es nula, por tanto inicialmente la corriente de cortocircuito en dicha fase será nula, pasando después por una punta, corriente máxima asimétrica de cortocircuito  $I_s$  y se amortigua después hasta dar lugar a la corriente estacionaria simétrica de cortocircuito  $i$ . Esta corriente presenta un valor de cresta constante y su valor eficaz se denomina corriente permanente de cortocircuito. La asimetría y el valor de punta de la corriente de cortocircuito vendrá determinada por el instante en que se produzca el cortocircuito, considerado respecto a la variación temporal de la tensión y por la impedancia de cortocircuito de la red, que en el caso mas general presenta una componente inductiva

relativamente grande, frente a la componente óhmica y por tanto la corriente de cortocircuito estará retrasada en un ángulo muy considerable respecto a la tensión. Por lo tanto la corriente de cortocircuito debería adoptar bruscamente en el instante  $t = 0$  el valor instantáneo correspondiente a la corriente simétrica de cortocircuito. Pero como la inductancia impide que se produzca este salto, la corriente de cortocircuito empieza siendo realmente nula. Por ello tiene que existir una corriente transitoria  $i_g$  con un valor inicial  $A$  que coincida con el valor instantáneo negativo de la corriente simétrica de cortocircuito  $i$ . Esta corriente transitoria se denomina componente aperiódica y se amortigua, siendo una función exponencial con la constante de tiempo  $T_g$  desde el valor inicial hasta hacerse nula, cuya representación gráfica es:



- Figura 3.2 -

Por tanto la variación de la corriente de cortocircuito correspondiente a la fase R viene definida por la ecuación en general por:

$$i_{Rk} = i_s + i_g = \frac{\sqrt{2} U_f}{Z_t} \text{sen}(wt + \psi - \varphi_k) - \frac{\sqrt{2} U_f}{Z_t} \text{sen}(\psi - \varphi_k) e^{-\frac{t}{T_g}} \quad (3.3)$$

en donde:

- $i_s$  = Componente simétrica de cortocircuito.
- $i_g$  = Componente aperiódica.
- $I_k''$  = Corriente inicial simétrica de cortocircuito.
- $I_s$  = Corriente máxima asimétrica de cortocircuito.
- $A$  = Valor inicial de la componente aperiódica.
- $U$  = Valor eficaz de la tensión en V.

- $Z_t$  = Módulo de la impedancia de cortocircuito de la red en  $\Sigma$ .
- $w$  = Pulsación.
- $t$  = Tiempo en s.
- $P$  = Ángulo de fase inicial de la tensión al producirse el cortocircuito.
- $v_k$  = Ángulo de la impedancia de cortocircuito de la red (=  $\text{arc tg } X_k/R_k$ ).
- $T_g$  = Constante de tiempo de la componente aperiódica (=  $X_k/wR_k = L_k/R_k$ ).

Especialmente destacamos que para  $t = 0$  resulta que  $i_{Rk} = 0$  lo que implica que:

$$i_{\approx}(0) = -i_g(0) = \frac{\sqrt{2} U_f}{Z_t} \text{sen}(\psi - \varphi_k)$$

Las magnitudes  $Z_t$ ,  $v_k$  y  $T_g$  vendrán dadas por los parámetros  $R_k$  y  $X_k$  de la impedancia de cortocircuito de la red. El ángulo de fase inicial  $P$  depende del instante  $t_k$  en que se produzca el cortocircuito, es decir, de la casualidad.

Llamando a la relación entre la tensión y la impedancia total corriente inicial simétrica de cortocircuito tenemos:

$$I''_k = \frac{U_f}{Z_t} \quad (A) \quad (3.4)$$

por tanto las corrientes de cortocircuito en cada fase vendrán determinadas por:

$$i_{Rk} = \sqrt{2} I''_k \left[ \text{sen}(wt + \psi - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{T_g}} \text{sen}(\psi - \varphi_k) \right] \quad (3.5)$$

$$i_{Sk} = \sqrt{2} I''_k \left[ \text{sen}\left(wt + \psi + \frac{4\pi}{3} - \varphi_k\right) - e^{-\frac{t}{T_g}} \text{sen}\left(\psi + \frac{4\pi}{3} - \varphi_k\right) \right] \quad (3.6)$$

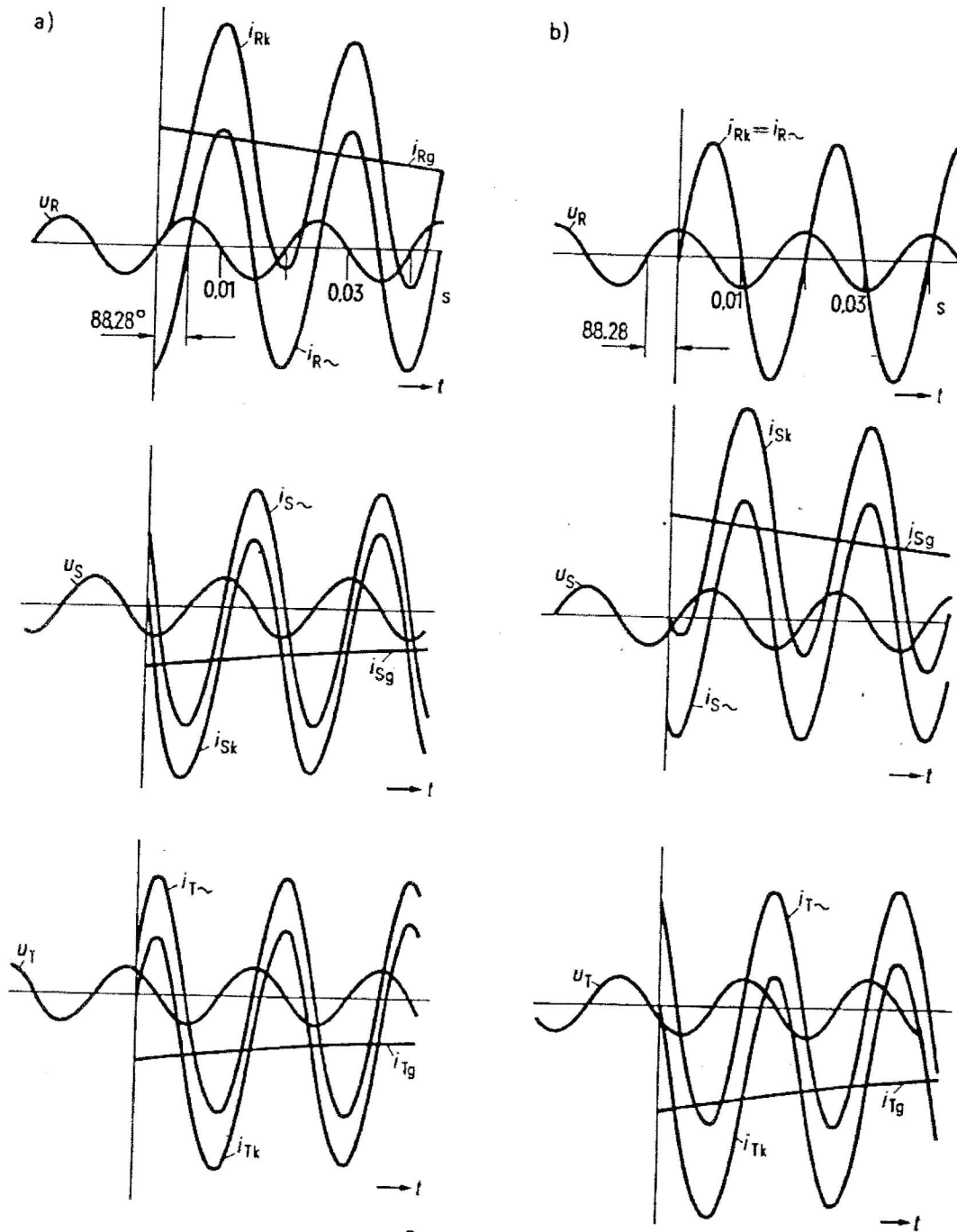
$$i_{Tk} = \sqrt{2} I''_k \left[ \text{sen}\left(wt + \psi + \frac{2\pi}{3} - \varphi_k\right) - e^{-\frac{t}{T_g}} \text{sen}\left(\psi + \frac{2\pi}{3} - \varphi_k\right) \right] \quad (3.7)$$

En la figura 3.3.a se representan las variaciones temporales de las tensiones y corrientes de cortocircuito para el caso de un cortocircuito tripolar que se ha producido cuando el valor instantáneo de la tensión en la fase R es nulo, es decir, con un ángulo de fase inicial cero ( $P = 0$ ). Se ha supuesto que la impedancia de cortocircuito es prácticamente inductiva, se ha tomado un valor de  $R_k/X_k = 0,03$  y  $T_g = 0,11$  s, por lo que las corrientes simétricas de cortocircuito son en el instante  $t = 0$ :

$$i_{S\approx} = i_{T\approx} = -0,5 i_{R\approx}$$

la misma relación se cumple para los valores iniciales de las componentes aperiódicas. Las corrientes de cortocircuito y las componentes aperiódicas que circulan por las fases son diferentes y dan lugar a valores eficaces distintos y variables en función del tiempo.

En la figura 3.3.b se ha representado las mismas funciones para el instante  $t = 0$  y que además se cumpla la condición de que  $\psi = \varphi_k$  en la fase R. Por lo que la corriente de cortocircuito  $i_R$  no presenta componente aperiódica y coincide por tanto con la corriente simétrica de cortocircuito. En las fases S y T están en oposición de fase en el instante inicial  $t = 0$  tanto los valores instantáneos de las corrientes simétricas de cortocircuito como de las componentes aperiódicas. En conclusión tenemos que las primeras puntas de corriente no alcanzan el máximo valor posible de la corriente máxima asimétrica de cortocircuito y en la práctica solo tienen interés los valores extremos, por lo que en el caso de un cortocircuito tripolar basta estudiar una sola fase.



$\frac{R_k}{X_k} = 0.03; T_g = 0.11s$   
 $t = 0; \psi = 0$  ——— en la fase R ———  $t = 0; \psi = \varphi_k$

- Figura 3.3 -

### **3.3 CORTOCIRCUITOS ALIMENTADOS POR GENERADORES SINCRÓNICOS.-**

El estudio de los cortocircuitos alimentados por generadores que supondremos sincrónicos por ser el caso más general, se puede estudiar bajo tres posibles supuestos de funcionamiento:

- 3.3.1 Cortocircuito en bornes del alternador funcionando en vacío.
- 3.3.2 Cortocircuito en bornes del alternador funcionando en carga.
- 3.3.3 Cortocircuito en una línea alimentada por un alternador.

Por tanto tenemos:

➤ **3.3.1 Cortocircuito en bornes del alternador funcionando en vacío.-**

Cuando la alimentación al punto de cortocircuito no es de potencia infinita, tiene influencia el comportamiento de la máquina que alimenta al cortocircuito, que supondremos generador sincrónico. Ello conduce a definir varios tipos de reactancias internas de los alternadores.

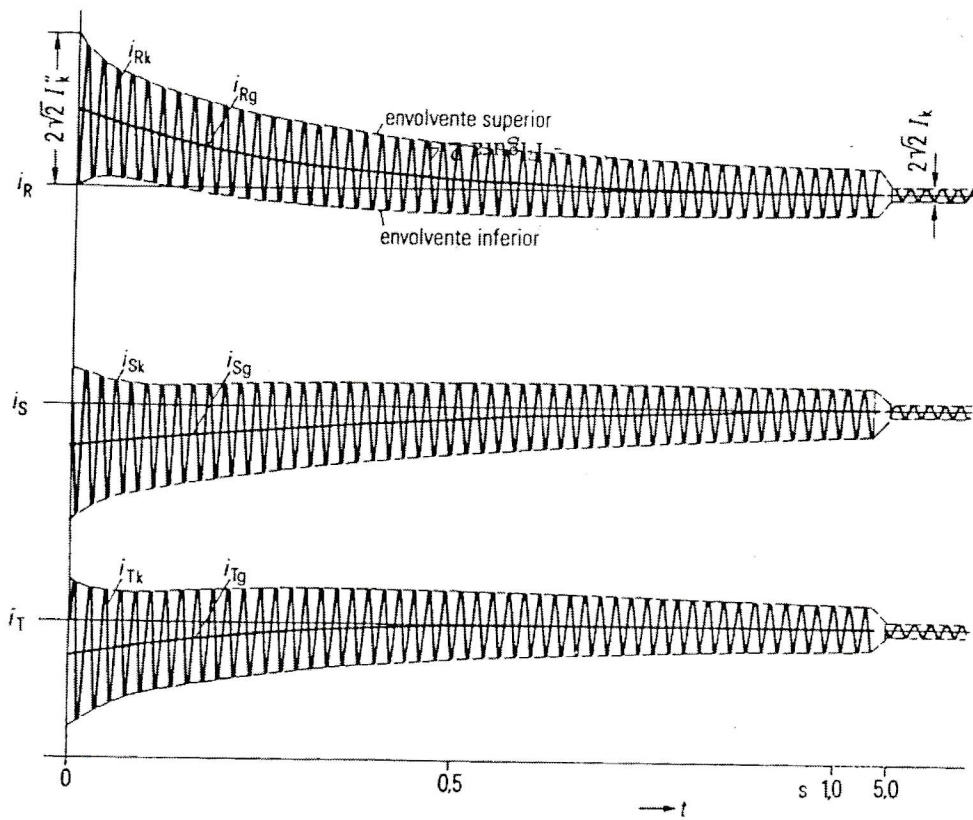
Si la impedancia interna del alternador fuese constante nada cambiaría, y la impedancia del mismo se agregaría a la de la línea y se operaría como en el apartado precedente. Sin embargo la reactancia interna de los alternadores no alcanza su valor permanente (reactancia sincrónica) más que transcurrido un cierto tiempo.

Sea un generador sincrónico, con devanado amortiguador en el que se produce en sus bornes un cortocircuito tripolar, supuesto este funcionando en vacío y que dicho cortocircuito se produce al pasar por cero la tensión en la fase R ( $u_{Rk} = 0$ ), las corrientes de cortocircuito en cada una de las tres fases  $i_{Rk}$ ,  $i_{Sk}$  y  $i_{Tk}$  siguen la variación temporal representada en la figura 2.4 en la que se ha representado tanto la variación para cada una de las fases, como ampliada la variación de la corriente en la fase R es decir la corriente de cortocircuito  $i_{Rk}$  y de sus componentes  $i_{-}$  e  $i_{g}$ .

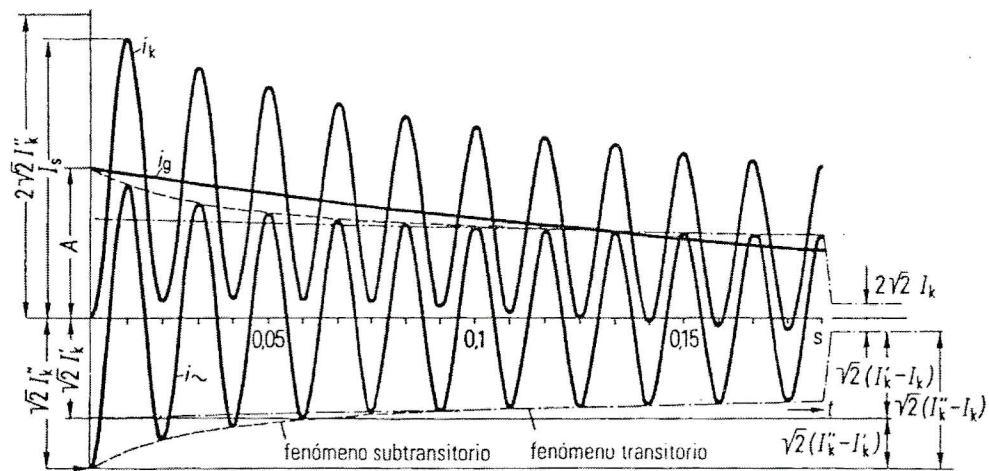
La corriente simétrica de cortocircuito puede dividirse con buena aproximación en tres partes claramente diferenciadas, que definen tres corrientes eficaces:

- Componente permanente.
- Componente transitoria.
- Componente subtransitoria.

Estas variaciones temporales de la corriente vienen condicionadas por los fenómenos electromagnéticos que se presentan en el alternador (reacción del inducido) y por su influencia sobre la f.e.m. Sin embargo para representar y calcular las relaciones de cortocircuito se considera en la práctica una tensión constante y se supone que el fenómeno de amortiguamiento de la corriente simétrica de cortocircuito viene provocada por el crecimiento de las reactancias del generador.



Variaciones temporales de las corrientes de cortocircuito correspondientes a un cortocircuito en bornes de un turbogenerador trifásico en caso de servicio en vacío con la velocidad y la tensión nominales (para  $t=0$  es  $u_R = 0$ )



Variaciones temporales de la corriente de cortocircuito  $i_k$  y de sus componentes  $i_g$  e  $i_{\sim}$  en la fase R

- Figura 3.4 -

De acuerdo con las componentes citadas para la corriente simétrica, las reactancias correspondientes se denominan:

- Reactancia sincrónica.
- Reactancia transitoria.
- Reactancia subtransitoria.

La componente permanente (corriente estacionaria simétrica de cortocircuito o corriente permanente de cortocircuito) tiene como expresión de su valor eficaz:

$$I_k = \frac{U_f}{X_d} = \frac{E}{X_d} \quad (A) \quad (3.8)$$

en donde:

- $U_f$  = Tensión de fase en vacío en V.
- $E$  = F.e.m. de fase en vacío en V.
- $X_d$  = Reactancia sincrónica, debida sobre todo a la reacción del inducido en  $\Sigma$ .

El valor eficaz de la corriente transitoria simétrica de cortocircuito es el cociente entre la f.e.m. y la reactancia transitoria:

$$I'_k = \frac{U_f}{X'_d} \quad (A) \quad (3.9)$$

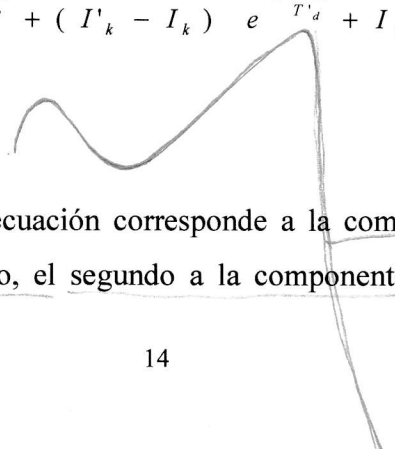
La reactancia para la componente transitoria es considerablemente menor que la correspondiente a la corriente permanente de cortocircuito ( $X'_d < X_d$ ). Al fenómeno transitorio se le superpone durante algunos períodos un subtransitorio. En los generadores sincrónicos con devanado amortiguador aparece en los circuitos rotóricos unos fenómenos de compensación entre los circuitos de amortiguación y los de excitación. Estos fenómenos provocan en el circuito estático, la componente subtransitoria de la corriente inicial simétrica de cortocircuito, cuyo valor inicial es igual a la amplitud máxima de la corriente inicial simétrica de cortocircuito  $2^{1/2} I''_k$  (\*)  $\sqrt{2} \cdot I_k$

El valor eficaz de la corriente subtransitoria simétrica de cortocircuito es el cociente entre la f.e.m. nominal o tensión en bornes en vacío entre fase y neutro supuesto como es normal, conectado el alternador en estrella y la reactancia subtransitoria ( $X''_d$ ).

$$I''_k = \frac{U_f}{X''_d} \quad (A) \quad (3.10)$$

En las máquinas sincrónicas de polos laminados sin devanado amortiguador no aparece el fenómeno subtransitorio, por lo que:  $I'_k = I''_k$ .

La variación temporal de la corriente de cortocircuito desde que se produce esta hasta que alcanza el estado estacionario puede expresarse por medio de la ecuación:

$$i_k = \sqrt{2} \left[ (I''_k - I'_k) e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_k - I_k) e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_k \right] \text{sen} (wt - \varphi_k) + \sqrt{2} I''_k e^{-\frac{t}{T''_d}} \text{sen} \varphi_k$$


→ El primer miembro de la ecuación corresponde a la componente subtransitoria de la corriente simétrica de cortocircuito, el segundo a la componente transitoria, el tercero a la

componente permanente y el último a la componente aperiódica. La pulsación  $\omega$  se mantiene aproximadamente constante en caso de estar trabajando el alternador en vacío. Se ha supuesto que el ángulo de fase inicial es nulo ( $\psi = 0$ ).

Como la resistencia del devanado estático en alternadores de gran potencia es mucho menor que la reactancia ( $R \ll X$ ) si despreciamos la resistencia, ello implica un valor del factor de potencia del cortocircuito de  $\phi_k = 90^\circ$  y la ecuación anterior se puede escribir bajo la forma:

$$i_k = \sqrt{2} E \left[ \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} + \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_{dk}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{1}{X_{dk}} \right] \cos \omega t + \sqrt{2} \frac{E}{X''_d} e^{-\frac{t}{T_s}}$$

Hemos determinado el valor de  $i_k$  desde que se inicia el cortocircuito, hasta que se establece la corriente de cortocircuito permanente. En la práctica se intenta cortar lo más rápidamente posible la corriente de cortocircuito mediante interruptores automáticos, así por ejemplo en las redes de A.T. el tiempo de corte oscila entre 0,06 y 0,2 segundos, en B.T. el tiempo de retardo suele ser de 0,01 a 0,03 segundos. Con los tiempos citados es posible que no se haya amortiguado todavía totalmente la componente aperiódica, en las normas VDE para aparatos de corte se distingue entre corriente asimétrica y simétrica de corte. El valor eficaz de la corriente asimétrica de corte resulta de la ecuación:

Asimétrica

$$I_k = \sqrt{\left[ (I''_k - I'_k) e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_k - I_k) e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_k \right]^2 + 2 (I''_k e^{-\frac{t}{T_s}})^2} \quad (3.11)$$

El miembro entre corchetes describe la variación temporal del valor eficaz de la componente simétrica y el segundo miembro la dependencia temporal de la componente aperiódica.

Para el valor eficaz de la corriente simétrica de corte se tiene:

$$I_a = (I''_k - I'_k) e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_k - I_k) e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_k \quad (3.12)$$

En el caso de un cortocircuito alejado del alternador se acepta que:

$$I''_k = I'_k = I_k$$

en este caso las ecuaciones 3.11 y 3.12 adoptan la siguiente forma:

$$I_u = \sqrt{\left[ (I''_k)^2 + 2 (I'_k e^{-\frac{t}{T''_d}})^2 \right]} \quad I_a = I_k \quad (3.13)$$

### ➤ 3.3.2 Cortocircuito en bornes del alternador funcionando en carga.-

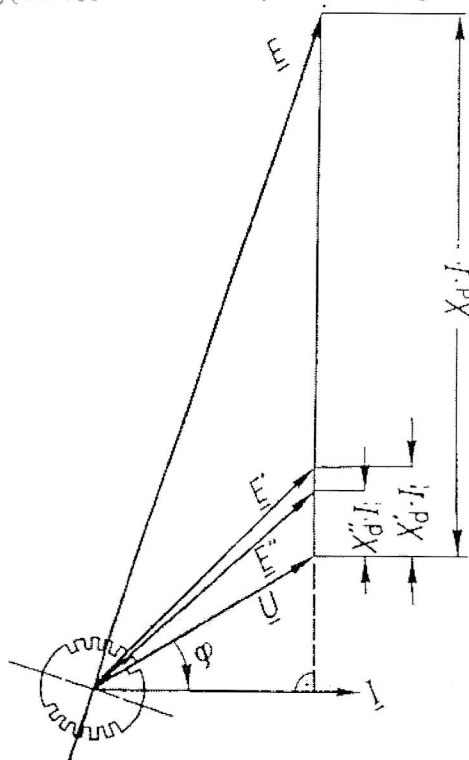
Funcionando un generador a tensión nominal, potencia nominal y factor de potencia nominal, la f.e.m. del generador es mayor que la tensión en bornes debida a la caída de tensión.

En concordancia con la reactancia subtransitoria, transitoria y sincrónica se distingue entre la f.e.m. subtransitoria  $E''$ , f.e.m. transitoria  $E'$  y f.e.m. sincrónica  $E$ . Mientras que para los cortocircuitos en bornes en vacío resulta  $U_f = E'' = E' = E$  si el generador está en carga debe tenerse también en cuenta el estado previo de carga.

Así tenemos las siguientes ecuaciones y su diagrama vectorial:

$$\vec{E}'' = \vec{U}_f + j \vec{X}''_d I \quad \vec{E}' = \vec{U}_f + j X'_d I \quad \vec{E} = \vec{U}_f + j X_d I$$

*Subtransitoria                      transitoria                      sincrónica*



- Figura 3.5 -

siendo  $I$  la corriente suministrada por el alternador y supuesto este conectado en estrella.

En rigor el diagrama es estrictamente válido para turboalternadores, tratándose de alternadores de polos salientes, es preciso distinguir entre reactancias longitudinales y transversales (longitudinales las dibujadas) que dependen de la naturaleza de la corriente  $I$ . No obstante en el cálculo de las corrientes de cortocircuito de alternadores de polos salientes se puede emplear el diagrama vectorial anterior sin que sean excesivos los errores resultantes, por lo que en la práctica es usual emplearlo tanto para los alternadores lentos como en los turboalternadores.

Si la máquina presenta carga nominal y factor de potencia 0,8 inductivo, resultan los siguientes valores para las fuerzas electromotrices subtransitoria, transitoria y sincrónica:

**- Turboalternadores:**

*Subtransitoria* →  $E'' = 1,05 \div 1,23 U_f$

*transitoria* →  $E' = 1,08 \div 1,36 U_f$

*sincrónica* →  $E = 1,97 \div 3,24 U_f$

**- Alternadores de polos salientes:**

$E'' = 1,09 \div 1,28 U_f$

$E' = 1,13 \div 1,4 U_f$

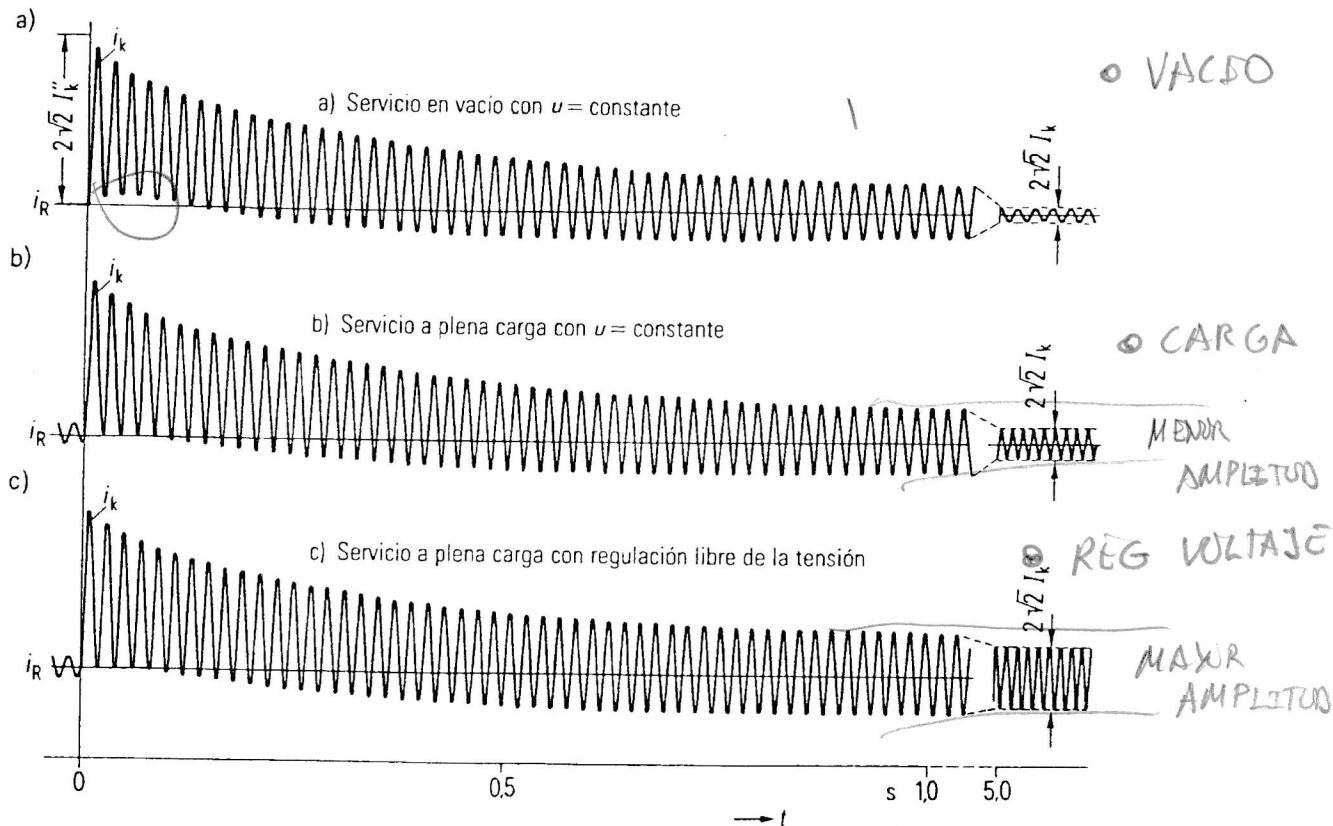
$E = 1,6 \div 2,44 U_f$

$$E = 1,97 \div 3,2 U_f$$

$$E = 1,6 \div 2,44 U_f$$

los valores inferiores corresponden a alternadores refrigerados por aire y los superiores a los refrigerados por agua.

En la figura siguiente se observa la variación temporal de la corriente de cortocircuito  $i_{Rk}$  para tres tipos de servicio.



- Figura 3.6 -

La curva a) corresponde al funcionamiento en vacío y ya la hemos estudiado. La curva b) representa la corriente de cortocircuito funcionando a plena carga con tensión de excitación constante, comparando la corriente de cortocircuito en estas condiciones es mayor que en vacío puesto que  $E''$  supera el valor de la tensión en bornes del alternador, la corriente de cortocircuito permanente es también mayor debido a la mayor tensión constante de excitación. Como en cortocircuito no hay potencia cedida a la red el alternador se acelera, porque la potencia motriz de la turbina de accionamiento no puede reducirse instantáneamente hasta el valor correspondiente al funcionamiento en vacío. Por ello la velocidad aumenta hasta un 110% de la nominal y después disminuye hasta un valor próximo al nominal. este fenómeno puede durar varios segundos hasta llegar al estado estacionario, por ello en la práctica los dispositivos de protección provocan la desexcitación del alternador.

La curva c) una vez transcurridos unos 0,25 segundos el fenómeno de amortiguamiento está menos marcado, que en el caso anterior ya que la regulación automática puede aumentar la

tensión de excitación hasta su límite superior y por tanto la corriente de cortocircuito permanente es de mayor valor.

➤ **3.3.3 Cortocircuito en una línea alimentada por un alternador.-**

Los cortocircuitos en bornes de los alternadores son relativamente raros, en la mayoría de los casos estos se producen en la propia red y por tanto es preciso considerar la impedancia de la red, de tal suerte que la impedancia de cortocircuito es la suma vectorial de la impedancia del alternador y la de la red, esto origina que las corrientes de cortocircuito sean menores y se cumplen con suficiente aproximación a partir de las ecuaciones (3.8 ) (3.9) y (3.10) que las corrientes de cortocircuito tienen por valor:

$$I''_k = \frac{E''}{Z''_k} = \frac{E''}{\sqrt{(R_g + R_l)^2 + (X''_d + X_l)^2}} \quad (A) \quad (3.14)$$

$$I'_k = \frac{E'}{Z'_k} = \frac{E'}{\sqrt{(R_g + R_l)^2 + (X'_d + X_l)^2}} \quad (A) \quad (3.15)$$

$$I_k = \frac{E}{Z'_k} = \frac{E}{\sqrt{(R_g + R_l)^2 + (X_d + X_l)^2}} \quad (A) \quad (3.16)$$

De estas ecuaciones se deduce que las tres corrientes de cortocircuito presentan diferencias cada vez menores al aumentar la impedancia de la red y que se aproxima a la corriente estacionaria simétrica de cortocircuito en caso de producirse el cortocircuito alejado del alternador.

### 3.4 COMPORTAMIENTO EN CORTOCIRCUITO DE LOS MOTORES.-

Cuando se produce un cortocircuito, es muy posible que existan conectadas a las barras en las que se ha producido el mismo, una serie de motores que van a incidir también sobre la corriente de cortocircuito por lo que cabe distinguir:

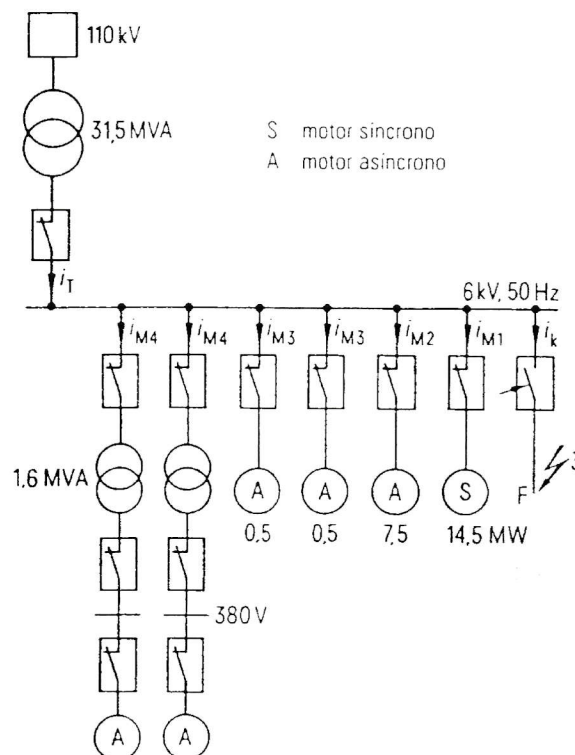
#### ➤ 3.4.1 Motores y compensadores sincrónicos.-

Si la duración del cortocircuito es inferior a 0,2 segundos ( $t \leq 0,2$  s), los motores y compensadores sincrónicos pueden tratarse con suficiente precisión como generadores sincrónicos. Si la duración del cortocircuito es mayor, la caída de velocidad debido al par antagonista de frenado provoca que las máquinas sincrónicas pasen a funcionar de forma asincrónica, por lo que en general se desconectan antes de que transcurran los 0,2 segundos desde el instante en que se ha producido el cortocircuito.

#### ➤ 3.4.2 Motores asincrónicos.-

Los motores asincrónicos de alta y baja tensión contribuyen también a la corriente de cortocircuito. Como estas máquinas no poseen devanado de excitación las corrientes de cortocircuito se amortiguan muy rápidamente, al contrario de lo que ocurre con las máquinas sincrónicas.

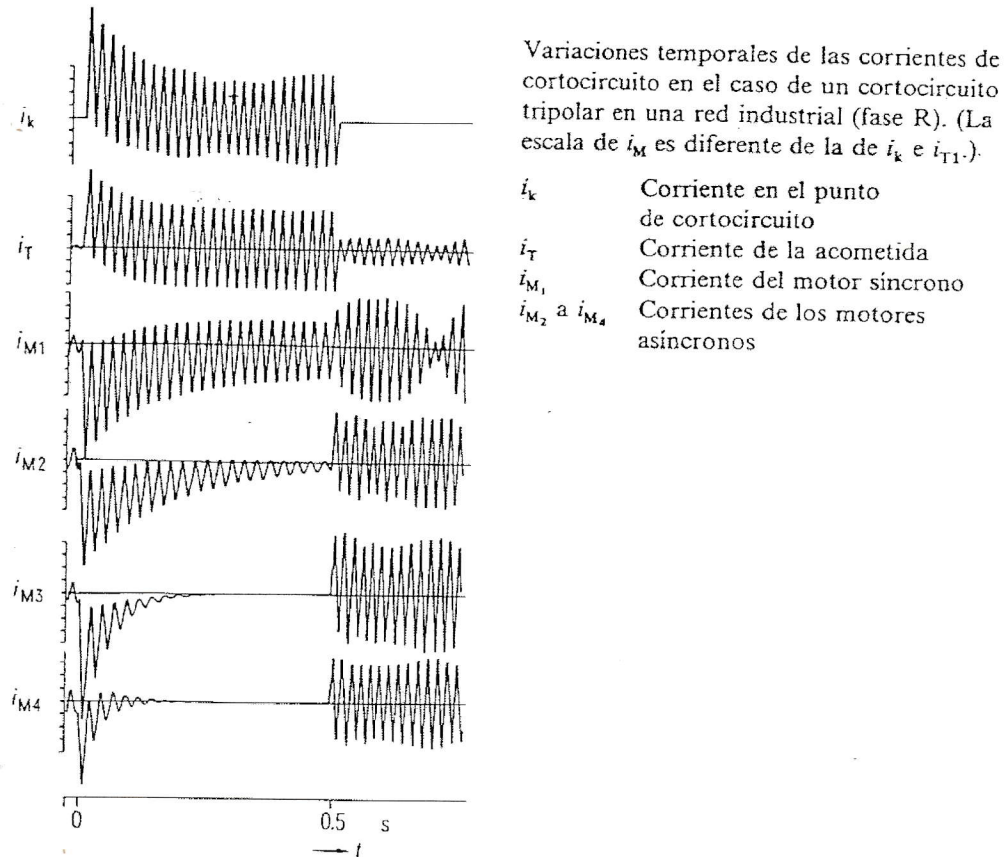
Como ejemplo ilustrativo de todo esto tenemos el siguiente circuito eléctrico en el que se ha producido un cortocircuito tripolar en barras



- Figura 3.7 -

La corriente de cortocircuito en el punto F se compone de las siguientes corrientes parciales:  $i_T$  acometida,  $i_{M1}$  del motor sincrónico,  $i_{M2}$  e  $i_{M3}$  de los motores asincrónicos de A.T.

e  $i_{M4}$  de los motores asincrónicos de B.T. La corriente de cortocircuito se amortigua regularmente unos 0,3 segundos después de haberse producido el cortocircuito, pasando a continuación a presentar una modulación, debido al funcionamiento sincrónico de los motores respecto de la red. Una vez se ha eliminado la anomalía,  $i_T$  sufre variaciones debido a la nueva conexión de los motores, hasta que se establece el régimen de funcionamiento normal.



- Figura 3.8 -

Resulta difícil determinar el número de motores que en un momento determinado contribuyen a aumentar la corriente de cortocircuito, por ello es habitual comparar el conjunto de los motores a un generador único que aporta al conjunto de las barras una intensidad igual a 3 veces la suma de las intensidades nominales de todos los motores instalados. En todo caso la contribución de los motores asincrónicos a la corriente de cortocircuito  $I''_k$  no se considera si:

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I''_k$$

siendo:

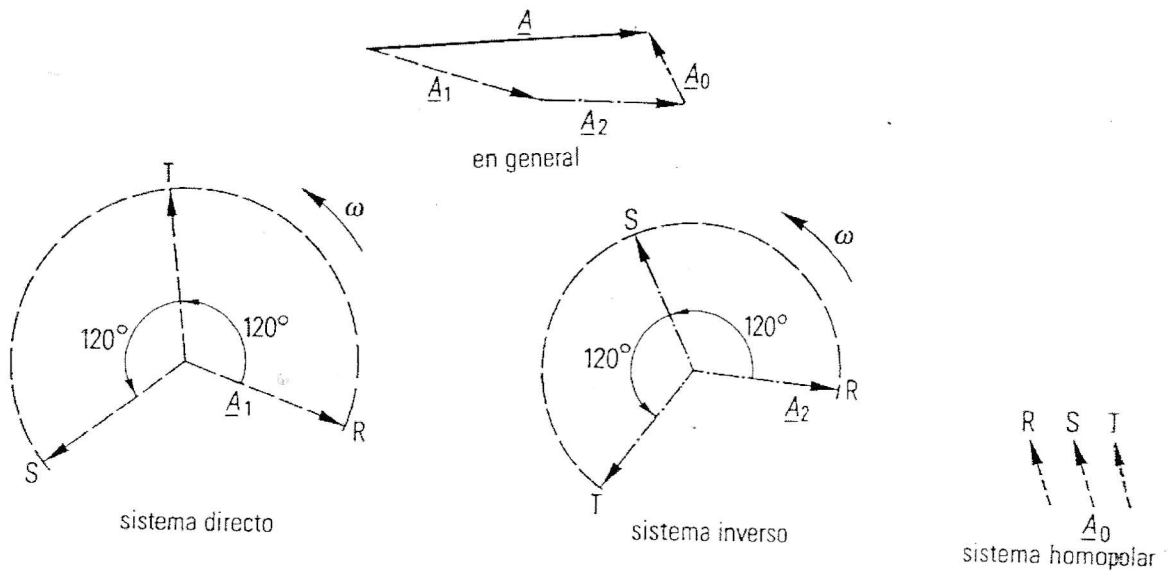
- $E I_{rM}$  = Suma de las corrientes asignadas de los motores conectados directamente, sin intermedio de transformadores, a la red donde se produce el cortocircuito.
- $I''_k$  = Corriente de cortocircuito simétrica inicial sin la contribución de los motores.

**3. 5 ESTUDIO DE LOS DISTINTOS TIPOS DE CORTOCIRCUITOS.-**

Para abordar el estudio de los distintos tipos de cortocircuitos es preciso conocer la teoría general de componentes simétricos, basada en el teorema de Stokvis y aplicado a los sistemas eléctricos por primera vez por el ingeniero norteamericano Fortescue, de aquí el nombre de Stokvis-Fortescue.

Este teorema permite estudiar los cortocircuitos equivalentes a cargas asimétricas de tal suerte que un vector  $\underline{A}$  cualquiera, puede considerarse como la resultante de tres vectores componentes  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_0$  dispuestos uno a continuación del otro de forma arbitraria.

Si complementamos como en la figura 3.9 las componentes del vector  $A_1$  hasta formar un sistema trifásico simétrico de secuencia directa R, S, T. La componente del vector  $A_2$  hasta formar un sistema trifásico simétrico de secuencia inversa y para ello o bien permutamos dos fases manteniendo el mismo sentido de giro o bien mantenemos las componentes e invertimos el sentido de giro y la componente  $A_0$  hasta formar un sistema trifásico homopolar, resulta posible representar cualquier sistema trifásico asimétrico, empleando estos tres sistemas de componentes.



- Figura 3.9 -

Se verifican por tanto las relaciones:

$$\vec{A}_R = \vec{A}_{1R} + \vec{A}_{2R} + \vec{A}_0 \quad (3.17)$$

$$\vec{A}_S = \vec{A}_{1S} + \vec{A}_{2S} + \vec{A}_0 = a^2 \vec{A}_{1R} + a \vec{A}_{2R} + \vec{A}_0 \quad (3.18)$$

$$\vec{A}_T = \vec{A}_{1T} + \vec{A}_{2T} + \vec{A}_0 = a \vec{A}_{1R} + a^2 \vec{A}_{2R} + \vec{A}_0 \quad (3.19)$$

El operador "a" equivale a un giro de +120° y el operador "a<sup>2</sup>" equivale a un giro del vector en +240° en sentido antihorario tomado como positivo, por lo que:

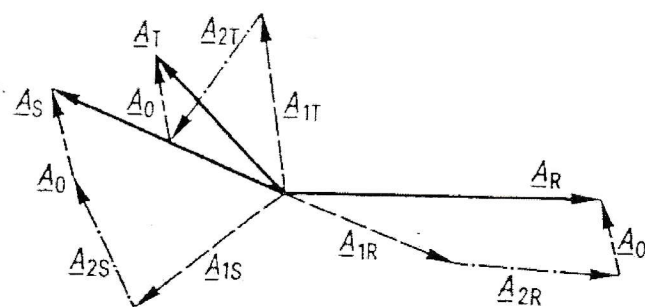
$$a = -0,5 + j 0,87 \quad a^2 = -0,5 - j 0,87 \quad (3.20)$$

120°                      240°

hay que tener en cuenta además que:

$$1 + a = -a^2 = 0,5 + j 0,87 \quad (3.21)$$

Según la magnitud y la posición relativa de las componentes simétricas, los vectores resultantes  $A_R$ ,  $A_S$  y  $A_T$  pueden tener cualquier módulo y ángulo de fase. En efecto con las componentes de los sistemas directo, inverso y homopolar representadas en la figura anterior el sistema trifásico asimétrico resultante de la suma vectorial de cada una de las componentes de cada fase es:



Suma vectorial de las componentes simétricas para obtener el sistema trifásico asimétrico

- Figura 3.10 -

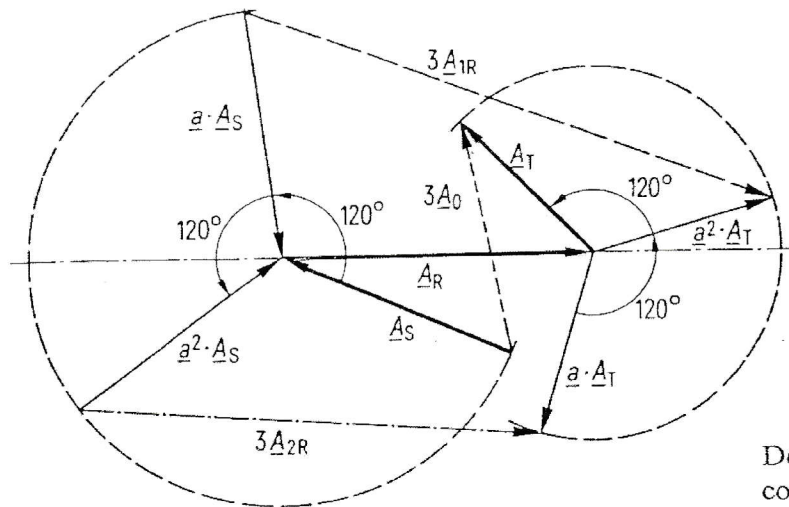
Recíprocamente, también resulta posible determinar las componentes directa, inversa y homopolar correspondientes a un sistema trifásico asimétrico dado. Para esta operación se emplean las siguientes relaciones:

$$\vec{A}_{1R} = \frac{1}{3} \left[ \vec{A}_R + a \vec{A}_S + a^2 \vec{A}_T \right] \quad (3.22)$$

$$\vec{A}_{2R} = \frac{1}{3} \left[ \vec{A}_R + a^2 \vec{A}_S + a \vec{A}_T \right] \quad (3.23)$$

$$\vec{A}_0 = \frac{1}{3} \left[ \vec{A}_R + \vec{A}_S + \vec{A}_T \right] \quad (3.24)$$

Operando gráficamente sobre el sistema trifásico asimétrico representado en la figura 3.10 podemos determinar las componentes de los sistemas trifásicos simétricos de secuencia directa, inversa y homopolar, comprobando que se verifican las ecuaciones anteriores



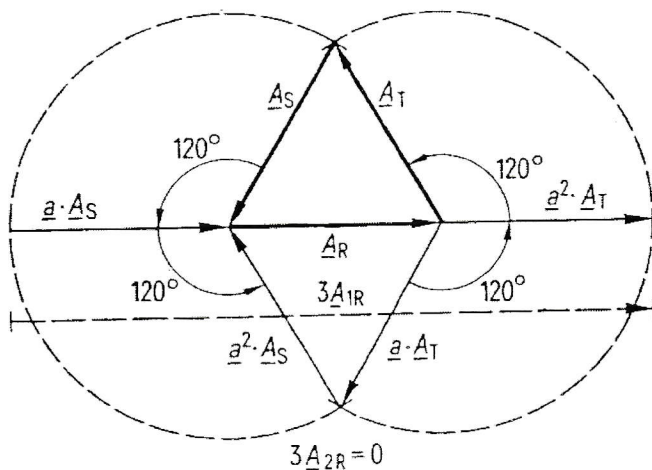
Determinación gráfica de las componentes

- Figura 3.11 -

A tener en cuenta que la componente homopolar  $A_0$ , aparece únicamente cuando los vectores  $A_R$ ,  $A_S$  y  $A_T$  no cierran un triángulo. Por tanto la existencia de una componente homopolar significa que las tres fases no presentan una carga simétrica respecto a tierra.

La componente  $A_{2R}$  aparece en general, cuando  $A_R$ ,  $A_S$  y  $A_T$  no son iguales entre si.

En efecto si los tres vectores representan un sistema trifásico equilibrado, su representación gráfica es un triángulo equilátero y se siguen en sentido antihorario, las componentes  $A_2$  y  $A_0$  son nulas. En este caso existe solo el sistema directo, representado por la resultante  $3 A_{1R}$  según la figura siguiente:



Carga simétrica

- Figura 3.12 -

El método brevemente descrito permite descomponer cualquier sistema trifásico asimétrico en tres sistemas de componentes simétricas. En consecuencia basta efectuar los cálculos para una fase solamente. Para las corrientes de un sistema trifásico se cumple por tanto a partir de las ecuaciones 3.17, 3.18 y 3.19:

$$\vec{I}_R = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_0 \quad \vec{I}_S = a^2 \vec{I}_1 + a \vec{I}_2 + \vec{I}_0 \quad \vec{I}_T = a \vec{I}_1 + a^2 \vec{I}_2 + \vec{I}_0 \quad (3.25)$$

o también a partir de las ecuaciones 2.21, 2.22 y 2.23 tenemos:

$$\vec{I}_1 = \frac{1}{3} [\vec{I}_R + a \vec{I}_S + a^2 \vec{I}_T] \quad (3.26)$$

$$\vec{I}_2 = \frac{1}{3} [\vec{I}_R + a^2 \vec{I}_S + a \vec{I}_T] \quad (3.27)$$

$$\vec{I}_0 = \frac{1}{3} [\vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T] \quad (3.28)$$

Para las tensiones de un sistema trifásico a partir de las mismas ecuaciones resulta:

$$\vec{U}_R = \vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \vec{U}_0 \quad \vec{U}_S = a^2 \vec{U}_1 + a \vec{U}_2 + \vec{U}_0 \quad \vec{U}_T = a \vec{U}_1 + a^2 \vec{U}_2 + \vec{U}_0 \quad (3.29)$$

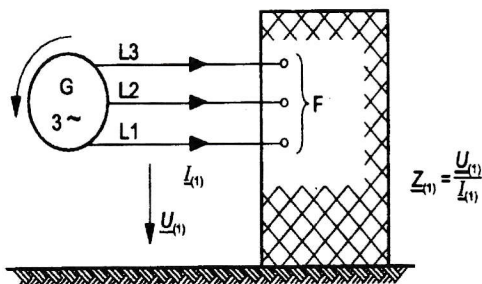
$$\vec{U}_1 = \frac{1}{3} [\vec{U}_R + a \vec{U}_S + a^2 \vec{U}_T] \quad (3.30)$$

$$\vec{U}_2 = \frac{1}{3} [\vec{U}_R + a^2 \vec{U}_S + a \vec{U}_T] \quad (3.31)$$

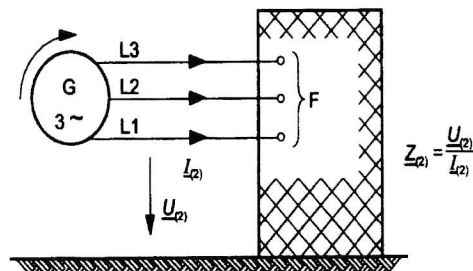
$$\vec{U}_0 = \frac{1}{3} [\vec{U}_R + \vec{U}_S + \vec{U}_T] \quad (3.32)$$

Las componentes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_0$  de la corriente o  $U_1$ ,  $U_2$  y  $U_0$  de la tensión se refieren siempre a la fase R. Esta fase de referencia no se indica con ningún subíndice.

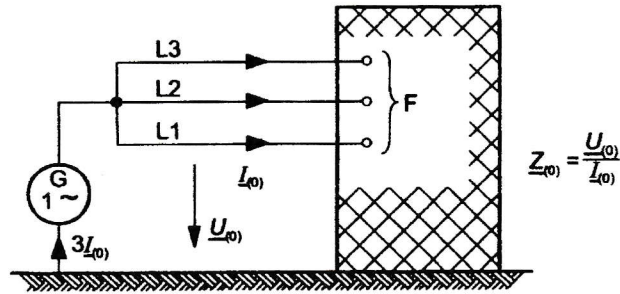
Las impedancias relacionadas con cada uno de los sistemas de componentes se designan de forma análoga a la de estos sistemas, con los nombres de impedancia directa, inversa y homopolar. En la figura 3.13 se representan los esquemas de conexión para la medida y determinación de las impedancias correspondientes a los tres sistemas: para los sistemas directo e inverso se emplean fuentes de tensión trifásicas simétricas, para el sistema homopolar se utiliza una fuente de tensión monofásica.



a) Secuencia directa.



b) Secuencia inversa



c) Secuencia homopolar

- Figura 3.13 -

Estudiamos con más profundidad estas impedancias, resulta:

**a) Impedancia directa  $Z_1$ .**

De un aparato o componente eléctrico es el cociente de la tensión simple y de la corriente de fase en el caso de estar alimentado mediante un sistema simétrico directo. Corresponde a la impedancia de servicio de las líneas, o las impedancias de cortocircuito de los transformadores y bobinas, y a la impedancia que aparece en los generadores en el instante en que se produce el cortocircuito.

**b) Impedancia inversa  $Z_2$ .**

De un aparato o componente eléctrico es el cociente entre la tensión simple y de la corriente de fase en el caso de estar alimentado con un sistema simétrico inverso. En las líneas, transformadores y en las bobinas coincide con la impedancia directa, en el caso de los generadores la impedancia inversa es la que aparece cuando se le somete a un sistema inverso de tensiones durante su marcha sincrónica. Este sistema tiene en el estator una velocidad relativa doble respecto al rotor, mientras que el sistema directo presenta una velocidad relativa nula respecto al rotor.

- En los turbogeneradores la impedancia inversa coincide prácticamente con la impedancia directa que aparece en el instante en que se produce el cortocircuito (reactancia inicial). En los generadores de polos salientes con o sin devanado amortiguador es mayor que la reactancia inicial. En las máquinas asincrónicas es prácticamente igual a la reactancia de cortocircuito correspondiente por tanto a la velocidad nula.

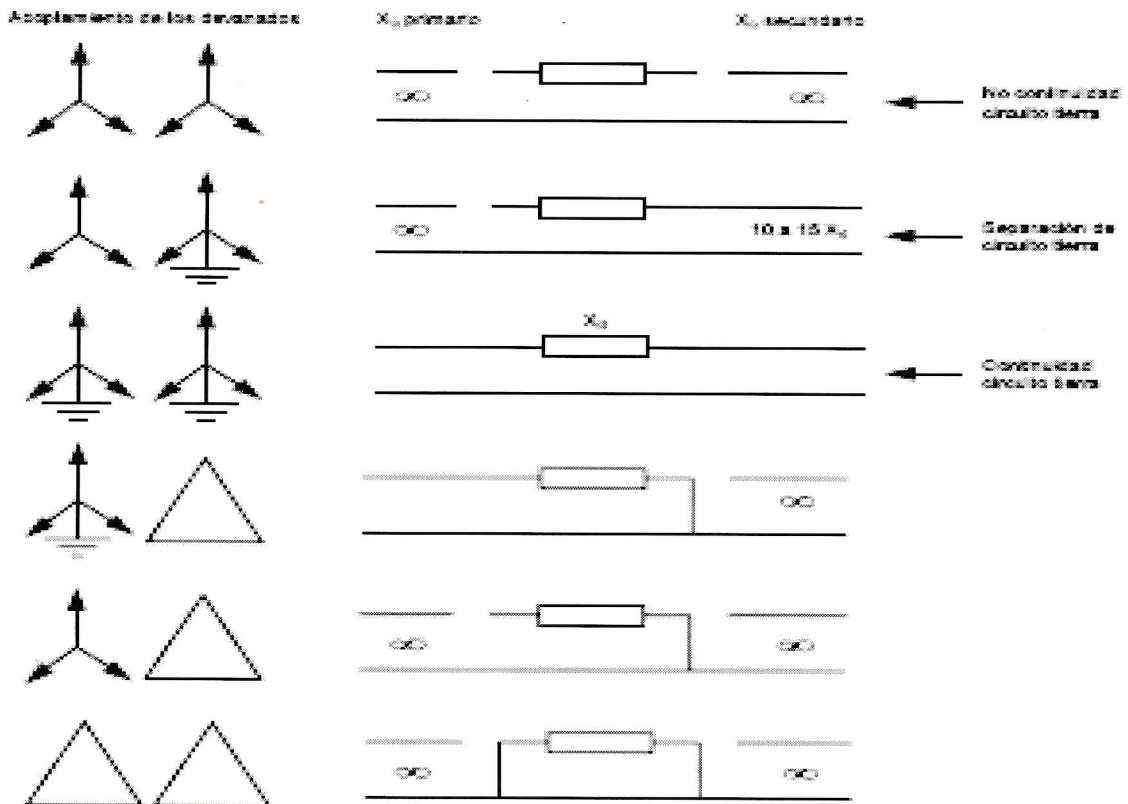
**c) Impedancia homopolar  $Z_0$ .**

De un componente o aparato eléctrico para corriente trifásica es el cociente entre la tensión de fase y neutro y de la corriente de fase en el caso de que la alimentación sea una fuente de tensión monofásica, si los tres conductores principales dispuestos en paralelo constituyen el camino de ida de la corriente y existe un cierto conductor que actúa como retorno común, por dicho retorno común (sistema de puesta a tierra, conductor neutro, hilo de tierra, cubierta o armadura del cable) circula una corriente

$3I_0 =$

tres veces mayor que la homopolar. La impedancia homopolar de un aparato o componente se refiere siempre a la conexión en estrella, por ejemplo si se trata de devanados. A las conexiones en triángulo no puede asignárseles impedancias homopolares.

La impedancia homopolar de un generador es generalmente mucho menor que la reactancia inicial. En los transformadores depende de su grupo de conexión y del tipo de núcleo magnético del mismo. Así tenemos:



La impedancia homopolar de las líneas es función de su tipo (líneas aéreas o cables) de su estructura (hilos de tierra o cubiertas metálicas y blindajes) y de las características del retorno por tierra, que depende de la conductividad del terreno.

Escapa al propósito de estos apuntes la determinación de las impedancias homopolares de transformadores, líneas, etc, remitimos al lector a los libros específicos que tratan estos temas. Por último decir que en el caso de cables enterrados la determinación de la impedancia homopolar de los mismos es por medio de ensayos, puesto que no existen fórmulas empíricas que determinen la impedancia homopolar de ellos.

De todos modos a título orientativo indicamos las impedancias de los elementos más comunes empleados en las instalaciones eléctricas:

## Impedancias típicas de un transformador

Visto del lado BT	R	Xd	Xi	Xo
Sin neutro	$\frac{P_{cu}}{3} \cdot I^2$	$\sqrt{Z_{cc}^2 - R^2} \cong Z_{cc}$ $Z_{cc} = U_{cc} \frac{U^2}{S_n}$	$X_d$ ( $X_i = X_d$ )	&
Yyn o Zyn (flujo libre) → → banco trifásico de 3 transformadores monofásicos (centrales)				&
Yyn o Zyn (flujo forzado)				10 a 15 Xd
Dyn o YNyn				Xd
-- zn (zig-zag)				0,1 a 0,2 Xd

## Impedancias típicas de un turbo-alternador

	R	Xd	Xi	Xo
Subtransitorio	$\ll X$ R despreciable	$X_{d'} = 10$ a 20%	10 a 20%	5 a 10%
Transitorio		$X_d = 15$ a 25%		
síncrono (permanente)		$X_d = 150$ a 250%		

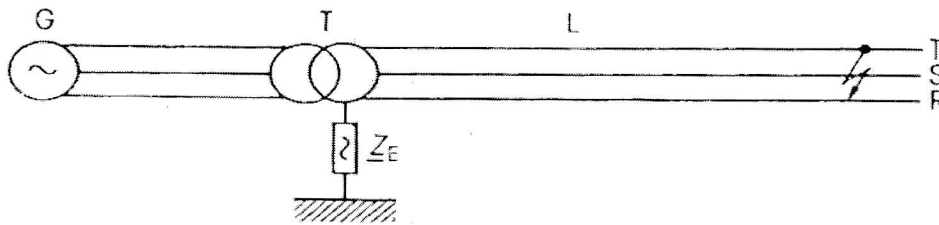
## Impedancias típicas de líneas aéreas (cables desnudos)

	R	Xd	Xi	Xo
MT o AT	$R = \rho \frac{L}{s}$	0,4 $\Omega$ /km	$X_i = X_d$	$X_o \cong 3 \cdot X_d$
BT		0,3 $\Omega$ /km		

## Impedancias típicas de cables aislados

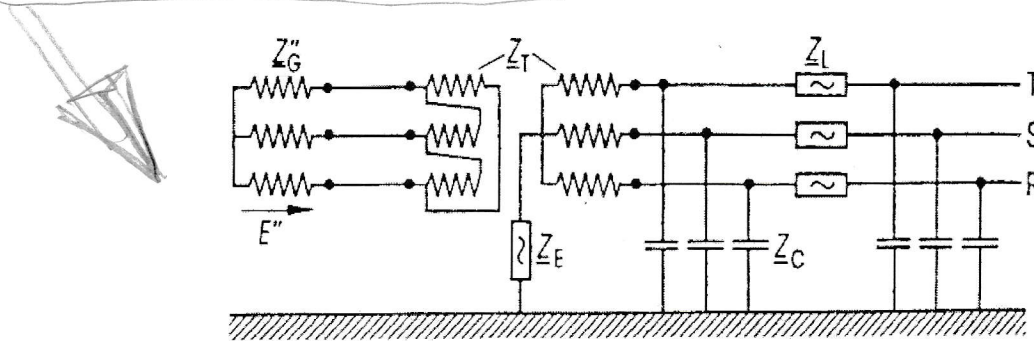
	R	Xd	Xi	Xo
Monofásico	$R = \rho \frac{L}{s}$	0,1 a 0,2 $\Omega$ /km	$X_i = X_d$	$X_o > 3 \cdot X_d$
Trifásico MT o AT		0,1 a 0,15 $\Omega$ /km		
Trifásico BT		0,08 $\Omega$ /km		

Efectuado el preámbulo del estudio de los cortocircuitos reseñamos que el estudio de los mismos lo efectuaremos sobre una red sencilla que consta de un generador G, un transformador T y una línea l, supuesta esta abierta en su extremo y por tanto tenemos el siguiente esquema:



- Figura 3.14 -

que se corresponde con el siguiente circuito equivalente:



- Figura 3.15 -

en el que tenemos:

- $Z_G$  = Impedancia de cortocircuito del generador en  $\Omega$ .
- $Z_T$  = Impedancia de cortocircuito del transformador en  $\Omega$ .
- $Z_l$  = Impedancia de la línea en  $\Omega$ .
- $Z_C$  = Impedancia debida a la capacidad de las fases respecto a tierra en  $\Omega$ .
- $Z_E$  = Impedancia de puesta a tierra del punto neutro del transformador en  $\Omega$ .

La impedancia de puesta a tierra  $Z_E$  es común para las tres fases o ramas, por ello en el esquema equivalente debe considerarse un valor triple para una sola fase.

La tensión generada en el generador sincrónico trifásico presenta una f.e.m. cuya secuencia es la misma que el sistema directo. Por ello la f.e.m. de los generadores solo puede aparecer en el sistema directo, tanto si se trata de cortocircuitos simétricos como asimétricos.

Por el contrario los sistemas inverso y homopolar no presentan fuerzas electromotrices, se cumple por tanto que:

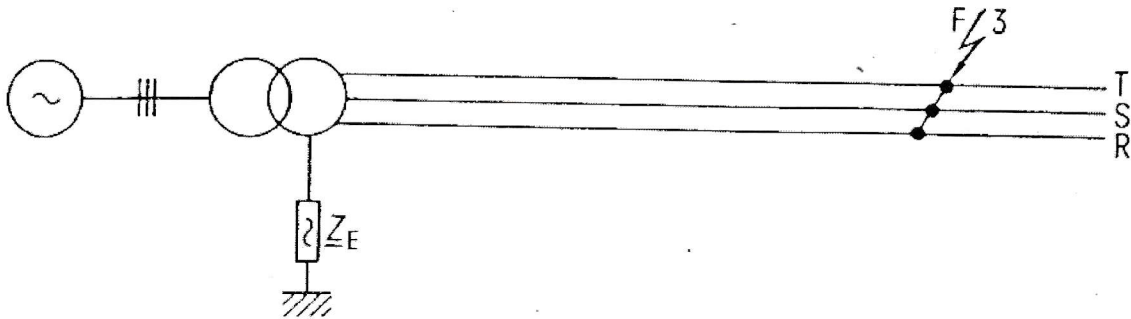
$$\rightarrow \boxed{E''_1 = E \quad E''_2 = 0 \quad E''_0 = 0} \quad (3.33)$$

A partir de este circuito simple estudiaremos el funcionamiento bajo los supuestos:

- Cortocircuito tripolar.
- Cortocircuito bipolar sin contacto a tierra.
- Cortocircuito bipolar con contacto a tierra.
- Cortocircuito unipolar a tierra.
- Doble contacto a tierra.

**3.6 CORTOCIRCUITO TRIPOLAR.-**

Sea un sistema eléctrico según el esquema adjunto en el que se ha producido un cortocircuito tripolar:



- Figura 3.16 -

Por simplicidad en el estudio de la corriente de cortocircuito, tanto para este cortocircuito como para los posteriores en las impedancias  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_0$  suponemos englobadas las impedancias directa, inversa y homopolar del generador, transformador, líneas y toma de tierra referidas al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito.

El cortocircuito tripolar representa una carga simétrica. Por tanto las tensiones de las tres fases en el punto del cortocircuito son nulas, tenemos por tanto:

$$\vec{U}_R = \vec{U}_S = \vec{U}_T = 0 \quad (3.34)$$

A partir de las ecuaciones 3.29 a 3.31 podemos determinar los valores de las componentes de las tensiones, tomando a la fase R como fase de referencia, es por lo que tenemos:

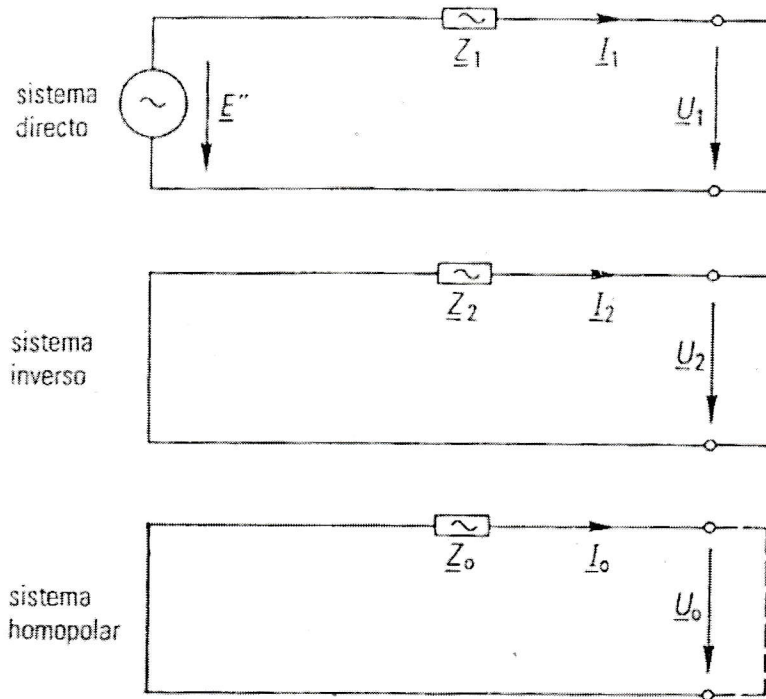
$$\vec{U}_1 = 0 \quad \vec{U}_2 = 0 \quad \vec{U}_0 = 0 \quad (3.35)$$

Por tanto el esquema equivalente, que representa el cortocircuito tripolar, con la tensión aplicada  $E''$  correspondiente a la combinación de las redes monofásicas será el reseñado en la figura 2.17 de donde se cumplen las siguientes relaciones:

$$\bullet \text{ - Sistema directo: } \vec{U}_1 = \vec{E}'' - \vec{I}_1 \vec{Z}_1 = 0 \quad \vec{I}_1 = \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1} \quad (3.36)$$

$$\bullet \text{ - Sistema inverso: } \vec{U}_2 = -\vec{I}_2 \vec{Z}_2 = 0 \quad \vec{I}_2 = 0 \quad (3.37)$$

$$\bullet \text{ - Sistema homopolar: } \vec{U}_0 = -\vec{I}_0 \vec{Z}_0 = 0 \quad \vec{I}_0 = 0 \quad (3.38)$$



- Figura 3.17 -

Sustituyendo los valores de las componentes de los sistemas de la corriente en la ecuación 2. 24 resulta:

$$\vec{I}_R = \vec{I}_1 \quad \vec{I}_S = a^2 \vec{I}_1 \quad \vec{I}_T = a \vec{I}_1 \quad (3.39)$$

por lo que:

$$\vec{I}_R = \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1} \quad \vec{I}_S = a^2 \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1} \quad \vec{I}_T = a \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1} \quad (3.40)$$

a partir de las ecuaciones anteriores podemos afirmar que las corrientes que circulan por las tres fases tienen el mismo valor absoluto, resulta que la corriente inicial simétrica de cortocircuito tiene por valor:

$$\vec{I}''_{k3} = \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1} \quad (A) \quad (3.41)$$

como se trata de un cortocircuito simétrico, no aparecen los sistemas inverso y homopolar, por tanto:

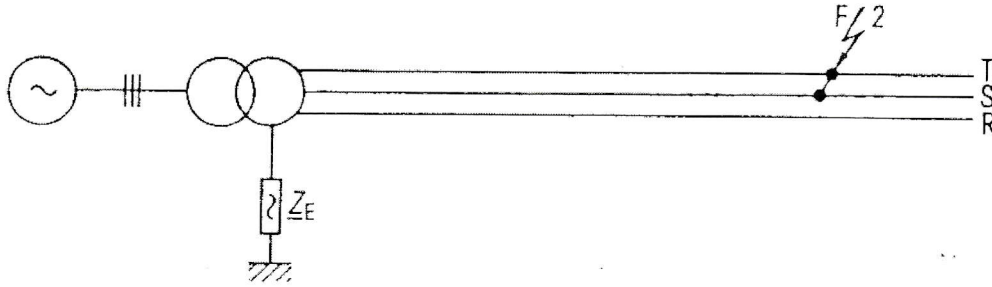
$$\vec{I}_{1R} = \vec{I}_1 = \vec{I}_R \quad \vec{I}_{1S} = a^2 \vec{I}_1 = \vec{I}_S \quad \vec{I}_{1T} = a \vec{I}_1 = \vec{I}_T \quad (3.42)$$

$$\vec{U}_{1R} = \vec{U}_1 = \vec{U}_R = 0 \quad \vec{U}_{1S} = a^2 \vec{U}_1 = \vec{U}_S = 0 \quad \vec{U}_{1T} = a \vec{U}_1 = \vec{U}_T = 0 \quad (3.43)$$

Recordamos que  $E''$  es la f.e.m. inicial de la máquina sincrónica o f.e.m. subtransitoria (tensión entre fase y neutro).

**3.7 CORTOCIRCUITO BIPOLAR SIN CONTACTO A TIERRA.-**

El cortocircuito bipolar sin contacto a tierra representa para la red una carga asimétrica, en efecto sea la red:



- Figura 3.18 -

Para el punto de cortocircuito se verifica:

$$\vec{U}_S = \vec{U}_T \quad \vec{I}_R = 0 \quad \vec{I}_S = -\vec{I}_T \quad (3.44)$$

a partir de las ecuaciones 2.27 y 2.28, tomando a la fase R como fase de referencia tenemos:

$$\vec{U}_S - \vec{U}_T = \vec{U}_1 - \vec{U}_2 = 0 \quad \vec{U}_1 = \vec{U}_2 \quad (3.45)$$

$$3 \vec{I}_0 = \vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T = 0 \quad \vec{I}_0 = 0 \quad (3.46)$$

por lo que a partir de la ecuación 3.25 tenemos:

$$\vec{I}_R = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_0 = 0 \quad \vec{I}_1 = -\vec{I}_2$$

de donde:

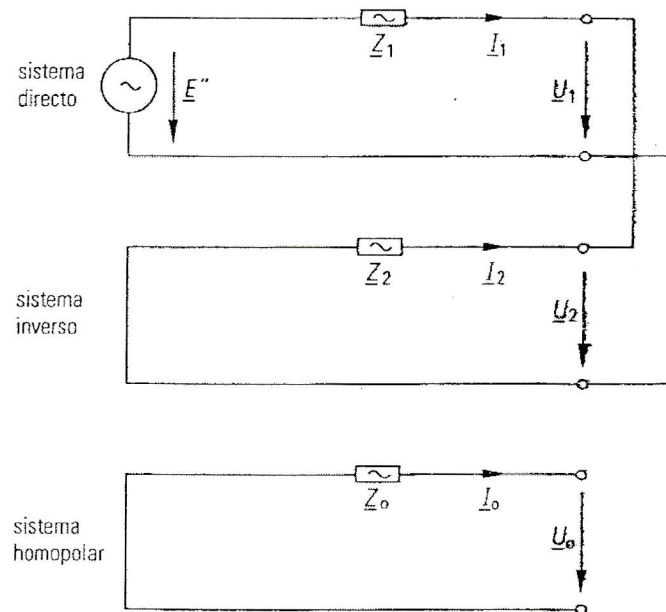
$$\vec{I}_0 = \frac{\vec{U}_0}{\vec{Z}_0} \quad \vec{U}_0 = 0 \quad (3.47)$$

para las corrientes en las fases afectadas  $I_S$  e  $I_T$  a partir de la ecuación 2.24 resulta:

$$\vec{I}_S = a^2 \vec{I}_1 + a \vec{I}_2 \quad \vec{I}_S = (a^2 - a) \vec{I}_1 \quad (3.48)$$

$$\vec{I}_T = a \vec{I}_1 + a^2 \vec{I}_2 \quad \vec{I}_T = (a - a^2) \vec{I}_1 \quad (3.49)$$

La figura siguiente representa el esquema equivalente a partir de las ecuaciones anteriores, con la f.e.m. inicial del generador  $E''$ , correspondiente a la combinación de las redes monofásicas:



- Figura 3.19 -

Se verifican las relaciones siguientes:

$$\bullet \quad - \text{ Sistema directo : } \vec{U}_1 = \vec{E}'' - \vec{I}_1 \vec{Z}_1 \quad (3.50)$$

$$\bullet \quad - \text{ Sistema inverso : } \vec{U}_2 = - \vec{I}_2 \vec{Z}_2 \quad (3.51)$$

$$\bullet \quad - \text{ Sistema homopolar : } \vec{U}_0 = - \vec{I}_0 \vec{Z}_0 \quad (3.52)$$

por otro lado como  $U_1 = U_2$  e  $I_1 = - I_2$  resulta:

$$\vec{E}'' = \vec{I}_1 ( \vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 ) \quad \vec{I}_1 = \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2}$$

de donde sustituyendo el valor anterior de  $I_1$  en las ecuaciones 3.48 y 3.49:

$$\vec{I}_S = \frac{(a^2 - a) \vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} = - \frac{j \sqrt{3} \vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} \quad (3.53)$$

$$\vec{I}_T = \frac{(a - a^2) \vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} = \frac{j \sqrt{3} \vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} \quad (3.54)$$

las dos corrientes toman el mismo valor absoluto. Por lo tanto, para la corriente inicial simétrica de cortocircuito correspondiente a un cortocircuito bipolar sin contacto a tierra, tenemos:

$$\vec{I}''_{k2} = \frac{\sqrt{3} \vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} \quad (A) \quad (3.55)$$

$C = UN = I k_2$   
 $2(\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2)$

o bien cuando se verifica que son iguales  $Z_1 = Z_2$  tanto en módulo como en fase y esto ocurre con mucha frecuencia, resulta:

$$\vec{I}''_{k2} = \frac{\sqrt{3} \vec{E}''}{2 \vec{Z}_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{I}''_{k3} \quad (A) \quad (3.56)$$

también denominada corriente mínima de cortocircuito, además como  $U_0 = 0$  según la ecuación 2.46 la tensión de la fase no afectada por el cortocircuito  $U_R$  tiene por valor:

$$\vec{U}_R = \vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \vec{U}_0 = \vec{U}_1 + \vec{U}_2,$$

de donde sustituyendo los valores de las tensiones directa e inversa por los valores dados por las ecuaciones 2.49 y 2.50 resulta:

$$\begin{aligned} \vec{U}_R &= \vec{E}'' - \vec{I}_1 \vec{Z}_1 - \vec{I}_2 \vec{Z}_2 = \vec{E}'' - (\vec{Z}_1 - \vec{Z}_2) \vec{I}_1 = \\ &= \vec{E}'' - (\vec{Z}_1 - \vec{Z}_2) \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} = \vec{E}'' - \left(1 - \frac{\vec{Z}_1 - \vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2}\right) \vec{E}'' = \vec{E}'' \frac{2 \vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} \end{aligned}$$

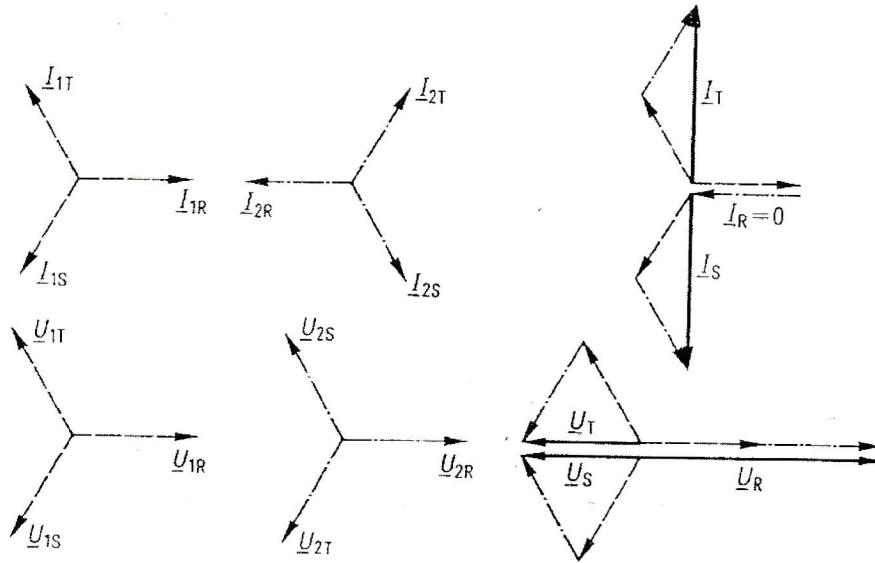
por lo que:

$$\vec{U}_R = \vec{E}'' \frac{2 \vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} \quad (3.57)$$

si además se cumple como anteriormente que  $Z_1 = Z_2$  en módulo y fase:

$$\vec{U}_R = \vec{E}'' \quad (3.58)$$

Queda por último representar los diagramas vectoriales correspondientes a los sistemas directo e inverso, puesto que el homopolar no existe y las componentes resultantes.



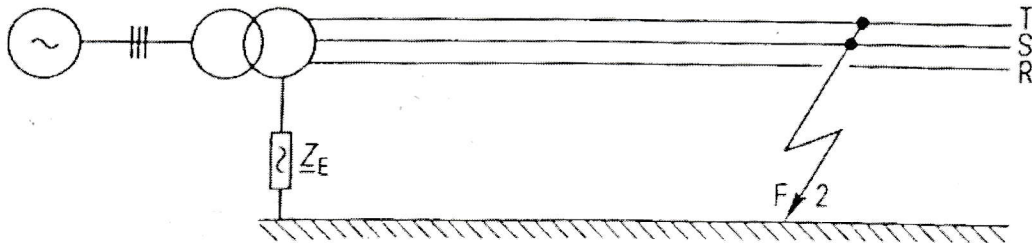
- Figura 3.20 -

A tener en cuenta que la impedancia de la puesta a tierra  $Z_E$  no interviene en el cortocircuito, puesto que  $U_0 = 0$ .

**3.8 CORTOCIRCUITO BIPOLAR CON CONTACTO A TIERRA.-**

Para el cortocircuito bipolar con contacto a tierra se cumple:

$$\vec{U}_S = \vec{U}_T = 0 \quad \vec{I}_R = 0 \quad (3.59)$$



- Figura 3. 21 -

A partir de las ecuaciones 3.25 y 3.32 a 3.35 resulta que la corriente en la fase R en función de sus componentes y las tensiones directa, inversa y homopolar, tomando a la fase R como referencia tienen los valores:

$$\vec{I}_R = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_0 = 0 \quad \vec{I}_1 = -\vec{I}_2 - \vec{I}_0 \quad (3.60)$$

$$3 \vec{U}_1 = [\vec{U}_R + a \vec{U}_S + a^2 \vec{U}_T] = \vec{U}_R \quad (3.61)$$

$$3 \vec{U}_2 = [\vec{U}_R + a^2 \vec{U}_S + a \vec{U}_T] = \vec{U}_R \quad (3.62)$$

$$3 \vec{U}_0 = [\vec{U}_R + \vec{U}_S + \vec{U}_T] = \vec{U}_R \quad (3.63)$$

es por lo podemos poner:

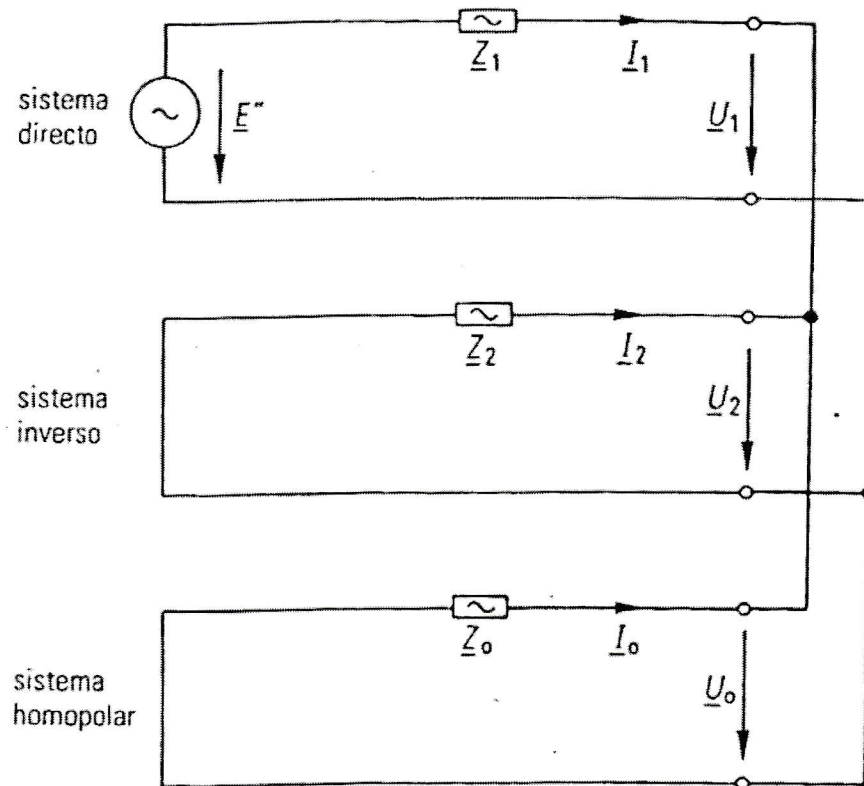
$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 = \vec{U}_0 \quad (3.64)$$

El esquema equivalente en base a la ecuación anterior resulta ser el de la figura 3.22 y a partir del mismo tenemos:

- $-\text{ Sistema directo : } \vec{U}_1 = \vec{E}'' - \vec{I}_1 \vec{Z}_1 \quad (3.65)$

- $-\text{ Sistema inverso : } \vec{U}_2 = -\vec{I}_2 \vec{Z}_2 \quad (3.66)$

- $-\text{ Sistema homopolar : } \vec{U}_0 = -\vec{I}_0 \vec{Z}_0 \quad (3.67)$



- Figura 3.22 -

Recordando las ecuaciones 3.60 y 3.64 tenemos:

$$\begin{aligned}\vec{I}_R &= \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_0 = \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1} - \frac{\vec{U}_1}{\vec{Z}_1} - \frac{\vec{U}_2}{\vec{Z}_2} - \frac{\vec{U}_0}{\vec{Z}_0} = \\ &= \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1} - \vec{U}_1 \frac{\vec{Z}_1 \vec{Z}_2 + \vec{Z}_2 \vec{Z}_0 + \vec{Z}_1 \vec{Z}_0}{\vec{Z}_1 \vec{Z}_2 \vec{Z}_0} = 0\end{aligned}$$

llamando:

$$\vec{A} = \vec{Z}_1 \vec{Z}_2 + \vec{Z}_2 \vec{Z}_0 + \vec{Z}_1 \vec{Z}_0$$

resulta a partir de las ecuaciones 3.66 y 3.67:

$$\begin{aligned}\vec{I}_2 &= -\frac{\vec{U}_2}{\vec{Z}_2} = -\frac{1}{\vec{Z}_2} \vec{E}'' \frac{\vec{Z}_2 \vec{Z}_0}{\vec{A}} = -\vec{E}'' \frac{\vec{Z}_0}{\vec{A}} \\ \vec{I}_0 &= -\frac{\vec{U}_0}{\vec{Z}_0} = -\frac{1}{\vec{Z}_0} \vec{E}'' \frac{\vec{Z}_2 \vec{Z}_0}{\vec{A}} = -\vec{E}'' \frac{\vec{Z}_2}{\vec{A}}\end{aligned}$$

sustituyendo los valores de ambas corrientes en la ecuación 3.60 sabemos que:

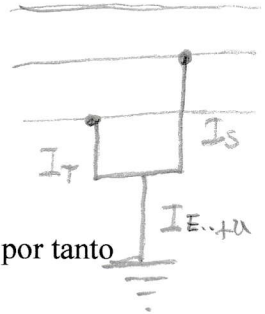
$$\vec{I}_1 = -\vec{I}_2 - \vec{I}_0 = \frac{\vec{U}_2}{\vec{Z}_2} + \frac{\vec{U}_0}{\vec{Z}_0} = \vec{U}_1 \left( \frac{1}{\vec{Z}_2} + \frac{1}{\vec{Z}_0} \right) = \vec{U}_1 \frac{\vec{Z}_2 + \vec{Z}_0}{\vec{Z}_2 \vec{Z}_0} =$$

$$= \bar{E}'' \frac{\bar{Z}_2 \bar{Z}_0}{\bar{A}} \frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 \bar{Z}_0} = \bar{E}'' \frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}{\bar{A}}$$

Por tanto las corrientes en las fases afectadas por el cortocircuito  $I_S$  e  $I_T$  serán calculadas por medio de la ecuación 3.25 sustituyendo los valores de  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_0$  determinados anteriormente:

$$\bar{I}''_{k2ES} = \bar{I}_S = j \sqrt{3} \bar{E}'' \frac{a \bar{Z}_2 - \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_0} \quad (3.68)$$

$$\bar{I}''_{k2ET} = \bar{I}_T = -j \sqrt{3} \bar{E}'' \frac{a^2 \bar{Z}_2 - \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_0} \quad (3.69)$$



La corriente que circula por tierra  $I_E$  resultará de la suma vectorial de  $I_S$  mas  $I_T$  por tanto tenemos:

$$\bar{I}''_{kE2E} = \bar{I}_S + \bar{I}_T = -3 \bar{E}'' \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_0} = 3 \bar{I}_0 \quad (3.70)$$

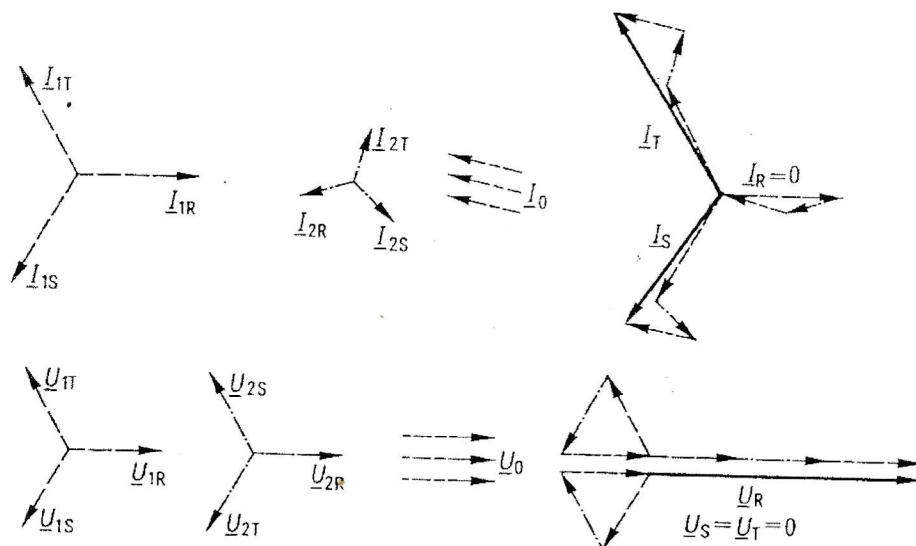
Como también se cumple según 3.64 y 3.29 que:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 \quad \bar{U}_R = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0$$

la tensión en la fase no afectada por el cortocircuito  $U_R$  respecto a tierra es:

$$\bar{U}_R = 3 \bar{E}'' \frac{\bar{Z}_2 \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_0 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_0} \quad (2.71)$$

En resumen los diagramas vectoriales que representan a los sistemas: directo, inverso y homopolar tanto de corrientes como de tensiones vienen significados en la figura siguiente:

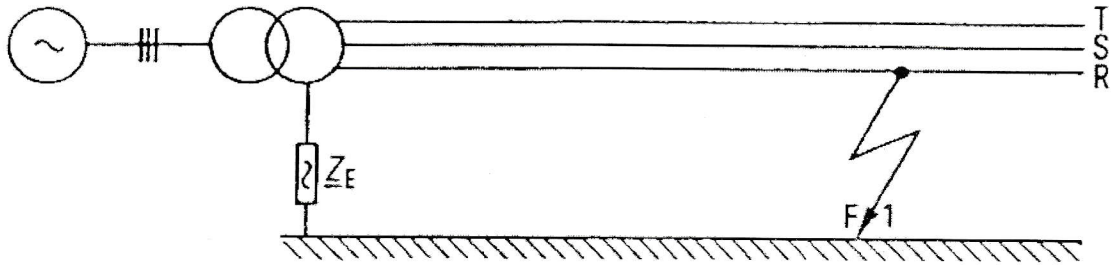


- Figura 3.23 -

**3.9 CORTOCIRCUITO UNIPOLAR A TIERRA.-**

En el cortocircuito unipolar a tierra se cumplen las condiciones:

$$\vec{U}_R = 0 \quad \vec{I}_S = 0 \quad \vec{I}_T = 0 \quad (3.72)$$



- Figura 3. 24 -

Partiendo de las ecuaciones 2.25 a 2.28 sabemos que:

$$3 \vec{I}_1 = [\vec{I}_R + a \vec{I}_S + a^2 \vec{I}_T] = \vec{I}_R \quad (3.73)$$

$$3 \vec{I}_2 = [\vec{I}_R + a^2 \vec{I}_S + a \vec{I}_T] = \vec{I}_R \quad (3.74)$$

$$3 \vec{I}_0 = [\vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T] = \vec{I}_R \quad (3.75)$$

es por lo que podemos decir que:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 = \vec{I}_0 \quad (3.76)$$

a tenor de la ecuación 3.29 sabemos que:

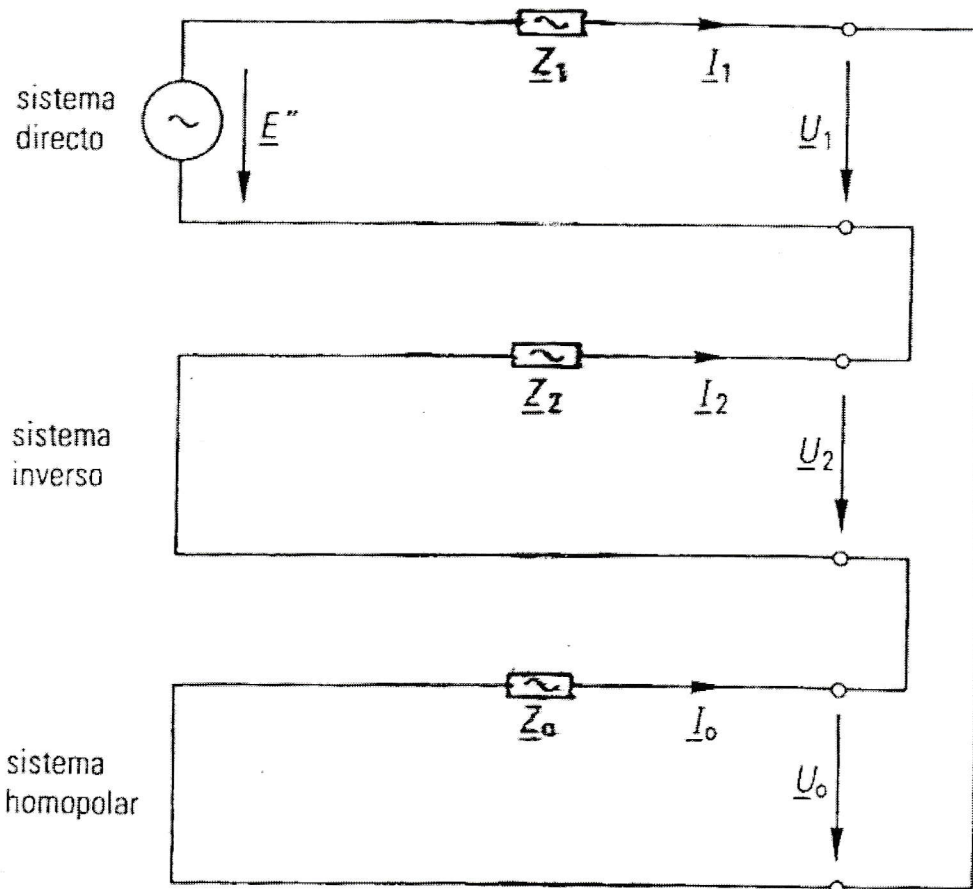
$$\vec{U}_R = \vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \vec{U}_0 = 0 \quad \vec{U}_1 = - \vec{U}_2 - \vec{U}_0 \quad (3.77)$$

por tanto a partir de estas ecuaciones resulta el esquema equivalente con la f.e.m.  $E''$  correspondiente a la combinación de las redes monofásicas, en las que se verifica:

$$- \text{Sistema directo: } \vec{U}_1 = \vec{E}'' - \vec{I}_1 \vec{Z}_1 \quad (3.78)$$

$$- \text{Sistema inverso: } \vec{U}_2 = - \vec{I}_2 \vec{Z}_2 \quad (3.79)$$

$$- \text{Sistema homopolar: } \vec{U}_0 = - \vec{I}_0 \vec{Z}_0 \quad (3.80)$$



- Figura 3.25 -

Por medio de las ecuaciones 3.76 y 3.77 y sustituyendo estos valores en la ecuación 3.29 tenemos:

$$\vec{U}_R = \vec{E}'' - \vec{Z}_1 \vec{I}_1 - \vec{Z}_2 \vec{I}_2 - \vec{Z}_0 \vec{I}_0 = 0$$

pero aplicando el valor de las componentes de la corriente dado por 3.76 resulta:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 = \vec{I}_0 = \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0}$$

por tanto la corriente inicial simétrica de cortocircuito, que es igual a la corriente que circula por la fase R ( $I''_{k1} = I_R$ ) viene determinada por la ecuación:

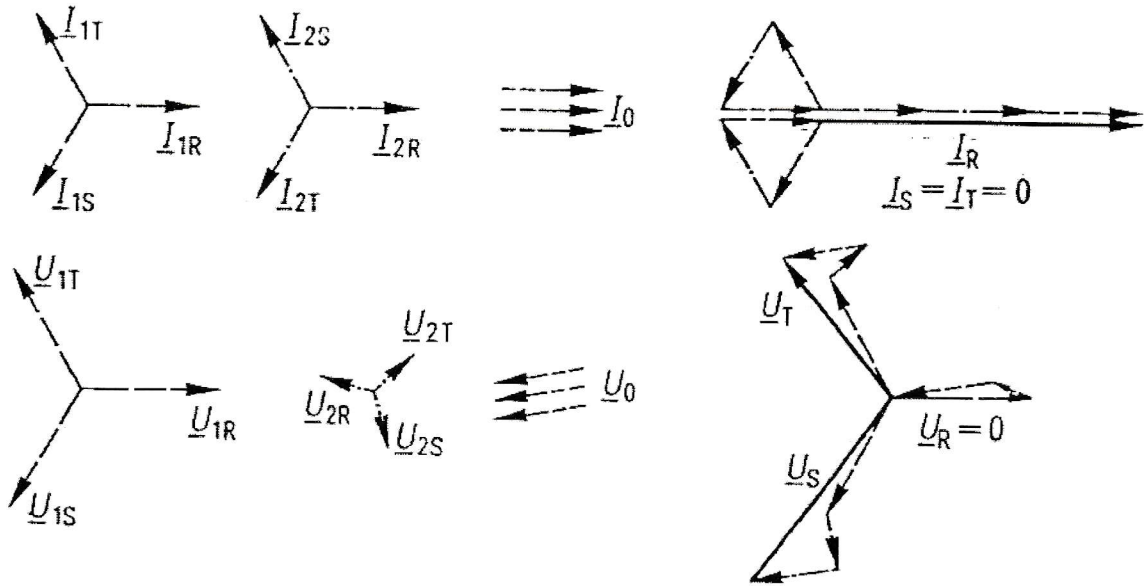
$$\vec{I}''_{k1} = 3 \frac{\vec{E}''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0} \quad (3.81)$$

Por último determinaremos las tensiones en las fases no afectadas por el cortocircuito, es decir las fases S y T a base de sustituir los valores de las ecuaciones 3.78 a 3.80 en la ecuación 3.29 es decir:

$$\vec{U}_S = \vec{E}'' \left[ a^2 - \frac{a^2 \vec{Z}_1 + a \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0} \right] \quad (3.82)$$

$$\vec{U}_T = \vec{E}'' \left[ a - \frac{a \bar{Z}_1 + a^2 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \right] \quad (3.83)$$

Los diagramas vectoriales correspondientes a los sistemas directo, inverso y homopolar de tensiones y corrientes son:



- Figura 3.26 -

**3.10 DOBLE CONTACTO A TIERRA.-**

El doble contacto a tierra es un cortocircuito que se produce en distintos puntos y en diferentes fases de una red. Se presenta sobre todo en redes con neutro aislado o con puesta a tierra compensante. En estas redes son las únicas en las que aparece, después de producirse un cortocircuito unipolar a tierra, se origina como ya hemos determinado un aumento considerable de la tensión en las fases no afectadas por el cortocircuito, que puede originar una descarga a tierra en una de las dos fases y se produce en consecuencia el doble contacto a tierra. La corriente de cortocircuito que se origina no es mayor que la que la correspondiente a un cortocircuito bipolar con y sin contacto a tierra. La importancia de determinar la corriente de cortocircuito en estas condiciones radica en comprobar los dispositivos de protección y para evaluar las interferencias, por ejemplo con redes telefónicas. Es por lo que omitimos su cálculo y reiteramos que el valor de la corriente de cortocircuito es menor que un cortocircuito bipolar con o sin contacto a tierra.

### 3.11 CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO SEGÚN LA NORMA VDE 0102 Y NORMA UNE-EN 60909-0:2002.-

En las expresiones deducidas para el cálculo de las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito, para los distintos tipos de cortocircuitos, se ha empleado la f.e.m. correspondiente a los generadores o acometidas existentes. En las directrices VDE 0102 y norma UNE-EN 60909-0:2002 se indica un método diferente de acuerdo con el cual basta considerar, para todos los puntos de cortocircuito, que en el punto de cortocircuito actúa una única fuente de tensión equivalente cuya f.e.m. o tensión es:

$$\boxed{\frac{c U_h}{\sqrt{3}}} \quad (3.84)$$

siendo:

-  $c$  = Coeficiente que tiene en cuenta la diferencia existente entre la f.e.m. inicial  $E''$  y la tensión de servicio de la red  $U_h$  en el punto de cortocircuito.

-  $U_h$  = Tensión de servicio de la red, valor medio entre fases.

Las f.e.m. de los generadores o acometidas se consideran nulas y únicamente se tienen en cuenta las impedancias de las distintas fuentes de corriente de cortocircuito

No se consideran las capacidades de las líneas en los sistemas directo e inverso y los motores se consideran como generadores.

El valor de la constante  $c$  en función de la tensión es:

#### ➤ **3.11.1 Redes trifásicas con tensión nominal $> 1$ kV.-**

Tanto para cortocircuitos próximos como alejados del alternador se cumple:

$$\boxed{\frac{c U_h}{\sqrt{3}} = \frac{c U_N}{\sqrt{3}}} \quad (3.85)$$

siendo:

-  $U_N$  = Tensión nominal compuesta de la red donde se produce el cortocircuito.

-  $c$  = Factor de tensión, cuyo valor es:

➤  $c = 1,1$  para las corrientes de cortocircuito máximas.

➤  $c = 1$  para las corrientes de cortocircuito mínimas.

#### ➤ **3.11.2 Redes trifásicas con tensión nominal $\leq 1$ kV sin generadores de B.T.-**

Tenemos:

$$\boxed{\frac{c U_h}{\sqrt{3}} = \frac{c U_N}{\sqrt{3}}} \quad (3.86)$$

siendo:

-  $U_N$  = Tensión nominal compuesta de la red de B.T.

-  $c$  = Factor de tensión, cuyo valor es:

- $c = 1,05$  para las corrientes de cortocircuito máximas.
- $c = 0,95$  para las corrientes de cortocircuito mínimas.

➔ ➔ **3.11.3 Redes trifásicas alimentadas con generadores.-**

Si en una red con tensión nominal superior a 1 kV hay generadores con reactancia subtransitoria mayor del 20% ( $X''_d > 20\%$ ) que alimentan directamente, es decir sin transformadores intercalados, el punto de cortocircuito o si en una red de tensión nominal  $< 1$  kV el punto de cortocircuito está alimentado por generadores de B.T. se cumple con la suficiente aproximación:

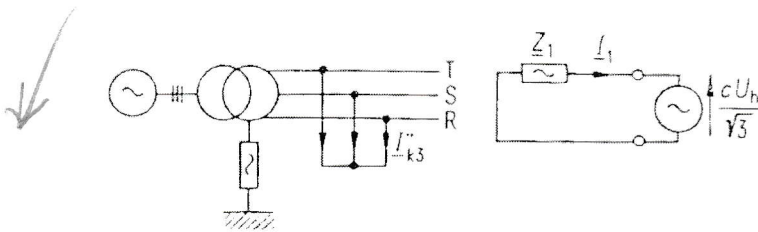
2.12

$$\frac{c U_h}{\sqrt{3}} = \frac{U_{NG}}{\sqrt{3}} + I_{NG} X''_d \text{ sen } \varphi_{NG} \quad (3.87)$$

siendo:

- $U_{NG}$  = Tensión nominal del generador.
- $I_{NG}$  = Corriente nominal del generador.
- $X''_d$  = Reactancia inicial del generador.
- $\varphi_{NG}$  = Ángulo de defase entre  $U_{NG}/\sqrt{3}$  y  $I_{NG}$  para servicio nominal.

Como resumen del cálculo de las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito según los distintos tipos, resultan las siguientes fórmulas y esquemas equivalentes según directrices VDE 0102.y norma UNE-EN 60909-0:2002.



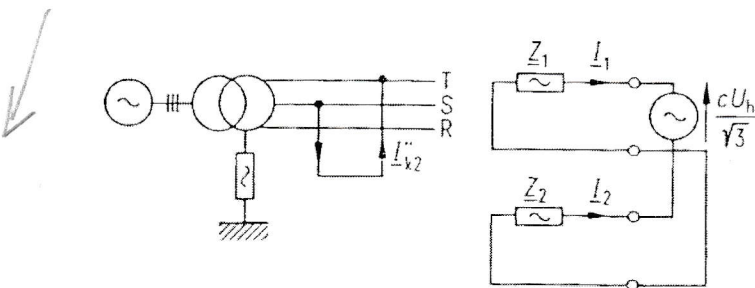
a) Cortocircuito tripolar

$$I_1 Z_1 = \frac{c U_h}{\sqrt{3}}$$

$$I_2 = 0$$

$$I_0 = 0$$

$$I''_{k3} = \frac{c U_h}{\sqrt{3} Z_1}$$



b) Cortocircuito bipolar sin contacto a tierra

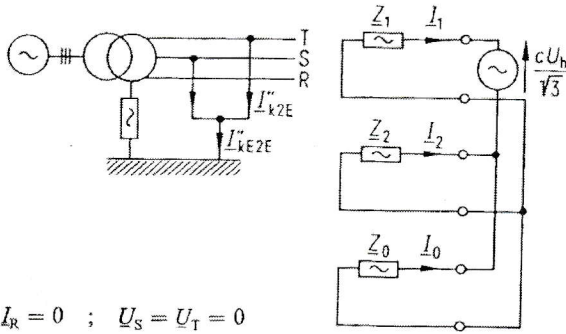
$$I_1 (Z_1 + Z_2) = \frac{c U_h}{\sqrt{3}}$$

$$I_2 = -I_1$$

$$I_0 = 0$$

$$I''_{k2} = \frac{c U_h}{(Z_1 + Z_2)}$$

$$U_R = \frac{c U_h}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$



$I_R = 0 ; U_S = U_T = 0$

c) Cortocircuito bipolar con contacto a tierra

$$I_1 \frac{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_1 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0} = \frac{cU_h}{\sqrt{3}}$$

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

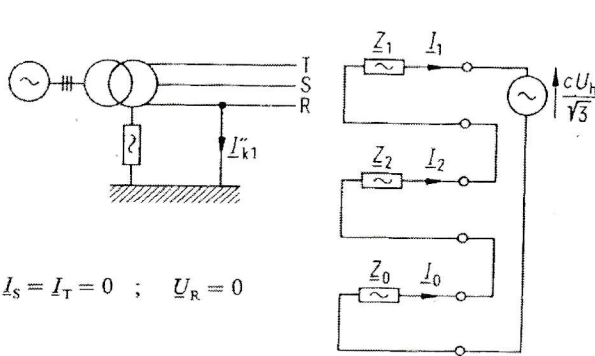
$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0}$$

$$I''_{k2ES} = +jcU_h \frac{aZ_2 - Z_0}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_0Z_1}$$

$$I''_{k2ET} = -jcU_h \frac{a^2Z_2 - Z_0}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_0Z_1}$$

$$I''_{kE2E} = -\sqrt{3}cU_h \frac{Z_2}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_0Z_1}$$

$$U_R = \sqrt{3}cU_h \frac{Z_2Z_0}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_0Z_1}$$



$I_S = I_T = 0 ; U_R = 0$

d) Cortocircuito unipolar a tierra

$$I_1(Z_1 + Z_2 + Z_0) = \frac{cU_h}{\sqrt{3}}$$

$$I_2 = I_1$$

$$I_0 = I_1$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_h}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$U_S = \frac{cU_h}{\sqrt{3}} \left( a^2 - \frac{a^2Z_1 + aZ_2 + Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right)$$

$$U_T = \frac{cU_h}{\sqrt{3}} \left( a - \frac{aZ_1 + a^2Z_2 + Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right)$$

**3.12 CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO  $I_s$ ,  $I_a$  e  $I_K$ .**

Hasta ahora hemos determinado  $I''_k$ , valor eficaz de la corriente en el instante en que se ha producido el cortocircuito, pero no solo es importante determinar dicha corriente, a partir de las directrices VDE 0102 se pueden calcular las corrientes:

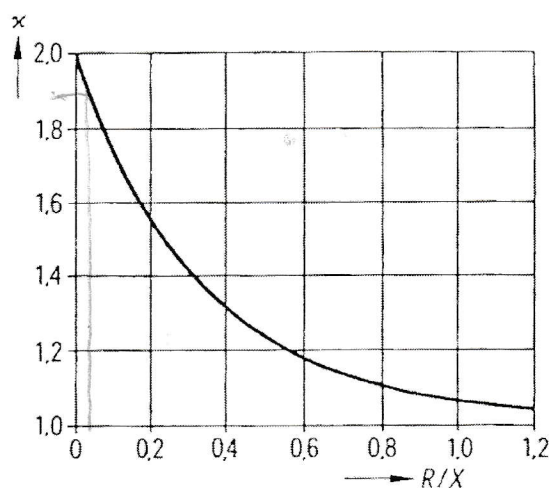
- $I_s$  = Corriente máxima asimétrica de cortocircuito, llamada también corriente de choque, es el valor máximo instantáneo posible.
- $I_a$  = Corriente simétrica de corte, es el valor eficaz de la componente alterna de cortocircuito correspondiente al instante en que se inicia la separación de los contactos del aparato de protección.
- $I_K$  = Corriente permanente de cortocircuito, es el valor eficaz de la corriente de cortocircuito en régimen permanente.

**➤ 3.12.1 Cálculo de la corriente  $I_s$ .**

La corriente máxima asimétrica se puede determinar por medio de la expresión:

$$I_s = \chi \sqrt{2} I''_k \quad (3.88)$$

El factor  $\chi$  depende de la relación entre  $R_k/X_k$  correspondientes a los distintos aparatos o componentes implicados en el cortocircuito y tiene en cuenta el amortiguamiento temporal de la componente aperiódica, así como el de la componente simétrica en el caso de cortocircuitos próximos al generador. La determinación de dicho factor se realiza por medio de la gráfica 3.27.



Factor  $\chi$  para calcular la corriente máxima asimétrica de cortocircuito  $I_s$

( $R$  y  $X$  son la resistencia efectiva  $R_k$  y la reactancia  $X_k$  de la impedancia de cortocircuito de la red  $Z_k$ )

- Figura 3.27 -

A efectos de la determinación de  $\chi$  la norma VDE 0102 propone aceptar los siguientes valores para la resistencia de los generadores:

- Alternadores de potencia < 100 MVA:  $R = 0,07 X''_d$ .
- Alternadores de potencia  $\geq 100$  MVA:  $R = 0,05 X''_d$ .

En los cortocircuitos en bornes del generador suele admitirse que  $R_k/X_k = 0,1$  y así resulta:

$$I_s = 1,8 \sqrt{2} I''_k \quad (3.89)$$

### ➤ 3.12.2 Cálculo de la corriente $I_a$ .

Según el tipo de máquina resulta:

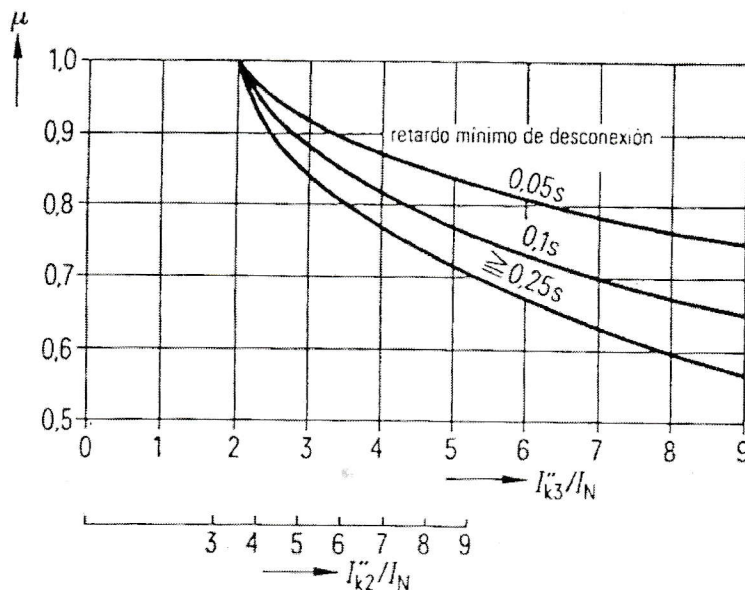
- Para máquinas sincrónicas:

$$I_a = \mu I''_k \quad (3.90)$$

- Para motores asincrónicos:

$$I_a = \mu q I''_k \quad (3.91)$$

El factor  $\mu$  depende de la relación entre  $I''_k/I_N$  y del retardo mínimo ( $t_v$ ) de desconexión de los aparatos de protección, según la gráfica 3.28

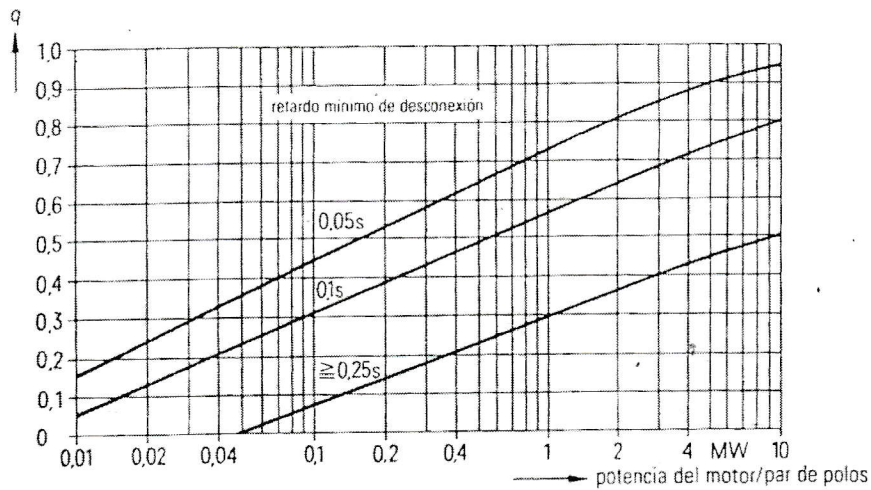


Factor  $\mu$  para calcular la corriente simétrica de corte  $I_a$

- Figura 3.28 -

El factor  $q$  es función de la relación entre la potencia del motor en MW y el número de pares de polos (de un motor asincrónico o de un grupo de motores) y del retardo mínimo de desconexión  $t_v$  de los aparatos de protección según la figura 3.29.

MARTES: MIÉRCOLES



Factor  $q$  para calcular la corriente simétrica de corte  $I_{aM}$  de un motor asíncrono

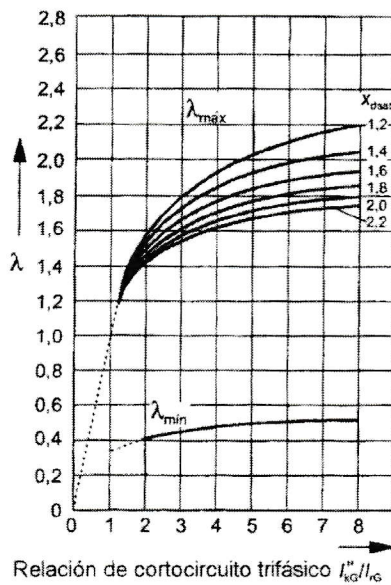
- Figura 3.29 -

➤ 3.12.3 Cálculo de la corriente  $I_k$ -

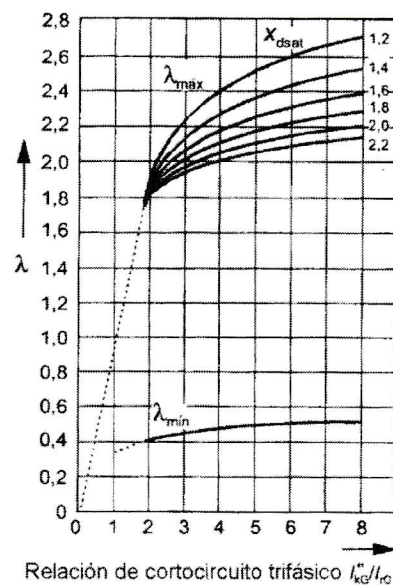
La intensidad de cortocircuito en régimen permanente para máquinas sincrónicas se puede determinar por medio de la expresión, según norma UNE 60909-0:2002.

$$I_k = \lambda I_N \quad (3.92)$$

● ALTERNADOR CON POLOS ENCASTRADOS



Factores  $\lambda_{\min}$  y  $\lambda_{\max}$  de la serie 1



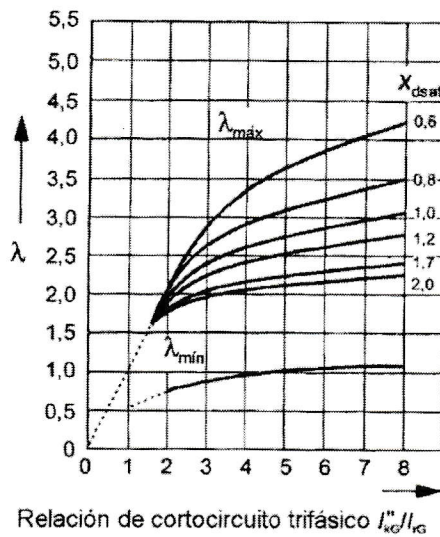
Factores  $\lambda_{\min}$  y  $\lambda_{\max}$  de la serie 2

Factores  $\lambda_{\min}$  y  $\lambda_{\max}$  para alternadores de rotor cilíndrico

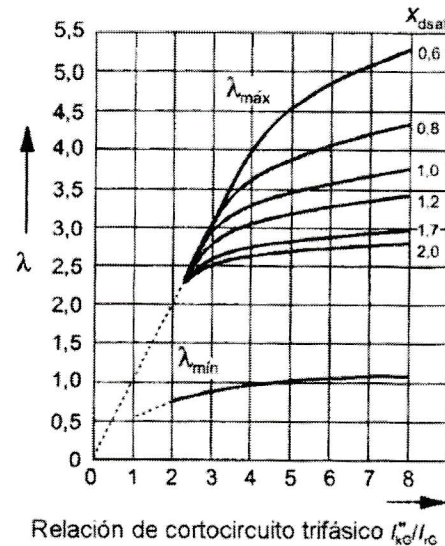
Las curvas anteriores están definidas para:

- Serie 1: para 1,3 veces la excitación asignada a la potencia y factor de potencia asignados.
- Serie 2: para 1,6 veces la excitación asignada a la potencia y factor de potencia asignados.

● ALTERNADOR CON POLOS SALIENTES



Factores  $\lambda_{\min}$  y  $\lambda_{\max}$  de la serie 1



Factores  $\lambda_{\min}$  y  $\lambda_{\max}$  de la serie 2

Factores  $\lambda_{\min}$  y  $\lambda_{\max}$  para alternadores de polos salientes

Las curvas anteriores están definidas para:

- Serie 1: para 1,6 veces la excitación asignada a la potencia y factor de potencia asignados.
- Serie 2: para 2 veces la excitación asignada a la potencia y factor de potencia asignados.

Estas gráficas han sido tomadas de la norma UNE 69909-0:2002.

Siendo  $I_N$  es la intensidad nominal de la máquina. El factor  $\lambda$  depende de la relación entre  $I''_k/I_N$  de las condiciones de excitación y del tipo de máquina sincrónica en cuestión. Así tenemos las figuras siguientes, en las que aparecen los valores de  $\lambda_{\max}$  y  $\lambda_{\min}$  que determinarán dos corrientes de cortocircuito según la excitación del alternador. Es decir  $\lambda_{\min}$  se emplea para determinar el valor de la corriente de cortocircuito en el caso de que la máquina funcione en vacío y el valor de  $\lambda_{\max}$  cuando el alternador trabaje con la excitación que normalmente se pueda considerar. Recordamos que en el caso de cortocircuitos alejados del alternador la corriente simétrica de cortocircuito permanece prácticamente constante durante todo el cortocircuito, en esta situación se verifica  $I''_k = I_k$ .

En general se suele despreciar el valor de las resistencias frente a las reactancias en los circuitos de A.T. siempre que las resistencias verifiquen que  $R \ll X$ , en base a esto las impedancias de las barras de las instalaciones de maniobra con tensiones de servicio mayor de 1 kV se puede despreciar. Pero en el caso de circuitos de B.T. es decir con tensión inferior a 1 kV se deberán tener en cuenta las impedancias de las barras y de las uniones entre aparatos, aunque solo tengan un par de metros, al calcular las corrientes de cortocircuito de la red, e incluso de debería considerar las resistencia debido a las contactos o a las uniones por medio de tornillos, que pueden alcanzar valores de hasta unos  $0,05 \text{ m}\Omega$ . Pero como estas resistencias son de muy difícil cuantificación no se consideran al calcular las corrientes de cortocircuito.

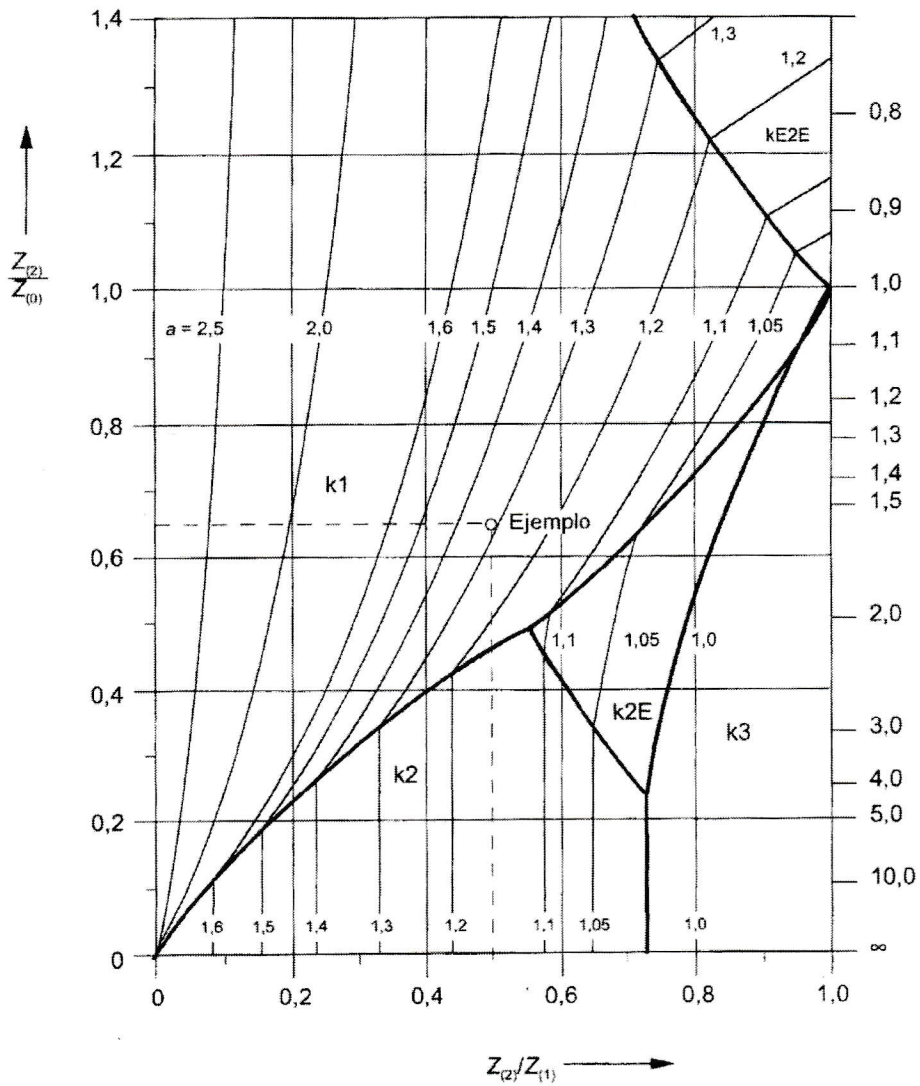
Para una mayor profundización en este apartado véase la norma UNE 21239-1 IN: 2005.

**3.13 MAYORES CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.-**

La determinación de la mayor corriente de cortocircuito posible, en alguna fase, para un punto de una línea resulta laboriosa. Por tal razón resulta práctico el uso del diagrama de la figura siguiente, en donde en función de las relaciones  $Z_2/Z_1$  y  $Z_2/Z_0$  se determina la zona en la que un tipo determinado de cortocircuito origina la mayor corriente de cortocircuito.

A tener en cuenta que en este diagrama simplificado, tomado de la norma UNE EN 60909-0:2001, los argumentos de las impedancias  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_0$  deben tener el mismo ángulo. Teniendo en cuenta la práctica y como norma general, tenemos:

- a) En los sistemas con neutro aislado, la corriente máxima se produce, prácticamente siempre, en el cortocircuito tripolar.
- b) En las redes con puesta a tierra compensante (a través de una reactancia) entran en consideración las corrientes de cortocircuito bipolar con o sin contacto a tierra.
- c) En los sistemas trifásicos con puesta a tierra rígida (resistencia de bajo valor) el cortocircuito unipolar, y especialmente el bipolar, puede dar lugar a corrientes de cortocircuito que superen a las del tripolar en un 50%.



$$a = \frac{\text{Corriente de cortocircuito desequilibrado}}{\text{Corriente de cortocircuito trifásico}}$$

Ejemplo:

$$Z_{(2)}/Z_{(1)} = 0,5$$

$$Z_{(2)}/Z_{(0)} = 0,65$$

El cortocircuito monofásico a tierra dará la corriente de cortocircuito más alta

Diagrama para determinar el tipo de cortocircuito (figura 3) que da lugar a la corriente de cortocircuito más alta, referida a la corriente trifásica simétrica de cortocircuito en el punto de defecto, cuando los ángulos de las impedancias de secuencia  $Z_{(1)}$ ,  $Z_{(2)}$ ,  $Z_{(0)}$  son idénticos

Figura 3.30 -

### 3.14 EFECTOS ELECTRODINÁMICOS Y TÉRMICOS DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.-

El cálculo de las corrientes de cortocircuito, tiene una doble misión, además de permitir el diseño de las protecciones, y son:

- Determinar los esfuerzos electrodinámicos.
- Determinar los efectos térmicos.

#### ➤ 3.14.1 Esfuerzos electrodinámicos.-

Recordemos que la fuerza de interacción (repulsión tratándose de corrientes opuestas o atracción en el caso de corrientes de igual sentido) entre dos conductores paralelos lineales (idealmente de secciones nulas) viene definido por la expresión:

$$F = B i l$$

siendo:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{i}{2 \pi r}$$

por lo que resulta:

$$F = \mu_0 \mu_r \frac{i^2}{2 \pi r} l$$

en donde:

- F = Fuerza total correspondiente a l metros de línea.
- B = Inducción magnética.
- $\mu_r$  = Permeabilidad relativa del medio considerado.
- $\mu_0$  = Permeabilidad magnética en el vacío  $4 \pi 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>.
- i = Valor instantáneo de la corriente.
- l = Longitud de la línea.
- r = Separación entre conductores lineales.

Empleando las unidades del sistema internacional, en la práctica  $\mu_r = 1$  y adoptando el caso más desfavorable en que  $i = I_s$ , resulta:

$$F = 4 \pi 10^{-7} \frac{I_s^2}{2 \pi r} l = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_s^2 l}{r} \quad (N) \quad (3.93)$$

o también:

$$F = 2,04 \cdot 10^{-8} \frac{I_s^2 l}{r} \quad (kg) \quad (3.94)$$

#### ➤ 3.14.2 Efectos térmicos.-

Generalmente el proceso de calentamiento por corrientes de cortocircuito se considera de corta duración, en virtud de los breves tiempos de actuación de los elementos de protección.

En estas condiciones, se suele aceptar que, en su transcurso, no existe disipación de calor, es decir, que todo el calor producido se traduce en un calentamiento del cable, y en esta situación resulta la ecuación:

$$I_{CC}^2 t = K'^2 S$$

Para una profundizar en el tema de estos esfuerzos recomendamos la lectura detallada de las normas: UNE-EN 60865-1:1997 y UNE-IEC/TR 60685-2 IN.

### 3.15 VALORES CARACTERÍSTICOS DE APARATOS Y COMPONENTES PARA CORRIENTE TRIFÁSICA A 50 HZ.\*

Para la determinación de las corrientes de cortocircuito es preciso conocer los valores de las impedancias directa, inversa y homopolar de cada uno de los componentes que intervienen en el mismo, si no se conoce el valor de ellos, en las tablas siguientes se indican los valores característicos medios de los aparatos y componentes utilizados en la producción y distribución de energía.

Pero además hay que tener en cuenta:

#### ➤ 3.15.1 Acometidas.-

El valor de la corriente de cortocircuito para una acometida viene determinada por la potencia de cortocircuito en el punto Q de conexión de la red que alimenta a dicha acometida, este valor debe ser facilitado por las empresas suministradoras de energía eléctrica. Para determinar las reactancias directa e inversa de la acometida, se cumple:

$$S''_{kQ} = \sqrt{3} U_{NQ} I''_{kQ} \quad (VA) \quad (3.95)$$

$$I''_{kQ} = \frac{1,1 U_{NQ}}{\sqrt{3} Z_Q} \quad (A) \quad (3.96)$$

$$Z_{Q(1 y 2)} = R_Q + j X_Q \quad (\Omega) \quad (3.97)$$

siendo:

- $S''_{kQ}$  = Potencia de cortocircuito de la acometida en MVA.
- $U_{NQ}$  = Tensión nominal de la red en el punto de conexión Q. (1,1 es el factor c).
- $Z_{Q(1 y 2)}$  = Impedancia directa e inversa de cortocircuito de la acometida en  $\Omega$ .

Si no se conocen otros valores, puede tomarse para la resistencia y reactancia directa e inversa efectiva de la acometida:

$$R_{Q(1 y 2)} = 0,1 X_Q \quad X_{Q(1 y 2)} = 0,995 Z_Q \quad (\Omega) \quad (3.98)$$

en donde:

- $R_{Q(1 y 2)}$  = Resistencia efectiva en los sistemas directo e inverso de la acometida en  $\Omega$ .
- $X_{Q(1 y 2)}$  = Reactancia en los sistemas directo e inverso de la acometida en  $\Omega$ .

A título informativo y para el ámbito de IBERDROLA (M.T. 1.10.17. Noviembre de 2002) en relación con la potencia de cortocircuito de las acometidas tenemos: considerando unas intensidades nominales de corte en interruptores de 50, 40, 31.5 y 25 kA., y exceptuando los emplazamientos de centrales generadoras, se exponen las siguientes propuestas:

- 400 kV: Adoptar una intensidad de cortocircuito de diseño de 50 kA. No se considera la necesidad de incluir también el valor de 40 kA, el cual sería suficiente en numerosas subestaciones, dado que el aumento futuro de

posiciones de 400 kV propiedad de IBERDROLA sería muy limitado, y condicionado por Red Eléctrica Española.

- Definir en 220 kV tres zonas:
  - Zona de 50 kA. constituida por la red de salida de las centrales de Villarino y Aldeadávila.
  - Zona de 40 kA, constituida por las redes de Madrid y País Vasco.
  - Zona de 31,5 kA, constituida por el resto de subestaciones.
- Definir en 132 kV tres zonas:
  - Zona de 50 kA. Constituida por una parte de la red de Madrid.
  - Zona de 40 kA, constituida por las redes de Madrid, Valencia y País Vasco (en este caso parcialmente).
  - Zona de 31,5 kA, constituida por el resto de subestaciones.
- Adoptar en 66 kV, 45 kV y 30 kV una intensidad de cortocircuito de diseño de 25 kA.
- En Media Tensión (20, 15 y 13 kV), para las potencias y tensiones de cortocircuito de los transformadores que se instalan, la potencia de cortocircuito es inferior siempre a 500 MVA, valor que no debe ser superado con el fin de no imponer requerimientos severos a la red de distribución en MT (360 MVA en 20 kV, 250 MVA en 13 y 15 kV). Ello implica una intensidad máxima de cortocircuito de 10,4 kA, por lo que se establece una intensidad de cortocircuito máxima de 16 kA, aunque en la práctica el valor normalizado de diseño de los embarrados de las celdas blindadas es de 20 kA.

### ➤ 3.15.2 Máquinas sincrónicas.-

La reactancia inicial  $X''_d$  (reactancia subtransitoria saturada) de una máquina sincrónica determina el valor de la corriente inicial simétrica de cortocircuito. La impedancia de un generador es:

$$Z_G = R_G + j X''_d \quad (\Omega)$$

siendo:

$$X''_d = \frac{x''_d \%}{100} \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} \quad (\Omega) \quad (3.99)$$

en donde:

- $x''_d \%$  = Reactancia subtransitoria expresada en %.
- $U_{NG}$  = Tensión nominal del generador en V.
- $S_{NG}$  = Potencia aparente nominal del generador en VA.

Para la resistencia del generador ( $R_G$ ) puede tomarse con suficiente aproximación:

- -  $R_G = 0,05 X''_d$  para:  $U_{NG} > 1 \text{ kV}$  y  $S_{NG} \geq 100 \text{ MVA}$ .
- -  $R_G = 0,07 X''_d$  para:  $U_{NG} > 1 \text{ kV}$  y  $S_{NG} < 100 \text{ MVA}$ .
- -  $R_G = 0,15 X''_d$  para:  $U_{NG} < 1 \text{ kV}$ .

Los motores y compensadores sincrónicos se tratan como generadores para el cálculo de las corrientes de cortocircuito.

### ➤ 3.15.3 Máquinas asincrónicas.-

La impedancia a considerar para el cálculo de la corriente inicial simétrica de cortocircuito se obtiene a partir de la corriente inicial de arranque del motor ( $I_{aM}$ ) y de la intensidad nominal del motor ( $I_N$ ), tal que se verifica:

$$Z_M = R_M + j X_M \quad (\Omega)$$

además tenemos:

$$Z_M = \frac{U_{NM}}{\sqrt{3} I_{aM}} \quad (\Omega) \quad (3.100)$$

Determinada la impedancia del motor, falta por determinar en que relación contribuyen a la impedancia, la resistencia y reactancia, tenemos:

- $R_M/X_M = 0,1$  con  $X_M = 0,995 Z_M$  para motores de A.T. con la relación Potencia/Par de polos  $\geq 1 \text{ MW}$ .
- $R_M/X_M = 0,15$  con  $X_M = 0,989 Z_M$  para motores de A.T. con la relación Potencia/Par de polos  $< 1 \text{ MW}$ .
- $R_M/X_M = 0,3$  con  $X_M = 0,958 Z_M$  para motores de B.T.

### ➤ 3.15.4 Transformadores.-

Los esquemas equivalentes correspondientes a los sistemas directo inverso y homopolar dependen del número y de la conexión de los devanados. El módulo de la impedancia inversa coincide con el de la impedancia directa. En general no es preciso tener en cuenta el defase resultante del grupo de conexión.

Para transformadores de dos devanados por fase resulta:

$$Z_1 = Z_2 = Z_T = R_T + j X_T \quad (\Omega)$$

pero también se cumple:

$$Z_T = \frac{u_{CC} \%}{100} \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} \quad (\Omega) \quad (3.101)$$

$$R_T = \frac{u_{\Omega} \%}{100} \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{P_{Cu2N}}{3 I_{NT}^2} \quad (\Omega) \quad (3.102)$$

$$X_T = \frac{u_X \%}{100} \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{U_{20T}^2}{100 S_{NT}} \sqrt{u_{cc}^2 \% - u_{\Omega}^2 \%} \quad (\Omega) \quad (3.103)$$

siendo:

- $Z_T$  = Impedancia combinada del transformador referida al nivel eléctrico del secundario en  $\Sigma$ .
- $u_{cc}\%$  = Tensión de cortocircuito en %.
- $U_{20T}$  = Tensión secundaria en vacío del transformador en V.
- $S_{NT}$  = Potencia aparente del transformador en VA.
- $R_T$  = Resistencia combinada a nivel eléctrico del secundario del transformador en  $\Omega$ .
- $X_T$  = Reactancia combinada a nivel eléctrico del secundario del transformador en  $\Omega$ .
- $u_{\Omega}\%$  = Caída de tensión óhmica en %.

En cuanto a las reactancias homopolares remitimos al lector a las tablas que a continuación reproducimos.

➤ **3.15.5 Cables eléctricos.-**

Para la determinación de las impedancias directas e inversas de los cables eléctricos que conforman las líneas eléctricas, remitimos al lector a los tratados monográficos sobre dicho tema o catálogos suministrados por el fabricante. En cuanto a las impedancias homopolares en los cables de líneas subterráneas reiteramos que no es posible modelizar una expresión matemática y que su determinación es por ensayo.

## Valores característicos de los generadores síncronos trifásicos

## Generadores síncronos de alta tensión

Tipo de máquina	Turbo- gene- radores	Generadores de polos salientes con devanado amortiguador		Generadores de polos salientes sin devanado amortiguador	
		rápidos 2 p < 16	lentos 2 p > 16	rápidos 2 p < 16	lentos 2 p > 16
Reactancia subtransitoria (saturada) $x_d''$ en %	9 a 32	14 a 32	15 a 25	22 a 35	25 a 40
Reactancia transitoria (saturada) $x_d'$ en %	14 a 45	20 a 32	22 a 36	22 a 35	25 a 40
Reactancia síncrona (saturada) $x_d$ en %	120 a 300	80 a 140	75 a 125	80 a 140	75 a 125
Relación de cortocircuito $K_C$	0,33 a 0,8	0,7 a 1,6	0,8 a 1,2	0,7 a 1,6	0,8 a 1,2
Reactancia inversa $x_2$ en %	9 a 32	14 a 25	15 a 27	36 a 63	35 a 60
Reactancia homopolar $x_0$ en %	2 a 20	3 a 20	3 a 22	4 a 24	4 a 30
Constante de tiempo subtransitoria $T_d''$ en s	0,02 a 0,05	0,02 a 0,05	0,02 a 0,05	—	—
Constante de tiempo transitoria $T_d'$ en s	0,4 a 1,8	0,7 a 2,5	0,7 a 2,5	0,7 a 2,5	0,7 a 2,5
Constante de tiempo de la com- ponente aperiódica $T_g$ en s	0,07 a 1,00	0,10 a 0,40	0,10 a 0,40	0,15 a 0,50	0,20 a 0,50

Resistencia efectiva del generador  $R_G = 0,07 X_d''$  para  $S_{NG} < 100$  MVA y  
 $R_G = 0,05 X_d''$  para  $S_{NG} \geq 100$  MVA.

## Generadores síncronos de baja tensión

	Turbo- generadores	Número de polos	Generadores de polos salientes	Número de polos
Potencia nominal en kVA	40 a 1.400		1.600 a 3.600	
Reactancia subtransitoria (saturada) $X_d''$ en %	10 a 15	4	10 a 12	2
		14	11 a 23	4
Reactancia transitoria (saturada) $x_d'$ en %	20 a 40	4	13 a 17	2
		14	26 a 36	4
Reactancia síncrona (no saturada) $x_d$ en %	150 a 300	4	170 a 220	2
		14	260 a 300	4
Relación de cortocircuito $K_C$	0,4 a 0,8	4	0,6 a 0,7	2
		14	0,4 a 0,5	4
Reactancia inversa $x_2$ en %	$\approx x_d''$	4 a 14	$\approx x_d''$	2 + 4
Reactancia homopolar $x_0$ en %	$(0,4 a 0,8) x_d''$	4 a 14	$(0,4 a 0,6) x_d''$	2 + 4
Constante de tiempo subtransitoria $T_d''$ en s	0,002 a 0,03	4 a 14	0,02 a 0,035	2 + 4
Constante de tiempo transitoria $T_d$ en s	0,006 a 1,0	4 a 14	0,5 a 1,2	2 + 4
Constante de tiempo de la com- ponente aperiódica $T_g$ en s	0,008 a 0,1	4 a 14	0,03 a 0,15	2 + 4

Resistencia efectiva del generador  $R_G = 0,15 X_d''$

## Valores característicos de los transformadores en aceite\*

Transformadores de distribución con conexión estrella/zigzag y triángulo/estrella según DIN 42 500/503/511, ediciones 4/67 y 11/68

Forma del núcleo	3 columnas			
Conexión	Yzn		Dyn	
$U_m$ kV	3,6 a 24	3,6 a 36	3,6 a 24	3,6 a 36
$S_N$ kVA	<250	<250	250 a 630	250 a 1.600
$u_k$ %	4	6	4	6
$u_R$ %	2,15 a 1,50	2,30 a 2,0	1,65 a 2,05	1,80 a 1,25
$(X_0/X_1)_s$	0,07 a 0,11	0,10 a 0,09	0,95 a 1,0	0,95 a 1,0
$(R_0/R_1)_s$	0,45 a 0,54	0,56 a 0,57	1,2 a 1,8	1,2 a 1,8

Transformadores de alta tensión de media potencia con conexión estrella/triángulo según DIN 42 504/508, ediciones 2/71 y 4/67

Forma del núcleo	3 columnas						
Conexión	YNd						
$U_m$ kV	3 a 36		72,5	123	36	72,5	123
$S_N$ MVA	2 a 4	5	6,3 a 10		12,5 a 40		
$u_{kps}$ %	6	7	8	10	10	11	12
$u_{Rps}$ %	1,05 a 0,85	0,70 a 0,65	0,75 a 0,65	0,85 a 0,70	0,60 a 0,45	0,65 a 0,45	0,60 a 0,50
$(X_0/X_1)_p$	0,85 a 1,0						
$(R_0/R_1)_p$	1,0 a 3,0						

\* Subíndices: p = primario, s = secundario, t = terciario

Transformadores con conexión estrella/estrella o autotransformadores en estrella (columna 2) de alta tensión y gran potencia con devanado estabilizador en triángulo

Forma del núcleo	3 columnas		5 columnas*
Conexión	YNyn(d)	YNa(d)	YNyn(d)
$U_m$ kV	123 a 420	245 a 420	245 a 420
$S_N$ MVA	20 a 300	a 240	350 a 600
$u_{kps}$ %**	10 a 20	9 a 10	13 a 21
$u_{kpt}$ %	13 a 37	17 a 24	17 a 50
$u_{kst}$ %	6 a 32	14 a 37	11 a 46
$u_{Rps}$ %	0,3 a 0,2	0,3 a 0,15	0,3 a 0,2
$u_{Rpt}$ %	1,0 a 0,2	0,7 a 0,5	1,0 a 0,2
$u_{Rst}$ %	1,0 a 0,2	1,0 a 0,5	1,0 a 0,2
$(X_0/X_1)_{pt}$	0,60 a 0,85	0,75	0,95 a 1,0
$(X_0/X_1)_{st}$	0,65 a 0,90	0,80	0,90 a 1,0
$(X_0/X_1)_{ps}$	0,85 a 0,95	0,90	1,0 a 1,1
$(R_0/R_1)_{pt}$	1,6 a 3,5	1,2 a 1,8	1,3 a 1,8
$(R_0/R_1)_{st}$	1,2 a 2,8	1,3 a 2,1	0,7 a 1,9
$(R_0/R_1)_{ps}$	1,4 a 3,7	2,2 a 2,9	1,1 a 2,0

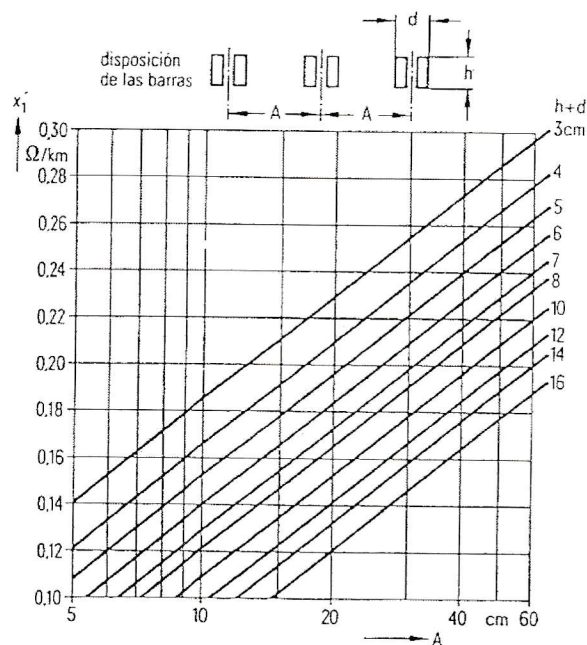
\* Los valores característicos de los transformadores monofásicos coinciden prácticamente con los de los transformadores de 5 columnas.

\*\* Valores porcentuales referidos a  $S_N$  (subíndice ps) o a  $S_N/3$  (subíndices pt y st)

Transformadores de alta tensión de gran potencia con conexión estrella/triángulo

Forma del núcleo	3 columnas			5 columnas		
Conexión	YNd			YNd		
$U_m$ kV	123	145 a 245	300 a 420	123	245	420
$S_N$ MVA	50 a 350	50 a 350	100 a 350	330	440 a 1.000	270 a 1.000
$u_{kps}$ %	13 a 14	13 a 16	12 a 16	16,5	14,5 a 17,5	14 a 18
$u_{Rps}$ %	0,40 a 0,20	0,40 a 0,20	0,35 a 0,20	0,22	0,25 a 0,20	0,27 a 0,20
$(X_0/X_1)_p$	0,85 a 1,0	0,85 a 1,0	0,85 a 0,95	$\approx 1$	$\approx 1$	$\approx 1$
$(R_0/R_1)_p$	1,5 a 2,8	1,3 a 2,9	1,8 a 2,0	1,1	1,0 a 1,1	1,0 a 1,1

Valores característicos de las barras de las instalaciones de maniobra

Reactancias inductivas  $X'$  en ohmios/km por fase para barras rectangulares

Conviene recordar a falta de más información algunos valores característicos, así tenemos:

- **Líneas aéreas con conductores desnudos:**
  - De media y alta tensión:  $X_K = 0,4 \Omega/\text{km}$ .
  - De media o baja tensión:  $X_K = 0,3 \Omega/\text{km}$ .

- **Líneas aéreas con conductores aislados:**
  - Cable trifásico en media tensión:  $X_K = 0,1 \div 0,15 \Omega /\text{km}$ .
  - Cable trifásico en baja tensión:  $X_K = 0,08 \Omega /\text{km}$ .
- **Interruptores automáticos de B.T. :**
  - Es correcto tomar una reactancia de  $X_L = 0,15 \text{ m } \Omega$  y despreciar la resistencia.
- **Conjunto de motores:**

Si se conoce la impedancia en el arranque de estos motores, que es una impedancia subtransitoria, se puede calcular la contribución de los motores a la corriente de cortocircuito, pero a falta de mas información se puede comparar el conjunto de los motores a un generador único que aporta al juego de barras una intensidad igual a 3 veces la suma de las intensidades nominales de todos los motores.

De todos modos la aportación de los motores a la corriente de cortocircuito, no se considera si:

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I''_k$$

Siendo:

- $\Gamma I_{rM}$  = Suma de las corrientes asignadas a los motores conectados directamente, sin intermedio de transformadores, a la red donde se produce el cortocircuito.
- $I''_k$  = Corriente de cortocircuito inicial simétrica sin la contribución de los motores.

- **Impedancia homopolar de las líneas aéreas con conductores desnudos:**

La impedancia homopolar de las líneas aéreas tiene por valor aproximadamente:  $Z_0 = 3 Z_1$  y es muy frecuente despreciar la resistencia frente a la reactancia, de donde  $X_0 = 3 X_1$ .

- **Impedancia homopolar de los cables aislados de baja y de alta tensión:**

Su valor depende de las técnicas y normas nacionales y pueden obtenerse de los manuales técnicos o de los datos del fabricante.

A título informativo y tomando como referencia el MT 2.33.01:2001 y para los conductores empleados en las líneas de Media Tensión a 20 kV, sus características eléctricas para la disposición indicada son las siguientes:

- Los cables son unipolares instalados al tresbolillo y en contacto mutuo.
- La corriente de retorno se supone repartida entre el terreno y las pantallas metálicas de los cables.
- Se ha supuesto una resistividad eléctrica del terreno de  $100 \Omega/\text{m}$ .

TIPO DE CABLE	$R_1$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X_1$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$R_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )
RHV 12/20 kV Al 1x95/16	0,403	0,120	1,324	0,667
RHV 12/20 kV Al 1x150/16	0,262	0,112	1,177	0,662
RHV 12/20 kV Al 1x240/16	0,161	0,105	1,068	0,657
RHV 12/20 kV Al 1x400/16	0,098	0,102	1,000	0,654
DHV 12/20 kV Al 1x95/16	0,403	0,120	1,324	0,667
DHV 12/20 kV Al 1x150/16	0,262	0,112	1,177	0,662
DHV 12/20 kV Al 1x240/16	0,161	0,105	1,068	0,657
DHV 12/20 kV Al 1x400/16	0,102	0,098	1,000	0,654
HEPRZ1 12/20 kV Al 1x150/16	0,206	0,112	1,173	0,638
HEPRZ1 12/20 kV Al 1x240/16	0,125	0,105	1,064	0,634
HEPRZ1 12/20 kV Al 1x400/25	0,078	0,098	0,998	0,631
HEPRZ1 18/30 kV Al 1x150/25	0,206	0,121	0,970	0,360
HEPRZ1 18/30 kV Al 1x240/25	0,125	0,113	0,866	0,355
HEPRZ1 18/30 kV Al 1x400/25	0,078	0,106	0,804	0,351
HEPRZ1 26/45 kV Al 1x185/25	0,164	0,120	0,92	0,370
HEPRZ1 26/45 kV Al 1x300/25	0,100	0,115	0,835	0,364
HEPRZ1 26/45 kV Al 1x500/25	0,061	0,108	0,788	0,361
HEPRZ1 36/66 kV Al 1x185/25	0,164	0,314	0,117	0,379
HEPRZ1 36/66 kV Al 1x300/25	0,100	0,122	0,833	0,372

Para mayor información, en relación con los valores de las impedancias tanto: directas como inversas y homopolares de máquinas eléctricas y líneas, recomendamos la lectura detallada de la norma UNE 60909-2:2010.IN en el que se abordan tanto por medio de tablas o gráficos estos valores para distintos países.

**3.16 EL MÉTODO DE CÁLCULO POR UNIDAD (p.u.).-**

Cuando se estudian las corrientes de cortocircuito o las corrientes en cada una de las partes de una instalación, sobre todo en A.T. tenemos dispuestos transformadores que definen distintos niveles de tensión y es necesario referir las resistencias y reactancias al nivel eléctrico en el que se produce el cortocircuito o referir las impedancias al punto de la instalación donde se desean determinar tensiones y corrientes, esto por medio de las relaciones de tensiones que presentan los transformadores, esto significa una dificultad, y es donde tiene su aplicación el método p.u.

Para simplificar estos cálculos se usa habitualmente una normalización que constituye el método por unidad, en adelante p.u. La idea consiste en tomar unos valores base para las distintas magnitudes del sistema: tensión, corriente, impedancia, potencia, etc., y definir la correspondiente magnitud en tanto por unidad como sigue:

$$\text{Magnitud por unidad} = \frac{\text{Magnitud real}}{\text{Valor base}}$$

Los valores base deben cumplir las mismas relaciones que los valores reales, debiendo cumplir las leyes de los circuitos eléctricos, en régimen permanente senoidal las magnitudes reales están representadas por números complejos y por tanto los valores base se corresponden con los módulos de las magnitudes eléctricas: valor eficaz de la tensión, módulo de la impedancia valor eficaz de la corriente y potencia aparente.

Los valores base han de cumplir las relaciones o ecuaciones modulares:

$$U_{BASE} = Z_{BASE} I_{BASE} \quad S_{BASE} = U_{BASE} I_{BASE}$$

La transformación en valores p.u. se realiza dividiendo la relación o ecuación en magnitudes reales por las correspondientes magnitudes base, esto es:

$$\frac{\vec{U}}{U_{BASE}} = \frac{\vec{Z} \vec{I}}{Z_{BASE} I_{BASE}} \quad \frac{\vec{S}}{S_{BASE}} = \frac{\vec{U} \vec{I}}{U_{BASE} I_{BASE}}$$

Es evidente que especificando dos cualesquiera de las cantidades anteriores las otras quedan determinadas, normalmente se definen la  $U_{BASE}$  y  $S_{BASE}$  y a partir de ellas se han determinado las relaciones entre corrientes e impedancias. En efecto:

$$I_{BASE} = \frac{S_{BASE}}{U_{BASE}} \quad ; \quad Z_{BASE} = \frac{U_{BASE}}{I_{BASE}} = \frac{U_{BASE}^2}{S_{BASE}} \quad ; \quad Y_{BASE} = \frac{1}{Z_{BASE}}$$

A partir de estas consideraciones el análisis de una red eléctrica compleja con diferentes niveles de tensión (distintos transformadores) es donde se aplica el método p.u. Conocido el esquema unificar del sistema el procedimiento para su estudio en p.u. consta de los siguientes pasos:

- 1°) Considerar el sistema dividido en secciones según el número de transformadores que formen parte del sistema.
- 2°) Se elige una potencia base  $S_B$  común para todo el sistema, típicamente 100 MVA para el nivel de transporte.
- 3°) Se toma una tensión base  $U_B$  en una de las secciones. A continuación se calculan las  $U_B$  de las otras secciones empleadas, utilizando la relación de tensiones del transformador correspondiente.
- 4°) Se calcula  $Z_B$  en cada una de las secciones a partir de los valores correspondientes a las citadas secciones.

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} \quad (\Omega) \quad (3.104)$$

- 5°) Para tener en cuenta los desfases entre las magnitudes primarias y secundarias (definidas por el índice horario del transformador), se puede definir para cada sección, un **ángulo de base**  $\alpha_B$ . Para ello se toma un valor cualquiera para el ángulo de fase de partida de una determinada sección se calculan los ángulos de base de las otras secciones de acuerdo con el índice horario de los transformadores presentes en el sistema supuestos en vacío.
- 6°) Se calculan los valores p.u. de las impedancias de cada componente en cada una de las secciones del sistema empleando las impedancias base correspondientes a cada sistema. Las impedancias de las líneas de transmisión se dan normalmente mediante sus valores óhmicos, con lo que se determinará el valor correspondiente en p.u. como:

$$Z_{p.u.} = \frac{Z_{RED}}{Z_B} \quad (3.105)$$

Los valores de las impedancias de los generadores y de los transformadores los facilitan los fabricantes (están explicitados en la placa de características) generalmente en porcentaje o p.u. respectivamente de magnitudes base coincidentes con los valores nominales de la máquina.

Como la potencias base común y la tensión base no siempre van a coincidir con los valores nominales de la máquina en cuestión, es necesario en ocasiones realizar un **cambio de base**. Sea por tanto  $Z_{p.u.1}$  la impedancia por unidad referida a una potencia base  $S_B$  y a una tensión base  $U_{B1}$  y sea  $Z_{p.u.2}$  la impedancia por unidad referida a la misma potencia base  $S_B$  y a otra tensión base  $U_{B2}$ . La relación entre las impedancias referidas a las dos bases distintas se obtiene teniendo en cuenta que:

$$Z_{REAL.} = Z_{p.u.1} Z_{B1} = Z_{p.u.2} Z_{B2} = Z_{p.u.1} \frac{U_{B1}^2}{S_B} = Z_{p.u.2} \frac{U_{B2}^2}{S_B}$$

por lo que cuando deseemos pasar una impedancia situada a un nivel eléctrico distinto de la tensión base, simplemente efectuaremos la operación:

$$Z_{p.u.} = Z_{REAL} \frac{U_{B2}^2}{S}$$

por otro lado, las resistencias o reactancias de transformadores o generadores están directamente expresadas en p.u. en efecto sabemos que:

$$X_T = \frac{u_X \%}{100} \frac{U_{20T}^2}{S_T} = X_{T p.u.} \frac{U_{20T}^2}{S_T}$$

$$R_T = \frac{u_\Omega \%}{100} \frac{U_{20T}^2}{S_T} = u_{\Omega p.u.} \frac{U_{20T}^2}{S_T}$$

de donde para pasar los valores en p.u. de dichas reactancias o resistencias, que están referidas a una cierta base definida por la tensión y potencia de este nivel eléctrico, a la base común del circuito, simplemente realizaremos un cambio de base de las potencias, en efecto:

Para pasar la impedancia a otro nivel eléctrico se divide por la relación de tensiones al cuadrado, de donde:

$$X'_T = \frac{X_T}{\left(\frac{U_{20T}}{U_B}\right)^2} = X_{T p.u.} \frac{U_{20T}^2}{\left(\frac{U_{20T}}{U_B}\right)^2 S_T} = \frac{X_{T p.u.} U_B^2}{S_T}$$

expresada en p.u. referida a la impedancia base, resulta ser:

$$X_{T p.u.2} = \frac{X'_T}{Z_B} = \frac{X_{T p.u.} U_B^2}{\frac{U_B^2}{S_B} S_T} = X_{T p.u.} \frac{S_B}{S_T} \quad (3.106)$$

$$R_{T p.u.2} = \frac{X'_T}{Z_B} = \frac{X_{T p.u.} U_B^2}{\frac{U_B^2}{S_B} S_T} = R_{T p.u.} \frac{S_B}{S_T} \quad (3.107)$$

- 7º) Se calculan los valores p.u. de la tensión o tensiones que sean datos.
- 8º) Se dibuja el esquema de impedancias por fase del sistema interconectando las fuentes y las impedancias en valores p.u. siguiendo el esquema unificar.
- 9º) Se resuelve el esquema en valores p.u.
- 10º) Por último se pasan los resultados obtenidos en valores p.u. a sus respectivos valores reales empleando los valores base adecuados de acuerdo con sección. En general, para una zona con unos valores base  $U_B$ ,  $S_B$  y  $\alpha_B$ , cualquier variable compleja en

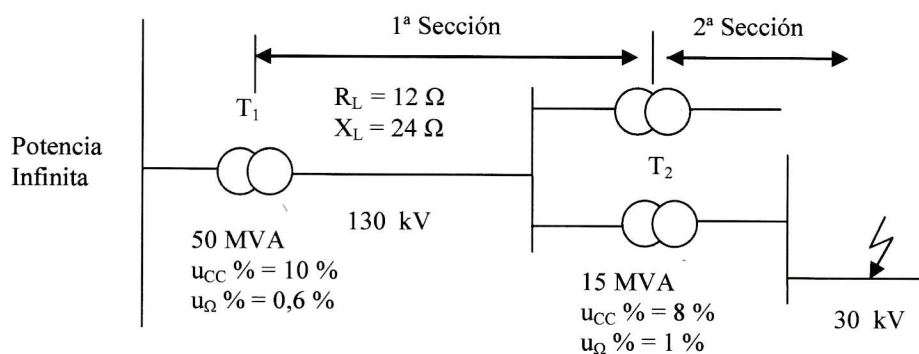
valor p.u. de intensidad  $I_{p.u.} \angle \gamma^\circ$  o tensión  $U_{p.u.} \angle \theta^\circ$  se puede pasar a valores reales mediante las expresiones:

$$\vec{I} = I_{p.u.} \angle \gamma^\circ I_B \angle \alpha_B^\circ \quad \vec{U} = U_{p.u.} \angle \gamma^\circ U_B \angle \alpha_B^\circ$$

Las ventajas que significa el estudio de redes eléctricas por el método p.u. son notables. Quizá la más importante es el hecho, ya mencionado de que tomando los valores de base adecuados, las relaciones de transformación desaparecen del problema. Pero existen otras que también se pueden destacar:

- Los parámetros de los distintos elementos son más uniformes. Los valores óhmicos reales difieren ampliamente para equipos de diferentes tamaños (valores nominales) pero difieren poco cuando se expresan en valores p.u. Esto hace que sea posible estimar impedancias p.u. no conocidas e identificar datos erróneos.
- Simplificación en los cálculos y reducción de errores computacionales.
- No hay que distinguir entre magnitudes de base y magnitudes de línea.
- Los resultados obtenidos en los cálculos del sistema tiene valores acotados (por ejemplo, las tensiones en los nudos en condiciones normales de funcionamiento varían alrededor del valor 1 p.u.) por lo que los errores se hacen más evidentes.

Creemos necesario ilustrar con un ejemplo la aplicación del método de cálculo p.u. para su mejor comprensión, sea por tanto el sistema siguiente en el que produce un cortocircuito trifásico en el punto indicado:



- Figura 3.31 -

El proceso de cálculo a tenor de los pasos definidos anteriormente son:

- 1º) Considerar el sistema dividido en dos secciones, la 1ª sección entre el  $T_1$  y el  $T_2$  y la 2ª sección entre el  $T_2$  y el punto de cortocircuito.
- 2º) Se elige una potencia base común para todo el sistema, en nuestro caso por comodidad elegimos la potencia del  $T_2$ , es decir de 15 MVA

$$S_{BASE} = 15 \text{ MVA}$$

3°) Se elige una tensión base para una sección, elegimos por tanto para la sección 2° una tensión base de 30 kV

$$U_{BASE 2} = 30 \text{ kV}$$

a partir de esta tensión base se obtienen las tensiones base en el resto de secciones empleando para ello las relaciones de transformación de los transformadores implicados, en nuestro caso:

$$U_{BASE 1} = 30 \frac{130}{30} = 130 \text{ kV}$$

$Z_{pu} =$

4°) Se definen las impedancias base de cada sección:

$$Z_{BASE 1} = \frac{U_{BASE 1}^2}{S_{BASE}} = \frac{130000^2}{15 \cdot 10^6} = 1126,66 \text{ } \Omega$$

$$Z_{BASE 2} = \frac{U_{BASE 2}^2}{S_{BASE}} = \frac{30000^2}{15 \cdot 10^6} = 60 \text{ } \Omega$$

5°) Calculo de las impedancia p.u. de cada uno de los elementos del sistema, utilizando las impedancias base correspondientes a cada sección.

Transformador 2°:

$Z_{pu} \text{ BASE 1} =$

Los valores están ya referidos a los valores base por tanto en p.u. son

$$X_{T2 p.u. BASE 2} = \sqrt{0,08^2 - 0,01^2} = 0,0793 \text{ p.u.}$$

$$R_{T2 p.u. BASE 2} = 0,01 \text{ p.u.}$$

$$Z_{T2} = \sqrt{0,08^2 - 0,01^2}$$

Línea:

$$Z_{LÍNEA p.u. BASE 2} = \frac{Z_{LÍNEA}}{Z_{B1}} = \frac{12 + j 24}{1126,66} = 1,065 \cdot 10^{-2} + j 2,1301 \cdot 10^{-2} \text{ } \Omega$$

Transformador 1°:

$$X_{T1 p.u.} = \sqrt{0,1^2 - 0,006^2} = 0,0998 \text{ p.u.}$$

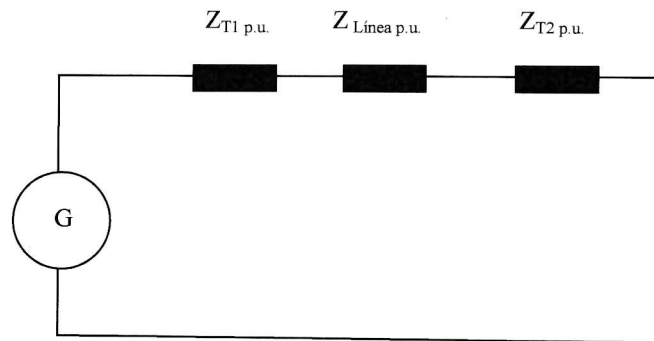
$$R_{T1 p.u.} = 0,006 \text{ p.u.}$$

Pero las magnitudes anteriores están referidas en p.u. a la tensión de transformador 130 kV y a la potencia aparente del transformador 50 MVA, por tanto para referirlas en p.u a la base de la sección 2 es necesario realizar un cambio de la base potencia, por tanto resulta:

$$X_{T1 p.u. BASE 2} = X_{T1 p.u.} \frac{15}{50} = 0,0998 \frac{15}{50} = 0,02994 \text{ p.u.}$$

$$R_{T1 p.u. BASE 2} = R_{T1 p.u.} \frac{15}{50} = 0,006 \frac{15}{50} = 0,0018 \text{ p.u.}$$

6°) Se dibuja el diagrama vectorial de impedancias en el que todos los valores están expresado en p.u. referido a la base elegida:



- Figura 3.32 -

7°) Se calcula impedancia en p.u del circuito:

$$\begin{aligned} Z_{TOTAL p.u.} &= (0,0018 + 1,065 \cdot 10^{-2} + 0,01) + j(0,02994 + 2,1301 \cdot 10^{-2} + 0,0793) = \\ &= 0,02245 + j 01305 = 0,1324 \quad |_{80,23^\circ} \end{aligned}$$

8°) La corriente de cortocircuito en valores p.u.

$$I''_{K3 p.u.} = \frac{1,1 U_{p.u.}}{\Sigma \bar{Z}_{p.u.}} = \frac{1,1 \cdot 1}{0,1324} = 8,308 \text{ p.u.}$$

9°) Cálculo de la corriente en valor absoluto

$$I''_{K3} = I''_{K3 p.u.} I_{BASE} = I''_{K3 p.u.} \frac{S_{BASE}}{\sqrt{3} U_{BASE}} = 8,308 \frac{15}{\sqrt{3} 30} = 2,398 \text{ (kA)}$$

TRIPOLAR

SIN  
BIPOLAR CONTACTO  
A TIERRA

CON  
BIPOLAR CONTACTO  
A TIERRA

UNIPOLAR A TIERRA

---

# FALTAS SIMÉTRICAS

---

El estudio de faltas en un sistema eléctrico es una tarea imprescindible para la selección de interruptores, el dimensionado de diversa aparellaje y el ajuste y coordinación de protecciones. Las faltas, que pueden tener muy distintos orígenes, son fenómenos rápidos, de entre 20 ms y 1 s de duración, hasta que son despejadas por los interruptores. En ese intervalo de tiempo se aprecian distintas componentes en las ondas de intensidad.

En el desarrollo de la falta, dependiendo del instante en que se produzca ésta, puede aparecer una componente de continua de decaimiento exponencial. Superpuesta a ella, habrá una senoide con envolvente exponencial. Dicha envolvente, antes de estabilizarse en un régimen permanente, sufre en las proximidades de los generadores un decaimiento en un período que llamamos transitorio. Los valores típicos de las intensidades en este período se estudian considerando un régimen senoidal permanente en el que, como reactancias de los generadores próximos, se consideran sus reactancias transitorias  $X'_d$ . Previamente a este período puede incluso distinguirse un período de decaimiento más rápido conocido como período subtransitorio, gobernado por las reactancias subtransitorias  $X''_d$ . Pasados estos períodos, la senoide se estabiliza en un régimen permanente en el que los generadores se consideran con sus reactancias síncronas  $X_d$ .

Las faltas simétricas, pese a ser poco frecuentes, resultan de especial interés en tanto que usualmente producen las mayores intensidades de cortocircuito. De especial relevancia resultan los valores de la intensidad de cortocircuito en los instantes de actuación de los interruptores, los cuales se utilizarán para su dimensionado y en cuyo cálculo, de acuerdo a las normas, habrá que incluir tanto la componente de continua como los valores calculados para el fasor  $J_{cc}$  en el período subtransitorio. Para el correcto calibrado de los relés de protección pueden interesarnos los valores del fasor  $J_{cc}$  tanto en el período subtransitorio como en el régimen permanente.

El análisis fasorial de una falta simétrica requiere, en primer lugar, establecer en qué marco temporal nos interesan las magnitudes, para utilizar las reactancias apropiadas en las máquinas síncronas próximas al punto de fallo.

# PROBLEMAS RESUELTOS

- 12.1. Del sistema de la Figura 12.4 se sabe que se produce un cortocircuito simétrico en la barra 1 y que los datos del sistema, con magnitudes p.u. correspondientes a  $S_B = 300$  MVA, son los siguientes:

<b>Generadores</b>	300 MVA	$X_d'' = 0.08j$ p.u.
<b>Trafos</b>	300 MVA	$X = 0.12j$ p.u.
<b>Línea</b>	sin pérdidas	$X_L = 0.2j$ p.u.
<b>Carga 1</b>	resistiva	$R_1 = 2$ p.u.

Tabla 12.1

Se sabe, igualmente, que las fuentes con las que se modelan los dos generadores tienen tensiones p.u. de  $1 \angle 0$ .

Suponiendo cortocircuito rígido, calcular la componente de alterna de la  $J_{cc}$  inmediatamente después del fallo. Calcular también las tensiones en ambas barras, la intensidad que atraviesa la línea y las suministradas por los generadores.

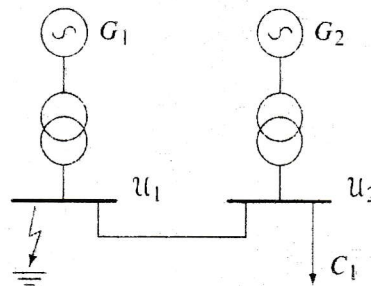


Figura 12.4 Sistema con fallo.

## Resolución

En este tipo de problemas no se considera el estado de carga previo al fallo, por lo que, pese a especificarse la carga en el enunciado, el sistema se considerará en vacío, como se muestra en la Figura 12.5.

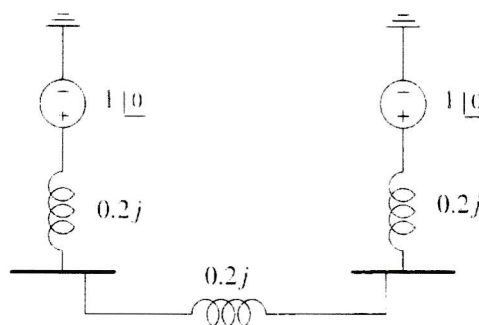
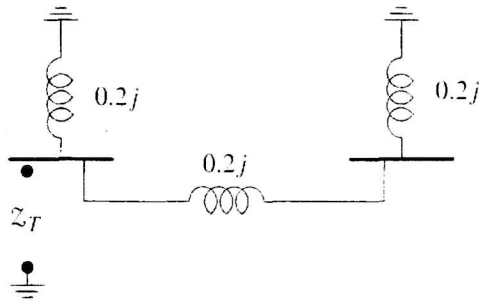


Figura 12.5 Modelo del sistema.

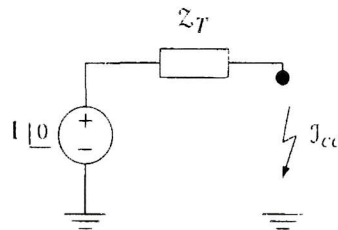
Calcularemos en primer lugar el equivalente Thevenin del sistema en el punto del fallo. Para ello, nos ayudaremos de la Figura 12.6, que corresponde al sistema en el que se han anulado las fuentes de tensión (modelo incremental). Basándonos en ella obtenemos:

$$Z_T = \frac{0.2j \cdot 0.4j}{0.2j + 0.4j} = 0.1333j$$

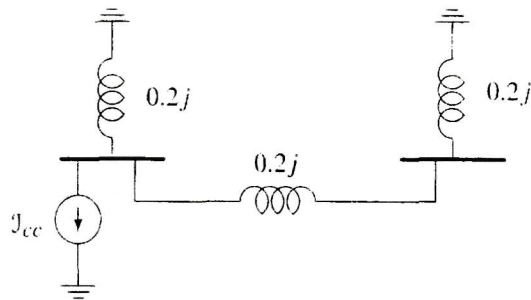

**Figura 12.6** Sistema pasivado.

Dicho valor de  $Z_T$  es el que debe considerarse en el equivalente de la Figura 12.7. Por tanto, la intensidad de corto vale:

$$J_{cc} = \frac{1}{Z_T} = -7.5j = 7.5 \angle -90$$


**Figura 12.7** Equivalente Thevenin.

El circuito de la Figura 12.8 (sistema pasivado y fallo sustituido por una fuente) nos permite obtener la contribución de cada generador al cortocircuito:


**Figura 12.8** Sustitución del cortocircuito.

Aplicando la expresión del divisor de intensidades:

$$J_1 = \frac{\frac{1}{0.2j}}{\frac{1}{0.2j} + \frac{1}{0.4j}} J_{cc} = 5 \angle -90$$

$$J_2 = \frac{\frac{1}{0.4j}}{\frac{1}{0.2j} + \frac{1}{0.4j}} J_{cc} = 2.5 \angle -90$$

y conseguidas éstas, la obtención de las tensiones es inmediata

$$\Delta u_1 = -0.2j \cdot j_1 = -1$$

$$\Delta u_2 = -0.2j \cdot j_2 = -0.5 \angle 0$$

El estado resultante, ignorando el estado de carga previo al fallo, es el que se muestra en la Figura 12.9.

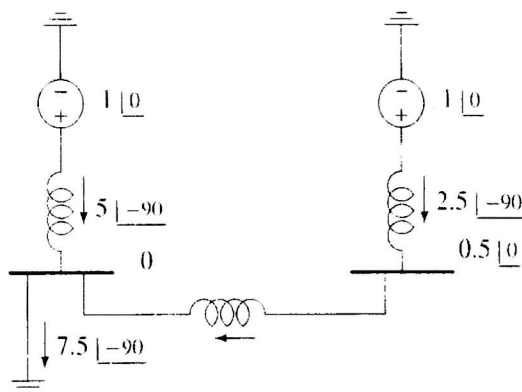


Figura 12.9 Estado tras el corto.

En la Figura 12.10 se muestra el resultado si se modela la carga como una resistencia. Se observa cómo la variación del resultado es mínima.

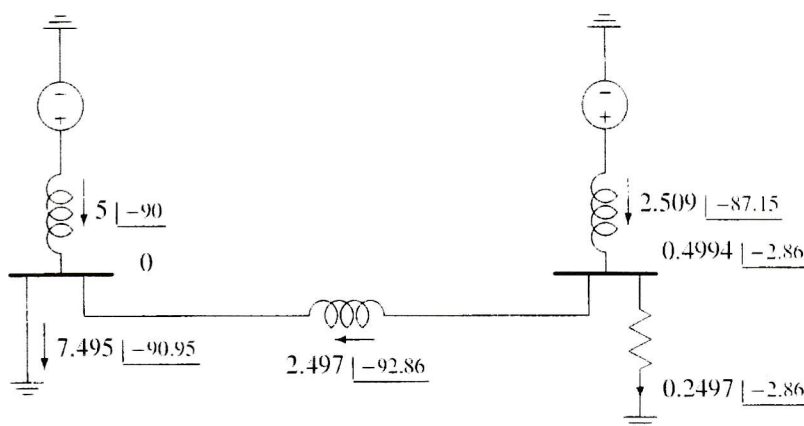


Figura 12.10 Estado tras el corto considerando la carga previa.

**12.2.** La matriz de impedancia de nudos de una red, usando reactancias subtransitorias, es:

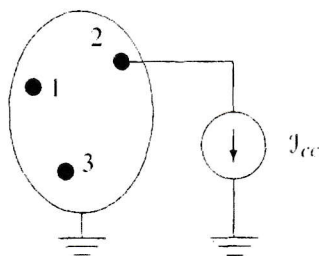
$$Z_n = j \begin{bmatrix} 0.4 & 0.1 & 0.3 \\ 0.1 & 0.8 & 0.5 \\ 0.3 & 0.5 & 1.2 \end{bmatrix}$$

Calcular la corriente subtransitoria en un fallo trifásico en la barra 2, y la tensión durante el fallo en las barras 1 y 3 (sistema en vacío, tensión antes del fallo 1 p.u.).

**Resolución**

Puesto que la impedancia Thevenin en el nudo 2 es  $Z_{22}$ , la intensidad de corto será:

$$J_{cc} = \frac{V^0}{Z_{22}} = \frac{1}{0.8j} = 1.25 \angle -90$$



**Figura 12.11** Sistema en situación de fallo.

En condiciones de fallo, como se ilustra en el esquema de la Figura 12.11, podemos obtener los incrementos respecto a estado de vacío como:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \end{bmatrix} = Z_n \begin{bmatrix} 0 \\ -J_{cc} \\ 0 \end{bmatrix}$$

luego

$$\Delta u_1 = -Z_{12} J_{cc} = -0.1j \cdot 1.25 \angle -90 = -0.125$$

$$\Delta u_3 = -Z_{32} J_{cc} = -0.5j \cdot 1.25 \angle -90 = -0.625$$

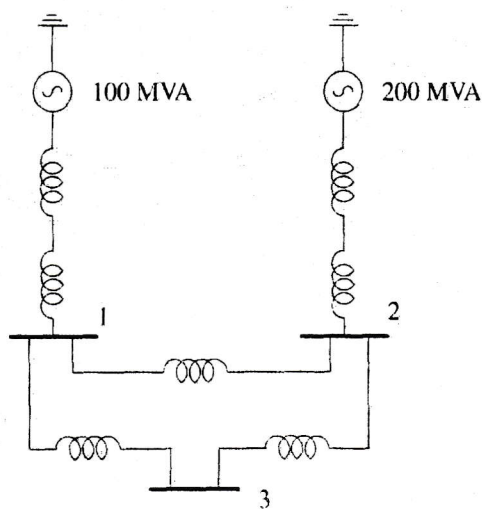
y

$$u_1 = 1 + \Delta u_1 = 0.875$$

$$u_3 = 1 + \Delta u_3 = 0.375$$

- 12.3.** Los 2 generadores de la Figura 12.12 alimentan a través de transformadores elevadores las barras 1 y 2. La reactancia equivalente para ambos conjuntos generador-transformador es de 0.3 p.u., en sus respectivas bases. Las tres líneas tienen una impedancia de 0.2 p.u. en 100 MVA. Encontrar, mediante métodos matriciales, la potencia de cortocircuito,  $S_{cc}$ , de las tres barras y las intensidades por las líneas ante un cortocircuito rígido en la barra 3.

**Nota:**  $S_B = 50$  MVA y  $u_i = 1$  p.u. antes del fallo.



**Figura 12.12** Sistema.

**Resolución**

La potencia de cortocircuito da una idea de la severidad del fallo:

$$S_{cc} = |J_{cc}| \cdot |E| = \frac{E^2}{X_T} \approx \frac{1}{X_T}$$

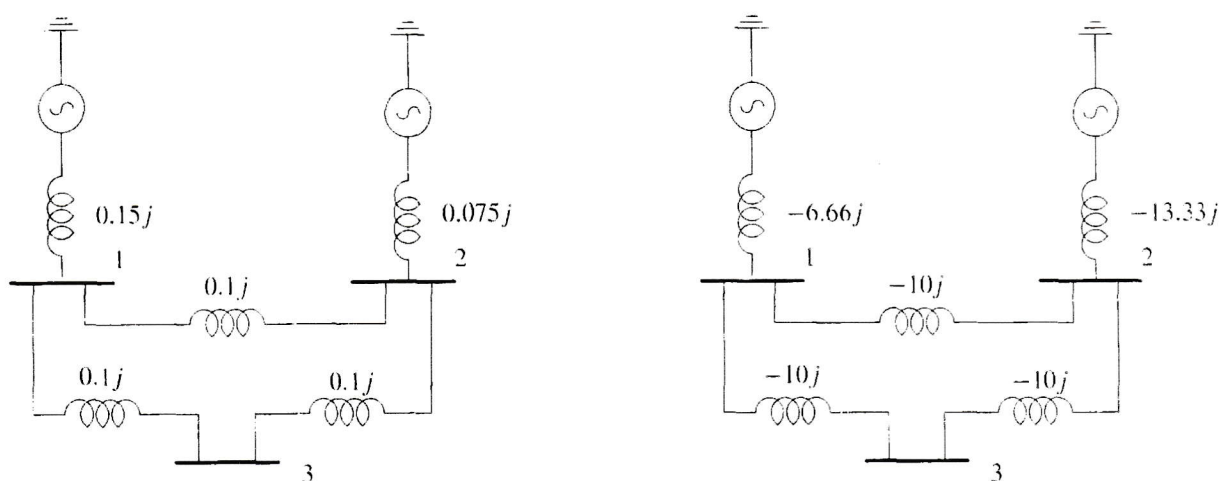
Conversión de base:

$$Z_{G1} = \frac{50}{100} \cdot 0.3 = 0.15$$

$$Z_{G2} = \frac{50}{200} \cdot 0.3 = 0.075$$

$$Z_L = \frac{50}{100} \cdot 0.2 = 0.1$$

El esquema en p.u. de la red se muestra en la Figura 12.13.



**Figura 12.13** Impedancias del sistema, a la izquierda, admitancias a la derecha.

Construyendo la matriz de admitancias

$$Y = j \begin{bmatrix} -26.6667 & 10 & 10 \\ 10 & -33.3333 & 10 \\ 10 & 10 & -20 \end{bmatrix}$$

y la matriz de impedancias de nudos

$$Z_n = Y^{-1} = j \begin{bmatrix} 0.0729 & 0.0386 & 0.0557 \\ & 0.0557 & 0.0471 \\ & & 0.1014 \end{bmatrix}$$

Las intensidades de cortocircuito en los distintos nudos,  $J_{f_i}$ , se obtienen usando las impedancias Thevenin,  $Z_{i,i}$ :

$$J_{f1} = \frac{1}{0.0729j} = -13.7255j \text{ p.u.}$$

$$J_{f2} = \frac{1}{0.0557j} = -17.9487j \text{ p.u.}$$

$$J_{f3} = \frac{1}{0.1014j} = -9.8592j \text{ p.u.}$$

Las  $S_{cc}$  de los nudos son, por tanto:

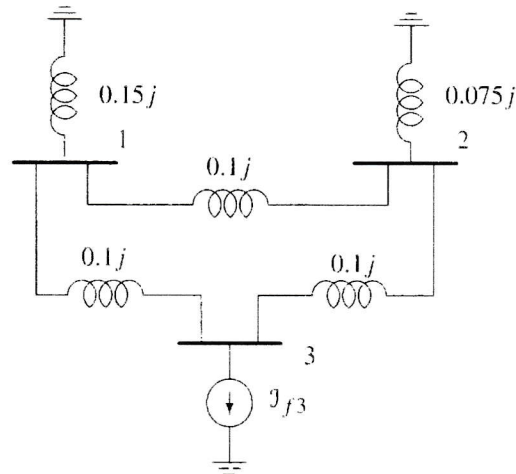
$$S_{cc1} \approx |J_{f1}| = 13.7255 \text{ p.u.}$$

$$S_{cc2} \approx |J_{f2}| = 17.9487 \text{ p.u.}$$

$$S_{cc3} \approx |J_{f3}| = 9.8592 \text{ p.u.}$$

Como era de esperar, el más crítico es el fallo en la barra 2 (mayor generador) y el nudo menos crítico es la barra 3 (generador más lejano).

En cuanto al caso concreto de un cortocircuito en el nudo 3, los incrementos en las magnitudes se obtienen, por el teorema de compensación, a partir del circuito de la Figura 12.14.



**Figura 12.14** Circuito para compensación.

Las ecuaciones nodales son:

$$Y \cdot \Delta V = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -J_{f3} \end{bmatrix}$$

$$\Delta V = Z_n \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -J_{f3} \end{bmatrix}$$

Sólo es necesaria la tercera columna de  $Z_n$  para el producto anterior. Así, considerando tensiones iniciales de valor unidad e  $J_{cc} = J_{f3} = -9.8592j$ :

$$u_1 = u_1^0 - Z_{13} \cdot J_{cc} = 0.4507 \text{ p.u.}$$

$$u_2 = u_2^0 - Z_{23} \cdot J_{cc} = 0.5352 \text{ p.u.}$$

$$u_3 = u_3^0 - Z_{33} \cdot J_{cc} = 0 \quad (\text{por ser corto rígido})$$

Las intensidades por las líneas son:

$$J_{12} = \frac{u_1 - u_2}{Z_{12}} = 0.8451j$$

$$J_{23} = \frac{u_2 - 0}{Z_{23}} = -5.3521j$$

$$J_{13} = \frac{u_1 - 0}{Z_{13}} = -4.507j$$

Como se ha visto, sólo ha sido necesario calcular la tercera columna de  $Z_n$ , lo cual podría haberse realizado eficientemente, en un caso de tamaño realista, mediante técnicas de vectores dispersos (eliminación

rápida hacia adelante y sustitución hacia atrás):

$$Y \cdot \begin{bmatrix} Z_{13} \\ Z_{23} \\ Z_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

12.4. La red de la Figura 12.15 tiene una matriz de impedancias de nudos:

$$Z_n = j \begin{bmatrix} 0.6026 & 0.1025 & 0.4026 \\ 0.1025 & 0.1025 & 0.1025 \\ 0.4026 & 0.1025 & 0.5226 \end{bmatrix}$$

que ya incluye la reactancia del generador  $X''_g = 0.1025$  p.u.

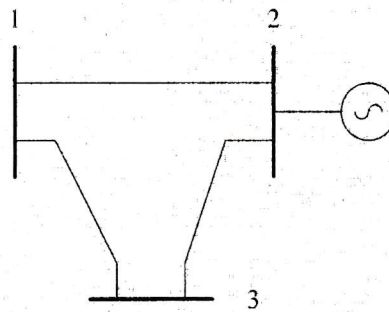


Figura 12.15 Sistema.

Se decide instalar en el nudo 1 un generador idéntico al existente. Calcular la nueva corriente de cortocircuito para un cortocircuito rígido en el nudo 3 y las nuevas tensiones tras el corto. Suponer tensiones iniciales 1 p.u.

**Resolución**

La matriz  $Z_n$  relaciona las tensiones en los nudos con las intensidades inyectadas según el modelo  $V = Z_n \cdot J_n$ , ilustrado por la Figura 12.16.

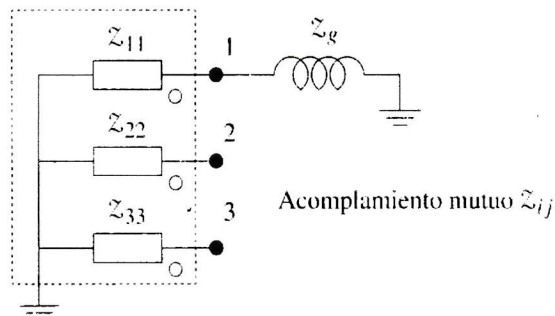


Figura 12.16 Modelo del sistema.

Al añadir un nuevo generador, el equivalente Thevenin desde el nudo 3 ha cambiado. La nueva impedancia del equivalente se obtiene resolviendo:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \\ J_3 \end{bmatrix}$$

con  $J_1 = \frac{-u_1}{Z_g}$ . Dichas ecuaciones corresponden al circuito de la Figura 12.17.

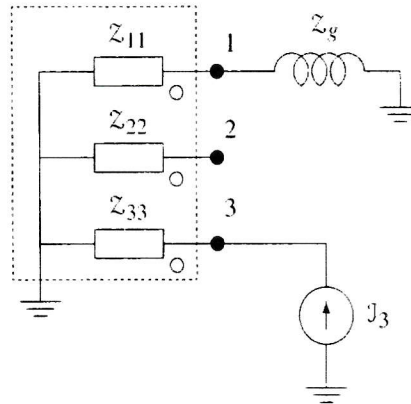


Figura 12.17 Circuito para la nueva impedancia equivalente.

Por lo tanto, tendremos

$$u_1 = Z_{11} \frac{-u_1}{Z_g} + Z_{13} J_3$$

$$u_3 = Z_{31} \frac{-u_1}{Z_g} + Z_{33} J_3$$

y eliminando  $u_1$ :

$$u_3 = \left[ Z_{33} - \frac{Z_{31} Z_{13}}{Z_g + Z_{11}} \right] J_3$$

Luego  $Z'_{33} = \frac{u_3}{J_3} = 0.2927j$ , y por tanto

$$J_{cc} \approx \frac{1}{X'_{33} j} = -3.4164j$$

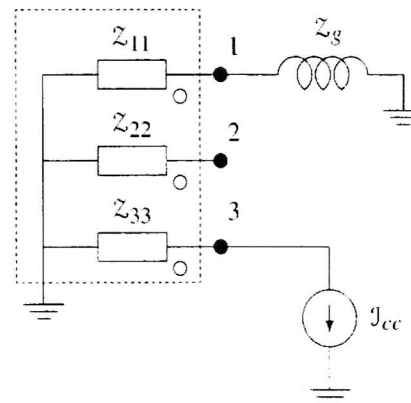


Figura 12.18 Circuito para compensación.

Los incrementos se obtienen de resolver el circuito de compensación de la Figura 12.18:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \end{bmatrix} = Z_n \begin{bmatrix} -\frac{\Delta u_1}{Z_g} \\ 0 \\ -J_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2 \\ -0.15 \\ -1 \end{bmatrix}$$

Y las tensiones quedan:

$$\begin{aligned} u_1 &= 1 + \Delta u_1 = 0.8 \\ u_2 &= 1 + \Delta u_2 = 0.85 \end{aligned}$$

$Z'_{33}$  también se podría haber obtenido a partir de  $Y_n$ :

$$Y_n = \begin{bmatrix} -3.5j & j & 2.5j \\ j & -12.422j & 1.666j \\ 2.5j & 1.666j & -4.166j \end{bmatrix}$$

modificándola con  $Y_g = -9.756j$

$$Y_n = j \begin{bmatrix} -13.256 & 1 & 2.5 \\ 1 & -12.422 & 1.666 \\ 2.5 & 1.666 & -4.166 \end{bmatrix}$$

e invirtiendo para obtener la matriz de impedancias de nudos tras la modificación

$$Z' = j \begin{bmatrix} 0.0876 & 0.0149 & 0.05853 \\ & 0.0876 & 0.0439 \\ & & \underline{0.2927} \end{bmatrix}$$

De este modo se ha conseguido el mismo valor  $Z'_{33} = 0.2927j$ .

## 12.5. Una red de alta tensión con matriz de admitancias de nudos:

$$Y_n = \begin{bmatrix} 0.12 - j & -0.02 + 0.2j & -0.1 + 0.8j \\ -0.02 + 0.2j & 0.1 - 1.5j & -0.08 + 0.9j \\ -0.1 + 0.8j & -0.08 + 0.9j & 0.18 - 2j \end{bmatrix}$$

se alimenta por la barra 1, de potencia de cortocircuito  $S_{cc} = 10$  p.u., y se desea estimar la intensidad de pico ante un cortocircuito trifásico en la barra 2 para su posterior uso en el cálculo de esfuerzos mecánicos. Dicha estimación se hará de acuerdo a la norma IEC 909-88 (equivalente a UNE 21-239-94), que para el cálculo de la intensidad de pico en cortocircuitos lejanos a alternadores ofrece varios métodos. Utilice el que se basa en la relación  $R/X$  en el punto del defecto:

$$I_{\text{pico}} \approx \sqrt{2} \chi_b I_{cc}$$

Donde  $\chi_b = 1.15(1.02 + 0.98e^{-3\frac{R}{X}})$ , salvo en redes de baja tensión, en que está limitado a 1.8 y en redes de alta tensión con el límite 2.0.

### Resolución

Introducimos en  $Y_n$  la reactancia del equivalente Thevenin de la alimentación,  $1/0.1j = -10j$ :

$$Y'_n = \begin{bmatrix} 0.12 - 11j & -0.02 + 0.2j & -0.1 + 0.8j \\ -0.02 + 0.2j & 0.1 - 1.5j & -0.08 + 0.9j \\ -0.1 + 0.8j & -0.08 + 0.9j & 0.18 - 2j \end{bmatrix}$$

Invirtiendo, conseguimos la matriz de impedancias nodal:

$$Z'_n = Y'^{-1}_n = \begin{bmatrix} 0.00018 + 0.0962j & -0.00267 + 0.0494j & -0.00244 + 0.0608j \\ -0.00267 + 0.0494j & 0.0508 + 0.9353j & 0.0215 + 0.4406j \\ -0.00244 + 0.0608j & 0.0215 + 0.4406j & 0.0527 + 0.7186j \end{bmatrix}$$

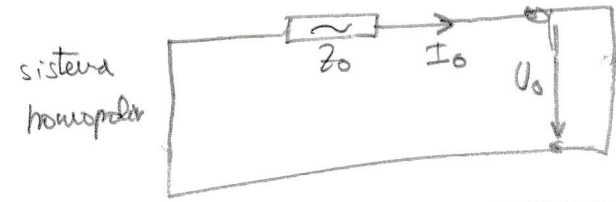
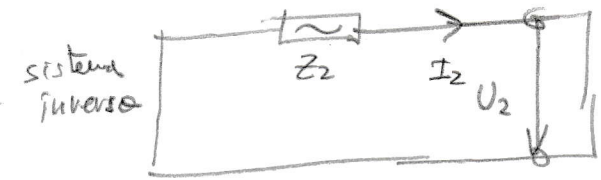
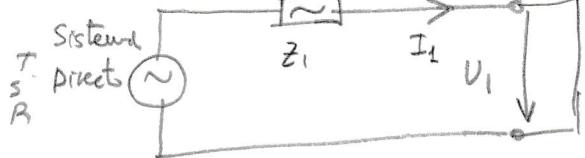
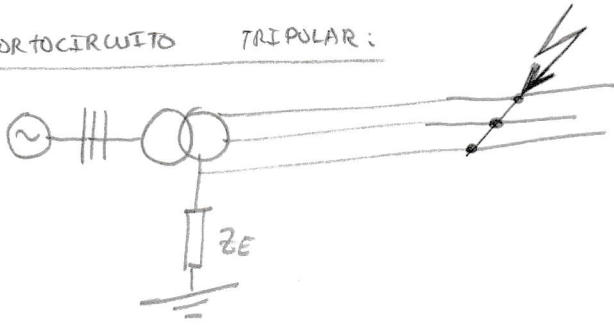
La impedancia Thevenin de la red en el punto del fallo a estudiar es  $\mathcal{Z}_T = 0.0508 + 0.9353j$ . Por tanto  $I_{cc} = 1/|\mathcal{Z}_T| = 1.0676$ . Para la estimación de la intensidad de pico necesitamos

$$\chi_b = 1.15(1.02 + 0.98e^{-3\frac{R}{X}}),$$

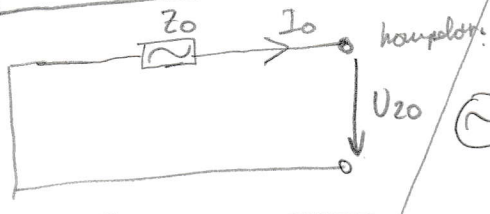
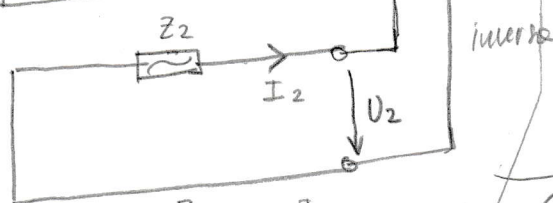
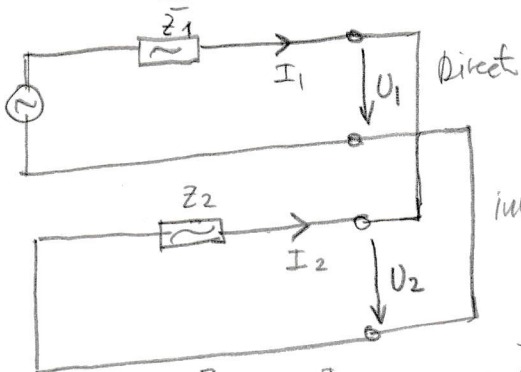
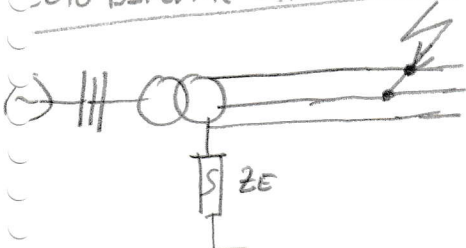
que puesto que  $R = 0.0508$  y  $X = 0.9353$  queda  $\chi_b = 2.13$ . Debemos imponer por tanto la cota  $\chi_b = 2$  de redes de alta con lo que obtenemos:

$$I_{\text{pico}} \approx 2\sqrt{2} 1.0676 = 3.0196$$

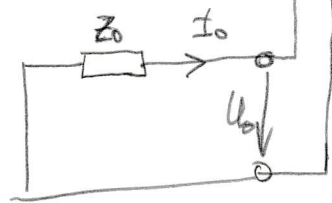
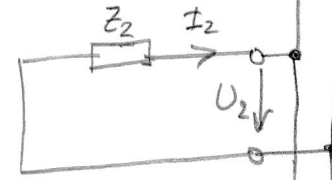
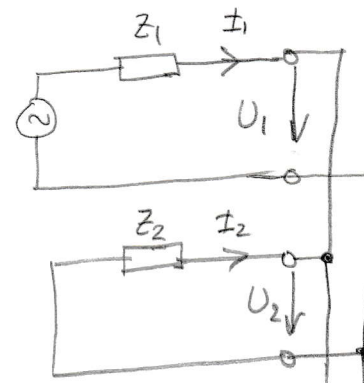
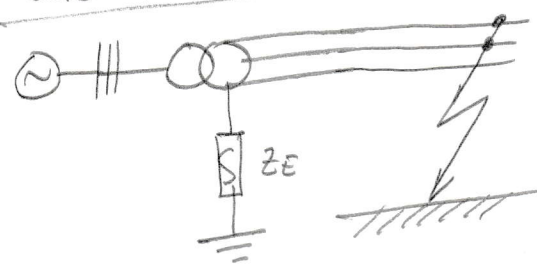
CORTOCIRCUITO TRIPOLAR:



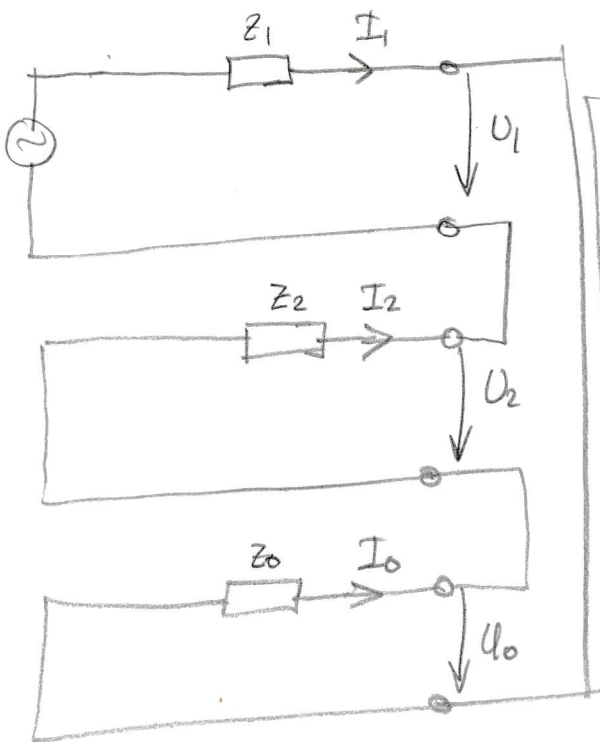
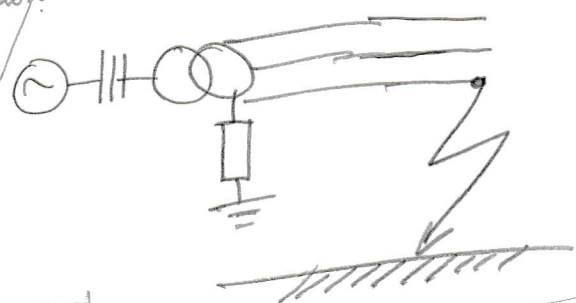
CCTO BIPOLAR SIN CONTACTO A TIERRA.



CCTO BIPOLAR CON CONTACTO A TIERRA.



CCTO UNIPOLAR TIERRA



• Redes trifásicas con tensión nominal  $> 1 \text{ kV}$

$C = 1'2$  para los cortos de carbocircuitos máximos

$C = 1$  para los cortos de cctos mínimos

• Redes trifásicas con tensión nominal  $\leq 1 \text{ kV}$

$C = 1'05$  para cortos cctos máximos

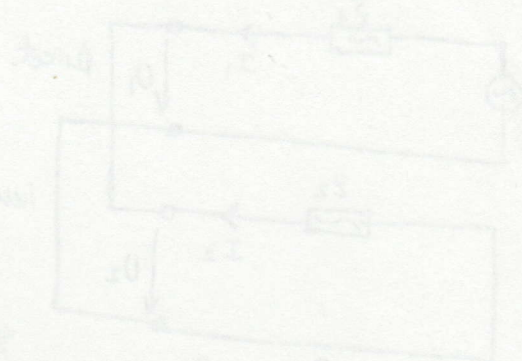
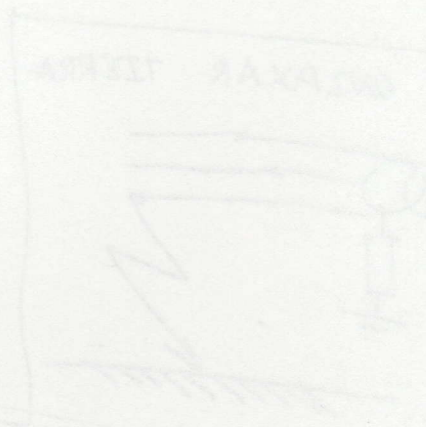
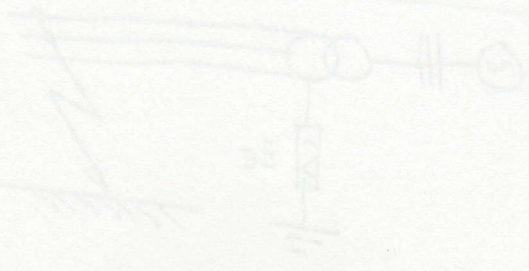
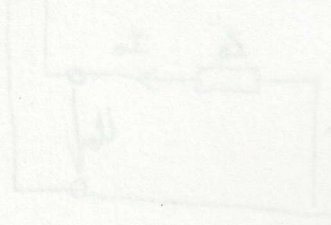
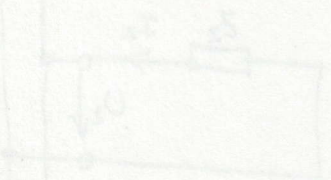
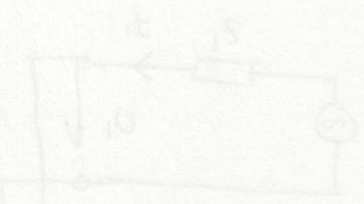
$C = 0'95$  para cortos cctos mínimos

$I_s = \text{Corrente de choque} \rightarrow I_s = k \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k$

↓  
 função  $\frac{R_k}{X_k}$  →

Alternadores de potência < 100 MVA →  $R = 0'07 X''_d$

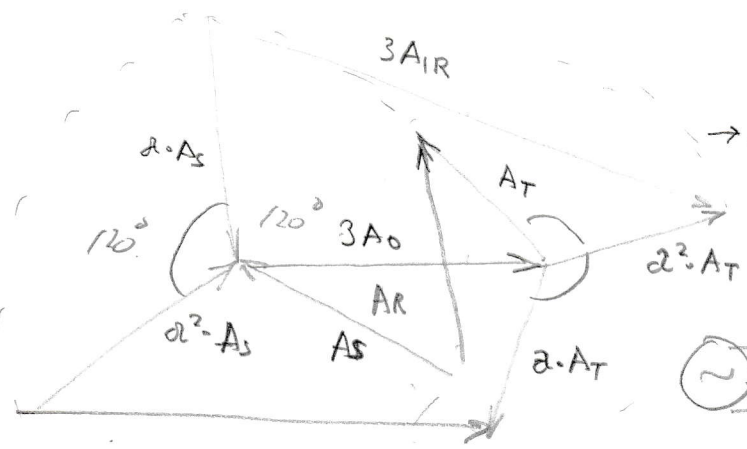
Alternadores de potência ≥ 100 MVA →  $R = 0'05 X''_d$



$V_{LL} > 100 \text{ kV}$  →  $R = 0'05 X''_d$   
 $V_{LL} < 100 \text{ kV}$  →  $R = 0'07 X''_d$   
 $V_{LL} < 10 \text{ kV}$  →  $R = 0'1 X''_d$

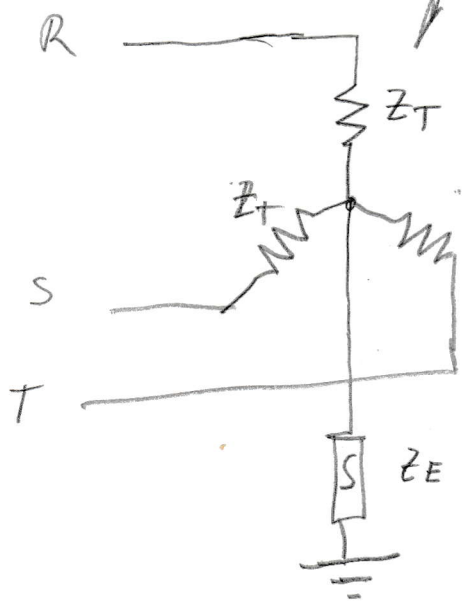
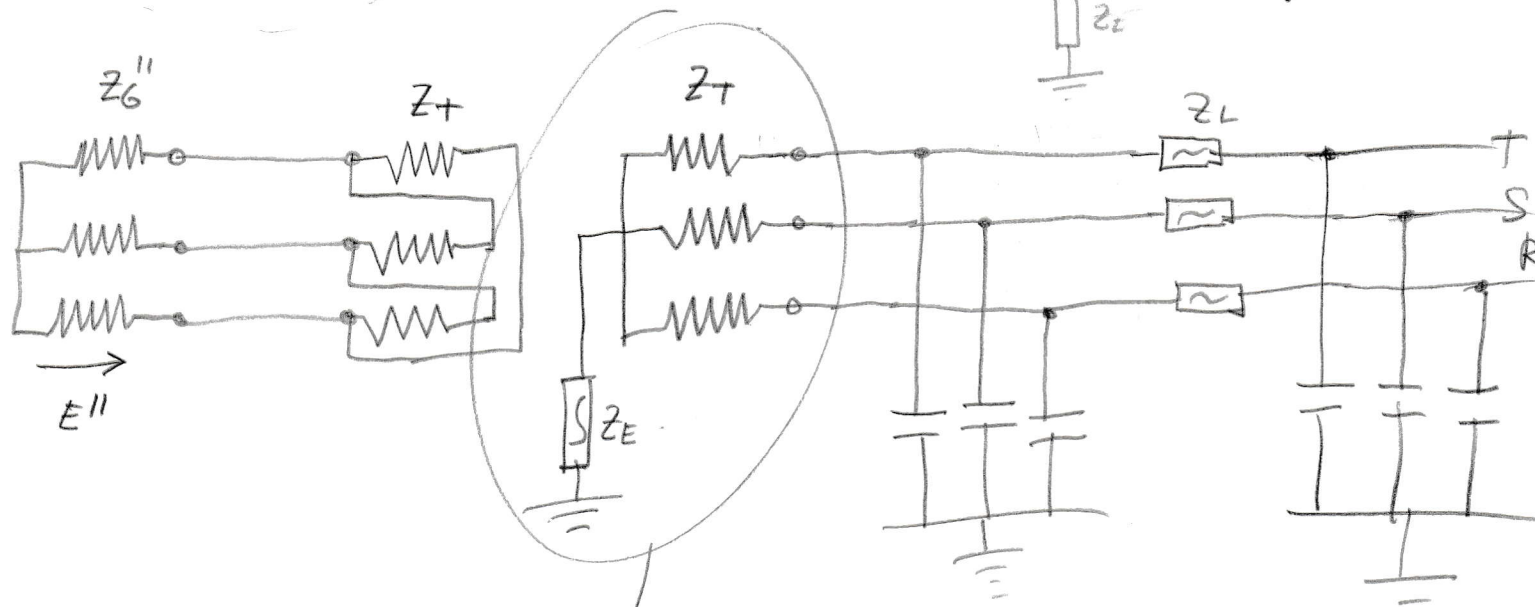
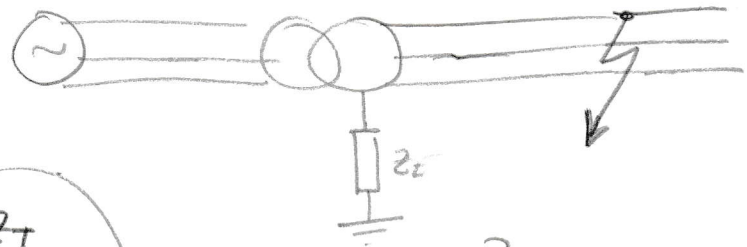
TIPOS DE CCTOS: Stokvis - Fortescue:

sistema asimétrico



Impedancia directa  $Z_1$   $Z_1 = Z_2 = \text{TURBOGENERADOR}$   
 Impedancia inversa  $Z_2$   
 Impedancia homopolar  $Z_0$

→ La corriente es tres veces mayor que la homopolar (conexión en estrella)  $3 \cdot I_0$ .



• La fem de los generadores solo puede aparecer en el sistema directo, tanto de cctos simétricos como asimétricos

• Sistema inverso y homopolar no presentan fuerzas electromotrices de campo

$$E_1'' = E \quad E_2'' = 0 \quad E_0'' = 0$$

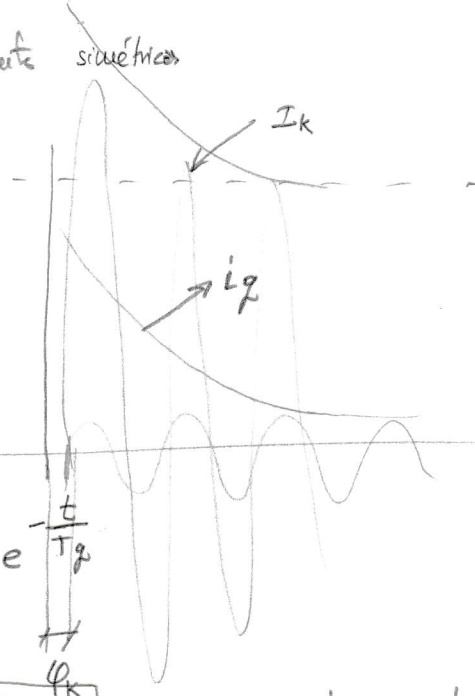
**CCTOS**

**MÉTODOS**

- Circuito tri polar.
- Circuito bipolar sin contacto a tierra.
- Circuito bipolar con contacto a tierra.
- Circuito unipolar a tierra.
- Ohne contacto a tierra.

- Método de las impedancias
- Método de composición
- Método convencional
- Método simplificado
- Método de las componentes simétricas

$\bar{i}$  = Componente simétrica de ccto  
 $\bar{i}_g$  = Componente aperiodica  
 $I_k''$  = Corriente inicial simétrica de ccto  
 $I_s$  = Corriente máxima asimétrica de ccto  
 $A$  = Valor inicial de la componente aperiodica



$$i_{RK} = \bar{i}_s + \bar{i}_g = \frac{\sqrt{2} \cdot U_f}{Z_t} \cdot \text{sen}(\omega t + \psi - \varphi_k) - \frac{\sqrt{2} \cdot U_f}{Z_t} \cdot \text{sen}(\psi - \varphi_k) e^{-\frac{t}{T_g}}$$

**CCTOS ALIMENTADOS POR GENERADORES SINCRÓNICOS**

① → Circuito tri polar en barras del alternador funcionando en modo

② → Circuito bipolar en barras del alternador funcionando en campo:

	TURBOALTERNADORES	ALTER POLOS SALIENTES
→ fem subtransitoria $E'' = U_f + X''_d j \cdot I$	$E'' = 1'05 / 1'23 U_f$	$E'' = 1'09 / 1'28 U_f$
→ fem transitoria $E' = U_f + X'_d j \cdot I$	$E' = 1'08 / 1'36 U_f$	$E' = 1'13 / 1'40 U_f$
→ fem sincrónica $E = U_f + X_d j \cdot I$	$E = 1'97 / 3'20 U_f$	$E = 2'16 / 2'44 U_f$

- Corriente simétrica de ccto
- Componente permanente
- Componente transitoria
- Componente subtransitoria
- Reactancia sincrónica ( $X_d$ )
- Reactancia transitoria ( $X'_d$ )
- Reactancia subtransitoria ( $X''_d$ )

③ Circuito tri polar en una línea alimentada por un alternador:

→ En barras que se produce

$$I_k'' = \frac{E''}{Z_k''} = \frac{E''}{\sqrt{(R_g + R_l)^2 + (X'_d + X_l)^2}} \quad \left| \quad I_k' = \frac{E'}{Z_l'} = \frac{E'}{\sqrt{(R_g + R_l)^2 + (X_d + X_l)^2}} \quad \right| \quad I_k = \frac{E}{Z_k} = \frac{E}{\sqrt{(R_g + R_l)^2 + (X_d + X_l)^2}}$$

**CCTOS EN MOTORES**

**1) MOTORES Y COMPENSADORES SINCRÓNICOS**

ccto  $t \leq 0'2s$  Motores y compensados sincrónicos = generadores sincrónicos

Si la demora del ccto es mayor a la caída de velocidad debido al par antagonista de frenado, provoca que los motores sincrónicos pasen a funcionar de forma asincrónica por lo tanto se desconectan antes de 0'2s.

2) MOTORES ASINCRÓNICOS: no poseen demanda de excitación, por lo tanto los corrientes de circuito se amortiguan muy rápidamente; el contrario de lo que ocurre con máquinas sincrónicas.

## ANEXO XI. Fórmulas para el cálculo de cortocircuitos mediante el método de las redes de secuencia y las componentes simétricas

### XI.I. Cálculo por el Método de las Componentes Simétricas

#### • Operador de giro ( $\underline{a}$ )

El operador:  $\underline{a} = \underline{a}^4 = (-0.5 + j 0.87) = 1(120^\circ)$  equivale a un giro del vector de  $+120^\circ$ .  
 $\underline{a}^2 = (-0.5 - j 0.87) = 1(240^\circ)$  equivale a un giro del vector de  $+240^\circ$ .  
 $\underline{a}^3 = (1 + j0) = 1(0^\circ)$  equivale a un giro del vector de  $+360^\circ$ .

- **Ecuaciones (A):** conocidas las componentes simétricas, permiten hallar los vectores principales.

$$\begin{aligned}\vec{I}_R &= \vec{I}_{R1} + \vec{I}_{R2} + \vec{I}_{R0} \\ \vec{I}_S &= \vec{I}_{S1} + \vec{I}_{S2} + \vec{I}_{S0} = \vec{I}_{R1} \vec{a}^2 + \vec{I}_{R2} \vec{a} + \vec{I}_{R0} \\ \vec{I}_T &= \vec{I}_{T1} + \vec{I}_{T2} + \vec{I}_{T0} = \vec{I}_{R1} \vec{a} + \vec{I}_{R2} \vec{a}^2 + \vec{I}_{R0}\end{aligned}$$

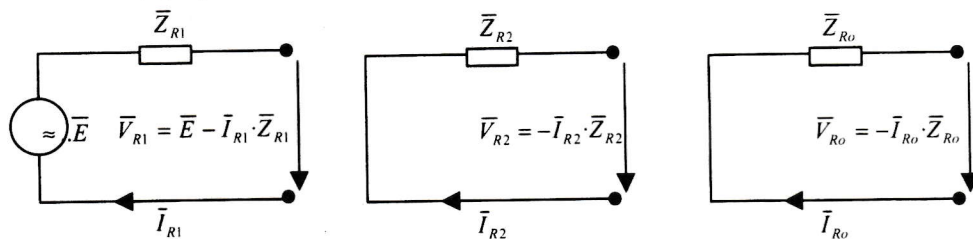
- **Ecuaciones (B):** conocidos los vectores principales, permiten hallar sus componentes simétricas.

$$\vec{I}_{R1} = \frac{1}{3}(\vec{I}_R + \vec{I}_S \vec{a} + \vec{I}_T \vec{a}^2) \quad \vec{I}_{R2} = \frac{1}{3}(\vec{I}_R + \vec{I}_S \vec{a}^2 + \vec{I}_T \vec{a}) \quad \vec{I}_{R0} = \frac{1}{3}(\vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T)$$

- **Intensidades y tensiones referidas a la fase (R):** las componentes ( $I_1$ ,  $I_2$  y  $I_0$ ) de la corriente o ( $U_1$ ,  $U_2$  y  $U_0$ ) de la tensión se refieren siempre a la fase (R). Normalmente, esta fase de referencia no se indica como subíndice.

$$\begin{aligned}\vec{I}_R &= \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_0 & \vec{I}_1 &= \frac{1}{3}(\vec{I}_R + \vec{a} \vec{I}_S + \vec{a}^2 \vec{I}_T) \\ \vec{I}_S &= \vec{a}^2 \vec{I}_1 + \vec{a} \vec{I}_2 + \vec{I}_0 & \vec{I}_2 &= \frac{1}{3}(\vec{I}_R + \vec{a}^2 \vec{I}_S + \vec{a} \vec{I}_T) \\ \vec{I}_T &= \vec{a} \vec{I}_1 + \vec{a}^2 \vec{I}_2 + \vec{I}_0 & \vec{I}_0 &= \frac{1}{3}(\vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T) \\ \vec{U}_R &= \vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \vec{U}_0 & \vec{U}_1 &= \frac{1}{3}(\vec{U}_R + \vec{a} \vec{U}_S + \vec{a}^2 \vec{U}_T) \\ \vec{U}_S &= \vec{a}^2 \vec{U}_1 + \vec{a} \vec{U}_2 + \vec{U}_0 & \vec{U}_2 &= \frac{1}{3}(\vec{U}_R + \vec{a}^2 \vec{U}_S + \vec{a} \vec{U}_T) \\ \vec{U}_T &= \vec{a} \vec{U}_1 + \vec{a}^2 \vec{U}_2 + \vec{U}_0 & \vec{U}_0 &= \frac{1}{3}(\vec{U}_R + \vec{U}_S + \vec{U}_T)\end{aligned}$$

- **Ecuaciones (C):** aplicando las leyes de Kirchoff y las redes de secuencia hallamos las Ecuaciones C.



Red directa

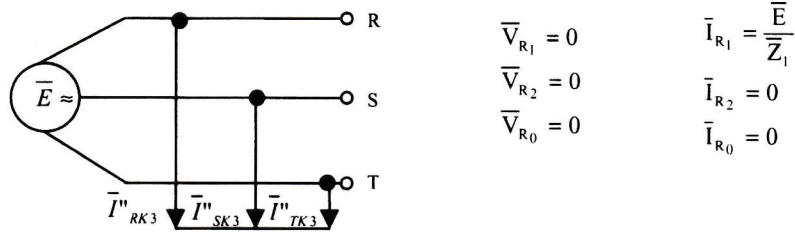
Red inversa

Red homopolar

### XI.II. Cálculo del Cortocircuito Trifásico

**Las condiciones iniciales:** que definen a este cortocircuito son:  $\vec{U}_R = \vec{U}_S = \vec{U}_T = 0$

**Las componentes simétricas:** de las tensiones y de las corrientes son:



Las intensidades serán: recordando que  $E = c \cdot U_n / \sqrt{3}$ , donde  $c = 1.1$

$$\bar{I}_R = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} [0^\circ] \quad \bar{I}_S = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} [240^\circ] \quad \bar{I}_T = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} [120^\circ]$$

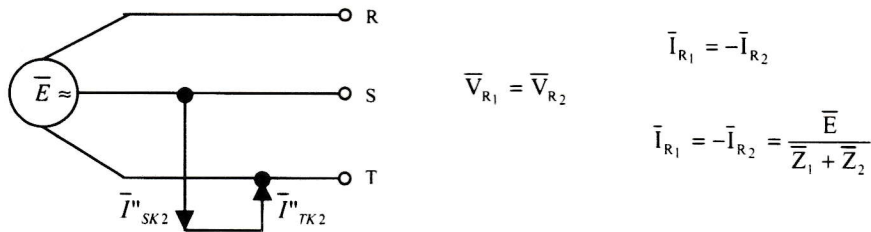
Las tensiones serán: recordando que  $E = c \cdot U_n / \sqrt{3}$ , donde  $c = 1.1$

$$\bar{U}_R = \bar{U}_S = \bar{U}_T = 0$$

### XI.III. Cálculo del Cortocircuito Bifásico

Las condiciones iniciales: que definen a este cortocircuito son:  $\bar{I}_R = 0$   $\bar{V}_S = \bar{V}_T$ . Las componentes homopolares son nulas en este cortocircuito.

Las componentes simétricas: de las tensiones y de las corrientes son:



Las intensidades serán: recordando que  $E = c \cdot U_n / \sqrt{3}$ , donde  $c = 1.1$

$$\bar{I}_R = 0 \quad \bar{I}_S = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} [-90^\circ] \quad \bar{I}_T = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} [90^\circ]$$

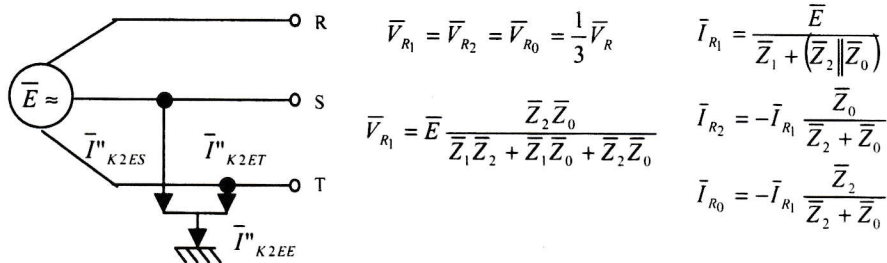
Las tensiones serán: recordando que  $E = c \cdot U_n / \sqrt{3}$ , donde  $c = 1.1$

$$\bar{V}_R = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3}} \frac{2\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} (0^\circ) \quad \bar{V}_S = \bar{V}_T = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3}} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} [180^\circ]$$

### XI.III. Cálculo del Cortocircuito Bifásico a Tierra

Las condiciones iniciales: que definen a este cortocircuito son:  $I_R = 0$   $V_S = V_T = 0$

Las componentes simétricas: de las tensiones y de las corrientes son:



**Las intensidades serán:** recordando que  $E = c \cdot U_n / \sqrt{3}$ , donde  $c = 1.1$

$$\begin{aligned} \bar{I}_R &= 0 & \bar{I}_S &= j11 \cdot \bar{U}_n \frac{\bar{a}\bar{Z}_2 - \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1\bar{Z}_0} & \bar{I}_T &= -j11 \cdot \bar{U}_n \frac{\bar{a}^2\bar{Z}_2 - \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1\bar{Z}_0} \\ \bar{I}_{EE} &= 11 \cdot \bar{U}_n \cdot \sqrt{3} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_0 + \bar{Z}_1\bar{Z}_0} \end{aligned}$$

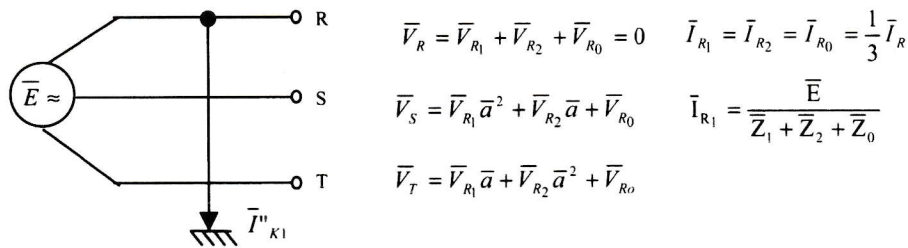
**Las tensiones serán:** recordando que  $E = c \cdot U_n / \sqrt{3}$ , donde  $c = 1.1$

$$\bar{V}_R = 11 \sqrt{3} \cdot U_n \frac{Z_2 Z_0}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0} \quad \bar{V}_S = \bar{V}_T = 0$$

#### XI.IV. Cálculo del Cortocircuito Monofásico a Tierra

**Las condiciones iniciales:** que definen a este cortocircuito son:  $V_R = 0 \quad I_S = I_T = 0$

**Las componentes simétricas:** de las tensiones y de las corrientes son:



**Las intensidades serán:** recordando que  $E = c \cdot U_n / \sqrt{3}$ , donde  $c = 1.1$

$$\bar{I}_R = \frac{11 \bar{U}_n \sqrt{3}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \quad \bar{I}_S = \bar{I}_T = 0$$

**Las tensiones serán:** recordando que  $E = c \cdot U_n / \sqrt{3}$ , donde  $c = 1.1$

$$\bar{V}_R = 0 \quad \bar{V}_S = \frac{11 \bar{U}_n}{\sqrt{3}} \left( \bar{a}^2 - \frac{\bar{Z}_1 \bar{a}^2 + \bar{Z}_2 \bar{a} + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \right) \quad \bar{V}_T = \frac{11 \bar{U}_n}{\sqrt{3}} \left( \bar{a} - \frac{\bar{Z}_1 \bar{a} + \bar{Z}_2 \bar{a}^2 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \right)$$

#### XI.V. Otras Fórmulas de Interés en Componentes Simétricas

1. **Redes trifásicas con tensiones nominales mayores de 1kV**, (tanto para cortocircuitos próximos al generador como para los cortocircuitos alejados de él):

$$\frac{c \cdot U_h}{\sqrt{3}} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3}}$$

Con:

- $U_N$  Tensión nominal (tensión entre líneas) de la red en el punto de cortocircuito.
- $c = 1,1$  Diferencia entre la fuerza electromotriz y la tensión de la red en el punto de falta.

2. **Redes trifásicas con tensiones nominales menores a 1kV** (sin generadores de baja tensión):

$$\frac{c \cdot U_h}{\sqrt{3}} = \frac{c \cdot U_{NT}}{\sqrt{3}}$$

Con:

- $U_{NT}$  Tensión nominal del lado de baja tensión de los transformadores que alimentan a la red.

- $c = 1$  Diferencia entre la fuerza electromotriz y la tensión de la red para el cálculo de las *máximas* corrientes iniciales simétricas de cortocircuito.
- $c = 0,95$  Diferencia entre la fuerza electromotriz y la tensión de la red para el cálculo de las *mínimas* corrientes iniciales simétricas de cortocircuito.

**3. En caso de redes con tensiones nominales superiores a 1kV:** donde existan generadores con  $X''_d > 20\%$  que alimentan directamente (sin transformadores intercalados) al punto de cortocircuito, o bien, si se disponen de redes con tensiones nominales menores o iguales a 1kV en donde el punto de cortocircuito está alimentado por generadores de baja tensión, se cumple para las fuerzas electromotrices de los generadores la siguiente expresión:

$$\frac{c \cdot U_h}{\sqrt{3}} = \frac{c \cdot U_{NG}}{\sqrt{3}} + I_{NG} \cdot X''_d \cdot \sin \varphi_{NG}$$

Con:

- $U_{NG}$  Tensión nominal del generador
- $I_{NG}$  Corriente nominal del generador
- $X''_d$  Reactancia inicial del generador
- $\varphi_{NG}$  Ángulo de desfase entre  $U_{NG}/\sqrt{3}$  y  $I_{NG}$  para servicio nominal

#### 4. Observaciones generales relativas al cálculo

En redes que dispongan de una impedancia ( $Z$ ) de cortocircuito formada principalmente por elementos inductivos (impedancias de bobinas, transformadores, motores y generadores) y que sólo presenten tramos cortos paralelos de líneas aéreas o cables, normalmente es posible prescindir de las resistencias dado que su valor es mucho menor al de las inductancias (sobre todo con redes con tensiones nominales superiores a 1kV). Con esta omisión, el valor de las impedancias no difiere apreciablemente del de las reactancias. Tampoco es necesario tener presente las resistencias efectivas de las líneas que presenten tensiones de servicio varias veces superiores a la tensión de la red en la que está situado el punto de cortocircuito. Con todas estas simplificaciones, la impedancia de cortocircuito considerada resulta ser algo menor que la impedancia real, y por tanto, los valores de las corrientes de cortocircuito calculados con estas impedancias resultarán aumentados respecto a su valor real, o sea, que estos valores nos darán un cierto margen de seguridad.

Por el contrario, para dimensionar las instalaciones e interruptores de protección es necesario conocer el valor de la máxima corriente asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ ) dependiendo su valor de la relación entre la resistencia efectiva y la reactancia del sistema, es decir, del factor ( $\chi$ ). Por ello, si los dispositivos y componentes implicados en el cortocircuito presentan resistencias efectivas grandes (cables y líneas aéreas largas o de poca sección, o incluso transformadores de poca potencia), al desprestigiar estas resistencias efectivas se obtendría, además de un valor demasiado pequeño para la impedancia de cortocircuito, un factor ( $\chi$ ) demasiado grande, es decir, una corriente máxima asimétrica demasiado elevada. Lo que conllevaría a elegir dispositivos de protección con una resistencia dinámica excesiva, aumentándose en demasía y sin razón su precio final.

Cuando las tensiones superen los 1000V, se podrá desprestigiar las impedancias de las barras de las instalaciones de maniobra. Por el contrario, cuando las tensiones sean inferiores a este valor (1kV), deben tenerse presentes las impedancias de las barras y de las uniones entre aparatos, aunque sólo dispongan de unos metros, al efectuar el cálculo de la impedancia de cortocircuito de la red. Las resistencias de paso debidas a los contactos o ha uniones por tornillos (que alcanzan valores de hasta 0,08mW) reducen también el valor de la corriente de cortocircuito en las instalaciones de baja tensión, aunque su cálculo con precisión resulta prácticamente imposible, desprestigándose para el análisis de las corrientes de cortocircuito.

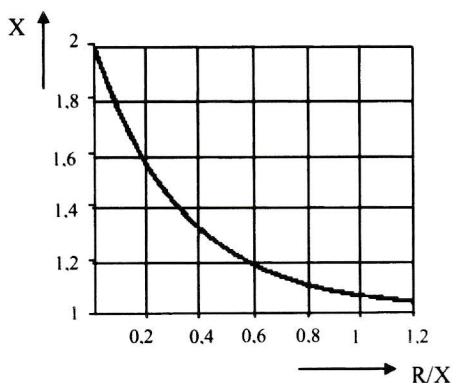
Resumiendo, puede decirse que si desprestigiamos las resistencias efectivas simplificaremos la determinación de la impedancia de cortocircuito de la red, sobre todo si ésta presenta ramas en paralelo y mallas, pero teniendo muy presente que a la hora de determinar las corrientes máximas asimétricas de cortocircuito ( $I_s$ ) no se podrán realizar estas simplificaciones.

## ANEXO XII. Fórmulas, Factores correctores y Tablas para el Cálculo de las Corrientes de Cortocircuito Mediante la Norma VDE 0102

### XII.I. Cálculo de las corrientes de cortocircuito $I_s$ , $I_a$ e $I_k$

Las corrientes de cortocircuito ( $I_s$ ,  $I_a$ , e  $I_k$ ) se calculan a partir de la corriente inicial simétrica de cortocircuito ( $I''_k$ ) y de los factores indicados en las directrices VDE 0102. Si el punto de cortocircuito está alimentado directamente por las distintas fuentes de corriente de cortocircuito se cumplen las siguientes relaciones para ( $I_s$ ,  $I_a$ ,  $I_{aM}$  e  $I_k$ ):

- **Corriente máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ ):**  $I_s = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k$

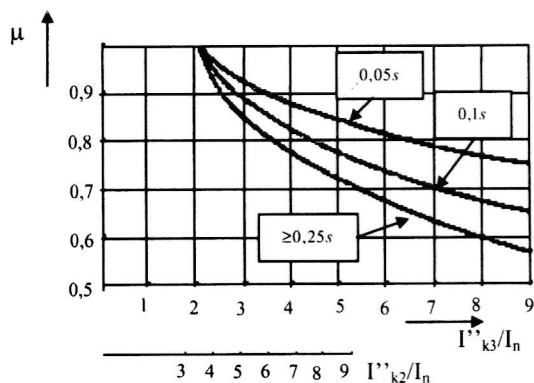


Gráfica XII.I Factor ( $\chi$ ) para calcular la corriente máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ ). Donde ( $R$ ) y ( $X$ ) son la resistencia ( $R_k$ ) y la reactancia ( $X_k$ ) de la impedancia de cortocircuito de la red ( $Z_k$ )

El factor ( $\chi$ ) depende de la relación ( $R_k/X_k$ ) correspondiente a los distintos elementos o dispositivos implicados en el cortocircuito y tiene presente el amortiguamiento temporal de la componente aperiódica y, en el caso de cortocircuitos próximos al generador, el de la componente simétrica.

- **Corriente simétrica de corte ( $I_a$ )**

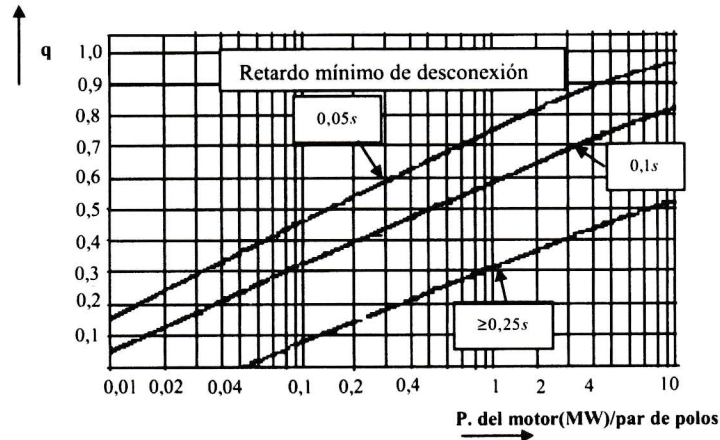
- Máquinas síncronas:  $I_a = \mu \cdot I''_k$
- Máquinas asíncronas:  $I_{aM} = \mu \cdot q \cdot I''_k$



Gráfica XII.II Factor ( $\mu$ ) para calcular la corriente simétrica de corte ( $I_a$ )

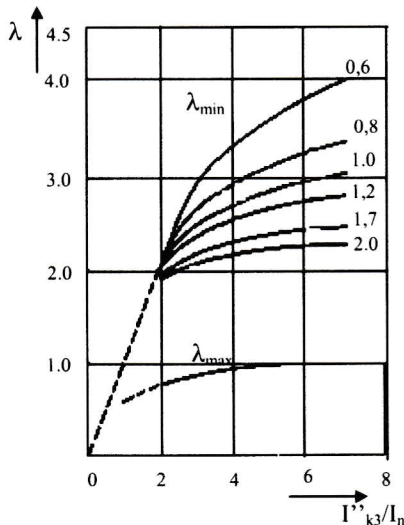
El factor ( $\mu$ ) depende de la relación ( $I''_k/I_n$ ) de los distintos generadores síncronos existentes en el circuito y del retardo mínimo de desconexión ( $t_V$ ).

El factor ( $q$ ) depende de la relación entre la potencia del motor asíncrono, del número de pares de polos y del retardo mínimo de desconexión ( $t_V$ ). Este factor vale la unidad si no existen motores asíncronos en la red analizada.

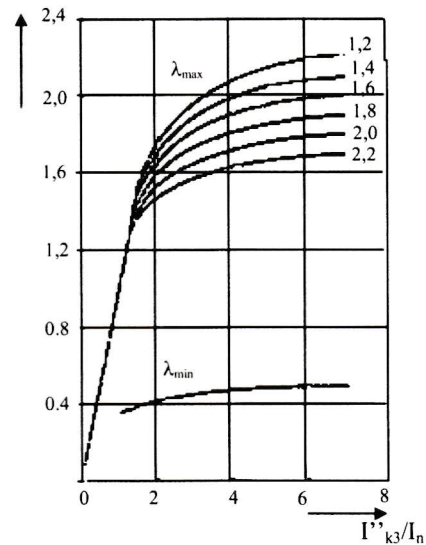


Gráfica XII.III Factor ( $q$ ) para calcular la corriente simétrica de corte ( $I_{aM}$ ) de un motor asíncrono

- **Corriente permanente de cortocircuito ( $I_k$ ):**  $\bar{I}_K = \lambda \cdot I_n$



Generadores de polos salientes



Turbogeneradores

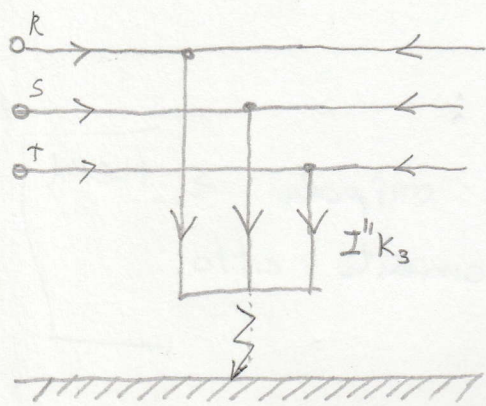
Gráfica XII.IV Factores ( $\lambda_{max}$  y  $\lambda_{min}$ ) para calcular las corrientes permanentes de cortocircuito máxima ( $I_{Kmax}$ ) y mínima ( $I_{Kmin}$ ) correspondientes a una máquina síncrona

El factor ( $\lambda$ ) depende de la relación ( $I''_K / I_n$ ), de las condiciones de excitación y del tipo de máquina síncrona que exista en la red analizada.

En las redes mixtas formadas por fuentes de corriente de cortocircuito de diverso valor, existirán corrientes de cortocircuito parciales circulando por las diversas ramas que presentarán relaciones ( $R/X$ ) diferentes. Por ello, las diversas porciones de las corrientes de cortocircuito se amortiguan siguiendo constantes de tiempo distintas (según la VDE 0102). Se remite al lector a la sección de problemas resueltos para comprobar cómo se efectúa el cálculo de redes múltiples.

**P.2** Un alternador de 30MVA a 13.6kV; conectada en estrella a 50 Hz, tiene una reactancia subtransitoria, inversa y homopolar del 20%, 25% y 5% respectivamente. Determinar la reactancia a disponer en la conexión del neutro para que la corriente que fluya en el caso de un cortocircuito unipolar no exceda la corriente de cortocircuito trifásico en el alternador,  $Z_E = 1000 \Omega$ .

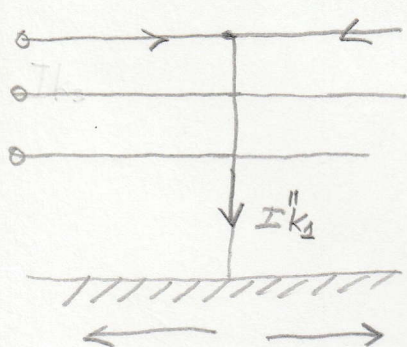
Se pide determinar el valor de la impedancia de puesta a tierra a disponer en el centro de estrella del alternador, para que en el caso de un cortocircuito unipolar a tierra, su valor no exceda del valor de la corriente de cortocircuito trifásico.



Los cortocircuitos trifásicos, son los únicos cortocircuitos que se comportan como sistemas equilibrados, ya que todos los fases están afectadas por igual. Las tensiones en el punto de cortocircuito, tanto si el cortocircuito se cierra a través de tierra como si está aislado de ella, son nulas, presentando los intensidades igual módulo por sus argumentos desfasados  $120^\circ$ .

Es uno de los cortocircuitos más violentos y de obligado cálculo, es por

lo que se nos pide que los expresiones de las corrientes de cortocircuito trifásico y unipolar a tierra:

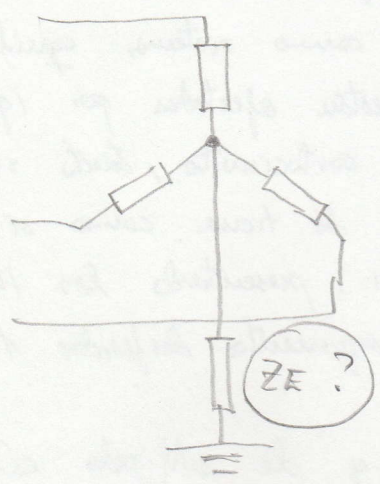


Este es el cortocircuito más frecuente y violento, produciéndose con mayor frecuencia en redes rigidamente puestas a tierra o mediante impedancias de bajo valor. Su cálculo es importante, tanto por lo elevado de sus corrientes como por su conexión a tierra, lo que permite calcular las fugas a tierra, las tensiones de contacto o de paso, o valorar las interferencias que estos corrientes pueden provocar.

Para su cálculo al ser desequilibrado y con pérdida de energía, son necesarios los tres redes de secuencia (directa, inversa y homopolar).

Estas corrientes vienen determinadas por:

GENERADOR



CONDICION:

Corriente cto unipolar o. fiend  
no exceda corriente cto  
tripolar

Se impone como condición que los módulos de admitancias sean iguales, de donde se deduce que

$3\vec{Z}_1 = \vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_3$ , si despreciamos las resistencias frente a las reactivas inductivas debido al reducido valor de las mismas tenemos

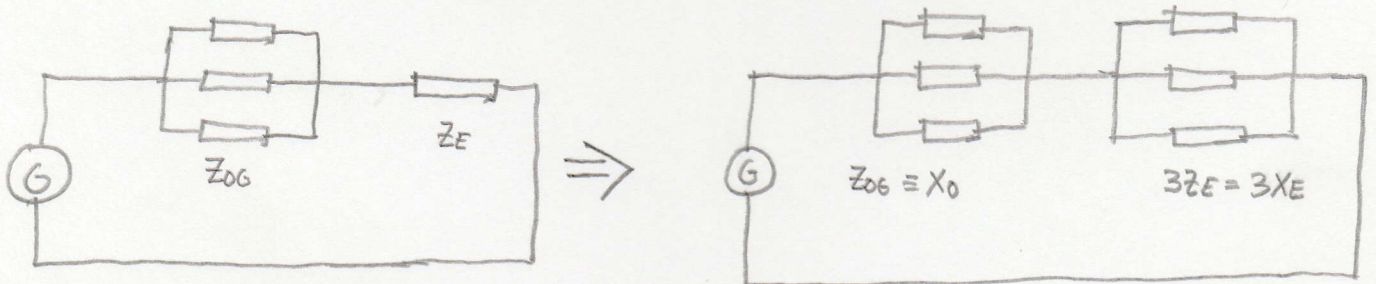
$3X_d'' = X_d'' + X_2 + X_{0T}$ , Tendremos que determinar los valores de las reactivas subtransitoria, inversa y homopolar del alternador que intervienen en el corto-circuito.

$$X_d'' = \frac{X_d\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NB}} = \frac{20\%}{100} \cdot \frac{13600^2}{30 \cdot 10^6} = 1'233066666667 \Omega$$

$$X_2 = \frac{X_2\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NB}} = \frac{25\%}{100} \cdot \frac{13600^2}{30 \cdot 10^6} = 1'541333333333 \Omega$$

$$X_0 = \frac{X_0\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NB}} = \frac{5\%}{100} \cdot \frac{13600^2}{30 \cdot 10^6} = 0'308266666666 \Omega$$

pero además de las reactivas del alternador para la reactancia homopolar interviene el valor de la impedancia de puesta a tierra con un valor triple, en efecto para determinar la impedancia homopolar se realiza el siguiente ensayo siguiente, en el que  $Z_{0G}$  representa la impedancia homopolar por fase del alternador y  $Z_E$  es el valor de la impedancia de puesta a tierra, es decir



de donde el valor de la reactancia inductiva por fase del circuito formado por el alternador y el sistema de puesta a tierra será de  $X_{0T} = X_0 + 3Z_E$  de donde resulta finalmente:  $3 \cdot X_d'' = X_d'' + X_2 + X_0 + 3Z_E$

Despejamos  $Z_E \rightarrow$

$$Z_E = \frac{3 \cdot X_d'' - (X_d'' + X_2 + X_0)}{3}$$

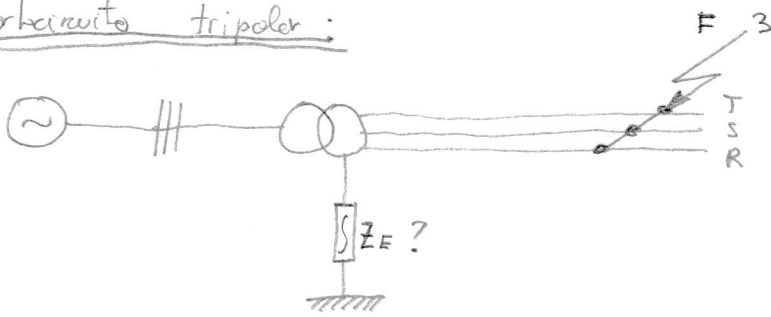
$$Z_E = \frac{3 \cdot 1'233066666667 - (1'233066666667 + 1'541333333333 + 0'308266666666)}{3} = 0'205511111113 \Omega$$

se ha supuesto que es una reactancia pura la bobina de puesta a tierra y se desprecia su resistencia

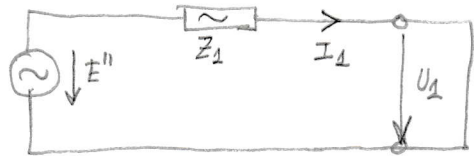
$$\vec{I}''_{k3} = \frac{\vec{E}''}{Z_1} ; \quad \vec{I}''_{k1} = 3 \cdot \frac{\vec{E}''}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

segundo por ejemplo en un

1) Circuito tripolar:

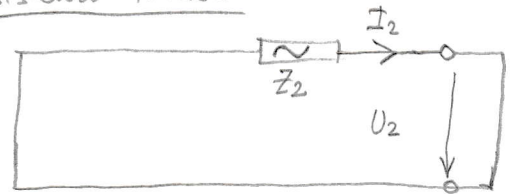


sistema directo



- sistema directo:  $U_1 = E'' - I_1 \cdot Z_1 = 0 \rightarrow \vec{I}_1 = \frac{\vec{E}''}{Z_1}$

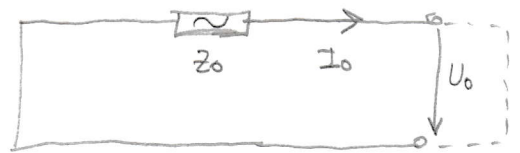
sistema inverso



- sistema inverso:  $U_2 = -I_2 \cdot Z_2 = 0 \rightarrow I_2 = 0$

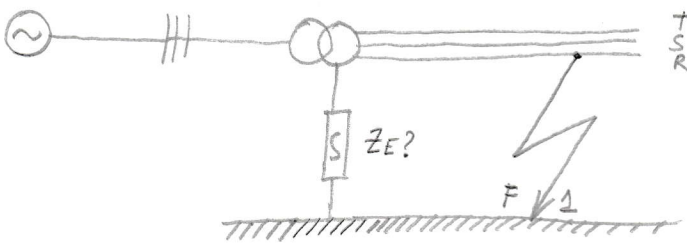
- sistema homopolar:  $U_0 = -I_0 Z_0 = 0 \rightarrow I_0 = 0$

sistema homopolar

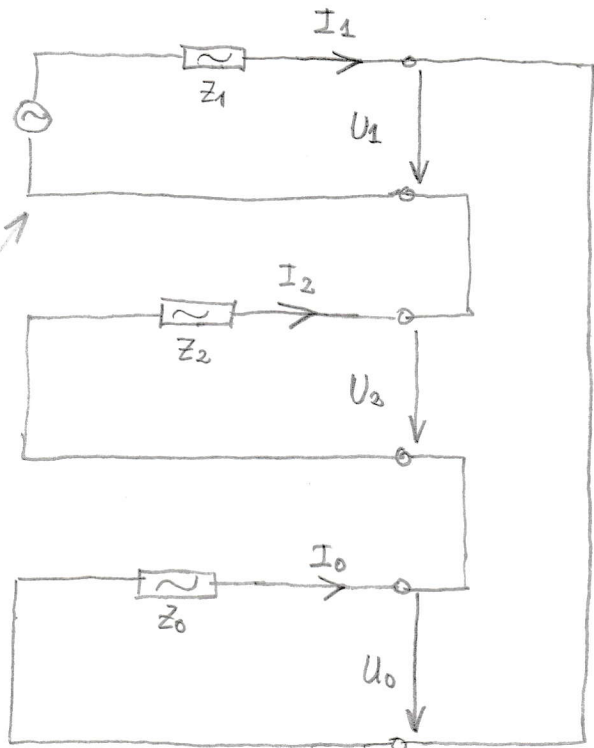


$$I_{k3} = \frac{E}{Z_1}$$

2) Circuitos unipolar a tierra:



Como están conectadas en estrella



- sistema directo:  $U_1 = E'' - I_1 \cdot Z_1$

- sistema inverso:  $U_2 = -I_2 \cdot Z_2$

- sistema homopolar:  $U_0 = -I_0 Z_0$

$$I_{k1} = 3 \cdot \frac{E''}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

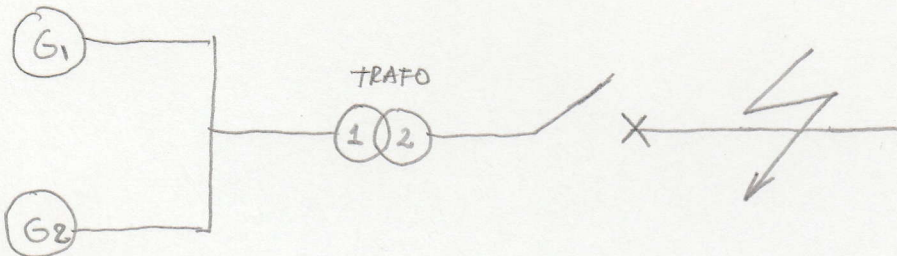
P.2.5 Dos generadores síncronos están acoplados en paralelo sobre un transformador, siendo sus características:

	G1	G2
POTENCIA	4500 kVA	14500 kVA
TENSION	13'8 kV	13'8 kV
X <sub>d</sub>	102%	111%
X' <sub>d</sub>	26%	30%
X'' <sub>d</sub>	22%	21%

TRANSFORMADOR	
POTENCIA	16 MVA
RELACION EN VACIO	(13'8 / 68 kV)
U <sub>cc</sub> %	10%
U <sub>2</sub> %	1%

Sabiendo que la tensión nominal de la red sería conectada al transformador es de 66 kV, determinar como se produce un cortocircuito bipolar en el inicio de la red aérea:

- 1) la corriente inicial simétrica de cortocircuito si fueran ambos alternadores;
- 2) la corriente inicial simétrica de cortocircuito si fueran únicamente el alternador de 14500 kVA:



corto circuito bipolar

$$I_{k2}'' = \frac{c U}{Z_1 + Z_2}$$

(\*) INCISO - PAG 3

Determinense los reactancias subtransitorias de ambos alternadores.

ALTERNADOR 1:

$$X''_{d1} = \frac{X''_{d1}\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{22\%}{100} \cdot \frac{13800^2}{4500 \cdot 10^3} = 9'3104 \Omega$$

A falta de mayor información de la (R<sub>G</sub>) resistencia efectiva del generador, se toma según la página 58 del TEMA 3 para potencias generadas menores a los 100 MVA el 0'07 de la reactancia subtransitoria en ambos alternadores

$$R_G = 0'07 \cdot X''_{d1} = 0'07 \cdot 9'3104 = 0'651728 \Omega$$

ALTERNADOR 2:

$$X''_{d2} = \frac{X''_{d2}\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{21\%}{100} \cdot \frac{13800^2}{14500 \cdot 10^3} = 2'75809655171 \Omega$$

A partir de mayor información se toma  $R_G = 0'07 \cdot X_d'' \Rightarrow R_G = 0'07 \cdot 2'75809655171 =$

$$R_G = 0'19306675862 \Omega$$

TRANSFORMADOR:

(Es un transformador elevador)

- En el primario del transformador tenemos, por parte del generador 1:

$$X''_{G1} = \frac{X''_{d1}}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2} = \frac{9'3104}{\left(\frac{13'8}{68}\right)^2} = 226'062222221 \Omega$$

$$R''_{G1} = \frac{R_{G1}}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2} = \frac{0'651728}{\left(\frac{13'8}{68}\right)^2} = 15'8243555555 \Omega$$

por parte del generador 2:

$$X''_{G2} = \frac{X''_{d2}}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2} = \frac{2'75809655171}{\left(\frac{13'8}{68}\right)^2} = 66'9682758615 \Omega$$

$$R_{G2} = \frac{R_{G2}}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2} = \frac{0'19306675862}{\left(\frac{13'8}{68}\right)^2} = 4'68777931031 \Omega$$

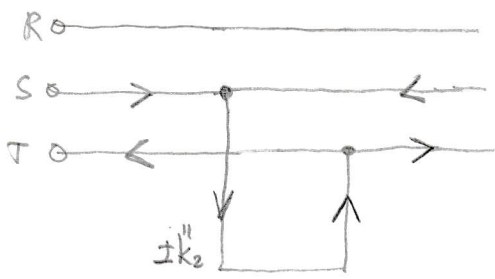
TRANSFORMADOR:

en el secundario:  $Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{68000^2}{16 \cdot 10^6} = 28'9 \Omega$

$$X_T = \frac{U_{20T}^2}{100 S_{NT}} \cdot \sqrt{U_{cc}\%^2 - U_{\Omega}\%^2} = \frac{68000^2}{100 \cdot 16 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{10^2 - 1^2} = 28'7551369324 \Omega$$

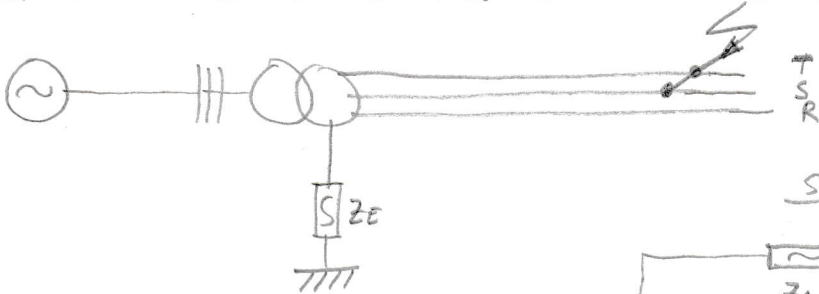
$$R_T = \sqrt{28'9^2 - 28'755^2} = 2'89136213574 \Omega$$

Primero que todo, nos están diciendo un cortocircuito bipolar sin contacto a tierra

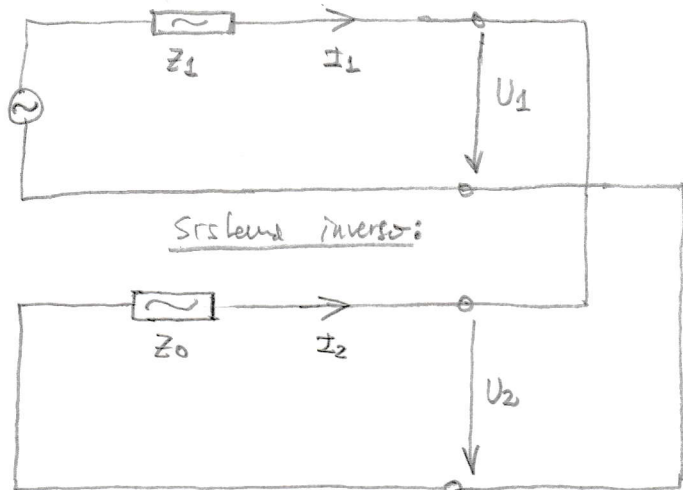


Generalmente los corrientes iniciales simétricas de cortocircuito son menores que las del fallo trifásico, aunque si el cortocircuito se produce en las inmediaciones de máquinas síncronas o síncronas de corta potencia, las corrientes de esta falta pueden llegar a presentar valores incluso mayores que los de cortocircuito trifásico.

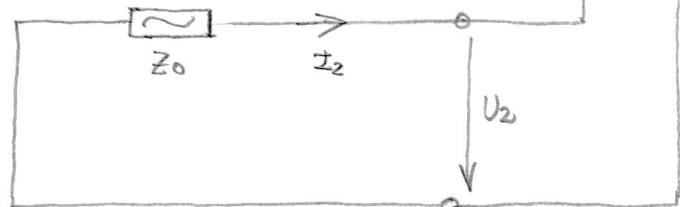
Al presentarse en dos de las tres fases del sistema, este circuito ya no es equilibrado, obligando su cálculo a la utilización tanto de la red de secuencia directa como la red de secuencia inversa:



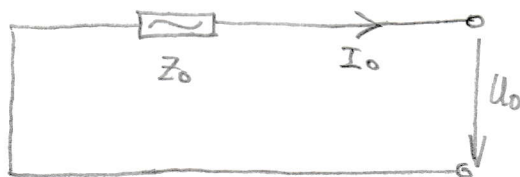
sistema directo:



sistema inverso:



sistema homopolar:



- sistema directo :  $\vec{U}_1 = \vec{E}'' - \vec{I}_1 \cdot \vec{Z}_1$

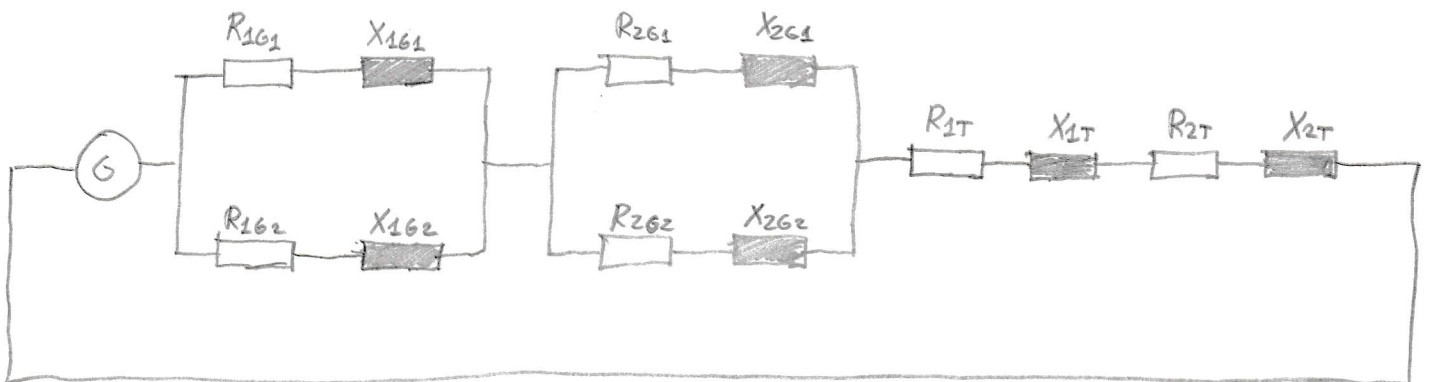
- sistema inverso :  $\vec{U}_2 = -\vec{I}_2 \cdot \vec{Z}_2$

- sistema homopolar :  $\vec{U}_0 = -\vec{I}_0 \cdot \vec{Z}_0$

$$I''_{k2} = \frac{C \cdot U}{Z_1 + Z_2}$$

- El circuito equivalente del cortocircuito es:

$R_1$



La expresión que determina la corriente para un cortocircuito bipolar resulta ser:

$$I_{k2} = \frac{c \cdot U}{Z_1 + Z_2}$$

$$R_{1G1} = R_{2G1}$$

$$R_{1G2} = R_{2G2}$$

Se decide el circuito en paralelo formado por los dos alternadores, que parecen para los sistemas directo e inverso iguales impedancias de eje una impedancia equivalente de valor:

$$Z = R + Xj \dots \text{Resumiendo el paralelo}$$

$$R_{1G1} = R_{2G1}$$

$$R_{G1} = R_{1G1} + R_{2G1}$$

$$R_{G1} = 2 R_{G1}$$

$$R_{1G2} = R_{2G2}$$

$$Z_{1G} = Z_{2G} = \frac{R_{G1} \cdot R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} + \frac{X_{G1} \cdot X_{G2}}{X_{G1} + X_{G2}} \cdot j =$$

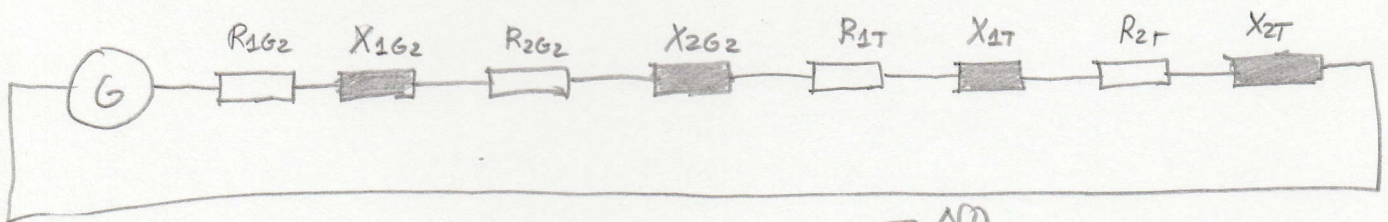
$$Z_{1G} = Z_{2G} = \frac{15'8243555555 \cdot 4'68777931031}{15'8243555555 + 4'68777931031} + \frac{226'062222221 \cdot 66'9682758615}{226'062222221 + 66'9682758615} \cdot j$$

$$Z_{1G} = Z_{2G} = 3'61644885125 + 51'663555018j = Z_T$$

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U}{2(Z_G + Z_T)} = I_{k2}'' = \frac{c \cdot U}{2(R_G + X_G j + R_T + X_T j)} = \frac{1'1 \cdot 66 \cdot 10^3}{2(3'61644885125 + 51'663555018j + 2'89136 + 28'75)}$$

$$I_{k2}'' = 449'87 A$$

2) Para este segundo supuesto solamente funciona el alternador 2, por lo cual la rama superior del circuito anterior deja de existir y están conectados en serie alternador y transformador por lo que la corriente será de:



$$R_{1G1} = R_{2G2} ; R_{1G2} = R_{1G1} \rightarrow 2R_{G1} = R_{1G1} + R_{2G2} ; 2R_{G2} = R_{1G2} + R_{2G2}$$

$$X_{1G1} = X_{2G1} ; X_{1G2} = X_{2G2} \rightarrow 2X_{G1} = X_{1G1} + X_{2G1} ; 2X_{G2} = X_{1G2} + X_{2G2}$$

$$2R_G = R_{G1} + R_{G2}$$

$$2X_G = X_{G1} + X_{G2}$$

$$Z_G = R_G + X_G j = \boxed{2Z_G} \parallel \boxed{2Z_T} = R_T + X_T j \quad R_{1T} = R_{2T}$$

$$X_{1T} = X_{2T}$$

$$R_T = R_{1T} + R_{2T} ; X_T = X_{1T} j + X_{2T} j$$

Source factor común:

$$2(Z_G + Z_T) \rightarrow 2(R_{G2} + X_{G2j} + R_T + X_{Tj})$$

$$2(4'68777931031 + 66'9682758615j + 2'89136213574 + 28'7551369324j)$$

$$2(67'1321476397 + 28'9j)$$

$$I''_{K2} = \frac{1'1 \cdot 66 \cdot 10^3}{2(67'1321476397 + 28'9j)} = 377'998419199A$$

P 2.9 Por medio de una acometida de 3000 MVA a 110 kV, se alimenta un transformador VdM de 20 MVA, relación de tensiones en vacío 110/10'5 kV, tensión de cortocircuito del 12% y cct ohmica nominal nominal del 0'6%. Sabiendo que la tensión en el secundario del transformador es de 10 kV,

del 0'6%  
10 kV

Determinar:

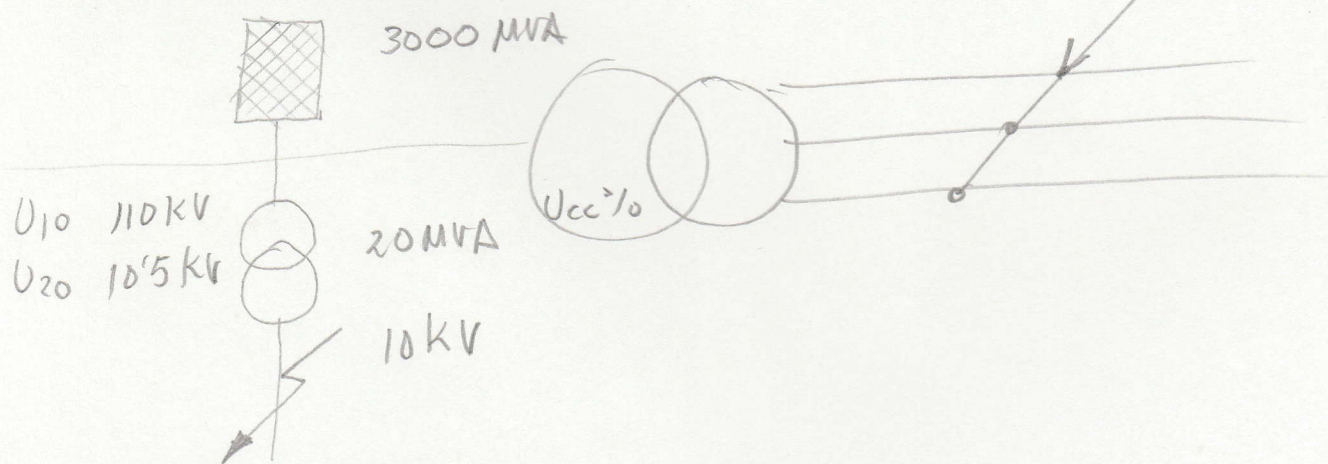
1) Cuando se produce un cortocircuito tripolar en el secundario del transformador los corrientes:

- Inicial simétrica de cortocircuito ( $I_k$ )
- Máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ )
- Simétrica de corte ( $I_a$ )
- Permanente de cortocircuito

2) Cuando se produce un cortocircuito bipolar sin contacto a tierra en el secundario del transformador, los corrientes:

- Inicial simétrica de cortocircuito ( $I_k$ )
- Máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ )
- Simétrica de corte ( $I_a$ )
- Permanente de cortocircuito ( $I_k$ )

1) El circuito eléctrico de la instalación es el siguiente:



Es necesario calcular las impedancias en el punto de cortocircuito, así resulta

ACOMETIDA:

$$Z_Q = \frac{c U_{N2}}{S_{kQ}}$$

sabiendo que  $U_{N2}$  es la tensión nominal de la acometida y  $S_{kQ}$  la potencia que transporta dicha acometida.

$$Z_Q = \frac{1'1 \cdot 110000^2}{3000000000} = 4'43666666667 \Omega$$

Pasamos esta impedancia al nivel eléctrico del secundario del transformador

$$Z'_Q = \frac{Z_Q}{(m')^2} = \frac{4'43666666667}{\frac{110}{10'5}} = 0'04042499999 \Omega$$

Con suficiente aproximación tenemos: según la página 54 del T-3 para conectados

$$X'_R = 0'995 \cdot Z'_Q \Rightarrow X'_R = 0'995 \cdot 0'04042499999 = 0'040222874999 \Omega$$

$$R'_R = 0'1 \cdot X'_R \Rightarrow R'_R = 0'1 \cdot 0'040222874999 = 0'0040222874999 \Omega$$

TRANSFORMADOR:

$$Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{10500^2}{20 \cdot 10^6} = 0'6615 \Omega$$

$$R_T = \frac{U_R\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{0'6}{100} \cdot \frac{10500^2}{20 \cdot 10^6} = 0'033075 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{0'6615^2 - 0'033^2} = 0'6606 \Omega$$

Por lo que la impedancia equivalente de conectada mas transformador será

$$X_{QT} = X'_R + X_T = 0'040222874999 + 0'6606 = 0'700822874999 \Omega$$

$$R_{QT} = R'_R + R_T = 0'0040222875999 + 0'033075 = 0'0370972875999 \Omega$$

$$\vec{Z}_{QT} = 0'0370972875999 + 0'700822874999j = 0'70180404022 \angle 86'9699389313^\circ \Omega$$

Por lo que el valor de la corriente para un cortocircuito trifásico en bornes del transformador será:

$$I_{k3} = \frac{1'1 U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{QT}} \rightarrow \frac{1'1 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 0'70180404022} = 9'05 \text{ kA} //$$

La corriente máxima de cortocircuito o corriente de choque tiene por

valor:

$$I_s = X \sqrt{2} I_{k3}'$$

, siendo el factor X determinado a partir

de la gráfica de la página 45 del T-3 dada para  $\frac{R}{X}$  de

$$\frac{R}{X} = 0'0529338994535 \text{ con lo que } X = 1'85 \cdot \sqrt{2} \cdot 9'05 =$$

$$I_s = 1'85 \sqrt{2} \cdot 9'05 = 23'677470 \text{ kA} //$$

Por otro lado la corriente simétrica de corte y la corriente permanente de cortocircuito, al considerar al cortocircuito alejado del alternador es igual a la corriente simétrica subtransitoria, pues no se considera amortiguamiento temporal de la corriente de cortocircuito, de donde  $I_{k3} = I_a = I_{k3} = 9'05 \text{ kA} //$

2) Para el cortocircuito bipolar sin contactos a tierra, como las impedancias directa e inversa de secuencia y transformador son iguales tenemos.

$$I_{k2}'' = \frac{1'1 U_N}{2 Z_{gr}} = \frac{1'1 \cdot 10}{2 \cdot 0'7017} = 7'838 \text{ kA} //$$

La corriente de choque presenta el mismo valor del factor  $X$  de donde:

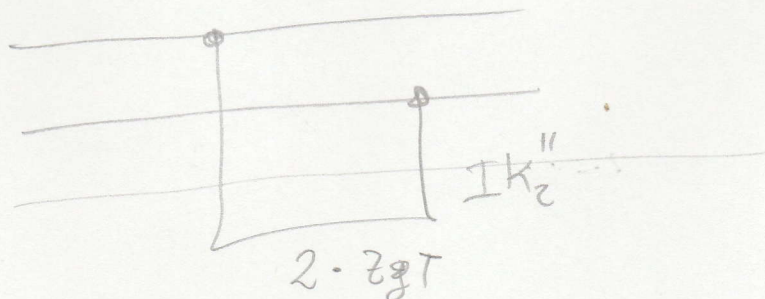
$$I_s = X \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' = 1'85 \sqrt{2} \cdot 7'838 = 20'506 \text{ kA} //$$

Las corrientes simétrica de corte y permanente de cortocircuito, por los mismos motivos que anteriormente se han dicho (no se produce amortiguamiento temporal de la corriente de cortocircuito) tienen por valor:

$$I_{k2}'' = I_a = I_{k2} = 7'838 \text{ kA} //$$

A tener en cuenta que a la hora de la elección del interruptor automático de protección en bornes del transformador, debe ser capaz de actuar con respecto al disparo por cortocircuito con los dos posibles corrientes calculados.

②

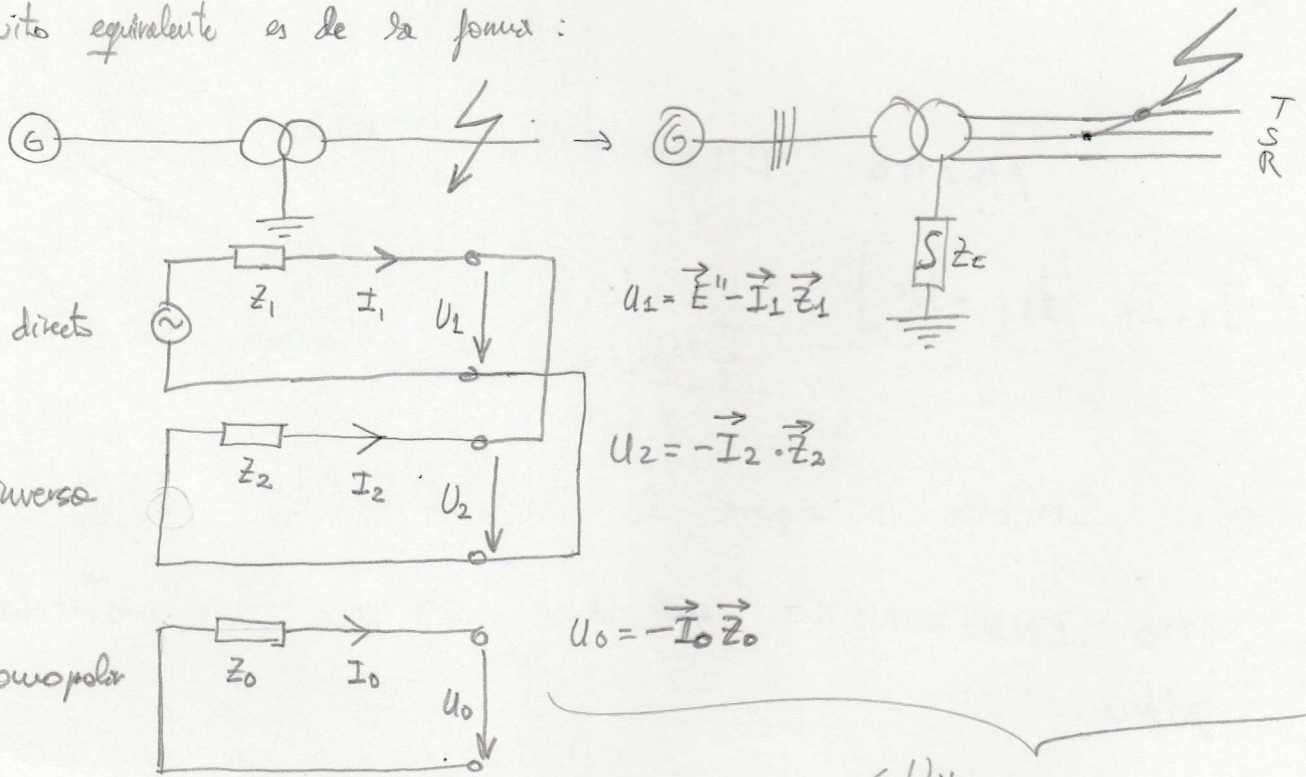


P2.11) Un generador síncrono de 100MVA a 10'5kV y 50Hz tiene una resistencia por fase del 0'3% una reactancia subtransitoria del 10'5% alimentado a un transformador Dy11 de 100MVA a 110kV con el neutro puesto a tierra rigidamente, siendo su relación de tensiones en vacío de 10'5/115kV, con tensión de cortocircuito del 11'5% caída de tensión óhmica nominal del 0'5% y sabiendo que para el transformador se cumple  $R_0/R_1=0'8$  y  $X_0/X_1=0'8$ .

Determinar para la tensión nominal del transformador:

- 1) La corriente inicial simétrica de cortocircuito en el caso de producirse un cortocircuito bipolo sin contacto a tierra y la tensión en la fase no afectada.
- 2) La corriente inicial simétrica de cortocircuito en los fases afectadas por un cortocircuito bipolo con contacto a tierra y la intensidad que circula por tierra.
- 3) La tensión en la fase no afectada por el cortocircuito en el caso anterior.

El circuito equivalente es de la forma:



$$I_{k2} = \frac{c U_N}{2(Z_1 + Z_2)}$$



9.2.1) En un sistema trifásico de 110KV a 100MVA y 20% de potencia en reactores por fase del 0.2% un reactor equivalente del 20% de potencia a un transformador DYN de 110KV a 110KV con el núcleo puesto a tierra rigidamente, si se produce un defecto de tensión en una de las fases de 110KV, con tensión de equilibrio del 110KV, ¿cuál es la tensión máxima nominal del 0.2% y cuánto que por el transformador de campo  $R/L = 0.8$  y  $X/L = 0.8$ .  
 Determinar por la tensión nominal del transformador;

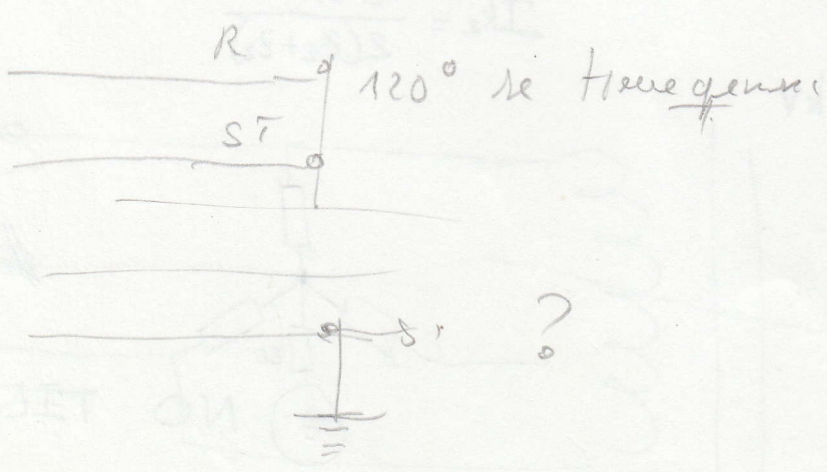
- 1) La corriente inicial máxima de cortocircuito en el caso de potencia en cortocircuito típica en un caso de tensión en la fase no afectada.
- 2) La corriente inicial máxima de cortocircuito en las fases afectadas por un caso de tensión en un caso de tensión y la intensidad que ocurre por tierra.
- 3) La tensión en la fase no afectada por el cortocircuito en el caso de tensión.

ANCTO BIPOLAR - TIERRA

$$I_s + I_T = \frac{I_{LT} \cdot U_R}{10^6} = \frac{S_{NCTO}}{100} \% \text{ Potencia de ccto}$$

Si  $S_{NCTO}$  no supera el SN del cable

CTO INDEFINIDO en caso de que las protecciones no salgan



Para un cortocircuito bipolar en bornos del transformador en hen en consideración las impedancias directas e inversas, por lo que es necesario determinarlas.

GENERADOR:  $Z_{1G} = Z_{2G} = \frac{R_G\% + jX_G''\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{0'3 + 10'5j}{100} \cdot \frac{10'5^2}{100} = 0'0033075 + 0'1157625j$

Referidas estas impedancias al nivel eléctrico del secundario del transformador

$$Z'_{1G} = Z'_{2G} = \frac{Z_{1G}}{(M')^2} = \frac{0'0033075 + 0'1157625j}{\left(\frac{10'5}{115}\right)^2} = (0'396 + 13'88j) \Omega = Z_G$$

TRANSFORMADOR:

$$U_x\% = \sqrt{(U_{cc}\%)^2 - (U_{\Omega}\%)^2} = \sqrt{11'5^2 - 0'5^2} = 2\sqrt{33} \approx 11'5\%$$

$$Z_1 = Z_{2T} = \frac{U_{\Omega}\% + U_x\% \cdot j}{100} \cdot \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} = \frac{0'5 + 11'5j}{100} \cdot \frac{115^2}{100} = (0'66125 + 15'20875j) \Omega = Z_T$$

Por otro lado la impedancia homopolar del transformador tiene por valor:

$$\frac{Z_{0T}}{Z_{2T}} = 0'8 \quad \vec{Z}_{0T} = R_{2,2T} \cdot 0'8 + X_{1,2T} \cdot 0'8j \Rightarrow Z_{0T} = 0'66125 \cdot 0'8 + 15'20875j \cdot 0'8 =$$

$$Z_{0T} = 12'1784945703 \quad | \quad 87'510447078^\circ \Omega$$

2 a par fado  
Z<sub>0</sub>  
CCTO Δ  
TERRA

• La corriente inicial simétrica subtransitoria está determinada por:

$$I_{k2}'' = \frac{C \cdot U_N}{(Z_1 + Z_2)} \Rightarrow \text{corresponde a la ecuación última de página anterior.}$$

$C = 1'1$  PAG 42

$$I_{k2}'' = \frac{C \cdot U_N}{2(Z_G + Z_T)} \Rightarrow I_{k2}'' = \frac{1'1 \cdot 110 \cdot 10^3}{2[(0'396 + 13'88j) + (0'66125 + 15'20875j)]} =$$

$$I_{k2}'' = 2078'4694795 \quad | \quad -87'9184629712^\circ \text{ A}$$

• La tensión en la fase no afectada por el cortocircuito vale:

$$U_R = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1'1 \cdot 110000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2(0'66125 + 15'20875j)}{(0'396 + 13'88j) + (0'66125 + 15'20875j)}$$

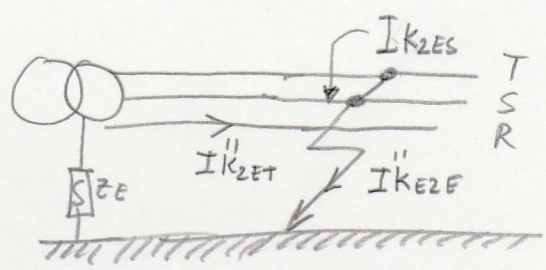
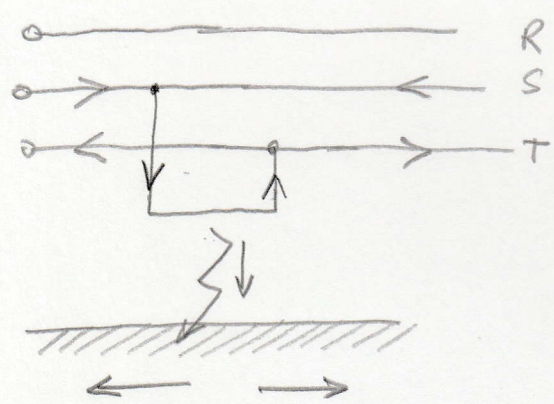
$$7306919158322 - 520'352221103 \cdot j = U_e =$$

Las impedancias directas e inversas son iguales, la tensión en la fase afectada no queda modificada por la presencia del cortocircito bipolar, es decir:

$$U_R = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2(z_2)}{z_1 + z_2} = U_R = \frac{1'1 \cdot 11000}{\sqrt{3}} = 69859'3825719 \text{ V. por lo que}$$

podemos deducir que la tensión en la fase no afectada no sufre ninguna modificación.

2) En el caso del cortocircito bipolar a tierra, dispone de las mismas características que el circuito bifásico sin contacto a tierra, pero en este caso, con pérdida de energía hacia tierra. Es necesario considerar para este fallo, además de las redes de secuencia directa e inversa, la red de secuencia homopolar debido a la pérdida de energía.

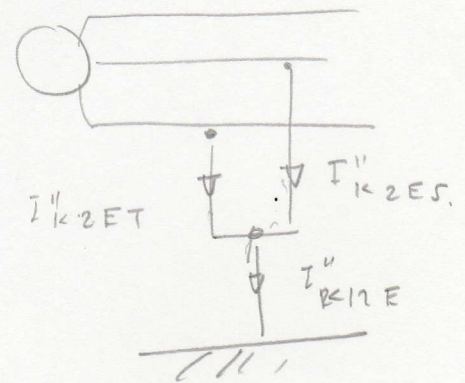


Las expresiones de los corrientes son:

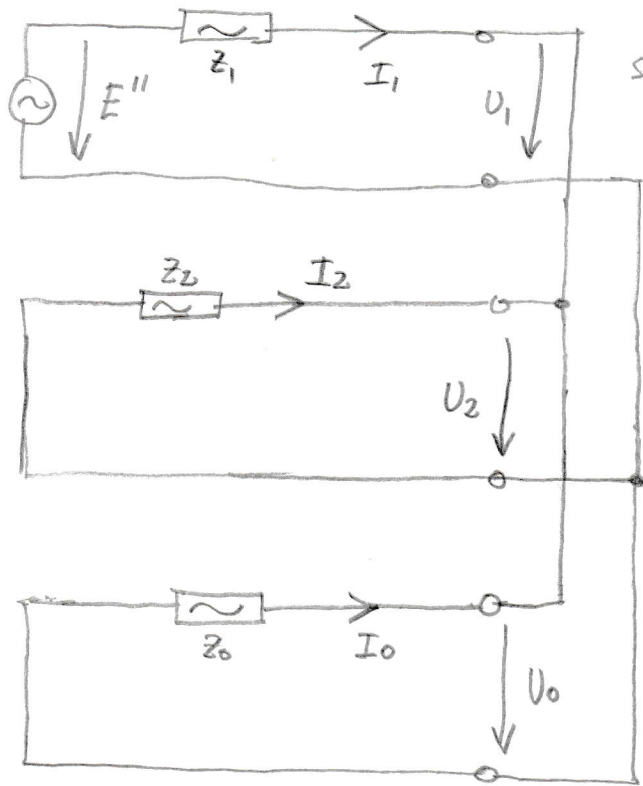
$$I''_{K2ES} = \vec{I}_S = jC \cdot U_N \cdot \frac{a^2 \vec{Z}_2 - \vec{Z}_0}{\vec{Z}_1 \cdot \vec{Z}_2 + \vec{Z}_2 \cdot \vec{Z}_0 + \vec{Z}_1 \cdot \vec{Z}_0}$$

$$I''_{K2ET} = \vec{I}_T = -jC U_N \cdot \frac{a^2 \vec{Z}_2 - \vec{Z}_0}{\vec{Z}_1 \cdot \vec{Z}_2 + \vec{Z}_2 \cdot \vec{Z}_0 + \vec{Z}_1 \cdot \vec{Z}_0}$$

$$I''_{KE2E} = \vec{I}_S + \vec{I}_T = -\sqrt{3} C U_N \cdot \frac{\vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 \cdot \vec{Z}_2 + \vec{Z}_2 \cdot \vec{Z}_0 + \vec{Z}_1 \cdot \vec{Z}_0}$$



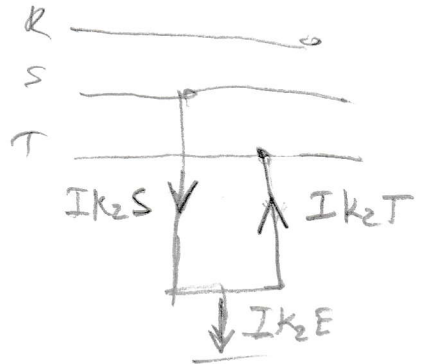
Correspondiente al circuito siguiente:



sistema directo

sistema inverso

sistema homopolular



$$Z_1 = Z_2 = Z_T + Z_G$$

(1) de donde:

$$I_{k2}'' = \frac{C \cdot U_N}{2(Z_G + Z_T)} \Rightarrow \text{Siendo } Z_1 = Z_2 = (Z_G + Z_T) \cdot 2 \text{ veces para satisfacer esta}$$

$$\text{condición } I_{k2}'' = \frac{C \cdot U_N}{2(Z_1 + Z_2)} \quad Z_1 = Z_2 = (0'396 + 13'88j + 0'66125 + 15'20875j)$$

La tensión en la fase no afectada por el cortocircuito:

$$U_R = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \Rightarrow U_R = \frac{1'1 \cdot 110000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2(0'396 + 13'88j + 0'66125 + 15'20875j)}{2(0'396 + 13'88j) + (0'66125 + 15'20875j)}$$

$$Z_1 = Z_2 = 29'1079568868 \quad |87'9184629712^\circ \Omega$$

$$Z_{1T} = Z_{2T} \quad Z_{1G} = Z_{2G}$$

$$Z_1 = Z_2 \quad (2) \quad (R)$$

$$U_R = \frac{1'1 \cdot 110000}{\sqrt{3}} = 69859'3825719 \text{ V}$$

$$I_{k2ES}'' = I_S = 1 \angle 190^\circ \cdot 1'1 \cdot 110000 \cdot \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 29'1079568868 \angle 87'9184629712^\circ - 12'1784945703 \angle 87'510447078^\circ}{29'1079568868 \angle 87'918462^\circ \cdot 29'10795688 \dots + 29'107 \angle 12^\circ \dots - 12'178 \angle 87'5 \dots + 29'1074 \dots \cdot 12'178 \angle 87'53^\circ \dots}$$

$$I_{k2ES}'' = I_S = 1 \angle 190^\circ \cdot 1'1 \cdot 110000 \cdot \frac{36'8027629247 \angle -135'499187678^\circ}{1556'24555677 \angle 175'651046495} = 2861'45 \angle 138'849765827^\circ \text{ A}$$

$$I_{k_{2ET}} = I_T = 1_{1270^\circ} \cdot 1' \cdot 110000 \cdot \frac{1240^\circ \cdot 29'1079568868 \mid 87'9184629712^\circ - 12'178 \mid 87'51^\circ}{29'107956 \mid 87'9184629712^\circ \dots + \dots - 12'178 \mid 87'51^\circ + 24'107 \mid 87'92^\circ - 12'178 \mid 87'51^\circ}$$

$$I_{k_{2ET}} = I_T = 1_{1270^\circ} \cdot 1' \cdot 110000 \cdot \frac{36'683765106 \mid -48'8606648854^\circ}{1556'24555677 \mid 175'651046495^\circ} = 2852'20771138 \mid 45'4882886196^\circ$$

$$I''_{k_{2E}} = \vec{I}_S + \vec{I}_T = -\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N \cdot \frac{\vec{Z}_2}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_1 \cdot Z_0} =$$

$$I''_{k_{2E}} = -\sqrt{3} \cdot 1' \cdot 110000 \cdot \frac{29'1079568868 \mid 87'9184629712^\circ}{29'1079568868 \mid 87'9184629712^\circ \dots + \dots \cdot 12'1784945703 \mid 87'510447078^\circ + 29'1079568868 \mid 87'9184629712^\circ}$$

$Z = Z_1 = Z_2$  Simplificando el denominador

$$Z^2 + 2(Z \cdot Z_0)$$

$$I''_{k_{2E}} = \frac{29'1079568868 \mid 87'9184629712^\circ}{1556'24555677 \mid 175'651046495^\circ} \cdot 110000 \cdot 1' \cdot -\sqrt{3} = 3919'94159397 \mid 92'267416476^\circ$$

La comprobación se realiza de la siguiente forma:

$$I''_{k_{2E}} = \vec{I}_S + \vec{I}_T = 2861'45 \mid 138'849765827^\circ + 2852'20771138 \mid 45'4882886196^\circ = 3919'9347635 \mid 92'2673109689^\circ$$

La tensión en los pines afectados por el circuito traven en A valor nulo, mientras que la tensión en la fase no afectada por el cortocircuito su valor es de:

$$U_R = \sqrt{3} \cdot C \cdot U_N \cdot \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_1 \cdot Z_0} \rightarrow$$

$$U_R = \sqrt{3} \cdot 1' \cdot 110000 \cdot \frac{29'1079568868 \mid 87'9184629712^\circ \cdot 12'1784945703 \mid 87'510447078^\circ}{\left( 29'1079568868 \mid 87'9184629712^\circ \right)^2 + 2 \left( 29'1079568868 \mid 87'9184629712^\circ \cdot 12'1784945703 \mid 87'510447078^\circ \right)}$$

$$U_R = 47738'9874162 \mid -0'222136445915^\circ$$

Esto significa que si bien inicialmente la tensión de fase era

de

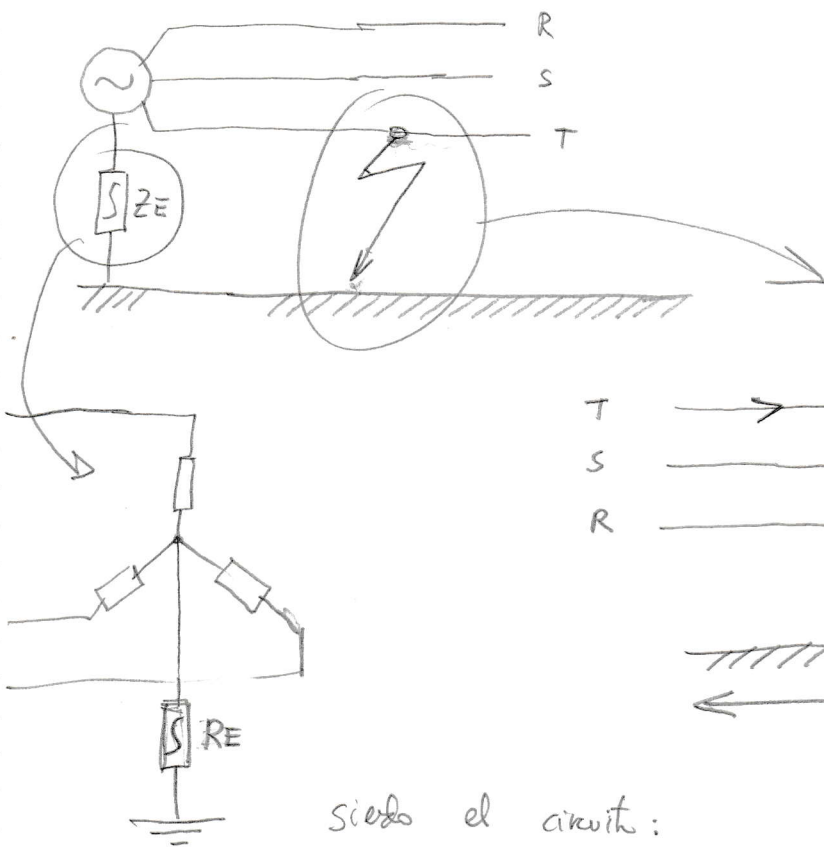
$$U_R = 1'1 \frac{110000}{\sqrt{3}} = 69859V$$

, la apertura del cortocircuito genera una disminución de la misma hasta alcanzar los 47738'9874 V

P2.12 Un alternador síncrono trifásico funciona en vacío con una tensión de 11kV, accidentalmente se origina un cortocircuito unipolar a tierra de  $0.05\Omega$ . Los valores de las reactancias directa, inversa y homopolar desde el cortocircuito hasta el generador son de  $0.5\Omega$ ,  $0.2\Omega$  y  $0.1\Omega$  respectivamente. Sabiendo que el centro de estrella del generador está conectado a tierra a través de una resistencia de  $0.2\Omega$ . Determinar:

- 1) El valor de la corriente inicial simétrica de cortocircuito.
- 2) El valor de las tensiones en las fases no afectadas por el cortocircuito.

FUNCIONA VACÍO



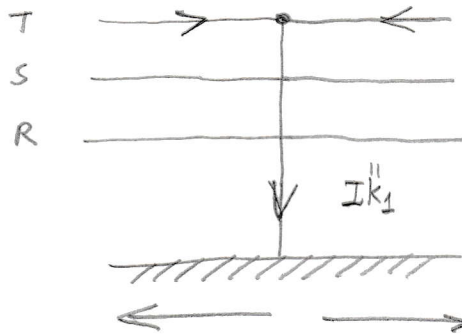
$$X_1 = 0.5\Omega$$

$$X_2 = 0.2\Omega$$

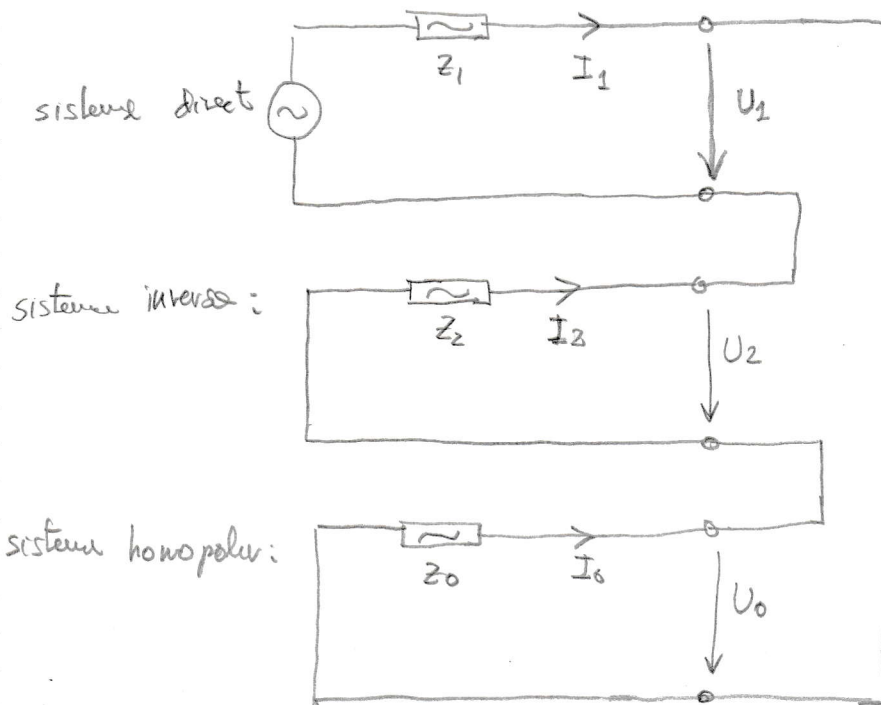
$$X_0 = 0.1\Omega$$

$$R_E = 0.2\Omega$$

$Z_{cc}$



siendo el circuito:



$$\vec{U}_1 = E'' - \vec{I}_1 \cdot \vec{Z}_1$$

$$\vec{U}_2 = -\vec{I}_2 \cdot \vec{Z}_2$$

$$U_0 = -\vec{I}_0 \cdot \vec{Z}_0$$

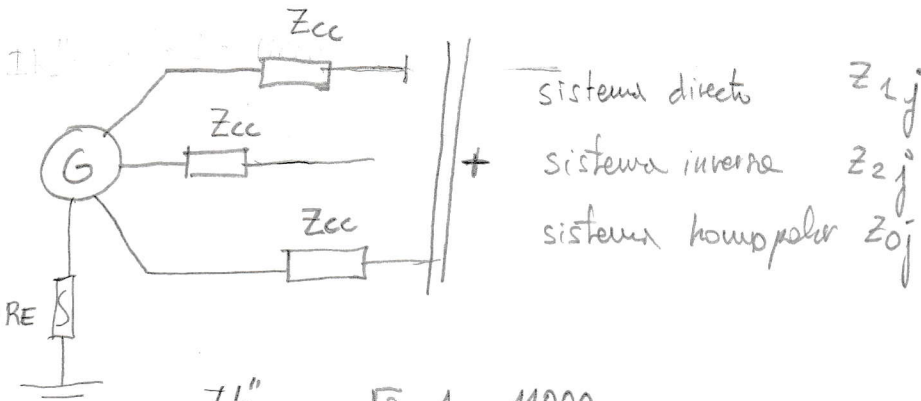
$$I_{k1}'' = 3 \cdot \frac{E''}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0}$$

$$I_{K1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Pero como indica el problema que la tensión en el momento de producirse el cortocircuito es de 11kV, en este caso el factor "c" será la unidad, porque estamos en el apartado de generadores página 43 (Redes trifásicas alimentadas con generadores)

3.11.1 Redes trifásicas con tensión nominal superior 1kV  $C=1 \rightarrow [I_{cc \text{ mín}}]$   
 ? en  $I_{K1}''$ ?

POR ESTAR EN VACÍO



$$I_{K1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 11000}{(3 \cdot 0'05 + 3 \cdot 0'2) + (0'5j + 0'2j + 0'1j)} = 17374'4381743 \angle -46'8476102661^\circ \text{ A} //$$

Cortocircuito de cortocircuito mínimos, en vacío superior según PAG 42  $C=1$

$U = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}} \rightarrow U = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}}$ , la tensión en la fase afectada por el cortocircuito es nula, mientras que las otras dos fases presentarán una tensión cuyo valor es:

$$U_s = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}} \left[ a^2 - \frac{a^2 Z_1 + a Z_2 + a Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right]; U_T = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}} \left[ a - \frac{a Z_1 + a^2 Z_2 + Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right]$$

como  $C=1$

$$U_s = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}} \cdot \left[ a - \frac{a \cdot Z_1 + a^2 \cdot Z_2 + Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right]; U_T = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3}} \cdot \left[ a - \frac{a Z_1 + a^2 Z_2 + Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \right]$$

$$U_s = \frac{1 \cdot 11000}{\sqrt{3}} \cdot \left[ 1 \angle 124^\circ - \frac{1 \angle 124^\circ \cdot 0'5 \angle 190^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 0'2 \angle 190^\circ + (3 \cdot 0'25 + 0'1j)}{0'5 \angle 190^\circ + 0'2 \angle 190^\circ + (3 \cdot 0'25 + 0'1j)} \right] = 6123'86204578 \angle -177'723944259^\circ$$

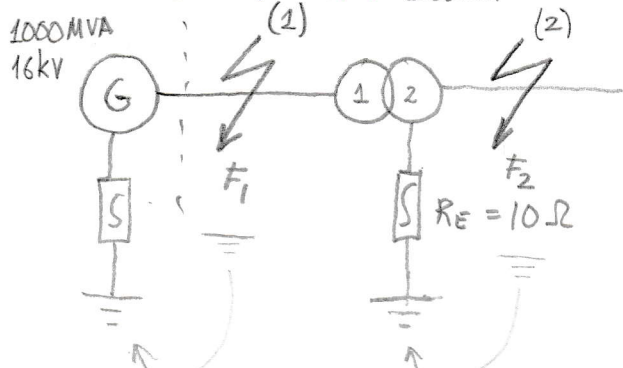
$$U_T = \frac{11000}{\sqrt{3}} \cdot \left[ 1 \angle 120^\circ - \frac{1 \angle 120^\circ \cdot 0'5 \angle 190^\circ + 1 \angle 124^\circ \cdot 0'2 \angle 190^\circ + (3 \cdot 0'25 + 0'1j)}{0'5 \angle 190^\circ + 0'2 \angle 190^\circ + (3 \cdot 0'25 + 0'1j)} \right] = 9475'61580763 \angle 115'37586637^\circ$$

2.14 Un alternador tipo turbo (turbo alternador) de 1000 MVA a 16 kV tiene una reactancia subtransitoria del 20% y una reactancia homopolar del 10% fijando con el neutro puesto a tierra, rigidamente. Este conectado a un banco de transformadores monofásicos en conexión  $\Delta Y$  de 1000 MVA con una relación de transformación de 16/420 kV y tensión de cortocircuito del 16% y cdt óhmica nominal del 0'25% presentando una relación  $R_0/R_1=1$ ;  $X_0/X_1=1$  estando puesto a tierra el neutro del transformador a través de una resistencia de 10  $\Omega$ . Determinar el valor de la corriente de choque cuando se produce un cortocircuito unipolar a tierra:

$$U_{NG} = 16000 \text{ V}$$

1) En bornes del alternador

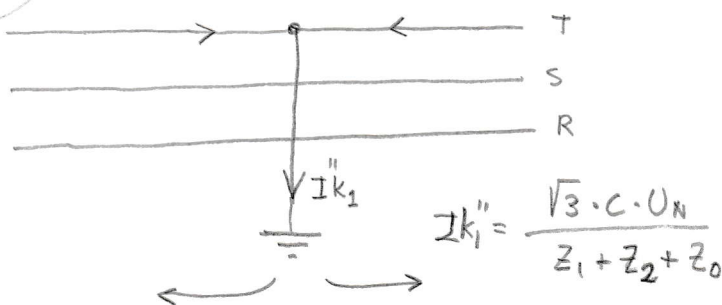
2) En bornes del transformador, sabiendo que la tensión nominal del transformador es de 400 kV. 1000 MVA



$$m_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{16000}{420000} = \text{Estación elevadora}$$

$X''_d = 20\%$  ;  $X_0\% = 10\%$  GENERADOR - -I  
 $U_{cc}\% = 16\%$  ;  $U_{\Omega}\% = 0'25\%$  TRANSFORMADOR - X'  
 U

1) Cortocircuito unipolar.



$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

En este primer apartado se pretende determinar la corriente de choque (valor instantánea máxima de la corriente de cortocircuito) y para ella es preciso calcular previamente la corriente de cortocircuito unipolar a tierra cuando se produce un cortocircuito en  $F_1$ . La expresión que determina la corriente de cortocircuito unipolar es:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad , \quad \text{siendo } C = 1'1 \text{ para } U_N > 1 \text{ kV} \quad \text{PAG 42 T-3}$$

- lógicamente una red de AT

$$Z_1 = R_G + X''_d j ; \quad Z_2 = Z_1 ; \quad Z_0 = R_0 + X_0 j$$

PAG 56

$R_G =$  resistencia de una fase del generador

$$R_0 = R_G = 0'05 \cdot X''_d$$

Alternador de  $S \geq 100 \text{ MVA}$

# Bornes del Alternador.

- cto próximo a  $\sqrt{2}$  que ocurre por lo menos una vez en una corriente eficaz inicial de la componente alterna de corriente que supone el doble de la corriente nominal del alternador.

- La Reactancia para la componente transitoria en los generadores síncronos con bobinas amortiguadoras aparece en los circuitos notándose unos fenómenos de compresión entre los circuitos de amortiguación y los de excitación.

Estos fenómenos provocan en el cto estático, la componente subtransitoria de la corriente inicial simétrica de cto cuyo valor  $\sqrt{2} \cdot I_k'' = I_s$

- Como nos piden la corriente de choque  $I_s$

será

$$I_s = 1.8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

En bornes del generador

$$\frac{R_k}{X_k} = 0.1$$

pero según que sea 1.9 por ser 0.06 ...

$$\text{Siendo } X''d = \frac{X''d\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{20}{100} \cdot \frac{16000^2}{1000000000} = 0'0512 \Omega //$$

$$R_G = 0'05 \cdot X''d \rightarrow R_G = 0'05 \cdot 0'0512 = 0'00256 \Omega //$$
 , en cuanto a la reactancia homopolar:

$$X_0 = \frac{X_0\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{16000^2}{1000000000} = 0'0256 \Omega //$$

$$R_0 = R_G = 0'05 \cdot 0'0512 = 0'00256 \Omega //$$
       $Z_1 = Z_2 \quad 2(Z) \rightarrow 2(R_G + X''d j)$

$$I''k_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot 1'1 \cdot 16000}{2(0'00256 + 0'0512 j) + (0'00256 + 0'0256 j)} = 237729'457448 \angle -86'5663696375^\circ \text{ A}$$

La corriente de choque  $I_s$  vale:  $I_s = k \cdot \sqrt{2} \cdot I''k_1$ , por lo tanto el valor ( $k$ ) es función de la relación  $R/X$  del circuito según la gráfica de la página 45 del libro T-3.

Antes de la ecuación anterior se tenía  $Z_1 + Z_2 + Z_0$ , pero como  $Z_1 = Z_2$   $2(Z) \rightarrow 2(R_G + X''d j)$ , y por otro lado  $(R_0 + X_0 j)$ , ahora sumamos  $R_T = 2R_G + R_0$  y tenemos.

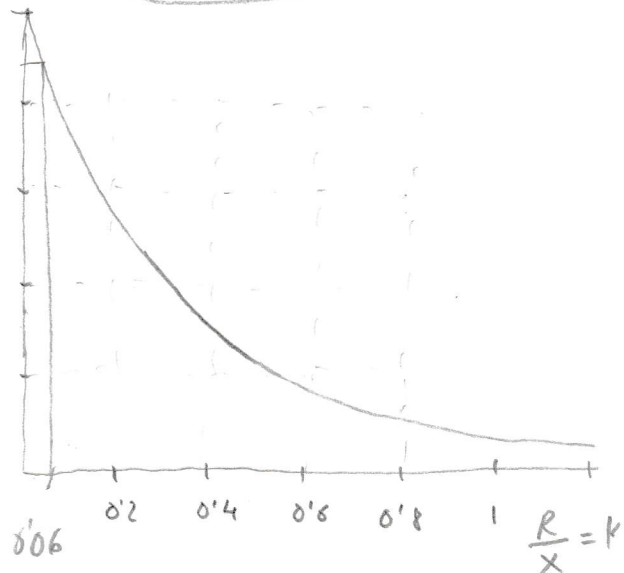
$$R_T = 2(0'00256) + 0'00256 = 0'00768 \Omega$$

Y por otro lado tenemos:  $X_T = 2(X''d j) + X_0 j = 2(0'0512 j) + 0'0256 j = 0'128 j \Omega$

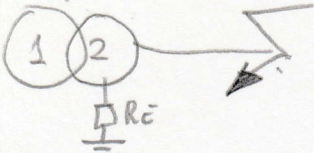
En función de  $\frac{R}{X}$ ,  $k$  es:  $\frac{R}{X} = \frac{0'00768}{0'128} = 0'06 \rightarrow k = 1'9$

$$I_s = 1'9 \cdot \sqrt{2} \cdot 237729'457448 = 638780'423505 \text{ A}$$

2- En este apartado se nos pide calcular la corriente de choque para un cortocircuito unipolar a tierra pero en el transformador, por lo que la corriente se cierra a través de la puesta a tierra del neutro del transformador, siendo el secundario en estrella

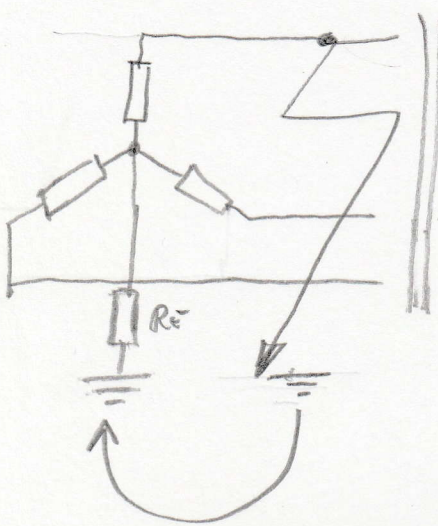


26/420kV



Siendo esto un cortocircuito unipolar a tierra, ya que son bobinas de transformadores monofásicos, el cortocircuito se produce según abajo pero resulta que se deriva a tierra y se cierra por el neutro del transformador.

Estando el secundario en (Y) estrella.



(\*) No alcanza a entender que un bobinado de transformador monofásico esté en estrella.

$$Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{16\%}{100} \cdot \frac{420000^2}{1000 \cdot 10^6} = 28'224 \Omega$$

de donde

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

$$R_T = \frac{U_{\Omega}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{0'25}{100} \cdot \frac{420000^2}{1000 \cdot 10^6} = 0'441 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{28'224^2 - 0'441^2}$$

La impedancia homopolar es  $Z_{0T}$

No hay  $\frac{R_0}{R_1} = 1$   
 $\frac{X_0}{X_1} = 1$

$$X_T = 28'22 \Omega$$

$$Z_{0T} = (0'441 + 28'22j) \Omega$$

También las impedancias directa e inversa del alternador intervienen en el valor de la corriente de cortocircuito, estas impedancias pasadas al nivel eléctrico del secundario del transformador son:

$$Z'_{1G} = Z'_{2G} = \frac{R_G + X''d_j}{\frac{U_1}{U_2}} = \frac{0'00256 + 0'0512j}{\frac{16000}{420000}} = (1'764 + 35'28j) \Omega$$

También se limita la corriente de cortocircuito unipolar a tierra la resistencia de puesta a tierra  $R_E$ , e interviene con un valor triple  $3 \cdot R_E$  de donde:  $I'_{k1}$  es: (siendo  $R_E = 10 \Omega$ )

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1'1 \cdot 400000}{2(0'441 + 28'22j) + (3 \cdot 10 + 0'441 + 28'22j) + 2(1'764 + 35'28j)}$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_{N2}}{Z_{0T} + Z_{0T} + (3 \cdot R_E + Z_{0T}) + Z_{16} + Z_{26}} = \frac{762102}{34'851 + 155'22j} = \frac{4784}{\sqrt{34'851^2 + 155'22^2}}$$

$$I''_{k1} = 4791'1396 \text{ A}$$

La corriente de carga valdrá  $I_s = k \sqrt{2} I''_k$  ;

según qué / en

$$\frac{R}{X} = \frac{34'851}{155'22} = 0'22452$$

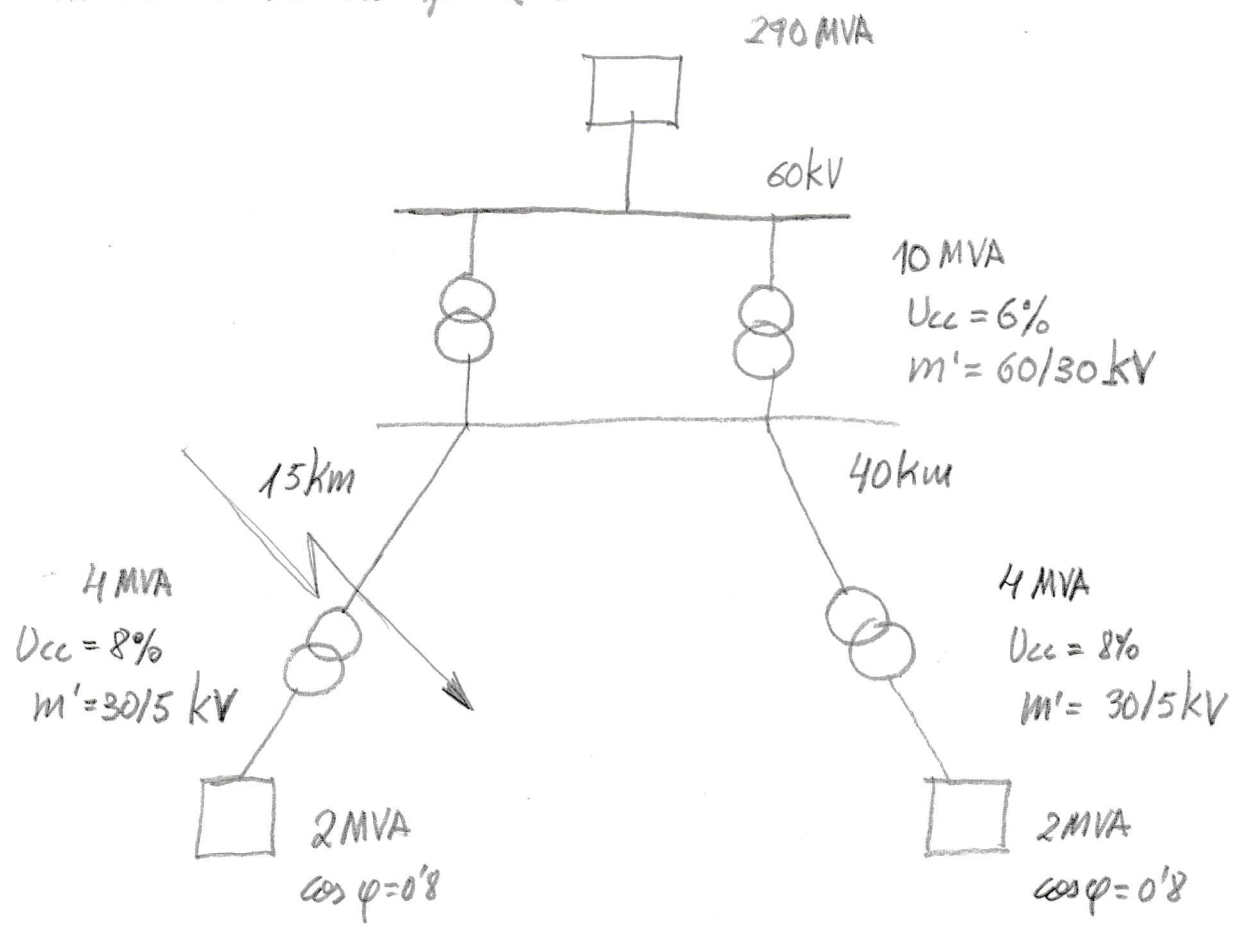
$k = 1'5 \rightarrow I_s = 1'5 \cdot \sqrt{2} \cdot 4791'1396 = 10163'541 \text{ A}$

P2.16 Una subestación de 290 MVA alimenta a 60 kV dos transformadores conectados en paralelo de: 10 MVA,  $U_{cc} = 6\%$ , relación de tensiones 60/30 kV en conexión Dy5 con los neutros puestas a tierra. De estos transformadores parten sendas líneas de 15 y 40 km con una reactancia inductiva kilométrica de  $0.35 \Omega$  alimentada cada una de ellas a un transformador en conexión Dd de 4 MVA,  $U_{cc} = 8\%$  y relación de tensiones de 30/5 kV. Estos transformadores conectan cargas de 2 MVA con factor de potencia  $0.8$  inductivo:

Del extremo de la línea de 15 km parte otra de 20 km de las mismas características y se produce un cortocircuito tripolar en su extremo. Determinar despreciando las resistencias del circuito y sabiendo que el neutro de los cuerpos está puesto a tierra:

- 1) El valor de la impedancia directa equivalente del conjunto del sistema.
- 2) El valor de la corriente inicial simétrica de cortocircuito tripolar.

El circuito es de la forma:



Determinamos las impedancias que hay en el circuito:

ACOMETIDA:

$$I''_{kQ} = \frac{S''_{kQ}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ}} = \frac{290 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 60000} = 2790'52630109 \text{ A}$$

$$Z_Q = X_Q = \frac{C \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{1'1 \cdot 60000}{\sqrt{3} \cdot 2790'52630109} = 13'655 \Omega$$

Pasamos esta impedancia al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito

$$Z'_Q = \frac{Z_Q}{(m')^2} = \frac{13'655}{\left(\frac{60}{30}\right)^2} = 3'414 \Omega$$

Transformadores de 10 MVA  $U_{cc} = 6\%$   $m' = \frac{60}{30}$  kV

$$Z_T = X_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{30000^2}{10 \cdot 10^6} = 5'4 \Omega$$

Línea de 15 km  $\rightarrow X_{L15} = 0'35 \cdot 15 = 5'25 \Omega$

y de 40 km  $\rightarrow X_{L40} = 0'35 \cdot 40 = 14 \Omega$

TRANSFORMADORES de 4 MVA ;  $U_{cc} = 8\%$   $m' = \frac{30}{5}$  kV

La impedancia del transformador referida al nivel eléctrico del secundario del mismo 5 kV es:

$$Z_T = X_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{5000^2}{4 \cdot 10^6} = 0'5 \Omega$$

Pasamos esta impedancia al nivel eléctrico del primario del transformador donde se ha producido el cortocircuito:

$$X'_T = X_T \cdot (m')^2 = 0'5 \cdot \left(\frac{30}{5}\right)^2 = 18 \Omega$$

Conjuntos de 2 MVA: La intensidad de la carga es de:

$$I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 5000} = 230'9 \text{ A}$$

por lo que se le puede asignar por fase una impedancia de:

$$Z_c = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_c} = \frac{5000}{\sqrt{3} \cdot 230'9} = 12'5 \Omega$$

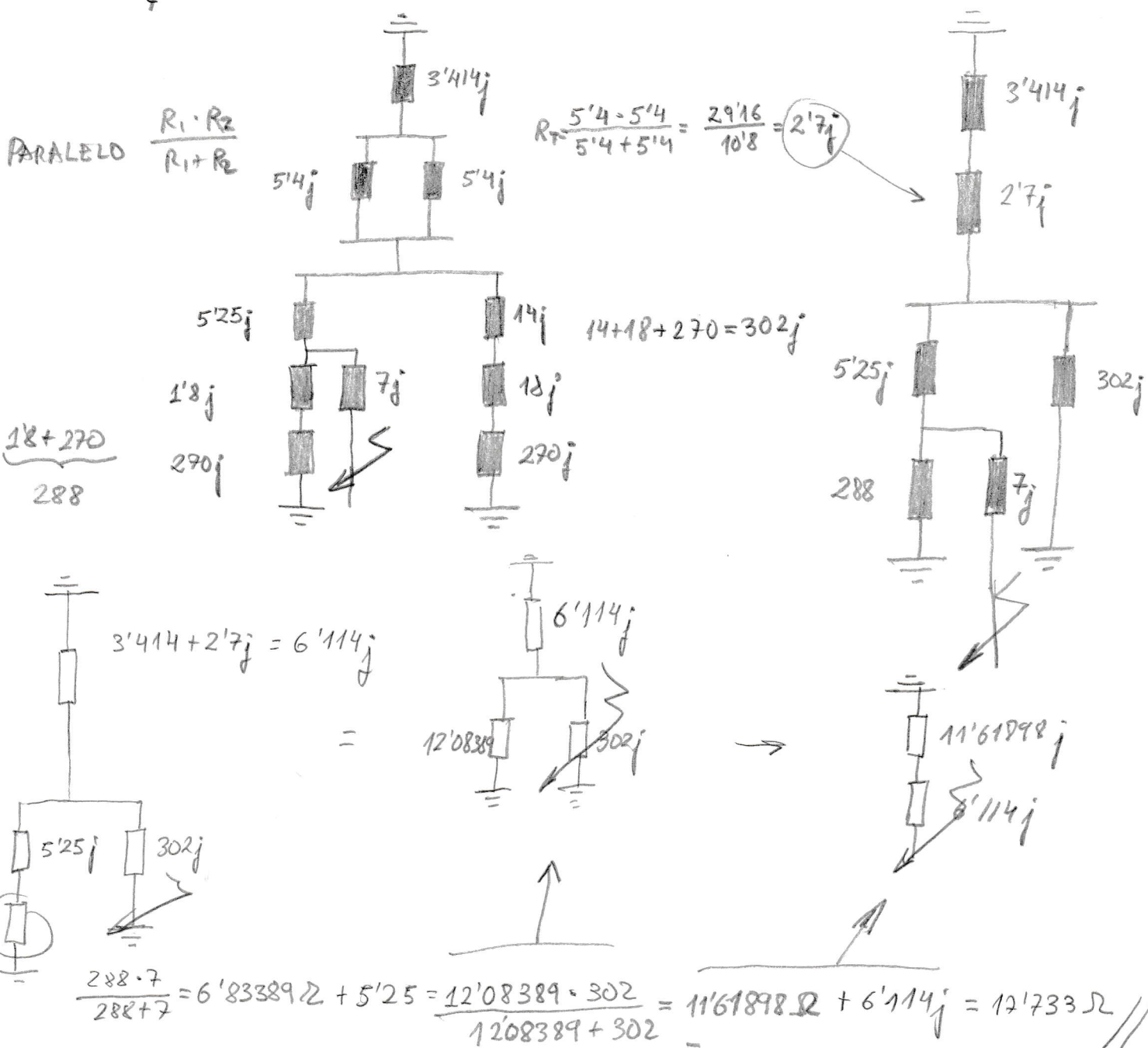
Conociendo la impedancia de la carga y como hemos despreciado los resistores en el sistema, resulta que la reactancia inductiva de la carga es de:

$$X_c = Z_c \cdot \text{sen } \varphi = 12'5 \cdot 0'6 = 7'5 \Omega$$

Reponida esta reactancia inductiva equivalente al nivel eléctrico del primario de transformador donde se ha producido el cortocircuito resulta:

$$X_c' = X_c \cdot (M')^2 = 7'5 \left(\frac{30}{5}\right)^2 = 270 \Omega$$

Línea 20 km  $X_{L20} = 0'35 \cdot 20 = 7 \Omega$ , por lo que resulta el siguiente circuito equivalente.



En resumen, la impedancia directa equivalente del circuito es de 17'733Ω

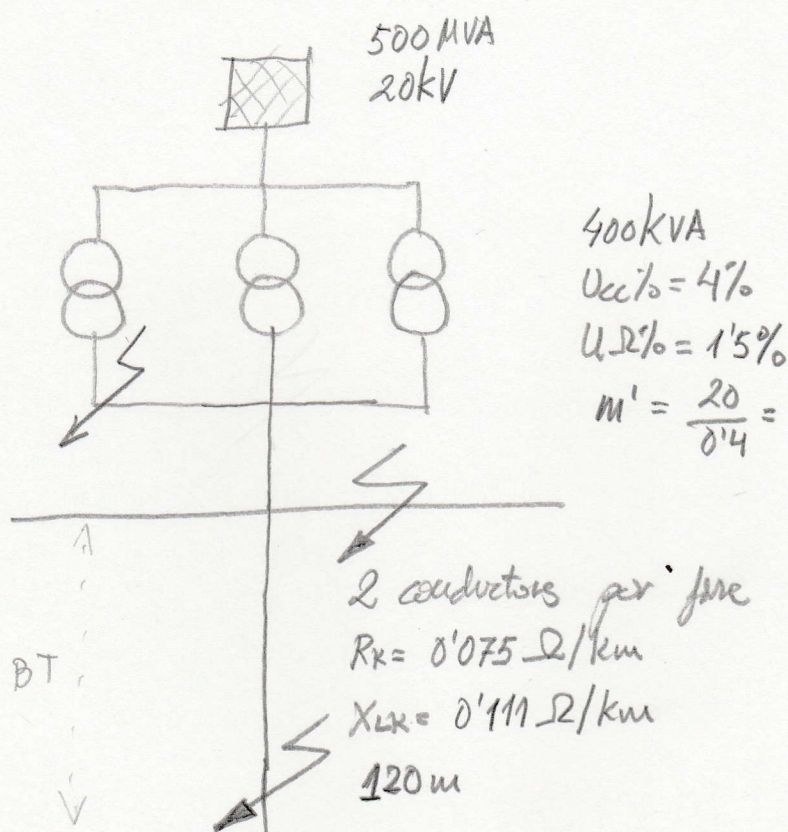
2) La intensidad de cortocircuito en el punto defecto para un cortocircuito en Alta Tensión es de:

$$I_{K3}'' = \frac{1'1 \cdot 30000}{\sqrt{3} \cdot 17'733} = 1074 \text{ A}$$

Esquemas de los modos de los tramos y 2) apartados.

P2.18 Desde una acometida con potencia de cortocircuito de 500 MVA son alimentados a 20 kV tres transformadores iguales conectados en paralelo de 400 kVA,  $U_{cc}\% = 4\%$ ,  $U_R\% = 1.5\%$  y relación de transformación en serie de 20/0.4 kV. Del embudo de BT parte una línea trifásica de 120 m con dos conductores por fase conectados en paralelo, siendo las características de cada cable  $R_k = 0.075 \Omega/\text{km}$  y  $X_k = 0.111 \Omega/\text{km}$ . Determinar la intensidad para un cortocircuito tripolar y bipolar cuando este se produce en:

- 1) Borneo de cualquiera de los tres transformadores:
- 2) En el embudo:
- 3) Al final de la línea de BT:



En este problema se pretende determinar los corrientes de cortocircuito en distintos puntos de una instalación y a partir de este valor definir los poderes de corte de los interruptores automáticos a disponer. En primer lugar determinaremos las impedancias de los distintos elementos que intervinen en la instalación.

Acometida: 
$$Z_Q = \frac{c \cdot U_N^2}{S''_{KR}} = \frac{1.1 \cdot 20^2}{500} = 0.88 \Omega$$

Pasemos esta impedancia al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito.

$$Z_p = \frac{Z_p}{M^2} = \frac{0'88}{\left(\frac{20}{0'4}\right)^2} \cdot 10^3 = 0'352 \text{ m}\Omega.$$

Descomponemos esta impedancia en su resistencia y reactancia, a falta de mayor información adoptamos los siguientes valores:

$$X'_p = 0'995 \cdot Z'_p = 0'995 \cdot 0'352 = 0'3502 \text{ m}\Omega$$

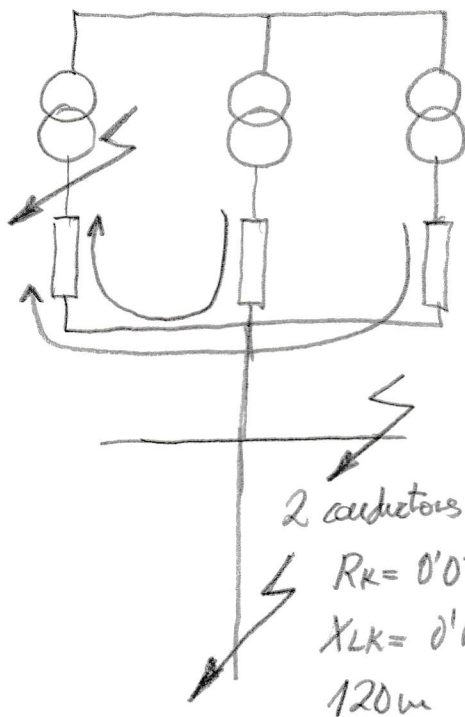
$$R'_p = 0'1 X'_p = 0'1 \cdot 0'35 = 0'035 \text{ m}\Omega$$

Transformador  $Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{400^2}{400} = 16 \text{ m}\Omega$

$$R_T = \frac{U_R\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{1'5}{100} \cdot \frac{400^2}{400} = 6 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = \sqrt{16^2 - 6^2} = 14'83 \text{ m}\Omega$$

Por estar en paralelo los tres transformadores y ser de iguales características podemos pasar la atención al lado de baja tensión y a continuación conectarlos en serie con cada uno de los transformadores, reiteramos que este circuito equivalente se puede hacer porque los transformadores son idénticos, por lo que tenemos el siguiente circuito.



400 kVA

$U_{cc}\% = 4\%$

$U_R\% = 1'5\%$

$M' = 20/0'4 \text{ kV}$

$3(R'_p + X'_p j)$

2 conductores por fase

$R_{LK} = 0'075 \Omega/\text{km}$

$X_{LK} = 0'111 \Omega/\text{km}$

120 m

Por lo que la impedancia del sistema transformador y acometida será (para cada conductor transformador - acometida).

$$R'' = 3 \cdot R'_2 + R_T = 3 \cdot 0'035 + 6 = 6'105 \text{ m}\Omega$$

$$X' = 3 X'_2 + X_T = 3 \cdot 0'035 + 14'83 = 15'88 \text{ m}\Omega$$

La corriente de cortocircuito en bornes del secundario de cualquier transformador será  $(n-1)$  veces la corriente de cortocircuito de cualquier transformador, en efecto es de fácil comprensión que la corriente de cortocircuito en bornes de uno cualquiera de los transformadores tendrá la corriente que proviene de los otros dos (se ha representado en rojo), por tanto  $(n-1)$  veces la corriente de un transformador, de donde la corriente que aporte cada transformador será:

$$I''_{K_3} = \frac{C \cdot U_{20T}}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (6'105 + 15'88j)} = 13'57 \text{ kA} \quad \text{en modo polar.}$$

$$I''_{K_3} = \frac{C \cdot U_{20T}}{Z_1 + Z_2} = \frac{1 \cdot 400}{2(6'105 + 15'88j)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{K_3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 13'57 = 11'75 \text{ kA}$$

luego el poder de corte mínimo necesario del interruptor automático a disponer en el secundario de cada uno de los transformadores (no se han representado estos interruptores automáticos es de:

$$I''_{TK_3} = 2 \cdot I''_{K_3} = 2 \cdot 13'57 = 27'14 \text{ kA}$$

$$I''_{TK_2} = 2 \cdot I''_{K_2} = 2 \cdot 11'75 = 23'5 \text{ kA}$$

2) La corriente de cortocircuito en el embudo en el caso de producirse una en la misma será la suma de las corrientes que provienen de cada uno de los transformadores, es decir, "n" veces la corriente de los transformadores dispuestos, en este caso tres de donde:

$$I''_{TK_3} = 3 \cdot I''_{K_3} = 3 \cdot 13'57 = 40'71 \text{ kA}$$

$$I''_{TK_2} = 3 \cdot I''_{K_2} = 3 \cdot 11'75 = 35'25 \text{ kA}$$

Estos rebotes de corriente los deberá soportar el embudo y además si como es normal se dispone un interruptor automático en inicio de la línea su poder de corte deberá ser igual o superior a la corriente más desfavorable, por tanto "n" veces la corriente que proviene de cualquier transformador:

3) Colocaremos por último la corriente de cortocircuito en el extremo final de la línea, puesto que en el extremo inicial coincidiría con la corriente en el embudo, no hay más que sumar la impedancia que presenta la línea teniendo en cuenta que por disponer dos cables por fase estos están en paralelo, a la impedancia del sistema formada por la acometida y los tres transformadores en paralelo, de donde la impedancia, de la línea será:

$$R_L = \frac{0'075 \cdot 0'12 \cdot 10^3}{2} = 4'5 \text{ m}\Omega$$

por otro lado la impedancia de la acometida (primaria y los secundarios de los transformadores) y de los tres transformadores en paralelo:

$$X_L = \frac{0'111 \cdot 0'12 \cdot 10^3}{2} = 6'66 \text{ m}\Omega$$

por otro lado la impedancia de la acometida (primaria y los secundarios de los transformadores) y de los tres transformadores en paralelo:

$$X_{TT} = \frac{X_T}{3} = \frac{15'88}{3} = 5'293 \text{ m}\Omega \quad ; \quad R_{TT} = \frac{R_T}{3} = \frac{6'105}{3} = 2'035 \text{ m}\Omega$$

por lo que los corrientes de cortocircuito son de

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_{ref}}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (2'035 + 4'5 + 5'293j + 6'66j)} = 16'952 \text{ kA}$$

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_{ref}}{Z_1 + Z_3} = \frac{1 \cdot 400}{2[2'035 + 5'293j] + [4'5 + 6'66j]} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 16'952 = 14'68 \text{ kA}$$

Estas corrientes son las corrientes máximas de cortocircuito tripolar y bipolar, se ha de comprobar además que para las corrientes mínimas de este circuito el valor de estas corrientes está situado en la zona de disparo magnético del interruptor automático situado aguas arriba de la línea, en caso contrario esta línea no está protegida por el interruptor automático situado en cabeza de la misma:

P2.20 Desde una subestación con potencia de cortocircuito de 250 MVA a 15 kV se alimentan a dos transformadores acoplados en paralelo por AT y BT siendo las características de ambos transformadores:

TRAF0: 1    630 kVA     $m' = \frac{15}{0.4}$      $U_{cc}\% = 4\%$      $P_{cu2} = 6.5 \text{ kW}$   
 TRAF0: 2    400 kVA     $m' = \frac{15}{0.4}$      $U_{cc}\% = 4\%$      $P_{cu2} = 4.6 \text{ kW}$

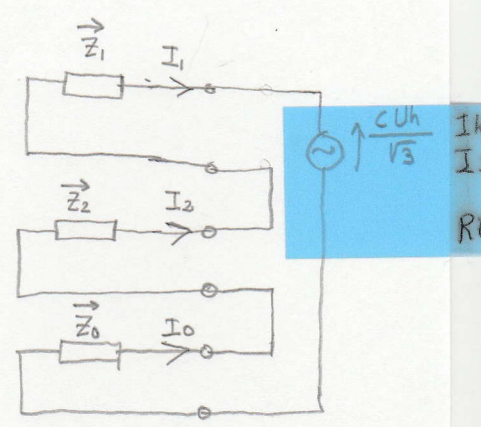
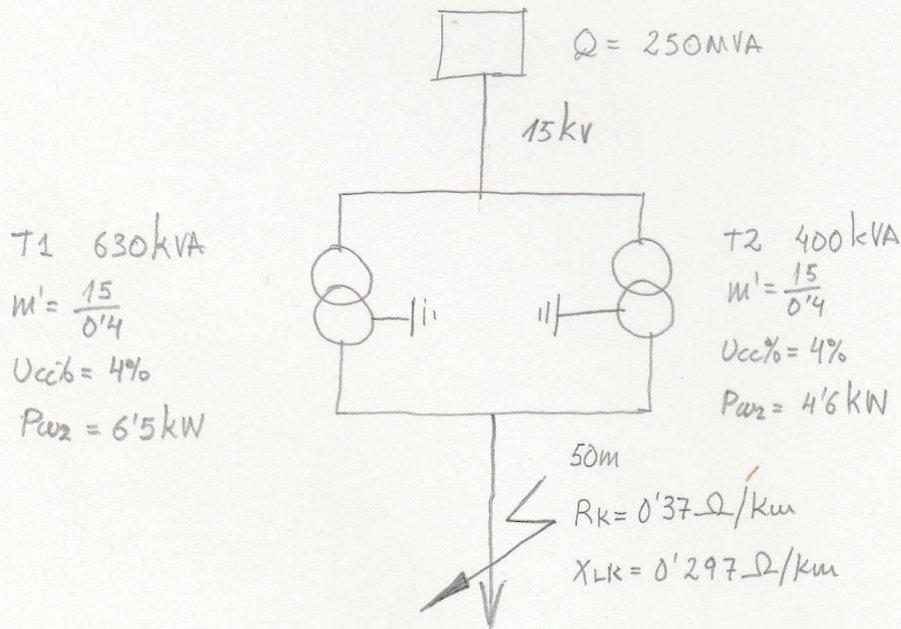
Del lado de BT parte una línea de características:  $R_k = 0.37 \Omega/\text{km}$  y  $X_k = 0.297 \Omega/\text{km}$ , sabiendo que se cumplen las siguientes relaciones

TRAF0: 1     $\frac{R_0}{R_1} = 1$      $\frac{X_0}{X_1} = 1$

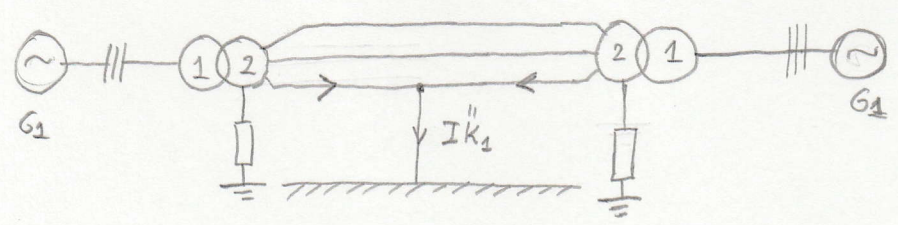
LINEA:     $\frac{R_0}{R_1} = 2$      $\frac{X_0}{X_1} = 3$

Determinar como se produce un cortocircuito unipolar a tierra en la línea de BT a 50 metros del inicio de la misma:

- 1) El valor eficaz de la corriente de cortocircuito.
- 2) El valor de la corriente de choque.



Determinar los valores de cortocircuito unipolar a tierra



$$I_k'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_h}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Determinamos los valores de las impedancias que intervienen en el circuito.

• ACOMETIDA:

$$Z_Q = \frac{c U_N^2}{S'' k_Q} = \frac{1'1 \cdot 15^2}{250} = 0'99 \Omega$$

Pasamos esta impedancia al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito

$$Z'_Q = \frac{Z_Q}{m'^2} = \frac{0'99}{\left(\frac{15}{0'4}\right)^2} \cdot 10^3 = 0'704 m \Omega$$

Descomponemos esta impedancia en su resistencia y reactancia, a falta de mayor información adoptamos los siguientes valores:

$$X'_Q = 0'995 Z'_Q = 0'995 \cdot 0'704 = 0'7 m \Omega$$

$$R'_Q = 0'1 X'_Q = 0'1 \cdot 0'7 = 0'07 m \Omega$$

TRAFIO T1 DE 630 KVA:

$$Z_{T1} = \frac{U_{cc} \%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{400^2}{630} = 10'158 m \Omega //$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2}$$

$$R_{T1} = \frac{P_{cu2}}{3 \cdot I_{2NT}^2} = \frac{6'5 \cdot 10^6}{3 \left(\frac{630000}{\sqrt{3} \cdot 400}\right)^2} = 2'62 m \Omega //$$

$$X_{T1} = \sqrt{10'158^2 - 2'62^2} = 9'81 m \Omega //$$

• TRAFIO T2 DE 400 KVA:

$$Z_{T2} = \frac{U_{cc} \%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{400^2}{400} = 16 m \Omega //$$

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2}$$

$$R_{T2} = \frac{P_{cu2}}{3 \cdot I_{2NT}^2} = \frac{4'6 \cdot 10^6}{3 \left(\frac{400000}{\sqrt{3} \cdot 400}\right)^2} = 4'6 m \Omega //$$

$$X_{T2} = \sqrt{16^2 - 4'6^2} = 15'324 m \Omega //$$

LINEA DE BT:

$$R_L = 0'37 \cdot 0'05 \cdot 10^3 = 18'5 m \Omega //$$

$$X_L = 0'297 \cdot 0'05 \cdot 10^3 = 14'85 m \Omega //$$

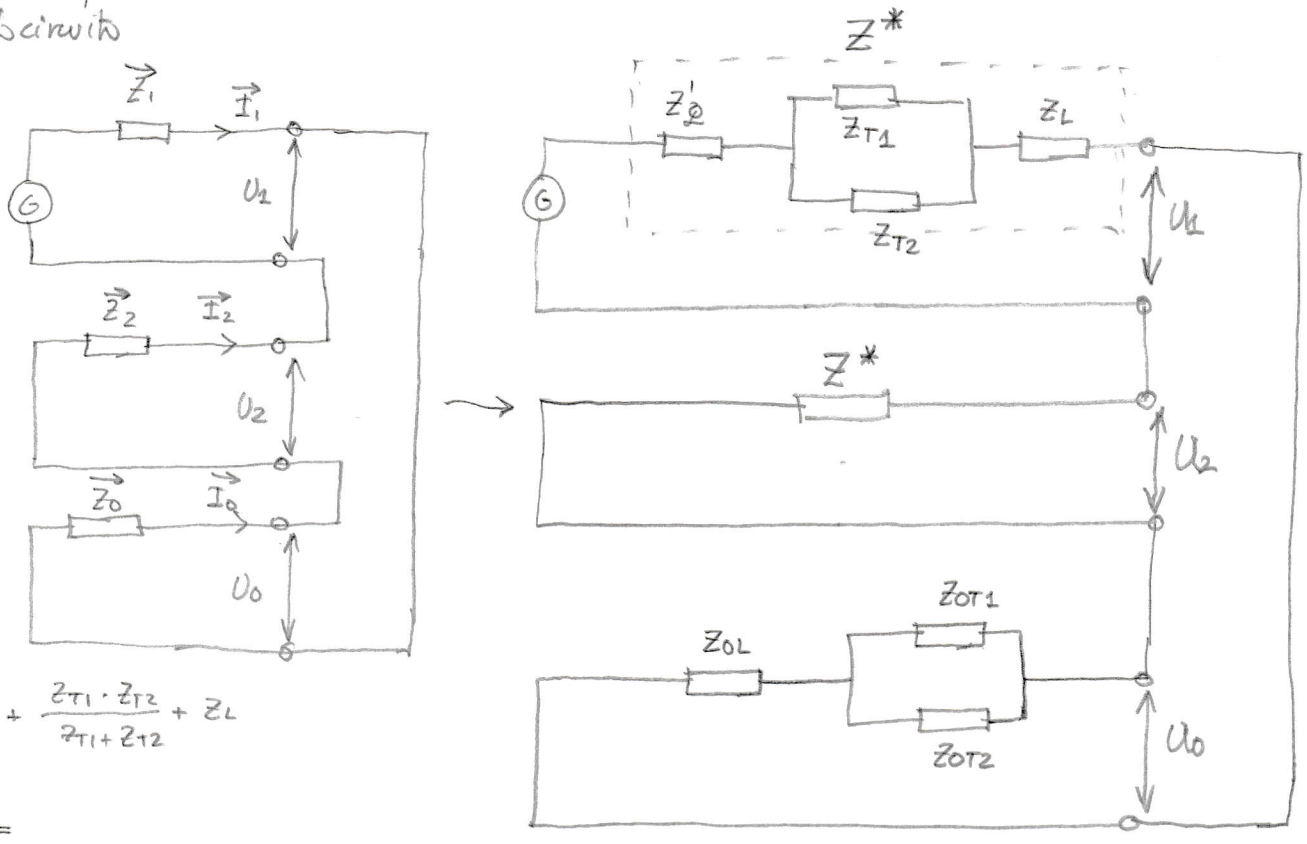
• RESISTENCIAS Y REACTANCIAS HOMOPOLARES DE TRAFOS Y LINEA:

$$\text{Trafo 1: } R_{OT1} = 2'62 m \Omega ; X_{OT1} = 0'95 X_{T1} \rightarrow X_{OT1} = 0'95 \cdot 9'81 = 9'32 m \Omega //$$

$$\text{Trafo 2: } R_{OT2} = 4'6 m \Omega ; X_{OT2} = 0'95 X_{T2} \rightarrow X_{OT2} = 0'95 \cdot 15'324 = 14'557 m \Omega //$$

Línea BT:  $R_{OL} = 2 \cdot R_L \rightarrow R_{OL} = 2 \cdot 18'5 = 37 \text{ m}\Omega$ ;  $X_{OL} = 3 \cdot X_L \rightarrow X_{OL} = 3 \cdot 14'85 = 44'55 \text{ m}\Omega$

Por lo que estamos en disposición de dibujar el circuito eléctrico correspondiente al cortocircuito



$$Z^* = Z'_0 + \frac{Z_{T1} \cdot Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} + Z_L$$

$$Z_{OTOTAL} =$$

La impedancias directas e inversas de la acometida y transformadores son iguales y se han englobado en  $Z^*$ , por otro lado solo interviene las impedancias homopolares de transformadores y línea, de donde:

$$Z^* = (0'07 + 0'7j) + \frac{(2'62 + 9'81j)(4'6 + 15'324j)}{(2'62 + 9'81j) + (4'6 + 15'324j)} + 18'5 + 14'85j = (20'244 + 21'532j) \text{ m}\Omega$$

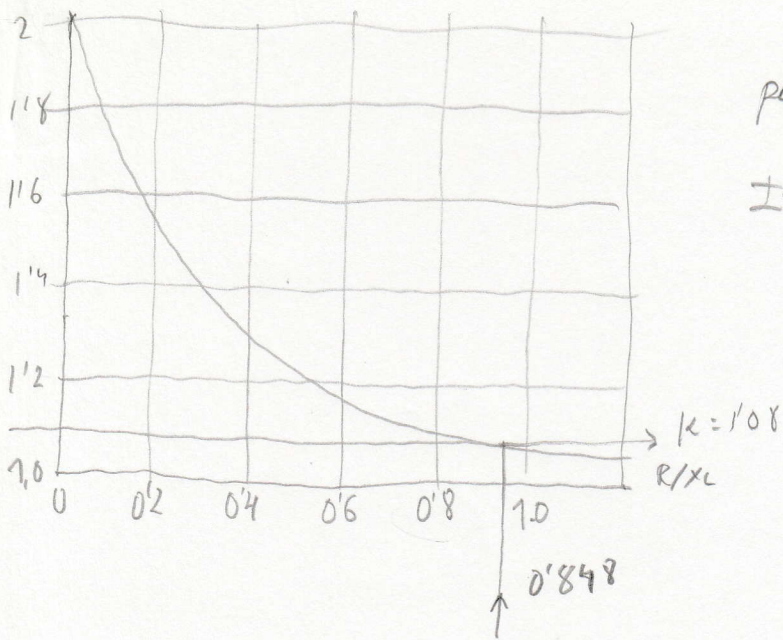
$$Z_{OTOTAL} = (37 + 44'55j) + \frac{(2'62 + 9'32j)(4'6 + 14'557j)}{(2'62 + 9'32j) + (4'6 + 14'557j)} = (38'675 + 50'233j) \text{ m}\Omega$$

La expresión de la corriente de cortocircuito unipolar a tierra es:

$$I_{K1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 400}{2(20'244 + 21'532j) + (38'675 + 50'233j)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 400}{79'163 + 93'297j} = 5'66 \text{ kA}$$

$$Z_1 = Z_2 = 2Z \rightarrow$$

2) Se pide determinar la corriente de choque, valor instantáneo de la corriente de cortocircuito y su valor depende de la relación  $R/X_L$  de la impedancia de cortocircuito, esta relación vale:  $\frac{R}{X_L} = \frac{79'163}{93'297} = 0'848$  por lo que el factor  $K = 1'08$  según la gráfica.



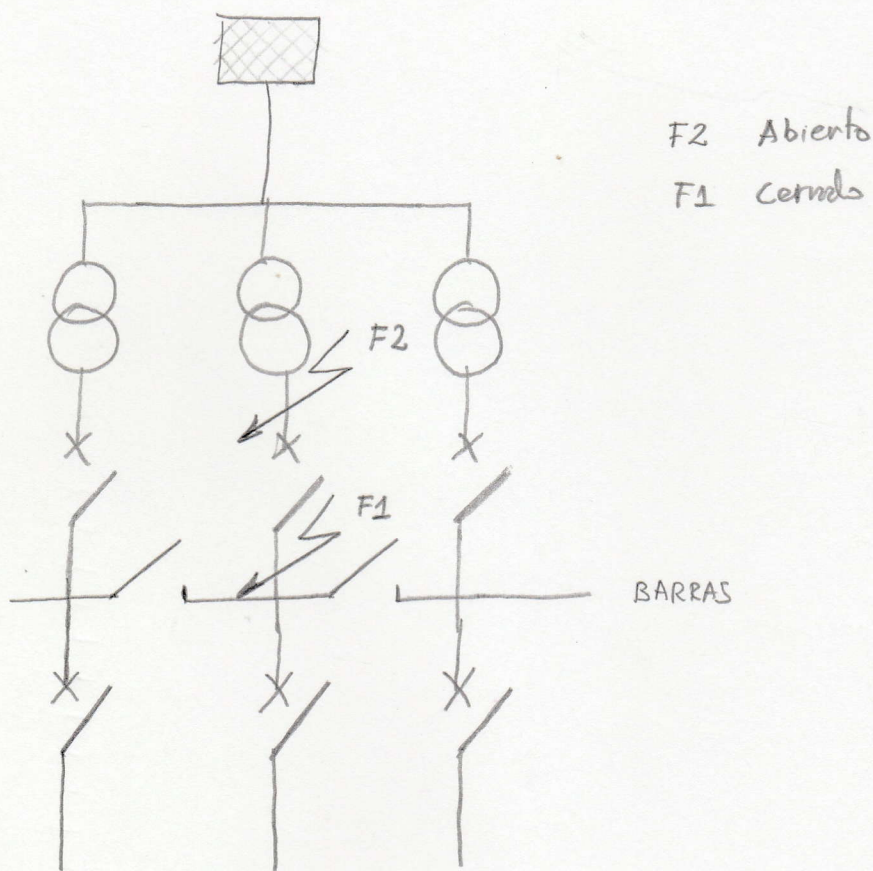
por lo que la corriente de choque es

$$I_s = k \cdot \sqrt{2} \cdot I'k_1 = 1.08 \cdot \sqrt{2} \cdot 5.66 = 8.645 \text{ kA}$$

P2.21 Tres transformadores Dyn 11 de 400KVA, 20/0'42KV,  $U_{cc}\% = 4\%$ ,  $U_2\% = 1'15\%$  están conectados en paralelo, alimentados desde una subestación con potencia de cortocircuito de 500 MVA, por medio de una línea cuyos coeficientes son  $R = 0'36 \Omega$  y  $X_L = 0'334 \Omega$ . Cada transformador está conectado a una barra que pueden interconectarse entre sí por medio de sencillos interruptores de acoplamiento de barras, partiendo de cada subestación una línea de BT. Sabiendo que se han dispuesto interruptores automáticos de protección tanto en los secundarios de los transformadores como en las cabezas de las líneas de BT.

Determinar para un cortocircuito tripolar:

- 1) la corriente de cortocircuito inicial simétrica en barras de cada transformador con interruptores de acoplamiento de barras abiertos y cerrados;
- 2) la corriente de choque en las condiciones del apartado anterior;



Para estudiar la corriente de cortocircuito trifásica en barras de cualquier transformador se pueden presentar dos casos con los interruptores de acoplamiento de barras abiertos y para este caso el punto más desfavorable es indistintamente los puntos F1 o F2 en cualquier transformador, o cuando los interruptores de acoplamiento de barras estén cerrados y el punto más desfavorable es el F2 también en cualquier transformador, puesto que se suman las corrientes que provienen de los otros dos transformadores que forman el sistema.

Calculamos a continuación los valores de las impedancias:

ACOMETIDA:  $I''_{kQ} = \frac{S_{kQ}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ}} = \frac{500 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 14433A$

$Z_Q = \frac{1'1 U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{1'1 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 14433} = 0'879 \Omega$ , de donde la acometida la podemos

descomponer en su parte real e imaginaria siendo:

$X_Q = 0'995 \cdot Z_Q \Rightarrow X_Q = 0'995 \cdot 0'879 = 0'8756 \Omega //$

$R_Q = 0'1 \cdot X_Q \Rightarrow R_Q = 0'1 \cdot 0'8756 = 0'08756 \Omega //$

ACOMETIDA + LINEA

$X_Q + X_L = 0'8756 + 0'334 = 1'209 \Omega //$

$R_Q + R_L = 0'08756 + 0'36 = 0'447 \Omega //$

REFERIDO ACOMETIDA + LINEA AL NIVEL ELECTRICO DEL SECUNDARIO DE

LOS TRANSFORMADORES:

$X'_{Q+L} = \frac{X_Q + X_L}{m'^2} = \frac{1'209}{\left(\frac{20}{0'42}\right)^2} = 0'000533 \Omega = 0'533 m\Omega //$

$R'_{Q+L} = \frac{R_Q + R_L}{m'^2} = \frac{0'447}{\left(\frac{20}{0'42}\right)^2} = 0'000197 \Omega = 0'197 m\Omega //$

TRANSFORMADOR:

$Z_{TC2} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{420^2}{400000} = 0'01764 \Omega = 17'64 m\Omega //$

$R_{TC2} = \frac{U_R\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{1'15}{100} \cdot \frac{420^2}{400000} = 0'00507 \Omega = 5'07 m\Omega //$

$X_{TC2} = \sqrt{Z_{TC}^2 - R_{TC}^2} = \sqrt{17'64^2 - 5'07^2} = 16'895 m\Omega //$

Cortocircuito en F1 con interruptor de acoplamiento de bombas abiertas

En este caso la impedancia que limita el cortocircuito está definida por la suma de la impedancia de la acometida mas línea pasada el nivel eléctrico del secundario del transformador mas la impedancia del transformador, es decir:

$R = R'_{Q+L} + R_{TC2} = 0'197 + 5'07 = 5'267 m\Omega$ ;  $X_L = X'_{Q+L} + X_{TC2} = 0'533 + 16'895 = 17'428 m\Omega //$

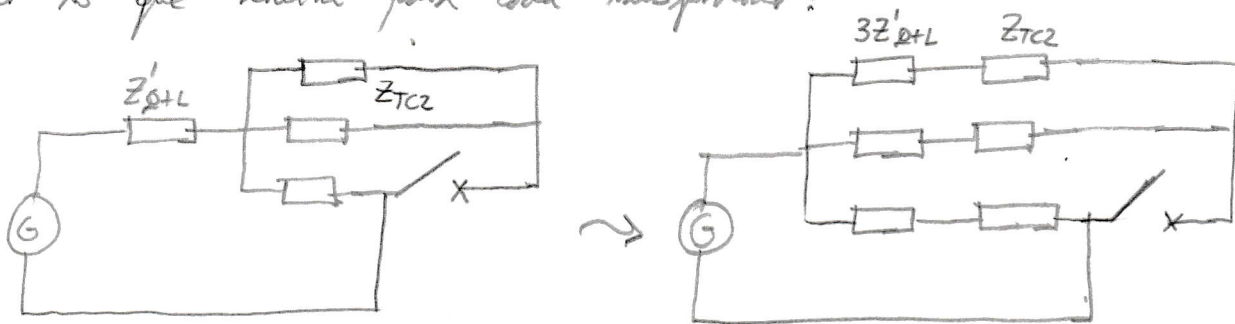
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{5'267^2 + 17'428^2} = 18'206 \text{ m}\Omega$$

Por lo que la corriente de cortocircuito trifásica es igual a:

$$I''_{k3} = \frac{C \cdot U_{20T}}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 18'206 \cdot 10^{-3}} = 13'318 \text{ kA}$$

Cortocircuito en F2 con interruptor de acoplamiento de barras cerrado:

El circuito equivalente es como el indicado y en este caso la impedancia de la acometida más línea al pasar el nivel eléctrico del transformador y puesta en serie con la impedancia del transformador debe tener un valor triple, por lo que resulta para cada transformador:



$$3 \cdot X'_{\phi+L} = 3 \cdot 0'533 = 1'599 \text{ m}\Omega$$

$$3 \cdot R'_{\phi+L} = 3 \cdot 0'197 = 0'591 \text{ m}\Omega$$

por lo que la impedancia por rama es:

$$R = 3 \cdot R'_{\phi+L} + R_{TC2} = 0'591 + 5'07 = 5'661 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = 3 \cdot X'_{\phi+L} + X_{TC2} = 1'599 + 16'895 = 18'494 \text{ m}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{5'661^2 + 18'494^2} = 19'341 \text{ m}\Omega$$

de donde la corriente por cada rama, es decir por transformador es igual a:

$$I''_{k3} = \frac{C \cdot U_{20T}}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 19'341} = 12'537 \text{ kA}$$

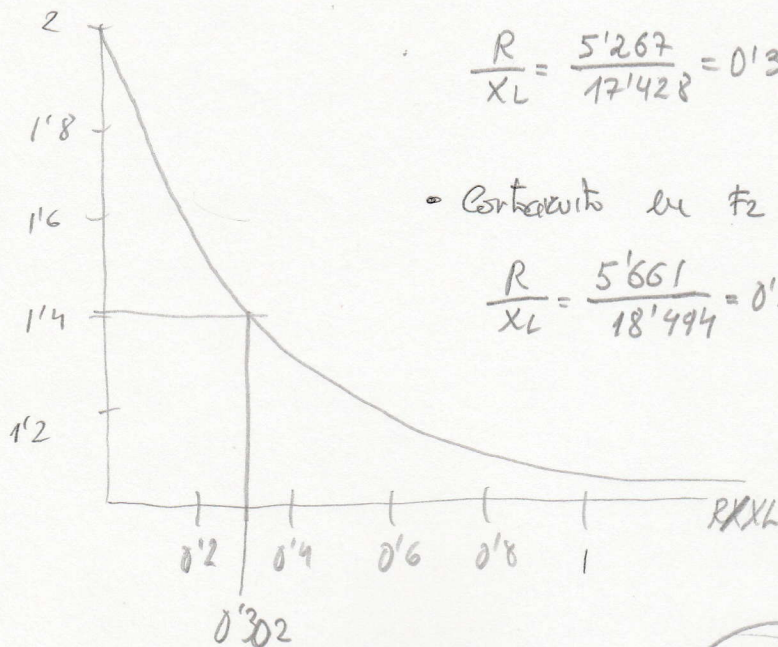
Para cuando se abren los interruptores de acoplamiento de barras el interruptor de protección "VE" usa corriente de valor doble, por lo que el poder de corte de todos los interruptores automáticos a disponer en los secundarios de los transformadores deben ser capaces de cortar una corriente de valor

$$P_dC = 2 I''_{k3} = 2 \cdot 12'537 = 25'074 \text{ kA}$$

2)

2) Vamos a determinar la corriente de choque, valor instantáneo máximo que determinan los máximos esfuerzos electrodinámicos) en función de la relación  $R/X_L$ , y en función de la expresión  $I_s = k \sqrt{2} \cdot I''_k$

Según la gráfica



• Circuito en  $F_1$  con interruptor abierto:

$$\frac{R}{X_L} = \frac{5'267}{17'428} = 0'302 // \rightarrow k = 1'4$$

• Circuito en  $F_2$  con interruptor cerrado: *similar*

$$\frac{R}{X_L} = \frac{5'661}{18'494} = 0'306 // \rightarrow k = 1'4$$

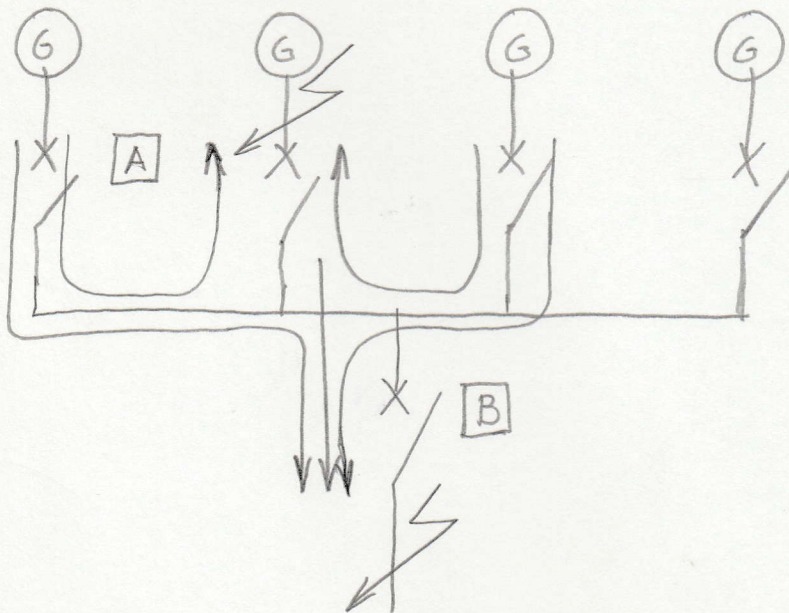
por lo que a partir de la gráfica resulta  $k = 1'4$  por lo que

$$I_s = k \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k \Rightarrow I_s = 1'4 \cdot \sqrt{2} \cdot 25'074 = 49'643 \text{ kA} //$$

P2.22 Un buque con régimen de neutro IT dispone para el suministro eléctrico de 4 alternadores síncronos de: 1000kVA a 400V con factor de potencia nominal 0,9 y  $X''d\% = 12\%$ . El sistema está concebido para que funcionen tres alternadores simultáneamente. De cada alternador parten líneas trifásicas de 25m, con tres conductores por fase de 240mm<sup>2</sup> siendo las características de los conductores:  $R_k = 0,125 \Omega/\text{km}$  y  $X_k = 0,07 \Omega/\text{km}$  que alimentan a un embarcado general con servos interruptores automáticos por línea y a su vez este embarcado posee un interruptor automático general para el conjunto del buque. Determinar:

- 1) las corrientes de cortocircuito más desfavorable en ambos tipos de interruptores automáticos.
- 2) Corriente simétrica de corte para cada interruptor sabiendo que el tiempo de retardo de las protecciones es de 0,05 segundos.
- 3) La caída de tensión (cdt) porcentual entre bornes del alternador y embarcado general cuando los alternadores funcionan en régimen nominal.

El esquema del sistema de generación eléctrica de este buque es de la forma:



El sistema de alimentación del buque está concebido para que funcionen simultáneamente tres alternadores quedando uno de ellos en reserva y este en funcionamiento cíclico.

Al ser un régimen de neutro IT la corriente, en el caso de un cortocircuito a tierra, bien unipolar o bipolar a tierra, será o bien nula, o de

un valor muy pequeño frente a los corrientes que provocan los cortocircuitos bipolar o tripolar. Pero además como consideramos iguales las impedancias directas e inversas  $Z_1 = Z_2$  tanto en módulo como en ángulo de fase entre otras cosas resulta para los corrientes de cortocircuito tripolar y bipolar

$$I_{K2}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot E''}{2 \cdot Z_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K3}'' = 0'866 I_{K3}'' \quad \text{en resumen, el cortocircuito más desfavorable será el tripolar y será para este tipo de cortocircuito para el que calculamos las corrientes de cortocircuito.}$$

Evidentemente al ser los alternadores iguales existen dos tipos de interconexiones automáticas: los del tipo "A" a la salida de cada alternador y el tipo B que será el general, como es natural sus características no serán las mismas. En efecto para los del tipo A la corriente más desfavorable será de  $2 I_{K3}''$  mientras que para el tipo B la corriente de cortocircuito más elevada es de  $3 I_{K3}''$  por lo que vamos a determinar la corriente de cortocircuito trifásica por queudor.

Primamente determinamos la corriente nominal del alternador:

$$I_{NG} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{NG}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1443'375673A$$

La reactancia subtransitoria es de:

$$X''_d = \frac{X''_d\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{400^2}{1000000} = 0'0192 \Omega$$

La resistencia del alternador al ser de BT, se puede tomar con suficiente aproximación:

$$R_G = 0'15 X''_d = 0'15 \cdot 0'0192 = 0'0288 \Omega$$

La resistencia de la línea que une el alternador con barras expresada en milliohmios tiene un valor de

$$R_L = \frac{R_k \cdot l}{3} = \frac{0'125 \cdot 0'025 \cdot 10^3}{3} = 1'04166 m\Omega$$

Por otro lado la reactancia inductiva de esta línea expresada también en milliohmios resulta ser de

$$X_L = \frac{X_{Lk} \cdot l}{3} = \frac{0'07 \cdot 0'025 \cdot 10^3}{3} = 0'5833 m\Omega$$

Por lo que la impedancia total del sistema formada por el alternador y la línea es:  $Z_T = Z_1 = (R_G + R_L) + (X_G + X_L)j = (2'88 + 1'04166) + (19'2 + 0'5833)j =$

$$Z_T = (3'9216 + 19'783j) \text{ m}\Omega.$$

Por otro lado al ser el sistema alimentado por alternadores en BT, la tensión de alimentación a la hora de determinar la corriente de cortocircuito vale:

$$\frac{c U_h}{\sqrt{3}} = \frac{U_{NG}}{\sqrt{3}} + I_{NG} \cdot X''_d \cdot \sin \varphi_{NG} \text{ por lo tanto:}$$

$$\frac{c U_h}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} + 1443'375673 \cdot 0'0192 \cdot 0'4358 = 243'02 \text{ V}$$

por lo que la corriente para un cortocircuito tripolar que aporte cualquier alternador es de:

$$I''_{K_3} = \frac{c \cdot U_h}{\sqrt{3} \cdot Z_1} = \frac{243'02}{(3'9216 + 19'783j)} = 12'049 \text{ kA}$$

Por lo que la corriente más desfavorable para el interruptor automático dispuesto en cada alternador es de

$$P_{dc} \text{ Interruptor "A"} = 2 I''_{K_3} = 2 \cdot 12'049 = 24'099 \text{ kA} \quad \text{mientras que para el}$$

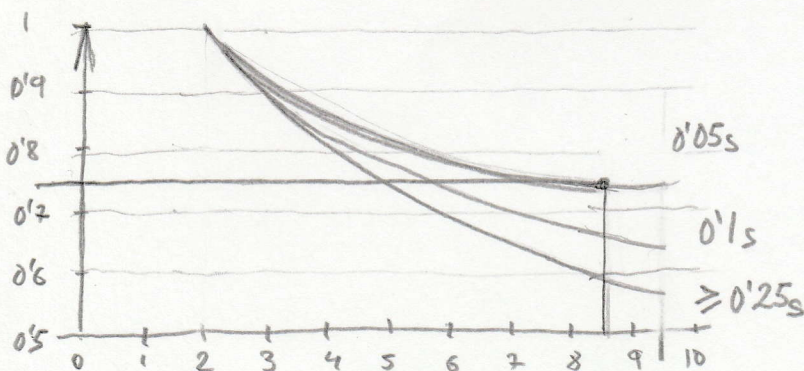
interruptor general será:

$$P_{dc} \text{ Interruptor "B"} = 3 I''_{K_3} = 3 \cdot 12'049 = 36'149 \text{ kA}$$

2) La corriente simétrica de corte, corriente que realmente va a cortar el interruptor automático depende del tiempo de retardo en el disparo del mismo por medio de la expresión

$$I_a = \mu \cdot I''_k$$

El factor  $\mu$  se determina por medio de la gráfica siguiente.



Factor  $\mu$  para calcular la corriente simétrica de corte  $I_s$ .

$$\frac{I''_{K_3}}{I_{NG}} = \frac{12'049}{1'44337} = 8'34$$

Por tanto en cada alternador la corriente se sumoligua y disminuye su valor en función de:

$$\frac{I_{k3}''}{I_N} = \frac{12'049}{1'44337} = 8'34 \rightarrow \text{Se guía la gráfica } \boxed{\mu = 0'75}$$

Por lo que para el interruptor conectado en bornes del alternador

$$I_a \text{ INTERRUPTOR BORNES ALTERNADOR} = 0'75 \cdot 24'094 = 18'07 \text{ kA} \quad \text{mientras que para el interruptor general del sistema es.}$$

$$I_a \text{ INTERRUPTOR GENERAL} = 0'75 \cdot 36'149 = 27'111 \text{ kA}$$

3) las caídas de tensión entre cualquier alternador y bornes generales serán idénticas para cualquier alternador siendo necesario calcularlas para un solo alternador, por tanto:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot (R_k \cdot \cos \varphi + X_{Lk} \cdot \sin \varphi) = \sqrt{3} \cdot 1443'37 \cdot 0'025 \left( \frac{0'125}{3} \cdot 0'9 + \frac{0'07}{3} \cdot 0'4358 \right)$$

$$\Delta U = 2'979 \text{ V}$$

Expresada esta caída de tensión de forma porcentual resulta:

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 = \frac{2'979}{400} \cdot 100 = 0'7448 \%$$

Por tanto en cada alternador la corriente se sumoliga y disminuye su valor en función de:

$$\frac{I_{k3}''}{I_N} = \frac{12'049}{1'44337} = 8'34 \rightarrow \text{Se guía la gráfica } \boxed{\mu = 0'75}$$

Por lo que para el interruptor conectado en bornes del alternador

$$I_a \text{ INTERRUPTOR BORNES ALTERNADOR} = 0'75 \cdot 24'099 = 18'07 \text{ kA}$$

mientras que para el interruptor general del sistema es:

$$I_a \text{ INTERRUPTOR GENERAL} = 0'75 \cdot 36'149 = 27'111 \text{ kA}$$

3) las caídas de tensión entre cualquier alternador y barras generales serán idénticas para cualquier alternador, siendo necesario calcularlas para un solo alternador, por tanto:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot (R_k \cdot \cos \varphi + X_{lk} \cdot \sin \varphi) = \sqrt{3} \cdot 1443'37 \cdot 0'025 \left( \frac{0'125}{3} \cdot 0'9 + \frac{0'07}{3} \cdot 0'4358 \right)$$

$$\Delta U = 2'979 \text{ V}$$

Expresada esta caída de tensión de forma porcentual resulta:

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 = \frac{2'979}{400} \cdot 100 = 0'7448 \%$$

P2.24 Desde una red de 132 kV con potencia de cortocircuito de 4000 MVA son alimentados dos transformadores conectados en paralelo, siendo sus características

TRANSFORMADOR 1° 20 MVA  $U_{cc}\% = 14\%$   $m' = \frac{132 \text{ kV}}{25 \text{ kV}} =$

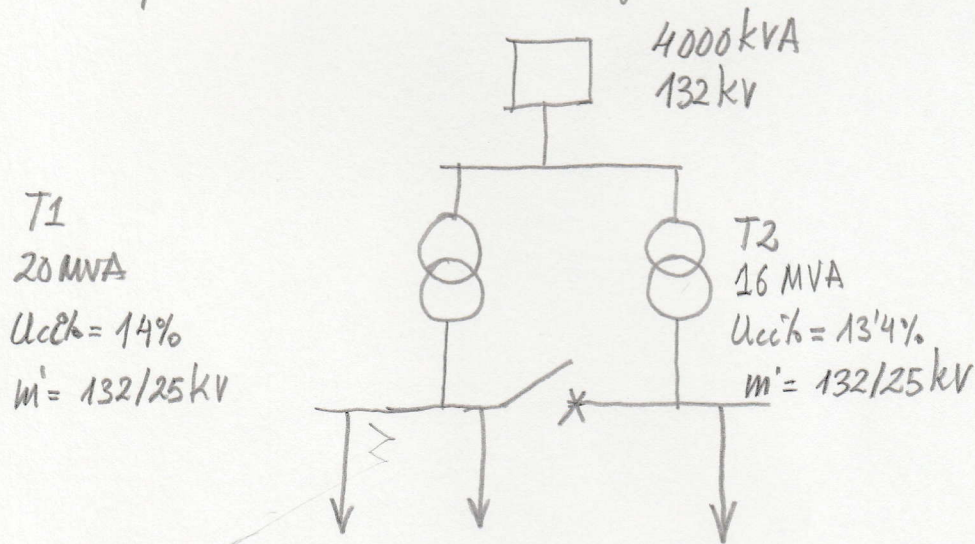
TRANSFORMADOR 2° 16 MVA  $U_{cc}\% = 13'4\%$   $m' = \frac{132 \text{ kV}}{25 \text{ kV}} =$

Estos conectados a unas barras de 20 kV que se pueden acoplar por medio de un interruptor y partiendo de estas barras, parten unas líneas eléctricas. Determinar:

- 1) La corriente inicial simétrica de cortocircuito en cualquiera de las líneas de salidas de barras, con el interruptor de acoplamiento cerrado.
- 2) La corriente inicial simétrica de cortocircuito en cualquiera de las líneas de salidas de barras, alimentada exclusivamente por el transformador 1.
- 3) La corriente inicial simétrica de cortocircuito en cualquiera de las líneas de salidas de barras, alimentada exclusivamente por el transformador 2.

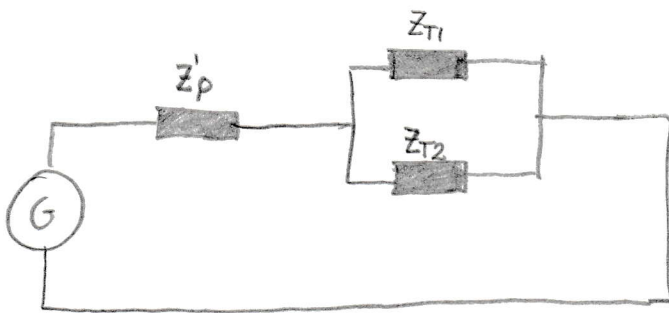
El esquema eléctrico es de la forma:

No dice el tipo de cortocircuito  
Suponemos tripolar



Se pide determinar la corriente de cortocircuito en cualquiera de las líneas de salida de barras estando el interruptor de acoplamiento de barras cerrado, por tanto el circuito eléctrico equivalente será:

•  $I_{k2}$   
de  
un  
•  $I_{k3}$   
•  $I_{k3}$



Determinemos las impedancias que intervienen en el circuito

ACOMETIDA:

$$I''_{kQ} = \frac{S''_{kQ}}{\sqrt{3} \cdot U_{NQ}} = \frac{4000 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 132000} = 17495'4 \text{ A} \quad \text{de donde:}$$

$$Z_Q = \frac{C \cdot U_{NQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} = \frac{1'1 \cdot 132000}{\sqrt{3} \cdot 17495'4} = 4'7981 \Omega$$

Como solo disponemos de las tensiones de cortocircuito de los transformadores, no se pueden calcular las resistencias combinadas de los transformadores, por tanto se desprecia, ello supone admitir que  $Z_{\text{TRAFOS}} = X_{\text{TRAFOS}}$  y haciendo extensivo este razonamiento para la acometida se admite que  $Z_Q = X_Q$ .

Pasada la reactancia de la acometida al nivel eléctrico del secundario de los transformadores:

$$Z'_Q = \frac{Z_Q}{m^2} = \frac{4'7981}{\left(\frac{132}{25}\right)^2} = 0'1718 \Omega$$

TRANSFORMADOR 1:

$$Z_{T1} = \frac{U_{cc1\%} \cdot U_{20T}^2}{100 \cdot S_{NT}} = \frac{14 \cdot 25000^2}{100 \cdot 20000000} = 4'375 \Omega$$

TRANSFORMADOR 2:

$$Z_{T2} = \frac{U_{cc2\%} \cdot U_{20T}^2}{100 \cdot S_{NT}} = \frac{13'4 \cdot 25000^2}{100 \cdot 16000000} = 5'234 \Omega$$

Por lo tanto la impedancia equivalente al circuito en paralelo de los transformadores es de:

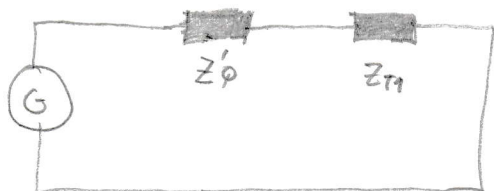
$$Z_{\text{EQUIVALENTE TRAFOS}} = \frac{Z_{T1} \cdot Z_{T2}}{Z_{T1} + Z_{T2}} = \frac{4'375 \cdot 5'234}{4'375 + 5'234} = 2'383 \Omega$$

Por último la impedancia que ve el cortocircuito es la de la acometida más la impedancia equivalente del paralelo de los transformadores, es decir:

$$Z = Z'_Q + Z_{\text{EQUIVALENTE TRAFOS}} = 0'1718 + 2'383 = 2'555 \Omega$$

$$\text{Por lo que la corriente de cortocircuito es de: } I''_{kQ} = \frac{1'1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{1'1 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 2'555} = 4971'31 \text{ A}$$

2) Cuando solo funciona el transformador 1 el circuito eléctrico será de la forma:



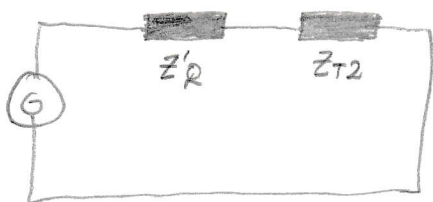
por lo que la impedancia que limita la corriente de cortocircuito es de:

$$Z = Z'p + Z_{T1} = 0'1718 + 4'375 = 4'5468 \Omega$$

Por lo que la corriente de cortocircuito es de:

$$I''_{kPT1} = \frac{1'1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{1'1 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 4'5468} = 2793 \text{ A}$$

3) Cuando solo funciona el transformador 2 el circuito eléctrico será de la forma



por lo que la impedancia que limita la corriente de cortocircuito es de:

$$Z = Z'p + Z_{T2} = 0'1718 + 5'234 = 5'4058 \Omega$$

Por lo que la corriente de cortocircuito es de:

$$\rightarrow I''_{kPT2} = \frac{1'1 U_N}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{1'1 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 5'4058} = 2349'6 \text{ A}$$

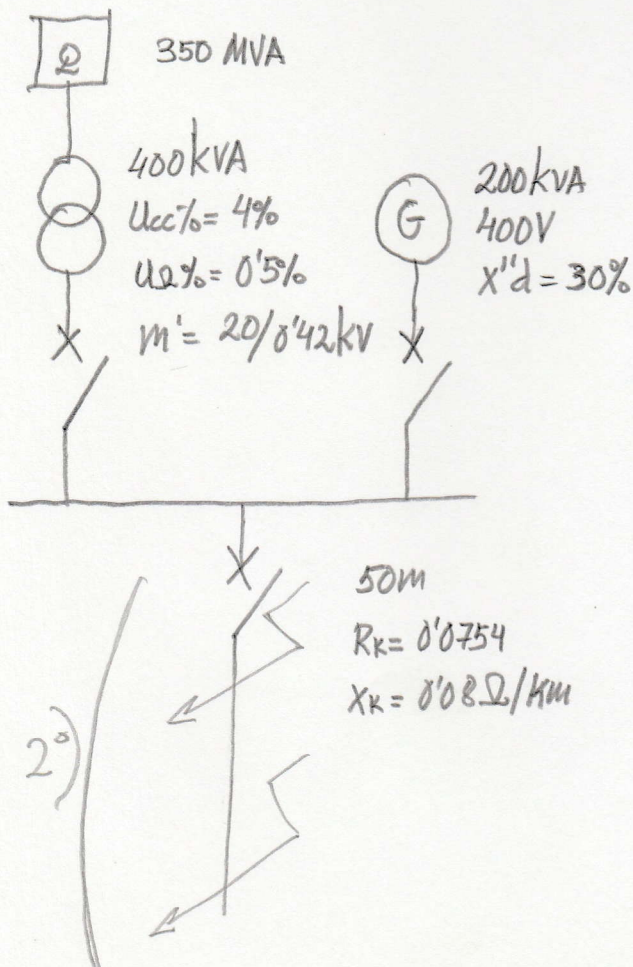
P2.25 Una instalación industrial presenta un grupo de generación, de tal modo que dispone de:

TRANSFORMADOR: 400kVA  $U_{cc}\% = 4$   $U_{\Omega}\% = 0.5$   $M' = \frac{20 \text{ kV}}{0.42 \text{ kV}}$

ALTERNADOR: 200kVA  $U_N = 400 \text{ V}$   $X''_d = 30\%$

Sabiendo que la potencia de cortocircuito de la acometida es de 350 MVA, que el transformador y el alternador están conectados en paralelo a un mismo subestación, del cual parte una línea de 50m cuyos características son:  $R_k = 0.0754 \Omega/\text{km}$  y  $X_k = 0.08 \Omega/\text{km}$ . Determinar para un cortocircuito trifásico:

- 1) Los poderes de corte mínimos necesarios para los interruptores automáticos instalados a la salida de transformador y alternador.
  - 2) Las corrientes de cortocircuito en inicio y final de línea derivada del subestación.
- 1) El esquema de la instalación es de la forma:



Se nos pide que calculemos los poderes de corte mínimos necesarios en los interruptores automáticos situados a la salida de transformador y generador.

Calculamos cada una de estas corrientes que pueden aportar al cortocircuito de acometida y al generador.

Previamente hay que determinar las impedancias puestas en juego y referidas al punto donde se produce el cortocircuito.

## IMPEDANCIA ASIMETRICA:

$$I''_{KQ3} = \frac{S''_{KQ}}{\sqrt{3} \cdot U_{NQ}} = \frac{350000000}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 10103 \text{ A}$$

$$Z_Q = \frac{1'1 \cdot U_{NQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{KQ3}} = \frac{1'1 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 10103} = 1'275 \Omega$$

Puesto que conocemos datos de la resistencia del transformador, no despreciamos la resistencia de la acometida, de donde:

$$X_Q = 0'995 Z_Q = 0'995 \cdot 1'275 = 1'25 \Omega$$

$$R_Q = 0'1 X_Q = 0'1 \cdot 1'25 = 0'125 \Omega$$

pasados los valores de la acometida al nivel eléctrico donde se produce el cortocircuito tiene un valor de:

$$X'_Q = \frac{X_Q}{M'} = \frac{1'25}{\left(\frac{20}{0'42}\right)^2} \cdot 10^3 = 0'551 \text{ m}\Omega // \quad R'_Q = \frac{R_Q}{M'} = \frac{0'125}{\left(\frac{20}{0'42}\right)^2} \cdot 10^3 = 0'0551 \text{ m}\Omega //$$

Se han expresado resistencia y reactancia de la acometida en (mΩ) por facilidad del cálculo y así la corriente vendrá expresada en kA.

$$\text{TRANSFORMADOR: } Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{420^2}{400000} \cdot 10^3 = 17'64 \text{ m}\Omega$$

$$R_T = \frac{U_R\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{0'5}{100} \cdot \frac{420^2}{400000} \cdot 10^3 = 2'205 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = \sqrt{17'64^2 - 2'205^2} = 17'501 \text{ m}\Omega$$

Sumando ahora resistencias y reactancias de acometida mas transformador, tenemos unos valores totales de:

$$R' = R'_Q + R_T = 0'0551 + 2'205 = 2'26 \text{ m}\Omega$$

$$X' = X'_Q + X_T = 0'551 + 17'501 = 18'052 \text{ m}\Omega$$

que se corresponde con una impedancia de  $Z' = 2'26 + 18'052j = 18'193 \angle 82'864046^\circ \text{ m}\Omega$

Por lo que cuando se produce un cortocircuito trifásico en el embarrado alimentado exclusivamente por el transformador, la corriente de cortocircuito tiene un valor de

$$I''_{K3TRAF0} = \frac{1'05 U_N}{\sqrt{3} \cdot Z'} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 18'193} \angle 82'864046^\circ = 13'328594 \angle -82'864046^\circ \text{ kA}$$

GENERADOR:

$$X_G'' = \frac{X''_d}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{30}{100} \cdot \frac{400^2}{200000} = 240 \text{ m}\Omega$$

Como no hemos despreciado la resistencia de la acometida y transformador, tampoco despreciaremos la resistencia del generador, y para generadores de BT, se cumple según la teoría la siguiente relación:

$$R_G = 0'15 \cdot X''_d = 0'15 \cdot 240 = 36 \text{ m}\Omega$$

por tanto:  $Z_G = 36 + 240j = 242'68 \angle 81'46^\circ \text{ m}\Omega$

por tanto la corriente que aporta el generador al embarrado en el caso de un cortocircuito trifásico funcionando exclusivamente el generador será de:

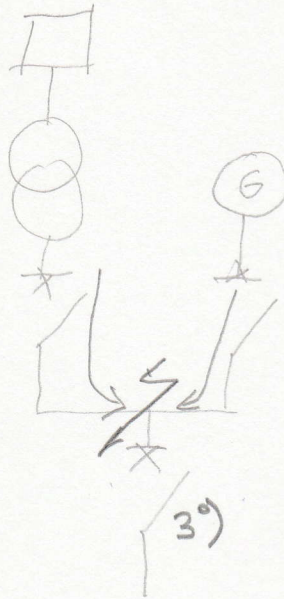
$$I''_{K3GEN} = \frac{1'05 \cdot U_N}{Z_G} = \frac{420}{\sqrt{3} \cdot 242'68} \angle 81'86^\circ = 0'999205 \angle -81'46^\circ \text{ kA}$$

A la hora de estudiar los pdc mínimos necesarios hay que tener en cuenta las posibles pautas donde se puede producir el cortocircuito.

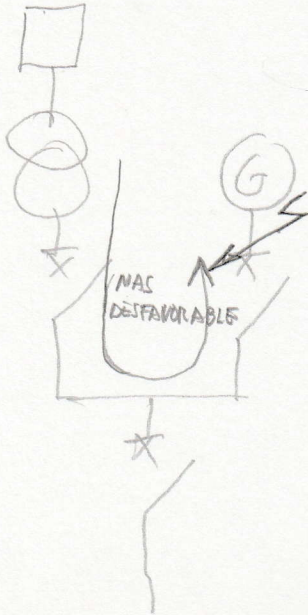
- 1) Cortocircuito en cualquier punto del embarrado, cada uno de los interruptores manuales del transformador y generador serán recorridos por las corrientes anteriormente calculadas.
- 2) Cortocircuito entre generador y su interruptor automático, en este caso por este interruptor automático recorrerá la corriente que proviene del transformador, si bien es verdad que lo recorre en sentido contrario al sentido normal de funcionamiento. (esta es la situación más desfavorable).
- 3) Cortocircuito entre transformador y su interruptor automático, en este caso por este interruptor automático pasará la corriente que proviene del generador, si bien es verdad que lo recorre en sentido contrario al sentido normal.

de funcionamiento (esta no es la situación mas desfavorable).

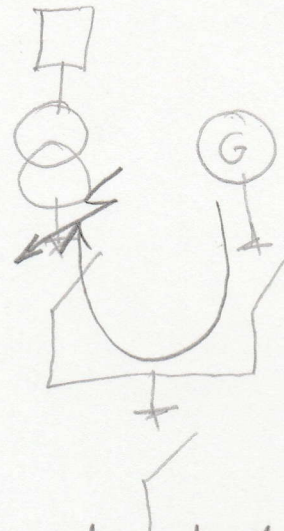
Los esquemas 1°)



2°)



3°)



En resumen, los pdc mínimos necesarios para autos interruptos automáticos deberían ser

$$\text{PODER DE CORTE MINIMO NECESARIO} \gg 13'328 \text{ KA}$$

2° Debemos calcular la corriente en inicio y final de línea de la línea derivada del embudo. Aplicando el teorema de la superposición, la corriente en inicio de la línea será la suma vectorial de los corrientes que aportan el convertidor del transformador y del generador, habida cuenta de que el ángulo de desfase entre ellos es prácticamente igual, sumamos aritmeticamente ambas corrientes:

$$I''_{K3 \text{ INICIO LINEA}} = 13'328 + 0'999 = 14'327 \text{ KA}$$

si la suma hubiera sido vectorial el resultado hubiera sido de:

$$I''_{K3 \text{ INICIO DE LINEA}} = 13'328594 \angle -82'864046^\circ + 0'999 \angle -81'86^\circ = 14'327 \angle -82'7940248865^\circ \text{ KA}$$

prácticamente el mismo resultado

Para calcular la corriente de cortocircuito al final de la línea se ha de tener en cuenta la resistencia y reactancia de esta:

$$R_L = \frac{50}{1000} \cdot 0'0754 \cdot 10^3 = 3'77 \text{ m}\Omega$$

$$Z_L = 3'77 + 4j = 5'496 \angle 46'69^\circ \text{ m}\Omega$$

$$X_L = \frac{50}{1000} \cdot 0'08 \cdot 10^3 = 4 \text{ m}\Omega$$

Se puede determinar esta corriente de dos maneras resolver el circuito de las impedancias en paralelo de transformador y generador, y sumar en serie la impedancia de la línea determinando la impedancia total, o bien determinar, a partir de la corriente de cortocircuito en inicio de línea que impedancia le corresponde, que será evidentemente el paralelo del transformador y del generador, de donde:

$$Z_{\text{EQUIVALENTE}} = \frac{1'05 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot I''_{\text{KB INICIO LINEA}}} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 14'327 \angle -82'79402^\circ} = 16'925184 \angle 82'794^\circ \text{ m}\Omega$$

Sumando a esta impedancia equivalente la impedancia de la línea tenemos una impedancia total de valor.

$$Z_{\text{TOTAL}} = 16'925184 \angle 82'794^\circ + 5'496 \angle 46'69^\circ$$

$$Z_{\text{TOTAL}} = 21'61 \angle 74'174916^\circ \text{ m}\Omega$$

De donde la corriente de cortocircuito en final de la línea es de:

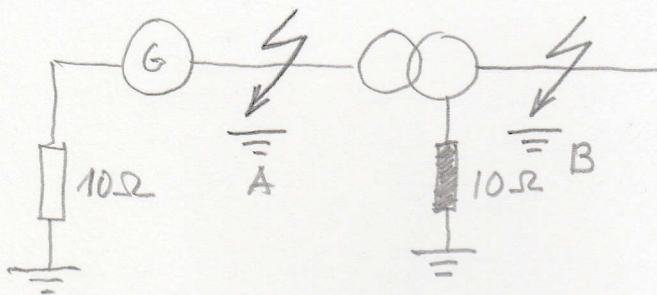
$$I''_{\text{KB FINAL LINEA}} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 21'61 \angle 74'174916^\circ} = 11'22 \angle -74'174916^\circ \text{ kA}$$

P2.29 Un generador de 100 MVA de 15 kV presenta las siguientes características  $X''_d = 20\%$ ,  $X_2 = 20\%$  y  $X_0 = 15\%$  y está puesto a tierra a través de una resistencia de  $10 \Omega$ , estando conectado a un transformador de 100 MVA con conexión triángulo-estrella con  $U_{cc}\% = 8\%$ ,  $U_2\% = 0.7\%$  y relaciones de tensiones en vacío 15/70 kV y puesto a tierra también a través de una resistencia de  $10 \Omega$ .  
 Determinar:

1) - la corriente inicial simétrica de cortocircuito para un cortocircuito unipolar si se produce en barras del alternador.

2) - la corriente inicial simétrica de cortocircuito para un cortocircuito unipolar si se produce en barras del transformador, sabiendo que para el mismo se cumplen las siguientes relaciones  $X_0/X_1 = 0.9$  y  $R_0/R_1 = 2.5$

1) El circuito equivalente es de la forma:



Por lo que para este primer apartado el punto de cortocircuito unipolar a tierra es el punto A, siendo la expresión de la corriente unipolar a tierra:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Es necesaria por tanto determinar las impedancias: directa, inversa y homopolar del sistema, tenemos:

$$Z_{1G} = R_G + X''_d j \rightarrow X''_d = \frac{X''_d\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{20}{100} \cdot \frac{15000^2}{100000000} = 0.45 \Omega$$

El valor de la resistencia de fase del generador a falta de mayor información se puede tomar:

$$R_G = 0.05 \cdot X''_d = 0.05 \cdot 0.45 = 0.0225 \Omega \quad \text{con lo que:}$$

$$Z_{1G} = R_G + X''_d j = (0.0225 + 0.45j) \Omega$$

Por otro lado la impedancia inversa sea igual a la directa, al ser iguales los valores porcentuales:

$$Z_{2G} = Z_{1G} = R_G + X_2 j = (0.0225 + 0.45j) \Omega$$

Por último, la impedancia homopolar del sistema está formada por la impedancia homopolar del generador más la impedancia de la puesta a tierra y con un valor triple, de donde:

$$X_0 = \frac{X_0\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{15}{100} \cdot \frac{15000^2}{100000000} = 0'3375 \Omega$$

por lo que  $Z_{OG} = R_G + X_0j + 3R_{PT} = 0'0225 + 0'3375j + 3 \cdot 10 = (30'0225 + 0'3375j) \Omega$

finalmente  $I''_{K1} = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0} = \frac{1'1 \sqrt{3} \cdot 15000}{2(0'0225 + 0'45j) + (30'0225 + 0'3375j)} = \frac{28578'8}{30'0675 + 1'2375j} =$

$$I''_{K1} = 949'68 \text{ A}$$

Este valor resulta ser pequeño porque la resistencia de puesta a tierra limita de forma extraordinaria el valor de la corriente de cortocircuito.

2) Para este cortocircuito la expresión es también:

$$I''_{K1} = \frac{\sqrt{3} \cdot C \cdot U_N}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0} \quad \text{pero la expresión anterior } \vec{Z}_1 \text{ representa las impedancias}$$

directas del transformador y del generador pasadas esta última al nivel eléctrico del secundario de transformador. Además  $Z_2$  es la impedancia inversa del transformador y del generador, también referido al generador al nivel eléctrico del secundario del transformador, pero se cumple que  $Z_1 = Z_2$ , resulta:

$$Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{70000^2}{100000000} = 3'92 \Omega$$

$$R_T = \frac{U_R\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{0'7}{100} \cdot \frac{70000^2}{100000000} = 0'343 \Omega$$

de donde  $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{3'92^2 - 0'343^2} = 3'905 \Omega$

Por otro lado las impedancias directas e inversas del generador pasadas al nivel eléctrico del secundario del transformador tienen por valor:

$$Z'_{1G} = Z'_{2G} = \frac{Z_{1G}}{(M')^2} = \frac{0'0225 + 0'45j}{\left(\frac{15000}{70000}\right)^2} = 0'489 + 9'799j \Omega \quad \text{de donde:}$$

$$Z_1 = Z_2 = Z'_{1G} + Z_T = (0'489 + 9'799j) + (0'343 + 3'905j) = 0'833 + 13'704j$$

En relación con el sistema homopolar, solo interviene la impedancia homopolar del transformador y la impedancia de puesta a tierra que está con un valor triple de:

$$R_{0T} = 2.5 R_T = 2.5 \cdot 0.343 = 0.8575 \Omega$$

$$X_{0T} = 0.9 X_T = 0.9 \cdot 3.905 = 3.5145 \Omega j$$

$$Z_0 = R_{0T} + X_{0T} j + 3 Z_E j = 0.8575 + 3.5145 j + 3 \cdot 10 j = 0.8575 + 33.5145 \Omega$$

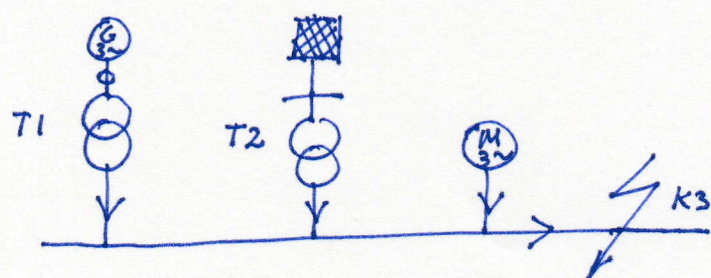
por lo que la corriente de cortocircuito triphasica tiene por valor:

$$I''_{K1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_N}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 70000}{2(0.833 + 13.704 j) + (0.8575 + 33.5145 j)} = 1988.42 A //$$

Hemos tomado el factor  $c=1$ , porque calculamos la corriente de cortocircuito con la tensión secundaria en vacío del transformador, si hubiéramos tomado la tensión nominal de la red que es equivalente de 66 kV entonces si tomáramos el valor de 1.1 que multiplicaría a la tensión nominal, los resultados que obtendríamos son muy poco discrepantes.

P2.30 Dado el sistema de la figura que representa una instalación con un grupo de cogeneración, sabiendo que las características de los elementos son:

- GENERADOR: 1.5 MVA a 690V  $X''d\% = 15\%$
- TRANSFORMADOR: T1 2MVA, relación de tensiones 690/420,  $U_{cc}\% = 6\%$
- BOMBIERA: 66kV con potencia de cortocircuito de 3000 MVA
- TRANSFORMADOR T2: 3000 kVA relación de tensiones de 66/0.42 kV,  $U_{cc}\% = 8\%$
- MOTOR ASINCRONO: 800 kW, 400V,  $\cos\varphi = 0.85$ ;  $\eta\% = 85\%$ ;  $I_{am}/I_{nm} = 4$  pares de polos = 2.



Determinar para un cortocircuito tripolar en el punto F.

- 1) la corriente inicial simétrica subtransitoria
- 2) la corriente simétrica de corta para un interruptor automático dispuesto en el punto F, si el tiempo mínimo de desconexión es de 0.1 segundos.

1) la corriente de cortocircuito en el punto F, por el principio de la superposición, será la suma de las corrientes que aportan cada uno de los partes que constituyen el sistema. Por otro lado como no se indican valores de reactancia se desprecian las mismas y se igualan impedancias a reactancias inductivas. Resulta por tanto:

Corriente que aporta el grupo de cogeneración, su valor está determinado por:

$$I''_{K3G} = \frac{C \cdot U_{20T}}{\sqrt{3} \cdot Z_{IG+T1}} \Rightarrow Z_{IG+T1} \text{ significa la impedancia directa del generador por el nivel eléctrico del secundario del transformador, más la impedancia del transformador, es decir:}$$

$$X''d = \frac{X''d\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} = \frac{15}{100} \cdot \frac{690^2}{1500000} = 0.04761 \Omega$$

por lo que este valor es el nivel eléctrico del secundario del transformador:

$$X'_G = \frac{X''_G}{\left(\frac{U_1}{U_{20T}}\right)^2} = \frac{0'04761}{\left(\frac{690}{420}\right)^2} = 0'01764 \Omega = 17'64 \text{ m}\Omega$$

para el transformador T1 su impedancia es:

$$Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{420^2}{2000000} = 0'005292 \Omega \rightarrow 5'292 \text{ m}\Omega$$

por lo que :  $Z_{IG+T1} = 17'64 + 5'292 = 22'932 \text{ m}\Omega$

Y la corriente de cortocircuito que aporta el generador es:

$$I''_{K3G} = \frac{1 \cdot 420}{\sqrt{3} \cdot 22'932} = 10'574 \text{ kA}$$

Corriente que aporta la acometida:

La expresión de la corriente aportada por la acometida es:

$$I''_{K3Q} = \frac{C \cdot U_{20T}}{\sqrt{3} \cdot Z_{IQ+T2}} \quad \text{la impedancia de la acometida a partir de la potencia de cortocircuito de la acometida resulta:}$$

$$S''_{K3Q} = \sqrt{3} \cdot U_{N3Q} I''_{K3Q} \rightarrow I''_{K3Q} = \frac{3000 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 66000} = 26243'19 \text{ A}$$

por lo que la impedancia de la acometida es de:

$$Z_Q = \frac{1'1 \cdot 66000}{\sqrt{3} \cdot 26243'19} = 1'579 \Omega \quad \text{pasada esta impedancia al nivel eléctrico del secundario del transformador 2:}$$

$$Z'_Q = \frac{Z_Q}{\left(\frac{U_1}{U_{20T}}\right)^2} = \frac{1'579}{\left(\frac{66}{0'42}\right)^2} = 0'00000647 \Omega \rightarrow 0'0647 \text{ m}\Omega$$

La impedancia del transformador 2 es:

$$Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{420^2}{3000000} = 0'004704 \Omega = 4'704 \text{ m}\Omega \quad \text{de donde:}$$

$$Z_{IQ+T2} = 0'0647 + 4'704 = 4'7687 \text{ m}\Omega \quad \text{por lo tanto}$$

$$I''_{K3Q} = \frac{C \cdot U_{20T}}{\sqrt{3} \cdot Z_{IQ+T2}} = \frac{1 \cdot 420}{\sqrt{3} \cdot 4'7687} = 50'849 \text{ kA}$$

## Corriente que aporta el motor asincrónico:

Se considera que el motor asincrónico, cuando se produce un cortocircuito en sus bornes para a funcionar como generador asincrónico, estando limitada la corriente que aporta el cortocircuito por la propia impedancia del motor, cuyo valor es:

$Z_M = \frac{U_{NM}}{\sqrt{3} \cdot I_{AM}}$  Como conocemos la relación entre la corriente de arranque respecto a la nominal, es necesario calcular la corriente nominal de este motor, por medio de la expresión:

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\phi \cdot \eta} = \frac{800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0'85 \cdot 0'85} = 1598'201 \text{ A}$$

de donde la corriente de arranque del motor será:

$$I_{AM} = 4 \cdot 1598'201 = 6392'8 \text{ A}$$

$$Z_M = \frac{U_{NM}}{\sqrt{3} \cdot I_{AM}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 6392'8} = 0'03612 \Omega = 36'125 \text{ m}\Omega$$

de donde la corriente aportada por el motor.

$$I''_{K3M} = \frac{C \cdot U_{20T}}{\sqrt{3} \cdot Z_M} = \frac{1 \cdot 420}{\sqrt{3} \cdot 36'125} = 6'712 \text{ kA}$$

En resumen, sumando las tres corrientes obtendremos la corriente de cortocircuito trifásica en el punto F.

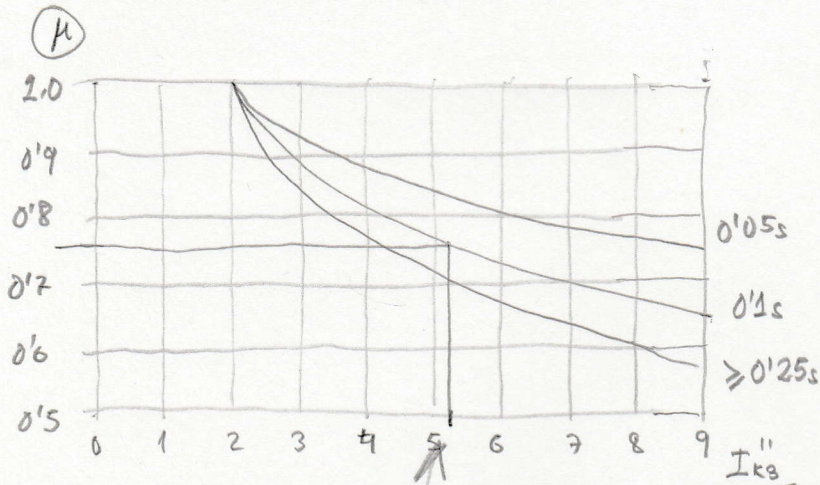
$$I''_{K3} = 10'574 + 50'849 + 6'712 = 68'135 \text{ kA}$$

2) Se nos está pidiendo que calculemos la corriente que realmente va a cortar un interruptor automático dispuesto en dicho tiempo, teniendo en cuenta que las corrientes que aporta el generador y el motor sufren un amortiguamiento, cuyo valor disminuye sobre el de  $I''_{K3}$ , no siendo así la corriente aportada por la red metida, cuyo valor permanece constante e invariable, puesto que al ser una red metida se supone cortocircuito alejado de los alternadores. Así tenemos:

Corriente simétrica de corte del alternador:

su valor está definido por la expresión.  $I_{AG} = \mu I''_k$

el factor  $\mu$  se define en la gráfica



por lo que la relación  $\frac{I''_{k3}}{I_N}$  tiene por valor  $I_N = \frac{S_{NG}}{\sqrt{3} \cdot U_{NG}}$

$I_N = \frac{1500000}{\sqrt{3} \cdot 690} = 1255'109 \text{ A}$  pero como la corriente de cortocircuito que proviene del alternador está considerada en el secundario del transformador, también hay que referir a este punto la corriente nominal, de donde:

$I''_{NG} = \frac{U_1}{U_{20T}} \cdot I_{NG} = \frac{690}{420} \cdot 1255'109 = 2061'96 \text{ A}$  por lo que:

$\frac{I''_{k3}}{I_{NG}} = \frac{10574}{2061'96} = 5'12 \rightarrow \mu = 0'76$  por lo que:  $I_{AG} = \mu \cdot I''_k = 0'76 \cdot 10'574 =$

$I_{AG} = 8'036 \text{ kA} \rightarrow$  Corriente que aporta el alternador

$I_{AG} = 8'036 \text{ kA} \rightarrow$  Corriente que aporta el alternador

• Corriente simétrica de corte de la acometida: Como se considera un cortocircuito alejado de los generadores, la corriente de cortocircuito no sufre amortiguación, siendo su valor constante e igual a:

$I_{AG} = I''_{k3R} = 50'849 \text{ kA.}$

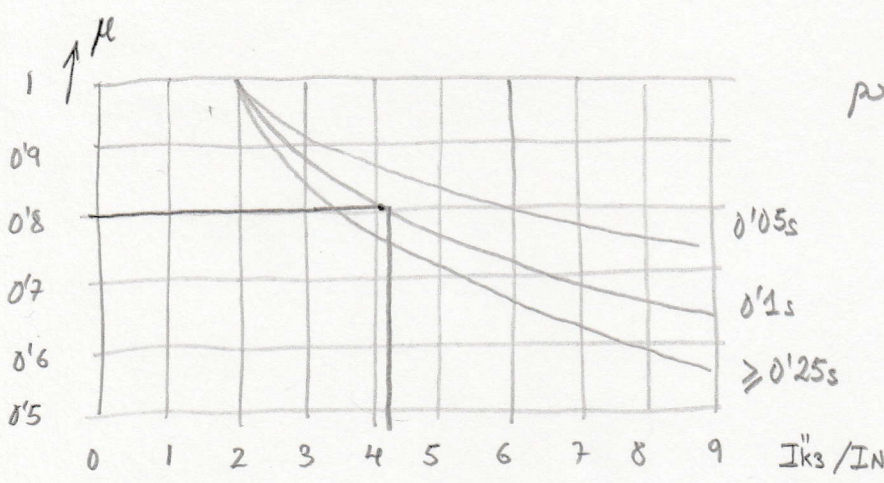
• Corriente simétrica de corte del motor: La corriente que aporta el motor así mismo se amortigua en función de la expresión:

$I_{AM} = \mu \cdot g \cdot I''_{k3M}$

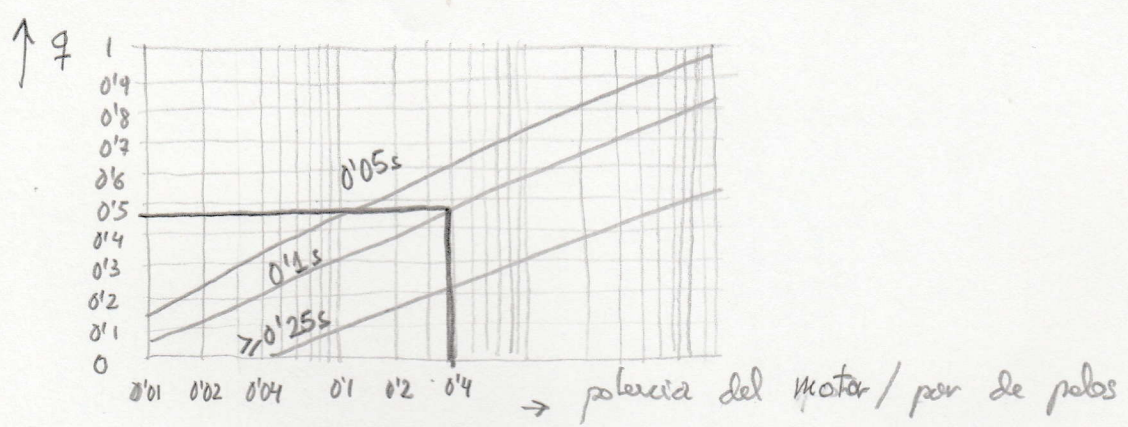
es preciso por tanto determinar los factores  $\mu$  y  $g$ . La relación  $I''_{k3}/I_N$  para el motor tiene por valor:

$$\frac{I''_{KSM}}{I_{NM}} = \frac{6712}{15982} = 4'999 \quad \text{segun la grafica ...}$$

por lo que el factor  $\mu = 0'8 //$



En relación con el factor  $\eta$  se determina por medio de la gráfica

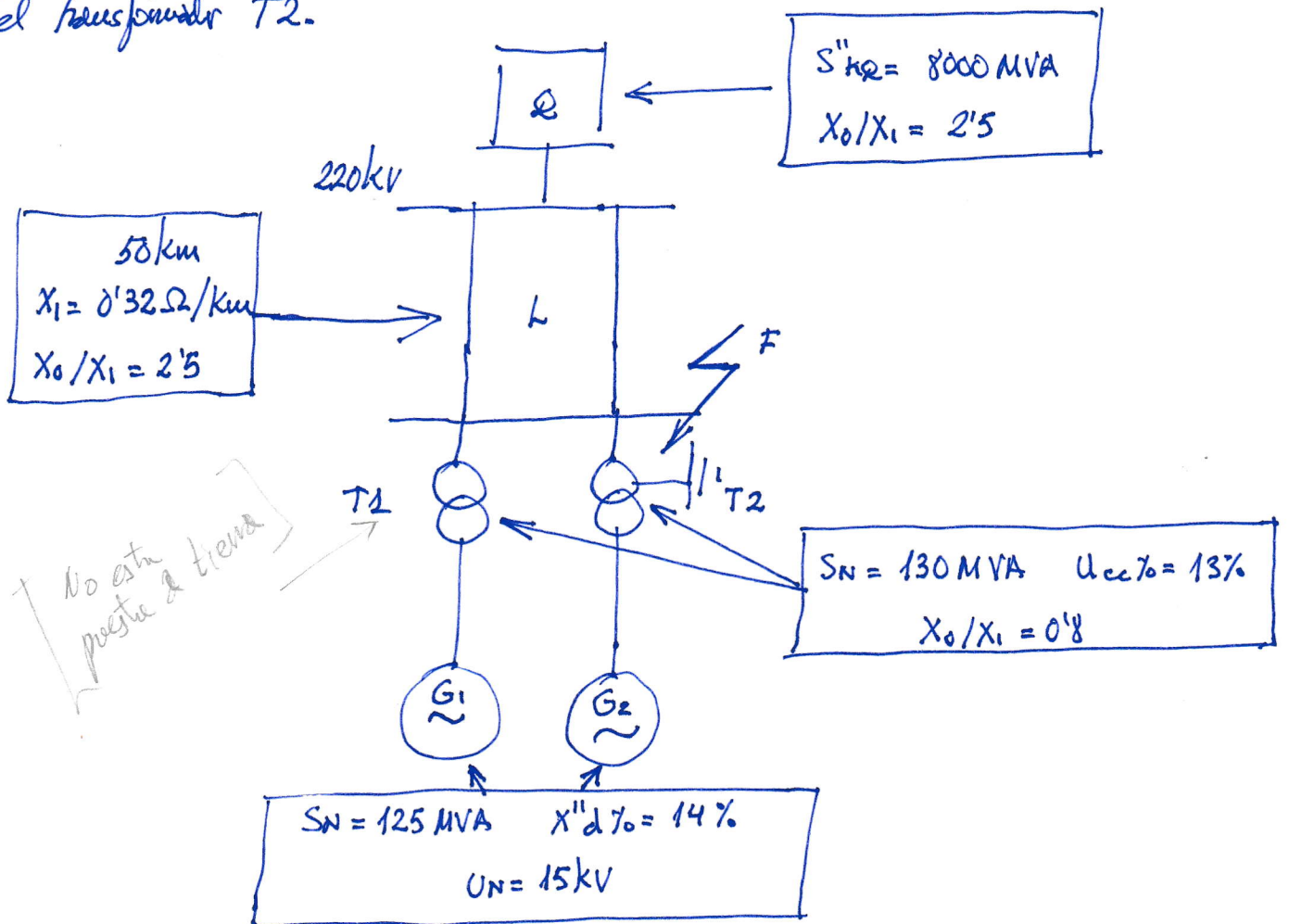


La relación potencia por par de polos es igual a  $0'8/2 = 0'4$  de donde en la grafica anterior  $\eta \approx 0'47$

$$I_{am} = \mu \eta I''_{KSM} = 0'8 \cdot 0'47 \cdot 6712 = 2'523 \text{ kA}$$

$$I_a'' = 8'036 + 50'849 + 2'523 = 61'408 \text{ kA}$$

P2.31 Dado el sistema de la figura que presenta una central que alimenta a una línea que alimenta a un sistema eléctrico de potencia representado por la resistencia  $Q$ . Se ha producido un cortocircuito unipolar a tierra en el punto  $F$ . Se conoce que los generadores son iguales entre sí y que también los transformadores presentan las mismas características, excepto que esta puesta a tierra el transformador  $T2$ .



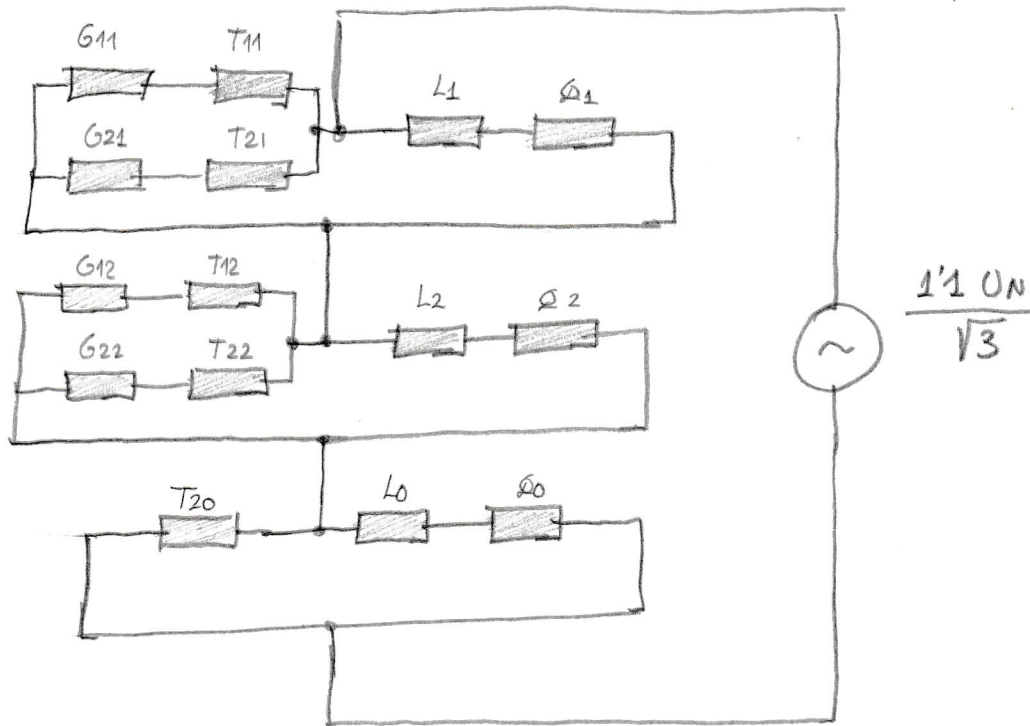
Determinar:

- 1) La corriente inicial simétrica para un cortocircuito unipolar a tierra
  - 2) La corriente inicial simétrica de cortocircuito unipolar a tierra si no funciona ningún alternador.
- 1) la expresión de la corriente inicial simétrica de cortocircuito para un cortocircuito unipolar a tierra empleando el método de los componentes simétricos este determinado por:

$$I_{k1} = \frac{C \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0}$$

Por otro lado como no se indican valores de resistencias de cada uno de los elementos, tomaremos en consideración únicamente las reactancias inductivas.

A la vista del punto donde se ha producido el cortocircuito, el esquema eléctrico equivalente es de la forma, en que el primer subíndice indica el elemento al que pertenece y el segundo si se refiere a las reactancias directas (1), inversa (2) y homopolares (0).



Es necesario determinar los valores de las reactancias que intervienen en el circuito, pero referidas las de los generadores al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito. Tenemos:

Reactancias directas e inversas de los generadores:

$$G_{11} = G_{12} = G_{21} = G_{22} = X''_d = \frac{X''_d \%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} \cdot \frac{1}{(m)^2} = \frac{14}{100} \cdot \frac{15000^2}{125000000} \cdot \frac{1}{\left(\frac{15000}{220000}\right)} = 54'208 \Omega$$

Reactancia directas e inversas de los transformadores

$$T_{11} = T_{12} = T_{21} = T_{22} = X''_d = \frac{U_{cc} \%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{13}{100} \cdot \frac{220000^2}{130000000} = 48'4 \Omega$$

Reactancia directas e inversa de las líneas en paralelo:

$$L_1 = L_2 = \frac{0'32 \cdot 50}{2} = 8 \Omega$$

Reactancia directas e inversa de la acometida:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{1'1 U_{NG}^2}{S_{K''_D}} = \frac{1'1 \cdot 220000^2}{8000000000} = 6'655 \Omega$$

## Reactancias homopolar del transformador T2:

Se obtiene en el cortocircuito unipolar a tierra en el embudo de la central el transformador T2 de donde:

$$T_{20} = 0'8 T_{21} = 0'8 \cdot 48'4 = 38'72 \Omega$$

## Reactancias homopolar de las líneas en paralelo:

$$L_0 = 2'5 L_1 = 2'5 \cdot 8 = 20 \Omega$$

## Reactancia homopolar de la acometida:

$$Q_0 = 2'5 Q_1 = 2'5 \cdot 6'655 = 16'637 \Omega$$

A partir de aquí es necesario resolver el circuito, tenemos

$$G_{11} + T_{11} = G_{21} + T_{21} = G_{12} + T_{12} = G_{22} + T_{22} = 54'208 + 48'4 = 102'6 \Omega$$

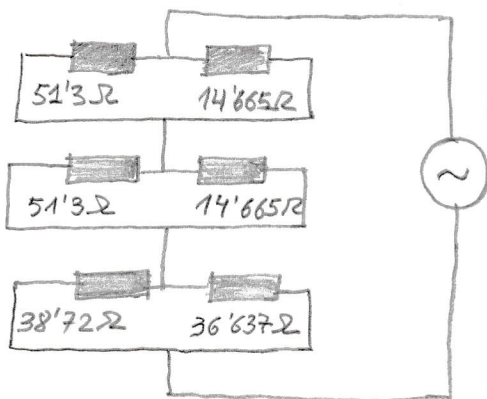
El circuito en paralelo de:  $G_{11} + T_{11} // G_{21} + T_{21}$  tiene un valor de:

$$\frac{102'6}{2} = 51'3 \Omega$$

$$L_1 + Q_1 = L_2 + Q_2 = 8 + 6'655 = 14'655 \Omega$$

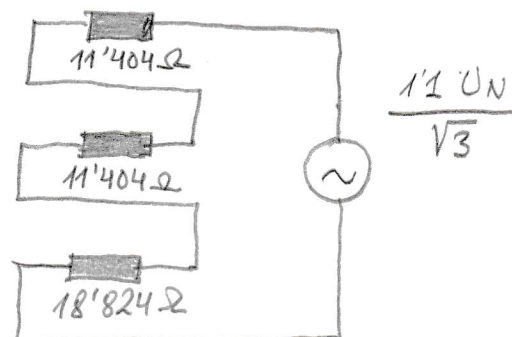
$$L_0 + Q_0 = 20 + 16'637 = 36'637 \Omega$$

Por tanto tenemos el siguiente circuito equivalente:



$$\frac{110 \text{ V}}{\sqrt{3}}$$

Reduciendo eléctricamente el circuito resulta:

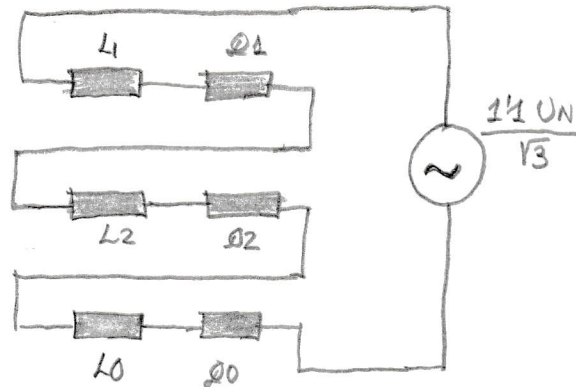


$$\frac{110 \text{ V}}{\sqrt{3}}$$

Por tanto la corriente de cortocircuito en el polo a tierra vale:

$$I''_{k1} = \frac{C \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1'1 \cdot \sqrt{3} \cdot 220\,000}{11'404 + 11'404 + 18'824} = 10068'1 \text{ A}$$

2) Al no estar conectados los alternadores no intervienen en el cortocircuito, pero la acometida que alimenta el subanillo de la central generadora alimenta la corriente de cortocircuito a tierra, el esquema resulta ser de la forma:



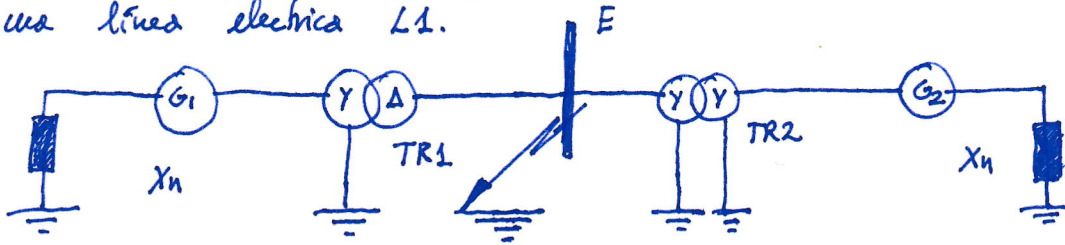
Por lo que la impedancia equivalente del circuito tiene un valor de:

$$Z_{EQUIVALENTE} = 6'655 + 8 + 6'655 + 8 + 20 + 16'637 = 65'947 \Omega$$

Por tanto la corriente en el polo a tierra tiene un valor de:

$$I''_{k1} = \frac{C \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{Z_{EQUIVALENTE}} = \frac{1'1 \cdot \sqrt{3} \cdot 220\,000}{65'947} = 6355'9 \text{ A}$$

P2.32 El circuito de la figura representa un suministro trifásico formado por dos generadores síncronos y dos transformadores interconectados por medio de una línea eléctrica L1.



Las características de cada uno de los elementos de sistema son

$$G1 - 60 \text{ MVA} - 25 \text{ kV} - X_1 = X_2 = 22.5\% - X_0 = 7.5\% - X_n = 11.25\%$$

$$G2 - 50 \text{ MVA} - 25 \text{ kV} - X_1 = X_2 = 21.875\% - X_0 = 7.5\% - X_n = 12.5\%$$

$$TR1 - 60 \text{ MVA} - 25/150 \text{ kV} - X_1 = X_2 = 11.25\% - X_0 = 7.5\%$$

$$TR2 - 80 \text{ MVA} - 25/150 \text{ kV} - X_1 = X_2 = 18\% - X_0 = 18\%$$

$$L1 - X_1 = X_2 = 14j \Omega - X_0 = 56.3 \Omega j$$

Sabiendo que la tensión nominal en las barras E es de 150 kV, cuando se produce un cortocircuito unipolar a tierra en las citadas barras, determinar

- 1) La corriente inicial simétrica para un cortocircuito unipolar a tierra.
- 2) Las corrientes por fase que circulan por la línea L1
- 3) Las corrientes por fase que aporta el generador 2 al circuito cortocircuito unipolar a tierra.

1) La expresión de la corriente inicial simétrica de cortocircuito para un cortocircuito unipolar a tierra empleando el método de las componentes simétricas está determinada por:

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 + \vec{Z}_0}$$

Por otro lado como no se indican valores de resistencia de cada uno de los elementos, tomaremos en consideración únicamente los reactancias inductivas

Determinemos en primer lugar las impedancias de cada uno de los elementos de la instalación:

## TRANSFORMADOR 1:

Pero referidos sus valores al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito

$$X_{1T1} = X_{2T1} = \frac{X_2\%}{100} \cdot \frac{U_{20T1}^2}{S_{NT1}} = \frac{11'25\%}{100} \cdot \frac{150000^2}{60000000} = 42'1875 j \Omega$$

$$X_{0T1} = \frac{X_0\%}{100} \cdot \frac{U_{20T1}^2}{S_{NT1}} = \frac{7'5\%}{100} \cdot \frac{150000^2}{60000000} = 28'125 j \Omega$$

## TRANSFORMADOR 2:

Pero referidos sus valores al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito.

$$X_{1T2} = X_{2T2} = \frac{X_2\%}{100} \cdot \frac{U_{20T2}^2}{S_{NT2}} = \frac{18\%}{100} \cdot \frac{150000^2}{80000000} = 50'625 j \Omega$$

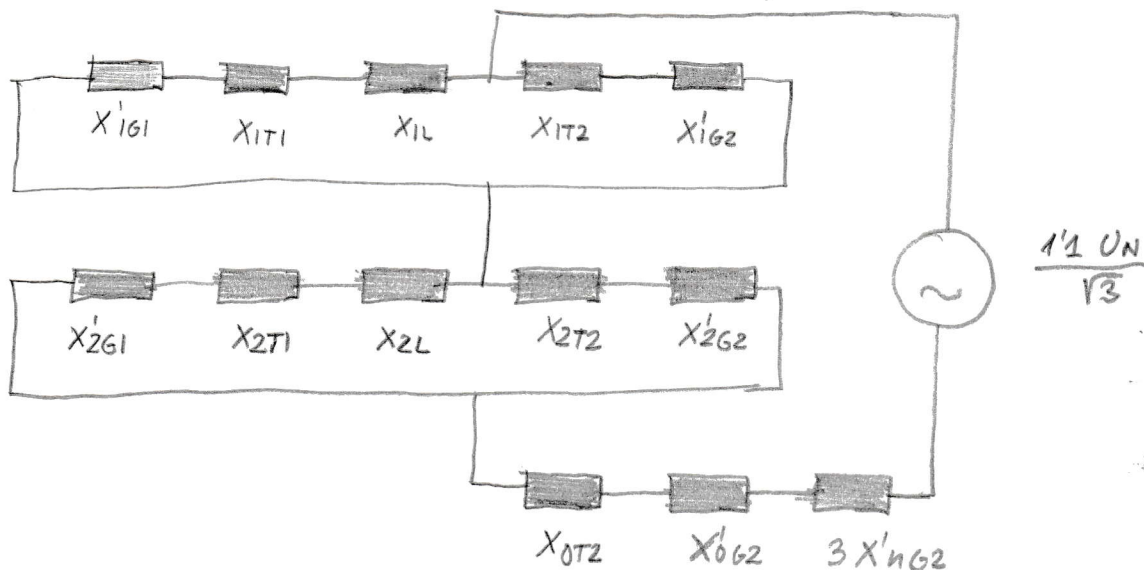
$$X_{0T2} = \frac{X_0\%}{100} \cdot \frac{U_{20T2}^2}{S_{NT2}} = \frac{18\%}{100} \cdot \frac{150000^2}{80000000} = 50'625 j \Omega$$

## LINEA:

$$X_{1L} = X_{2L} = 14'1 \Omega$$

$$X_{0L} = 56'3 j \Omega$$

A la hora de estudiar la corriente de cortocircuito unipolar a tierra, hay que tener en cuenta que al estar el transformador 2 puesto a tierra, tanto el primario como el secundario, esto permite que la corriente a tierra circule tanto como el primario como por el secundario y por la puesta a tierra del generador 2. Por tanto el circuito equivalente es:



$$\text{GENERADOR 1: } X_{1G1} = X_{2G1} = \frac{X_2\%}{100} \cdot \frac{U_{NG1}}{S_{NG1}} = \frac{22'5}{100} \cdot \frac{25000^2}{60000000} = 2'344 j \Omega$$

$$X_{0G1} = \frac{X_0\%}{100} \cdot \frac{U_{NG1}}{S_{NG1}} = \frac{7'5\%}{100} \cdot \frac{25000^2}{60000000} = 0'7812 j \Omega$$

$$X_{1n} = \frac{X_n\%}{100} \cdot \frac{U_{NG1}}{S_{NG1}} = \frac{11'25}{100} \cdot \frac{25000^2}{60000000} = 1'1718 j \Omega$$

Referimos estos valores al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito, es decir a 150kV:

$$X'_{1G1} = X'_{2G1} = \frac{X_{1G1}}{m'^2} = \frac{2'344}{\left(\frac{25000}{150000}\right)^2} = 84'384 j \Omega$$

$$X'_{0G1} = \frac{X_{0G1}}{m'^2} = \frac{0'7812}{\left(\frac{25000}{150000}\right)^2} = 28'123 j \Omega$$

$$X'_{1n} = \frac{X_{1n}}{m'^2} = \frac{1'1718}{\left(\frac{25000}{150000}\right)^2} = 42'184 j \Omega$$

GENERADOR 2:

$$X_{1G2} = X_{2G2} = \frac{X_2\%}{100} \cdot \frac{U_{NG2}}{S_{NG2}} = \frac{21'875}{100} \cdot \frac{25000^2}{50000000} = 2'734 j \Omega$$

$$X_{0G2} = \frac{X_0\%}{100} \cdot \frac{U_{NG2}}{S_{NG2}} = \frac{7'5}{100} \cdot \frac{25000^2}{50000000} = 0'9375 j \Omega$$

$$X_{2n} = \frac{X_n\%}{100} \cdot \frac{U_{NG2}}{S_{NG2}} = \frac{12'5}{100} \cdot \frac{25000^2}{50000000} = 1'5625 j \Omega$$

Referimos estos valores al nivel eléctrico donde se ha producido el cortocircuito, es decir a 150kV.

$$X'_{1G2} = X'_{2G2} = \frac{X_{1G2}}{m'^2} = \frac{2'734}{\left(\frac{25000}{150000}\right)^2} = 98'424 j \Omega$$

$$X'_{0G2} = \frac{X_{0G2}}{\left(\frac{25000}{150000}\right)^2} = \frac{0'9375}{m'^2} = 33'75 j \Omega$$

$$X'_{1n} = \frac{X_{2n}}{m'^2} = \frac{1'5625}{\left(\frac{25000}{150000}\right)^2} = 56'25 j \Omega$$

En dicho circuito interviene la reactancia de puesta a tierra del generador 2 con un valor triple. Por tanto tenemos: Impedancia directa equivalente

$$X_{EQUIVALENTE} = \frac{(X_{G1}' + X_{T1} + X_L) \cdot (X_{G2}' + X_{T2})}{(X_{G1}' + X_{T1} + X_L) + (X_{G2}' + X_{T2})} = \frac{(84'384 + 42'1875 + 14'1) (98'424 + 50'625)}{(84'384 + 42'1875 + 14'1) + (98'424 + 50'625)}$$

$$X_{EQUIVALENTE} = 72'37j \Omega$$

Impedancia inversa equivalente:

$$X_{2EQUIVALENTE} = X_{1EQUIVALENTE} = 72'37j \Omega$$

Impedancia homopolar equivalente:

$$X_{0EQUIVALENTE} = (50'625 + 33'75 + 3 \cdot 56'25) = 253'125j \Omega$$

por lo que la impedancia total equivalente tiene un valor de

$$X_{TOTAL} = (72'37 + 72'37 + 253'125) = 397'86j \Omega$$

Finalmente la corriente de cortocircuito unipolar a tierra es de:

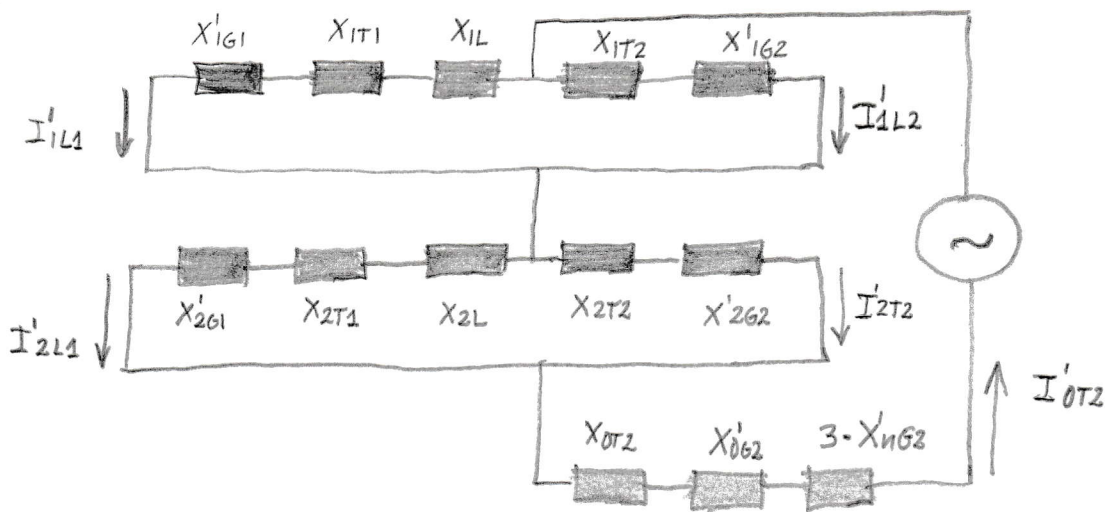
$$I''_{K1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1'1 \cdot \sqrt{3} \cdot 150000}{397'86} = 718'3 \text{ A}$$

Evidentemente esta corriente es puramente inductiva y retrasa de  $90^\circ$  respecto a la tensión.

2) Para determinar las corrientes que aportan al cortocircuito unipolar a tierra,

rebasando el circuito equivalente, en el que las corrientes directa e inversa se subdividen en dos aportadas cada una de ellas por el generador correspondiente, mientras que la corriente homopolar es aportada exclusivamente por el generador 2. Por otro lado sabemos que para un circuito unipolar se cumple:

$$I''_{K1} = I_1 + I_2 + I_0 = 3 \cdot I_1 = 3 \cdot I_2 = 3 \cdot I_0$$



De donde se han formado mas divisiones de intensidad, por tanto, tomando la fase R de la línea L1 tenemos

$$I'_{1RL1} = I'_{2RL1} = \frac{I''_{K1}}{3} \cdot \frac{X_{1EQUIVALENTE}}{X'_{1G1} + X_{1T1} + X_{1L}} = \frac{718'3}{3} \cdot \frac{72'37}{84'384 + 42'1875 + 14'2} = 123'18 \text{ A}$$

mientras que la corriente homopolar tiene un valor de:  $I'_{0L1} = 0 \text{ A}$

Por lo que las corrientes en cada una de las fases de la línea L1 son:

$$I'_{RL1} = I'_{1RL1} + I'_{2RL1} + I'_{0L1} = 123'18 \angle_{-90^\circ} + 123'18 \angle_{-90^\circ} + 0 \angle_{-90^\circ} = 246'36 \angle_{-90^\circ} \text{ A}$$

$$I'_{SL1} = I'_{1RL1} \cdot a^2 + I'_{2RL1} \cdot a + I'_{0L1} = 123'18 \angle_{-90^\circ} \cdot 1 \angle_{120^\circ} + 123'18 \angle_{-90^\circ} \cdot 1 \angle_{120^\circ} + 0 = 123'18 \angle_{90^\circ} \text{ A}$$

$$I'_{TL1} = I'_{1RL1} \cdot a + I'_{2RL1} \cdot a^2 + I'_{0L1} = 123'18 \angle_{-90^\circ} \cdot 1 \angle_{120^\circ} + 123'18 \angle_{-90^\circ} \cdot 1 \angle_{240^\circ} + 0 = 123'18 \angle_{90^\circ} \text{ A}$$

Evidentemente la suma de las tres corrientes es nula:

$$\Sigma(\vec{I}'_{RL1} + \vec{I}'_{SL1} + \vec{I}'_{TL1}) = 0 \text{ A}$$

3) Falta por ultimo determinar las corrientes que circulan por el generador 2. Primeramente calcularemos las corrientes que circulan por el transformador T2 en el nivel de 150 kV:

$$I'_{1T2} = I'_{2T2} = \frac{I''_{K2}}{3} \cdot \frac{X_{1EQUIVALENTE}}{X_{1T2} + X'_{1G1}} = \frac{718'3}{3} \cdot \frac{72'37}{98'424 + 50'625} = 116'25 \text{ A}$$

Mientras que las corrientes homopolares son:

$$I'_{0T2} = I'_{1L1} + I'_{1T2} = 123'18 + 116'25 = 239'43 \text{ A}$$

Estos corrientes son puramente inductivas y por tanto retrasan  $90^\circ$  respecto a la tensión, pero además para un cortocircuito unipolar se cumple:

$$I''_{k1} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_0$$

Podemos por tanto estas corrientes al nivel eléctrico del primario transformador TR2, o lo que es lo mismo al nivel eléctrico del generador G2, es decir 25 kV.

$$I_{1G2} = I_{1G2} \cdot m' = 116'25 \cdot \frac{150000}{25000} = 697'5 \text{ A}$$

Realizando lo mismo para la corriente homopolar del generador 2, tenemos:

$$I_{0G2} = I_{0G2} \cdot m' = 239'43 \cdot \frac{150000}{25000} = 1436'58 \text{ A}$$

Estamos en disposición de calcular las corrientes en los generadores, por medio de las expresiones:

$$I_{RG2} = I_{1RG2} + I_{2RG2} + I_{0G2} = 697'5 \angle_{-90^\circ} + 697'5 \angle_{-90^\circ} + 1436'58 \angle_{-90^\circ} = 2831'58 \angle_{-90^\circ} \text{ A}$$

$$I_{SG2} = I_{1RG2} \cdot a^2 + I_{2RG2} \cdot a + I_{0G2} = 697'5 \angle_{-90^\circ} \cdot 1 \angle_{240^\circ} + 697'5 \angle_{-90^\circ} \cdot 1 \angle_{120^\circ} + 1436'58 \angle_{-90^\circ} = 739'08 \angle_{-90^\circ}$$

$$I_{TG2} = I_{1RG2} \cdot a + I_{2G2} \cdot a^2 + I_{0G2} = 697'5 \angle_{-90^\circ} \cdot 1 \angle_{120^\circ} + 697'5 \angle_{-90^\circ} \cdot 1 \angle_{240^\circ} + 1436'58 \angle_{-90^\circ} = 739'08 \angle_{-90^\circ}$$

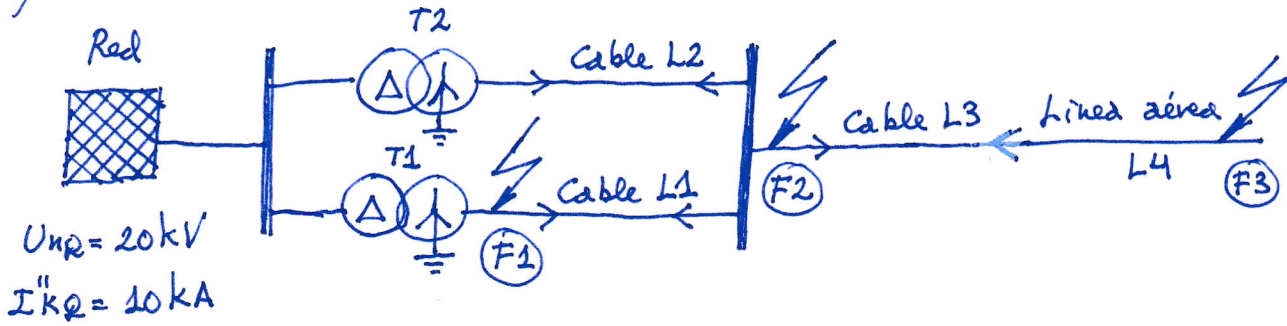
Evidentemente la suma de las tres corrientes tiene un valor:

$$\Sigma(\vec{I}_{RG2} + \vec{I}_{SG2} + \vec{I}_{TG2}) = 2831'58 \angle_{-90^\circ} + 739'08 \angle_{-90^\circ} + 739'08 \angle_{-90^\circ} = 4309'74 \angle_{-90^\circ} \text{ A}$$

Este valor debe coincidir con el valor de la corriente de cortocircuito unipolar pasado al nivel eléctrico del generador, de donde:

$$718'3 \cdot \frac{150000}{25000} = 4309'8 \text{ A} //$$

P2.33 El circuito de la figura representa un suministro trifásico en BT formado por una acometida y dos transformadores en paralelo que alimentan a un subanillo, del que parte en principio una línea con cable aéreo y posteriormente una línea aérea de BT.



Las características de los elementos del sistema son:

Transformador T1: 630 kVA,  $m' = 20/0'42$ ,  $U_{cc}\% = 4\%$ ,  $P_{cu2 \text{ Nominales}} = 6'5 \text{ kW}$ ,  
 $R_0/R_1 = 1$ ,  $X_0/X_1 = 0'95$ .

Transformador T2: 400 kVA,  $m' = 20/0'42$ ,  $U_{cc}\% = 4\%$ ,  $P_{cu2 \text{ Nominales}} = 4'6 \text{ kW}$ ,  
 $R_0/R_1 = 1$ ,  $X_0/X_1 = 0'95$ .

Línea 1:  $Z_{L1} = (0'385 + 0'395j) \text{ m}\Omega$ ,  $R_0/R_1 = 3'7$ ,  $X_0/X_1 = 1'81$

Línea 2:  $Z_{L2} = (0'416 + 0'136j) \text{ m}\Omega$ ,  $R_0/R_1 = 4'23$ ,  $X_0/X_1 = 1'21$

Línea 3:  $Z_{L3} = (5'42 + 1'24j) \text{ m}\Omega$ ,  $R_0/R_1 = 3$ ,  $X_0/X_1 = 4'46$

Línea 4:  $Z_{L4} = (18'5 + 44'55j) \text{ m}\Omega$ ,  $R_0/R_1 = 2$ ,  $X_0/X_1 = 3$

Determinar para un cortocircuito unipolar a tierra, los valores de la corriente inicial simétrica subtransitoria y la corriente de choque:

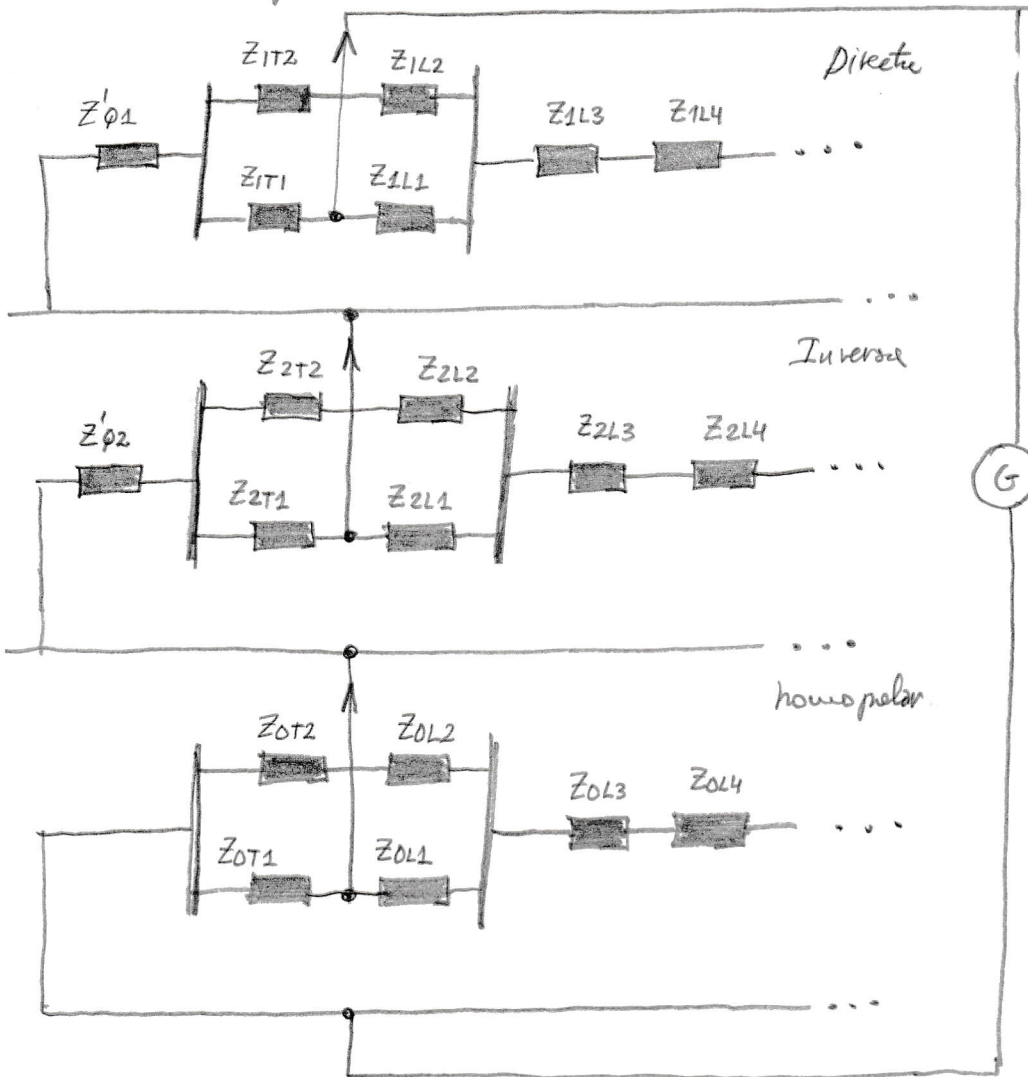
- 1) Cuando el cortocircuito se produce en F1
- 2) Cuando el cortocircuito se produce en F2
- 3) Cuando el cortocircuito se produce en F3

1) La expresión de la corriente inicial simétrica de cortocircuito para un cortocircuito unipolar a tierra empleando el método de las componentes simétricas está determinada por:

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Ahora hay que representar el circuito equivalente con los sistemas de secuencia: directa, inversa y homopolar que intervienen en el cortocircuito,

siendo de la forma indicada a continuación.



• Acometida:

$$Z_{\phi} = \frac{C \cdot UN_{\phi}}{\sqrt{3} \cdot I''_{k\phi}} = \frac{1'1 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 1'27017 \Omega$$

Debido al nivel eléctrico en donde se ha producido el cortocircuito.

$$Z'_{\phi} = \frac{Z_{\phi}}{m'^2} = \frac{1'27017}{\left(\frac{20000}{420}\right)^2} = 0'00056014523 \rightarrow 0'56014 \text{ m}\Omega$$

Por otro lado la resistencia y reactancia de la acometida valen

$$X'_{\phi} = 0'995 \cdot Z'_{\phi} = 0'995 \cdot 0'5601 = 0'5573 \text{ m}\Omega$$

$$R'_{\phi} = 0'1 \cdot X'_{\phi} = 0'1 \cdot 0'5573 = 0'05573 \text{ m}\Omega$$

TRANSFORMADOR 1:

$$Z_{1T2} = Z_{2T1} = \frac{U_{cc} \%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{420^2}{630000} = 11'2 \text{ m}\Omega$$

$$P_{cu2N} = 3 \cdot R_{c2} \cdot I_{2N}^2 \Rightarrow R_{c2} = \frac{P_{cu2N}}{3 \cdot I_{2N}^2} = \frac{6500}{3 \left( \frac{630000}{\sqrt{3} \cdot 420} \right)^2} = 2'888 \text{ m}\Omega$$

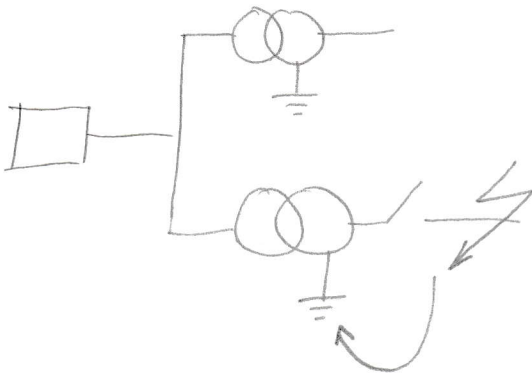
$$X_{c2} = \sqrt{11'2^2 - 2'888^2} = 10'82 \text{ m}\Omega$$

TRANSFORMADOR 2:

$$Z_{1T2} = Z_{2T2} = \frac{U_{cc} \%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{420^2}{400000} = 17'64 \text{ m}\Omega$$

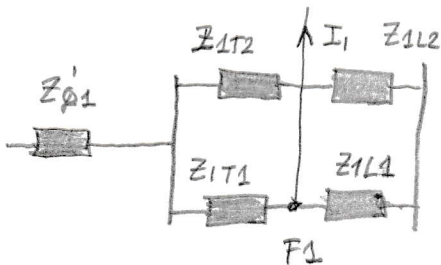
$$P_{cu2N} = 3 \cdot R_{c2} \cdot I_{2N}^2 \Rightarrow R_{c2} = \frac{P_{cu2N}}{3 \cdot I_{2N}^2} = \frac{4600}{3 \left( \frac{400000}{\sqrt{3} \cdot 420} \right)^2} = 5'071 \text{ m}\Omega$$

$$X_{c2} = \sqrt{17'64^2 - 5'071^2} = 16'89 \text{ m}\Omega$$



$$I_{K1} = 3 \cdot I_1 = 3 \cdot I_2 = 3 \cdot I_3$$

Estamos ya en disposici3n de calcular el valor de la impedancia equivalente (a tener en cuenta que las impedancias de las l3neas 3 y 4 evidentemente no intervienen en el cortocircuito).



El circuito equivalente correspondiente a las secciones directa e inversa tienen un valor de:

$$Z_1 \text{ EQUIVALENTE} = Z_2 \text{ EQUIVALENTE} = \frac{(\vec{Z}_{1L1} + \vec{Z}_{1L2} + \vec{Z}_{1T2}) \cdot \vec{Z}_{1T1} + \vec{Z}'_{\phi 1}}{(\vec{Z}_{1L1} + \vec{Z}_{1L2} + \vec{Z}_{1T2}) + \vec{Z}_{1T1}}$$

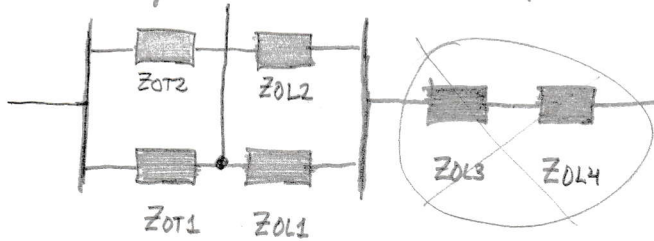
$$Z_1 \text{ EQUIVALENTE} = \frac{(0'385 + 0'395j) + (0'416 + 0'136j) + (5'071 + 16'89j) \cdot (2'888 + 10'82j)}{(0'385 + 0'395j) + (0'416 + 0'136j) + (5'071 + 16'89j) + (2'888 + 10'82j)} + (0'0557 + 0'5573j)$$

$$Z_1 \text{ EQUIVALENTE} = (2'0144134 + 7'2389052j) \text{ m}\Omega$$

La directa e inversa son iguales así pues

$$Z_1 = Z_2 = \boxed{Z_1 \text{ EQUIVALENTE} \cdot 2}$$

Muchas que la impedancia equivalente del circuito homopolar tiene un valor de



NO SE TIENEN EN CUENTA

IMPEDANCIAS DE LA LINEA 3 y 4.

$$Z_{0EQUIVALENTE} = \frac{(\vec{Z}_{0L1} + \vec{Z}_{0L2} + \vec{Z}_{0T2}) \cdot \vec{Z}_{0T1}}{(\vec{Z}_{0L1} + \vec{Z}_{0L2} + \vec{Z}_{0T2}) + \vec{Z}_{0T1}} = \frac{(1'424 + 0'7149j) + (1'759 + 0'1645j) + (5'07 + 16'04j) \cdot (2'888 + 10'28j)}{(1'424 + 0'7149j) + (1'759 + 0'1645j) + (5'07 + 16'04j) + (2'888 + 10'28j)}$$

Los valores =  $Z_{0L1} = \left( \frac{R_{0L1} \cdot R_{L1}}{R_{L1}} + \frac{X_{0L1} \cdot X_{L1}}{X_{L1}} j \right) = (3'7 \cdot 0'385 + 1'81 \cdot 0'395j) = (1'424 + 0'7149j) \text{ m}\Omega$

$$Z_{0L2} = \left( \frac{R_{0L2} \cdot R_{L2}}{R_{L2}} + \frac{X_{0L2} \cdot X_{L2}}{X_{L2}} j \right) = (4'23 \cdot 0'416 + 1'21 \cdot 0'136j) = (1'759 + 0'1645j) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{0T2} = \left( R_{c2T2} + \frac{X_{0T2}}{X_{1T2}} \cdot X_{c2T2} j \right) = (5'071 + 0'95 \cdot 16'89j) = (5'07 + 16'04j) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{0T1} = \left( R_{c2T1} + \frac{X_{0T1}}{X_{1T1}} \cdot X_{c2T1} j \right) = (2'888 + 0'95 \cdot 10'82j) = (2'888 + 10'28j) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{0EQUIVALENTE} = (2'2687334 + 6'450096j) \text{ m}\Omega$$

finalmente  $Z_{TOTAL} = Z_1 \text{ EQUIVALENTE} + Z_2 \text{ EQUIVALENTE} + Z_{0EQUIVALENTE}$

Como  $(Z_1 = Z_2) \rightarrow Z_{TOTAL} = 2 \cdot (2'0144134 + 7'2389052j) + (2'2687334 + 6'450096j)$

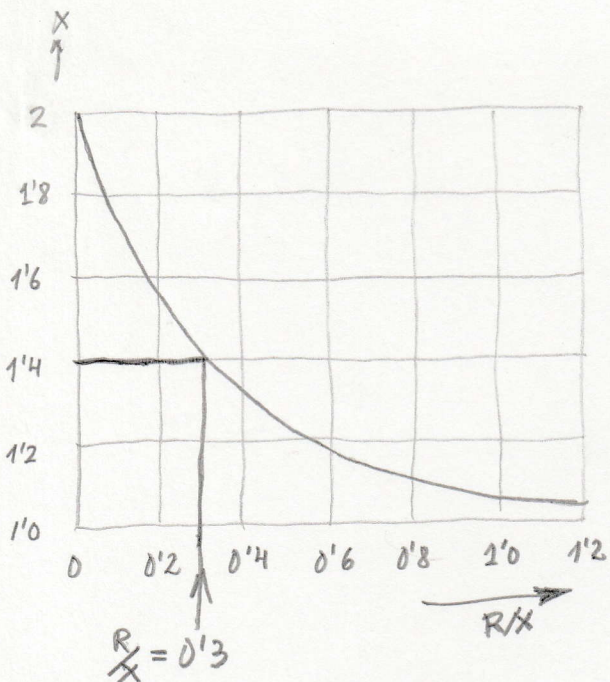
$$Z_{TOTAL} = 6'2975602 + 20'9279064j = 21'8548971 \angle 73'25257244^\circ \text{ m}\Omega$$

por lo que la corriente inicial simetrica para el cortocircito unipolar en el punto F1 tiene un valor de:

$$I''_{k1} = \frac{1'05 \cdot \sqrt{3} \cdot 400}{21'853} = 33'288 \text{ kA}$$

Por último la corriente de choque esta determinada por la expresion

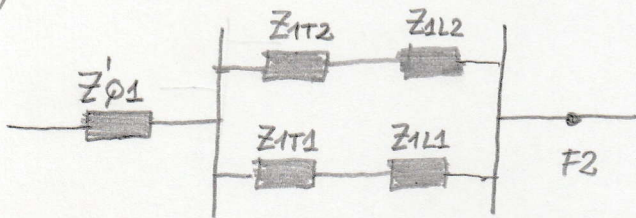
$$I_s = X \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k1} = \text{para una relación } \frac{R}{X} = \frac{6'2975}{20'9279} = 0'3$$



El factor  $X$  tiene un valor aproximado de 1.4 según la gráfica adjunta, por tanto:

$$X = 0.4 \rightarrow I_s = 1.4 \cdot \sqrt{2} = 33.288 = 65.906 \text{ kA} //$$

2) Al producirse el cortocircuito en el punto F2 la alimentación para del punto F1 al F2 modificándose el circuito equivalente de cada rama, para el sistema directo tenemos:



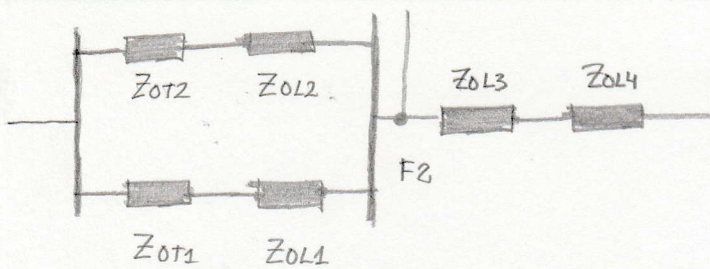
Por lo que ahora la impedancias equivalente de rama directa e inversa tienen un valor de:

$$Z_{1EQUIVANTE} = Z_{2EQUIVANTE} = \frac{(\vec{Z}_{1L1} + \vec{Z}_{1T1}) \cdot (\vec{Z}_{1L2} + \vec{Z}_{1T2})}{(\vec{Z}_{1L1} + \vec{Z}_{1T1}) + (\vec{Z}_{1L2} + \vec{Z}_{1T2})} + \vec{Z}'_{Q1}$$

$$Z_{1EQUIVANTE} = \frac{(0.385 + 0.395j + 2.888 + 10.82j) \cdot (0.416 + 0.136j + 5.071 + 16.89j)}{(0.385 + 0.395j + 2.888 + 10.82j) + (0.416 + 0.136j + 5.071 + 16.89j)} + (0.0557 + 0.5573j)$$

$$Z_{1EQUIVANTE} = (2.11021697 + 7.32j) \text{ m}\Omega$$

Lo mismo sucede con el circuito de rama inversa homopolar, en el que las impedancias de las líneas 3 y 4 tampoco interviene en el cortocircuito, siendo su impedancia equivalente:



$$Z_{\text{EQUIVALENTE}} = \frac{(Z_{O11} + Z_{O12}) \cdot (Z_{O12} + Z_{O11})}{(Z_{O11} + Z_{O12}) + (Z_{O12} + Z_{O11})} = \frac{(1'424 + 0'7149j + 2'888 + 10'28j) \cdot (1'759 + 0'1645j + 5'07 + 16'04j)}{(1'424 + 0'7149j + 2'888 + 10'28j) + (1'759 + 0'1645j + 5'07 + 16'04j)}$$

$$Z_{\text{EQUIVALENTE}} = (2'643 + 6'551j) \text{ m}\Omega$$

Por tanto la impedancia total del cortocircuito es de: , teniendo en cuenta  $Z_1 = Z_2$   
 $Z = 2$

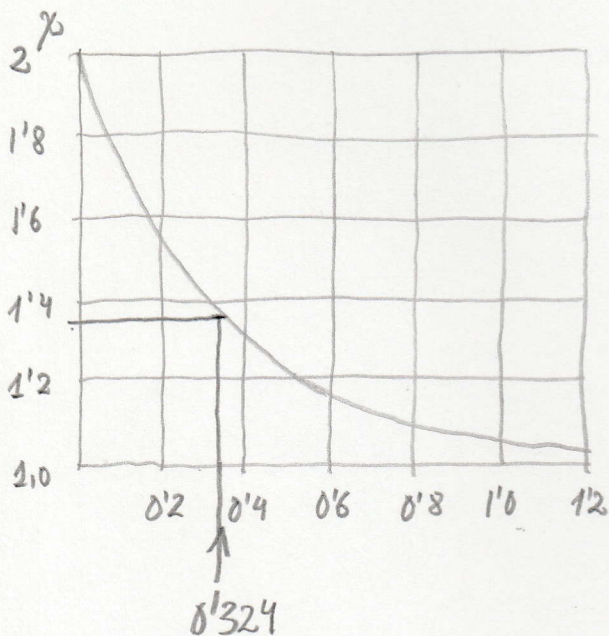
$$Z_{\text{TOTAL}} = Z_{1\text{EQUIVALENTE}} + Z_{2\text{EQUIVALENTE}} + Z_{\text{EQUIVALENTE}}$$

$$Z_{\text{TOTAL}} = 2(2'109 + 7'319j) + 2'643 + 6'551j = 6'861 + 21'189j = 22'272 \angle 72'05^\circ \text{ m}\Omega$$

La corriente de cortocircuito unipolar en el punto F2 tiene un valor de:

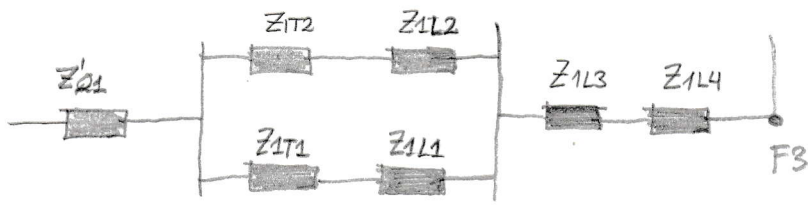
$$I''_{K1} = \frac{1'05 \cdot \sqrt{3} \cdot 400}{22'272} = 32'66 \text{ kA}$$

La relación  $R/X = \frac{6'861}{21'189} = 0'324$ , y según la gráfica,  $\chi = 1'38$



$$I_s = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{K1} \Rightarrow I_s = 1'38 \cdot \sqrt{2} \cdot 32'66 = 63'73 \text{ kA}$$

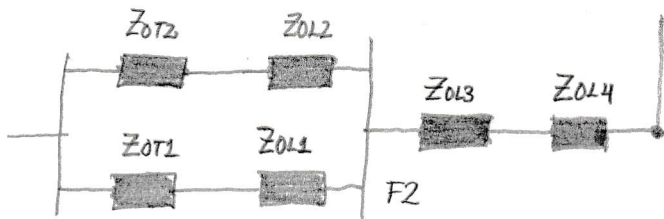
3) Al producirse el cortocircuito unipolar en el punto F3, echen en consideración las impedancias directas, inversas y homopolares de las líneas 3 y 4, por tanto el circuito es:



Por lo que la impedancia directa e inversa equivalente será de:

$$Z_{1EQUIVALENTE} = (2'109 + 7'319j + 5'42 + 1'74j + 18'5 + 44'55j) (26'029 + 53'609j) \mu\Omega$$

Mientras que para la impedancia homopolar tenemos el siguiente circuito:



La impedancia homopolar equivalente será:

$$Z_{0EQUIVALENTE} = 2'643 + 6'551j + 3 \cdot 5'42 + 4'416j \cdot 1'74 + 2 \cdot 18'5 + 3 \cdot 44'55j = (55'903 + 147'961j) \mu\Omega$$

Por tanto la impedancia total del cortocircuito es de:

$$Z_{TOTAL} = Z_{1EQUIVALENTE} + Z_{2EQUIVALENTE} + Z_{0EQUIVALENTE} =$$

$$Z_{TOTAL} = 2(26'029 + 53'609j) + 55'903 + 147'961j = 107'96 + 255'179j = 277'07 \angle 67'06^\circ$$

La corriente de cortocircuito unipolar en el punto F3 tiene un valor de:

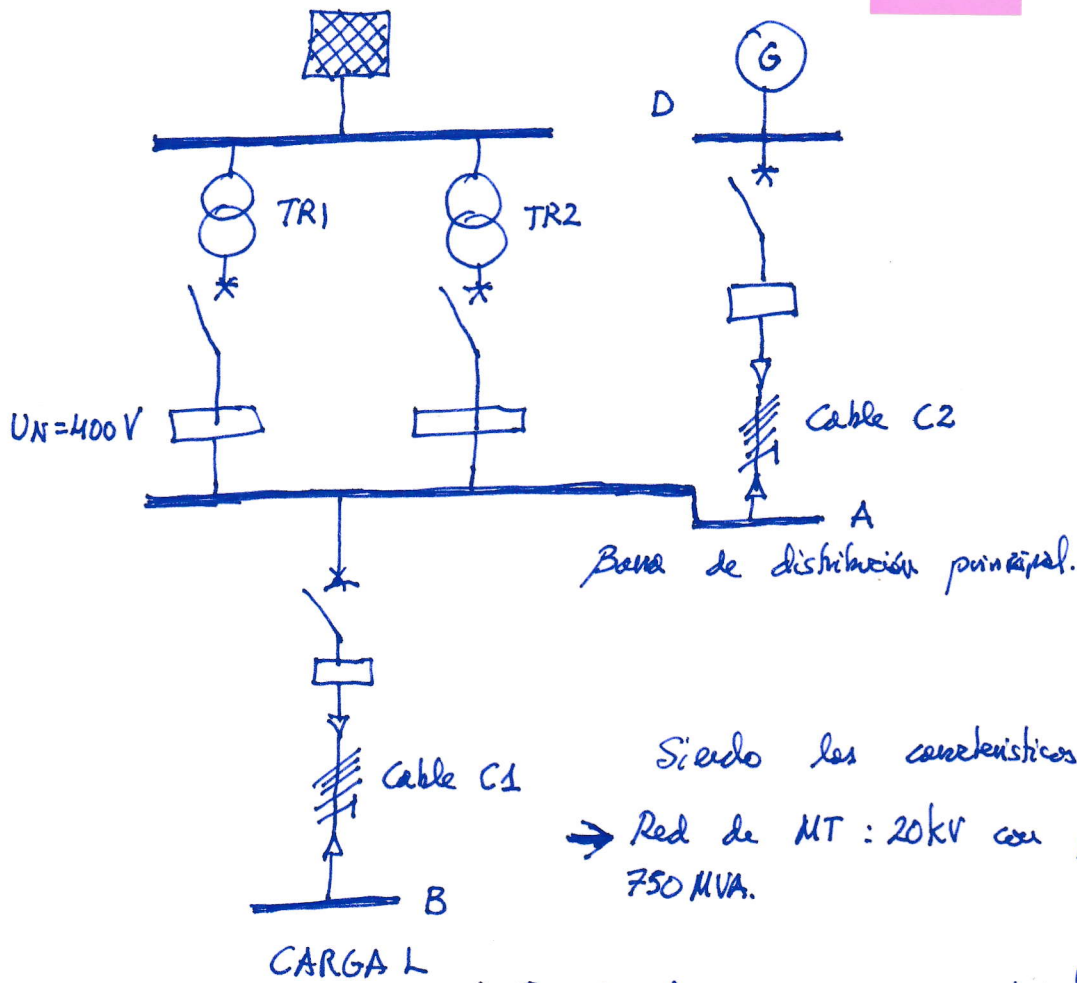
$$I''_{K1} = \frac{1'05 \cdot \sqrt{3} \cdot 400}{277'07} = 2'62 \text{ KA}$$

La relación  $\frac{R}{X} = \frac{107'96}{255'179} = 0'423$  en consecuencia el factor  $\alpha$  tiene un valor aproximado de 1'3 según la gráfica adjunta, por tanto:

$$I_s = 1'3 \cdot \sqrt{2} \cdot 2'62 = 4'817 \text{ KA}$$

P2.34 El circuito de la figura representada, es una instalación con régimen de neutro TNS.

BIPOLAR



Siendo las características de la instalación  
 → Red de MT: 20kV con potencia de cortocircuitos de 750 MVA.

→ Transformadores TR1 y TR2: 1600kVA; 20/0'42kV;  $U_{cc}\% = 6\%$   
 $P_{cu2N} = 1\%$ ;  $R_0/R_1 = 1$ ;  $X_0/X_1 = 1$

→ Generador: 1250kVA;  $X''_d\% = 14\%$ ;  $X''_0\% = 9\%$

→ Cable C2:  $3 \times (2 \times 185) + 6 \times 95 + G500$  cuyas características son: Resistencia de fase =  $2'477 \text{ m}\Omega$ ; Resistencia de fase =  $1'850 \text{ m}\Omega$ ; Resistencia de neutro =  $4'825 \text{ m}\Omega$   
 Resistencia de neutro =  $1'875 \text{ m}\Omega$ ; Resistencia conductor PE =  $4'656 \text{ m}\Omega$  y resistencia conductor PE =  $1'850 \text{ m}\Omega$ .

Determinar:

- 1) Cuando se produce un cortocircuito trifásico en la barra principal de distribución, la corriente en esta y las corrientes parciales del circuito.
- 2) Cuando se produce un cortocircuito fase-neutro en la barra principal de distribución el valor de dicha corriente
- 3) Cuando se produce un cortocircuito fase-conductor de protección en la barra

principal de distribución el valor de dicha corriente.

2º) En primer lugar hay que tener en cuenta que los transformadores tienen una conexión  $\Delta/\Delta$  con puesta a tierra. Es necesario determinar las impedancias directas, inversas y homopolares que intervienen en el circuito según el tipo del mismo. Para el primer cortocircuito trifásico, solo intervienen las impedancias directas de: Acometida, transformadores en paralelo, generador y línea de alimentación de este a los buses principales. Definamos los valores de las mismas:

ACOMETIDA:  $S''_{kQ} = \sqrt{3} \cdot U_{kQ} \cdot I''_{kQ} \rightarrow I''_{kQ} = \frac{750000000}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 21650'6 \text{ A}$

donde se le puede asignar una impedancia equivalente de:  $Z_Q = \frac{1'1 \cdot 20000}{\sqrt{3} \cdot 21650'6}$

$Z_Q = 0'58666 \Omega$  Pasado al nivel eléctrico en donde se ha producido el cortocircuito y expresada en  $\text{m}\Omega$ :

$$Z'_Q = \frac{Z_Q}{m'^2} = \frac{0'58666}{\left(\frac{20000}{420}\right)^2} = 0'2587 \text{ m}\Omega$$

Por otro lado la resistencia y reactancia de la acometida valen:

$$X'_Q = 0'995 Z'_Q = 0'995 \cdot 0'2587 = 0'2574 \text{ m}\Omega$$

$$R'_Q = 0'1 \cdot X'_Q = 0'1 \cdot 0'2574 = 0'02574 \text{ m}\Omega$$

TRANSFORMADORES TR1 Y TR2:

$$Z_{1TR1} = Z_{1TR2} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{420^2}{1600000} = 6'615 \text{ m}\Omega$$

$$R_{C2TR1} = R_{C2TR2} = \frac{1}{400} \cdot \frac{420^2}{1600000} = 1'1 \text{ m}\Omega$$

$$X_{C2TR} = X_{C2TR2} = \sqrt{6'615^2 - 1'1^2} = 6'522 \text{ m}\Omega$$

GENERADOR:  $X''_d = \frac{X''_d\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NT}} = \frac{14}{100} \cdot \frac{400^2}{1250000} = 17'92 \text{ m}\Omega$

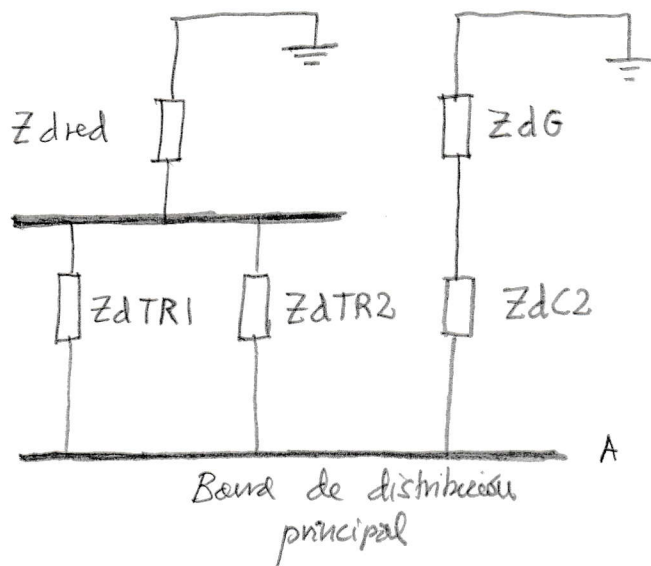
A falta de mayor información para calcular la resistencia del devorado del alternador empleamos:  $R_G = 0'15 X''_d \Rightarrow 0'15 \cdot 17'92 = 2'688 \text{ m}\Omega$

## LINEA C2:

Cable C2:  $3 \times (2 \times 185) + 3 \times (2 \times 95) + G-500$  cuyos característicos son: Resistencia de fase =  $2'477 \text{ m}\Omega$ ; Reactancia de fase =  $1'850 \text{ m}\Omega$ .

El circuito equivalente del sistema de seccion directa es de la forma:

Red de seccion positiva:



Procedemos por tanto a determinar la impedancia equivalente de este sistema teniendo en cuenta que al desconectar el tipo de carga despreciamos la misma (en el caso de ser motores se han en su consideración a través de la impedancia de la línea C1:)

$$Z_{1EQUI} = \frac{\left[ Z_{red} + \frac{Z_{dR1} \cdot Z_{dR2}}{Z_{dR1} + Z_{dR2}} \right] \cdot \left[ Z_{dG} + Z_{dc2} \right]}{\left[ Z_{red} + \frac{Z_{dR1} \cdot Z_{dR2}}{Z_{dR1} + Z_{dR2}} \right] + \left[ Z_{dG} + Z_{dc2} \right]}$$

$$Z_{1EQUI} = \frac{\left[ 0'02574 + 0'2574j + \frac{(1'1 + 6'522j) \cdot (1'1 + 6'522j)}{(1'1 + 6'522j) + (1'1 + 6'522j)} \right] \cdot \left[ 2'688 + 17'92j + 2'477 + 1'85j \right]}{\left[ 0'02574 + 0'2574j + \frac{(1'1 + 6'522j) \cdot (1'1 + 6'522j)}{(1'1 + 6'522j) + (1'1 + 6'522j)} \right] + \left[ 2'688 + 17'92j + 2'477 + 1'85j \right]}$$

$$Z_{1EQUI} = 8'532 + 2'99j = \begin{matrix} 3'037 \\ 79'91^\circ \end{matrix} \text{ m}\Omega$$

Por tanto la corriente triplar de cortocircuito en barras principales es de:

$$I''_{K3} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 3'037} = 79'84 \text{ kA}$$

Falta ahora por calcular la corriente que aporta cada transformador y el alternador, para el alternador tenemos:

$$I''_{K3 \text{ GENERADOR}} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (5'165 + 19'77j)} = 11'867 \text{ kA}$$

Mientras que al ser los transformadores iguales la corriente que aporta cada uno de ellos es de:

$$I''_{k3TR1} = I''_{k3TR2} = \frac{79'84 - 11'867}{2} = 33'98 \text{ kA}$$

Para calcular este último valor, la corriente aportada por ambos transformadores es de:

$$I''_{k3TR1 \text{ y } TR2} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0'57587 + 3'5184j)} = 68 \text{ kA}$$

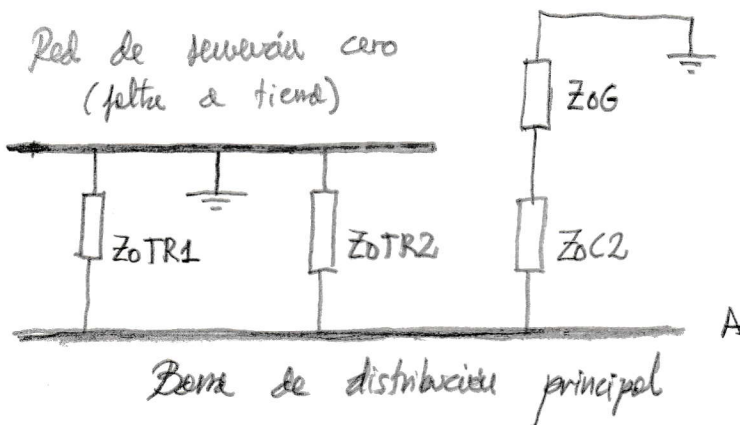
Muy aproximadamente el doble de la corriente aportada por un transformador.

2) Al ser un régimen de neutro TNS, se puede producir cortocircuito unipolar bien a neutro o bien al conductor de protección PE, evidentemente los valores serán distintos si sus secciones son distintas.

En este apartado calcularemos la corriente unipolar entre un conductor de fase y el neutro, perteneciente a las barras de distribución principal. La expresión de la corriente de cortocircuito unipolar es:

$$I''_{k1} = \frac{C \cdot \sqrt{3} \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0} =$$

La impedancia homopolar del circuito está representada por el siguiente esquema:



La impedancia equivalente está definida por la expresión:

$$Z_{OEQUI} = \frac{\left[ \frac{Z_{0TR1} \cdot Z_{0TR2}}{Z_{0TR1} + Z_{0TR2}} \right] \cdot [Z_{0G} + Z_{0F-NC2}]}{\left[ \frac{Z_{0TR1} \cdot Z_{0TR2}}{Z_{0TR1} + Z_{0TR2}} \right] + [Z_{0G} + Z_{0F-NC2}]}$$

Primamente hay que definir la impedancia homopolar del generador, siendo su valor:

$$X_0'' = \frac{X_0''\%}{100} \cdot \frac{U_{NG}^2}{S_{NT}} = \frac{9}{100} \cdot \frac{400^2}{1250000} = 11'52 \text{ m}\Omega$$

La resistencia homopolar es igual a la resistencia directa del alternador, de donde

resulta:

$$Z_{OEQUI} = \frac{\left[ \frac{(1'1 + 6'522j) \cdot (1'1 + 6'522j)}{(1'1 + 6'522j) + (1'1 + 6'522j)} \right] \cdot [2'688 + 11'52j + 3(4'825 + 1'875j)]}{\left[ \frac{(1'1 + 6'522j) \cdot (1'1 + 6'522j)}{(1'1 + 6'522j) + (1'1 + 6'522j)} \right] + [2'688 + 11'52j + 3(4'825 + 1'875j)]} = 0'7 + 2'88j = 2'963 \angle 76'34^\circ$$

$$Z_{OEQUIVA} = 2'963 \angle 76'34^\circ \text{ m}\Omega$$

Por tanto la corriente de cortocircuito trifásico por neutro es:

$$I''_{k1 \text{ F-N}} = \frac{1'05 \sqrt{3} \cdot 400}{2(0'532 + 2'99j) + 0'7 + 2'88j} = \frac{727'46}{1'764 + 8'86j} = 80'525 \text{ kA}$$

3) Para el cálculo de la corriente de cortocircuito trifásico a tierra - fase del conductor de protección (PE) empleamos el mismo circuito anterior, pero en este caso  $Z_{OC2}$  será la impedancia homopolar del conductor de protección, es decir:

$$Z_{OEQUI} = \frac{\frac{Z_{OTR1} \cdot Z_{OTR2}}{Z_{OTR1} + Z_{OTR2}} \cdot [Z_{OG} + Z_{OF-PE C2}]}{\frac{Z_{OTR1} \cdot Z_{OTR2}}{Z_{OTR1} + Z_{OTR2}} + [Z_{OG} + Z_{OF-PE C2}]}$$

$$Z_{OEQUIV} = \frac{\left[ \frac{(1'1 + 6'522j) \cdot (1'1 + 6'522j)}{(1'1 + 6'522j) + (1'1 + 6'522j)} \right] \cdot [2'688 + 11'52j + 3(4'656 + 1'850j)]}{\left[ \frac{(1'1 + 6'522j) \cdot (1'1 + 6'522j)}{(1'1 + 6'522j) + (1'1 + 6'522j)} \right] + [2'688 + 11'52j + 3(4'656 + 1'850j)]} = 0'697 + 2'877j$$

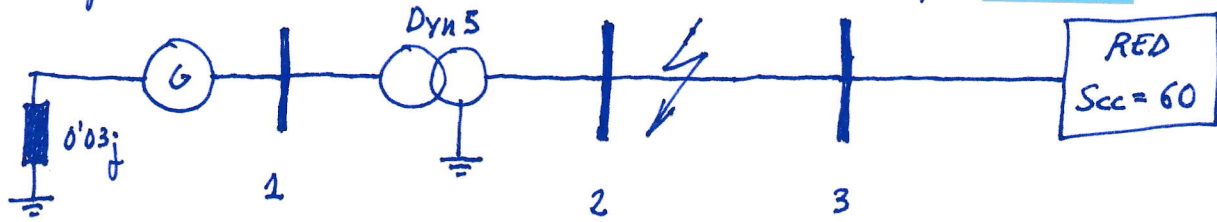
$$Z_{OEQUI} = 2'960 \angle 76'32^\circ \text{ m}\Omega$$

Por tanto la corriente de cortocircuito trifásico fase conductor de protección (PE) es de:

$$I''_{k1 \text{ F-PE}} = \frac{1'05 \sqrt{3} \cdot 400}{2(0'532 + 2'99j) + 0'697 + 2'877j} = \frac{727'26}{1'761 + 8'857j} = 80'557 \text{ kA}$$

Al tener en cuenta que tanto la impedancia del conductor neutro como el de protección intervienen en la ecuación con un valor triple:

P 3.36 Dada la red de la figura siguiente con los datos expresados en pu referido a una misma tensión base ( $1732 + 0j$ ) pu



Se conoce los siguiente datos:

→ GENERADOR:  $X_1 = 0.2$ ;  $X_2 = 0.08$ ;  $X_0 = 0.04$

→ TRANSFORMADOR:  $X_{cc} = 0.15$ ;  $X_0 = 0.12$

→ LÍNEA: 20km  $X_1 = X_2 = 0.08$   $X_0 = 0.2$

Determinar:

1) La intensidad por el neutro del transformador cuando se produce un cortocircuito unipolar a tierra a 5km de la barra 2 con una impedancia de falla de  $0.02j$ .

2) Las tensiones en bornes del generador en las condiciones del apartado anterior:

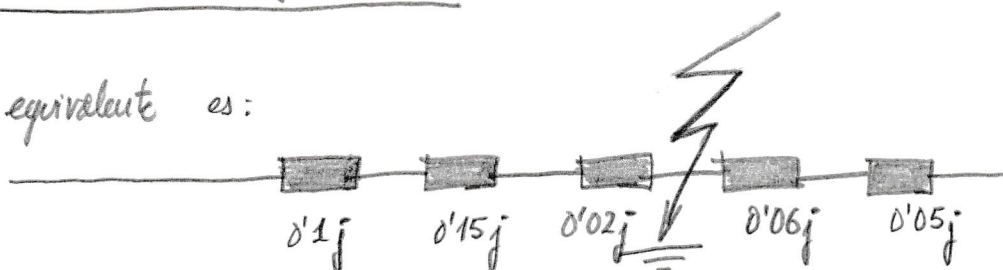
1) La expresión de la intensidad de cortocircuito unipolar a tierra está determinada por la expresión

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{E''}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \rightarrow I_{k1} = \frac{3 \cdot E''}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

En nuestro caso como estamos trabajando en pu, el valor de  $E'' = 1 + 0j$  falta por determinar el valor de las impedancias: directas, inversas y homopolares que intervienen en el circuito.

Circuito de secuencia directa:

El equivalente es:



Puesto que, al producirse el cortocircuito a 5km de la barra 2, tenemos:

$$\frac{0'08 \cdot 5}{20} = 0'02j \text{ pu} \quad \frac{0'08 \cdot 15}{20} = 0'06j \text{ pu.}$$

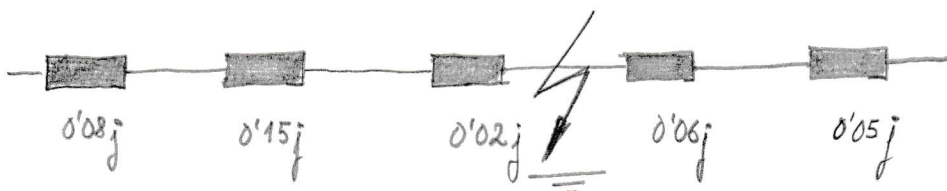
Por otro lado a la red le corresponde una impedancia por fase de valor:

$$X_{RED \text{ pu}} = \frac{U^2}{S_{cc}} = \frac{\sqrt{3}^2}{60} = 0'05j \text{ pu}$$

Con lo que la impedancia equivalente directa es de:

$$Z_{1 \text{ pu}} = \frac{(0'1j + 0'15j + 0'02j) \cdot (0'06j + 0'05j)}{(0'1j + 0'15j + 0'02j) + (0'06j + 0'05j)} = 0'0782j \text{ pu}$$

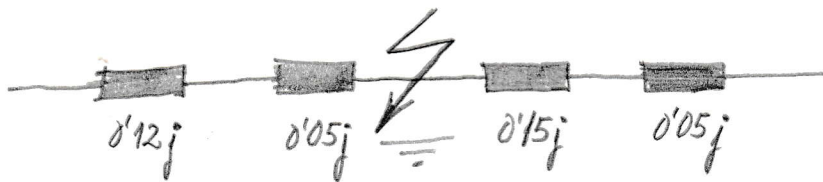
Circuito de tensión inversa: El esquema equivalente es:



Por lo que la impedancia inversa tiene un valor de:

$$Z_{2 \text{ pu}} = \frac{(0'08j + 0'15j + 0'02j) \cdot (0'06j + 0'05j)}{(0'08j + 0'15j + 0'02j) + (0'06j + 0'05j)} = 0'0764j \text{ pu.}$$

Circuito de tensión homopolar: El esquema equivalente es:



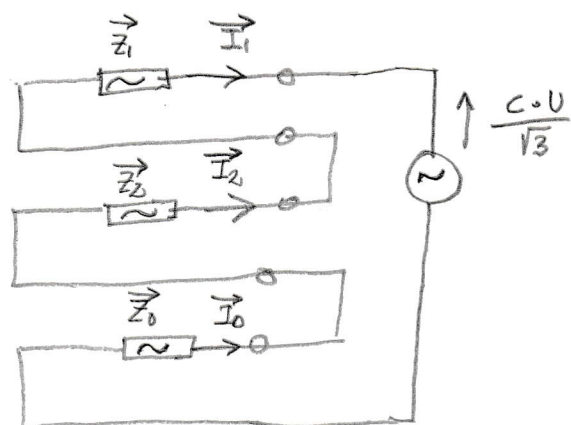
Puesto que la corriente homopolar se cierra a través de la puesta a tierra del neutro del transformador y del sistema eléctrico de alimentación.

Por lo que la impedancia inversa tiene un valor de:

$$Z_{0 \text{ pu}} = \frac{(0'12j + 0'05j) \cdot (0'15j + 0'05j)}{(0'12j + 0'15j) + (0'15j + 0'05j)} = 0'0919j \text{ pu}$$

Pero además hay que tener en cuenta la impedancia de falla de  $0'02j$  que interviene con un valor triple es decir:  $3 \cdot 0'02 = 0'06j$  pu por lo que la impedancia homopolar total es de:  $0'0919 + 0'06 = 0'1519j$  pu

El circuito equivalente total para el cálculo de la corriente de cortocircuito resulta:



Conocidos los valores de las impedancias: directa, inversa y homopolar, la corriente de cortocircuito unipolar a tierra tiene en pu un valor de:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 = \vec{I}_0 = \frac{\vec{E}''}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1 + 0j}{0'0782j + 0'0764j + 0'1519j} = 0 - 3'2626j \text{ pu}$$

O también:

$$I''_{K1} = 3 \cdot \vec{I}_1 = 0 + 9'7878j \text{ pu}$$

A partir de los valores de las corrientes directa, inversa y homopolar, podemos determinar las tensiones: directa, inversa y homopolar. Siendo sus valores:

$$\vec{U}_1 = \vec{E} - \vec{I}_1 \cdot \vec{Z}_1 = (1 + 0j) - (0 + 0'0782j) \cdot (0 - 3'2626j) = (0'7448 + 0j) \text{ pu}$$

$$\vec{U}_2 = -\vec{I}_2 \cdot \vec{Z}_2 = -(0 + 0'0764j) \cdot (0 - 3'2626j) = (-0'24926 + 0j) \text{ pu}$$

$$\vec{U}_0 = -\vec{I}_0 \cdot \vec{Z}_0 = -(0 + 0'0919j) \cdot (0 - 3'2626j) = (-0'2998 + 0j) \text{ pu}$$

La intensidad homopolar en el neutro del transformador se calcula a partir de la tensión homopolar dividida por la impedancia homopolar del transformador, es decir:

$$\vec{I}_{0 \text{ TRAF}} = \frac{-0'2998}{0'12j + 0'05j} = 0 + 1'763j \text{ pu}$$

Finalmente la corriente por el neutro del transformador es de:

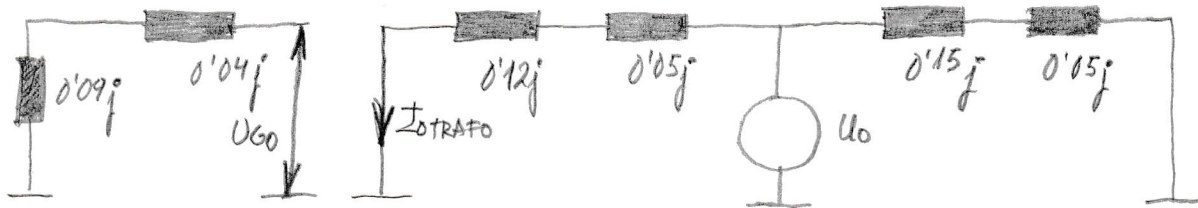
$$|\vec{I}_{\text{NTRAF}}| = 3 \cdot |\vec{I}_{0 \text{ TRAF}}| = 3 \cdot 1'763 = 5'2905 \text{ pu}$$

2) Para calcular las tensiones en cada una de las fases del generador previamente las calcularemos en el transformador en el dominio de los componentes simétricos y después introduciremos el desfase que provoca el transformador, puesto que al ser un transformador en conexión Dy5 provoca un desfase de  $150^\circ$

Así resulta:

Circuito de secuencia homopolar:

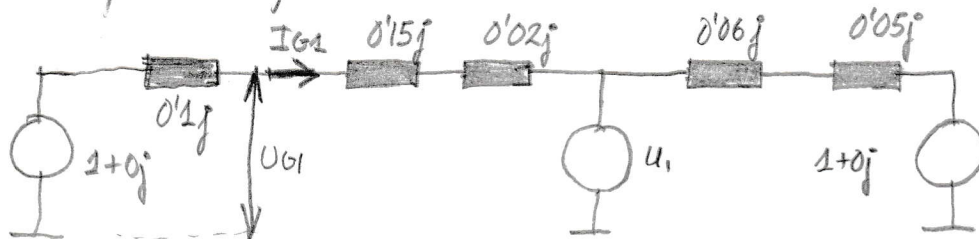
El esquema equivalente es:



Evidentemente en el punto  $U_{G0} = 0$

Circuito de secuencia directa:

El esquema equivalente es:



A partir de la figura tenemos 
$$I_{G1} = \frac{(1+0j) - (0.7448 + 0j)}{0 + 0.27j} = -0.945j \text{ pu}$$

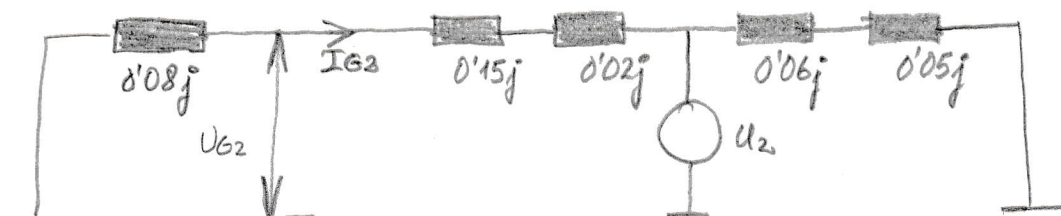
$$U_{G1} = (1+0j) - (0 - 0.945j) \cdot (0 + 0.1j) = 0.9055 - 0j \text{ pu}$$

pero ahora hay que introducir el desfase que provoca el transformador, que resulta ser de  $-150^\circ$ , por lo que resulta finalmente de:

$$U_{G1} = (0.9055 - 0j) - (-0.8660 - 0.5j) = -0.7841 - 0.4527j = 0.9055 \angle -150^\circ \text{ pu}$$

Circuito de secuencia inversa:

El esquema equivalente es:



A partir de la figura tenemos:

$$\underline{I}_{G2} = \frac{0'24926 + 0j}{0 + 0'25j} = 0 - 0'9968j \text{ pu}$$

$$\text{de donde } U_{G2} = -(0 + 0'08j)(0 - 0'9968) = -0'07975 + 0j \text{ pu}$$

pero ahora hay que introducir el desfase que provoca el transformador que resulta ser de  $-150^\circ$ , pero al ser un transformador inversa su signo es contrario al de la transformación directa, es decir de  $150^\circ$ , por lo que resulta finalmente:

$$U_{G2} = (0'07975 + 0j)(-0'8660 + 0'5j) = -0'0690 + 0'03987j = 0'0797 \angle 150^\circ \text{ pu}$$

Transformando estas tensiones en el dominio de fases tenemos:

$$\vec{U}_R = \vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \vec{U}_0 \quad \vec{U}_S = a^2 \vec{U}_1 + a \vec{U}_2 + \vec{U}_0 \quad \vec{U}_T = a \vec{U}_1 + a^2 \vec{U}_2 + \vec{U}_0$$

Por tanto resulta en definitiva:

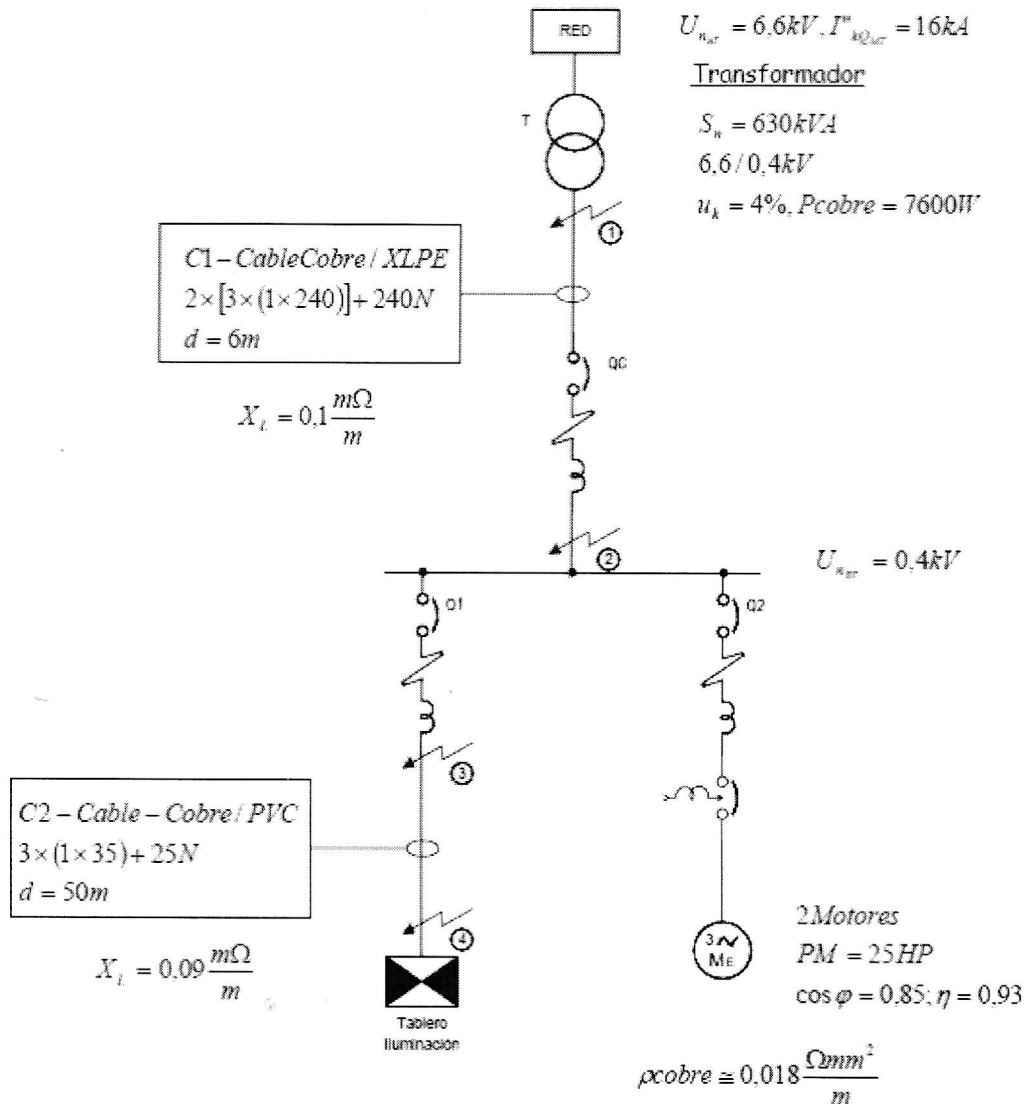
$$\vec{U}_{RG} = 0'9055 \angle -150^\circ + 0'0797 \angle 150^\circ + 0 = 0'9478 \angle -154'48^\circ \text{ pu} //$$

$$\vec{U}_{SG} = 1 \angle 120^\circ \cdot 0'9055 \angle -150^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 0'0797 \angle 150^\circ + 0 = 0'8258 \angle 90^\circ \text{ pu} //$$

$$\vec{U}_{TG} = 1 \angle 120^\circ \cdot 0'9055 \angle -150^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 0'0797 \angle 150^\circ + 0 = 0'9478 \angle -25'82^\circ \text{ pu} //$$

-Dada la red de la figura siguiente con los datos indicados. Calcular:

- 1º) El valor de la corriente para un corto tripolar en los puntos: 1, 2, 3 y 4.
- 2º) El valor de la corriente para un corto bipolar y fase-neutro en el punto 4.



NOTA: Se admite una reactancia inductiva de  $0,08 \text{ m}\Omega/\text{m}$  para las líneas de BT y la corriente de arranque de los motores cumple la relación  $I_a/I_N = 5$  y en los cuadros anteriores  $d$  es la longitud de la línea.

1) El cortocircuito tripolar:

En primer lugar determinamos los valores de las impedancias que intervinen en el sistema. Así tenemos:

ACOMETIDA:

$$I'_{kQ} = \frac{I' \cdot U_{Nq}}{\sqrt{3} \cdot Z_Q} \rightarrow Z_Q = \frac{I' \cdot U_{Nq}}{\sqrt{3} \cdot I'_{kQ}} = \frac{1'1 \cdot 6600}{\sqrt{3} \cdot 16000} = 0'2619 \Omega$$

Repetido este valor al nivel eléctrico donde se produce el cortocircuito su valor es de

$$Z'_Q = \frac{Z_Q}{M'^2} = \frac{0'2619}{\left(\frac{U_1}{U_{20}}\right)^2} \rightarrow \text{siendo la tensión de vacío } 420V \rightarrow \frac{0'2619}{\left(\frac{6600}{420}\right)^2} = 1'0608 m\Omega$$

$$X'_Q = 0'995 \cdot Z'_Q = 0'995 \cdot 1'0608 = 1'0555 m\Omega$$

$$R'_Q = 0'1 \cdot X'_Q = 0'1 \cdot 1'0555 = 0'1055 m\Omega$$

TRANSFORMADOR: La tensión nominal del transformador es de 400V pero tenemos la de vacío de 420V, de donde:

$$Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} = \frac{4\%}{100} \cdot \frac{420^2}{630000} = 0'0112 \Omega$$

$$\text{Por otro lado: } P_{cu2N} = 3 \cdot R_{c2} \cdot I_{2N}^2 \rightarrow \text{siendo } I_{2N} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{630000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 909'32 A$$

$$\text{Despejando } R_{c2} = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_{2N}^2} = \frac{7600}{3 \cdot 909'32^2} = 0'00306 \Omega \rightarrow 3'06 m\Omega$$

$$X_{c2} = \sqrt{Z_T^2 - R_{c2}^2} = \sqrt{0'0112^2 - 0'00306^2} = 0'0107 \Omega \rightarrow 10'7 m\Omega$$

$$\text{Otro método para resolverlo sería: } R_{c2} = \frac{U_{\Omega}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} \rightarrow U_{\Omega}\% = \frac{100 \cdot R_{c2} \cdot S_{NT}}{U_{20T}^2}$$

$$U_{\Omega}\% = \frac{100 \cdot 0'00306 \cdot 630000}{420^2} = 1'092857\% \quad U_x\% = \sqrt{U_{cc}\%^2 - U_{\Omega}\%^2} = \sqrt{4^2 - 1'092857^2}$$

$$U_x\% = 3'84781278\%$$

$$X_{c2} = \frac{U_x\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_{NT}} \rightarrow X_T = \frac{3'84781278\%}{100} \cdot \frac{420^2}{630000} = 0'0107738 \Omega$$

$X_{c2} = 10'7738 m\Omega \checkmark$  se comprueba que da lo mismo... más o menos

LINEA C1 Por tener dos cables en paralelo por fase:

$$R_{C1} = \frac{P_{cu} \cdot L}{n \cdot \text{circuito} \cdot S_F} = \frac{0'018 \cdot 6m}{2 \cdot 240} = 0'000225 \Omega = 0'225 m\Omega$$

$$X_{C1} = \frac{X \cdot L}{n \cdot \text{cortocircuitos}} = \frac{0'1 \cdot 0'006}{2} = 0'0003 \Omega = 0'3 m\Omega$$

LINEA C2:

$$R_{C2} = \frac{P_{cu} \cdot L}{S_F} = \frac{0'018 \cdot 50}{35} = 0'02571 \Omega = 25'71 m\Omega$$

$$X_{C2} = X \cdot L = 0'00009 \cdot 50 = 0'00450 \Omega \rightarrow 4'5 m\Omega$$

MOTORES

Hay que determinar la contribución de los motores a la corriente de cortocircuitos, tenemos:

$$I_{NMOT} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{25 \cdot 736}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0'85 \cdot 0'93} = 33'59 A$$

$$I_{Anage MOT} = 5 \cdot I_N \Rightarrow I_{AMOT} = 5 \cdot 33'59 = 167'98 A$$

$$Z_{MOT} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 167'68} = 1'3747 \Omega \quad \text{Por tanto la corriente que aporta cada motor es de:}$$

$$I''_{KMOT} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 1'3747} = 176'38 A$$

Puesto que tenemos los motores que aportan en su conjunto a un circuito tripolar una corriente de:

$$2 \cdot I''_{KMOT} = 2 \cdot 176'38 = 352'76 A$$

Estamos en disposición ya de calcular las corrientes de cortocircuito tripolar en los distintos puntos sin más que sumar las impedancias puestas en juego según el punto del cortocircuito

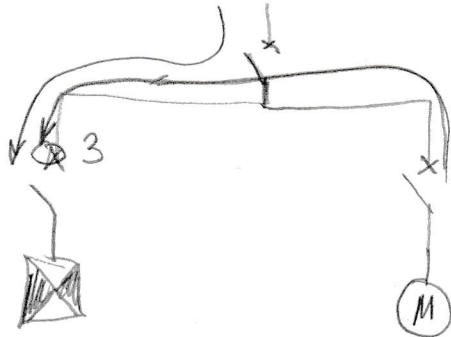
$$\underline{\underline{PUNTO 1:}} \quad I''_{K3 \text{ PUNTO 1}} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0'1055 + 1'055j + 3'06 + 10'7j)} = 19'918 kA.$$

$$\underline{\underline{PUNTO 2:}} \quad I''_{K3 \text{ PUNTO 2}} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0'1055 + 1'055j + 3'06 + 10'7j + 0'225 + 0'3j)} = 19'363 kA.$$

PUNTO 3:

En el punto 3 se deberán sumar los corrientes de cortocircuito que provienen de la acometida, que evidentemente es igual a  $I''_{k3 \text{ PUNTO 2}}$  mas la corriente que aportan los motores, es decir

$$I''_{k3 \text{ PUNTO 3}} = I''_{k3 \text{ PUNTO 2}} + 2 \cdot I''_{k \text{ MOT}} = 19'363 + 2 \cdot 176'38 \cdot 10^{-3} = 19'715 \text{ kA}$$



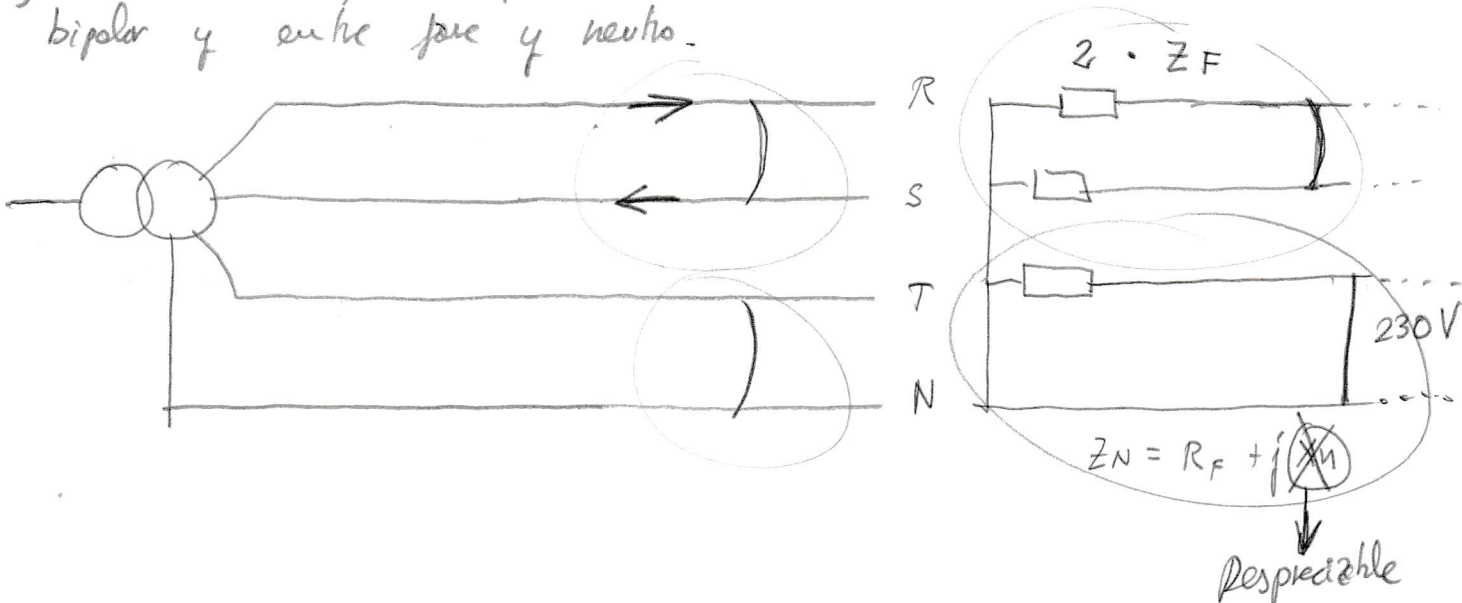
A partir de este resultado podemos concluir que la corriente aportada por los motores es despreciable frente a la aportada por la acometida, siempre como se cumple que:

$$\sum I_{FM} \leq 0'01 \cdot I'' \Rightarrow 2 \cdot 33'59 = 67'18 < 0'01 \cdot 19363 = 193'33 \text{ A}$$

En conclusión se desprecia la corriente aportada por los motores a partir de este punto

PUNTO 4:  $I''_{k3 \text{ PUNTO 4}} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0'1055 + 1'055 + 3'06 + 10'7j + 0'225 + 0'3j + 25'71 + 4'5j)} = 7'242 \text{ kA}$

2º) Se determinara para el punto 4 los valores de las corrientes de cortocircuito bipolar y entre fase y neutro.



Para el caso de cortocircuito bipolar en el punto 4 la expresión:

$$I''_{K2 \text{ PUNTO 4}} = \frac{C \cdot U_N}{2 \cdot Z_F} = \frac{1'05 \cdot 400}{2(0'1055 + 1'055j + 3'06 + 10'7j + 0'225 + 0'3j + 25'71 + 4'5j)} = 6'272 \text{ kA}$$

Para el cortocircuito fase-neutro la tensión que alimenta al mismo es la tensión simple o de fase, mientras que la impedancia que limita el cortocircuito es la impedancia de la fase puesta en cortocircuito y el neutro, considerando exclusivamente la resistencia del neutro, tenemos:

LINEA C1:

Para el conductor neutro su resistencia es de:

$$R_{NC1} = \frac{0'018 \cdot 6}{240} = 0'00045 \Omega \rightarrow 0'45 \text{ m}\Omega$$

$$R_{NC1} = \frac{P \cdot L}{S_{\text{neutro}}}$$

LINEA C2:

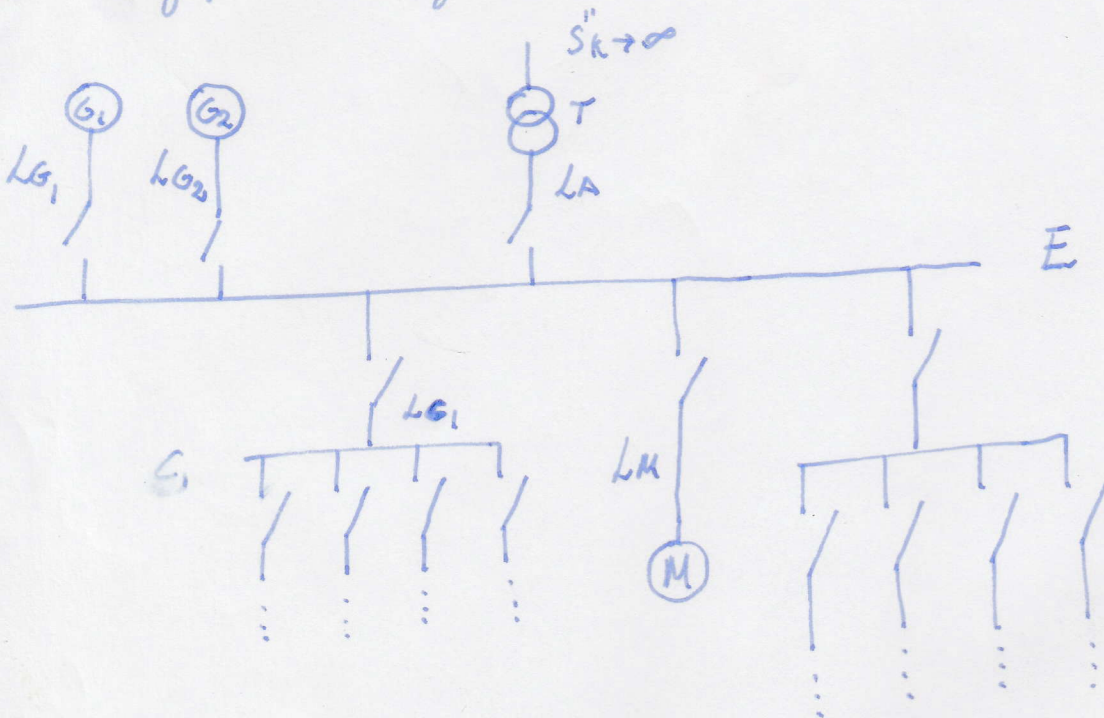
Para el conductor neutro su resistencia es de:

$$R_{NC1} = \frac{P \cdot L}{S_{\text{NEUTRO}}} = \frac{0'018 \cdot 50}{25} = 0'036 \Omega = 36 \text{ m}\Omega$$

$$I''_{KFN \text{ PUNTO 4}} = \frac{1'05 \cdot 230}{(0'1055 + 1'055j + 3'06 + 10'7j + 0'225 + 0'3 + 25'71 + 4'5j + 36'45) + 0'45} = 3'572 \text{ kA}$$

$|-14'17^\circ$

Dada la red de la figura siguiente, en la que se ha representado una instalación industrial con dos grupos de cogeneración:



10

Siendo los característicos de los distintos elementos

GENERADORES:

$P_N = 300 \text{ kW}$  ;  $U_N = 400 \text{ V}$  ;  $\cos \varphi = 0.9$  ;  $X_d'' \% = 11.11$  ;  $R_G \% = 1.67$

MOTOR:

$P_N = 400 \text{ kW}$  ;  $U_N = 400 \text{ V}$  ;  $\cos \varphi = 0.9$  ;  $\eta_{\%} = 0.95$  ;  $I_{tr}/I_N = 6$  ;  $p = 2$  polos polos

TRANSFORMADOR:

$S_N = 630 \text{ kVA}$  ;  $u' = \left(\frac{20}{0.42}\right) \text{ kV}$  ;  $V_a \% = 6\%$  ;  $V_r \% = 1\%$

LINEAS:

- LA  $\rightarrow 2(3 \times 1 \times 185) + 185 \text{ mm}^2$  (40m)
- LG  $\rightarrow 3 \times 1 \times 240 + 120 \text{ mm}^2$  (30m)
- LM  $\rightarrow 2 \times (3 \times 1 \times 185) + 185 \text{ mm}^2$  (20m)

cct. tripolar sin tierra

Las líneas eléctricas son de cobre con una resistividad de  $\rho = 0.018 \text{ } \Omega/\text{km}$  y se admita una reactancia inductiva de  $0.1 \text{ } \Omega/\text{km}$

Para un cortocircuito tripolar:

1°) La corriente de cortocircuito inicial simétrica subtransitoria si el cortocircuito se produce en el punto E.

2°) La corriente que opone a dicho cortocircuito: el transformador solo uno de los generadores y el motor

3°) El poder de corto máximo de los interruptores electromecánicos LCA y LCB si el tiempo de retardo es de  $25 \text{ ms}$

4°) La corriente de choque en el subbarido.

1) Primero identificamos la corriente de cortocircuito inicial simétrica subtransitoria en un cortocircuito tripolar donde no interviene el motor, produciéndose el cortocircuito en el subbarido del punto E, como la expresión  $(I_{K3}''') = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}}$  donde  $C = 1.05$  por ser un circuito de Baja tensión, y ser la corriente máxima de cortocircuito, por otro lado, solo nos quedará hallar la impedancia total de cortocircuito ( $Z_{cc}$ ), por ello es necesario a calcular las impedancias de los equipos receptores, generadores, transformadores y transportadores de la energía eléctrica de este circuito. cuando se produzca nuestro cortocircuito en el subbarido.

# NUUESTRO EQUIPO DE COGENERACIÓN:

## • Generador 1 =

Hallamos la Reactancia subtransitoria directa con la siguiente expresión

$$X_d'' = \frac{X_d\%}{100} \cdot \frac{UNG^2}{S_{NG}} \rightarrow \text{Desconociado la potencia aparente de nuestro generador}$$

calculamos a tal efecto  $S_{NG} = \frac{P_{NG}}{\cos\phi} = \frac{300000}{0.9} = \left(\frac{1000000}{3}\right)$  VA pordevos

$$X_d'' = \frac{11.11\%}{100} \cdot \frac{400^2}{\frac{1000000}{3}} = \left(\frac{3333}{62500}\right) \Omega$$

Como se conoce que  $R_G = 1.67\%$  se interpreta directamente

$$R_G'' = \frac{R_G\%}{100} \cdot \frac{UNG^2}{S_{NG}} = \frac{1.67\%}{100} \cdot \frac{400^2}{\frac{1000000}{3}} = \left(\frac{501}{62500}\right) \Omega$$

Por tanto simplificada ambas expresiones en función de la impedancia  $\vec{Z}_G$ ,

$$\vec{Z}_{G1} = \vec{Z}_{G2} = \frac{R_G\% + jX_G\%}{100} \cdot \frac{UNG^2}{S_{NG}} = \frac{1.67\% + j11.11\%}{100} \cdot \frac{400^2}{\frac{1000000}{3}} = \left(\frac{501 + 3333j}{62500}\right) \Omega$$

Y como ambos generadores aportan lo mismo,  $\vec{Z}_{G1} = \vec{Z}_{G2}$ , por tanto

$$\vec{Z}_{G1} = \left(\frac{501 + 3333j}{62500}\right) \Omega \quad \vec{Z}_{G2} = \left(\frac{501 + 3333j}{62500}\right) \Omega$$

• Transformador: la impedancia total del transformador es ( $\vec{Z}_T$ ) donde...

$$Z_T = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_{20T}^2}{S_N} \rightarrow \text{Siendo la tensión de cortocircuito } U_{cc}\% = 6\% \text{ y la tensión en vacío del secundario del transformador } U_{20} = 420V, \text{ por tanto procedemos el cálculo}$$

$$Z_T = \frac{6\%}{100} \cdot \frac{420^2}{630000} = \left(\frac{21}{1250}\right) \Omega \quad \text{siendo la resistencia del transformador ...}$$

$$X_T = \frac{U_{20}^2}{100 \cdot S_{NT}} \cdot \sqrt{U_{cc}\%^2 - U_{\Omega}\%^2} \rightarrow X_T = \frac{420^2}{100 \cdot 630000} \cdot \sqrt{6^2 - 1^2} = \left(\frac{7\sqrt{35}}{2500}\right) \Omega \quad \text{y su resistencia}$$

$$R_T = \sqrt{Z_T^2 - X_T^2} = \sqrt{\left(\frac{21}{1250}\right)^2 - \left(\frac{7\sqrt{35}}{2500}\right)^2} = \left(\frac{7}{2500}\right) \Omega \quad \text{por tanto } \vec{Z}_T = \left(\frac{7 + 7\sqrt{35}j}{2500}\right) \Omega$$

## MOTOR

Según nuestro libro en la página 56 del Tema 3 para máquinas asíncronas la impedancia del motor viene expresada de la siguiente manera

$$Z_M = \frac{U_{NM}}{\sqrt{3} \cdot I_{am}} \quad \text{donde para hallar } (I_{am}) \text{ (la corriente de arranque)}$$

Nos dicen en el enunciado que es 6 veces la corriente nominal, por tanto calculamos la corriente nominal sin olvidar el rendimiento.

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\phi \cdot \eta} = \frac{400000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.9 \cdot 0.95} = 675.2634727 \text{ A}$$

$$I_{am} = I_N \cdot 6 = 4051.580836 \text{ A} \rightarrow Z_M = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 4051.580836} = \frac{400}{400000} = \left(\frac{57}{2000}\right) \Omega$$

En misma página 56 también se encuentra que para máquinas asíncronas de par de polos de potencia menor a 1 MW nos dice que la reactancia del motor será  $X_M = 0.958 Z_M$  para motores de Baja Tensión.

Por tanto  $X_M = 0.958 \cdot \left(\frac{57}{2000}\right) = 0.054606 \Omega$

También dice que hay una proporción entre la resistencia y reactancia de 0.3  $\frac{R_M}{X_M} = 0.3$  por tanto  $R_M = 0.3 \cdot X_M \Rightarrow R_M = 0.3 \cdot 0.054606 =$

$$R_M = 0.0163818 \Omega$$

Quedado la impedancia del motor  $\vec{Z}_M = (0.0163818 + 0.054606j) \Omega$

Ahora solo faltan nuestras líneas ....

• CALCULO DE LAS LINEAS

• Línea LG = LG<sub>1</sub> = LG<sub>2</sub> (3x1x240) + 120mm<sup>2</sup> de 30 metros

$\rho = 0.018 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$   
 $X_{LK} = 0.1 \Omega/\text{km}$

$\text{LG}_1 \rightarrow R_{LG_1} = \rho \cdot \frac{L}{S} \rightarrow R_{LG_1} = 0.018 \cdot \frac{30\text{m}}{240} = \left(\frac{9}{4000}\right) \Omega$

$X_{LG_1} = X_{LK} \cdot L \rightarrow X_{LG_1} = 0.1 \cdot 0.03\text{km} = \left(\frac{3}{1000}\right) \Omega$

La impedancia total =  $\vec{Z}_{LG_1} = \left(\frac{9}{4000} + \frac{3}{1000}j\right) \Omega = \vec{Z}_{LG_2}$

Como las líneas de ambos generadores son iguales:

$\vec{Z}_{LG_2} = \left(\frac{9}{4000} + \frac{3}{1000}j\right) \Omega$

• Línea LA  $\rightarrow R_{LGA} = \frac{\rho \cdot L}{n^{\circ} \text{ circuitos}} = \frac{0.018 \cdot \frac{40\text{metros}}{185}}{2} = \left(\frac{9}{4625}\right) \Omega$

$X_{LGA} = \frac{X_{LK} \cdot L}{n^{\circ} \text{ circuitos}} = \frac{0.1 \cdot 0.04\text{km}}{2} = \left(\frac{1}{500}\right) \Omega$

$\vec{Z}_{LGA} = \left(\frac{9}{4625} + \frac{1}{500}j\right) \Omega$

• Línea LM  $R_{LM} = \frac{\rho \cdot L}{n^{\circ} \text{ circuitos}} = \frac{0.018 \cdot \frac{20\text{metros}}{185}}{2} = \left(\frac{9}{9250}\right) \Omega$

$X_{LM} = \frac{X_{LK} \cdot L}{n^{\circ} \text{ circuitos}} = \frac{0.1 \cdot 0.02\text{kilometros}}{2} = \left(\frac{1}{1000}\right) \Omega$

$\vec{Z}_{LM} = \left(\frac{9}{9250} + \frac{1}{1000}j\right) \Omega$

Resumen de circuitos:

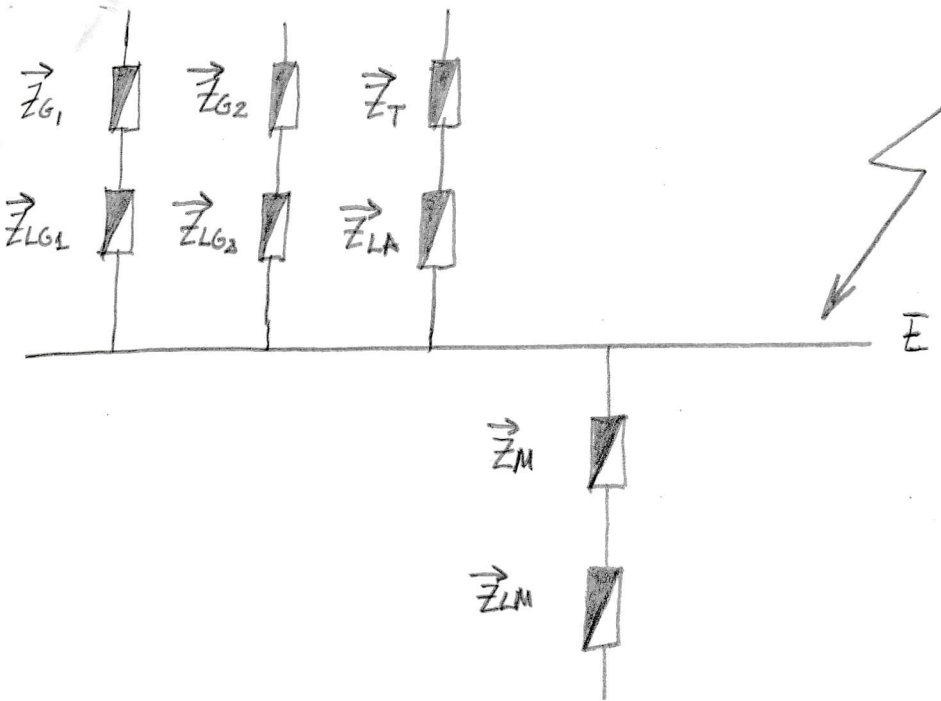
• Generador 1:  $\vec{Z}_{G1} = \left(\frac{501 + 3333j}{62500}\right) \Omega$  • Generador 2:  $\left(\frac{501 + 3333j}{62500}\right) \Omega = \vec{Z}_{G2}$

• Transformador:  $\vec{Z}_T = \left(\frac{7 + 7\sqrt{35}j}{2500}\right) \Omega$  • Motor:  $\vec{Z}_M = (0.0163818 + 0.054606j) \Omega$

• Línea LG<sub>1</sub>  $\vec{Z}_{LG_1} = \left(\frac{9}{4000} + \frac{3}{1000}j\right) \Omega$  • Línea LG<sub>2</sub>  $\vec{Z}_{LG_2} = \left(\frac{9}{4000} + \frac{3}{1000}j\right) \Omega$

• Línea LA  $\vec{Z}_{LA} = \left(\frac{9}{4625} + \frac{1}{500}j\right) \Omega$  • Línea LM  $\vec{Z}_{LM} = \left(\frac{9}{9250} + \frac{1}{1000}j\right) \Omega$

Por tanto el esquema es el siguiente



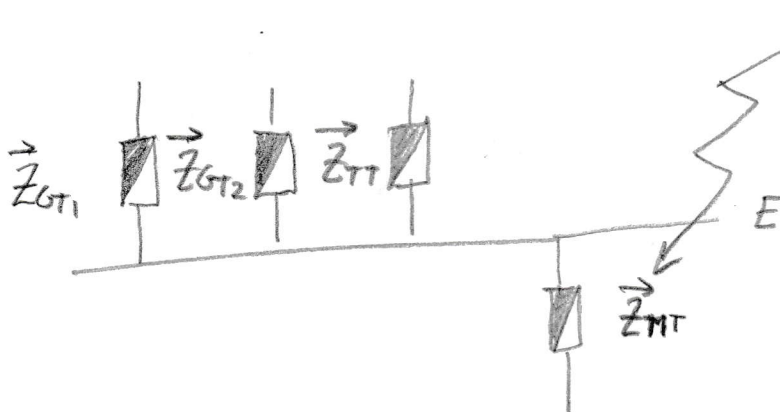
Se resuelve en serie  $\vec{Z}_{GT1} = \vec{Z}_{G1} + \vec{Z}_{LG1} = \left( \frac{501 + 3333j}{62500} + \frac{9}{4000} + \frac{3}{1000}j \right)$

$$\vec{Z}_{GT1} = (0'010266 + 0'056328j) \Omega // \quad \vec{Z}_{GT2} = (0'010266 + 0'056328j) \Omega //$$

$$\vec{Z}_{TT} = \vec{Z}_T + \vec{Z}_{LA} = \left( \frac{7 + 7\sqrt{35}j}{2500} + \frac{9}{4625} + \frac{1}{500}j \right) = \left( \frac{439}{92500} + 0'01856502339j \right) \Omega //$$

$$\vec{Z}_{MT} = \vec{Z}_M + \vec{Z}_{LM} = \left( 0'0163818 + 0'054606j + \frac{9}{9250} + \frac{1}{1000}j \right) = (0'01735477297 + 0'055606j) \Omega //$$

tenemos el siguiente esquema



Impedancias reducidas en paralelo sobre generadores

$$\vec{Z}_{GT} = \frac{\vec{Z}_{GT1} \cdot \vec{Z}_{GT2}}{\vec{Z}_{GT1} + \vec{Z}_{GT2}} = \frac{(R_{GT1} \cdot R_{GT2}) + (X_{GT1} \cdot X_{GT2})j}{(R_{GT1} + R_{GT2}) + (X_{GT1} + X_{GT2})j} = \frac{(0'010266 \cdot 0'010266) + (0'056328 \cdot 0'056328)j}{(0'010266 + 0'010266) + (0'056328 + 0'056328)j}$$

$$\vec{Z}_{GT} = (5'133 \cdot 10^{-3} + 0'028164j) \Omega$$

Ahora resolvemos el paralelo del generador y el transformador

$$\vec{Z}_{GT+} = \frac{\vec{Z}_G \cdot \vec{Z}_{T+}}{\vec{Z}_G + \vec{Z}_{T+}} = \frac{(R_G \cdot R_{T+}) + (X_G \cdot X_{T+})j}{(R_G + R_{T+}) + (X_G + X_{T+})j} = \frac{(5'133 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{439}{92500}) + (0'028164 \cdot 0'01856502339)j}{(5'133 \cdot 10^{-3} + \frac{439}{92500}) + (0'028164 + 0'01856502339)j}$$

$$\vec{Z}_{GT+} = (2'465945322 \cdot 10^{-3} + 0'01118930551j) \Omega$$

Ahora resolvemos el paralelo del (generador+transformador) con el motor.

$$\vec{Z}_{GT+M} = \frac{\vec{Z}_{GT+} \cdot \vec{Z}_{MT}}{\vec{Z}_{GT+} + \vec{Z}_{MT}} = \frac{(R_{GT+} \cdot R_{MT}) + (X_{GT+} \cdot X_{MT})j}{(R_{GT+} + R_{MT}) + (X_{GT+} + X_{MT})j} = \frac{(2'465945322 \cdot 10^{-3}) \cdot (0'01735477297) + (0'01118930551 \cdot 0'055606)j}{(2'465945322 \cdot 10^{-3} + 0'01735477297) + (0'01118930551 + 0'055606)j}$$

$$\vec{Z}_{GT+M} = (2'159150874 \cdot 10^{-3} + 9'314913937 \cdot 10^{-3}j) \Omega = \vec{Z}_{cc} \quad \text{por tanto la amplitud}$$

de cortocircuito inicial simétrica subtransitorio será  $I K_3'' = \frac{C \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \vec{Z}_{cc}}$

Expresado en formato módulo-argumento  $\vec{Z}_{cc} = 9'56188026229 \cdot 10^{-3} \angle 76'9495928236^\circ \Omega$

$$I K_3'' = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 9'56188026229 \cdot 10^{-3}} = 25359'7730162 \angle -76'9495928236^\circ \text{ A}$$

B

$$2) I_{K''}^{\text{MOTOR}} = \frac{C \cdot U_{NM}}{\sqrt{3} \cdot \vec{Z}_{MT}} \Rightarrow \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 5'82513122671 \cdot 10^{-2}} = \frac{12654'5507464}{72'6667252593^\circ}$$

Se da la impedancia del motor mas la linea  $\vec{Z}_m = (0'01735477297 + j0'055606) \Omega$

$$\vec{Z}_{m\varphi} = 5'82513122671 \cdot 10^{-2} \angle 72'6667252593^\circ \Omega$$

$$I_{K''}^{\text{MOTOR}} = 1162'77511394 \angle -72'6667252593^\circ \quad A \quad B$$

$$I_{K''}^{\text{TRANSFORMADOR}} = \frac{1'05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0'019162048335} = \frac{12654'5507464}{75'6600711599^\circ} \quad A \quad B$$

$$\vec{Z}_{TT\varphi} = 0'019162048335 \angle 75'6600711599^\circ \Omega \quad B$$

Impedancia

$$I_{K''}^{\text{GENERADOR}} = \frac{1'05 \cdot 400}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 2'86279336488 \cdot 10^{-2}} = \frac{4235'14871933}{79'6709871621^\circ} \quad A$$

$$Z_{0\varphi} = 2'86279336488 \cdot 10^{-2} \angle 79'6709871621^\circ \Omega$$

3) Para no sobredimensionar los fusibles o magnetotermicas, se emplean los factores reductores de corriente para el generador y motor.

Para el generador  $I_2 = \mu \cdot I_{K30}''$ . Número generador

( $\mu$ ) se observa en la grafica de la página 46 como máquina síncrona su corriente solo depende del factor ( $\mu$ ) que es función

de la proporción  $\frac{IK_3''}{ING}$  donde.  $\mu f\left(\frac{IK_3''}{ING}\right)$  en la gráfica.

Por tanto:  $\frac{4235'1487}{481'125224} = 8'80259 \rightarrow \mu = 0'57$

La intensidad nominal del generador =  $ING = \frac{300000}{400 \cdot 0'9 \cdot \sqrt{3}} = 481'125224 A$

$I_{GEN} = 0'57 \cdot 4235'1487 \cdot 2 = 4828'069518 A$

Por otro lado el motor es una máquina asíncrona, donde interviene ( $g$ ), que se obtiene en la gráfica correspondiente de la página 42 figura 3.39, donde es función de la potencia y del tiempo de retardo mínimo, no obstante, comenzamos con el factor ( $\mu$ ) anteriormente explicado.

$\frac{IK_3''}{INM} = \frac{4162'775113}{675'263472} = 6'164668 \rightarrow \mu = 0'67$

Por otro lado ( $g$ ) es función de  $\frac{MW}{n^\circ \text{ par de polos}} = \frac{0'4 MW}{2} = 0'2$

siendo correspondido en la línea  $t \geq 0'25s$  a  $0'14$ .

$g = 0'14$

Por máquina asíncrona:  $I_a = \mu \cdot g \cdot IK_3'' = 0'67 \cdot 0'14 \cdot 4162'775113 = 390'468305 A$

El transformador aporta toda su corriente de cortocircuito, por tanto

$I_a = IK_{3TRAFO} + 2I_{Ia0} + I_a = 12654'55074 + 4828'069 + 390'4683$

Horizado la suma  $I_a = 17873'08804 A$

Siendo el magnetotérmico normalizado

**B**

( 20 ) KA

3) La corriente de choque ( $I_s$ ) es la que define los esfuerzos electrodinámicos, siendo el valor máximo instantáneo fijado en virtud del amortiguamiento temporal de la componente asimétrica, y también la componente simétrica en el caso de cortocircuitos próximos al generador.

$I_s = \chi \sqrt{2} \cdot I_k''$  donde ( $I_k''$ ) es la corriente inicial calculada en el primer apartado y ( $\chi$ ) es función de la proporción entre la resistencia y reactancia respectivamente, calculadas anteriormente en el apartado 1)  $\vec{Z}_{cc} = (2'159150874 \cdot 10^{-3} + 9'314913937 \cdot 10^{-3} j) \Omega$

$$\frac{R_{cc}}{X_{cc}} = \frac{2'159150874 \cdot 10^{-3}}{9'314913937 \cdot 10^{-3}} = 0'231795 \rightarrow \chi = 1'5$$

La corriente de choque

$$I_s = 1'5 \cdot \sqrt{2} \cdot 25359'7730162 = 53796'20240$$

$$\underline{-76'9495928236^\circ}$$

$$\underline{-76'9495928236^\circ}$$

**B**

A

## CAPÍTULO III. PROBLEMAS RESUELTOS DE CÁLCULO DE FALLOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

### PROBLEMA 3.1

Dimensionar los interruptores de protección del circuito de la figura, una subestación de distribución interconectada a una central generadora. La potencia prevista que se distribuirá a través del embarrado "B", coincide con la potencia nominal del transformador. Las líneas de salida del embarrado llevan cada una su correspondiente protección. (Para realizar los cálculos suponer cortocircuitos trifásicos).

#### DATOS

Generador.....14MVA.....20kV..... $X_1''=0.16$ ..... $X_2=0.18$ ..... $X_0=0.05$

Transformador....25MVA...120/20kV..... $\epsilon_{cc}=0.07$ .....DynII.....n=6

Líneas :

Línea L<sub>1</sub>..... $X_{L1}=8.5 \Omega$  ..... $R_{L1}=2.5 \Omega$

Línea L<sub>2</sub>..... $X_{L2}=0.11 \Omega$  ..... $R_{L2}=0.09 \Omega$

Línea L<sub>3</sub>..... $X_{L3}=0.57 \Omega$  ..... $R_{L3}=0.5 \Omega$

- **Intensidades nominales para interruptores de protección estándar**

100A, 125A, 160A, 200A, 250A, 315A, 400A,  
630A, 800A, 1250A, 1600A, 2000A, 2600A.

- **Poderes de corte y de cierre para interruptores de protección estándar**

3.15kA, 10kA, 16kA, 20kA, 31.5kA, 40kA, 50kA, 63kA, 100kA

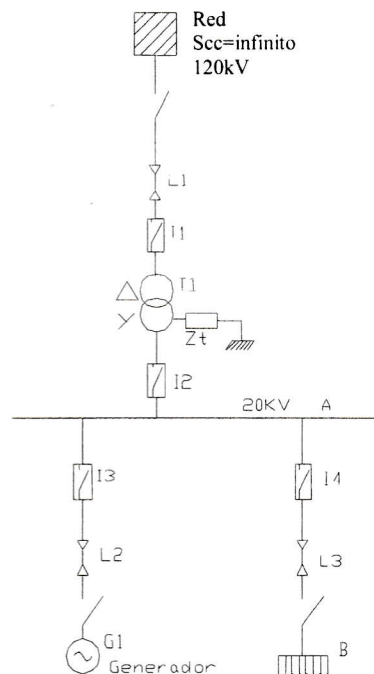


Figura 3.1 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.1

#### HALLAR:

Delante de una falta trifásica en diversos puntos del circuito, se pide para cada interruptor:

- 1 Intensidad nominal de los interruptores. Dar un valor normalizado.
- 2 Protección térmica contra sobrecargas, es decir, ajuste de las curvas a tiempo inverso. Intensidades de arranque ( $I_r$ ). Considérese un margen de seguridad de un 10%. Coeficientes de arranque.
- 3 Protección magnética contra cortocircuitos, es decir, ajuste de las curvas a tiempo independiente o instantáneo. Para ello suponer cortocircuitos en los embarrados "A" y "B".
- 4 Indicar el poder de cierre y el poder de corte para cada interruptor, así como las intensidades de cierre y de corte. Para ello suponer cortocircuitos trifásicos en bornes de cada interruptor.

## RESOLUCIÓN

### 1. y 2. Hallamos los relés térmicos (protección contra las sobrecargas)

- **Para dimensionar los relés térmicos es necesario seguir unas pautas de cálculo:**
- Primeramente se calculará la intensidad de carga (la intensidad de funcionamiento) del interruptor.
- Seguidamente se calcula la intensidad de arranque de cada interruptor (normalmente será entre un 10% o un 15% más elevada que la intensidad de carga).
- Una vez hallada esta intensidad de arranque, se buscará en catálogos de casas comerciales, interruptores con intensidades mayores que las de arranque calculadas (normalmente, entre un 20% y un 100% mayores que éstas). Al buscar los posibles relés, se tendrá también en cuenta el tipo de curva más adecuada para la zona a proteger por los interruptores, así como los retardos adicionales.
- Con los relés elegidos, ya se podrán buscar los coeficientes de arranque correspondientes, simplemente para ello, se dividirá, el valor de la intensidad de arranque por la intensidad nominal del relé (será el ajuste que deberemos efectuar, para adaptar las intensidades nominales que las casas comerciales ofrecen, a los valores que nosotros necesitamos y que hemos obtenido por cálculo).

Procedemos a buscar estos parámetros:

- **Intensidad de carga para cada uno de los relés térmicos:**  $I_c = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$
- $$I_{c1} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 120 \cdot 10^3} = 120.3 A$$
- $$I_{c2} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 721.7 A$$
- $$I_{c3} = \frac{14 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 404.1 A$$
- $$I_{c4} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 721.7 A$$

Recordar que el transformador no modifica las potencias ni la frecuencia.

- **La intensidad de arranque de cada interruptor** (aumentamos un 10% las intensidades de carga de los interruptores para evitar disparos no deseados con el normal funcionamiento del sistema):

$$I_{1arrq} = 120.3 \cdot 1.1 = 132.3 A$$

$$I_{2arrq} = 794 A$$

$$I_{3arrq} = 444.5 A$$

$$I_{4arrq} = 794 A$$

- **Las intensidades nominales de los interruptores:** deben ser mayores que las intensidades de arranque: ( $I_n > I_{arrq}$ ) hallándose éstas por catálogo (consultar la sección datos para obtener una relación de las intensidades nominales de los interruptores más usuales):

$$I_{n1} = 400 A$$

$$I_{n2} = I_{n4} = 1250 A$$

$$I_{n3} = 800 A$$

- **Los coeficientes de arranque son:**  $C_{arrq} = \frac{I_{arrq}}{I_n}$

$$C_{1arrq} = \frac{132.3}{400} = 0.33$$

$$C_{2arrq} = C_{4arrq} = \frac{794}{1250} = 0.635$$

$$C_{3arrq} = \frac{444.5}{800} = 0.556$$

### 3. y 4. Hallamos los relés magnéticos (protección contra cortocircuitos)

Primeramente hallaremos todas las impedancias que afectan al circuito, teniendo presente el nivel de tensión al que las calculamos, ya que cuando realizaremos cálculos generales será imprescindible pasar todas las impedancias a un mismo nivel de tensión, el nivel que deseemos, pero siempre igual para todas (los cambios de tensión, debe recordarse que se producen siempre en los transformadores).

- **Impedancias del circuito:** con una tilde ( ' ) señalizaremos las impedancias al nivel bajo de tensión.

- **Acometida (a 120kV)**

$$Z_Q = 1.1 \cdot \frac{U^2_Q}{S_Q} = 1.1 \cdot \frac{120^2}{\infty} = 0 \Omega$$

- **Transformador (a 120kV)**

$$Z_T = \epsilon_{cc} \cdot \frac{U^2_T}{S_T} = 0.07 \cdot \frac{120000^2}{25 \cdot 10^6} = 40.32 \Omega$$

$$R_T = \epsilon_{CCR} \cdot \frac{U^2_T}{S_T} = 0.005 \cdot \frac{120000^2}{25 \cdot 10^6} = 2.88 \Omega \quad (\text{El valor de 0.005 se ha obtenido en tablas})$$

$$\bar{X}_T = \sqrt{Z_T - R_T} = j40.21 \Omega$$

$$\bar{Z}_T = (R + jX) = (2.88 + j40.21) = 40.31 \angle 85.9^\circ \Omega$$

- **Generador (a 20kV)**

$$X_{1g} = X'' \cdot \frac{U^2_g}{S_g} = 0.16 \cdot \frac{20000^2}{14 \cdot 10^6} = j4.57 \Omega$$

$$R_{1g} = 0.07 \cdot X_{1g} = 0.32 \Omega$$

$$X_{2g} = X'' \cdot \frac{U^2_g}{S_g} = 0.18 \cdot \frac{20000^2}{14 \cdot 10^6} = j5.14 \Omega \quad \bar{Z}_g' = (R + jX) = (0.32 + j4.57) = 4.58 \angle 86^\circ \Omega$$

- **Líneas (línea 1ª a 120kV, líneas 2ª y 3ª a 20kV)**

$$\bar{Z}_{L1} = (2.5 + j8.5) = 8.86 \angle 73.6^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{L2} = (0.09 + j0.11) = 0.14 \angle 50.71^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{L3} = (0.5 + j0.57) = 0.76 \angle 48.74^\circ \Omega$$

- **Relación de transformación**

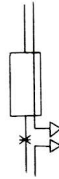
$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{120}{20} = 6$$

- **Intensidad de cortocircuito que afectan a cada interruptor (cortocircuitos trifásicos)**

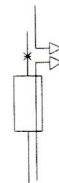
Los interruptores automáticos sirven para proteger un circuito contra las sobrecargas y los cortocircuitos. Pero primeramente resulta imprescindible protegerlos a ellos mismos, es por ello que se determina que poder de corte y que poder de cierre les corresponde delante de los cortocircuitos más desfavorables que pueden darse (cuando se produce un cortocircuito muy cercano a ellos, ya que en estas circunstancias la impedancia es muy pequeña, siendo la intensidad la mayor posible).

- Según la norma VDE 0102, resulta muy improbable un cortocircuito en el interior del propio interruptor, por lo que para calcular la situación más desfavorable se supone cortocircuitos justo en los bornes del relé (en el exterior).
- Si el cortocircuito se produce en el exterior del relé, como mínimo pueden darse dos casos: que el cortocircuito se produzca en la parte superior del relé, o por el contrario, que el cortocircuito se produzca en la parte inferior del relé.

- Tanto si se produce el cortocircuito por la parte superior, como por la parte inferior del relé, y recordando que cuando se produce un cortocircuito todas las intensidades van a parar al punto de cortocircuito (punto del circuito con la mínima impedancia), por el interior del relé nunca pasará el valor total de la intensidad de cortocircuito (para que pasara el valor total de la intensidad de cortocircuito, sería necesario que el cortocircuito se produjera en el interior del relé, caso altamente improbable), sino una de las dos aportaciones, la superior o la inferior, dependiendo del lugar donde se halla producido el cortocircuito.
- Se desglosa, por tanto, el cálculo de la intensidad de cortocircuito, por las aportaciones de corriente que llegan por su parte superior (Up) o por las aportaciones de corriente que lo hacen por su parte inferior (Down). Existiendo, pues, dos posibles aportaciones de las corrientes de cortocircuito:
  1. Que el cortocircuito se produzca “aguas abajo” del interruptor: en tal caso, sólo se tendrá en cuenta la aportación de corriente de cortocircuito correspondiente al tramo superior, ya que ésta será la única que pasará a través del interruptor (que es la que nos interesa, denominándose UP).



2. Que el cortocircuito se produzca “aguas arriba” del interruptor: en tal caso, sólo se tendrá en cuenta la aportación de corriente de cortocircuito correspondiente al tramo inferior, ya que ésta será la única que pasará a través del interruptor (que es la que nos interesa, denominándose DOWN).



Teniendo presente lo expuesto en los puntos precedentes, calcularemos para cada interruptor los valores de las intensidades de cortocircuito correspondientes tanto a las aportaciones que se producen por la parte superior como a las aportaciones de corriente que se producen por la parte inferior.

- **Interruptor 1° (a 120kV)**

$$\bar{I}_{k3U}^* = 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = 1,1 \cdot \frac{120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 8,86 \angle 73,6^\circ} = 8601,6 \angle -73,6^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{KU} = \bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} = (2,5 + j8,5) = 8,86 \angle 73,6^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_{k3D}^* = 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = 1,1 \cdot \frac{120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 209,4 \angle 85,2^\circ} = 365 \angle -85,2^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{KD} = \bar{Z}_T + (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_G) \cdot m^2 = (17,64 + j208,7) = 209,4 \angle 85,2^\circ \Omega$$

- **Interruptor 2° (a 20kV)**

$$\bar{I}_{k3U}^* = 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = 1,1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1,361 \angle 83,7^\circ} = 9332,6 \angle -83,7^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{KU} = \bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T = (0,149 + j1,353) = 1,361 \angle 83,7^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_{k3D}^* = 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = 1,1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 4,7 \angle 85^\circ} = 2702,5 \angle -85^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{KD} = (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_G) = (0,41 + j4,68) = 4,7 \angle 85^\circ \Omega$$

- **Interruptor 3° (a 20kV)**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3U}^* &= 1.1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_K} = 1.1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.361 \angle 83.7^\circ} = 9332.6 \angle -83.7^\circ \text{ A} \\ \bar{Z}_{KU} &= \bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T = (0.149 + j1.353) = 1.361 \angle 83.7^\circ \Omega \\ \bar{I}_{k3D}^* &= 1.1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_K} = 1.1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 4.7 \angle 85^\circ} = 2702.5 \angle -85^\circ \text{ A} \\ \bar{Z}_{KD} &= (\bar{Z}'_{L2} + \bar{Z}'_G)' = (0.41 + j4.68) = 4.7 \angle 85^\circ \Omega\end{aligned}$$

- **Interruptor 4° (A 20kV)**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3U}^* &= 1.1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_K} = 1.1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.055 \angle 84^\circ} = 12039.5 \angle -84^\circ \text{ A} \\ \bar{Z}_{KU} &= (\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T) // (\bar{Z}'_{L2} + \bar{Z}'_G)' = (0.1104 + j1.05) = 1.056 \angle 84^\circ \Omega \\ \bar{I}_{k3D}^* &= 0 \text{ A} \text{ Porque los sumideros son consumidores de intensidad (no existe aportación por la parte inferior)}\end{aligned}$$

• **Poder de cierre de los interruptores**

**Nota:** Para una correcta comprensión de la corriente máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ ) y de la corriente de corte ( $I_a$ ), nos remitimos al problema 3.3 de este mismo capítulo y a los anexos, donde de forma detallada se exponen los conceptos, gráficas, cálculos, y otros aspectos concernientes a estas intensidades.

Para hallar el poder de cierre es necesario obtener la máxima corriente asimétrica de cortocircuito. Ésta se halla con los valores de las corrientes de cortocircuitos iniciales más desfavorables (los cortocircuitos producidos en las inmediaciones de los interruptores), multiplicados por el factor ( $\chi$ ), el cual se obtiene gráficamente mediante la relación ( $R/X$ ) para cada una de las impedancias de cortocircuito (gráfica 12.1 de los anexos).

- **Interruptor 1°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{sU} &= \sqrt{2} \cdot \chi_{1U} \cdot \bar{I}_{k3}^* = 17030.3 \angle -73.6^\circ \text{ A} \rightarrow \chi_{1U} = 1.4 \\ \bar{I}_{sD} &= \sqrt{2} \cdot \chi_{1D} \cdot \bar{I}_{k3}^* = 929.1 \angle -85.2^\circ \text{ A} \rightarrow \chi_{1D} = 1.8 \\ \text{Con: } \frac{R}{X_L} &= \frac{2.5}{8.5} = 0.294 \text{ entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{1U} = 1.4 \\ \text{Con: } \frac{R}{X_L} &= \frac{17.64}{208.7} = 0.084 \text{ entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{1D} = 1.8\end{aligned}$$

- **Interruptor 2°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{sU} &= \sqrt{2} \cdot \chi_{2U} \cdot \bar{I}_{k3}^* = 22701 \angle -83.7^\circ \text{ A} \rightarrow \chi_{2U} = 1.72 \\ \bar{I}_{sD} &= \sqrt{2} \cdot \chi_{2D} \cdot \bar{I}_{k3}^* = 6803.0 \angle -85^\circ \text{ A} \rightarrow \chi_{2D} = 1.78 \\ \text{Con: } \frac{R}{X_L} &= \frac{0.149}{1.353} = 0.1101 \text{ entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{2U} = 1.72 \\ \text{Con: } \frac{R}{X_L} &= \frac{0.410}{4.68} = 0.087 \text{ entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{2D} = 1.78\end{aligned}$$

### - Interruptor 3°

Este interruptor coincide con el anterior, ya que si se desprecian las impedancias propias de los interruptores, y las impedancias de las barras de conexión, el cortocircuito producido en bornes del interruptor  $I_3$  es a todos los efectos el mismo que en bornes del interruptor  $I_2$ .

$$\bar{I}_{sU} = \sqrt{2} \cdot \chi_{3U} \cdot \bar{I}_{k3}^* = 22701 \angle -83.7^\circ A \rightarrow \chi_{3U} = 1.72$$

$$\bar{I}_{sD} = \sqrt{2} \cdot \chi_{3D} \cdot \bar{I}_{k3}^* = 6803 \angle -85^\circ A \rightarrow \chi_{3D} = 1.78$$

### - Interruptor 4°

$$\bar{I}_{sU} = \sqrt{2} \cdot \chi_{4U} \cdot \bar{I}_{k3}^* = 28944.9 \angle -84^\circ A \rightarrow \chi_{4U} = 1.7$$

$$\bar{I}_{sD} = \sqrt{2} \cdot \chi_{4D} \cdot \bar{I}_{k3}^* = 0 A \quad (\text{no existe aportación inferior ya que en barras "B" hay consumidores}).$$

$$\text{Con: } \frac{R}{X_L} = \frac{0.1105}{1.050} = 0.1050 \quad \text{entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{4U} = 1.70$$

Vistos estos valores, el poder de cierre para todos los interruptores será aproximadamente el doble del valor de la intensidad más alta, en éste caso, de 50kVA.

### • Poder de corte de los interruptores

Para determinar el poder de corte, debemos primeramente conocer la intensidad de cortocircuito inicial que fluirá desde cada generador, motor síncrono, red o motor asíncrono hacia el punto de cortocircuito. Una vez hallada esta intensidad inicial de cortocircuito, se aplicarán los coeficientes correctores " $\mu$ " y " $q$ " dados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente de los anexos.

Como no hay motores asíncronos en el sistema de potencia, el valor del coeficiente " $q$ " será siempre la unidad ( $q=1$ ) (gráfica 12.3), ya que este coeficiente, como se indica en la citada gráfica, sólo se ve afectado cuando el circuito dispone de motores asíncronos.

El factor " $\mu$ " lo encontramos gráficamente mediante la relación  $I_{k3}^*/I_n$  (gráfica 12.2). Para ello previamente se hallan las intensidades nominales de cada fuente de energía y las aportaciones que las mismas fuentes entregan a las líneas que parten de ellas, obteniéndose así el cociente anterior.

El valor de la intensidad nominal del único generador existente en el circuito es:

$$I_{ng} = \frac{Sn}{Un \cdot \sqrt{3}} = \frac{14 \cdot 10^6}{20 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 404.1 A (t_v = 0.1 \text{ seg})$$

Como no hay motores asíncronos en el sistema de potencia, el valor del coeficiente " $q$ " será siempre la unidad ( $q=1$ ). (gráfica 12.3), ya que este coeficiente, como se indica en la citada gráfica, sólo se ve afectado cuando en el circuito existen motores asíncronos.

El factor " $\mu$ " lo encontramos gráficamente mediante la relación  $I_{k3}^*/I_n$  (gráfica 12.2). Para ello previamente se hallan las intensidades nominales de cada fuente de energía y las aportaciones que las mismas fuentes entregan a las líneas que parten de ellas cuando se produce un cortocircuito, obteniéndose el cociente anterior:

### • Interruptor 1°

$$\bar{I}_{aU} = \bar{I}_{k3U}^* \cdot \mu_U \cdot q_U = 8601.6 \angle -73.6^\circ A \rightarrow \mu_U = 1$$

$$\bar{I}_{aD} = \bar{I}_{k3D}^* \cdot \mu_D \cdot q_D = 273.7 \angle -85.2^\circ A \rightarrow \mu_D = 0.75$$

$$\frac{I_{k3D}^*}{I_{ng}} = \frac{365.6}{404.1} = 5.46 \quad \text{y con la tabla 12.2, obtenemos: } \mu_D = 0.75$$

Para la corriente superior,  $\mu_U = 1$ , ya que no hay motores asíncronos ni máquinas síncronas. En cambio, para la corriente inferior, debe tenerse presente la presencia del generador. Nótese que para realizar el cociente es necesario multiplicar por la relación de transformación la corriente de cortocircuito hallada en los bornes del interruptor  $I_1$ , para adaptarla así al nivel de tensión del generador. También debe recordarse que no existirá aportación de corriente de cortocircuito a través del embarrado "B", ya que según nos indican, sólo son consumidores de energía, no productores; así toda la corriente de cortocircuito será proporcionada por el generador.

• **Interruptor 2°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{aU} &= \bar{I}_{k3U}^* \cdot \mu_U \cdot q_U = 9332.6 \angle -83.7^\circ A \rightarrow \mu_U = 1 \\ \bar{I}_{aD} &= \bar{I}_{k3D}^* \cdot \mu_D \cdot q_D = 1945.8 \angle -85^\circ A \rightarrow \mu_D = 0.72 \\ \frac{I_{K3D}''}{I_{ng}} &= \frac{2702.5}{404.1} = 6.69 \text{ y con la tabla 12.2, obtenemos: } \mu_D = 0.72\end{aligned}$$

Para la corriente superior,  $\mu_U = 1$ , ya que no hay motores asíncronos ni máquinas síncronas. En cambio, para la corriente inferior, debe tenerse presente la presencia del generador. Nótese que en esta ocasión, no es necesario aplicar ningún cambio de relación de transformación, ya que tanto la intensidad de cortocircuito como la intensidad nominal del generador están al mismo nivel de tensión (20kV). También debe recordarse que no existirá aportación de corriente de cortocircuito a través del embarrado "B", ya que según nos indican, sólo son consumidores de energía, no productores; así toda la corriente de cortocircuito será proporcionada por el generador.

• **Interruptor 3°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{aU} &= \bar{I}_{k3U}^* \cdot \mu_U \cdot q_U = 9332.6 \angle -83.7^\circ A \rightarrow \mu_U = 1 \\ \bar{I}_{aD} &= \bar{I}_{k3D}^* \cdot \mu_D \cdot q_D = 1945.8 \angle -85^\circ A \rightarrow \mu_D = 0.72\end{aligned}$$

Los valores hallados para este interruptor coinciden con los del interruptor  $I_2$  (ya que entre ellos sólo se encuentran los propios interruptores y las barras de interconexión) y hemos supuesto que estos elementos carecen de impedancia.

• **Interruptor 4°**

$$\bar{I}_{aU} = \bar{I}_{k3red}^* \cdot \mu_1 \cdot q + \bar{I}_{k3generador}^* \cdot \mu_2 \cdot q = 9339.6 \angle -83.7^\circ \cdot 1 \cdot 1 + 2697 \angle -85^\circ \cdot 1 \cdot 0.72 = 11281 \angle -83.9^\circ A$$

Primeramente, y ha efectos de hallar la aportación de corriente de cortocircuito que tanto la red como el generador proporcionan al punto de cortocircuito, debemos hallar que parte de la intensidad de cortocircuito que proviene del generador y la que parte que proviene de la red, mediante un divisor de intensidad.

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3red}^* &= \bar{I}_{k3}^* \cdot \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{L2})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}'_{L2} + \bar{Z}'_{g1})} = 12039.5 \angle -84^\circ \frac{4.7 \angle 85^\circ}{6.06 \angle 84.7^\circ} = 9342.5 \angle -83.71^\circ A \\ \bar{I}_{k3generador}^* &= \bar{I}_{k3}^* \cdot \frac{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_T + \bar{Z}'_{L1})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}'_{L2} + \bar{Z}'_{g1})} = 12039.5 \angle -84^\circ \frac{1.361 \angle 83.7^\circ}{6.06 \angle 84.7^\circ} = 2697 \angle -85^\circ A\end{aligned}$$

Entonces, para la corriente superior tenemos al no existir máquinas giratorias:  $\mu_{red} = 1$

La aportación de corriente por la parte inferior vendrá determinada por el generador síncrono:

$$\frac{I_{K3}''}{I_{ng}} = \frac{2697}{404.1} = 6.67 \text{ y con la tabla 12.2, obtenemos: } \mu_{generador} = 0.72$$

La corriente de cortocircuito inferior será nula, ya que sólo existen consumidores a través de las barras "B".

$$\bar{I}_{aD} = \bar{I}_{k3}^r \cdot \mu \cdot q = 0 \text{ A (ya que no existe aportación de corriente por la parte inferior)}$$

Al igual que el poder de cierre, el poder de corte debe ser aproximadamente el doble del valor máximo encontrado, en este caso será suficiente con unos 20KA.

#### • PROTECCIÓN MAGNÉTICA

Una vez protegidos los propios interruptores (poder de cierre y poder de corte), debemos proteger mediante estos interruptores al resto del circuito. Para ello se sigue un procedimiento radicalmente opuesto al anterior; si para la protección de los interruptores buscábamos las intensidades de cortocircuitos máximas, y por tanto los cortocircuitos se debían dar lo más cerca posible de los interruptores, ahora para la protección del circuito deben buscarse las intensidades mínimas que pueden provocar un cortocircuito y que asimismo éstas sean detectadas por los interruptores. Para ello en esta ocasión lo que se intenta provocar es cortocircuitos en las partes más alejadas de los interruptores (en las barras de interconexión, normalmente); de esta forma se obtienen las corrientes más débiles (cortocircuitos alejados y por tanto con impedancias más grandes) y estas corrientes deberán ser detectadas por los interruptores. Sólo de esta forma todo el circuito estará protegido contra cortocircuitos, ya que si se protege el circuito de las corrientes más débiles (cortocircuitos alejados) también el circuito estará protegido contra cortocircuitos más violentos (más cercanos a los interruptores y por tanto con mayores intensidades). Así, si se producen sendos cortocircuitos en las barras "A" y "B":

#### • Cortocircuito en barras "B"

##### • En barras "B" y en el interruptor 4"

$$\bar{I}_{k3B}^r = \bar{I}_{k3/4}^r = 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_K} = 1,1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1,73 \angle 69,35^\circ} = 7342 \angle -69,35^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_K = ((\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T) // (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_g)) + \bar{Z}_{L3} = 1,73 \angle 69,35^\circ \Omega$$

Esta intensidad de cortocircuito total, se repartirá por las dos ramas de la siguiente forma:

##### • Interruptor 2º: (rama de la red)

$$\bar{I}_{k3/2}^r = \bar{I}_{k3B}^r \cdot \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{L2})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{g1})} = 5697,4 \angle -69,1^\circ \text{ A}$$

##### • Interruptor 3º: (rama del generador)

$$\bar{I}_{k3/3}^r = \bar{I}_{k3B}^r \cdot \frac{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_T + \bar{Z}'_{L1})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{g1})} = 1644,7 \angle -70,4^\circ \text{ A}$$

##### • Interruptor 1º

$$\bar{I}_{k3/1}^r = \bar{I}_{k3/2}^r \cdot \frac{1}{m} = 949,5 \angle -69,1^\circ \text{ A}$$

Esta intensidad es la misma que circula por el interruptor  $I_2$ , pero pasada al nivel alto de tensión, es decir dividida por la relación de transformación.

#### • Cortocircuito en barras "A"

La corriente total de cortocircuito en las barras "A" será:

$$\bar{I}_{k3A}^r = 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_K} = 1,1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1,055 \angle 83,99^\circ} = 12038 \angle -84^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_K = (\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T) // (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_g) = 1,056 \angle 84^\circ \Omega$$

Esta corriente total de cortocircuito se repartirá entre las ramas del transformador y del generador de la siguiente forma:

- **Interrupor 2° (rama transformador)**

$$\bar{I}_{k3/2}^* = \bar{I}_{k3A}^* \cdot \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{L2})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{g1})} = 9341.5 \angle -83.7^\circ A$$

- **Interrupor 3° (rama generador)**

$$\bar{I}_{k3/3}^* = \bar{I}_{k3A}^* \cdot \frac{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_T + \bar{Z}'_{L1})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{g1})} = 2696.5 \angle -85^\circ A$$

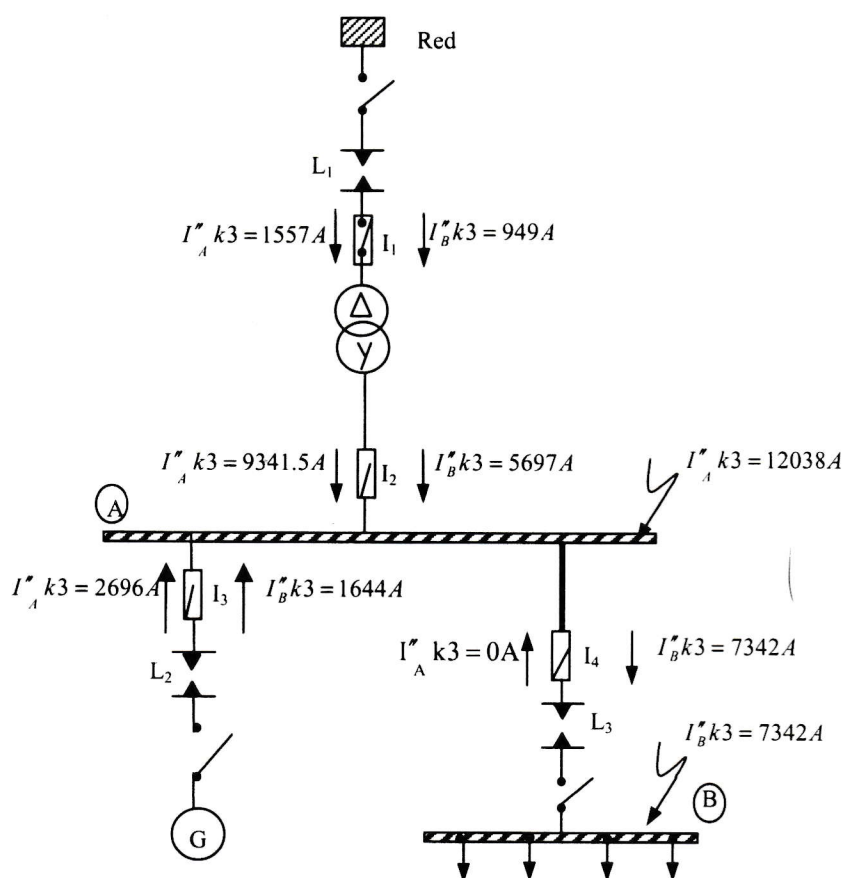
- **Interrupor 1°**

$$\bar{I}_{k3/1}^* = \bar{I}_{k3/2}^* \cdot \frac{1}{m} = 1557 \angle -83.7^\circ A$$

- **Interrupor 4°**

$$\bar{I}_{k3}^* = \bar{I}_{k3/4}^* = 0 \angle 0^\circ A \text{ (no existe aportación de corriente por parte de los consumidores).}$$

Con estas intensidades ya tenemos todos los datos para escoger el tipo de interruptor adecuado que debemos disponer en el circuito para protegerlo contra sobretensiones y cortocircuitos.



• **Adoptamos una selectividad en dos niveles**

Para la protección contra sobrecargas y cortocircuitos, dispondremos de una selectividad en dos niveles, es decir, que delante de cualquier falta actuarán como mínimo dos interruptores. Estos interruptores serán los dos más cercanos aguas arriba del punto de cortocircuito o falta.

De forma resumida, seguidamente se exponen las protecciones selectivas, dependiendo del punto en el cual se haya producido el cortocircuito.

- Falta aguas abajo de "B" → Actuará su protección más el interruptor  $I_4$ .
- Falta en las barras "B" → Actuará  $I_4$  e  $I_2$  o  $I_3$ .
- Falta en las barras "A" → Actuará en  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_1$ .
- El interruptor  $I_1$ , no queremos que actúe ante faltas en "B", pero sí ante faltas en "A". Por tanto:  
 $I_{1n} = 400 \text{ A}$       $I_{1 \text{ mag}} = 3 \cdot I_n = 1200 \text{ A} < I_{AK3}'' = 1557 \text{ A}$  con un retardo de 0.5 sg
- El interruptor  $I_2$ , tiene que actuar tanto para faltas en "A" como para faltas en "B":  
 $I_{2n} = 1250 \text{ A}$       $I_{2 \text{ mag}} = 4 \cdot I_n = 5000 \text{ A} < I_{BK3}'' = 5697 \text{ A}$  con un retardo de 0.3 sg
- El interruptor  $I_3$ , tiene que actuar tanto para faltas en "A" como para faltas en "B":  
 $I_{3n} = 800 \text{ A}$       $I_{3 \text{ mag}} = 1.5 \cdot I_n = 1200 \text{ A} < I_{BK3}'' = 1645 \text{ A}$  con un retardo de 0.3 sg
- El interruptor  $I_4$ , tiene que actuar ante faltas en "B", y aguas abajo de "B", como no sabemos cuánto "aguas abajo", adoptamos:  
 $I_{4n} = 1250 \text{ A}$       $I_{4 \text{ mag}} = 4 \cdot I_n = 5000 \text{ A} < I_{K3B}'' = 7342 \text{ A}$  con un retardo de 0.1 sg

### PROBLEMA 3.2

Disponemos de un sistema de potencia formado por una subestación transformadora de distribución que abastece a unos consumidores a través del embarrado "B", y a un grupo de motores a través del embarrado "A". Las protecciones del sistema de potencia se llevará a cabo mediante interruptores magnetotérmicos y fusibles adecuados, colocados como se indica en la figura. La potencia prevista que se distribuirá a través del embarrado "B" es de 20MVA coincidiendo la tensión con el valor que toma la misma para el embarrado "A".

#### DATOS

Motores:.....16MVA.....10KV..... $\cos \phi = 0.94$ ..... $I_{arr}/I_n = 5$ ..... $\eta = 70\%$ ..... $n = 1500\text{rpm}$ .

Transformador.....20MVA.....110/10KV..... $\epsilon_{cc} = Z_1 = Z_2 = 12\%$ ..... $Z_0 = 0.9 \cdot Z_1$ ..... $X_n = j1\Omega$

$$\epsilon_{RCC} = X_1 = X_2 = 0.6\%$$

$L_1$ ..... $Z_1 = Z_2 = (0.8 + j2.8)\Omega$ ..... $X_0 = 2.5 \cdot X_1$

$L_2$ ..... $Z_1 = Z_2 = (0.015 + j0.2)\Omega$ ..... $X_0 = 2.5 \cdot X_1$

$L_3$ ..... $Z_1 = Z_2 = (0.04 + j0.4)\Omega$ ..... $X_0 = 2.5 \cdot X_1$

#### • Intensidades nominales para interruptores de protección estándar

100A, 125A, 160A, 200A, 250A, 315A, 400A,  
630A, 800A, 1250A, 1600A, 2000A, 2600A.

#### • Poderes de corte y de cierre para interruptores de protección estándar

3.15kA, 10kA, 16kA, 20kA, 31.5kA, 40kA, 50kA, 63kA, 100kA

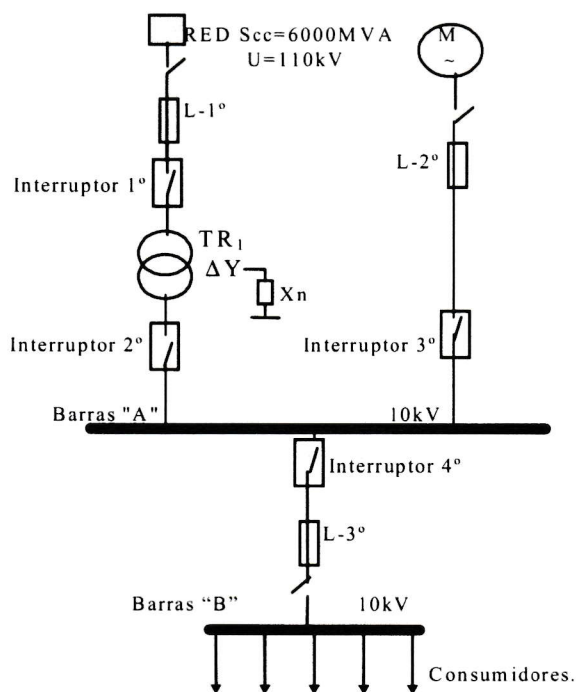


Figura 3.2 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.2

#### HALLAR

Delante de una falta trifásica en diversos puntos del circuito se pide para cada interruptor:

- 1 Intensidad nominal de los interruptores. Dar un valor normalizado.
- 2 Protección térmica contra sobrecargas, es decir, ajuste de las curvas a tiempo inverso. Intensidades de arranque ( $I_r$ ). Considérese un margen de seguridad de un 10%. Coeficientes de arranque.

- 3 Protección magnética contra cortocircuitos, es decir, ajuste de las curvas a tiempo independiente o instantáneo. Para ello suponer cortocircuitos en los embarrados "A" y "B".
- 4 Indicar el poder de cierre y el poder de corte para cada interruptor, así como las intensidades de cierre y de corte. Para ello, suponer cortocircuitos trifásicos en bornes de cada interruptor.

## RESOLUCIÓN

### 1. y 2. Hallamos los relés térmicos (protección contra sobrecargas)

*Para comprender su cálculo, consultar la misma sección del problema 3.1 de este capítulo, donde se especifican: cálculos, gráficas a consultar y los conceptos teóricos más importantes para su comprensión.*

- **Cálculo de las intensidades de carga (Ic) y elección de las intensidades nominales mediante los valores dados en el enunciado**

$$S_n = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot U_n \rightarrow I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \Rightarrow$$

- Valor nominal	- Adoptamos
$I_{c1} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 105A$	$I_{n1} = 400A$
$I_{c2} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 1155A$	$I_{n2} = 1600A$
$I_{c3} = \frac{16 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10^3} = 924A$	$I_{n3} = 1250A$
$I_{c4} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10^3} = 1155A$	$I_{n4} = 1600A$

Recordar que el transformador no modifica las potencias ni las frecuencias.

- **Las intensidades de arranque de cada interruptor son:** (adoptamos para las intensidades de arranque un 10% más que las intensidades de carga).

$$I_{arrq1} = I_{c1} \cdot 1.1 = 115.5A$$

$$I_{arrq2} = I_{c2} \cdot 1.1 = 1270.5A$$

$$I_{arrq3} = I_{c3} \cdot 1.1 = 1016.4A$$

$$I_{arrq4} = I_{c4} \cdot 1.1 = 1270.5A$$

- **Quedando los coeficientes de arranque**

$$C_{arrq-1} = \frac{I_{arr1}}{I_{n1}} = 0.29$$

$$C_{arrq-3} = \frac{I_{arr3}}{I_{n3}} = 0.81$$

$$C_{arrq-2} = \frac{I_{arr2}}{I_{n2}} = 0.79$$

$$C_{arrq-4} = \frac{I_{arr4}}{I_{n4}} = 0.79$$

Para el interruptor "I<sub>2</sub>" se le aplicará un retardo de 0.2 seg ya que los coeficientes de arranque coinciden y no pueden disparar dos interruptores a la vez.

### 3. y 4. Hallamos los relés magnéticos (protección contra los cortocircuitos)

*Para comprender su cálculo, consultar la misma sección del problema 3.1 de este capítulo, donde se especifican: cálculos, gráficas a consultar y los conceptos teóricos más importantes para su comprensión.*

Primeramente hallaremos todas las impedancias que afectan al circuito, teniendo presente el nivel de tensión al que las calculamos, ya que cuando realizaremos cálculos generales será imprescindible pasar todas las impedancias a un mismo nivel de tensión, el nivel que deseemos, pero siempre igual para todas (los cambios de tensión, debe recordarse, se producen siempre en los transformadores).

- **Impedancias del circuito:** Cálculo de las impedancias que intervienen en el circuito.

- **Acometida (a 110kV)**

$$\bar{Z}_Q = 1.1 \frac{U_n^2}{S_n} = 1.1 \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{6000 \cdot 10^6} = 2.22 \Omega$$

$$\bar{X}_Q = 0.995 \bar{Z}_Q = 0.995 \cdot 2.22 = j2.207 \Omega$$

$$R_Q = 0.1 \cdot X_Q = 0.1 \cdot 2.207 = 0.2207 \Omega$$

$$\bar{Z}_Q = (0.2207 + j2.207) = 2.22 \angle 85^\circ \Omega$$

- **Línea 1° (a 110kV)**

$$\bar{Z}_{L1} = (0.8 + j2.8) = 2.9 \angle 74^\circ \Omega$$

- **Transformador (a 110kV)**

$$\bar{Z}_T = \epsilon_{CCT} \frac{U_n^2}{S_n} = 0.12 \frac{(110)^2}{20} = 72.6 \Omega \quad m = \frac{110}{10} = 11$$

$$R_{TR} = \epsilon_{CC} \frac{U_n^2}{S_n} = 0.006 \frac{(110)^2}{20} = 3.63 \Omega$$

$$X_{TR} = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{72.6^2 - 3.63^2} = 72.5 \Omega$$

$$\bar{Z}_T = (3.63 + j72.5) = 72.6 \angle 87^\circ \Omega$$

- **Motores (a 10kV)** (se unen todos los motores como si fuese uno sólo, al presentar características similares)

$$\bar{Z}_M = \frac{1}{I_{arrq}} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1}{5} \frac{(10)^2}{16} = 1.25 \Omega \quad \text{como } \frac{MW}{npp} \geq 1 \text{ tendremos:}$$

$$\bar{X}_M = 0.995 \bar{Z}_M = 0.995 \cdot 1.25 = j1.24 \Omega$$

$$R_M = 0.1 \cdot X_M = 0.1 \cdot 1.24 = 0.124 \Omega$$

$$\bar{Z}_M = (0.124 + j1.24) = 1.25 \angle 84^\circ \Omega$$

- **Línea 2° (a 10kV)**

$$\bar{Z}_{L2} = (0.015 + j0.2) = 0.2 \angle 85^\circ \Omega$$

- **Línea 3° (a 10kV)**

$$\bar{Z}_{L3} = (0.04 + j0.4) = 0.4 \angle 84^\circ \Omega$$

- **Las impedancias calculadas por ramas serán:** (la tilde ( ' ) nos indica que las impedancias están al nivel bajo de tensión, 10kV).

$$(\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR}) = (4.65 + j77.5) = 77.64 \angle 86.6^\circ \Omega \text{ (calculadas a 110kV)}$$

$$\bar{Z}_A = (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR})' = (0.038 + j0.64) = 0.642 \angle 86.6^\circ \Omega \text{ (calculadas a 10kV)}$$

$$\bar{Z}_B = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega \text{ (calculadas a 10kV)}$$

$$(\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2}) = (16.82 + j174.24) = 175.5 \angle 84.5^\circ \Omega \text{ (calculadas a 110kV)}$$

$$(\bar{Z}_A // \bar{Z}_B)' = \frac{0.9309 \angle 171.1^\circ}{(0.177 + j2.08)} = \frac{0.9309 \angle 171.1^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 0.445 \angle 85.9^\circ = (0.0317 + j0.443) \Omega \text{ (a 10kV)}$$

$$(\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_Q)' = (1.0207 + j5) = 5.1 \angle 78.7^\circ \Omega \text{ (calculadas a 110kV)}$$

- **Intensidades de cortocircuito que afectan a cada interruptor (suponiendo cortocircuitos trifásicos)**

Como los interruptores sirven para proteger el circuito, es necesario primeramente protegerlos a ellos mismos, es por ello que hemos determinado su poder de corte y poder de cierre, delante de los

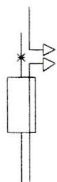
cortocircuitos más desfavorables que pueden darse (cuando se produce un cortocircuito muy cercano a ellos, lo que determina las más bajas impedancias y por tanto las más elevadas intensidades).

Para obtener las intensidades de cortocircuito trifásico que afectan a cada interruptor, se desglosa su cálculo en las aportaciones de corriente que llegan por su parte superior (Up), o en las aportaciones de corriente que lo hacen por su parte inferior (Down), ya que según la norma VDE resulta muy improbable un cortocircuito en el interior del interruptor. Siendo por tanto la situación más desfavorable cuando el cortocircuito se produce en las inmediaciones del interruptor, pero en su exterior. Existiendo, pues, dos casos posibles de cortocircuito:

- 1 Que el cortocircuito se produzca "aguas abajo" del interruptor: en tal caso, sólo se tendrá en cuenta la aportación de corriente de cortocircuito correspondiente al tramo superior, ya que ésta es la única que pasará a través del interruptor (que es la que nos interesa, denominándose UP).



- 2 Que el cortocircuito se produzca "aguas arriba" del interruptor: en tal caso, sólo se tendrá en cuenta la aportación de corriente de cortocircuito correspondiente al tramo inferior, ya que ésta es la única que pasará a través del interruptor (que es la que nos interesa, denominándose DOWN).



Teniendo presente lo expuesto en los puntos precedentes, calcularemos para cada interruptor los valores de las intensidades de cortocircuito correspondientes tanto a las aportaciones que se producen por la parte superior, como a las aportaciones de corriente que se producen por la parte inferior.

- **Interruptor 1°**

$$\bar{I}_{1uK3}^* = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{1u}} = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1})} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 5.1 \angle 78.7^\circ} = 13698 \angle -78.7^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{1u} = (\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_Q) = (1.0207 + j5) = 5.1 \angle 78.7^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_{1DK3}^* = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_Q + \bar{Z}'_{L2} + \bar{Z}'_M)} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 247.6 \angle 85.3^\circ} = 282 \angle -85.3^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{1D} = (\bar{Z}_M + \bar{Z}'_{L2} + \bar{Z}'_M) = (20.45 + j246.8) = 247.6 \angle 85.3^\circ \Omega$$

- **Interruptor 2°**

$$\bar{I}_{2uK3}^* = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.642 \angle 86.6^\circ} = 9892 \angle -86.6^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{2u} = (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR}) = (0.038 + j0.64) = 0.642 \angle 86.6^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_{2DK3}^* = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}'_{L2} + \bar{Z}'_M)} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.45 \angle 84.5^\circ} = 4380 \angle -85^\circ \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{2D} = (\bar{Z}'_M + \bar{Z}'_{L2}) = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega$$

- **Interruptor 3°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{3_u K3}^* &= \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_M)} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.45 \angle 84.5^\circ} = 4380 \angle -85^\circ A \\ \bar{Z}_{3U} &= (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega \\ \bar{I}_{3_D K3}^* &= \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.642 \angle 86.6^\circ} = 9892 \angle -86.6^\circ A \\ \bar{Z}_{3D} &= (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR})' = (0.038 + j0.64) = 0.642 \angle 86.6^\circ \Omega\end{aligned}$$

- **Interruptor 4°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{4_u K3}^* &= \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \left[ (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_M) // (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T) \right]} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.445 \angle 85.9^\circ} = 14272 \angle -85.9^\circ A \\ \bar{Z}_{4U} &= (\bar{Z}_A // \bar{Z}_B)' = \frac{0.9309 \angle 171.1}{(0.177 + j2.08)} = \frac{0.9309 \angle 171.1^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 0.445 \angle 85.9^\circ = (0.0317 + j0.443) \Omega \\ \bar{I}_{4_D K3}^* &= \frac{1.1 \cdot 0}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{L3}} = 0 A \quad (\text{Ya que no existe corriente por la parte inferior de este interruptor})\end{aligned}$$

- **Poder de cierre de los interruptores**

**Nota:** Para una correcta comprensión de la corriente máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ ) y de la corriente de corte ( $I_a$ ), nos remitimos al problema 3.3 de este mismo capítulo y a los anexos, donde de forma detallada se exponen los conceptos, gráficas, cálculos y otros aspectos concernientes a estas intensidades.

Para hallar el poder de cierre de los interruptores, es necesario obtener la máxima corriente asimétrica de cortocircuito. Ésta se halla con los valores de las corrientes de cortocircuitos iniciales más desfavorables (los cortocircuitos producidos en las inmediaciones de los interruptores) multiplicados por el factor  $\chi$ , el cual se obtiene gráficamente mediante la relación R/X para cada una de las impedancias de cortocircuito (gráfica 12.1, de los anexos).

- **Interruptor 1°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{S1-U} &= \sqrt{2} \cdot \bar{I}_{1_u K3}^* \cdot \chi_{1u} = \sqrt{2} \cdot 13698 \angle -78.7^\circ \cdot 1.55 = 30026 \angle -78.7^\circ A \\ \bar{Z}_{1U} &= (\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_Q) = (1.0207 + j5) = 5.1 \angle 78.7^\circ \Omega \quad \frac{R_{1U}}{X_{1U}} = \frac{1.021}{5} = 0.204 \rightarrow X_{1u} = 1.55 \\ \bar{I}_{S1-D} &= \sqrt{2} \cdot \bar{I}_{1_D K3}^* \cdot \chi_{1D} = \sqrt{2} \cdot 282 \angle -85.3^\circ \cdot 1.81 = 722 \angle -85.3^\circ A \\ \bar{Z}_{1D} &= (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_M) = (20.45 + j246.8) \Omega \quad \frac{R_{1D}}{X_{1D}} = \frac{20.45}{246.8} = 0.083 \rightarrow X_{1D} = 1.81\end{aligned}$$

- **Interruptor 2°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{S2-U} &= \sqrt{2} \cdot \bar{I}_{2_u K3}^* \cdot \chi_{2u} = \bar{I}_{S3-D} = \sqrt{2} \cdot 9892 \angle -86.6^\circ \cdot 1.87 = 26160 \angle -86.6^\circ A \\ \bar{Z}_{2U} &= \bar{Z}_A = (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR})' = (0.038 + j0.64) \Omega \quad \frac{R_{2U}}{X_{2U}} = \frac{0.038}{0.64} = 0.059 \rightarrow X_{1u} = 1.87 \\ \bar{I}_{S2-D} &= \sqrt{2} \cdot \bar{I}_{2_D K3}^* \cdot \chi_{2D} = \bar{I}_{S3-U} = \sqrt{2} \cdot 4380 \angle -85^\circ \cdot 1.79 = 11088 \angle -85^\circ A \\ \bar{Z}_{2D} &= \bar{Z}_B = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega \quad \frac{R_{2D}}{X_{2D}} = \frac{0.139}{1.44} = 0.096 \rightarrow X_{2D} = 1.79\end{aligned}$$

- **Interruptor 3°**

$$\bar{I}_{S3-U} = \sqrt{2} \cdot I_{2D}''_{K3} \cdot \chi_{3U} = I_{S2-D} = \sqrt{2} \cdot 4380 \angle -85^\circ \cdot 1.79 = 11088 \angle -85^\circ A$$

$$\bar{Z}_{3U} = \bar{Z}_B = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2}) = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega \quad \frac{R_{3U}}{X_{3U}} = \frac{0.139}{1.44} = 0.0965 \rightarrow X_{3U} = 1.79$$

$$\bar{I}_{S3-D} = \sqrt{2} \cdot I_{2u}''_{K3} \cdot \chi_{3D} = \bar{I}_{S2-U} = \sqrt{2} \cdot 9892 \angle -86.6^\circ \cdot 1.87 = 26160 \angle -86.6^\circ A$$

$$\bar{Z}_{3D} = \bar{Z}_A = (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR}) = (0.038 + j0.64) \Omega \quad \frac{R_{3D}}{X_{3D}} = \frac{0.038}{0.64} = 0.059 \rightarrow X_{3D} = 1.87$$

- **Interruptor 4°**

$$\bar{I}_{S4-U} = \sqrt{2} \cdot I_{4u}''_{K3} \cdot X_{4u} = \sqrt{2} \cdot 14272 \angle -85.2^\circ \cdot 1.85 = 37340 \angle -85.2^\circ A$$

$$\bar{Z}_{4U} = (\bar{Z}_A // \bar{Z}_B) = 0.445 \angle 85.9^\circ = (0.0317 + j0.443) \Omega \quad \frac{R_{4U}}{X_{4U}} = \frac{0.0318}{0.443} = 0.07 \rightarrow X_{4u} = 1.85$$

$$\bar{I}_{S4-D} = 0 \quad (\text{De las barras "B" no existe aportación de corriente ya que son consumidores}).$$

*Vistos estos valores, el poder de cierre para todos los interruptores será aproximadamente el doble del valor de la intensidad más alta, como se indica en la tabla adjunta.*

- **Poder de corte de los interruptores**

Para determinar el poder de corte debemos primeramente conocer la intensidad de cortocircuito inicial que fluirá desde cada generador, motor síncrono, red o motor asíncrono hacia el punto de cortocircuito. Una vez hallada esta intensidad inicial de cortocircuito, se aplicarán los coeficientes correctores "μ" y "q" dados en las gráficas 12.2 y 12.3, respectivamente de los anexos.

Como hay motores asíncronos en el sistema de potencia, el valor del coeficiente "q" se deberá buscar en la gráfica 12.3, ya que como se indica en la citada tabla, este coeficiente sólo se ve afectado cuando el circuito dispone de motores asíncronos.

El factor "μ" lo encontramos gráficamente mediante la relación  $I_{K3}''/I_n$  (gráfica 12.2). Para ello previamente se hallan las intensidades nominales de cada fuente de energía y las aportaciones que las mismas fuentes entregan a las líneas que parten de ellas, obteniéndose así el cociente anterior:

$$I_a = \mu \cdot q \cdot I_{K3}''$$

- **Interruptor 1°**

$$\bar{I}_{a1-U} = \bar{I}_{K3U}'' \cdot \mu_U \cdot q_U = 13698 \angle -78.7^\circ \cdot 1 \cdot 1 = 13698 \angle -78.7^\circ A$$

$\mu_U = q_U = 1$  Sin máquinas asíncronas, y con una acometida (generador alejado).

$$\bar{I}_{a1-D} = \bar{I}_{K3D}'' \cdot \mu_D \cdot q_D = 282 \angle -85.3^\circ \cdot 0.86 \cdot 0.73 = 177 \angle -85.3^\circ A$$

$$\frac{I_{K3D}''}{I_{nM}} = \frac{282}{924} = \frac{282}{84} = 3.35 \quad \text{con } t_v = 0.1 \text{sg} \rightarrow \mu_D = 0.78; q_D = 0.73 \quad (\text{ver su cálculo más adelante}).$$

- **Interruptor 2°**

$$\bar{I}_{a2-U} = \bar{I}_{K3-U}'' \cdot \mu_U \cdot q_U = 9892 \angle -86.6^\circ \cdot 1 \cdot 1 = 9892 \angle -86.6^\circ A$$

$\mu_U = 1, q_U = 1$  no está afectado por máquinas síncronas ni asíncronas.

$$\bar{I}_{a2-D} = \bar{I}_{a3u} = 4380 \angle -85^\circ \cdot 0.78 \cdot 0.73 = 2494 \angle -85^\circ A$$

$$\frac{I_{K3U}^*}{I_n} = \frac{4380}{924} = 4.74 \quad \text{con } t_v = 0.1 \text{sg} \rightarrow \mu_U = 0.78, q_U = 0.73 \quad (\text{ver cálculo de coeficientes más adelante})$$

• **Interruptor 3º**

$$\bar{I}_{a3-U} = \bar{I}_{K3-U}^* \cdot \mu_U \cdot q_U = 4380 \angle -85^\circ \cdot 0.78 \cdot 0.73 = 2494 \angle -85^\circ \text{ A}$$

$$\frac{I_{K3U}^*}{I_{nM}} = \frac{4380}{924} = 4.74 \quad \text{con } t_v = 0.1 \text{sg} \rightarrow \mu_U = 0.78$$

Cálculo del coeficiente ( $q_U$ ):

$$I_{nM} = \frac{S_{nM}}{V_{nM} \sqrt{3}} = \frac{16 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 924 \text{ A}$$

$$P_{Motor} = S \cdot \cos \varphi = 16 \cdot 10^6 \cdot 0.94 = 15 \cdot 10^6 \text{ MW}$$

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \Rightarrow p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = \frac{3000}{1500} = 2$$

$$\eta = 0.7 \quad (\text{rendimiento del grupo de motores})$$

$$P_{real} = 15 \cdot 10^6 \cdot 0.7 = 10.53 \text{ MW}$$

$$\frac{MW}{pp} = \frac{10.53}{2} = 5.26 \frac{MW}{pp}$$

Entrando en la gráfica tendremos:  $q_U = 0.73$

Por su parte la corriente de corte inferior será:

$$\bar{I}_{a3-D} = \bar{I}_{a2-U} = 9892 \angle -86.6^\circ \cdot 1.1 = 9892 \angle -86.6^\circ \text{ A}$$

• **Interruptor 4º**

$$\bar{I}_{a4-U} = \bar{I}_{a2-U} + \bar{I}_{a3-U} = 12386 \angle -86^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{a4-D} = \bar{I}_{K34D}^* \cdot \mu_D \cdot q_D = 0 \cdot \mu \cdot q = 0 \quad (\text{no hay contribución de corriente por la parte inferior}).$$

Tabla 3.1. Poder de corte y poder de cierre ó choque de los interruptores:

Interruptor	$I_C$	$I_{arranque}$	$I_n$	$C_{arranque}$	$I_{K3}$	$I_S$	$I_a$	$P_{corte}$	$P_{cierre}$
$I_1$	105	115.5	400	0.24	13698	30026	13698	20kA	50kA
$I_2$	1155	1270.5	1600	0.79	9892	26160	9892	20kA	50kA
$I_3$	924	1016.4	1250	0.81	9892	26160	9892	20kA	50kA
$I_4$	1155	1270.5	1600	0.79	14272	37340	12386	20kA	50kA

• **PROTECCIÓN MAGNÉTICA**

Una vez protegidos los propios interruptores (poder de cierre y poder de corte), debemos proteger mediante estos interruptores al resto del circuito. Para ello se sigue un procedimiento radicalmente opuesto al anterior; si para la protección de los interruptores buscábamos las intensidades de cortocircuitos máximas, y por tanto los cortocircuitos se debían dar lo más cerca posible de los interruptores, ahora para la protección del circuito se deben buscar las intensidades mínimas que puede provocar un cortocircuito y que asimismo éstas sean detectadas por los interruptores. Para ello, en esta ocasión, se intenta provocar cortocircuitos en las partes más alejadas de los interruptores (en las barras de interconexión, normalmente); de esta forma se obtienen las corrientes más débiles (cortocircuitos alejados) y éstas corrientes deberán ser detectadas por los interruptores. Sólo de esta forma el sistema estará protegido contra todos los cortocircuitos, ya que si se protege al circuito contra los cortocircuitos más débiles (los más alejados y por tanto con mayores impedancias y menores intensidades), también el circuito estará protegido contra cortocircuitos más violentos (más cercanos a los interruptores). Así, si se producen sendos cortocircuitos en las barras "A" y "B":

- **Cortocircuito en barras "A"**

La intensidad de cortocircuito total en barras "A" será:

$$\vec{I}_{AK3}^* = \frac{1.1 \cdot \vec{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \vec{Z}_{AK3}^*} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.445 \angle 85.4^\circ} = 14272 \angle -85.4^\circ A$$

$$\vec{Z}_{AK3}^* = \left[ (\vec{Z}_T + \vec{Z}_{L1} + \vec{Z}_Q)' // (\vec{Z}_M + \vec{Z}_{L2}) \right] = \vec{Z}_A' // \vec{Z}_B' = 0.445 \angle 85.4^\circ \Omega$$

- **Interruptor  $I_2$**

$$\vec{I}_{I_2 K3}^* = \vec{I}_{AK3}^* \frac{(\vec{Z}_M + \vec{Z}_{L2})'}{(\vec{Z}_M + \vec{Z}_{L2})' + (\vec{Z}_Q + \vec{Z}_{L1} + \vec{Z}_T)'} = 14272 \angle -85.4^\circ \frac{1.45 \angle 84.5^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 9901 \angle -86.6^\circ A$$

- **Interruptor  $I_1$**

$$\vec{I}_{I_1 K3}^* = \frac{\vec{I}_{I_2 K3}^*}{m} = \frac{9901 \angle -86.6^\circ}{11} = 900 A \angle -86.6^\circ \Omega$$

- **Interruptor  $I_3$**

$$\vec{I}_{I_3 K3}^* = \vec{I}_{BK3}^* \frac{(\vec{Z}_Q + \vec{Z}_{L1} + \vec{Z}_T)'}{(\vec{Z}_M + \vec{Z}_{L2})' + (\vec{Z}_Q + \vec{Z}_{L1} + \vec{Z}_T)'} = 14272 \angle -85.4^\circ \frac{0.642 \angle 86.6^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 4384 \angle -84^\circ A$$

- **Interruptor  $I_4$**

$$\vec{I}_{I_4 K3}^* = 0 A \text{ (no hay contribución de corriente por parte de los consumidores).}$$

- **Cortocircuito en las barras "B"**

La intensidad de cortocircuito total en barras "B" y será:

$$\vec{I}_{BK3}^* = \frac{1.1 \cdot \vec{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \vec{Z}_{BK3}^*} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.846 \angle 85.1^\circ} = 7507 \angle -85.1^\circ A$$

$$\vec{Z}_{BK3}^* = (\vec{Z}_{AK3}^* + \vec{Z}_{L3})' = (0.0718 + j0.843) = 0.846 \angle 85.1^\circ \Omega$$

- **Interruptor  $I_4$** . La intensidad en el interruptor  $I_4$ , coincide con la intensidad total de cortocircuito en barras "B".

$$\vec{I}_{I_4 K3}^* = \frac{1.1 \cdot \vec{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \vec{Z}_{BK3}^*} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.846 \angle 85.1^\circ} = 7507 \angle -85.1^\circ A = \vec{I}_{BK3}^*$$

- **Interruptor  $I_2$**

$$\vec{I}_{I_2 K3}^* = \vec{I}_{BK3}^* \frac{(\vec{Z}_M + \vec{Z}_{L2})'}{(\vec{Z}_M + \vec{Z}_{L2})' + (\vec{Z}_Q + \vec{Z}_{L1} + \vec{Z}_T)'} = 7507 \angle -85.1^\circ \frac{1.45 \angle 84.5^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 5208 \angle -85.7^\circ A$$

- **Interruptor  $I_1$**

$$\vec{I}_{I_1 K3}^* = \frac{\vec{I}_{I_2 K3}^*}{m} = \frac{5208 \angle -85.7^\circ}{11} = 473.5 \angle -85.7^\circ A$$

▪ **Interruptor  $I_3$ .**

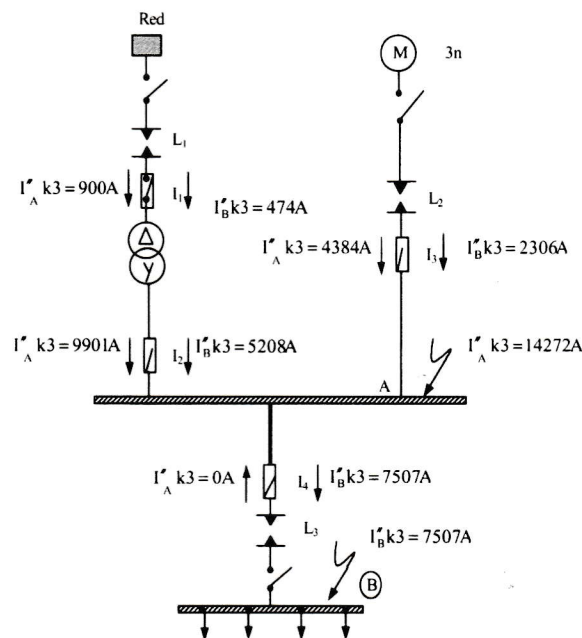
$$\vec{I}_{I_3 K3}^* = \vec{I}_{B K3}^* \frac{(\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)'}{(\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' + (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)'} = 7507 \angle -85.1^\circ \frac{0.642 \angle 86.6^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 2306 \angle -85.6^\circ \text{ A}$$

• **Disponemos de una selectividad en dos niveles**

Para la protección contra sobrecargas y cortocircuitos, dispondremos de una selectividad en dos niveles, es decir, que delante de cualquier falta actuarán como mínimo dos interruptores. Estos interruptores serán los dos más cercanos aguas arriba del cortocircuito o falta.

De forma resumida, seguidamente se exponen las protecciones selectivas, dependiendo del punto en el cual se haya producido el cortocircuito.

- Falta aguas abajo de "B" → Actuará su protección más  $I_4$ .
- Falta en las barras "B" → Actuará  $I_4$  y  $I_2$  ó  $I_3$ .
- Falta en las barras "A" → Actuará en  $I_2$ ,  $I_3$  y  $I_1$ .
- $I_{aM} = \text{Sin}_M = S \cdot 924 = 4620 \text{ A}$ . Durante 10 seg.
- El interruptor  $I_1$ , no queremos que actúe ante faltas en "B", pero sí ante faltas en "A". Por tanto:  
 $I_{1n} = 400 \text{ A}$      $I_{1 \text{ mag}} = 2 \cdot I_n = 800 \text{ A} < I_A^* k3 = 900 \text{ A}$  retardo de 0.5 sg
- El interruptor  $I_2$ , tiene que actuar tanto para faltas en "A" como para faltas en "B":  
 $I_{2n} = 1600 \text{ A}$      $I_{2 \text{ mag}} = 3 \cdot I_n = 4800 \text{ A} < I_B^* k3 = 5280 \text{ A}$  retardo de 0.3 sg
- El interruptor  $I_4$ , tiene que actuar ante faltas en "B" y aguas abajo de "B", como no sabemos cuánto "aguas abajo", adoptamos:  
 $I_{4n} = 1600 \text{ A}$      $I_{4 \text{ mag}} = 3 \cdot I_n = 4800 \text{ A} < I_B^* k4 = 7507 \text{ A}$  retardo de 0.1 sg

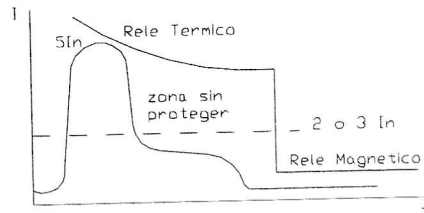


- El interruptor  $I_3$  es el más problemático, ya que incorpora un motor.

Teóricamente tendría que actuar tanto para faltas en "A" como con faltas en "B", pues la menor intensidad es:  $I_{\text{mag}}^* k3 = 2306\text{A}$  y la  $I_{3\text{mag}} < 2306\text{ A}$ . Pero el motor arranca a  $5I_n = 5 \cdot 924 = 4620\text{A}$ . Por tanto su intensidad deberá quedar por encima de este valor.

### • Protección de motores

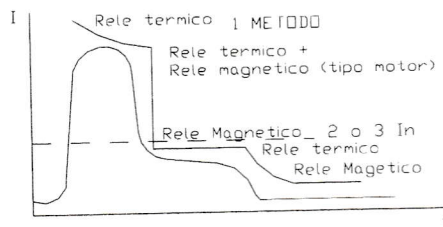
En el caso de que existan motores asíncronos las protecciones, se tienen que dimensionar de otra forma. Esto es debido a la gráfica intensidad-tiempo. En un motor, si lo protegemos de la misma forma que en los casos anteriores, dejaríamos una zona sin proteger, como vemos en la figura siguiente:



Para evitar este inconveniente podemos optar por dos formas de protección diferentes:

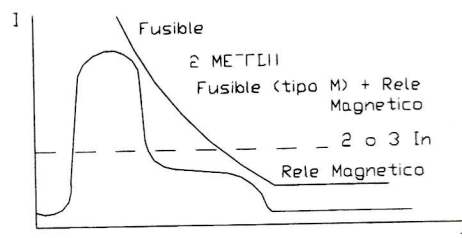
#### 1. Mediante un relé térmico y un relé magnético de tipo motor

Los relés magnéticos tipo motor disponen de dos tiempos de disparo a modo de niveles. Así pueden aproximarse más a la curva de arranque de los motores (protección más efectiva), sin perjudicar su normal funcionamiento.



#### 2. Mediante un fusible (tipo "Motor") y un relé térmico

Este sistema es también ampliamente utilizado, ya que permite un acercamiento a la curva de arranque de los motores pero esta vez con la característica típica que define a los fusibles, con su forma inclinada. Debe tenerse especial precaución en que el fusible en todo momento proteja al relé térmico contra los cortocircuitos. Es decir, el fusible actuará contra los cortocircuitos, mientras que el relé térmico lo hará contra las sobretensiones.



### PROBLEMA 3.3

El esquema de la figura representa una sección de una red eléctrica trifásica alimentada por dos generadores situados en paralelo al principio del sistema de potencia. Para el diseño de los interruptores de protección, y para conocer la respuesta del circuito en diversos puntos del mismo ante situaciones anómalas, funcionando los generadores sin carga y a la tensión nominal y con los siguientes datos:

#### DATOS

$G_A$ .....	20 MVA.....	10KV.....	$X''_1 = X_2 = 12\%$ .....	$X_0 = 0.4X_1$ .....	$X_n = 2\%$
$G_B$ .....	30 MVA.....	10KV.....	$X''_1 = X_2 = 14\%$ .....	$X_0 = 0.4X_1$ .....	$X_n = 0\%$
$T_{R1}$ .....	50 MVA.....	100/10KV.....	$\epsilon_{x1cc} = \epsilon_{x2cc} = 22.5\%$ .....	$X_0 = 0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n = 3.75\%$
$T_{R2}$ .....	50 MVA.....	100/10KV.....	$\epsilon_{x1cc} = \epsilon_{x2cc} = 14.4\%$ .....	$X_0 = 0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n = 0\%$
$L_1$ .....			$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = (0.06 + j0.12)\Omega$ ...	$\bar{Z}_0 = 2.5\bar{Z}_1$	
$L_2$ .....			$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = (2 + j6)\Omega$ .....	$\bar{Z}_0 = 2.5\bar{Z}_1$	

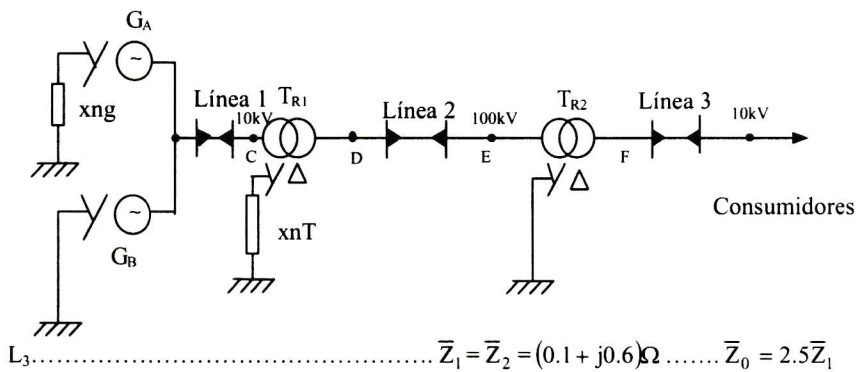


Figura 3.3 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.3

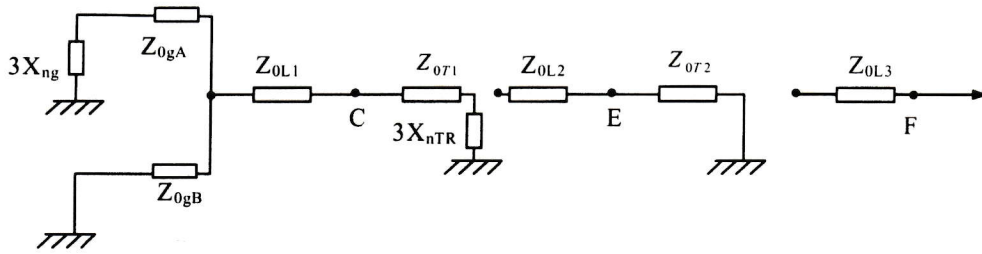
#### HALLAR

1. Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar de la red representada
2. En el supuesto de producirse unos cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, trifásicos) en las barras de interconexión "C", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{K1}, I''_{K2}, I''_{K3}, I_{S1}, I_{S2}, I_{S3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ). (Suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores.)
3. En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "E", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{K1}, I''_{K2}, I''_{K3}, I_{S1}, I_{S2}, I_{S3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ). (Suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores.)
4. En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "F", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{K1}, I''_{K2}, I''_{K3}, I_{S1}, I_{S2}, I_{S3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ). (Suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores.)

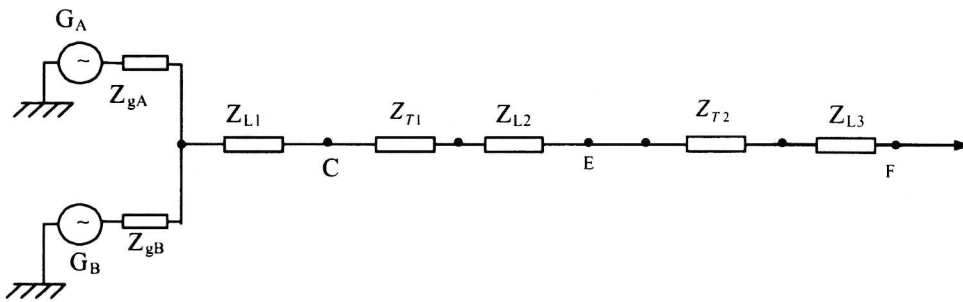
#### RESOLUCIÓN

##### 1. Redes de secuencia directa, inversa y homopolar

- Red de secuencia homopolar



- Red de secuencia directa e inversa (sin los generadores)



- Cálculo de impedancias (todas a 10kV)

- $G_A$   $\bar{X}_{1gA} = \bar{X}_{2gA} = 0.12 \frac{(10)^2}{20} = j0.6\Omega$   $\bar{X}_{0gA} = 0.4 \bar{X}_{1gA} = j0.24\Omega$   $\bar{X}_{ngA} = 0.02 \frac{(10)^2}{20} = j0.1\Omega$
- $G_B$   $\bar{X}_{1gB} = \bar{X}_{2gB} = 0.14 \frac{(10)^2}{30} = j0.47\Omega$   $\bar{X}_{0gB} = 0.4 \bar{X}_{1gB} = j0.188\Omega$   $\bar{X}_{ngB} = 0\Omega$
- $T_{R1}$   $\bar{X}_{1T1} = \bar{X}_{2T1} = 0.225 \frac{(10)^2}{50} = j0.45\Omega$   $\bar{X}_{0T1} = 0.9 \bar{X}_{1T1} = j0.405\Omega$   $\bar{X}_{nT1} = 0.0375 \frac{10^2}{50} = j0.075\Omega$
- $T_{R2}$   $\bar{X}_{1T2} = \bar{X}_{2T2} = 0.144 \frac{(10)^2}{50} = j0.288\Omega$   $\bar{X}_{0T2} = 0.9 \bar{X}_{1T2} = j0.2592\Omega$   $\bar{X}_{nT2} = 0\Omega$
- $L_1$   $\bar{Z}_{1L1} = \bar{Z}_{2L1} = (0.06 + j0.12) = 0.134 \angle 63.43^\circ \Omega$   
 $\bar{Z}_{0L1} = 2.5 \bar{Z}_{1L1} = (0.15 + j0.3) = 0.335 \angle 63.4^\circ \Omega$
- $L_2$   $\bar{Z}_{1L2} = \bar{Z}_{2L2} = (0.02 + j0.06) = 0.0632 \angle 71.6^\circ \Omega$   
 $\bar{Z}_{0L2} = 2.5 \bar{Z}_{1L2} = (0.05 + j0.15) = 0.158 \angle 71.6^\circ \Omega$
- $L_3$   $\bar{Z}_{1L3} = \bar{Z}_{2L3} = (0.1 + j0.6) = 0.608 \angle 80.5^\circ \Omega$   
 $\bar{Z}_{0L3} = 2.5 \bar{Z}_{1L3} = (0.25 + j1.5) = 1.52 \angle 80.5^\circ \Omega$

- Cálculo de impedancias (todas a 100kV)

- $G_A$   $\bar{X}_{1gA} = \bar{X}_{2gA} = j0.6 \cdot 100 = j60\Omega$   $\bar{X}_{0gA} = 0.4 \bar{X}_{1gA} = j24\Omega$   $\bar{X}_{ngA} = j0.1 \cdot 100 = j10\Omega$
- $G_B$   $\bar{X}_{1gB} = \bar{X}_{2gB} = j0.47 \cdot 100 = j47\Omega$   $\bar{X}_{0gB} = 0.4 \bar{X}_{1gB} = j18.8\Omega$   $\bar{X}_{ngB} = 0\Omega$
- $T_{R1}$   $\bar{X}_{1T1} = \bar{X}_{2T1} = 0.225 \frac{(100)^2}{50} = j45\Omega$   $\bar{X}_{0T1} = 0.9 \bar{X}_{1T1} = j40.5\Omega$   $\bar{X}_{nT1} = j7.5\Omega$

$$\bullet T_{R2} \quad \bar{X}_{1T2} = \bar{X}_{2T2} = 0.1425 \frac{(100)^2}{50} = j28.8\Omega \quad \bar{X}_{0T2} = 0.9 \bar{X}_{1T2} = j25.92\Omega \quad \bar{X}_{nT2} = 0\Omega$$

$$\bullet L_1 \quad \bar{Z}_{1L1} = \bar{Z}_{2L1} = (6 + j12) = 13.4 \angle 63.43^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{oL1} = 2.5 \bar{Z}_{1L1} = (15 + j30) = 33.5 \angle 63.4^\circ \Omega$$

$$\bullet L_2 \quad \bar{Z}_{1L2} = \bar{Z}_{2L2} = (2 + j6) = 6.32 \angle 71.6^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{oL2} = 2.5 \bar{Z}_{1L2} = (5 + j15) = 15.8 \angle 71.6^\circ \Omega$$

$$\bullet L_3 \quad \bar{Z}_{1L3} = \bar{Z}_{2L2} = (10 + j60) = 60.8 \angle 80.5^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{oL3} = 2.5 \bar{Z}_{1L3} = (25 + j150) = 152 \angle 80.5^\circ \Omega$$

• **Relaciones de transformación**

$$m_1 = \frac{100}{10} = 10 \rightarrow m_1^2 = 100 \quad m_2 = \frac{100}{10} = 10 \rightarrow m_2^2 = 100$$

• **Buscamos las impedancias directa, inversa y homopolar vistas desde "C", "E" y "F"**

• **Impedancias vistas desde las Barras "C" (todas las impedancias a 10kV)**

$$\bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{C1} = [(\bar{Z}_{gA} // \bar{Z}_{gB}) + \bar{Z}_{L1}] = [(j0.6 // j0.47) + (0.06 + j0.12)] = j0.2636 + (0.06 + j0.12)\Omega$$

$$\bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{2C} = (0.06 + j0.384) = 0.388 \angle 81.1^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{0C} = [((3X_{ngA} + X_{ogA}) // X_{ogB}) + Z_{oL1}] // [(3X_{nTR1} + Z_{oT1})] =$$

$$\bar{Z}_{oC} = [(3 \cdot j0.1 + j0.24) // j0.188] + (0.15 + j0.3) // [(3 \cdot (j0.075) + j0.405)] =$$

$$\bar{Z}_{0C} = [(j0.54 // j0.188) + (0.15 + j0.3)] // (j0.63) =$$

$$\bar{Z}_{oC} = [(j0.1394) + (0.15 + j0.3)] // (j0.63) = [0.15 + j0.4390] // j0.63 = 0.271 \angle 79.2^\circ = (0.0507 + j0.27)\Omega$$

$$\bar{Z}_C = \bar{Z}_{1C} + \bar{Z}_{2C} + \bar{Z}_{0C} = (0.170 + j1.033) = 1.047 \angle 80.7^\circ \Omega$$

• **Impedancias vistas desde las Barras "E" (todas las impedancias a 100kV)**

$$\bar{Z}_{1E} = \bar{Z}_{2E} = \bar{Z}_{1C} \cdot m_1^2 + (\bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{L2}) = (0.388 \angle 81.1^\circ)100 + (j45 + (2 + j6)) =$$

$$\bar{Z}_{1E} = \bar{Z}_{2E} = 38.8 \angle 81.1^\circ + (2 + j51) = (8 + j89.3) = 89.7 \angle 84.9^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{oE} = \bar{Z}_{oTR2} = j25.92\Omega$$

$$\bar{Z}_E = (16 + j204.5) = 205.14 \angle 85.5^\circ \Omega$$

• **Impedancias vistas desde las Barras "F" (todas las impedancias a 10kV)**

$$\bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} = \frac{\bar{Z}_{E1}}{m_2^2} \bar{Z}_{1E} + (\bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L3}) = \frac{89.7 \angle 84.9^\circ}{10^2} + (j0.288 + (0.1 + j0.6)) =$$

$$\bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} = 0.897 \angle 84.9^\circ + (0.1 + j8828) = (0.18 + j1.776) = 1.785 \angle 84.2^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{oF} = \infty$$

$$\bar{Z}_F = (0.36 + j\infty) = \infty$$

## 2. Intensidades iniciales de cortocircuito, intensidades máximas asimétricas de cortocircuito e intensidad simétrica de corte (con falta trifásica) en barras "C" (10kV)

- **Corrientes de cortocircuito:** (aplicando las fórmulas correspondientes a cada tipo de cortocircuito)

$$I''_{K3} = \frac{1.1 \cdot Un}{\sqrt{3} \cdot Z_{1C}} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.388 \angle 81.1^\circ} = 16368 \angle -81.1^\circ A$$

$$I''_{K2} = \frac{1.1 \cdot Un}{(Z_{1C} + Z_{2C})} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{2 \cdot 0.388 \angle 81.1^\circ} = 14175.3 \angle -81.1^\circ A$$

$$\bar{I}''_{K1} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot Un}{(\bar{Z}_{1C} + \bar{Z}_{2C} + \bar{Z}_{0C})} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 10000 \angle 0^\circ}{1.047 \angle 80.7^\circ} = 18197 \angle -80.7^\circ A$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I<sub>s</sub>":** (aplicando el coeficiente  $\chi$ , gráfica 12.1)

Para hallar esta corriente es necesario recordar que:

- La corriente máxima asimétrica de cortocircuito "I<sub>s</sub>" se obtiene a partir de la correspondiente corriente de cortocircuito inicial (para cada tipo de cortocircuito), multiplicándola por  $\sqrt{2}$ , y aplicándole un factor corrector " $\chi$ ", hallado en el anexo (gráfica 12.1). En esta gráfica se entra con la relación (R/X) teniendo presente que el valor de estos dos parámetros será diferente dependiendo del tipo de cortocircuito producido.

Las fórmulas a aplicar para hallar la corriente de cierre máxima para los distintos tipos de cortocircuitos son:

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{S3} &= \sqrt{2} \cdot I''_{K3} \cdot X_3 = \sqrt{2} \cdot 16368 \angle -81.1^\circ \cdot 1.62 = 37500 \angle -81.1^\circ A \\ \text{con } \frac{R_1}{X_1} &= \frac{0.06}{0.384} = 0.156 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_3 = 1.62 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{S2} &= \sqrt{2} \cdot I''_{K2} \cdot X_2 = \sqrt{2} \cdot 14175.3 \angle -81.1^\circ \cdot 1.62 = 32476 \angle -81.1^\circ A \\ \text{Con } \frac{R_1 + R_2}{X_1 + X_2} &= \frac{2 \cdot 0.06}{2 \cdot 0.384} = 0.156 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_2 = 1.62 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{S1} &= \sqrt{2} \cdot I''_{K1} \cdot X_1 = \sqrt{2} \cdot 18197 \angle -80.17^\circ \cdot 1.61 = 41432 \angle -80.17^\circ A \\ \text{Con } \frac{R_1 + R_2 + R_0}{X_1 + X_2 + X_0} &= \frac{0.170}{1.033} = 0.164 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_1 = 1.61 \end{aligned}$$

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será:** (valores de " $\mu$ ", y " $q$ ", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos.)

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "C", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = I''_{K3} \cdot \mu \cdot q = I_{agA} + I_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes:

- Coeficiente  $\mu$ : se obtiene en las gráficas 12.2 de los anexos para cada generador (existirán tantos  $\mu$ , como generadores síncronos tenga el sistema de potencia). En dichas gráficas, se entra con la relación ( $I''_{K3}/I_n$ ) por el eje de las abscisas, obteniéndose en el eje de las ordenadas el valor correspondiente del coeficiente  $\mu$ . Hallar los valores de las intensidades nominales de los diversos generadores no es problema (ver fórmula adjunta). El problema lo constituye el encontrar la corriente de cortocircuito trifásica que sale de cada uno de los generadores síncronos del sistema. Decimos que es difícil ya que partimos del valor de la corriente de cortocircuito trifásico en el punto de cortocircuito, y con este valor, y mediante divisores de intensidad, debemos hallar las contribuciones que cada fuente de energía aporta a esta corriente total. Recordaremos, finalmente, que es

imprescindible trabajar siempre con el mismo nivel de tensión, es decir, no podemos mezclar diferentes niveles de tensión; para ello, se realizarán las conversiones oportunas, pero recordando que si cambiamos un nivel de tensión (paso a través de un transformador), resulta imprescindible cambiar todos los parámetros eléctricos asociados (intensidades, impedancias, etc).

- Coeficiente "q": se obtiene en las gráficas 12.3 de los anexos para cada motor asíncrono (existirán tantos "q" como motores asíncronos tenga el sistema de potencia). La obtención de este coeficiente es mucho más sencilla que la obtención del coeficiente anterior ( $\mu$ ), ya que bastará con conocer la potencia activa real (en MW) del motor (o grupo de motores) dividida por el número de polos del mismo, es decir, (MW/pp). Con este valor y entrando por las abscisas de la gráfica 12.3, se lee en las ordenadas cada uno de los diferentes "q" del sistema. No hacen falta, por tanto, divisores de intensidad, ni conocer donde se ha producido el cortocircuito, ni la intensidad de cortocircuito, simplemente el coeficiente "q" depende de la potencia de los motores y de su número de polos, siendo independiente de las otras magnitudes eléctricas.
- Una vez se han obtenido los coeficientes " $\mu$ " y "q" para cada una de las máquinas eléctricas del circuito (generadores síncronos, y motores asíncronos respectivamente), ya podemos buscar las correspondientes "Ia" (una para cada máquina eléctrica). La "Ia" que nos interesa es la total (Ia del punto de cortocircuito), por tanto, debemos ir sumando cada una de las "Ia" parciales obtenidas en cada máquina hasta llegar al punto de cortocircuito. La suma total de todas las contribuciones será la "Ia" pedida (atención a los cambios de tensión que cada una de estas intensidades parciales puede sufrir hasta llegar al punto de cortocircuito, con todo lo que esto conlleva).
- Finalmente, si cambiamos de punto de cortocircuito la "q" no cambiará, es indiferente a estos cambios, pero la " $\mu$ " sí cambiará, ya que la intensidad de cortocircuito que salga de cada generador síncrono depende exclusivamente del valor que tome la intensidad total de cortocircuito en el punto de cortocircuito, y el valor de esta intensidad total de cortocircuito depende del punto donde se produzca el cortocircuito. Es decir, para cada punto de cortocircuito, existirá una "Ia".

Operando en consecuencia con lo comentado anteriormente, y para las barras "C", tendremos:

$$\bar{I}_{aC} = I_{k3}'' \cdot \mu \cdot q = I_{ogA} + I_{ogB} = (5248.5 + j7067.3) = 12315.8 \angle -81.1^\circ A$$

$$I_{ng1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 1154.7 A$$

$$I_{ng2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 1732 A$$

Si  $\bar{I}_{k3C}'' = 16368 \angle -81.1^\circ A$  La aportación de cada generador será:

$$\bar{I}_{g1}^{K3} = \bar{I}_{C}^{K3} \frac{\bar{Z}_{gB}}{\bar{Z}_{gB} + \bar{Z}_{gA}} = 16368 \angle -81.1^\circ \frac{j0.47}{(j0.47 + j0.6)} = 7189.7 \angle -81.1^\circ A$$

$$\bar{I}_{g2}^{K3} = \bar{I}_{C}^{K3} \frac{\bar{Z}_{gA}}{\bar{Z}_{gB} + \bar{Z}_{gA}} = 16368 \angle -81.1^\circ \frac{j0.6}{(j0.47 + j0.6)} = 9178.3 \angle -81.1^\circ A$$

$$\text{Entonces } \frac{I_{gA}^{K3}}{I_{ngA}} = \frac{7189.7}{1154.7} = 6.22 \quad \frac{I_{gB}^{K3}}{I_{ngB}} = \frac{9178.3}{1732} = 5.3 \quad (\text{con un } tv=0.1sg)$$

$$\mu_{gA} = 0.73 \quad \mu_{gB} = 0.77$$

$$I_{ogA} = I_{gA}^{K3} \cdot \mu_{gA} \cdot q_{gA} = 7189.7 \angle -81.1^\circ \cdot 0.73 \cdot 1 = 5248.5 \angle -81.1^\circ A$$

$$I_{ogB} = I_{gB}^{K3} \cdot \mu_{gB} \cdot q_{gB} = 9178.3 \angle -81.1^\circ \cdot 0.77 \cdot 1 = 7067.3 \angle -81.1^\circ A$$

### 3. Intensidades iniciales de cortocircuito, intensidades máximas asimétricas de cortocircuito e intensidad simétrica de corte (con falta trifásica) en barras "E" (100kV)

- **Corrientes de cortocircuito:** (aplicando las fórmulas correspondientes a cada tipo de cortocircuito).

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3}^* &= \frac{1.1 \cdot 100000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 89.7 \angle 84.9^\circ} = 708 \angle -84.9^\circ A \\ \bar{I}_{k2}^* &= \frac{1.1 \cdot 100000 \angle 0^\circ}{2 \cdot 89.7 \angle 84.9^\circ} = 613.15 \angle -84.9^\circ A \\ \bar{I}_{k1}^* &= \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 100000 \angle 0^\circ}{205.14 \angle 85.5^\circ} = 928.8 \angle -85.5^\circ A\end{aligned}$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I<sub>s</sub>":** (aplicando el coeficiente  $\chi$ , gráfica 12.1)

Recordando todo lo expuesto en la primera pregunta de este problema sobre la intensidad "I<sub>a</sub>" y a la cual nos remitimos para su correcta asimilación, las fórmulas a aplicar para hallar la corriente de cierre máxima, para los distintos tipos de cortocircuitos, son:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{S3}^* &= \sqrt{2} \cdot 708 \angle -84.9^\circ \cdot 1.74 = 1742.2 \angle -84.9^\circ A \\ &\text{con } \frac{R_1}{X_1} = \frac{8}{89.3} = 0.09 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_3 = 1.74 \\ \bar{I}_{S2}^* &= \sqrt{2} \cdot 613.15 \angle -84.9^\circ \cdot 1.74 = 1508.12 \angle -84.9^\circ A \\ &\text{con } \frac{R_1 + R_2}{X_1 + X_2} = \frac{2.8}{2 \cdot 89.3} = 0.09 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_2 = 1.74 \\ \bar{I}_{S1}^* &= \sqrt{2} \cdot 928.8 \angle -85.5^\circ \cdot 1.78 = 2338 \angle -85.5^\circ A \\ &\text{con } \frac{R_1 + R_2 + R_0}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{16}{204.5} = 0.078 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_1 = 1.78\end{aligned}$$

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será:** (valores de "μ" y "q", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos):

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "E", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = I_{k3}^* \cdot \mu \cdot q = I_{agA} + I_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta de este problema, y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

Operando en consecuencia para estas barras "E", tendremos:

$$I_a = I_k^* \cdot \mu \cdot q \quad \text{No hay motores, por tanto } q=1$$

Partimos de:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3}^* &= 708 \angle -84.9^\circ A \text{ que pasada al otro extremo del transformador (barras "C"), nos da:} \\ \bar{I}_{k3}^* &= 7080 \angle -84.9^\circ A\end{aligned}$$

Por tanto, la contribución de cada generador será, aplicando los divisores de intensidad:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{gAK3}^* &= 7080 \angle -84.9^\circ \frac{j0.47}{(j0.47 + j0.6)} = 3110 \angle -84.9^\circ A \\ I_{ngA} &= 1154.7 A \\ \bar{I}_{gBK3}^* &= 7080 \angle -84.9^\circ \frac{j0.6}{(j0.47 + j0.6)} = 3970 \angle -84.9^\circ A \\ I_{ngB} &= 1732 A\end{aligned}$$

Entonces:

$$\frac{I_{K3gA}''}{I_{ngA}} = \frac{3110}{1154.7} = 2.69 \rightarrow \mu_{gA} = 0.92 \text{ con } tv=0.1s \text{ (gráfica 12.2).}$$

$$\frac{I_{K3gB}''}{I_{ngB}} = \frac{3970}{1732} = 2.292 \rightarrow \mu_{gB} = 0.98 \text{ con } tv=0.1s \text{ (gráfica 12.2).}$$

$$I_{agA} = 3110 \angle -84.9^\circ \cdot 0.92 = 2861.2 \angle -84.9^\circ A$$

$$I_{agB} = 3970 \angle -84.9^\circ \cdot 0.98 = 3890.6 \angle -84.9^\circ A$$

$$I_{a_3E} = 6751.8 \angle -84.9^\circ A$$

$$\bar{I}_{a_3E}' = \frac{\bar{I}_{a_3E}}{m_1} = 675.18 \angle -84.9^\circ A$$

#### 4. Intensidades iniciales de cortocircuito, intensidades máximas asimétricas de cortocircuito e intensidad simétrica de corte (con falta trifásica) en barras "F" (10kV)

- **Corrientes de cortocircuito:** (aplicando las fórmulas correspondientes a cada tipo de cortocircuito).

$$\bar{I}_{K3}'' = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.785 \angle 84.2^\circ} = 3557.9 \angle -84.2^\circ A$$

$$\bar{I}_{K2}'' = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{2 \cdot 1.785 \angle 84.2^\circ} = 3081.2 \angle -84.2^\circ A$$

$$\bar{I}_{K1}'' = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\infty} = 0 A$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I<sub>s</sub>":** (aplicando el coeficiente  $\chi$ , gráfica 12.1).

Recordando todo lo expuesto en la primera pregunta de este problema sobre la intensidad "I<sub>s</sub>", y a la cual nos remitimos para su correcta asimilación:

Las fórmulas a aplicar para hallar la corriente de cierre máxima, para los distintos tipos de cortocircuitos, son:

$$\bar{I}_{S3} = \sqrt{2} \cdot 3557.9 \angle -84.2^\circ \cdot 1.72 = 8654.4 \angle -84.2^\circ A$$

$$\text{con } \frac{R_1}{X_1} = \frac{0.18}{1.776} = 0.1 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_3 = 1.72$$

$$\bar{I}_{S2} = \sqrt{2} \cdot 3081.2 \angle -84.2^\circ \cdot 1.72 = 7495 \angle -84.2^\circ A$$

$$\text{con } \frac{R_1 + R_2}{X_1 + X_2} = \frac{2 \cdot 0.18}{2 \cdot 1.776} = 0.1 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_2 = 1.72$$

$$\bar{I}_{S1} = \sqrt{2} \cdot 0 \cdot X = 0 A$$

$$\text{con } \frac{R_1 + R_2 + R_0}{X_1 + X_2 + X_0} = \infty \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_1 = 0$$

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será:** (valores de "μ" y "q", hallados en las tablas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos).

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "F", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = I_{K3}'' \cdot \mu \cdot q = I_{agA} + I_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta de este problema, y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

Operando en consecuencia para estas barras "F", tendremos:

$$\bar{I}_{aF} = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB} = 1562.8 \angle -84.2^\circ \cdot 1.1 + 1995 \angle -84.2^\circ \cdot 1.1 = 3557.9 \angle -84.2^\circ A$$

Con  $I_{ngA} = 1154.7A$        $I_{ngB} = 1732A$

Si la  $\bar{I}_{K3}^* = 3557.9 \angle -84.2^\circ A$  Entonces la aportación de cada generador será:

$$\bar{I}_{gAK3}^* = 3557.9 \angle -84.2^\circ \frac{j0.47}{j1.07} = 1562.8 \angle -84.2^\circ A$$

$$\bar{I}_{gBK3}^* = 3557.9 \angle -84.2^\circ \frac{j0.6}{j1.07} = 1995 \angle -84.2^\circ A$$

Por lo tanto el coeficiente  $\mu$  de cada generador será:

$$\frac{I_{K3gA}^*}{I_{ngA}} = \frac{1562.8}{1154.7} = 1.353 \rightarrow \mu_{gA} = 1 \text{ con } tv=0.1s \text{ (gráfica 12.2).}$$

$$\frac{I_{K3gB}^*}{I_{ngB}} = \frac{1995}{1732} = 1.15 \rightarrow \mu_{gB} = 1 \text{ con } tv=0.1s \text{ (gráfica 12.2).}$$

Nótese que no es posible rebajar la corriente de apertura "Ia" coincidiendo ésta con la corriente de cortocircuito trifásica "I<sub>k3</sub>". Ese resultado es completamente lógico si tenemos presente que las barras estudiadas ("F") están muy alejadas de los generadores síncronos trifásicos.

## PROBLEMA 3.4

El esquema de la figura representa una sección de una red eléctrica trifásica alimentada por tres generadores situados en los extremos del sistema de potencia. A efectos de diseño de los interruptores de protección y para conocer la respuesta del circuito en diversos puntos del mismo ante situaciones anómalas, funcionando los generadores sin carga y a la tensión nominal y con los siguientes datos:

## DATOS

$G_1$ :	.....40MVA.....10KV.....	$X''_d=X_1=X_2=20\%$ .....	$X_o=6\%$ .....	$X_n=j4\Omega$ .
$G_2$ :	.....100MVA.....10KV.....	$X''_d=X_1=X_2=20\%$ .....	$X_o=10\%$ .....	$X_n=0$ .
$G_3$ :	.....25MVA.....25KV.....	$X''_d=X_1=X_2=25\%$ .....	$X_o=10\%$ .....	$X_n=0$ .
$T_{R1}$ y $T_{R2}$ :	.....20MVA.....110/10KV.....	$\epsilon_{cc}=X_1=X_2=9\%$ .....	$X_o=0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n=0$
$T_{R3}$ :	.....60MVA.....110/25KV.....	$\epsilon_{cc}=X_1=X_2=10\%$ .....	$X_o=0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n=0$
$T_{R4}$ :	.....100MVA.....110/10KV.....	$\epsilon_{cc}=X_1=X_2=8\%$ .....	$X_o=0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n=0$
$L_1$ :	.....	$X_1=X_2=j30\Omega$ .....	$X_o=j50\Omega$	
$L_2$ :	.....	$X_1=X_2=j30\Omega$ .....	$X_o=j60\Omega$	
$L_3$ :	.....	$X_1=X_2=j40\Omega$ .....	$X_o=j90\Omega$	

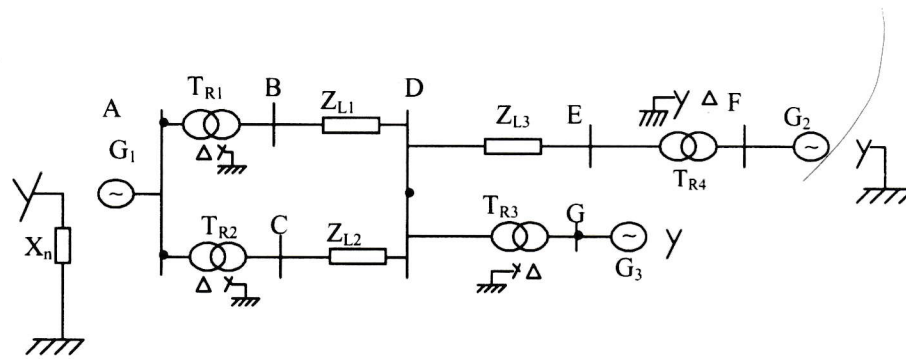


Figura 3.4 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.4

## HALLAR

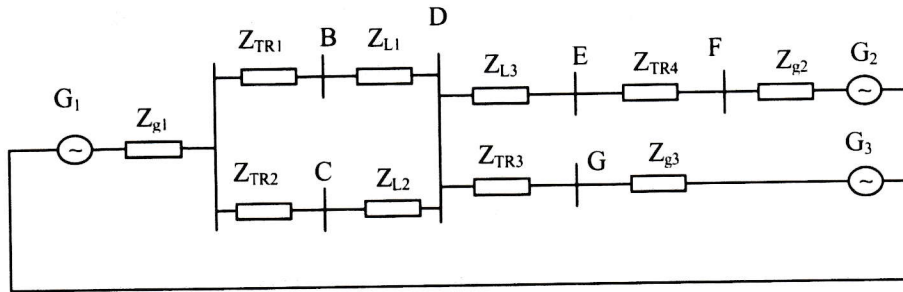
- 1 Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar, de la red representada.
- 2 En el supuesto de producirse unos cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, trifásicos) en las barras de interconexión "D", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- 3 En el supuesto de que se produzcan los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "F", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- 4 Si se produce en barras "D" un cortocircuito fase-fase-tierra, indicar las corrientes de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k2ES}$ ,  $I''_{k2ET}$ ,  $I''_{k2EE}$ ).

## RESOLUCIÓN

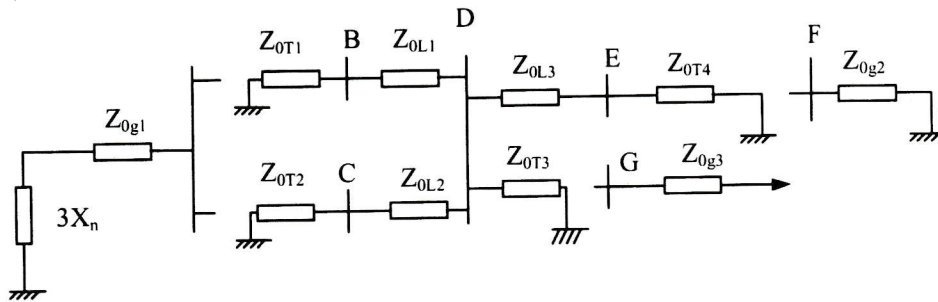
## 1. Redes de secuencia directa, indirecta y homopolar

Las redes de secuencia del circuito de potencia son las mostradas a continuación, recordando que la secuencia inversa es idéntica a la red directa, pero sin las fuentes generadoras, aunque sí con sus impedancias.

- Red de secuencia directa e inversa (la red inversa no incorpora los generadores)



- Red de secuencia homopolar



- Cálculo de impedancias (todas las impedancias están calculadas a 10kV)

• G <sub>1</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.20 \frac{(10)^2}{40} = j0.5\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.06 \frac{(10)^2}{40} = j0.15\Omega$	X <sub>n</sub> =j4Ω
• G <sub>2</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.20 \frac{(10)^2}{100} = j0.2\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.1 \frac{(10)^2}{100} = j0.10\Omega$	X <sub>n</sub> =0Ω
• G <sub>3</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.25 \frac{(25)^2}{25} = j6.25\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.1 \frac{(25)^2}{25} = j2.5\Omega$	X <sub>n</sub> =0Ω
	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j6.25}{\left(\frac{25}{10}\right)^2} = j1\Omega$	$\bar{X}_0 = \frac{j2.5}{\left(\frac{25}{10}\right)^2} = j0.4\Omega$	X <sub>n</sub> =0Ω
• T <sub>R1</sub> =T <sub>R2</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.09 \frac{(10)^2}{20} = j0.45\Omega$	$\bar{X}_0 = j0.405\Omega$	X <sub>n</sub> =0Ω
• T <sub>R3</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.10 \frac{(25)^2}{60} = j1.04\Omega$	$\bar{X}_0 = j0.936\Omega$	X <sub>n</sub> =0Ω
	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j1.04}{\left(\frac{25}{10}\right)^2} = j0.166\Omega$	$\bar{X}_0 = j0.15\Omega$	X <sub>n</sub> =0Ω
• T <sub>R4</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(10)^2}{100} = j0.08\Omega$	$\bar{X}_0 = j0.072\Omega$	X <sub>n</sub> =0Ω
• L <sub>1</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j30}{\left(\frac{110}{10}\right)^2} = j0.25\Omega$	$\bar{X}_0 = \frac{j50}{11^2} = j0.41\Omega$	
• L <sub>2</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j30}{11^2} = j0.25\Omega$	$\bar{X}_0 = \frac{j60}{11^2} = j0.496\Omega$	

$$\bullet L_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j40}{11^2} = j0.33\Omega \quad \bar{X}_0 = \frac{j90}{11^2} = j0.74\Omega$$

• **Cálculo de impedancias (todas las impedancias están calculadas a 110kV)**

$$\bullet G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j0.5 \cdot 11^2 = j60.5\Omega \quad \bar{X}_0 = j0.15 \cdot 11^2 = j18.15\Omega \quad X_n = j44\Omega$$

$$\bullet G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j0.2 \cdot 11^2 = j24.2\Omega \quad \bar{X}_0 = j0.1 \cdot 11^2 = j12.1\Omega \quad X_n = 0\Omega$$

$$\bullet G_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j6.25 \left( \frac{110}{25} \right)^2 = j121\Omega \quad \bar{X}_0 = j2.5 \left( \frac{110}{25} \right)^2 = j48.4\Omega \quad X_n = 0\Omega$$

$$\bullet T_{R1}=T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.09 \frac{(110)^2}{20} = j54.45\Omega \quad \bar{X}_0 = j54.45 \cdot 0.9 = j49\Omega \quad X_n = 0\Omega$$

$$\bullet T_{R3} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.10 \frac{(110)^2}{60} = j20.14\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.9 \cdot j20.14 = j18.11\Omega \quad X_n = 0\Omega$$

$$\bullet T_{R4} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(110)^2}{100} = j9.68\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.9 \cdot j9.68 = j8.71\Omega \quad X_n = 0\Omega$$

$$\bullet L_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j30\Omega \quad \bar{X}_0 = j50\Omega$$

$$\bullet L_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j30\Omega \quad \bar{X}_0 = j60\Omega$$

$$\bullet L_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j40\Omega \quad \bar{X}_0 = j90\Omega$$

**Notas:**

Es importante recordar que los puntos de cortocircuitos pedidos se hallan a 10kV y 110kV. No nos piden ningún resultado a 25kV (generador  $G_3$ ), por tanto, sólo buscaremos las impedancias a los dos niveles de tensión de 10kV, y 110kV requeridos, no importando las impedancias a 25kV.

• **Relaciones de transformación**

$$m_1 = m_2 = \frac{110}{10} = 11 \quad m_3 = \frac{110}{25} = 4.4 \quad m_4 = \frac{110}{10} = 11$$

• **Buscamos las impedancias directa, inversa y homopolar vistas desde "D" y desde "F".**

• **Impedancias vistas desde las Barras "D" (110kV)**

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1D} = \bar{Z}_{2D} &= \left[ \bar{Z}_{g1} + (\bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{L1}) // (\bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L2}) \right] // \left[ (\bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{TR4} + \bar{Z}_{g2}) // (\bar{Z}_{TR3} + \bar{Z}_{g3}) \right] = \\ \bar{Z}_{1D} = \bar{Z}_{2D} &= [j60.5 + (j84.45 // j84.45)] // [(j73.88) // (j141.14)] = (j102.7) // (j73.88 // j141.14) = \\ \bar{Z}_{1D} = \bar{Z}_{2D} &= (j102.7 // j48.49) = 32.95 \angle 90^\circ = (0 + j32.95)\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{oD} &= \left[ (\bar{Z}_{0T1} + \bar{Z}_{0L1}) // (\bar{Z}_{0T2} + \bar{Z}_{0L2}) \right] // \left[ (\bar{Z}_{0L3} + \bar{Z}_{0T4}) // (\bar{Z}_{0T3}) \right] = \\ \bar{Z}_{oD} &= [j99 // j109] // [(j98.71) // (j18.11)] = (j51.88 // j15.30) = \\ \bar{Z}_{oD} &= 11.82 \angle 90^\circ = (0 + j11.82)\Omega \end{aligned}$$

y por tanto:

$$\bar{Z}_{TD} = \bar{Z}_{1D} + \bar{Z}_{2D} + \bar{Z}_{oD} = 77.72 \angle 90^\circ = (0 + j77.72)\Omega$$

• **Impedancias vistas desde las Barras "F" (10kV)**

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= \left[ \left[ \bar{Z}_{g1} + (\bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{L1}) // (\bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L2}) \right] // (\bar{Z}_{TR3} + \bar{Z}_{g3}) \right] + (\bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{TR4}) // \left[ \bar{Z}_{g2} \right] = \\ \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= \left[ [j0.5 + (j0.7 // j0.7)] // (j1.166) \right] + (j0.41) // [j0.2] = [(j0.85 // j1.166) + j0.41] // (j0.2) = \\ \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= ((j0.49 + j0.41) // j0.2) = (j0.9 // j0.2) = (0 + j0.164) = 0.164 \angle 90^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{oF} = \bar{Z}_{og2} = (0 + j0.1) = 0.1 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{TF} = \bar{Z}_{oF} + \bar{Z}_{1F} + \bar{Z}_{2F} = (0 + j0.428) = 0.428 \angle 90^\circ \Omega$$

**2. Las corrientes de cortocircuito monofásico, bifásico y trifásico; corrientes máximas asimétricas; corriente simétrica de corte y tensiones con un cortocircuito en "D" (110kV) son:**

- **Corrientes de cortocircuito:** (aplicando las fórmulas correspondientes a cada tipo de cortocircuito)

$$\bar{I}_{K1}^n = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 110000 \angle 0^\circ}{72.72 \angle 90^\circ} = 2696.6 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K2}^n = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (32.95 \angle 90^\circ)} = 1836 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3}^n = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 32.95 \angle 90^\circ} = 2120 \angle -90^\circ A$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I<sub>s</sub>":** (aplicando el coeficiente  $\chi$ , gráfica 12.1)

Recordar que en este caso se han omitido todas las resistencias, y por tanto todo son reactancias inductivas, resultando el coeficiente  $\chi=2$ , en todos los casos. Las fórmulas a aplicar para hallar la corriente de cierre máxima, para los distintos tipos de cortocircuitos, son:

$$\bar{I}_{S1} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (2696.6 \angle -90^\circ) = 7627 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S2} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1836 \angle -90^\circ) = 5193 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S3} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (2120 \angle -90^\circ) = 5996.2 \angle -90^\circ A$$

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será:** (valores de "μ" y "q", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos)

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "D", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = \bar{I}_{k3}^n \cdot \mu \cdot q = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta del problema 3.3, y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

Operando en consecuencia para estas barras "D", tendremos:

$$\bar{I}_{K3}^n = 2120 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3g2g3}^n = 2120 \angle -90^\circ \left( \frac{102.7 \angle 90^\circ}{151.2 \angle 90^\circ} \right) = 1440 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3g2}^n = 1440 \angle -90^\circ \frac{141.14 \angle 90^\circ}{215 \angle 90^\circ} = 945 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3g3}^n = 1440 \angle -90^\circ \frac{73.88 \angle 90^\circ}{215 \angle 90^\circ} = 495 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3g1}^n = 2120 \angle -90^\circ \left( \frac{48.5 \angle 90^\circ}{151.2 \angle 90^\circ} \right) = 680 \angle -90^\circ A$$

Las intensidades nominales de cada generador son:

$$I_{ng1} = \frac{40 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 2309.4 \text{ A}$$

$$I_{ng2} = \frac{100 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 5773.5 \text{ A}$$

$$I_{ng3} = \frac{25 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 577.35 \text{ A}$$

Por tanto (recordar que las intensidades de cortocircuito están halladas a 110kV, mientras que las nominales de los generadores están halladas a 10kV (para los generadores  $g_1$  y  $g_2$ ) y a 25kV ( $g_3$ )):

$$\frac{I_{K3g1}''}{I_{ng1}} = \frac{680}{2309.4} = 3.24 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_1 = 0.87$$

$$\frac{I_{K3g2}''}{I_{ng2}} = \frac{945}{5773.5} = 1.81 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_2 = 1$$

$$\frac{I_{K3g3}''}{I_{ng3}} = \frac{495}{577.35} = 3.8 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_3 = 0.82$$

$$m_3 = \left( \frac{110}{25} \right)$$

$$\bar{I}_{ad} = (680 \angle -90^\circ) \cdot 1 \cdot 0.87 + (945 \angle -90^\circ) \cdot 1 \cdot 1 + (495 \angle -90^\circ) \cdot 1 \cdot 0.82 = 1942.45 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Estos valores ya están todos a 110kV.

#### • Las tensiones en el punto "D" (110kV)

Su resolución consiste simplemente en la aplicación de las fórmulas dadas para cada tensión y cada tipo de cortocircuito, pudiéndose hallarse éstas en los anexos correspondientes.

$$\bullet \bar{V}_{3R} = \bar{V}_{3S} = \bar{V}_{3T} = 0$$

$$\bullet \bar{V}_2 = \frac{c \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3}} \frac{2\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{1.1 \cdot 11000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \frac{2 \cdot 32.95 \angle 90^\circ}{2 \cdot 32.95 \angle 90^\circ} = 69859.4 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\bullet \bar{V}_{2T} = \sqrt{3} \cdot c \cdot \bar{U}_n \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} = \sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ \frac{389.4 \angle 180^\circ}{1864.6 \angle 180^\circ} = 43768 \angle 0^\circ \text{ V}$$

#### 3. Las corrientes de cortocircuito monofásico, bifásico y trifásico; corrientes máximas asimétricas y corriente simétrica de corte, con un cortocircuito en barras "F" (10kV)

- **Corrientes de cortocircuito:** (aplicando las fórmulas correspondientes a cada tipo de cortocircuito)

$$\bar{I}_{K1}'' = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 10000 \angle 0^\circ}{0.428 \angle 90^\circ} = 44515.3 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{K2}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (0.164 \angle 90^\circ)} = 33537 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{K3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.164 \angle 90^\circ} = 38725 \angle -90^\circ \text{ A}$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I<sub>s</sub>":** (aplicando el coeficiente  $\chi$ , gráfica 12.1)

Recordando que solo existen reactancias inductivas y que las resistencias han sido omitidas, el coeficiente  $\chi=2$ , siempre. Las fórmulas a aplicar para hallar la corriente de cierre máxima, para los distintos tipos de cortocircuitos, son:

$$\bar{I}_{S1} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (44515 \angle -90^\circ) = 125907 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{S2} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (33537 \angle -90^\circ) = 94857 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{S3} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (38725 \angle -90^\circ) = 109530 \angle -90^\circ \text{ A}$$

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será (todas a 10kV):** (valores de " $\mu$ " y " $q$ ", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos)

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "F", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = \bar{I}''_{k3} \cdot \mu \cdot q = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta del problema 3.3, y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

Operando en consecuencia para estas barras "F", tendremos:

$$\bar{I}''_{k3} = 38725 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}''_{K3g2} = 38725 \angle -90^\circ \frac{0.9 \angle 90^\circ}{1.1 \angle 90^\circ} = 31684 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}''_{K3g1, g3} = 38725 \angle -90^\circ \frac{0.2 \angle 90^\circ}{1.1 \angle 90^\circ} = 7041 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}''_{K3g1} = 7041 \angle -90^\circ \frac{1.166 \angle 90^\circ}{2.016 \angle 90^\circ} = 4072.3 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}''_{K3g3} = 7041 \angle -90^\circ \frac{0.85 \angle 90^\circ}{2.016 \angle 90^\circ} = 2968.7 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Recordar que las intensidades nominales halladas a 10kV ( $g_1$  y  $g_2$ ) y 25kV ( $g_3$ ) son:

$$I_{ng1} = \frac{40 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 2309.4 \text{ A}$$

$$I_{ng2} = \frac{100 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 5773.5 \text{ A}$$

$$I_{ng3} = \frac{25 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 577.35 \text{ A}$$

Por tanto las relaciones intensidad de cortocircuito, intensidad nominal serán (a igual nivel de tensión):

$$\frac{I''_{K3g1}}{I_{ng1}} = \frac{4072.3}{2309.4} = 1.76 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_1 = 1$$

$$\frac{I''_{K3g2}}{I_{ng2}} = \frac{31684}{5773} = 5.5 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_2 = 0.75$$

$$\frac{I''_{K3g3}}{I_{ng3}} = \frac{2968.7}{577.35} = \frac{2968.7}{577.35} \cdot \frac{11}{4.4} = \frac{2968.7}{1443.4} = 2.05 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_3 = 1$$

$$\bar{I}_{aF} = (4072.3 \angle -90^\circ) \cdot 1.1 + (31684 \angle -90^\circ) \cdot 1.0.75 + (2968.7 \angle -90^\circ) \cdot 1.1 = 30804 \angle -90^\circ \text{ A}$$

#### 4. Delante una falta bifásica a tierras en el punto "D", las corrientes que se originarán serán:

- Calculamos la  $I''_{K2EE}$  en las barras "D"

Su resolución consiste simplemente en la aplicación de las fórmulas dadas para este tipo de cortocircuito, tanto referentes a tensiones como a intensidades. Estas fórmulas pueden ser consultadas en los anexos correspondientes. (Los valores de las impedancias son los valores que las mismas toman en el punto de cortocircuito, es decir, las totales.)

**Nota: recordar que:**  $\bar{a} = 1\angle 0^\circ$      $\bar{a}^2 = 1\angle 120^\circ$      $\bar{a}^3 = 1\angle 240^\circ$

$$\bar{I}''_{K2Es} = jc\bar{U}_n \frac{\bar{a}\bar{Z}_2 - \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1\bar{Z}_3 + \bar{Z}_2\bar{Z}_0} =$$

$$\bar{I}''_{K2E_T} = -jc\bar{U}_n \frac{\bar{a}^2\bar{Z}_2 - \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1\bar{Z}_3 + \bar{Z}_2\bar{Z}_0} =$$

$$I''_{K2EE} = -\sqrt{3}c\bar{U}_n \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1\bar{Z}_3 + \bar{Z}_2\bar{Z}_0} =$$

Con:

$$\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1\bar{Z}_0 + \bar{Z}_0\bar{Z}_2 = 1864.6\angle 180^\circ = (-1864.6 + j0)\Omega$$

$$a\bar{Z}_2 - \bar{Z}_0 = 32.95\angle 210^\circ - 11.82\angle 90^\circ = 40.18\angle -135.3^\circ \Omega$$

$$a^2\bar{Z}_2 - \bar{Z}_0 = 32.95\angle 330^\circ - 11.82\angle 90^\circ = 40.18\angle -44.8^\circ \Omega$$

Por tanto:

$$\bar{I}''_{K2Es} = 1.1110000 \left( \frac{40.18\angle -135.3^\circ + 90^\circ}{1864.6\angle 180^\circ} \right) = 2607.4\angle 134.7^\circ A = (-1836 + j1853)A$$

$$\bar{I}''_{K2E_T} = 1.1110000 \angle 0^\circ \left( \frac{40.18\angle (-44.8^\circ - 90^\circ)}{1864.6\angle 180^\circ} \right) = 2607.4\angle 45.2^\circ = (1836 + j1850)A$$

---


$$(0 + j3703.2)$$

$$\bar{I}''_{K2EE} = \sqrt{3} \cdot 1.1110000 \angle 0^\circ \left( \frac{32.95\angle 90^\circ}{1864.6\angle 180^\circ} \right) = 3703.5\angle -90^\circ A$$

### PROBLEMA 3.5

El esquema de la figura representa una sección de una red eléctrica trifásica alimentada por dos generadores situados en los extremos del sistema de potencia. A efectos de diseño de los interruptores de protección y para conocer la respuesta del circuito en diversos puntos del mismo ante situaciones anómalas, funcionando los generadores sin carga y a la tensión nominal y con los siguientes datos:

#### DATOS

$G_1$ :	30MVA	30KV	$X''_d=X_1=X_2=16\%$	$X_0=4\%$	$X_n=0$
$G_2$ :	60MVA	30KV	$X''_d=X_1=X_2=18\%$	$X_0=4\%$	$X_n=0$
$T_{R1}$ :	30MVA	120/30KV	$\text{ecc}=X_1=X_2=14\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
$T_{R2}$ :	70MVA	120/30KV	$\text{ecc}=X_1=X_2=12\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
$L_1$ :			$X_1=X_2=j25\Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1$	
$L_2$ y $L_3$ :			$X_1=X_2=j20\Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1$	
$L_4$ :			$X_1=X_2=j22\Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1$	
$L_5$ :			$X_1=X_2=j10\Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1$	

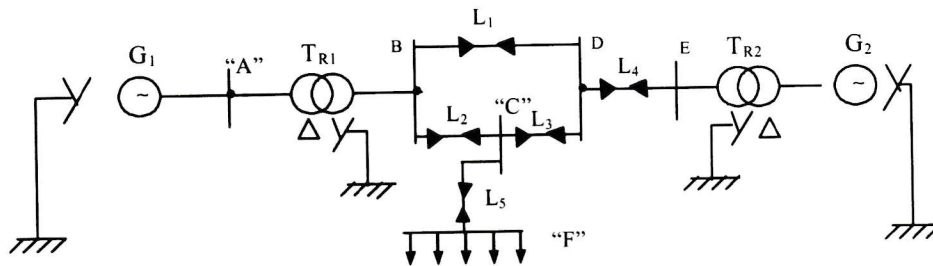


Figura 3.5 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.5

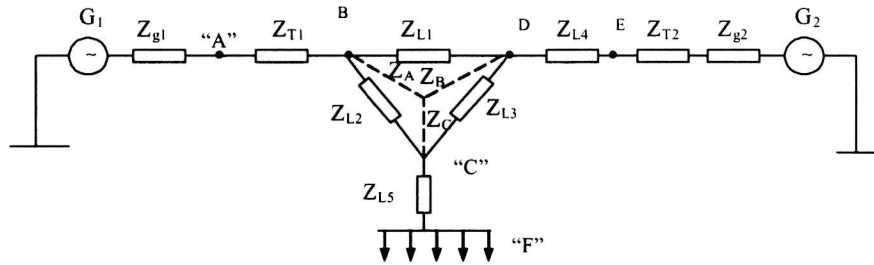
#### HALLAR

- Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar, de la red representada.
- En el supuesto de producirse unos cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, trifásicos) en las barras de interconexión "A", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $Is_1$ ,  $Is_2$ ,  $Is_3$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "C", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $Is_1$ ,  $Is_2$ ,  $Is_3$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores). Finalmente indicar las corrientes de cortocircuito bifásico a tierras ( $I''_{KEE}$ ,  $I''_{KSE}$ ,  $I''_{KTE}$ ) que se producirían en las barras citadas.
- En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "F", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $Is_1$ ,  $Is_2$ ,  $Is_3$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).

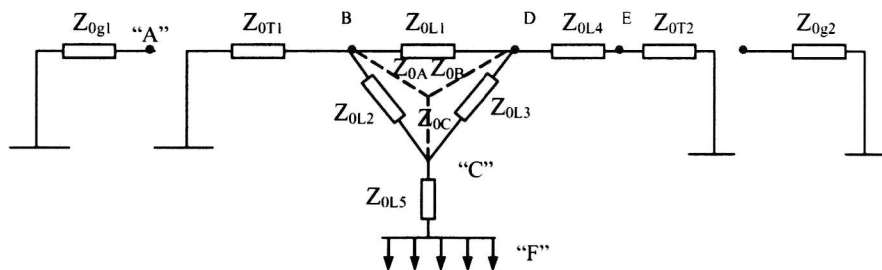
#### RESOLUCIÓN

- Redes de secuencia directa, inversa y homopolar**

• **Red de secuencia directa e inversa (sin los generadores)**



• **Red de secuencia homopolar**



• **Relación de transformación**

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{120}{30} = 4$$

• **Cálculo de impedancias (todas las impedancias están calculadas a 30kV)**

- $G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.16 \frac{(30)^2}{30} = j4.8\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \frac{(30)^2}{30} = j1.2\Omega \quad X_n = j0\Omega$
- $G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.18 \frac{(30)^2}{60} = j2.7\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \frac{(30)^2}{60} = j0.6\Omega \quad X_n = j0\Omega$
- $T_{R1} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.14 \frac{(30)^2}{30} = j4.2\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.9 \cdot X_1 = j3.78\Omega \quad X_n = j0\Omega$
- $T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.12 \frac{(30)^2}{70} = j1.542\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.9 \cdot X_1 = j1.39\Omega \quad X_n = j0\Omega$
- $L_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j25}{\left(\frac{120}{30}\right)^2} = j1.562\Omega \quad \bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j3.91\Omega$
- $L_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j20}{4^2} = j1.25\Omega \quad \bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j3.125\Omega$
- $L_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j20}{4^2} = j1.25\Omega \quad \bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j3.125\Omega$

$$\begin{aligned} \bullet L_4 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= \frac{j22}{4^2} = j1.375\Omega & \bar{X}_0 &= 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j3.44\Omega \\ \bullet L_5 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= \frac{j10}{4^2} = j0.625\Omega & \bar{X}_0 &= 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j1.562\Omega \end{aligned}$$

Nos falta transformar el triángulo formado por las líneas  $Z_{L1}$ ,  $Z_{L2}$  y  $Z_{L3}$ , en una estrella, tal como queda reflejado en las redes de secuencia (si no realizamos la transformación el problema se complicaría en demasía). Para ello aplicaremos las fórmulas de transformación adecuadas, y aparte, teniendo presente los niveles de tensión de trabajo en esta zona (30kV).

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{YA} &= \frac{\bar{Z}_{L1} \cdot \bar{Z}_{L2}}{\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L3}} = \frac{j1.562 \cdot j1.25}{j1.562 + j1.25 + j1.25} = \frac{j1.953}{j4.062} = j0.481\Omega \\ \bar{Z}_{YB} &= \frac{\bar{Z}_{L1} \cdot \bar{Z}_{L3}}{\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L3}} = \frac{j1.562 \cdot j1.25}{j1.562 + j1.25 + j1.25} = \frac{j1.953}{j4.062} = j0.481\Omega \\ \bar{Z}_{YC} &= \frac{\bar{Z}_{L2} \cdot \bar{Z}_{L3}}{\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L3}} = \frac{j1.25 \cdot j1.25}{j1.562 + j1.25 + j1.25} = \frac{j1.562}{j4.062} = j0.385\Omega \end{aligned}$$

Sus correspondientes componentes homopolares son:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{Y_{A0}} &= 2.5 \cdot \bar{Z}_{YA1} = 2.5 \cdot j0.481 = j1.202\Omega \\ \bar{Z}_{Y_{B0}} &= 2.5 \cdot \bar{Z}_{YB1} = 2.5 \cdot j0.481 = j1.202\Omega \\ \bar{Z}_{Y_{C0}} &= 2.5 \cdot \bar{Z}_{YC1} = 2.5 \cdot j0.385 = j0.961\Omega \end{aligned}$$

• **Cálculo de impedancias (todas las impedancias están calculadas a 120kV)**

$$\begin{aligned} \bullet G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j4.8 \left( \frac{120}{30} \right)^2 = j76.8\Omega & \bar{X}_0 &= j1.2 \left( \frac{120}{30} \right)^2 = j19.2\Omega & X_n &= j0\Omega \\ \bullet G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j2.7 \left( \frac{120}{30} \right)^2 = j43.2\Omega & \bar{X}_0 &= j0.6 \left( \frac{120}{30} \right)^2 = j9.6\Omega & X_n &= j0\Omega \\ \bullet TR_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= 0.14 \frac{(120)^2}{30} = j67.2\Omega & \bar{X}_0 &= 0.9 \cdot X_1 = j60.48\Omega & X_n &= j0\Omega \\ \bullet TR_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= 0.12 \frac{(120)^2}{70} = j24.68\Omega & \bar{X}_0 &= 0.9 \cdot X_1 = j22.22\Omega & X_n &= j0\Omega \\ \bullet L_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j25\Omega & \bar{X}_0 &= 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j62.5\Omega \\ \bullet L_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j20\Omega & \bar{X}_0 &= 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j50\Omega \\ \bullet L_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j20\Omega & \bar{X}_0 &= 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j50\Omega \\ \bullet L_4 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j22\Omega & \bar{X}_0 &= 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j55\Omega \\ \bullet L_5 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j10\Omega & \bar{X}_0 &= 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j25\Omega \end{aligned}$$

Transformaremos igualmente el triángulo formado por las líneas  $Z_{L1}$ ,  $Z_{L2}$  y  $Z_{L3}$ , en una estrella, tal como queda reflejado en las redes de secuencia, pero en este caso, considerando el nivel de tensión de 120kV.

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{YA} &= \frac{\bar{Z}_{L1} \cdot \bar{Z}_{L2}}{\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L3}} = \frac{j25 \cdot j20}{j25 + j20 + j20} = \frac{j500}{j65} = j7.692\Omega \\ \bar{Z}_{YB} &= \frac{\bar{Z}_{L1} \cdot \bar{Z}_{L3}}{\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L3}} = \frac{j25 \cdot j20}{j25 + j20 + j20} = \frac{j500}{j65} = j7.692\Omega \\ \bar{Z}_{YC} &= \frac{\bar{Z}_{L2} \cdot \bar{Z}_{L3}}{\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L3}} = \frac{j20 \cdot j20}{j25 + j20 + j20} = \frac{j400}{j65} = j6.15\Omega \end{aligned}$$

Sus correspondientes componentes homopolares son:

$$\bar{Z}_{Y_{Ao}} = 2.5 \cdot \bar{Z}_{Y_{A1}} = 2.5 \cdot j7.692 = j19.23\Omega$$

$$\bar{Z}_{Y_{Bo}} = 2.5 \cdot \bar{Z}_{Y_{B1}} = 2.5 \cdot j7.692 = j19.23\Omega$$

$$\bar{Z}_{Y_{Co}} = 2.5 \cdot \bar{Z}_{Y_{C1}} = 2.5 \cdot j6.15 = j15.38\Omega$$

**Nota:**

*A partir de ahora se trabajará al nivel de tensión que corresponda (30kV para la barra "A" y 120kV para las barras "C" y "F"), pero siempre con la transformación estrella realizada, nunca con el triángulo primitivo.*

- Buscamos las impedancias directa, inversa y homopolar vistas desde "A", "C" y "F"
- Impedancias vistas desde las Barras "A" (30kV)

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1A} = \bar{Z}_{2A} &= \left[ \frac{(\bar{Z}_{g2} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_B + \bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1})}{(\bar{Z}_{g1})} \right] = \\ \bar{Z}_{1A} = \bar{Z}_{2A} &= \left[ \frac{(j2.7 + j1.542 + j1.375 + j0.481 + j0.481 + j4.2)}{(j4.8)} \right] = \left[ \frac{(j10.78)}{(j4.8)} \right] = \\ \bar{Z}_{1A} = \bar{Z}_{2A} &= (0 + j3.32) = 3.32 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{0A} = \bar{Z}_{og1} = j1.2\Omega$$

$$\bar{Z}_{TA} = \bar{Z}_{1A} + \bar{Z}_{2A} + \bar{Z}_{0A} = j7.84\Omega$$

- Impedancias vistas desde las Barras "C" (120kV)

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{2C} &= \left[ \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A)}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})} \right] + (\bar{Z}_C) = \\ \bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{2C} &= \left[ \frac{(j76.8 + j67.2 + j7.692)}{(j7.692 + j22 + j24.68 + j43.2)} \right] + (j6.15) = \\ \bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{2C} &= \left[ \frac{(j151.69)}{(j97.57)} \right] + (j6.15) = (j59.38 + j6.15) = (0 + j65.53) = 65.53 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{0C} &= \left[ \frac{(\bar{Z}_{oTR1} + \bar{Z}_{oA})}{(\bar{Z}_{oB} + \bar{Z}_{oL4} + \bar{Z}_{oTR2})} \right] + \bar{Z}_{oC} = \left( \frac{(j60.48 + j19.23)}{(j19.23 + j55 + j22.22)} \right) + j15.38 = \\ \bar{Z}_{0C} &= (j79.71) / (j96.45) + (j15.38) = (j43.64 + j15.38) = (0 + j59.1) = 59.1 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{TC} &= \bar{Z}_{1C} + \bar{Z}_{2C} + \bar{Z}_{0C} = (0 + j190.18) = 190.18 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

- Impedancias vistas desde las Barras "F" (120kV)

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= \left[ \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A)}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})} \right] + (\bar{Z}_C + \bar{Z}_{L5}) = \\ \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= \left[ \frac{(j76.8 + j67.2 + j7.692)}{(j7.692 + j22 + j24.68 + j43.2)} \right] + (j6.15 + j10) = \\ \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= \left[ \frac{(j151.69)}{(j97.57)} \right] + (j16.15) = (j59.38 + j16.15) = (0 + j75.53) = 75.53 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{0F} &= \left[ \frac{(\bar{Z}_{oTR1} + \bar{Z}_{oA})}{(\bar{Z}_{oB} + \bar{Z}_{oL4} + \bar{Z}_{oTR2})} \right] + (\bar{Z}_{oC} + \bar{Z}_{oL5}) = \left( \frac{(j79.71)}{(j96.45)} \right) + (j15.38 + j25) = \\ \bar{Z}_{0F} &= (j43.64) + (j40.38) = (0 + j84.02) = 84.02 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{TF} &= \bar{Z}_{1F} + \bar{Z}_{2F} + \bar{Z}_{0F} = (0 + j235.1) = 235.1 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

## 2. Las corrientes de cortocircuito monofásico, bifásico y trifásico; corrientes máximas asimétricas y la corriente simétrica de corte con un cortocircuito en "A" (30kV) son:

- Corrientes de cortocircuito y corrientes máximas asimétricas de corte "Is" serán:

Para el cálculo de las siguientes intensidades, obtención y significado de los coeficientes a ellas asociados, así como las tablas o gráficas que deben ser consultados, nos remitimos al problema 3.3, donde

de forma extensa, se razonan estas fórmulas y parámetros (recordar que se han despreciado las resistencias de todos los componentes, y por tanto el coeficiente siempre será  $\chi=2$  (tabla 12.1)).

$$\begin{aligned}\bar{I}_{K3A}^* &= \frac{1.1 \cdot 30000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 3.32 \angle 90^\circ} = 5738.7 \angle -90^\circ A & \bar{I}_{S3} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (5738.7 \angle -90^\circ) = 16231.5 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{K2A}^* &= \frac{1.1 \cdot 30000 \angle 0^\circ}{2 \cdot 3.32 \angle 90^\circ} = 4969.8 \angle -90^\circ A & \bar{I}_{S2} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (4969.8 \angle -90^\circ) = 14057 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{K1A}^* &= \frac{1.1 \cdot 30000 \angle 0^\circ \sqrt{3}}{7.84 \angle 90^\circ} = 7290.5 \angle -90^\circ A & \bar{I}_{S1} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (7290.5 \angle -90^\circ) = 20620.6 \angle -90^\circ A\end{aligned}$$

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será:** (valores de "μ", y "q", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos)

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "A", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = I_{k3}^* \cdot \mu \cdot q = I_{agA} + I_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta del problema 3.3, y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

- Partimos de las tensiones nominales de los dos generadores halladas a 30kV:

$$I_{ng1} = \frac{30 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 577.4 A \quad I_{ng2} = \frac{60 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 1155 A$$

- La corriente total de cortocircuito trifásico en barras "A" es:

$$\bar{I}_{K3A}^* = \frac{1.1 \cdot 30000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 3.32 \angle 90^\circ} = 5738.7 \angle -90^\circ A$$

- Mediante divisores de intensidad hallamos las aportaciones que cada generador proporciona a esta corriente total de cortocircuito:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3g1}^* &= 5738.7 \angle -90^\circ \frac{j10.78}{(j10.78 + j4.8)} = \frac{10.78 \angle 90^\circ}{15.58 \angle 90^\circ} = 3970.7 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{k3g2}^* &= 5738.7 \angle -90^\circ \frac{j4.8}{(j10.78 + j4.8)} = \frac{4.8 \angle 90^\circ}{15.58 \angle 90^\circ} = 1768 \angle -90^\circ A\end{aligned}$$

- Con estos valores, los coeficientes μ que tendremos serán para cada generador (recordar que para realizar el cociente es imprescindible que las intensidades nominales y las de cortocircuito se encuentren al mismo nivel de tensión, que en este caso sí coincide a 30kV) con un tiempo  $t_v=0.1s$ :

$$\frac{I_{kg1}^*}{I_{ng1}} = \frac{3970.7}{577.4} = 6.88 \quad \mu_{g1} = 0.72 \quad \frac{I_{kg2}^*}{I_{ng2}} = \frac{1768}{1155} = 1.53 \quad \mu_{g2} = 1$$

- Entonces las intensidades de corte que cada generador aportará (recordar que  $q=1$  siempre, ya que no existen motores asíncronos en el circuito).

$$\begin{aligned}\bar{I}_{ag1} &= \mu_1 \cdot q \cdot I_{k3g1}^* = 0.72 \cdot 1 \cdot (3970.7 \angle -90^\circ) = 2858.9 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{ag2} &= \mu_2 \cdot q \cdot I_{k3g2}^* = 1 \cdot 1 \cdot (1768 \angle -90^\circ) = 1768 \angle -90^\circ A\end{aligned}$$

- Finalmente, la intensidad total de corte en el punto de cortocircuito (barras "A") será:

$$\bar{I}_{aA} = \bar{I}_{ag1} + \bar{I}_{ag2} = 2858.9 \angle -90^\circ + 1768 \angle -90^\circ = 4626.9 \angle -90^\circ A$$

**3. Las corrientes de cortocircuito monofásico, bifásico y trifásico; corriente bifásica a tierras; corrientes máximas asimétricas y la corriente simétrica de corte con un cortocircuito en barras "C" (120kV) son:**

- **Corrientes de cortocircuito y corrientes máximas asimétricas de corte "Is" serán:**

Para el cálculo de las siguientes intensidades, obtención y significado de los coeficientes a ellas asociados, así como las tablas o gráficas que deben ser consultados, nos remitimos al problema 3.3, donde de forma extensa, se razonan estas fórmulas y parámetros (recordar que se han despreciado las resistencias de todos los componentes, y por tanto, el coeficiente siempre será  $\chi=2$  (tabla 12.1)).

$$\begin{aligned} \bar{I}_{K3C}^* &= \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 65.53 \angle 90^\circ} = 1163 \angle -90^\circ \text{ A} & \bar{I}_{S3} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1163 \angle -90^\circ) = 3289 \angle -90^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{K2}^* &= \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (65.53 \angle 90^\circ)} = 1007.2 \angle -90^\circ \text{ A} & \bar{I}_{S2} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1007.2 \angle -90^\circ) = 2848.8 \angle -90^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{K1}^* &= \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \sqrt{3}}{190.16 \angle 90^\circ} = 1202.3 \angle -90^\circ \text{ A} & \bar{I}_{S1} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1202.3 \angle -90^\circ) = 3400.6 \angle -90^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

- **Las corrientes de cortocircuito bifásico a tierras serán:**

- **Calculamos la  $I''_{K2E}$  en las barras "C"**

Su resolución consiste simplemente en la aplicación de las fórmulas dadas para este tipo de cortocircuito, tanto referentes a tensiones como a intensidades. Estas fórmulas pueden ser consultadas en los anexos correspondientes. (Los valores de las impedancias son los valores que las mismas toman en el punto de cortocircuito, es decir, las totales).

**Nota: recordar que:**  $\bar{a} = 1 \angle 0^\circ$      $\bar{a}^{-2} = 1 \angle 120^\circ$      $\bar{a}^{-3} = 1 \angle 240^\circ$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{K2Es}^* &= jc \bar{U}_{nC} \frac{\bar{a} \bar{Z}_2 - \bar{Z}_o}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_3 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_o} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \cdot 108 \angle (-122^\circ + 90^\circ)}{12042 \angle 180^\circ} = 1184 \angle 148^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{K2Et}^* &= -jc \bar{U}_{nC} \frac{\bar{a}^{-2} \bar{Z}_2 - \bar{Z}_o}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_3 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_o} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \cdot 108 \angle (-58.3^\circ - 90^\circ)}{12042 \angle 180^\circ} = 1184 \angle 31.7^\circ \text{ A} \\ I_{K2E}^* &= -\sqrt{3} c \bar{U}_{nC} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_3 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_o} = -\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \frac{65.54 \angle 90^\circ}{12042 \angle 180^\circ} = 1244.3 \angle 90^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Con:

$$\begin{aligned} \bar{a} \bar{Z}_2 - \bar{Z}_o &= 65.54 \angle 210^\circ - 59.1 \angle 90^\circ = (-56.76 - j91.9) = 108 \angle -122^\circ \Omega \\ \bar{a}^{-2} \bar{Z}_2 - \bar{Z}_o &= 65.54 \angle 330^\circ - 59.1 \angle 90^\circ = (-56.76 - j91.9) = 108 \angle -58.3^\circ \Omega \\ \bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_3 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_o &= 12042 \angle 180^\circ \Omega \end{aligned}$$

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será:** (valores de "μ" y "q", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos)

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "C", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = \bar{I}''_{k3} \cdot \mu \cdot q = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta del problema 3.3, y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

- Partimos de las tensiones nominales de los dos generadores halladas a 30kV:

$$I_{ng1} = \frac{30 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 577.4 A$$

$$I_{ng2} = \frac{60 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 1155 A$$

- La corriente total de cortocircuito trifásico en barras "C" es:

$$\vec{I}_{K3C} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 65.53 \angle 90^\circ} = 1163 \angle -90^\circ A$$

- Mediante divisores de intensidad hallamos las aportaciones que cada generador proporciona a esta corriente total de cortocircuito:

$$\vec{I}_{K3g1} = 1163 \angle -90^\circ \frac{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})} = 1163 \angle -90^\circ \frac{97.57 \angle 90^\circ}{249.3 \angle 90^\circ} = 455 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{K3g2} = 1163 \angle -90^\circ \frac{(\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})} = 1163 \angle -90^\circ \frac{151.7 \angle 90^\circ}{249.3 \angle 90^\circ} = 708 \angle -90^\circ A$$

- Con estos valores, los coeficientes  $\mu$  que tendremos serán para cada generador (recordar que para realizar el cociente es imprescindible que las intensidades nominales y las de cortocircuito se encuentren al mismo nivel de tensión, que en este caso no coincide) con un tiempo  $t_v=0.1s$ :

$$\frac{I_{kg1}''}{I_{ng1}} = \frac{455 \left( \frac{120}{30} \right)}{577.4} = 3.15 \quad \mu_{g1} = 0.87 \quad \frac{I_{kg2}''}{I_{ng2}} = \frac{708 \left( \frac{120}{30} \right)}{1155} = 2.45 \quad \mu_{g2} = 0.93$$

- Entonces las intensidades de corte que cada generador aportará (recordar que  $q=1$  siempre, ya que no existen motores asíncronos en el circuito) a 120kV de tensión serán:

$$\vec{I}_{og1} = \mu_1 \cdot q \cdot \vec{I}_{K3g1}'' = 0.87 \cdot 1 \cdot (455 \angle -90^\circ) = 395.87 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{og2} = \mu_2 \cdot q \cdot \vec{I}_{K3g2}'' = 0.93 \cdot 1 \cdot (708 \angle -90^\circ) = 658.4 \angle -90^\circ A$$

- Finalmente, la intensidad total de corte en el punto de cortocircuito (barras "C") será:

$$\vec{I}_{aC} = \vec{I}_{og1} + \vec{I}_{og2} = 395.87 \angle -90^\circ + 658.4 \angle -90^\circ = 1054.2 \angle -90^\circ A$$

#### 4. Las corrientes de cortocircuito monofásico, bifásico y trifásico; corrientes máximas asimétricas y la corriente simétrica de corte con un cortocircuito en "F" (120kV) son:

- Corrientes de cortocircuito y corrientes máximas asimétricas de corte "Is", serán:

Para el cálculo de las siguientes intensidades, obtención y significado de los coeficientes a ellas asociados, así como las tablas o gráficas que deben ser consultados, nos remitimos al problema 3.3, donde de forma extensa, se razonan estas fórmulas y parámetros (recordar que se han despreciado las resistencias de todos los componentes, y por tanto, el coeficiente siempre será  $\chi=2$  (tabla 12.1)).

$$\vec{I}_{K3F} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 7.53 \angle 90^\circ} = 1009 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{S3} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1009 \angle -90^\circ) = 2854 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{K2F} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (75.53 \angle 90^\circ)} = 873.82 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{S2} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (873.82 \angle -90^\circ) = 2471.5 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{K1F} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \cdot \sqrt{3}}{235.1 \angle 90^\circ} = 972.5 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{S1} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (972.5 \angle -90^\circ) = 2750.6 \angle -90^\circ A$$

- La corriente simétrica de corte "I<sub>s</sub>" trifásica será: (valores de " $\mu$ ", y " $q$ ", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos)

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "F", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = \bar{I}''_{k3} \cdot \mu \cdot q = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta del problema 3.3 y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

- Partimos de las tensiones nominales de los dos generadores halladas a 30kV:

$$I_{ng1} = \frac{30 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 577.4 A \quad I_{ng2} = \frac{60 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 1155 A$$

- La corriente total de cortocircuito trifásico en barras "F" es:

$$\bar{I}''_{K3F} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 7.53 \angle 90^\circ} = 1009 \angle -90^\circ A$$

- Mediante divisores de intensidad hallamos las aportaciones que cada generador proporciona a esta corriente total de cortocircuito:

$$\bar{I}''_{k3g1} = 1009 \angle -90^\circ \frac{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})} = 1009 \angle -90^\circ \frac{97.57 \angle 90^\circ}{249.3 \angle 90^\circ} = 395 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{k3g2} = 1009 \angle -90^\circ \frac{(\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})} = 1009 \angle -90^\circ \frac{151.7 \angle 90^\circ}{249.3 \angle 90^\circ} = 614 \angle -90^\circ A$$

- Con estos valores, los coeficientes  $\mu$  que tendremos serán para cada generador (recordar que para realizar el cociente es imprescindible que las intensidades nominales y las de cortocircuito se encuentren al mismo nivel de tensión, que en este caso no coincide):

$$\frac{I''_{kg1}}{I_{ng1}} = \frac{395 \left( \frac{120}{30} \right)}{577.4} = 2.74 \quad \mu_{g1} = 0.91 \quad \frac{I''_{kg2}}{I_{ng2}} = \frac{614 \left( \frac{120}{30} \right)}{1155} = 2.13 \quad \mu_{g2} = 0.98$$

- Entonces las intensidades de corte que cada generador aportará (recordar que  $q=1$  siempre, ya que no existen motores asíncronos en el circuito) a 120kV de tensión serán:

$$\bar{I}_{ag1} = \mu_1 \cdot q \cdot \bar{I}''_{K3g1} = 0.91 \cdot 1 \cdot (395 \angle -90^\circ) = 35.45 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{ag2} = \mu_2 \cdot q \cdot \bar{I}''_{K3g2} = 0.98 \cdot 1 \cdot (614 \angle -90^\circ) = 601.72 \angle -90^\circ A$$

- Finalmente, la intensidad total de corte en el punto de cortocircuito (barras "C") será:

$$\bar{I}_{aC} = \bar{I}_{ag1} + \bar{I}_{ag2} = 359.45 \angle -90^\circ + 601.72 \angle -90^\circ = 961.17 \angle -90^\circ A$$

### PROBLEMA 3.6

Disponemos del siguiente sistema de potencia formado por varios generadores y transformadores dispuestos como se indica en la figura. Suponiendo que se producen unos cortocircuitos en las barras "A" y "F", y con los valores siguientes:

#### DATOS

$G_1$ :	40MVA	25KV	$X_d''=X_1=X_2=12\%$	$X_0=4\%$	$X_n=0$
$G_2$ :	50MVA	25KV	$X_d''=X_1=X_2=16\%$	$X_0=4\%$	$X_n=0$
$T_{R1}$ :	40MVA	120/25KV	$X_1=X_2=12\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
$T_{R2}$ :	70MVA	120/25KV	$X_1=X_2=12\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
$L_1$ :			$X_1=X_2=j25 \Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1=62.5j \Omega$	
$L_2$ :			$X_1=X_2=j20 \Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1=50j \Omega$	
$L_3$ :			$X_1=X_2=j20 \Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1=50j \Omega$	
$L_4$ :			$X_1=X_2=j22 \Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1=55j \Omega$	
$L_5$ :			$X_1=X_2=j10 \Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1=25j \Omega$	

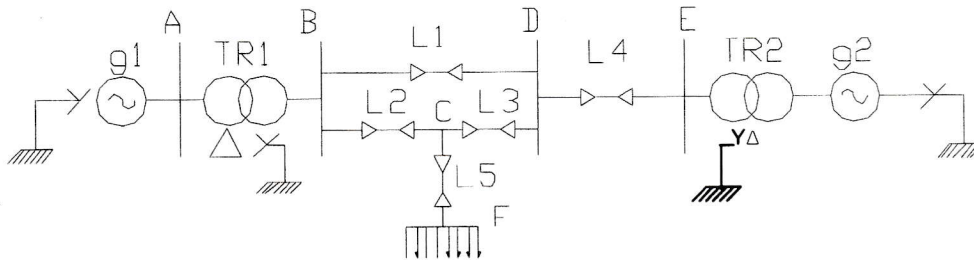


Figura 3.6 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.6

#### HALLAR

- Las redes de secuencia directa, inversa y homopolar del sistema de potencia.
- En el supuesto de producirse unos cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, trifásicos) en las barras de interconexión "A", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "F", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).

#### RESOLUCIÓN

##### • Cálculo de impedancias a 25kV

$$\begin{array}{lll}
 G_1 & \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = X_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,12 \cdot \frac{25000^2}{40 \cdot 10^6} = j1.875\Omega & \bar{X}_0 = 0,04 \cdot \frac{25000^2}{40 \cdot 10^6} = j0.625\Omega \quad X_n=0 \\
 G_2 & \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0,16 \cdot \frac{25000^2}{50 \cdot 10^6} = j2\Omega & \bar{X}_0 = 0,04 \cdot \frac{25000^2}{50 \cdot 10^6} = j0.5\Omega \quad X_n=0 \\
 T_{R1} & \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \epsilon_{xcc} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,12 \cdot \frac{25000^2}{40 \cdot 10^6} = j1.875\Omega & \bar{X}_0 = 0,9 \cdot \bar{X}_1 = j1.687\Omega \quad X_n=0
 \end{array}$$

$$T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 \cdot \epsilon_{xcc} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,12 \cdot \frac{25000^2}{70 \cdot 10^6} = j1,07\Omega \quad \bar{X}_0 = 0,9 \cdot \bar{X}_1 = j0,964\Omega \quad X_n=0$$

$$L_1: \quad X_1 = X_2 = \frac{j25}{\left(\frac{120}{25}\right)^2} = \frac{j25}{(4,8)^2} = j1,085\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j2,71\Omega$$

$$L_2: \quad X_1 = X_2 = j0,868\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j2,17\Omega$$

$$L_3: \quad X_1 = X_2 = j0,868\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j2,17\Omega$$

$$L_4: \quad X_1 = X_2 = j0,955\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j2,387\Omega$$

$$L_5: \quad X_1 = X_2 = j0,434\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j1,085\Omega$$

• **Cálculo de impedancias a 120kV**

$$G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j1,875)(4,8)^2 = j43,2\Omega \quad \bar{X}_0 = (j0,625)(4,8)^2 = j14,4\Omega \quad X_n=0$$

$$G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j2)(4,8)^2 = j46,08\Omega \quad \bar{X}_0 = (0,5)(4,8)^2 = j11,52\Omega \quad X_n=0$$

$$T_{R1} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \epsilon_{xcc} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,12 \cdot \frac{120000^2}{40 \cdot 10^6} = j43,2\Omega \quad \bar{X}_0 = 0,9 \cdot \bar{X}_1 = j38,88\Omega \quad X_n=0$$

$$T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 \cdot \epsilon_{xcc} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0,12 \cdot \frac{120000^2}{70 \cdot 10^6} = j24,6\Omega \quad \bar{X}_0 = 0,9 \cdot \bar{X}_1 = j22,22\Omega \quad X_n=0$$

$$L_1: \quad X_1 = X_2 = j25\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j62,5\Omega$$

$$L_2: \quad X_1 = X_2 = j20\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j50\Omega$$

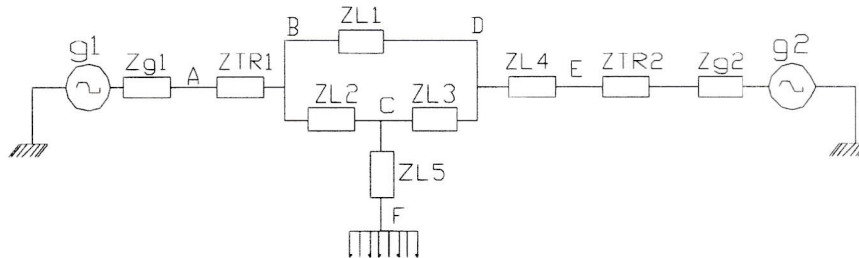
$$L_3: \quad X_1 = X_2 = j20\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j50\Omega$$

$$L_4: \quad X_1 = X_2 = j22\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j55\Omega$$

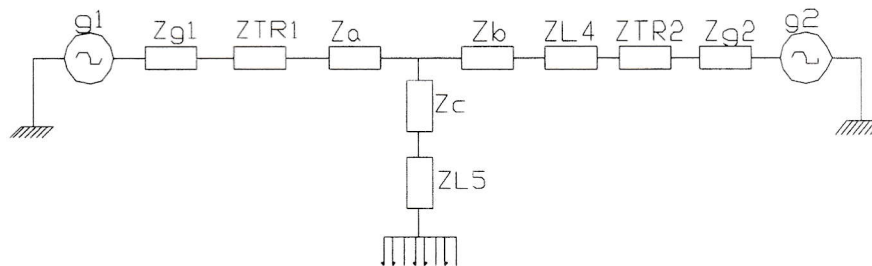
$$L_5: \quad X_1 = X_2 = j10\Omega \quad X_0 = 2,5 \cdot X_1 = j25\Omega$$

**1 Redes de secuencia directa, inversa y homopolar**

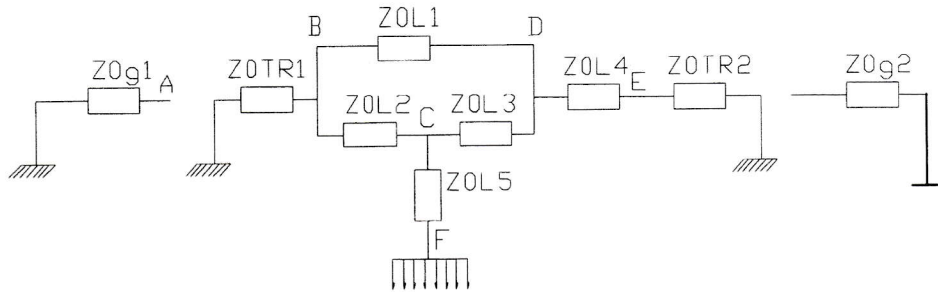
• **Redes de secuencia directa e inversa (sin los generadores)**



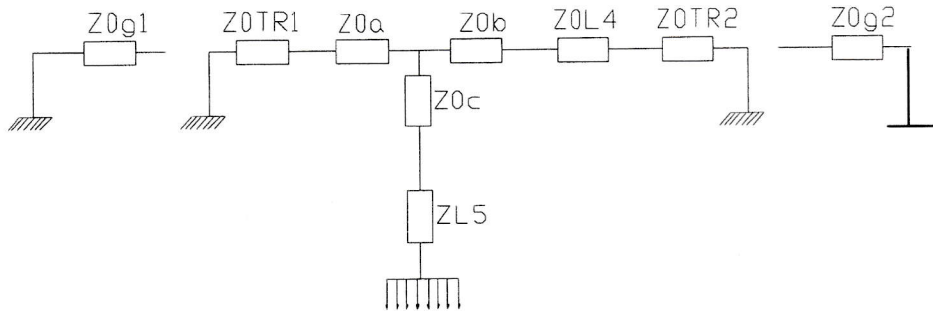
• **Con el cambio triangulo-estrella**



- **Red de secuencia homopolar**



- **Con el cambio triángulo-estrella**



- **Pasamos las impedancias de triángulo a estrella**

- **En la red directa y inversa (a 25kV)**

$$\bar{X}_A = \frac{\bar{X}_{L1} \cdot \bar{X}_{L2}}{\bar{X}_{L1} + \bar{X}_{L2} + \bar{X}_{L3}} = j0.334\Omega$$

$$\bar{X}_B = \frac{\bar{X}_{L1} \cdot \bar{X}_{L3}}{\bar{X}_{L1} + \bar{X}_{L2} + \bar{X}_{L3}} = j0.334\Omega$$

$$\bar{X}_C = \frac{\bar{X}_{L2} \cdot \bar{X}_{L3}}{\bar{X}_{L1} + \bar{X}_{L2} + \bar{X}_{L3}} = j0.267\Omega$$

- **En la red homopolar (a 25kV)**

$$\bar{X}_{oA} = \frac{\bar{X}_{0L1} \cdot \bar{X}_{0L2}}{\bar{X}_{0L1} + \bar{X}_{0L2} + \bar{X}_{0L3}} = j0.835\Omega$$

$$\bar{X}_{oB} = \frac{\bar{X}_{0L1} \cdot \bar{X}_{0L3}}{\bar{X}_{0L1} + \bar{X}_{0L2} + \bar{X}_{0L3}} = j0.835\Omega$$

$$\bar{X}_{oC} = \frac{\bar{X}_{0L2} \cdot \bar{X}_{0L3}}{\bar{X}_{0L1} + \bar{X}_{0L2} + \bar{X}_{0L3}} = j0.667\Omega$$

- **En la red directa y inversa (a 120kV)**

$$\bar{X}_A = \frac{\bar{X}_{L1} \cdot \bar{X}_{L2}}{\bar{X}_{L1} + \bar{X}_{L2} + \bar{X}_{L3}} = j7.692\Omega$$

$$\bar{X}_B = \frac{\bar{X}_{L1} \cdot \bar{X}_{L3}}{\bar{X}_{L1} + \bar{X}_{L2} + \bar{X}_{L3}} = j7.692\Omega$$

$$\bar{X}_C = \frac{\bar{X}_{L2} \cdot \bar{X}_{L3}}{\bar{X}_{L1} + \bar{X}_{L2} + \bar{X}_{L3}} = j6.15\Omega$$

- **En la red homopolar (a 120kV)**

$$\bar{X}_{oA} = \frac{\bar{X}_{0L1} \cdot \bar{X}_{0L2}}{\bar{X}_{0L1} + \bar{X}_{0L2} + \bar{X}_{0L3}} = j19.23\Omega$$

$$\bar{X}_{oB} = \frac{\bar{X}_{0L1} \cdot \bar{X}_{0L3}}{\bar{X}_{0L1} + \bar{X}_{0L2} + \bar{X}_{0L3}} = j19.23\Omega$$

$$\bar{X}_{oC} = \frac{\bar{X}_{0L2} \cdot \bar{X}_{0L3}}{\bar{X}_{0L1} + \bar{X}_{0L2} + \bar{X}_{0L3}} = j15.38\Omega$$

- **Buscamos las impedancias directa, inversa y homopolar vistas desde "A" y "F"**
- **Impedancias vistas desde las Barras "A" (a 25kV)**

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1A} = \bar{Z}_{2A} &= (\bar{Z}_{g1}) // [\bar{Z}_{g2} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{LA} + \bar{Z}_B + \bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1}] = (j1.875) // [j6.578] = (0 + j1.46) = 1.46 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{oA} = \bar{Z}_{og1} &= (0 + j0.625) = 0.625 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{TA} &= \bar{Z}_{1A} + \bar{Z}_{2A} + \bar{Z}_{oA} = (j1.46 + j1.46 + j0.625) = (0 + j3.545) = 3.545 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

- **Impedancias vistas desde las Barras "F" (a 120 KV)**

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= \left[ (\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A) // (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{LA} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) \right] + (\bar{Z}_C + \bar{Z}_{LS}) = \\ &= [(j43.2 + j43.2 + j7.692) // (j7.692 + j22 + j24.6 + j46.08)] + (j16.15) = (j94.09 // j100.37) + (j25.38) = \\ &= (j48.57) + (j16.15) = (0 + j64.72) = 64.72 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{oF} &= \left[ (\bar{Z}_{oTR1} + \bar{Z}_{oA}) // (\bar{Z}_{oB} + \bar{Z}_{oLA} + \bar{Z}_{oTR2}) \right] + (\bar{Z}_{oC} + \bar{Z}_{oLS}) = \\ &= [(j38.88 + j19.23) // (j19.23 + j55 + j22.22)] + (j15.38 + j25) = (j58.11 // j96.45) + (j40.38) = \\ &= (j36.26 + j40.38) = (0 + j76.64) = 76.64 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{TF} = \bar{Z}_{1F} + \bar{Z}_{2F} + \bar{Z}_{oF} = (0 + j206.1) = 206.1 \angle 90^\circ \Omega$$

## 2 Las corrientes de cortocircuito monofásico, bifásico y trifásico; corrientes máximas asimétricas y la corriente simétrica de corte con un cortocircuito en "A" (a 25kV) son:

- **Corrientes de cortocircuito:** (aplicando las fórmulas correspondientes a cada tipo de cortocircuito).

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3} &= \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} = \frac{1.1 \cdot 25000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.46 \angle 90^\circ} = 10874.75 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{k2} &= \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{1.1 \cdot 25000 \angle 0^\circ}{2 \cdot 1.46 \angle 90^\circ} = 9417.8 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{k1} &= \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n \cdot \sqrt{3}}{\bar{Z}_T} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 25000 \angle 0^\circ}{3.545 \angle 90^\circ} = 13436.2 \angle -90^\circ A\end{aligned}$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I<sub>s</sub>":** (aplicando el coeficiente  $\chi$ , gráfica 12.1)

Recordando todo lo expuesto en la primera pregunta del problema 3.3 referente a la intensidad "I<sub>s</sub>", y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

Las fórmulas a aplicar para hallar la corriente de cierre máxima, para los distintos tipos de cortocircuitos, son:

$$\bar{I}_S = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot \bar{I}'_k \quad \text{Como } R=0, \text{ siempre } \chi = 2 \text{ (gráfica 12.1, de los anexos)}$$

$$\bar{I}_{S3} = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot \bar{I}'_{k3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (10874.75 \angle -90^\circ) = 30758.44 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S2} = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot \bar{I}'_{k2} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (9417.8 \angle -90^\circ) = 26637.56 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S1} = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot \bar{I}'_{k1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (13436.2 \angle -90^\circ) = 38002.2 \angle -90^\circ A$$

Con estos valores se adopta para todos los casos un Poder de Cierre de 50KA.

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será:** (valores de "μ" y "q", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos)

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "A", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = \bar{I}''_{k3} \cdot \mu \cdot q = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta del problema 3.3 y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

- Operando en consecuencia para estas barras "A", tendremos:

La intensidad trifásica de cortocircuito en barras "A" es:  $\bar{I}''_{AK3} = 10874.75 \angle -90^\circ A$

Si dividimos esta intensidad entre los dos generadores:

$$\bar{I}''_{AK3g1} = \bar{I}''_{AK3} \frac{(\bar{Z}_{g2} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_B + \bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1})}{(\bar{Z}_{g1}) + (\bar{Z}_{g2} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_B + \bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1})} = 10874.75 \angle -90^\circ \frac{j6.578}{j8.453} = 8462.6 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{AK3g2} = \bar{I}''_{AK3} \frac{\bar{Z}_{g1}}{(\bar{Z}_{g1}) + (\bar{Z}_{g2} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_B + \bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1})} = 10874.75 \angle -90^\circ \frac{j1.875}{j8.453} = 2412.2 \angle -90^\circ A$$

Las intensidades nominales, en módulo, de los generadores son:

$$I_{ng1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{40 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 25 \cdot 10^3} = 923.76 A$$

$$I_{ng2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 25 \cdot 10^3} = 1154.7 A$$

Encontramos los coeficientes  $\mu_{g1}$  y  $\mu_{g2}$  gráficamente (gráfica 12.2, de los anexos con un  $tv=0.1s$ ):

$$\frac{I''_{K3g1}}{I_{ng1}} = \frac{8462.6}{923.76} = 9.16 \quad \mu_{g1} = 0.65$$

$$\frac{I''_{K3g2}}{I_{ng2}} = \frac{22412.2}{1154.7} = 2.09 \quad \mu_{g2} = 0.98$$

Por tanto, la corriente simétrica de corte será:

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_{ag1} + \bar{I}_{ag2} = \bar{I}''_{K3g1} \cdot \mu_{g1} \cdot q_1 + \bar{I}''_{K3g2} \cdot \mu_{g2} \cdot q_2 = \\ &= (8462.6 \angle -90^\circ) \cdot 0.65 \cdot 1 + (2412.2 \angle -90^\circ) \cdot 0.98 \cdot 1 = 7864.6 \angle -90^\circ A \end{aligned}$$

Recordar que  $q=1$  cuando no hay motores asíncronos (gráfica 12.3, de los anexos).

Con estos valores será suficiente con adoptar un Poder de Corte de 15KA.

### 3 Las corrientes de cortocircuito monofásico, bifásico y trifásico; corrientes máximas asimétricas y la corriente simétrica de corte con un cortocircuito en "F" (a 120kV) son:

- **Corrientes de cortocircuito:** (aplicando las fórmulas correspondientes a cada tipo de cortocircuito)

$$\bar{I}''_{K3} = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 64.72 \angle 90^\circ} = 1177.54 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{K2} = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (64.72 \angle 90^\circ)} = 1019.78 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{K1} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_T} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 120000 \angle 0^\circ}{206.1 \angle 90^\circ} = 1109.3 \angle -90^\circ A$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I<sub>s</sub>":** (aplicando el coeficiente  $\chi$ , gráfica 12.1)

Recordando todo lo expuesto en la primera pregunta del problema 3.3 referente a la intensidad "I<sub>s</sub>" y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

Las fórmulas a aplicar para hallar la corriente de cierre máxima, para los distintos tipos de cortocircuitos, son:

$$\bar{I}_s = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot \bar{I}''_k \quad \text{Como } R=0, \text{ siempre } \chi = 2 \text{ (gráfica 12.1, de los anexos)}$$

$$\bar{I}_{s3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \bar{I}''_{k3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (1177.5 \angle -90^\circ) = 3330.6 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{s2} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \bar{I}''_{k2} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (1019.8 \angle -90^\circ) = 2884.4 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{s1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \bar{I}''_{k1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (1109.3 \angle -90^\circ) = 3137.6 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Con estos valores se adopta para todos los casos un Poder de Cierre de 5KA.

- **La corriente simétrica de corte "I<sub>a</sub>" trifásica será:** (valores de "μ", y "q", hallados en las gráficas 12.2 y 12.3 respectivamente, de los anexos)

Para hallar la corriente de corte total, vista desde las barras "F", es necesario aplicar la fórmula:

$$\bar{I}_{a3} = \bar{I}''_{k3} \cdot \mu \cdot q = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes, cuyo cálculo se ha explicado en la primera pregunta del problema 3.3 y a la cual nos remitimos para su correcta comprensión:

- Operando en consecuencia para estas barras "F", tendremos:

$$\text{Como: } \bar{I}^*_{Fk3120KV} = 1177.54 \angle -90^\circ \text{ A A}$$

Mediante divisores de intensidad, buscamos las aportaciones que cada generador da a esta corriente de cortocircuito:

$$\begin{aligned} \bar{I}^*_{FK3g1} &= \bar{I}''_{FK3} \cdot \frac{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})}{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A) + (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})} = \\ &= \bar{I}''_{FK3} \cdot \frac{(j7.692 + j22 + j24.6 + j46.08)}{(2(j43.2) + j7.692) + (j7.69 + j22 + j24.6 + j46.08)} = 1177.54 \angle -90^\circ \frac{j100.4}{j194.5} = 607.8 \angle -90^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}^*_{FK3g2} &= \bar{I}''_{FK3} \cdot \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A)}{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A) + (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})} = \\ &= \bar{I}''_{FK3} \cdot \frac{(j43.2 + j43.2 + j7.692)}{(2(j43.2) + j7.692) + (j7.692 + 22 + j24.6 + j46.08)} = 1177.54 \angle -90^\circ \frac{j94.1}{j194.5} = 569.7 \angle -90^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Que a bajo nivel de tensión (25kV) será:

$$\bar{I}''_{FK3g125KV} = 607.8 \angle -90^\circ \left( \frac{120}{25} \right) = 2917.4 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}''_{FK3g225KV} = 569.7 \angle -90^\circ \cdot (4.8) = 2734.6 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Con unas intensidades nominales, en módulo, de los generadores de:

$$I_{ng1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{40 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 25 \cdot 10^3} = 923.76 \text{ A}$$

$$I_{ng2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 25 \cdot 10^3} = 1154.7 A$$

Encontramos  $\mu_{g1}$  y  $\mu_{g2}$  gráficamente (gráfica 12.2, de los anexos y con un tiempo de  $t_v=0.1s$ ):

$$\frac{I''_{K3g1}}{I_{ng1}} = \frac{2917.4}{923.76} = 3.16 \quad \mu_{g1} = 0.87$$

$$\frac{I''_{K3g2}}{I_{ng2}} = \frac{2734.6}{1154.7} = 2.37 \quad \mu_{g2} = 0.93$$

Quedando la corriente simétrica de corte con un valor de (recordar que vuelven a adoptarse los valores de las intensidades a 120000kV, ya que el punto "F" se encuentra a esta tensión):

$$\begin{aligned} \bar{I}_{af120kV} &= \bar{I}_{ag1} + \bar{I}_{ag2} = \bar{I}''_{K3g1} \cdot \mu_{g1} \cdot q_1 + \bar{I}''_{K3g2} \cdot \mu_{g2} \cdot q_2 = \\ &= (607.8 \angle -90^\circ) \cdot 0.87 \cdot 1 + (569.7 \angle -90^\circ) \cdot 0.93 \cdot 1 = 1058.6 \angle -90^\circ A \end{aligned}$$

Recordar que cuando no hay motores asíncronos  $q=1$  (gráfica 12.3 de los anexos).

Con estos valores podemos adoptar un Poder de Corte de 2KA para todos los casos.

**PROBLEMA 3.7**

El circuito mostrado en la figura corresponde a un suministro trifásico formado por dos generadores síncronos trifásicos y dos transformadores. Los parámetros y valores que definen al sistema son:

**DATOS**

$G_1$ .....	60 MVA.....	25 kV.....	$X_1=X_2= 22.5\%$ .....	$X_0= 7.5\%$ .....	$X_n= 11.25\%$
$G_2$ .....	50 MVA.....	25 kV.....	$X_1=X_2= 21.875\%$ .....	$X_0= 7.5\%$ .....	$X_n= 12.5\%$
$TR_1$ .....	60 MVA.....	25/150 kV.....	$X_1=X_2= 11.25\%$ .....	$X_0= 7.5\%$ .....	$X_n= 0$
$TR_2$ .....	80 MVA.....	25/150 kV.....	$X_1=X_2= 18\%$ .....	$X_0= 18\%$ .....	$X_n= 0$
Línea.....			$X_1=X_2= j 14.1\Omega$ .....	$X_0= j 56.3\Omega$	

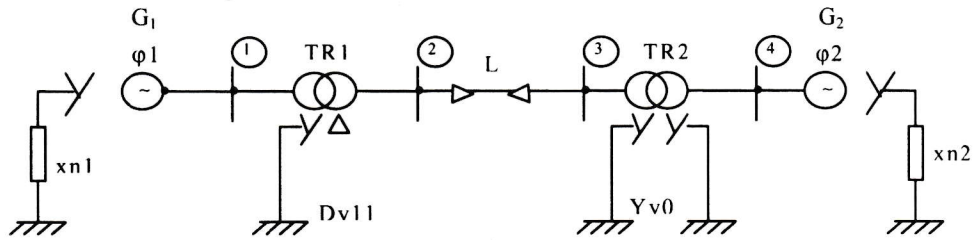


Figura 3.7 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.7

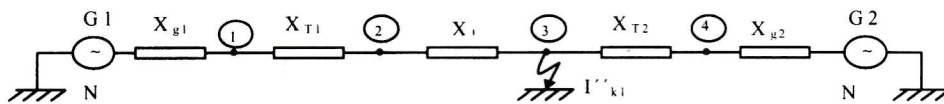
**HALLAR**

Si en las barras "3", se produce un cortocircuito Fase-tierra:

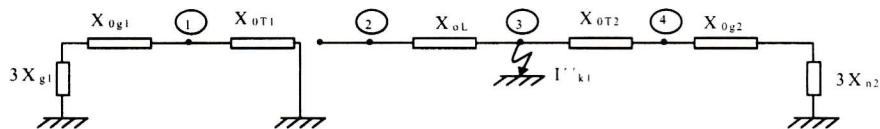
1. Todas las intensidades del circuito.
2. Las tensiones de línea en el punto de fallo (barras "3").
3. Las tensiones de línea en bornes de  $G_1$ , (barras "1").

**RESOLUCIÓN**

- **Redes de secuencia directa, inversa y homopolar**
- *Redes de secuencia directa e inversa (sin generadores)*



- **Red de secuencia homopolar**



• **Cálculo de impedancias a 25kV**

• G <sub>1</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.225 \frac{(25)^2}{60} = j2.344\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.075 \frac{(25)^2}{60} = j0.7812\Omega$	$\bar{X}_n = j1.172\Omega$
• G <sub>2</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.21875 \frac{(25)^2}{50} = j2.734\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.075 \frac{(25)^2}{50} = j0.9375\Omega$	$\bar{X}_n = j1.563\Omega$
• T <sub>R1</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.1125 \frac{(25)^2}{60} = j1.172\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.075 \frac{(25)^2}{60} = j0.781\Omega$	$\bar{X}_n = 0$
• T <sub>R2</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.18 \frac{(25)^2}{80} = j1.406\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.18 \frac{(25)^2}{80} = j1.406\Omega$	$\bar{X}_n = 0$
• Línea	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j14.1}{(6)^2} = j0.392\Omega$	$\bar{X}_0 = \frac{j56.3}{(6)^2} = j1.564\Omega$	

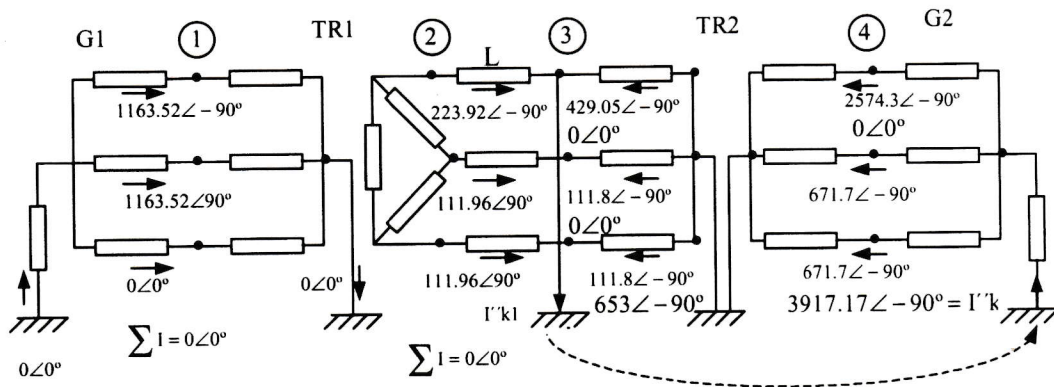
• **Cálculo de impedancias a 150kV**

• G <sub>1</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j2.344)(6)^2 = j84.384\Omega$	$\bar{X}_0 = (j0.7812)(6)^2 = j28.12\Omega$	$\bar{X}_n = j42.19\Omega$
• G <sub>2</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j2.734)(6)^2 = j98.42\Omega$	$\bar{X}_0 = (j0.9375)(6)^2 = j33.75\Omega$	$\bar{X}_n = j56.27\Omega$
• T <sub>R1</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.1125 \frac{(150)^2}{60} = j42.18\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.075 \frac{(150)^2}{60} = j28.125\Omega$	$\bar{X}_n = 0$
• T <sub>R2</sub>	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.18 \frac{(150)^2}{80} = j50.62\Omega$	$\bar{X}_0 = 0.18 \frac{(150)^2}{80} = j50.625\Omega$	$\bar{X}_n = 0$
• Línea	$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j14.1\Omega$	$\bar{X}_0 = j56.3\Omega$	

• **Relación de transformación**

$$m = \frac{150}{25} = 6$$

• **Circuito equivalente al producirse una falta monofásica en las barras "3"**



• **Barras "3" a alta tensión (150kV) en el punto de cortocircuito**

• **Cálculo de las impedancias totales vistas desde las barras de cortocircuito**

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \left[ (\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{T1} + \bar{X}_L) // (\bar{X}_{T2} + \bar{X}_{g2}) \right] = [(j140.66 // j149)] = (0 + j72.35) = 72.35\angle 0^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_0 = \left[ (\bar{X}_{oT2} + \bar{X}_{og2} + 3\bar{X}_{g2}) \right] = (j50.625 + j33.75 + 3(j56.268)) = (0 + j253.18) = 253.18\angle 0^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_T = (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0) = (0 + j397.9) = 397.9 \angle 0^\circ \Omega$$

- **La corriente de cortocircuito total, así como las componentes simétricas totales en las barras del cortocircuito, con una falta monofásica a tierra, será:**

$$\bar{I}_{K1}^* = \frac{1.1 \bar{U}_n \sqrt{3}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{1.1 \cdot (150000 \angle 0^\circ) \sqrt{3}}{397.9 \angle 90^\circ} = (1.1) 652.94 \angle -90^\circ A$$

El coeficiente de simultaneidad (1.1) no se utiliza para realizar el estudio de las componentes simétricas.

Las componentes simétricas de la corriente de cortocircuito monofásico a tierra se repartirán de la siguiente forma:

$$\bar{I}_{R1} = \bar{I}_{R2} = \bar{I}_{R0} = \frac{\bar{I}_{K1}^*}{3} = 217.65 \angle -90^\circ A$$

Con este tipo de cortocircuito monofásico a tierra, es necesario considerar las componentes homopolares, ya que existe una fuga de corriente hacia tierra.

- **Intensidades de línea en el punto de cortocircuito:** (intensidades totales en el punto de cortocircuito halladas mediante sus correspondientes componentes simétricas).

**Recordar que:**  $\bar{a} = 1 \angle 0^\circ$      $\bar{a}^2 = 1 \angle 120^\circ$      $\bar{a}^{-3} = 1 \angle 240^\circ$

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 217.65 \angle -90^\circ + 217.65 \angle -90^\circ + 217.65 \angle -90^\circ = 652.94 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 217.65 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 217.65 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 217.65 \angle -90^\circ = 0 \angle 0^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 217.65 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 217.65 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 217.65 \angle -90^\circ = 0 \angle 0^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 652.65 \angle -90^\circ A$$

En este caso, como existe fuga de energía a tierra, la suma de las intensidades de línea en el punto de cortocircuito no será nula. Existe una componente, que es precisamente la corriente total de cortocircuito.

## 1. Hallamos todas las intensidades del circuito

Vamos a hallar las intensidades de línea correspondientes a diversos puntos del sistema de potencia. Para ello, nos basaremos en las componentes simétricas halladas para el apartado anterior (punto de cortocircuito).

Será necesario, mediante divisores de intensidad, dividir las componentes simétricas halladas (recordar que son las totales para el punto de cortocircuito) para las dos secciones en las que queda dividido el circuito a causa del cortocircuito producido en las barras "3" (ver redes de secuencia).

- **Reparto de las componentes simétricas de las corrientes**

Línea	$T_{R2}$ (primario)
$\bar{I}_{R1} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{149 \angle -90^\circ}{289.7 \angle -90^\circ} = 111.96 \angle -90^\circ A$	$\bar{I}_{R1} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{j140.7}{j289.7} = 105.7 \angle -90^\circ A$
$\bar{I}_{R2} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{149 \angle -90^\circ}{289.7 \angle -90^\circ} = 111.96 \angle -90^\circ A$	$\bar{I}_{R2} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{j140.7}{j289.7} = 105.7 \angle -90^\circ A$
$\bar{I}_{R0} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{253.18 \angle -90^\circ}{\infty} = 0 A$	$\bar{I}_{R0} = 217.65 \angle -90^\circ A$

- **Las intensidades serán:**
- **EN LA LÍNEA L<sub>1</sub> Y EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR T<sub>R1</sub>: (150kV) (valores especificados en el esquema del circuito equivalente del sistema de potencia)**
- **Cálculo de intensidades de línea en la línea 1°**

Teniendo presentes las componentes simétricas halladas para este tramo del circuito, tendremos:

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 111.96\angle -90^\circ + 111.96\angle -90^\circ + 0\angle 0^\circ = 223.92\angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 111.96\angle(-90^\circ + 240^\circ) + 111.96\angle(-90^\circ + 120^\circ) + 0\angle 0^\circ = 111.96\angle 90^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 111.96\angle(-90^\circ + 120^\circ) + 111.96\angle(-90^\circ + 240^\circ) + 0\angle 0^\circ = 111.96\angle 90^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 0\angle 0^\circ A$$

- **EN EL GENERADOR G<sub>1</sub>: (25kV) (valores especificados en el esquema del circuito equivalente del sistema de potencia)**

Para calcular las corrientes que fluyen a través de los bornes del generador G<sub>1</sub>, será necesario pasar las componentes simétricas que transcurrían por la línea 1°, a través del transformador T<sub>R1</sub>.

Para pasar las componentes simétricas a través de un transformador es preciso recordar tres requisitos básicos:

- Un transformador sólo permitirá el paso de las componentes homopolares cuando sus primarios y secundarios estén conectados en estrella y además cada neutro de estas estrellas esté puesto a tierra. Los demás tipos de conexión nunca permitirán el paso de las componentes homopolares.
  - Un transformador (aunque mantiene la frecuencia y las potencias en unos valores muy similares) modifica las tensiones y las intensidades al paso de éstas a través del mismo. Por ello, es necesario aplicar la relación de transformación (tanto para intensidades como para tensiones) cuando se desee pasar estas magnitudes a través de un transformador.
  - Los transformadores también introducen desfases en los argumentos de las magnitudes eléctricas que pasan por sus bobinados. Para simplificar en la resolución de estos problemas, se seguirá lo establecido por la norma Americana ANSI, mediante la cual pueden darse dos situaciones características:
    - En transformadores triángulo-estrella o estrella-triángulo. Si aumentamos de tensión (transformador elevador) tendremos que sumarles 30° grados a los ángulos de las intensidades en la secuencia directa, y restarles 30° grados a los ángulos de las mismas intensidades en la secuencia inversa. Si lo que hacemos es disminuir la tensión (transformador reductor), el proceso será el contrario del anterior (donde se sumaban grados se restarán, y viceversa).
    - En transformadores, estrella-estrella o triángulo-triángulo. No se producirá ningún desfase (el desfase es de 0° grados), no debiéndose modificar por tanto los argumentos de las tensiones o de las intensidades.
- **Componentes simétricas de las intensidades en los bornes del generador G<sub>1</sub>**

En nuestro caso, perdemos tensión al pasar de la línea 1° (150kV) a los bornes del generador G<sub>1</sub> (25kV). Teniendo presente las recomendaciones para transformadores, las componentes simétricas que pasaban por la línea 1°, al pasar a través del transformador T<sub>R1</sub>, quedan convertidas de la siguiente forma:

$$\bar{I}'_{R1} = \bar{I}_{R1} \cdot m \cdot 1\angle -30^\circ = 111.96\angle -90^\circ \left( \frac{150}{25} \right) \cdot 1\angle -30^\circ = 671.76\angle -120^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R2} = \bar{I}_{R2} \cdot m \cdot 1\angle 30^\circ = 111.96\angle -90^\circ \left( \frac{150}{25} \right) \cdot 1\angle 30^\circ = 671.76\angle -60^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R0} = 0A$$

El transformador T<sub>R1</sub> no permite el paso de las corrientes homopolares a través de él, como queda reflejado en la red de secuencia homopolar.

- **Cálculo de las intensidades de línea en los bornes del generador  $G_1$**

$$\bar{I}'_R = \bar{I}'_{R1} + \bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0} = 671.76 \angle -120^\circ + 671.76 \angle -60^\circ + 0 \angle 0^\circ = 1163.52 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}'_S = \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R0} = 671.76 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 671.76 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 1163.52 \angle 90^\circ A$$

$$\bar{I}'_T = \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}'_{R0} = 671.76 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 671.76 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 0 \angle 0^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I}' = 0 \angle 0^\circ A$$

- **EN EL PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR  $T_{R2}$  (150kV) (valores especificados en el esquema del circuito equivalente del sistema de potencia)**
- **Cálculo de intensidades de línea en los bornes de  $T_{R2}$**

Teniendo presente las componentes simétricas halladas para este tramo del circuito, tendremos:

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 105.7 \angle -90^\circ + 105.7 \angle -90^\circ + 217.65 \angle -90^\circ = 429.05 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 105.7 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 105.7 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 217.65 \angle -90^\circ = 111.8 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}_{R0} = 105.7 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 105.7 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 217.65 \angle -90^\circ = 111.8 \angle -90^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 652.65 \angle -90^\circ A$$

- **EN EL GENERADOR  $G_2$ : (20kV): (valores especificados en el esquema del circuito equivalente del sistema de potencia)**

Para calcular las corrientes que fluyen a través de los bornes del generador  $G_2$ , será necesario pasar las componentes simétricas que transcurrían por el primario del transformador  $T_{R2}$ .

Para pasar las componentes simétricas a través de un transformador es preciso recordar los tres requisitos básicos dados en el apartado anterior de este mismo problema:

- **Componentes simétricas de las intensidades en los bornes del generador  $G_2$**

En nuestro caso, perdemos tensión al pasar de los bornes del primario del transformador  $T_{R2}$  (150kV) a los bornes del generador  $G_2$  (25kV). Teniendo presente las recomendaciones para transformadores, las componentes simétricas, al pasar a través del transformador  $T_{R2}$ , quedan convertidas de la siguiente forma:

$$\bar{I}'_{R1} = \bar{I}_{R1} \cdot m \cdot 1 \angle 0^\circ = 105.7 \angle -90^\circ \left( \frac{150}{25} \right) \cdot 1 \angle 0^\circ = 634.2 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R2} = \bar{I}_{R2} \cdot m \cdot 1 \angle 0^\circ = 105.7 \angle -90^\circ \left( \frac{150}{25} \right) \cdot 1 \angle 0^\circ = 634.2 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R0} = \bar{I}_{R0} \cdot m \cdot 1 \angle 0^\circ = 217.65 \angle -90^\circ \left( \frac{150}{25} \right) \cdot 1 \angle 0^\circ = 1305.9 \angle -90^\circ A$$

- **Cálculo de las intensidades de línea en los bornes del generador  $G_2$**

$$\bar{I}'_R = \bar{I}'_{R1} + \bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0} = 634.2 \angle -90^\circ + 634.2 \angle -90^\circ + 1305.9 \angle -90^\circ = 2574.3 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}'_S = \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R0} = 634.2 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 634.2 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 1305.9 \angle -90^\circ = 671.7 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}'_T = \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}'_{R0} = 634.2 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 634.2 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 1305.9 \angle -90^\circ = 671.7 \angle -90^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I}' = 3917.7 \angle -90^\circ A$$

El sumatorio de las intensidades no es cero, ya que existe una fuga a tierra de energía eléctrica. Además, este valor de la suma de intensidades debe coincidir con el obtenido para la corriente de cortocircuito total del sistema (es lógico, ya que esta suma de corrientes no es más que el retorno de tierra de la corriente total de cortocircuito aplicándole la relación de transformación correspondiente).

## 2. Tensiones de línea en el punto de cortocircuito (barras "3") (150kV)

### • Componentes simétricas

Primeramente, hallamos las tensiones con componentes simétricas en el punto de cortocircuito. Por tanto, deberemos usar las intensidades e impedancias totales en el punto de cortocircuito.

$$\bar{V}_{R1} = \bar{E} - \bar{I}_{R1} \bar{Z}_1 = \frac{150000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 217.65 \angle -90^\circ \cdot 72.35 \angle -0^\circ = 70855.56 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{R2} = -\bar{I}_{R2} \bar{Z}_2 = -217.65 \angle -90^\circ \cdot 72.35 \angle 90^\circ = 15747 \angle 180^\circ V$$

$$\bar{V}_{R0} = -\bar{I}_{R0} \bar{Z}_0 = -217.65 \angle -90^\circ \cdot 253.18 \angle 90^\circ = 55104.62 \angle 180^\circ V$$

### • Calculamos las tensiones de fase en este punto de cortocircuito

$$\bar{V}_{RN} = \bar{V}_{R1} + \bar{V}_{R2} + \bar{V}_{R0} = 70855.56 \angle 0^\circ + 15747 \angle 180^\circ + 55104.62 \angle 180^\circ = 0 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{SN} = \bar{V}_{R1} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{V}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R0} = 70855.6 \angle 240^\circ + 15747 \angle 300^\circ + 55104.6 \angle 180^\circ = 111613.15 \angle -137.8^\circ V$$

$$\bar{V}_{TN} = \bar{V}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R2} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{V}_{R0} = 70855.6 \angle 120^\circ + 15747 \angle 60^\circ + 55104.6 \angle 180^\circ = 111613.15 \angle 137.8^\circ V$$

### • Cálculo de las tensiones de línea en el punto de cortocircuito

$$\bar{U}_{RS} = \bar{V}_{RN} - \bar{V}_{SN} = 0 \angle 0^\circ - 111613.2 \angle -137.8^\circ = 111613.15 \angle 42.2^\circ V$$

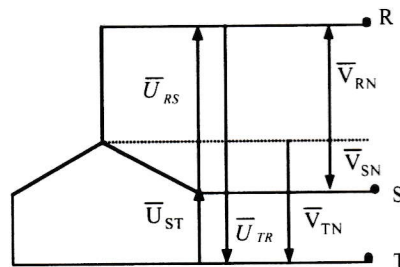
$$\bar{U}_{ST} = \bar{V}_{SN} - \bar{V}_{TN} = 111613.2 \angle -137.8^\circ - 111613.15 \angle 137.8^\circ = 149945.7 \angle -90^\circ V$$

$$\bar{U}_{TR} = \bar{V}_{TN} - \bar{V}_{RN} = 111613.15 \angle 137.8^\circ - 0 \angle 0^\circ = 111613.15 \angle 137.8^\circ V$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{U}_{RS} \\ \bar{U}_{ST} \\ \bar{U}_{TR} \end{array} \right\} \Sigma \bar{U}_L = 0 \angle 0^\circ V$$

La suma de las tensiones de línea, aún con cortocircuito con fugas a tierra, debe ser siempre cero.

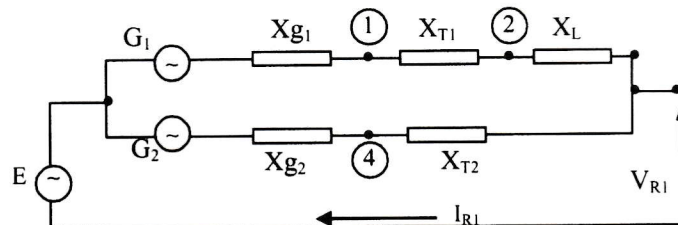
Para el cálculo de estas tensiones de línea nos puede ayudar el siguiente gráfico, donde se relacionan las tensiones de fase con las tensiones de línea:



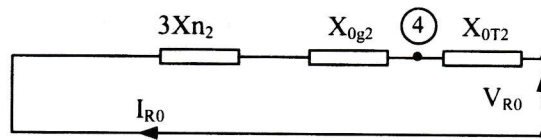
## 3 Tensiones de línea en barras "1" del generador G<sub>1</sub> (25kV)

Para el cálculo de las tensiones, en estas barras alejadas del punto de cortocircuito, serán de gran ayuda los siguientes esquemas que representan al circuito de potencia visto desde el punto de falta (barras "3"). Se representan tanto las secuencias directa e inversa como la secuencia homopolar:

### - Redes directa e inversa vistas desde las barras "3"



- **Red homopolar vista desde las barras "3"**



- **Cálculo de las tensiones por componentes simétricas en barras "1"**

Para realizar este cálculo debe tenerse presente que estamos situados en la zona de 25kV, con todos los cambios en cuanto a las magnitudes eléctricas (módulos y ángulos) que esto representa.

Primeramente pasamos a la tensión de 25kV las componentes simétricas de las tensiones, halladas en el punto del cortocircuito (150kV):

$$\begin{aligned}\bar{V}''_{R1} &= \frac{\bar{V}_{R1}}{m} \cdot 1 \angle -30^\circ = \frac{70855.56 \angle 0^\circ}{6} \cdot 1 \angle -30^\circ = 11809.26 \angle -30^\circ V \\ \bar{V}''_{R2} &= \frac{\bar{V}_{R2}}{m} \cdot 1 \angle 30^\circ = \frac{15747 \angle 180^\circ}{6} \cdot 1 \angle 30^\circ = 2624.5 \angle 210^\circ V \\ \bar{V}''_{R0} &= 0 \angle 0^\circ V\end{aligned}$$

Nosotros ya conocemos el valor de las componentes simétricas en el punto de cortocircuito buscadas a alto nivel de tensión (150kV). Pero es necesario proceder al cálculo de dichas componentes simétricas, pero ahora en las barras deseadas (en este caso a nivel bajo de tensión 25kV). Existen dos formas para realizar este cálculo:

- **Método A**

Con este método, se resta de la tensión total en el punto de cortocircuito (al nivel de tensión adecuado) la caída de tensión que se produce hasta alcanzar el punto o barras de conexión deseadas, (resultan de gran utilidad para la comprensión de las siguientes expresiones los esquemas dados en este apartado de las redes de secuencia vistas desde el punto o barras "3".)

$$\begin{aligned}\bar{V}'_{R1} &= \bar{E}' - \bar{I}'_{R1} \bar{Z}_{g1} = \frac{25000 \angle (0^\circ - 30^\circ)}{\sqrt{3}} - 671.76 \angle -120^\circ \cdot 2.344 \angle 90^\circ = 12859.2 \angle -30^\circ V \\ \bar{V}'_{R2} &= -\bar{I}'_{R2} \bar{Z}_{g2} = -671.76 \angle -60^\circ \cdot 2.344 \angle 90^\circ = 1574.6 \angle 210^\circ V \\ \bar{V}'_{R0} &= -\bar{I}'_{R0} \bar{Z}_o = 0 \angle 0^\circ V\end{aligned}$$

- **Método B**

Con este método, se suma a la tensión total de las componentes simétricas en el punto de cortocircuito (al nivel de tensión adecuado) la caída de tensión que se produce hasta alcanzar el punto o barras de conexión deseadas. (Resultan de gran utilidad para la comprensión de las siguientes expresiones los esquemas dados en este apartado de las redes de secuencia vistas desde el punto ó barras "3".)

$$\begin{aligned}\bar{V}'_{R1} &= \bar{V}''_{R1} + \bar{I}'_{R1} (\bar{Z}_L + \bar{Z}_{TR1}) = \frac{70855.56 \angle (0^\circ - 30^\circ)}{(150/25)} + 671.76 \angle -120^\circ \cdot (j0.392 + j1.172) = 12860 \angle -30^\circ V \\ \bar{V}'_{R2} &= \bar{V}''_{R2} + \bar{I}'_{R2} (\bar{Z}_L + \bar{Z}_{TR1}) = \frac{15747 \angle (180^\circ + 30^\circ)}{(150/25)} + 671.76 \angle -60^\circ \cdot (j0.392 + j1.172) = 1573.9 \angle 210^\circ V \\ \bar{V}'_{R0} &= \bar{V}''_{R0} + \bar{I}'_{R0} \bar{Z}_o = 0 \angle 0^\circ V\end{aligned}$$

- **Cálculo de las tensiones de fase en las barras del generador G<sub>1</sub>**

$$\bar{V}'_{RN} = \bar{V}'_{R1} + \bar{V}'_{R2} + \bar{V}'_{R0} = 12860 \angle -30^\circ + 1573.9 \angle 210^\circ + 0 \angle 0^\circ = 12148.5 \angle -36.44^\circ V$$

$$\bar{V}'_{SN} = \bar{V}'_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}'_{R0} = 12860 \angle (-30^\circ + 240^\circ) + 1573.9 \angle (210^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 12148 \angle -143.6^\circ V$$

$$\bar{V}'_{TN} = \bar{V}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}'_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}'_{R0} = 12860 \angle (-30^\circ + 120^\circ) + 1573.9 \angle (210^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 14433.6 \angle 90^\circ V$$

• **Cálculo de las tensiones de línea en las barras del generador G<sub>1</sub>**

$$\bar{U}'_{RS} = \bar{V}'_{RN} - \bar{V}'_{SN} = 12148.5 \angle -36.4^\circ - 12148.5 \angle -143.6^\circ = 19551.5 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}'_{ST} = \bar{V}'_{SN} - \bar{V}'_{TN} = 12148.5 \angle -143.6^\circ - 14433.6 \angle 90^\circ = 23749 \angle -114^\circ V$$

$$\bar{U}'_{TR} = \bar{V}'_{TN} - \bar{V}'_{RN} = 14433.6 \angle 90^\circ - 12148.5 \angle -36.44^\circ = 23753 \angle 114^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}'_L = 240 \angle 0.87^\circ V$$

La suma de tensiones de línea debería dar cero. El valor obtenido, aunque no nulo, es muy pequeño, debiéndose esta desviación a posibles redondeos de cálculo.

**PROBLEMA 3.8**

Dos máquinas síncronas se conectan a través de transformadores trifásicos a una línea de transmisión de energía eléctrica, como se muestra en la figura. Los parámetros y valores que definen al sistema son:

**DATOS**

$G_1, G_2$ .....100MVA.....20kV..... $X''d=X_1=X_2=20\%$ ..... $X_o=4\%$ ..... $X_n=5\%$   
 $T_{R1}, T_{R2}$ .....100MVA.....20kV/345kV..... $X''d=X_1=X_2=8\%$ ..... $X_o=8\%$ ..... $X_n=0\%$   
 Línea..... $X_1=X_2=j178.5\ \Omega$ ..... $X_o=j595.1\ \Omega$

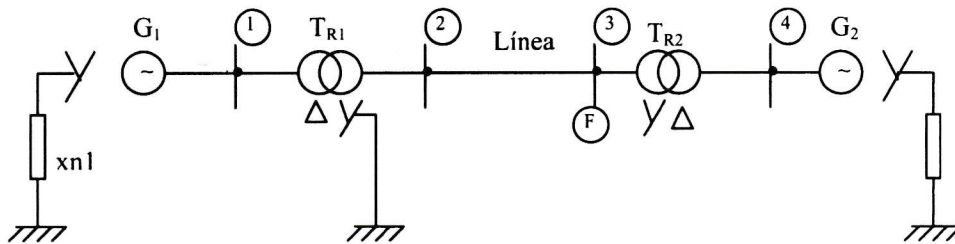


Figura 3.8 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.8

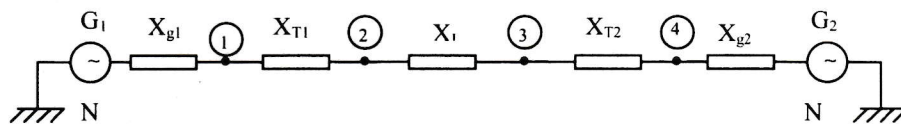
**HALLAR**

Si el sistema esta operando a voltaje nominal y sin corriente antes del fallo, delante de una falta bifásica, en las barras "3":

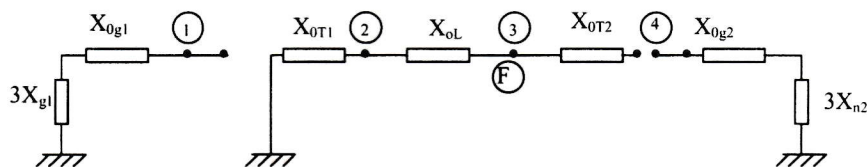
- 1 Todas las intensidades del circuito.
- 2 Las tensiones de línea en barras "3" (punto de cortocircuito).
- 3 Tensiones de línea en barras "4".

**RESOLUCIÓN**

- **Redes de secuencia directa, inversa y homopolar**
- *Redes de secuencia directa e inversa (sin generadores)*



- **Red de secuencia homopolar**



- **Cálculo de impedancias**

- **Cálculo de impedancias a 20kV**

- $G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.2 \frac{(20)^2}{100} = j0.8\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \frac{(20)^2}{100} = j0.16\Omega \quad \bar{X}_n = 0.05 \left( \frac{20}{100} \right)^2 = j0.2\Omega$

- $G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.2 \frac{(20)^2}{100} = j0.8\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \frac{(20)^2}{100} = j0.16\Omega \quad \bar{X}_n = 0.05 \left( \frac{20}{100} \right)^2 = j0.2\Omega$

- $TR_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_n = 0$

- $TR_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_n = 0$

- Línea  $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j178.5}{(17.25)^2} = j0.6\Omega \quad \bar{X}_0 = \frac{j595.1}{(17.25)^2} = j2\Omega$

- **Cálculo de impedancias a 345kV**

- $G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j0.8)(17.25)^2 = j238\Omega \quad \bar{X}_0 = (j0.16)(17.25)^2 = j47.6\Omega \quad \bar{X}_n = j59.5\Omega$

- $G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j0.8)(17.25)^2 = j238\Omega \quad \bar{X}_0 = (j0.16)(17.25)^2 = j47.6\Omega \quad \bar{X}_n = j59.5\Omega$

- $TR_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_n = 0$

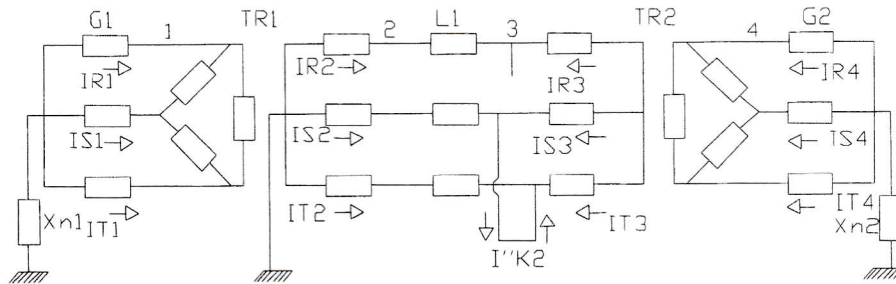
- $TR_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_n = 0$

- Línea  $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j178.5\Omega \quad \bar{X}_0 = j595.1\Omega$

- **Relación de transformación**

$$m = \frac{345}{20} = 17.25$$

- **Circuito equivalente al producirse una falta bifásica en las barras "3"**



- **Barras "3" a alta tensión (345kV) en el punto de cortocircuito**

- **Cálculo de las impedancias totales vistas desde las barras de cortocircuito**

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{TR1} + \bar{X}_L) // (\bar{X}_{TR2} + \bar{X}_{g2}) = (j511.72 // j333.22) = (0 + j201.8) = 201.8 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{X}_0 = (\bar{X}_{oTR1} + \bar{X}_{oL}) = (j95.22 + j595.1) = (0 + j690.32) = 690.32 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{X}_T = \bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_0 = (j201.8 + j201.8 + j690.32) = (0 + j1093.92) = 1093.92 \angle 90^\circ \Omega$$

- **Cálculo de las componentes simétricas totales en las barras de cortocircuito (345kV) con una falta bifásica**

$$\begin{aligned} \bar{V}_{R1} &= \bar{V}_{R2} & \bar{I}_{R1} &= -\bar{I}_{R2} & \bar{V}_{R0} &= \bar{I}_{R0} = 0 \\ \bar{I}_{R1} &= \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{345000\angle 0^\circ}{2 \cdot (201.8\angle 90^\circ)} = 493.5\angle -90^\circ A \end{aligned}$$

Además como sabemos que las corrientes  $I_{R1} = -I_{R2}$

$$\bar{I}_{R2} = -\bar{I}_{R1} = 493.5\angle 90^\circ A$$

No existe componente homopolar, ya que como se indica en el enunciado, el cortocircuito es bifásico, sin conexión a tierras, no existiendo fuga de corriente y por consiguiente siendo nula la componente que representa a estas fugas (la componente homopolar):

- **Intensidades de línea en el punto de cortocircuito (345kV) (Intensidades totales en el punto de cortocircuito halladas mediante sus correspondientes componentes simétricas):**

**Recordar que:**  $\bar{a} = 1\angle 0^\circ$      $\bar{a}^2 = 1\angle 120^\circ$      $\bar{a}^3 = 1\angle 240^\circ$

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 493.5\angle -90^\circ + 493.5\angle 90^\circ + 0\angle 0^\circ = 0\angle 0^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 493.5\angle(-90^\circ+240^\circ) + 493.5\angle(90^\circ+120^\circ) + 0\angle 0^\circ = 854.76\angle 180^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 493.5\angle(-90^\circ+120^\circ) + 493.5\angle(90^\circ+240^\circ) + 0\angle 0^\circ = 854.76\angle 0^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 0\angle 0^\circ A$$

O bien, directamente:  $\bar{I}_S = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} = \frac{1.1 \cdot 345000\angle 0^\circ}{2 \cdot (201.8\angle 90^\circ)} = (1.1)854.8\angle 180^\circ A$

Nunca se tiene en cuenta el factor (1.1), cuando se trabaja con componentes simétricas.

## 1 Hallamos todas las intensidades del circuito

Vamos a hallar las intensidades de línea correspondientes a diversos puntos del sistema de potencia. Para ello, nos basaremos en las componentes simétricas halladas para el apartado anterior (punto de cortocircuito).

Será necesario, mediante divisores de intensidad, dividir las componentes simétricas halladas (recordar que son las totales para el punto de cortocircuito), para las dos secciones en las que queda dividido el circuito a causa del cortocircuito producido en las barras "3" (ver redes de secuencia).

- **Reparto de las componentes simétricas de las corrientes**

Línea	$T_{R2}$ (primario)
$\bar{I}_{R1} = 493.5\angle -90^\circ \frac{j333.22}{j844.94} = 194.62\angle -90^\circ A$	$\bar{I}_{R1} = 493.5\angle -90^\circ \frac{j511.72}{j844.94} = 298.9\angle -90^\circ A$
$\bar{I}_{R2} = 493.5\angle 90^\circ \frac{j333.22}{j844.94} = 194.62\angle 90^\circ A$	$\bar{I}_{R2} = 493.5\angle 90^\circ \frac{j511.72}{j844.94} = 298.9\angle 90^\circ A$
$\bar{I}_{R0} = 0\angle 0^\circ A$	$\bar{I}_{R0} = 0\angle 0^\circ A$

- **Las intensidades serán:**

- EN LA LÍNEA  $L_1$  Y EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR  $T_{R1}$ : (valores denominados,  $I_{R2}$ ,  $I_{S2}$ ,  $I_{T2}$ ). (345kV)
- *Cálculo de intensidades de línea en la línea 1°*

Teniendo presentes las componentes simétricas halladas para este tramo del circuito, tendremos:

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 194.62 \angle -90^\circ + 194.62 \angle 90^\circ + 0 \angle 0^\circ = 0 \angle 0^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 194.62 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 194.62 \angle (90^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 337 \angle 180^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 194.62 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 194.62 \angle (90^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 337 \angle 0^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 0 \angle 0^\circ A$$

- EN EL GENERADOR  $G_1$ : (valores denominados,  $I_{R1}$ ,  $I_{S1}$ ,  $I_{T1}$ ). (20kV)

Para calcular las corrientes que fluyen a través de los bornes del generador  $G_1$ , será necesario pasar las componentes simétricas que transcurrían por la línea 1°, a través del transformador  $T_{R1}$ .

Para pasar las componentes simétricas a través de un transformador es preciso recordar los tres requisitos básicos dados en el problema 3.7 (a él nos remitimos para su comprensión):

- *Componentes simétricas de las intensidades en los bornes del generador  $G_1$*

En nuestro caso, perdemos tensión al pasar de la línea 1° (345kV) a los bornes del generador  $G_1$  (20kV). Teniendo presente las recomendaciones para transformadores, las componentes simétricas que pasaban por la línea 1°, al pasar a través del transformador  $T_{R1}$ , quedan convertidas de la siguiente forma:

$$\bar{I}'_{R1} = \bar{I}_{R1} \cdot m \angle -30^\circ = 194.62 \angle -90^\circ \cdot 17.25 \angle -30^\circ = 3357.2 \angle -120^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R2} = \bar{I}_{R2} \cdot m \angle 30^\circ = 194.62 \angle 90^\circ \cdot 17.25 \angle 30^\circ = 3357.2 \angle 120^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R0} = 0 \angle 0^\circ A$$

- *Cálculo de las intensidades de línea en los bornes del generador  $G_1$*

$$\bar{I}'_R = \bar{I}'_{R1} + \bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0} = 3357.2 \angle -120^\circ + 3357.2 \angle 120^\circ + 0 \angle 0^\circ = 3357.2 \angle 180^\circ A$$

$$\bar{I}'_S = \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R0} = 3357.2 \angle (-120^\circ + 240^\circ) + 3357.2 \angle (120^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 3357.2 \angle 180^\circ A$$

$$\bar{I}'_T = \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}'_{R0} = 3357.2 \angle (-120^\circ + 120^\circ) + 3357.2 \angle (120^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 6714.4 \angle 0^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I}' = 0 \angle 0^\circ A$$

- EN EL PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR  $T_{R2}$ : (valores denominados  $I_{R3}$ ,  $I_{S3}$ ,  $I_{T3}$ ) (345kV)
- *Cálculo de intensidades de línea en los bornes de  $T_{R2}$*

Teniendo presente las componentes simétricas halladas para este tramo del circuito, tendremos:

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 298.9 \angle -90^\circ + 298.9 \angle 90^\circ + 0 \angle 0^\circ = 0 \angle 0^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 298.9 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 298.9 \angle (90^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 517.7 \angle 180^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 298.7 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 298.7 \angle (90^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 517.7 \angle 0^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 0 \angle 0^\circ A$$

- EN EL GENERADOR  $G_2$ : (valores denominados,  $I_{R4}$ ,  $I_{S4}$ ,  $I_{T4}$ ). (20kV)

Para calcular las corrientes que fluyen a través de los bornes del generador  $G_2$ , será necesario pasar las componentes simétricas que transcurrían por el primario del transformador  $T_{R2}$ .

Para pasar las componentes simétricas a través de un transformador es preciso recordar los tres requisitos básicos dados en el problema 3.7 (a él nos remitimos para su comprensión):

- **Componentes simétricas de las intensidades en los bornes del generador  $G_2$**

En nuestro caso, perdemos tensión al pasar de los bornes del primario del transformador  $T_{R2}$  (345kV) a los bornes del generador  $G_2$  (20kV). Teniendo presente las recomendaciones para transformadores, las componentes simétricas, al pasar a través del transformador  $T_{R2}$ , quedan convertidas de la siguiente forma:

$$\bar{I}'_{R1} = \bar{I}'_{R1} \cdot m \cdot 1 \angle -30^\circ = 298.9 \angle -90^\circ \cdot 17.25 \cdot 1 \angle -30^\circ = 5156 \angle -120^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R2} = \bar{I}'_{R2} \cdot m \cdot 1 \angle 30^\circ = 298.9 \angle 90^\circ \cdot 17.25 \cdot 1 \angle 30^\circ = 5156 \angle 120^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R0} = 0 \angle 0^\circ A$$

- **Cálculo de las intensidades de línea en los bornes del generador  $G_2$**

$$\bar{I}'_R = \bar{I}'_{R1} + \bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0} = 5156 \angle -120^\circ + 5156 \angle 120^\circ + 0 \angle 0^\circ = 5156 \angle 180^\circ A$$

$$\bar{I}'_S = \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R0} = 5156 \angle (-120^\circ + 240^\circ) + 5156 \angle (120^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 5156 \angle 180^\circ A$$

$$\bar{I}'_T = \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}'_{R0} = 5156 \angle (-120^\circ + 120^\circ) + 5156 \angle (120^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 10312 \angle 0^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I}' = 0 \angle 0^\circ A$$

## 2 Tensiones de línea en el punto de cortocircuito (barras "3") (345kV)

- **Componentes simétricas**

Primeramente, hallamos las tensiones con componentes simétricas en el punto de cortocircuito. Por tanto, deberemos usar las intensidades e impedancias totales en el punto de cortocircuito.

$$\bar{V}_{R1} = \bar{E} - \bar{I}'_{R1} \bar{Z}_1 = \frac{345000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 493.5 \angle -90^\circ \cdot 201.8 \angle 90^\circ = 99597.5 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{R2} = -\bar{I}'_{R2} \bar{Z}_2 = -493.5 \angle 90^\circ \cdot 201.8 \angle 90^\circ = 99588.3 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{R0} = -\bar{I}'_{R0} \bar{Z}_0 = 0 \angle 0^\circ V$$

- **Calculamos las tensiones de fase en este punto de cortocircuito**

$$\bar{V}_{RN} = \bar{V}_{R1} + \bar{V}_{R2} + \bar{V}_{R0} = 99597.5 \angle 0^\circ + 99588.3 \angle 0^\circ = 199186 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{SN} = \bar{V}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R0} = 99597.5 \angle (0^\circ + 240^\circ) + 99588.3 \angle (0^\circ + 120^\circ) = 99592.9 \angle 180^\circ V$$

$$\bar{V}_{TN} = \bar{V}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{R0} = 99597.5 \angle (0^\circ + 120^\circ) + 99588.3 \angle (0^\circ + 240^\circ) = 99592.9 \angle 180^\circ V$$

- **Cálculo de las tensiones de línea en el punto de cortocircuito**

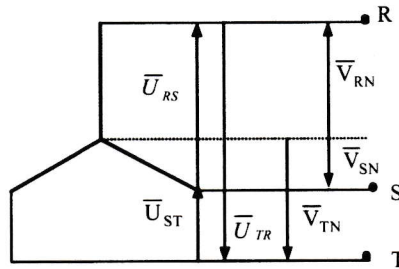
$$\bar{U}_{RS} = \bar{V}_{RN} - \bar{V}_{SN} = 199186 \angle 0^\circ - 99592.9 \angle 180^\circ = 298778.9 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}_{ST} = \bar{V}_{SN} - \bar{V}_{TN} = 99592.9 \angle 180^\circ - 99592.9 \angle 180^\circ = 0 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}_{TR} = \bar{V}_{TN} - \bar{V}_{RN} = 99592.9 \angle 180^\circ - 199186 \angle 0^\circ = 298778.9 \angle 180^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}_{\text{línea}} = 0 \angle 0^\circ$$

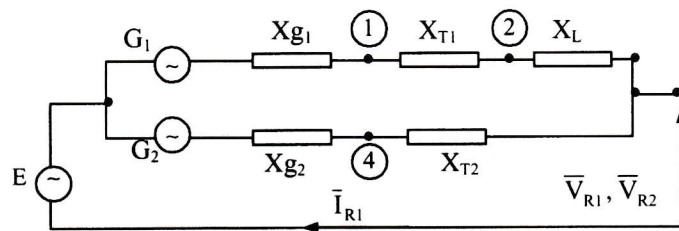
Para el cálculo de estas tensiones de línea nos puede ayudar el siguiente gráfico, donde se relacionan las tensiones de fase con las tensiones de línea:



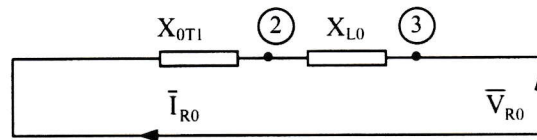
### 3 Tensiones de línea en barras "4" (20kV)

Para el cálculo de las tensiones en estas barras alejadas del punto de cortocircuito, serán de gran ayuda los siguientes esquemas que representan al circuito de potencia visto desde el punto de falta (barras "3"). Se representan tanto las secuencias directa e inversa como la secuencia homopolar:

- *Redes directa e inversa vistas desde las barras "3"*



- *Red homopolar vistas desde las barras "3"*



- **Cálculo de las tensiones por componentes simétricas en barras "4"**

Para realizar este cálculo, debe tenerse presente que estamos situados en la zona de 20kV, con todos los cambios en cuanto a las magnitudes eléctricas (módulos y ángulos) que esto representa.

Primeramente pasamos a la tensión de 20kV las componentes simétricas de las tensiones, halladas en el punto del cortocircuito (345kV):

$$\bar{V}''_{R1} = \frac{\bar{V}_{R1}}{m} \cdot 1 \angle -30^\circ = \frac{99597.5 \angle 0^\circ}{17.25} \cdot 1 \angle -30^\circ = 5773.77 \angle -30^\circ V$$

$$\bar{V}''_{R2} = \frac{\bar{V}_{R2}}{m} \cdot 1 \angle 30^\circ = \frac{99597.5 \angle 0^\circ}{17.25} \cdot 1 \angle 30^\circ = 5773.77 \angle 30^\circ V$$

$$\bar{V}''_{R0} = 0 \angle 0^\circ V$$

Una vez pasadas las componentes simétricas de las tensiones en el punto de cortocircuito a bajo nivel de tensión, procedemos al cálculo de dichas componentes simétricas pero ahora en el punto (barras) deseado. Existen dos formas para realizar este cálculo:

- **Método A**

Con este método, se resta de la tensión total en el punto de cortocircuito, la caída de tensión que se produce hasta alcanzar el punto o barras de conexión deseadas. (Resulta de gran utilidad para la comprensión de las siguientes expresiones los esquemas dados en este apartado de las redes de secuencia vistas desde el punto ó barras "3".)

$$\bar{V}'_{R1} = \bar{E}' - \bar{I}'_{R1} \bar{X}_{1g2} = \frac{20000 \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} - 5156 \angle -120^\circ \cdot 0.8 \angle 90^\circ = 7422.2 \angle -30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R2} = -\bar{I}'_{R2} \bar{X}_{2g2} = -5156 \angle 120^\circ \cdot 0.8 \angle 90^\circ = 4124.8 \angle 30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R0} = -\bar{I}'_{R0} \bar{X}_{og2} = 0 \angle 0^\circ V$$

- **Método B**

Con este método, se suma a la tensión total de las componentes simétricas en el punto de cortocircuito la caída de tensión que se produce hasta alcanzar el punto o barras de conexión deseadas. (Resulta de gran utilidad para la comprensión de las siguientes expresiones los esquemas dados en este apartado de las redes de secuencia vistas desde el punto ó barras "3".)

$$\bar{V}'_{R1} = \bar{V}''_{R1} + \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{X}_{TR2} = 5773.77 \angle -30^\circ + 5156 \angle -120^\circ \cdot 0.32 \angle 90^\circ = 7423.6 \angle -30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R2} = \bar{V}''_{R2} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{X}_{TR2} = 5773.77 \angle 30^\circ + 5156 \angle 120^\circ \cdot 0.32 \angle 90^\circ = 4123.8 \angle 30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R0} = 0 \angle 0^\circ V$$

- **Cálculo de las tensiones de fase en las barras "4"**

Utilizando cualquiera de los dos métodos anteriores:

$$\bar{V}'_{RN} = \bar{V}'_{R1} + \bar{V}'_{R2} + \bar{V}'_{R0} = 7423.6 \angle -30^\circ + 4123.8 \angle 30^\circ = 10136.3 \angle -9.36^\circ V$$

$$\bar{V}'_{SN} = \bar{V}'_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}'_{R0} = 7423.6 \angle (-30^\circ + 240^\circ) + 4124.8 \angle (30^\circ + 120^\circ) = 10136.3 \angle -170.6^\circ V$$

$$\bar{V}'_{TN} = \bar{V}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}'_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}'_{R0} = 7423.6 \angle (-30^\circ + 120^\circ) + 4124.8 \angle (30^\circ + 240^\circ) = 3298.8 \angle 90^\circ V$$

- **Cálculo de las tensiones de línea en las barras "4"**

$$\bar{U}'_{RS} = \bar{V}'_{RN} - \bar{V}'_{SN} = 10136.3 \angle -9.36^\circ - 10136.3 \angle -170.6^\circ = 20001.4 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}'_{ST} = \bar{V}'_{SN} - \bar{V}'_{TN} = 10136.3 \angle -170.6^\circ - 3298.8 \angle 90^\circ = 11160.15 \angle -153.6^\circ V$$

$$\bar{U}'_{TR} = \bar{V}'_{TN} - \bar{V}'_{RN} = 3298.8 \angle 90^\circ - 10136.3 \angle -9.36^\circ = 11158.3 \angle 153.7^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}'_{línea} = 0 \angle 0^\circ$$

La suma de las tensiones de línea debe ser nula.

**PROBLEMA 3.9**

Dos máquinas síncronas se conectan a través de transformadores trifásicos a una línea de transmisión, como se muestra en la figura. Los valores que definen al sistema de potencia son:

**DATOS**

$G_1, G_2$ : .....100 MVA.....20KV..... $X''_d = X_1 = X_2 = 20\%$ .....  $X_0 = 4\%$ ..... $X_n = 5\%$   
 $T_{R1}, T_{R2}$ : .....100MVA.....345/20KV..... $excc = X_1 = X_2 = X_0 = 8\%$ ..... $X_n = 0\%$   
 Línea..... $X_1 = X_2 = j 178.5\Omega$ ..... $X_0 = j 595.1\Omega$

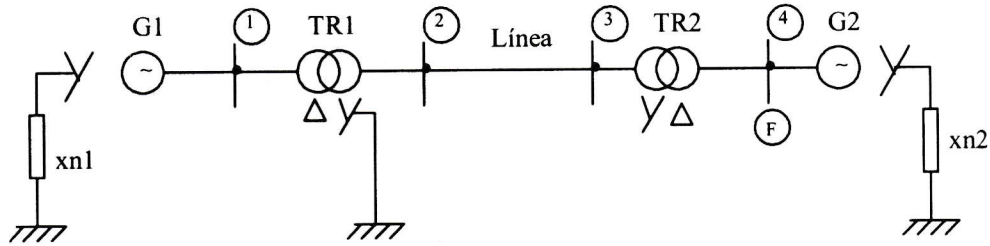


Figura 3.9 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.9

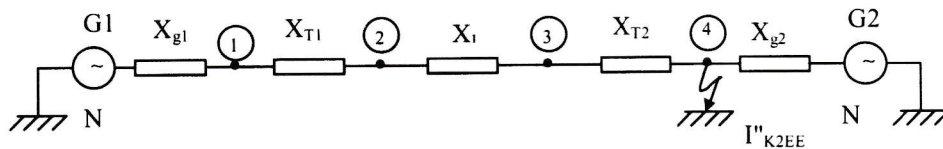
**HALLAR**

Se produce una falta bifásica a tierra en barras "4":

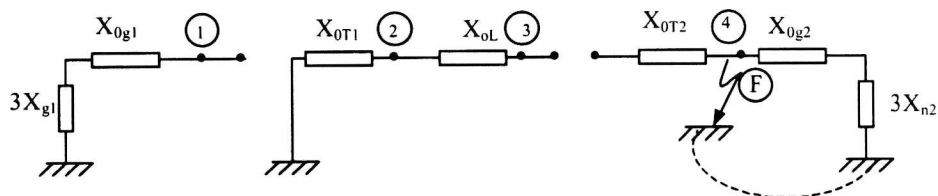
1. Todas las intensidades del circuito.
2. Tensiones de línea en el punto de cortocircuito (barras "4").
3. Tensiones de línea en los bornes del generador (barras "1").
4. Tensiones de línea en los bornes del secundario del transformador  $T_{R1}$  (barras "2").

**RESOLUCIÓN**

- **Redes de secuencia directa, inversa y homopolar**
- **Redes de secuencia directa e inversa (sin generadores)**



- **Red de secuencia homopolar**



• **Cálculo de impedancias**

• **Cálculo de impedancias a 20kV**

• G<sub>1</sub>     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.2 \frac{(20)^2}{100} = j0.8\Omega$      $\bar{X}_0 = 0.04 \frac{(20)^2}{100} = j0.16\Omega$      $\bar{X}_n = 0.05 \left( \frac{20}{100} \right)^2 = j0.2\Omega$

• G<sub>2</sub>     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.2 \frac{(20)^2}{100} = j0.8\Omega$      $\bar{X}_0 = 0.04 \frac{(20)^2}{100} = j0.16\Omega$      $\bar{X}_n = 0.05 \left( \frac{20}{100} \right)^2 = j0.2\Omega$

• TR<sub>1</sub>     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega$      $\bar{X}_0 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega$      $\bar{X}_n = 0$

• TR<sub>2</sub>     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega$      $\bar{X}_0 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega$      $\bar{X}_n = 0$

• Línea     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j178.5}{(17.25)^2} = j0.6\Omega$      $\bar{X}_0 = \frac{j595.1}{(17.25)^2} = j2\Omega$

• **Cálculo de impedancias a 345kV**

• G<sub>1</sub>     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j0.8)(17.25)^2 = j238\Omega$      $\bar{X}_0 = (j0.16)(17.25)^2 = j47.6\Omega$      $\bar{X}_n = j59.5\Omega$

• G<sub>2</sub>     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j0.8)(17.25)^2 = j238\Omega$      $\bar{X}_0 = (j0.16)(17.25)^2 = j47.6\Omega$      $\bar{X}_n = j59.5\Omega$

• TR<sub>1</sub>     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega$      $\bar{X}_0 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega$      $\bar{X}_n = 0$

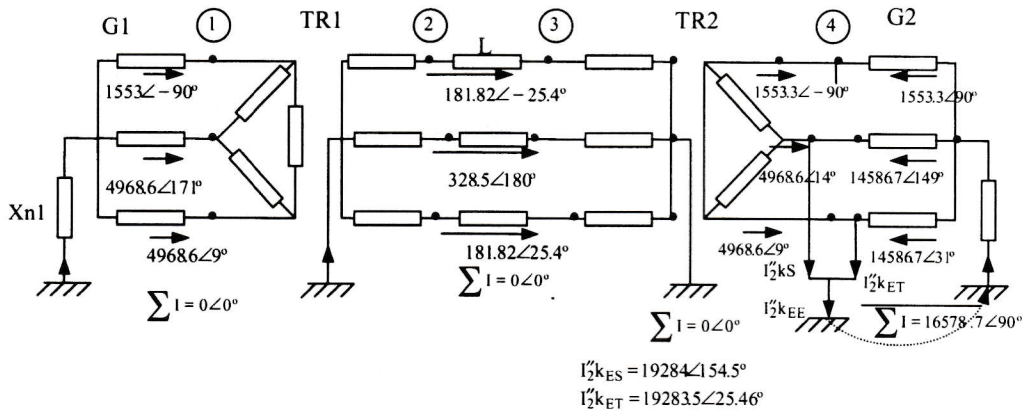
• TR<sub>2</sub>     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega$      $\bar{X}_0 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega$      $\bar{X}_n = 0$

• Línea     $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j178.5\Omega$      $\bar{X}_0 = j595.1\Omega$

• **Relación de transformación**

$$m = \frac{345}{20} = 17.25$$

**Circuito equivalente al producirse una falta bifásica a tierra en las barras "4"**



• **Barras "4" a nivel bajo de tensión (20kV) en el punto de cortocircuito**

• **Cálculo de las impedancias totales vistas desde las barras de cortocircuito**

$$\bar{Z}_{4_1} = \bar{Z}_{4_2} = \left[ (\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{TR1} + \bar{X}_L + \bar{X}_{TR2}) // (\bar{X}_{g2}) \right] = [(j2.04 // j0.8)] = (0 + j0.574) = 0.574\angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{4o} = [(\bar{X}_{og2} + 3\bar{X}_{n2})] = [j0.16 + 3(j0.2)] = (0 + j0.76) = 0.76\angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_T = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_o = (j0.574 + j0.574 + j0.76) = (0 + j1.908) = 1.908\angle 90^\circ \Omega$$

- **Cálculo de las componentes simétricas totales de las corrientes en el punto de cortocircuito considerando un cortocircuito bifásico a tierras**

Aplicando las ecuaciones correspondientes a este tipo de cortocircuitos:

$$\bar{I}_{R1} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + (\bar{Z}_2 // \bar{Z}_o)} = \frac{20000\angle 0^\circ / \sqrt{3}}{j0.574 + (j0.574 // j0.76)} = \frac{20000\angle 0^\circ / \sqrt{3}}{0.901\angle 90^\circ} = 12815.5\angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{R2} = -\bar{I}_{R1} \frac{\bar{Z}_o}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_o} = -12815.5\angle -90^\circ \frac{j0.76}{j0.76 + j0.574} = 7301.18\angle 90^\circ A$$

$$\bar{I}_{R0} = -\bar{I}_{R1} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_o} = -12815.5\angle -90^\circ \frac{j0.574}{j0.76 + j0.574} = 5514.3\angle 90^\circ A$$

Con este tipo de cortocircuito bifásico a tierra, es necesario considerar las componentes homopolares, ya que existe una fuga de corriente hacia tierra.

- **Intensidades de línea en el punto de cortocircuito (Intensidades totales en el punto de cortocircuito halladas mediante sus correspondientes componentes simétricas):**

**Recordar que:**  $\bar{a} = 1\angle 0^\circ$      $\bar{a}^2 = 1\angle 120^\circ$      $\bar{a}^3 = 1\angle 240^\circ$

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 12815.5\angle -90^\circ + 7301.18\angle 90^\circ + 5514.3\angle 90^\circ = 0\angle 0^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 12815.5\angle (150^\circ) + 7301.18\angle (90^\circ + 120^\circ) + 5514.3\angle 90^\circ = 19285.4\angle 154.6^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 12815.5\angle (30^\circ) + 7301.18\angle (90^\circ + 240^\circ) + 5514.3\angle 90^\circ = 19285.4\angle 25.4^\circ A$$

$$\bar{I}_{2KEE}'' = \bar{I}_{2KES}'' + \bar{I}_{2KET}'' = 16544.37\angle 90^\circ A$$

En este caso, como existe fuga de energía a tierra, la suma de las intensidades de línea en el punto de cortocircuito no será nula. Existe una componente, que es precisamente la corriente total de cortocircuito.

## 1 Hallamos todas las intensidades del circuito

Vamos a hallar las intensidades de línea correspondientes a diversos puntos del sistema de potencia. Para ello, nos basaremos en las componentes simétricas halladas en el apartado anterior (punto de cortocircuito).

Será necesario, mediante divisores de intensidad, dividir las componentes simétricas halladas (recordar que son las totales para el punto de cortocircuito), para las dos secciones en las que queda dividido el circuito a causa del cortocircuito producido en las barras "4" (ver redes de secuencia).

- **Reparto de las componentes simétricas de las corrientes**

**Secundario del T<sub>R2</sub>**

$$\bar{I}_{R1} = \bar{I}_{R1T} \frac{j0.8}{j2.84} = 3610\angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{R2} = \bar{I}_{R2T} \frac{j0.8}{j2.84} = 2056.7\angle 90^\circ A$$

$$\bar{I}_{R0} = \bar{I}_{R0T} \cdot 0 = 0\angle 0^\circ A$$

**Generador G<sub>2</sub>**

$$\bar{I}_{R1} = 12815.5\angle -90^\circ \frac{j2.04}{j2.84} = 9205.5\angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{R2} = 7301.18\angle 90^\circ \frac{j2.04}{j2.84} = 5244.5\angle 90^\circ A$$

$$\bar{I}_{R0} = \bar{I}_{R0T} = 5514.3\angle 90^\circ A$$

Nótese que la componente homopolar que circulará por los terminales del transformador  $T_{R2}$  será nula, ya que como indica la red de secuencia homopolar, este transformador no permite el paso de esta componente. (Toda la componente homopolar deberá pasar por el generador  $G_2$ ).

- **EN EL GENERADOR  $G_2$ : (20kV) (valores especificados en el esquema del circuito equivalente del sistema de potencia)**

Para calcular las corrientes que fluyen a través de los bornes del generador  $G_2$ , no será necesario pasar las componentes simétricas por ningún transformador, por tanto adoptando directamente los valores de las mismas dados en el divisor de intensidad del apartado anterior, tendremos:

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 9205.5 \angle -90^\circ + 5244.5 \angle 90^\circ + 5514.3 \angle 90^\circ = 1553.3 \angle 90^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 9205.5 \angle (150^\circ) + 5244.5 \angle (90^\circ + 120^\circ) + 5514.3 \angle 90^\circ = 14586.7 \angle 149^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 9205.5 \angle (30^\circ) + 5244.5 \angle (90^\circ + 240^\circ) + 5514.3 \angle 90^\circ = 14586.7 \angle 31^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 16578.70 \angle 90^\circ A$$

El valor de la suma de intensidades se corresponde con el valor total de la corriente de cortocircuito bifásico a tierras, ya que precisamente este valor es el retorno de la corriente total de falta a través de tierra.

- **EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR  $T_{R2}$ : (20kV) (valores especificados en el esquema del circuito equivalente del sistema de potencia)**

Para calcular las corrientes que fluyen a través de los bornes del secundario del transformador  $T_{R2}$ , no es necesario pasar las componentes simétricas por ningún transformador, por tanto se podrán adoptar directamente los valores de las mismas dados en el divisor de intensidad del apartado anterior.

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 3610 \angle -90^\circ + 2056.7 \angle 90^\circ + 0 \angle 0^\circ = 1553.3 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 3610 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 2056.7 \angle (90^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 4968.6 \angle 171^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 3610 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 2056.7 \angle (90^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 4968.6 \angle 9^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 0 \angle 0^\circ A$$

En esta ocasión la suma de intensidades es nula, ya que el  $T_{R2}$ , no tiene conexión a tierra (triángulo) y por tanto no puede tener resultante la suma de las intensidades de línea que a él acometen.

- **EN LA LÍNEA  $L_1$ , EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR  $T_{R1}$ , Y EN EL PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR  $T_{R2}$ : (345kV) (valores especificados en el esquema del circuito equivalente del sistema de potencia)**

- **Cálculo de intensidades de línea para estos elementos**

Para calcular las corrientes que fluyen a través de los bornes del secundario del transformador  $T_{R1}$  y de la línea, al estar al nivel alto de tensión (345kV), será necesario pasar las componentes simétricas que transcurrían a través del secundario del transformador  $T_{R2}$ .

Para pasar las componentes simétricas a través de un transformador es preciso recordar los tres requisitos básicos dados en el problema 3.7 (a él nos remitimos para su comprensión).

- **Componentes simétricas de las intensidades en los bornes del transformador  $T_{R2}$  y de la línea**

En nuestro caso, ganamos tensión al pasar del secundario del transformador  $T_{R2}$  (20kV) a la línea 1° (345kV). Teniendo presente las recomendaciones para transformadores, las componentes simétricas que pasaban por el secundario del transformador  $T_{R2}$ , al pasar a través del mismo transformador se convierten en la línea 1° en:

$$\begin{aligned}\bar{I}'_{R1} &= \frac{\bar{I}_{R1}}{m} \cdot 1 \angle 30^\circ = \frac{3610 \angle -90^\circ}{17.25} \cdot 1 \angle 30^\circ = 209.27 \angle -60^\circ A \\ \bar{I}'_{R2} &= \frac{\bar{I}_{R2}}{m} \cdot 1 \angle -30^\circ = \frac{2056.7 \angle 90^\circ}{17.25} \cdot 1 \angle -30^\circ = 119.23 \angle 60^\circ A \\ \bar{I}'_{R0} &= 0 \angle 0^\circ A\end{aligned}$$

- **Cálculo de las corrientes de línea en los bornes del transformador  $T_{R2}$  y de la línea**

$$\begin{aligned}\bar{I}'_R &= \bar{I}'_{R1} + \bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0} = 209.27 \angle -60^\circ + 119.23 \angle 60^\circ + 0 \angle 0^\circ = 181.82 \angle -25.4^\circ A \\ \bar{I}'_S &= \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R0} = 209.27 \angle (-60^\circ + 240^\circ) + 119.23 \angle (60^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 328.5 \angle 180^\circ A \\ \bar{I}'_T &= \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}'_{R0} = 209.27 \angle (-60^\circ + 120^\circ) + 119.23 \angle (60^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 181.82 \angle 25.4^\circ A \\ \Sigma \bar{I}' &= 0 \angle 0^\circ A\end{aligned}$$

La suma de las corrientes de línea debe ser nula (consultar el circuito equivalente).

- **EN EL GENERADOR  $G_1$ : (20kV) (valores especificados en el esquema del circuito equivalente del sistema de potencia)**

Para calcular las corrientes que fluyen a través de los bornes del generador  $G_1$ , será necesario pasar las componentes simétricas que transcurrían por la línea 1°, a través del transformador  $T_{R1}$ .

Para pasar las componentes simétricas a través de un transformador es preciso recordar los tres requisitos básicos dados en el problema 3.7 (a él nos remitimos para su comprensión).

- **Componentes simétricas de las intensidades en los bornes del generador  $G_1$**

En nuestro caso, perdemos tensión al pasar de la línea 1° (345kV) a los bornes del generador  $G_1$  (20kV). Teniendo presente las recomendaciones para transformadores, las componentes simétricas que pasaban por la línea 1°, al pasar a través del transformador  $T_{R1}$ , quedan convertidas de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\bar{I}''_{R1} &= \bar{I}'_{R1} \cdot m \cdot 1 \angle -30^\circ = 209.27 \angle -60^\circ \cdot 17.25 \cdot 1 \angle -30^\circ = 3610 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}''_{R2} &= \bar{I}'_{R2} \cdot m \cdot 1 \angle 30^\circ = 119.23 \angle 60^\circ \cdot 17.25 \cdot 1 \angle 30^\circ = 2056.7 \angle 90^\circ A \\ \bar{I}''_{R0} &= 0 \angle 0^\circ A\end{aligned}$$

El transformador  $T_{R1}$ , no permite el paso de las corrientes homopolares a través de él, como queda reflejado en la red de secuencia homopolar. Aparte, se comprueba que las intensidades que pasan por los bornes del generador  $G_1$ , coinciden con las intensidades del secundario del transformador  $T_{R2}$ , (es normal ya que los dos se encuentran a igual potencial y han sufrido iguales transformaciones).

- **Cálculo de las intensidades de línea en los bornes del generador  $G_1$**

$$\begin{aligned}\bar{I}''_R &= \bar{I}''_{R1} + \bar{I}''_{R2} + \bar{I}''_{R0} = 3610 \angle -90^\circ + 2056.7 \angle 90^\circ + 0 \angle 0^\circ = 1553.3 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}''_S &= \bar{I}''_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}''_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}''_{R0} = 3610 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 2056.7 \angle (90^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 4968.6 \angle 171^\circ A \\ \bar{I}''_T &= \bar{I}''_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}''_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}''_{R0} = 3610 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 2056.7 \angle (90^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 4968.6 \angle 9^\circ A \\ \Sigma \bar{I}'' &= 0 \angle 0^\circ A\end{aligned}$$

La suma de las corrientes de línea a través del generador  $G_1$  debe ser nula (consultar el circuito equivalente).

## 2 Tensiones de línea en el punto de cortocircuito (barras "4" a 20 kV)

- **Componentes simétricas**

Primeramente, hallamos las tensiones con componentes simétricas en el punto de cortocircuito. Por tanto, deberemos usar las intensidades e impedancias totales en el punto de cortocircuito.

$$\bar{V}_{R1} = \bar{E} - \bar{I}_{R1} \bar{Z}_1 = \bar{V}_{R2} = \bar{V}_{R0} = \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 12815.5 \angle -90^\circ \cdot 0.574 \angle 90^\circ = 4190 \angle 0^\circ V$$

Con este tipo de cortocircuito bifásico a tierra, coinciden los valores de las tres componentes simétricas de las tensiones.

- **Calculamos las tensiones de fase en este punto de cortocircuito**

$$\bar{V}_{RN} = \bar{V}_{R1} + \bar{V}_{R2} + \bar{V}_{R0} = 3\bar{V}_{R1} = 3(4190 \angle 0^\circ) = 12567.76 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{SN} = \bar{V}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R0} = \bar{V}_{R1}(1 + \bar{a} + \bar{a}^2) = 0 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{TN} = \bar{V}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{R0} = \bar{V}_{R1}(1 + \bar{a} + \bar{a}^2) = 0 \angle 0^\circ V$$

- **Cálculo de las tensiones de línea en el punto de cortocircuito**

$$\bar{U}_{RS} = \bar{V}_{RN} - \bar{V}_{SN} = 12567.76 \angle 0^\circ - 0 \angle 0^\circ = 12567.76 \angle 0^\circ V$$

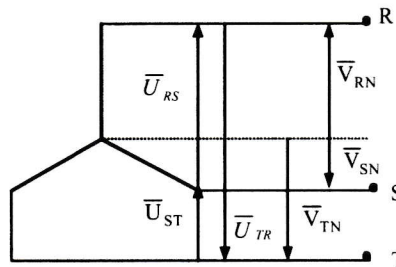
$$\bar{U}_{ST} = \bar{V}_{SN} - \bar{V}_{TN} = 0 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}_{TR} = \bar{V}_{TN} - \bar{V}_{RN} = 0 \angle 0^\circ - 12567.76 \angle 0^\circ = 12567.76 \angle 180^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}_{\text{línea}} = 0 \angle 0^\circ$$

La suma de las tensiones de línea, aun con cortocircuito con fugas a tierra, debe ser siempre cero.

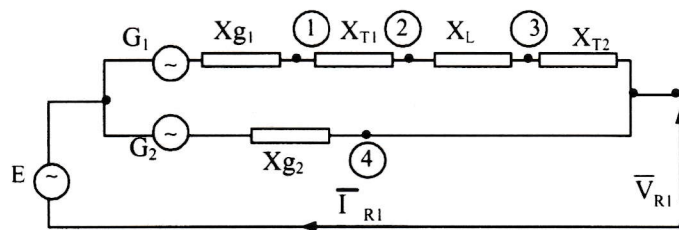
Para el cálculo de estas tensiones de línea, nos puede ayudar el siguiente gráfico, donde se relacionan las tensiones de fase con las tensiones de línea:



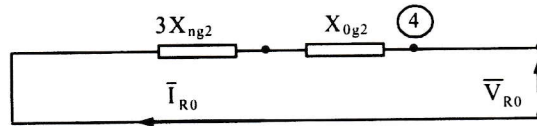
### 3 Tensiones de línea en barras "1" del generador G<sub>1</sub>: (20kV)

Para el cálculo de las tensiones en estas barras alejadas del punto de cortocircuito, serán de gran ayuda los siguientes esquemas que representan al circuito de potencia visto desde el punto de falta (barras "4"). Se representan tanto las secuencias directa e inversa como la secuencia homopolar:

- **Redes directa e inversa vistas desde las barras "4"**



- **Red homopolar vista desde las barras "4"**



- **Cálculo de las tensiones por componentes simétricas en barras "1"**

Para realizar este cálculo, debe tenerse presente que estamos situados en la zona de 20kV, con todos los cambios en cuanto a las magnitudes eléctricas (módulos y ángulos) que esto representa.

Al contrario que en los problemas precedentes, en este caso la tensión del punto de cortocircuito (bornes del generador  $G_2$  a 20kV) coincide con la tensión pedida en los bornes del generador  $G_1$ , que también es de 20kV; por tanto, las componentes simétricas halladas en el punto de cortocircuito (barras "4") ya no deberán ser modificadas para buscar las componentes simétricas de las tensiones en las barras "1". Estas componentes eran:

$$\bar{V}_{R1} = 4190 \angle 0^\circ V \quad \bar{V}_{R2} = 4190 \angle 0^\circ V \quad \bar{V}_{R0} = 0 \angle 0^\circ V$$

Para hallar las componentes simétricas de las tensiones en la nueva posición (barra "1"), podremos realizar los cálculos de dos formas diferentes.

- **Método A**

Con este método, se resta de la tensión total en el punto de cortocircuito (al nivel de tensión adecuado) la caída de tensión que se produce hasta alcanzar el punto o barras de conexión deseadas. (Resultan de gran utilidad para la comprensión de las siguientes expresiones los esquemas dados en este apartado de las redes de secuencia vistas desde el punto o barras "4").

$$\bar{V}''_{R1} = \bar{E}'' - \bar{I}''_{R1} \cdot X_{g1} = \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 3610 \angle -90^\circ \cdot 0.8 \angle 90^\circ = 8666 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}''_{R2} = -\bar{I}''_{R2} \cdot X_{g1} = -2056.7 \angle 90^\circ \cdot 0.8 \angle 90^\circ = 1645 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}''_{R0} = -\bar{I}''_{R0} \cdot \bar{X}_{g1} = 0 \angle 0^\circ V$$

- **Método B**

Con este método, se suma a la tensión total de las componentes simétricas en el punto de cortocircuito (al nivel de tensión adecuado) la caída de tensión que se produce hasta alcanzar el punto o barras de conexión deseadas. (Resultan de gran utilidad para la comprensión de las siguientes expresiones los esquemas dados en este apartado de las redes de secuencia vistas desde el punto o barras "4").

$$\bar{V}''_{R1} = \bar{V}_{R1} + (\bar{X}_{TR2} + \bar{X}_L + \bar{X}_{TR1}) \bar{I}''_{R1} = 4190 \angle 0^\circ + 1.24 \angle 90^\circ \cdot 3610 \angle -90^\circ = 8666 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}''_{R2} = \bar{V}_{R2} + (\bar{X}_{TR2} + \bar{X}_L + \bar{X}_{TR1}) \bar{I}''_{R2} = 4190 \angle 0^\circ + 1.24 \angle 90^\circ \cdot 2056.7 \angle 90^\circ = 1639.7 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}''_{R0} = \bar{V}_{R0} + 0 \cdot \bar{I}''_{R0} = 0 \angle 0^\circ V$$

- **Cálculo de las tensiones de fase en las barras "1" del generador  $G_1$**

$$\bar{V}''_{RN} = \bar{V}''_{R1} + \bar{V}''_{R2} + \bar{V}''_{R0} = 8666 \angle 0^\circ + 1639.7 \angle 0^\circ + 0 \angle 0^\circ = 10305 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}''_{SN} = \bar{V}''_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}''_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}''_{R0} = 8666 \angle (0^\circ + 240^\circ) + 1639.7 \angle (0^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 7966 \angle -130.3^\circ V$$

$$\bar{V}''_{TN} = \bar{V}''_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}''_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}''_{R0} = 8666 \angle (0^\circ + 120^\circ) + 1639.7 \angle (0^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 7966 \angle 130.3^\circ V$$

- **Cálculo de las tensiones de línea en las barras "1" del generador  $G_1$**

$$\bar{U}''_{RS} = \bar{V}''_{RN} - \bar{V}''_{SN} = 10305 \angle 0^\circ - 7966 \angle -130.3^\circ = 16608.4 \angle 21.45^\circ V$$

$$\bar{U}''_{ST} = \bar{V}''_{SN} - \bar{V}''_{TN} = 7966 \angle -130.3^\circ - 7966 \angle 130.3^\circ = 12150.6 \angle -90^\circ V$$

$$\bar{U}''_{TR} = \bar{V}''_{TN} - \bar{V}''_{RN} = 7966 \angle 130.3^\circ - 10305 \angle 0^\circ = 16608.4 \angle 158.54^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}''_{Linea} = 0 \angle 0^\circ V$$

La suma de tensiones de línea da un valor nulo, como era de esperar.

#### 4 Tensiones de línea en barras "2" del secundario del transformador $T_{R1}$ : (345kV)

Para realizar este cálculo, debe tenerse presente que estamos situados en la zona de 345kV, con todos los cambios en cuanto a las magnitudes eléctricas (módulos y ángulos) que esto representa.

Primeramente pasamos a la tensión de 345kV las componentes simétricas de las tensiones, halladas en el punto del cortocircuito (20kV):

$$\bar{V}'_{R1} = \bar{V}_{R1} \cdot m \cdot 1 \angle -30^\circ = 4190 \angle 0^\circ \cdot 17.25 \cdot 1 \angle 30^\circ = 72277.5 \angle 30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R2} = \bar{V}_{R2} \cdot m \cdot 1 \angle 30^\circ = 4190 \angle 0^\circ \cdot 17.25 \cdot 1 \angle -30^\circ = 72277.5 \angle -30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R0} = 0 \angle 0^\circ V$$

Una vez pasadas las componentes simétricas de las tensiones en el punto de cortocircuito al alto de tensión, procedemos al cálculo de dichas componentes simétricas pero ahora en el punto (barras) deseado. Existen dos formas para realizar este cálculo:

##### • Método A

Con este método, se resta de la tensión total en el punto de cortocircuito la caída de tensión que se produce hasta alcanzar el punto o barras de conexión deseadas. (Resultan de gran utilidad para la comprensión de las siguientes expresiones los esquemas dados en este apartado de las redes de secuencia vistas desde el punto o barras "4").

$$\bar{V}'_{R1} = \bar{E}' - \bar{I}'_{R1} (\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{TR1}) = \frac{345000 \angle (0^\circ - 30^\circ)}{\sqrt{3}} - 209.27 \angle -60^\circ \cdot 333.27 \angle 90^\circ = 129442.43 \angle 30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R2} = -\bar{I}'_{R2} (\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{TR1}) = -119.23 \angle 60^\circ \cdot 333.27 \angle 90^\circ = 39735.7 \angle -30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R0} = -\bar{I}'_{R0} (\bar{X}_{og1} + \bar{X}_{oTR1}) = 0 \angle 0^\circ V$$

##### • Método B

Con este método, se suma a la tensión total de las componentes simétricas en el punto de cortocircuito la caída de tensión que se produce hasta alcanzar el punto o barras de conexión deseadas. (Resultan de gran utilidad para la comprensión de las siguientes expresiones los esquemas dados en este apartado de las redes de secuencia vistas desde el punto o barras "4").

$$\bar{V}'_{R1} = \bar{V}'_{R1} + \bar{I}'_{R1} (\bar{X}_L + \bar{X}_{TR2}) = 72277.5 \angle 30^\circ + 209.27 \angle -60^\circ \cdot 273.72 \angle 90^\circ = 129559 \angle 30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R2} = \bar{V}'_{R2} + \bar{I}'_{R2} (\bar{X}_L + \bar{X}_{TR2}) = 72277.5 \angle -30^\circ + 119.23 \angle 60^\circ \cdot 273.72 \angle 90^\circ = 39642 \angle -30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R0} = \bar{V}'_{R0} + \bar{I}'_{R0} (\bar{X}_L + \bar{X}_{TR2}) = 0 \angle 0^\circ V$$

##### • Cálculo de las tensiones de fase en las barras "2"

Utilizando cualquiera de los dos métodos anteriores:

$$\bar{V}'_{RN} = \bar{V}'_{R1} + \bar{V}'_{R2} + \bar{V}'_{R0} = 129559 \angle 30^\circ + 39642 \angle -30^\circ + 0 \angle 0^\circ = 153224.5 \angle 17^\circ V$$

$$\bar{V}'_{SN} = \bar{V}'_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}'_{R0} = 129559 \angle 270^\circ + 39642 \angle 60^\circ + 0 \angle 0^\circ = 89706.6 \angle -90^\circ V$$

$$\bar{V}'_{TN} = \bar{V}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}'_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}'_{R0} = 129559 \angle 150^\circ + 39642 \angle 210^\circ + 0 \angle 0^\circ = 153224.5 \angle 163^\circ V$$

##### • Cálculo de las tensiones de línea en las barras "2"

$$\bar{U}'_{RS} = \bar{V}'_{RN} - \bar{V}'_{SN} = 153224.5 \angle 17^\circ - 89706.6 \angle -90^\circ = 198927.8 \angle 42.6^\circ V$$

$$\bar{U}'_{ST} = \bar{V}'_{SN} - \bar{V}'_{TN} = 89706.6 \angle -90^\circ - 153224.5 \angle 163^\circ = 198927.8 \angle -42.56^\circ V$$

$$\bar{U}'_{TR} = \bar{V}'_{TN} - \bar{V}'_{RN} = 153224.5 \angle 163^\circ - 153224.5 \angle 17^\circ = 293025 \angle 180^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}'_{línea} = 0 \angle 0^\circ$$

La suma de las tensiones de línea debe ser nula.

**PROBLEMA 3.10**

Dos generadores síncronos de 40MVA y 10kV cada uno se disponen en paralelo, suministrando energía a una línea de distribución. Las impedancias secuenciales de los generadores y la línea son:

**DATOS**

	Generadores	Línea
Secuencia directa.....	$j 6\Omega$	$j 10\Omega$
Secuencia inversa.....	$j 4\Omega$	$j 10\Omega$
Secuencia homopolar.....	$j 1\Omega$	$j 20\Omega$

El primer generador tiene su punto neutro aislado de tierra, mientras que el segundo generador tiene su punto neutro conectado a tierra a través de una resistencia de  $0.8 \Omega$ .

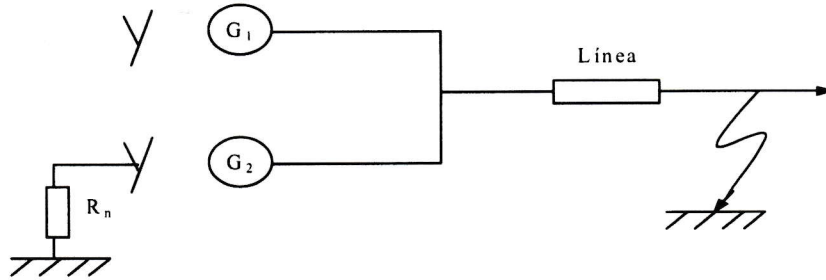


Figura 3.10 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.10

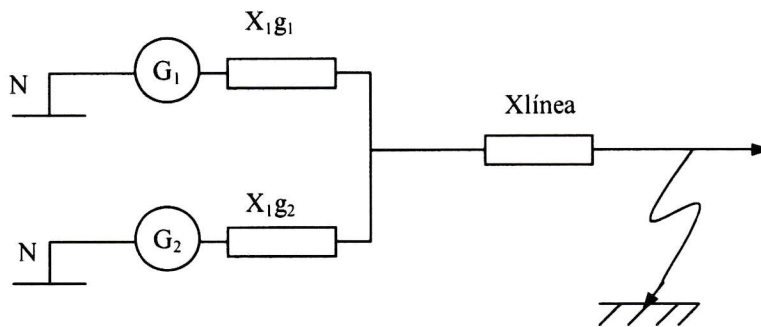
**HALLAR**

Si se produce un cortocircuito entre la fase "R" y tierra (cortocircuito monofásico), en el extremo más alejado de la línea, y se supone que los generadores antes de la falla trabajan sin carga:

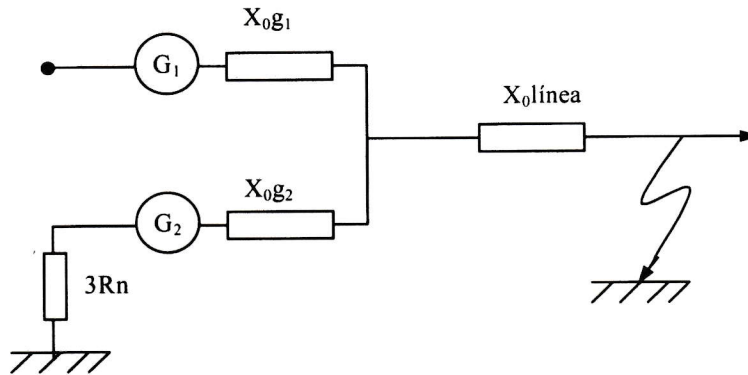
1. La intensidad monofásica de cortocircuito ( $I''_{k1}$ ), en el punto de la falla.
2. La intensidad que circula por la fase "S", del primer generador ( $I_{Sg1}$ ), al producirse el cortocircuito.
3. La intensidad que circula por la fase "R", del segundo generador ( $I_{Rg2}$ ), al producirse el cortocircuito.
4. La tensión entre líneas  $U_{ST}$  en bornes del segundo generador al producirse el cortocircuito.

**RESOLUCIÓN**

- **Redes de secuencia directa, inversa y homopolar**
- *Redes de secuencia directa e inversa (sin generadores)*



- *Red de secuencia homopolar*



- **Cálculo de las impedancias totales vistas desde el punto de cortocircuito (10kV)**

$$\begin{aligned}\bar{X}_1 &= (\bar{X}_{1g1} // \bar{X}_{1g2}) + \bar{X}_{línea} = (j6 // j6) + (j10) = (0 + j13) = 13 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{X}_2 &= (\bar{X}_{2g1} // \bar{X}_{2g2}) + \bar{X}_{línea} = (j4 // j4) + (j10) = (0 + j12) = 12 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{X}_0 &= 3\bar{X}_n + \bar{X}_{0g2} + \bar{X}_{0línea} = ((3 \cdot 0.8) + j1 + j20) = (2.4 + j21) = 21.13 \angle 83.48^\circ \Omega \\ \bar{X}_T &= \bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_0 = (2.4 + j21) + (j13 + j12) = (2.4 + j46) = 46 \angle 87^\circ \Omega\end{aligned}$$

- **Cálculo de las componentes simétricas totales de las corrientes en el punto de cortocircuito**

$$\bar{I}_{R1} = \bar{I}_{R2} = \bar{I}_{R3} = \frac{\bar{V}_f}{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_0} = \frac{10000 \angle 0^\circ}{46 \angle 87^\circ} = 125.5 \angle -87^\circ A$$

Al ser un cortocircuito monofásico a tierra, las tres componentes simétricas de las corrientes son iguales y del valor hallado. Aparte, recordar que con este tipo de cortocircuito monofásico a tierra es necesario considerar las componentes homopolares, ya que existe una fuga de corriente hacia tierra.

### 1 La intensidad monofásica de cortocircuito ( $I''_{k1}$ ) en el punto de la falla

- **Intensidades de línea en el punto de cortocircuito:** (intensidades totales en el punto de cortocircuito halladas mediante sus correspondientes componentes simétricas)

$$\bar{I}''_{K1} = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 3\bar{I}_{R1} = 3(125.5 \angle -87^\circ) = 376.5 \angle -87^\circ A$$

Las intensidades de línea de las otras fases:  $I''_{KS} = I''_{KT} = 0$  (serán nulas).

### 2 La intensidad que circula por la fase "S" del primer generador ( $I''_{sg1}$ ) al producirse el cortocircuito

Para hallar esta intensidad de línea, es necesario conocer en primer lugar las componentes simétricas de las intensidades en bornes de este generador  $G_1$ . Para ello será necesario realizar un divisor de intensidad con los valores totales de las componentes simétricas de las intensidades halladas en el punto de cortocircuito.

Nótese que al ser idénticos los dos generadores en cuanto a secuencias directa e inversa, bastará con dividir por dos las componentes simétricas totales para hallar las correspondientes componentes simétricas en cualquiera de los dos generadores.

En cambio para la secuencia homopolar, los dos generadores se comportan de forma diferente. Mientras que el primer generador no está puesto a tierra (no podrán circular corrientes homopolares por el mismo), el segundo generador está puesto a tierra, circulando toda la componente homopolar del sistema a través de él.

- **Contribuciones de los dos generadores**

$$\bar{I}_{R1g1} = \bar{I}_{R1} \frac{j6}{j12} = 125.5 \angle -87^\circ \cdot \frac{j6}{j12} = 62.75 \angle -87^\circ = \bar{I}_{R1g2} A$$

$$\bar{I}_{R2g1} = \bar{I}_{R2} \frac{j4}{j8} = 125.5 \angle 90^\circ \cdot \frac{j4}{j8} = 62.75 \angle -87^\circ = \bar{I}_{R2g2} A$$

$$\bar{I}_{R0g1} = 0 A$$

$$\bar{I}_{R0g2} = \bar{I}_{R0} = 125.5 \angle -82.7^\circ A$$

- **La intensidad que circula por la fase "S" del primer generador ( $\bar{I}_{sg1}$ ) al producirse el cortocircuito será:**

Recordar que:  $\bar{a} = 1 \angle 0^\circ$      $\bar{a}^{-2} = 1 \angle 120^\circ$      $\bar{a}^{-3} = 1 \angle 240^\circ$

$$\bar{I}_{Sg1} = \bar{I}_{R1} \bar{a}^{-2} + \bar{I}_{R2} \bar{a} + \bar{I}_{R0} = (-3.28 + j62.66) = 62.75 \angle -93^\circ A$$

### 3 La intensidad que circula por la fase "R" del segundo generador ( $\bar{I}_{rg2}$ ) al producirse el cortocircuito

Como en el apartado anterior ya hemos calculado las componentes simétricas de las intensidades correspondientes tanto al generador  $G_1$ , como al generador  $G_2$ , resulta fácil hallar la intensidad de línea correspondiente a la fase "R" pedida.

- **La intensidad que circula por la fase "R" del segundo generador ( $\bar{I}_{rg2}$ ) al producirse el cortocircuito será:**

$$\bar{I}_{Rg2} = \bar{I}_{R1g2} + \bar{I}_{R2g2} + \bar{I}_{R0g2} = 62.75 \angle -87^\circ + 62.75 \angle -87^\circ + 125.5 \angle -87^\circ = 251 \angle -87^\circ A$$

### 4 La tensión entre líneas ( $U_{st}$ ) en bornes del segundo generador al producirse el cortocircuito será:

- **Componentes simétricas**

Primeramente buscamos las componentes simétricas de las tensiones en el punto de cortocircuito:

$$\begin{cases} \bar{V}_{R1} = \bar{E} - \bar{I}_{R1} \bar{Z}_1 = \frac{10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - (125.5 \angle -87^\circ) \cdot (13 \angle 90^\circ) = 4145.1 \angle -1.18^\circ = (4144.2 - j85.34) V \\ \bar{V}_{R2} = -\bar{I}_{R2} \bar{Z}_2 = -(125.5 \angle -87^\circ) \cdot (12 \angle 90^\circ) = 1506 \angle -183^\circ = (-1503.9 - j78.82) V \\ \bar{V}_{R0} = -\bar{I}_{R0} \bar{Z}_0 = -(125.5 \angle -87^\circ) \cdot (21.13 \angle 83.48^\circ) = 2651.8 \angle 176.5^\circ = (-2646.8 - j162.8) V \end{cases}$$

- **Cálculo de las componentes simétricas de las tensiones en bornes del generador  $G_1$**

Mediante las componentes simétricas halladas en el punto de cortocircuito, es posible hallar las componentes simétricas de las tensiones en bornes del generador  $G_1$ :

$$\begin{cases} \bar{V}_{R1} = 4145.1 \angle -1.18^\circ + 125.5 \angle -87^\circ \cdot (10 \angle 90^\circ) = (5397.5 - j19.78) = 5397.5 \angle -0.21^\circ V \\ \bar{V}_{R2} = 1506 \angle 183^\circ + 125.5 \angle -87^\circ \cdot (10 \angle 90^\circ) = (-250.65 - j13.13) = 251 \angle -177^\circ V \\ \bar{V}_{R0} = 2651.8 \angle -176.5^\circ + 20 \angle -90^\circ \cdot (125.5 \angle -87^\circ) = (-140.3 + j293.3) = 325 \angle 115.6^\circ V \end{cases}$$

Debe recordarse que en este problema no existen transformadores, siendo suficiente con añadir las pérdidas por caída de tensión de la impedancia de la línea para obtener los valores pedidos.

- **Cálculo de las tensiones de fase en bornes del generador G<sub>1</sub>**

$$\bar{V}_R = \bar{V}_{R1} + \bar{V}_{R2} + \bar{V}_{R0} = (5006.4 - j260.1) = 5013.13 \angle 2.93^\circ V$$

$$\bar{V}_S = \bar{V}_{R1} \bar{a}^2 + \bar{V}_{R2} \bar{a} + \bar{V}_{R0} = (-2719.6 - j4581.9) = 5328.2 \angle -120.7^\circ V$$

- **Cálculo de las tensiones de línea en bornes del generador G<sub>1</sub>**

$$\begin{cases} \bar{U}_{RS} = \bar{V}_R - \bar{V}_S = (7726 + j484.2) = 9118 \angle 32^\circ V \\ \bar{U}_{ST} = \bar{V}_S - \bar{V}_T = (-11.6 - j9782.9) = 9782.9 \angle -90^\circ V \\ \bar{U}_{TR} = \bar{V}_T - \bar{V}_R = (-7714.4 - j4940.9) = 9161 \angle 147.4^\circ V \end{cases} \quad \Sigma \bar{U}_{LINEA} = 0V$$

El valor de la tensión de línea que se pide en el enunciado se corresponde con la fase "S". Siendo nula la suma total de las tensiones de línea.

## CAPÍTULO IV. ENUNCIADOS DE PROBLEMAS DE FALLOS EN SISTEMAS DE POTENCIA

### PROBLEMA 4.1

Disponemos de un sistema de potencia formado por una central generadora y una subestación transformadora de distribución que abastecen a unos consumidores a través del embarrado "B". Las protecciones del sistema de potencia se llevarán a cabo mediante interruptores magnetotérmicos colocados como se indica en la figura. La potencia prevista que se distribuirá a través del embarrado "B" coincide con la potencia nominal del transformador.

#### DATOS

Generador:.....12MVA.....20KV..... $X''_d=X_1=X_2=16\%$ ..... $X_0=5\%$ ..... $X_n=0$ .  
 Transformador.....25MVA.....110/20KV..... $\epsilon_{cc}=X_1=X_2=7\%$ ..... $X_0=0.9 \cdot X_1$ ..... $X_n=j1\Omega$   
 $L_1$ ..... $Z_1=Z_2=(2.25+j6.5)\Omega$ ..... $X_0=2.5 \cdot X_1$ .  
 $L_2$ ..... $Z_1=Z_2=(0.08+j0.11)\Omega$ ..... $X_0=2.5 \cdot X_1$   
 $L_3$ ..... $Z_1=Z_2=(0.42+j0.57)\Omega$ ..... $X_0=2.5 \cdot X_1$

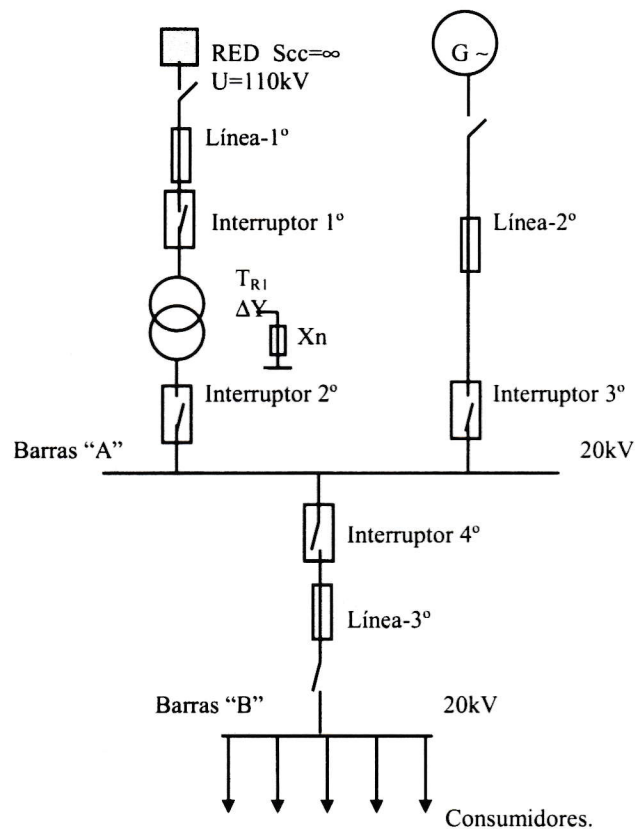


Figura 4.1 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.1

- **Intensidades nominales para interruptores de protección estándar**  
 100A, 125A, 160A, 200A, 250A, 315A, 400A,  
 630A, 800A, 1250A, 1600A, 2000A, 2600A.
- **Poderes de corte y de cierre para interruptores de protección estándar**  
 3.15kA, 10kA, 16kA, 20kA, 31.5kA, 40kA, 50kA, 63kA, 100kA

**HALLAR**

- *para cada interruptor, delante de una falta trifásica en diversos puntos del circuito:*
1. Intensidad nominal de los interruptores. Dar un valor normalizado.
  2. Protección térmica contra sobrecargas, es decir, ajuste de las curvas a tiempo inverso. Intensidades de arranque ( $I_r$ ) (considérese un margen de seguridad de un 10%). Coeficientes de arranque.
  3. Protección magnética contra cortocircuitos, es decir, ajuste de las curvas a tiempo independiente o instantáneo (suponer cortocircuitos trifásicos en los embarrados "A" y "B").
  4. Indicar el poder de cierre y el poder de corte para cada interruptor, así como las intensidades de cierre y corte (suponer cortocircuitos trifásicos en bornes de cada interruptor).

**RESPUESTAS**

1. Las intensidades nominales de los interruptores son:
  - Intensidades nominales:  $I_{11^\circ} = 131.2\text{A}$ .  $I_{12^\circ} = 721.7\text{A}$ .  $I_{13^\circ} = 346.4\text{A}$ .  $I_{14^\circ} = 721.7\text{A}$ .
  - Las intensidades nominales normalizadas son:  
 $I_{n11^\circ} = 400\text{A}$ .  $I_{n12^\circ} = 1250\text{A}$ .  $I_{n13^\circ} = 630\text{A}$ .  $I_{n14^\circ} = 1250\text{A}$ .
2. Los relés térmicos se dimensionarán con los siguientes valores:
  - Las intensidades de arranque son: (aumento de un 10% como margen de seguridad).  
 $I_{arr11^\circ} = 144.3\text{A}$ .  $I_{arr12^\circ} = 794\text{A}$ .  $I_{arr13^\circ} = 381\text{A}$ .  $I_{arr14^\circ} = 794\text{A}$ .
  - Los coeficientes de arranque son:  
 $C_{arr11^\circ} = 36\%$ .  $C_{arr12^\circ} = 63.5\%$ .  $C_{arr13^\circ} = 60\%$ .  $C_{arr14^\circ} = 63.5\%$ .
3. Los relés magnéticos se dimensionarán con los siguientes valores:
  - Los interruptores delante de un cortocircuito trifásico en barras "A" y "B" respectivamente, se verán afectados por unas intensidades de valor:  
 $I_{11^\circ} = (1730\text{A}-1084\text{A})$   $I_{12^\circ} = (9514\text{A}-5964\text{A})$   $I_{13^\circ} = (2335\text{A}-1464\text{A})$   $I_{14^\circ} = (0\text{A}-7428\text{A})$
  - Las intensidades que se tomarán en el ajuste a tiempo independiente serán (recordar que como mínimo deben de existir dos interruptores que protejan cada defecto en coordinación):  
 $I_{mag11^\circ} = 1600\text{A}$  ( $4 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.5\text{s}$ .  
 $I_{mag12^\circ} = 5000\text{A}$  ( $4 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.3\text{s}$ .  
 $I_{mag13^\circ} = 1260\text{A}$  ( $2 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.3\text{s}$ .  
 $I_{mag14^\circ} = 6250\text{A}$  ( $5 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.0\text{s}$ .
4. Los poderes de cierre y corte para cada interruptor son:
  - Las intensidades máximas delante de un cortocircuito trifásico en bornes de cada interruptor (las más desfavorables debidas a la aportación de la parte superior o inferior del interruptor) son:  
 $I''_{k311^\circ} = 10125/-71^\circ\text{A}$   $I''_{k312^\circ} = 9479/-83.4^\circ\text{A}$   $I''_{k313^\circ} = 9479/-83.4^\circ\text{A}$   $I''_{k314^\circ} = 11849/-83.4^\circ\text{A}$
  - Las intensidades máximas asimétricas son:  
 $I_{S11^\circ} = 19472/-71^\circ\text{A}$   $I_{S12^\circ} = 23192/-83.4^\circ\text{A}$   $I_{S13^\circ} = 23192/-83.4^\circ\text{A}$   $I_{S14^\circ} = 29325/-84.4^\circ\text{A}$
  - Las intensidades de corte serán:  
 $I_{a11^\circ} = 10125/-71^\circ\text{A}$   $I_{a12^\circ} = 9479/-83.4^\circ\text{A}$   $I_{a13^\circ} = 9479/-83.4^\circ\text{A}$   $I_{a14^\circ} = 11154/-84.4^\circ\text{A}$
  - Los poderes de corte y cierre para cada interruptor son: se ha adoptado para todos los interruptores un poder de corte de 20kA, y un poder de cierre de 50kA.

**PROBLEMA 4.2**

Disponemos de un sistema de potencia formado por una subestación transformadora de distribución que abastece a unos consumidores a través del embarrado "B" y a un grupo de motores a través del embarrado "A". Las protecciones del sistema de potencia se llevarán a cabo mediante interruptores magnetotérmicos y fusibles adecuados, colocados como se indica en la figura. La potencia prevista que se distribuirá a través del embarrado "B" es de 20MVA coincidiendo la tensión con el valor que toma la misma en el embarrado "A".

**DATOS**

Motores:.....20MVA.....20KV..... $\cos \delta = 0.96$ ..... $I_{arr}/I_n = 5$ ..... $\eta = 80\%$ ..... $n = 1500\text{rpm}$ .  
 Transformador.....30MVA.....120/20KV..... $\epsilon_{cc} = Z_1 = Z_2 = 12\%$ ..... $Z_0 = 0.9 \cdot Z_1$ ..... $X_n = j1\Omega$   
 $\epsilon_{Rcc} = X_1 = X_2 = 0.8\%$   
 $L_1$ ..... $Z_1 = Z_2 = (1+j3)\Omega$ ..... $X_0 = 2.5 \cdot X_1$

$$L_2 \dots\dots\dots Z_1=Z_2= (0.06+j0.6)\Omega \dots\dots\dots X_0= 2.5 \cdot X_1$$

$$L_3 \dots\dots\dots Z_1=Z_2= (0.08+j0.8)\Omega \dots\dots\dots X_0= 2.5 \cdot X_1$$

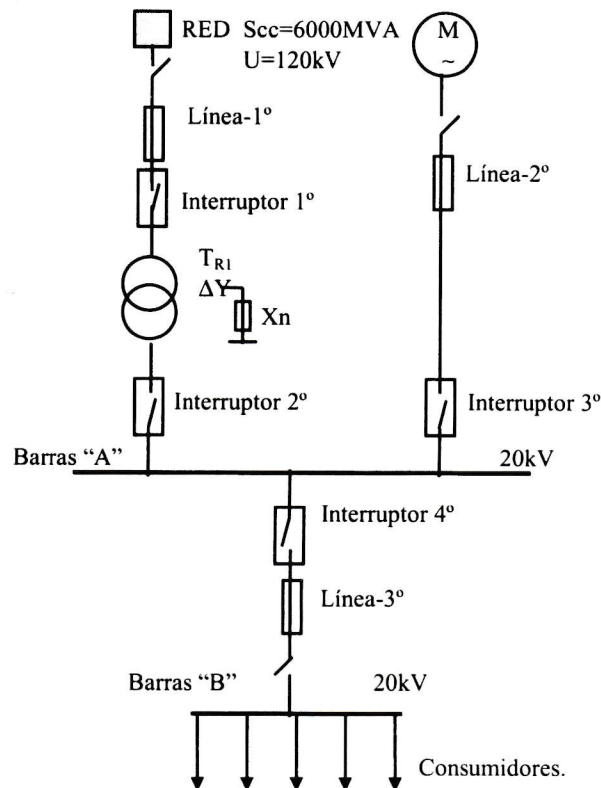


Figura 4.2 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.2

- **Intensidades nominales para interruptores de protección estándar**  
100A, 125A, 160A, 200A, 250A, 315A, 400A,  
630A, 800A, 1250A, 1600A, 2000A, 2600A.
- **Poderes de corte y de cierre para interruptores de protección estándar**  
3.15kA, 10kA, 16kA, 20kA, 31.5kA, 40kA, 50kA, 63kA, 100kA

#### HALLAR

- **Para cada interruptor, delante de una falta trifásica en diversos puntos del circuito:**
  - 1 Intensidad nominal de los interruptores. Dar un valor normalizado.
  - 2 Protección térmica contra sobrecargas, es decir, ajuste de las curvas a tiempo inverso. Intensidades de arranque ( $I_r$ ) (considérese un margen de seguridad de un 10%). Coeficientes de arranque.
  - 3 Protección magnética contra cortocircuitos, es decir, ajuste de las curvas a tiempo independiente o instantáneo (suponer cortocircuitos trifásicos en los embarrados "A" y "B").
  - 4 Indicar el poder de cierre y el poder de corte para cada interruptor, así como las intensidades de cierre y de corte (suponer cortocircuitos trifásicos en bornes de cada interruptor).

#### RESPUESTAS

- 1 Las intensidades nominales de los interruptores son:
  - Intensidades nominales:  $I_{n1^\circ} = 144.3A$ .  $I_{n2^\circ} = 866A$ .  $I_{n3^\circ} = 577.4A$ .  $I_{n4^\circ} = 866A$ .
  - Las intensidades nominales normalizadas son:  
 $I_{n11^\circ} = 400A$ .  $I_{n12^\circ} = 1250A$ .  $I_{n13^\circ} = 1250A$ .  $I_{n14^\circ} = 1250A$ .
- 2 Los relés térmicos se dimensionarán con los siguientes valores:

- Las intensidades de arranque son: (aumento de un 10% como margen de seguridad).  
 $I_{arr1^{\circ}}=158.7A$ .  $I_{arr2^{\circ}}=952.6A$ .  $I_{arr3^{\circ}}=635.1A$ .  $I_{arr4^{\circ}}=952.6A$ .
  - Los coeficientes de arranque son:  
 $C_{arr1^{\circ}}=40\%$ .  $C_{arr2^{\circ}}=76\%$ .  $C_{arr3^{\circ}}=51\%$ .  $C_{arr4^{\circ}}=76\%$ .
- 3 Los relés magnéticos se dimensionarán con los siguientes valores:
- Los interruptores delante de un cortocircuito trifásico en barras "A" y "B" respectivamente se verán afectados por unas intensidades de valor:  
 $I_{11^{\circ}}=(1215A-825.4A)$   $I_{12^{\circ}}=(7291A-4952.3A)$   $I_{13^{\circ}}=(2644A-1795.8A)$   $I_{14^{\circ}}=(0A-6756.2A)$
  - Las intensidades que se tomarán en el ajuste a tiempo independiente serán (recordar que como mínimo deben de existir dos interruptores que protejan cada defecto en coordinación):  
 $I_{mag11^{\circ}}=800A$  ( $2 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.5s$ .  
 $I_{mag12^{\circ}}=4800A$  ( $3 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.3s$ .  
 $I_{mag13^{\circ}}=2250A$  ( $1.8 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.3s$ . (Se tendría que tener una intensidad de  $I=5 \cdot I_n=5 \cdot 924=4620A$ . para poder arrancar el motor, por lo que seria recomendable el uso de fusibles tipo motor unidos a un relé térmico. Ver la sección de problemas resueltos).  
 $I_{mag14^{\circ}}=4800A$  ( $3 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.0s$ .
- 4 Los poderes de cierre y corte para cada interruptor serán:
- Las intensidades máximas delante de un cortocircuito trifásico en bornes de cada interruptor (las más desfavorables debidas a la aportación de la parte superior o inferior del interruptor) son:  
 $I''_{k311^{\circ}}=14912.4/-76.4^{\circ}A$   $I''_{k312^{\circ}}=7292.7/-86.3^{\circ}A$   $I''_{k313^{\circ}}=7292.7/-86.3^{\circ}A$   $I''_{k314^{\circ}}=9946.5/-85.7^{\circ}A$
  - Las intensidades máximas asimétricas son:  
 $IS_{11^{\circ}}=31637/-76.4^{\circ}A$   $IS_{12^{\circ}}=18770.4/-86.3^{\circ}A$   $IS_{13^{\circ}}=18770.4/-86.3^{\circ}A$   $IS_{14^{\circ}}=25314.6/-85.7^{\circ}A$
  - Las intensidades de corte serán:  
 $Ia_{11^{\circ}}=14912.4/-76.4^{\circ}A$   $Ia_{12^{\circ}}=7292.7/-86.3^{\circ}A$   $Ia_{13^{\circ}}=7156/-86.3^{\circ}A$   $Ia_{14^{\circ}}=9355.7/-85.8^{\circ}A$
  - Los poderes de corte y cierre para cada interruptor son: se han adoptado para todos los interruptores: un poder de corte de 20kA, y un poder de cierre de 50kA.

### PROBLEMA 4.3

Disponemos de un sistema de potencia formado por una subestación transformadora de distribución que abastece a unos consumidores, a través del embarrado "B", y a un grupo de motores a través del embarrado "A". Las protecciones del sistema de potencia se llevarán a cabo mediante interruptores magnetotérmicos y fusibles adecuados colocados como se indica en la figura. La potencia prevista que se distribuirá a través del embarrado "B" es de 10MVA coincidiendo la tensión con el valor que toma la misma para el embarrado "A".

#### DATOS

Motores:.....14MVA.....8KV..... $\cos \delta = 0.94$ ..... $I_{arr}/I_n = 6$ ..... $\eta = 75\%$ ..... $n = 1500rpm$ .  
 Transformador.....18MVA.....80/8KV..... $\text{ecc} = Z_1 = Z_2 = 15\%$ ..... $Z_0 = 0.9 \cdot Z_1$ ..... $X_n = j1 \Omega$   
 $\text{excc} = X_1 = X_2 = 14.9\%$   
 $L_1$ ..... $Z_1 = Z_2 = (0 + j0) \Omega$ ..... $X_0 = 2.5 \cdot X_1$  Despreciable  
 $L_2$ ..... $Z_1 = Z_2 = (0 + j0) \Omega$ ..... $X_0 = 2.5 \cdot X_1$  Despreciable  
 $L_3$ ..... $Z_1 = Z_2 = (0.08 + j0.8) \Omega$ ..... $X_0 = 2.5 \cdot X_1$

- **Intensidades nominales para interruptores de protección estándar**  
 100A, 125A, 160A, 200A, 250A, 315A, 400A,  
 630A, 800A, 1250A, 1600A, 2000A, 2600A.
- **Poderes de corte y de cierre para interruptores de protección estándar**  
 3.15kA, 10kA, 16kA, 20kA, 31.5kA, 40kA, 50kA, 63kA, 100kA

#### HALLAR

- *Para cada interruptor, delante de una falta trifásica en diversos puntos del circuito:*
  - 1 Intensidad nominal de los interruptores. Dar un valor normalizado.
  - 2 Protección térmica contra sobrecargas, es decir ajuste de las curvas a tiempo inverso. Intensidades de arranque ( $I_r$ ) (considérese un margen de seguridad de un 15%). Coeficientes de arranque.

- 3 Protección magnética contra cortocircuitos, es decir ajuste de las curvas a tiempo independiente o instantáneo (suponer cortocircuitos en los embarrados "A" y "B").
- 4 Indicar el poder de cierre y el poder de corte para cada interruptor, así como las intensidades de cierre y de corte (suponer cortocircuitos trifásicos en bornes de cada interruptor).

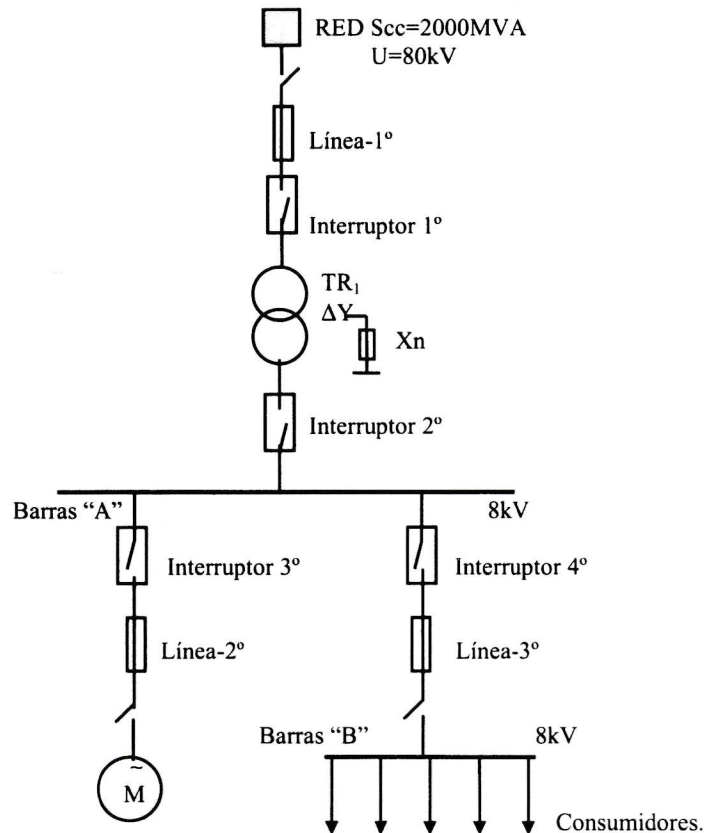


Figura 4.3 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.3

#### RESPUESTAS

- 1 Las intensidades nominales de los interruptores son:
  - Intensidades nominales:  $I_{11^\circ} = 130\text{A}$ .  $I_{12^\circ} = 1300\text{A}$ .  $I_{13^\circ} = 1010\text{A}$ .  $I_{14^\circ} = 722\text{A}$ .
  - Las intensidades nominales normalizadas son:  
 $I_{n11^\circ} = 400\text{A}$ .  $I_{n12^\circ} = 2000\text{A}$ .  $I_{n13^\circ} = 1600\text{A}$ .  $I_{n14^\circ} = 1250\text{A}$ .
- 2 Los relés térmicos se dimensionarán con los siguientes valores:
  - Las intensidades de arranque son: (aumento de un 15% como margen de seguridad).  
 $I_{arr11^\circ} = 150\text{A}$ .  $I_{arr12^\circ} = 1493\text{A}$ .  $I_{arr13^\circ} = 1162\text{A}$ .  $I_{arr14^\circ} = 830\text{A}$ .
  - Los coeficientes de arranque son:  
 $C_{arr11^\circ} = 37.5\%$ .  $C_{arr12^\circ} = 74.7\%$ .  $C_{arr13^\circ} = 72.6\%$ .  $C_{arr14^\circ} = 66.4\%$ .
- 3 Los relees magnéticos se dimensionaran con los siguientes valores:
  - Los interruptores delante de un cortocircuito trifásico en barras "A" y "B" respectivamente se verán afectados por unas intensidades de valor:  
 $I_{11^\circ} = (898\text{A}-258\text{A})$   $I_{12^\circ} = (8990\text{A}-2581\text{A})$   $I_{13^\circ} = (6685\text{A}-1922\text{A})$   $I_{14^\circ} = (0\text{A}-4505\text{A})$
  - Las intensidades que se tomarán en el ajuste a tiempo independiente serán (recordar que como mínimo deben de existir dos interruptores que protejan cada defecto en coordinación):  
 $I_{mag11^\circ} = 800\text{A}$  ( $2 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.5\text{s}$ .  
 $I_{mag12^\circ} = 2000\text{A}$  ( $1 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.3\text{s}$ .  
 $I_{mag13^\circ} = 1600\text{A}$  ( $1 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.3\text{s}$ . (Se tendría que tener una intensidad de  $I=6 \cdot I_n = 6 \cdot 1010 = 6060\text{A}$ , para poder arrancar el motor, por lo que sería recomendable el uso de fusibles tipo motor unidos a un relé térmico. Ver la sección de problemas resueltos).  
 $I_{mag14^\circ} = 3750\text{A}$  ( $3 \cdot I_n$ ) con un tiempo de disparo de  $t=0.0\text{s}$ .

- 4 Los poderes de cierre y corte, para cada interruptor, son:
- Las intensidades máximas delante de un cortocircuito trifásico en bornes de cada interruptor (las más desfavorables debidas a la aportación de la parte superior o inferior del interruptor) son:  
 $I''_{k31^o} = 14434/-84.3^oA$   $I''_{k32^o} = 8990/-87.8^oA$   $I''_{k33^o} = 8990/-87.8^oA$   $I''_{k34^o} = 15668/-86.3^oA$
  - Las intensidades máximas asimétricas son:  
 $Is_{11^o} = 35721.7/-84.3^oA$   $Is_{12^o} = 24792.6/-87.8^oA$   $Is_{13^o} = 24792.6/-87.8^oA$   $Is_{14^o} = 39441.7/-86.3^oA$
  - Las intensidades de corte serán:  
 $Ia_{11^o} = 14434/-84.3^oA$   $Ia_{12^o} = 8990.3/-87.8^oA$   $Ia_{13^o} = 8990.3/-87.8^oA$   $Ia_{14^o} = 15668.3/-86.3^oA$
  - Los poderes de corte y cierre para cada interruptor son: se han adoptado para los interruptores ( $I_1$  e  $I_4$ ), un poder de corte de 20kA, y un poder de cierre de 50kA. Para los interruptores ( $I_2$  e  $I_3$ ), el poder de corte es 16kA, y el poder de cierre de 40kA.

#### PROBLEMA 4.4

Disponemos de un sistema de potencia formado por una subestación transformadora de distribución y dos centrales eléctricas que conjuntamente abastecen a un grupo de motores a través del embarrado "B". Ante la posibilidad de un aumento de la demanda de potencia se cree conveniente la incorporación de una tercera central ( $G_3$ ). Las protecciones del tercer grupo generador se realizarán mediante un interruptor magnetotérmico y fusibles adecuados, colocados como se indica en la figura. Las solicitaciones máximas a que estará sometido el interruptor se producirán bajo condiciones de cortocircuito y por lo tanto este será el régimen a estudiar.

#### DATOS

Motor.....	16MVA.....	10KV.....	$\cos \delta = 0.94$ .....	$I_{arr}/I_n = 5$ .....	$\eta = 80\%$ .....	$n = 1500$ rpm.
$G_1$ .....	75MVA.....	10.5KV.....	$X''_d = X_1 = X_2 = 11.5\%$ .....	$X_o = 0.4 \cdot X_1$ .....	$X_n = j1\Omega$ .	
$G_2$ .....	35MVA.....	10.5KV.....	$X''_d = X_1 = X_2 = 19\%$ .....	$X_o = 0.4 \cdot X_1$ .....	$X_n = j1\Omega$	
$G_3$ .....	15MVA.....	10.5KV.....	$X''_d = X_1 = X_2 = 12\%$ .....	$X_o = 0.4 \cdot X_1$ .....	$X_n = j1\Omega$	
$Tr_1$ .....	75MVA.....	121/11KV.....	$\text{excc} = X_1 = X_2 = 11.5\%$ .....	$X_o = 0.9 \cdot Z_1$ .....	$X_n = 0$ .	
$Tr_2$ .....	35MVA.....	121/11KV.....	$\text{excc} = X_1 = X_2 = 12.5\%$ .....	$X_o = 0.9 \cdot Z_1$ .....	$X_n = 0$ .	
$Tr_3$ .....	20MVA.....	121/11KV.....	$\text{excc} = X_1 = X_2 = 12.5\%$ .....	$X_o = 0.9 \cdot Z_1$ .....	$X_n = 0$ .	
$Tr_4$ .....	20MVA.....	121/11KV.....	$\text{excc} = X_1 = X_2 = 12.5\%$ .....	$X_o = 0.9 \cdot Z_1$ .....	$X_n = 0$ .	
$L_1$ .....			$Z_1 = Z_2 = (0.19 + j1.52)\Omega$ .....	$X_o = 2.5 \cdot X_1$		
$L_2$ .....			$Z_1 = Z_2 = (1.12 + j3.95)\Omega$ .....	$X_o = 2.5 \cdot X_1$		
$L_3$ .....			$Z_1 = Z_2 = (0.37 + j0.28)\Omega$ .....	$X_o = 2.5 \cdot X_1$		

- Intensidades nominales para interruptores de protección estándar**  
 100A, 125A, 160A, 200A, 250A, 315A, 400A,  
 630A, 800A, 1250A, 1600A, 2000A, 2600A.
- Poderes de corte y de cierre para interruptores de protección estándar**  
 3.15kA, 10KA, 16KA, 20kA, 31.5kA, 40kA, 50kA, 63kA, 100kA

#### HALLAR

- Delante de una falta monofásica, bifásica o trifásica en bornes del interruptor y considerando siempre la aportación total de energía (la de la parte superior más de la parte inferior del interruptor):**
  - Intensidades de cortocircuito que se producirán en bornes del interruptor ( $I''_{k11}$ ,  $I''_{k12}$ ,  $I''_{k13}$ ) (considérese la aportación de energía total, la superior más la inferior).
  - Las máximas intensidades asimétricas de cortocircuito en bornes del interruptor delante de los diversos tipos de cortocircuito ( $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ ). Dar asimismo el poder de cierre (considérese la aportación de energía total, es decir, la superior más la inferior).
  - Las potencias de cortocircuito ( $S''_{k1}$ ,  $S''_{k2}$ ,  $S''_{k3}$ ) en bornes del interruptor delante de las diversas faltas que puedan producirse (considérese la aportación de energía total, la superior más la inferior).
  - Cuál será la intensidad de corte ( $I_a$ ) y el poder de corte delante de una falta trifásica en bornes del interruptor estudiado (considérese la aportación de energía total, la superior más la inferior).

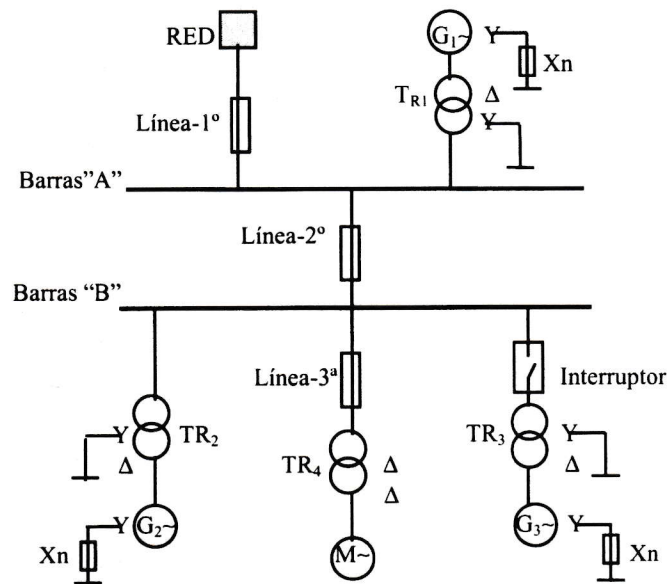


Figura 4.4 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.4

### RESPUESTAS

- Las intensidades de cortocircuito que se producirán en el interruptor (consideradas las aportaciones de la parte superior e inferior del circuito, es decir las totales) serán:  
 $I''_{k1''} = 6543/-83.8^\circ\text{A}$ .  $I''_{k2''} = 7118/-83.8^\circ\text{A}$ .  $I''_{k3''} = 8219/-83.4^\circ\text{A}$ .
- Las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán en bornes del interruptor, (consideradas las aportaciones por la parte superior e inferior del circuito, es decir las totales), serán:  
 $I_{s1} = 16840/-85.4^\circ\text{A}$   $I_{s2} = 17313/-83.8^\circ\text{A}$   $I_{s3} = 19992/-83.8^\circ\text{A}$ .  
 • El poder de cierre al que se dotará al interruptor para hacer frente a todos los tipos de cortocircuitos será: 40kA.
- Las potencias de cortocircuito (consideradas las aportaciones de la parte superior e inferior del circuito, es decir, las totales) serán:  
 $S''_{k1} = 1246.6\text{ MVA}$   $S''_{k2} = 1356.4\text{ MVA}$   $S''_{k3} = 1566\text{ MVA}$
- La intensidad de corte en el interruptor delante de una falta trifásica, (consideradas las aportaciones de la parte superior e inferior del circuito, es decir las totales) será:  
 $I_a = 7893.25/-90^\circ\text{A}$ . Poder de corte: 16kA.

### PROBLEMA 4.5

El esquema de la figura representa una sección de una red eléctrica trifásica alimentada por dos generadores situados en los extremos del sistema de potencia. A efectos de diseño de los interruptores de protección, y para conocer la respuesta del circuito en diversos puntos del mismo ante situaciones anómalas, se pide funcionando los generadores sin carga y a la tensión nominal:

#### DATOS

$G_1$ :	40MVA	40KV	$X''_d = X_1 = X_2 = 10\%$	$X_0 = 6\%$	$X_n = 0$
$G_2$ :	50MVA	50KV	$X''_d = X_1 = X_2 = 12\%$	$X_0 = 6\%$	$X_n = j4\Omega$
$TR_1$ :	50MVA	150/40KV	$E_{cc} = X_1 = X_2 = 11\%$	$X_0 = 0.9 \cdot X_1$	$X_n = j8\Omega$
$TR_2$ :	60MVA	150/50KV	$E_{cc} = X_1 = X_2 = 9\%$	$X_0 = 0.9 \cdot X_1$	$X_n = 0$
$L_1$ :			$X_1 = X_2 = j35\Omega$	$X_0 = 2.5 \cdot X_1$	
$L_2$ y $L_3$ :			$X_1 = X_2 = j40\Omega$	$X_0 = 2.5 \cdot X_1$	
$L_4$ :			$X_1 = X_2 = j30\Omega$	$X_0 = 2.5 \cdot X_1$	
$L_5$ :			$X_1 = X_2 = j20\Omega$	$X_0 = 2.5 \cdot X_1$	

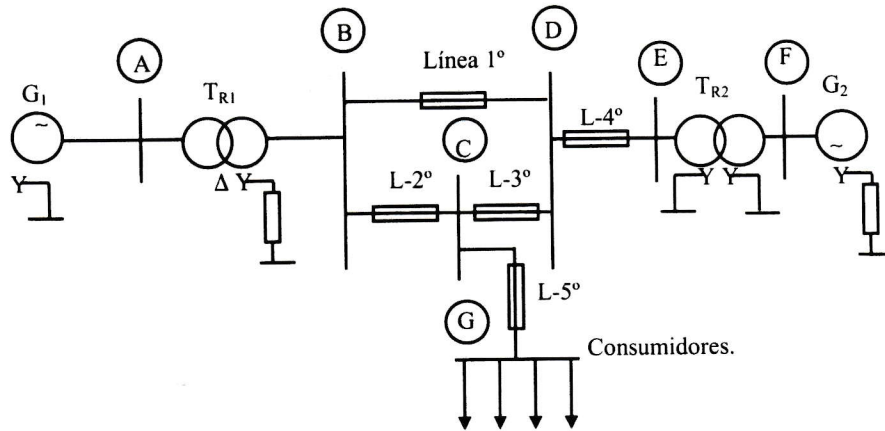


Figura 4.5 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.5

### HALLAR

- En el supuesto de producirse unos cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, trifásicos) en las barras de interconexión "A", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $Is_1$ ,  $Is_2$ ,  $Is_3$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "C", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $Is_1$ ,  $Is_2$ ,  $Is_3$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores). Finalmente indicar las corrientes de cortocircuito bifásico a tierras ( $I''_{KEE}$ ,  $I''_{KSE}$ ,  $I''_{KTE}$ ) que se producirían en las barras citadas.
- En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "G", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $Is_1$ ,  $Is_2$ ,  $Is_3$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar de la red representada.

### RESPUESTAS

- Las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirá en "A" son:  $I''_{k1} = 7778.16 / -90^\circ$  A,  $I''_{k2} = 7115.13 / -90^\circ$  A,  $I''_{k3} = 8215.85 / -90^\circ$  A.  
 $Is_1 = 25111.23 / -90^\circ$  A,  $Is_2 = 20124.62 / -90^\circ$  A,  $Is_3 = 23237.93 / -90^\circ$  A.  
 • La corriente de corte trifásica será:  $I_a = 5843.83 / -90^\circ$  A.
- Las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirá en "C" son:  $I''_{k1} = 817.22 / -90^\circ$  A,  $I''_{k2} = 1089.49 / -90^\circ$  A,  $I''_{k3} = 1258.04 / -90^\circ$  A.  
 $Is_1 = 2311.43 / -90^\circ$  A,  $Is_2 = 3081.54 / -90^\circ$  A,  $Is_3 = 3558.27 / -90^\circ$  A.  
 • La corriente de corte trifásica será:  $I_a = 1054.3 / -90^\circ$  A.  
 • Las corrientes de cortocircuito bifásico a tierras son:  
 $I''_{KEE} = 720.88 / 90.28^\circ$  A,  $I''_{KES} = 1346.6 / 164.76^\circ$  A,  $I''_{KET} = 1346.65 / 15.81^\circ$  A.
- Las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirá en "G" son:  $I''_{k1} = 649.91 / -90^\circ$  A,  $I''_{k2} = 861.79 / -90^\circ$  A,  $I''_{k3} = 995.12 / -90^\circ$  A.  
 $Is_1 = 1838.24 / -90^\circ$  A,  $Is_2 = 2437.51 / -90^\circ$  A,  $Is_3 = 2814.62 / -90^\circ$  A.  
 • La corriente de corte trifásica será:  $I_a = 889.42 / -90^\circ$  A.
- Las redes de secuencia directa, inversa y homopolar no se indican. Pero con redes parecidas, consultar la sección de problemas resueltos.

### PROBLEMA 4.6

El esquema de la figura representa una sección de una red eléctrica trifásica alimentada por dos generadores situados en paralelo al principio del sistema de potencia. A efectos de diseño de los interruptores de protección, y para conocer la respuesta del circuito en diversos puntos del mismo ante situaciones anómalas, se pide funcionando los generadores sin carga y a la tensión nominal:

#### DATOS

$G_1$ :	20MVA	10KV	$X''_d=X_1=X_2=12\%$	$X_0=0.4 \cdot X_1$	$X_n=j4\Omega$
$G_2$ :	30MVA	10KV	$X''_d=X_1=X_2=14\%$	$X_0=0.4 \cdot X_1$	$X_n=0$
$T_{R1}$ :	60MVA	150/15KV	$\text{ecc}=X_1=X_2=12\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=j7.5\Omega$
$T_{R2}$ :	50MVA	150/15KV	$\text{ecc}=X_1=X_2=10\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
$L_1$ :			$Z_1=Z_2=(0.06j0.12)\Omega$	$Z_0=2.5 \cdot Z_1$	
$L_2$ :			$Z_1=Z_2=(2+j6)\Omega$	$Z_0=2.5 \cdot Z_1$	
$L_3$ :			$Z_1=Z_2=(0.1+j0.6)\Omega$	$Z_0=2.5 \cdot Z_1$	

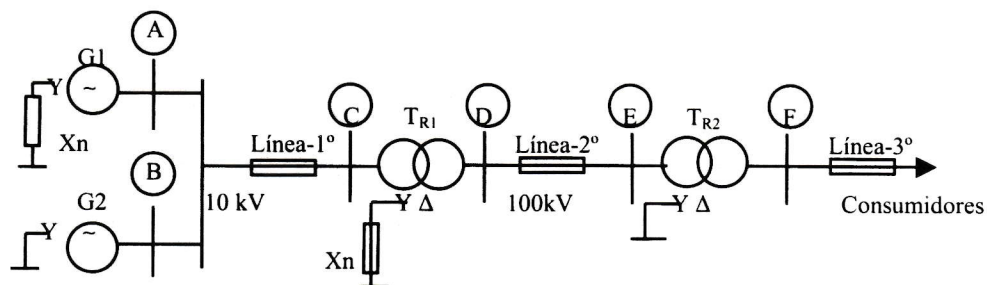


Figura 4.6 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.6

#### HALLAR

- En el supuesto de producirse unos cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, trifásicos) en las barras de interconexión "C", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "E", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "F", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar, de la red representada.

#### RESPUESTAS

- Las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirá en "C" son:  $I''_{k1} = 18197/-80.7^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k2} = 14175.3/-81.1^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k3} = 16368/-81.1^\circ \text{ A}$ .  
 $I_{s1} = 41432/-80.2^\circ \text{ A}$ ,  $I_{s2} = 32476/-81.1^\circ \text{ A}$ ,  $I_{s3} = 37500/-81.1^\circ \text{ A}$ .  
 • La corriente de corte trifásica será:  $I_a = 12315.8/-81.1^\circ \text{ A}$ .
- Las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirá en "E" son:  $I''_{k1} = 928.8/-85.5^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k2} = 613.15/-84.9^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k3} = 708/-84.9^\circ \text{ A}$ .  
 $I_{s1} = 2338/-85.5^\circ \text{ A}$ ,  $I_{s2} = 1508/-84.9^\circ \text{ A}$ ,  $I_{s3} = 1742.2/-84.9^\circ \text{ A}$ .

- La corriente de corte trifásica será:  $I_a = 675.18/-84.9^\circ$  A.
- 3 Las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirá en "F" son:  $I''_{k1} = 0/0^\circ$  A,  $I''_{k2} = 3081.2/-84.2^\circ$  A,  $I''_{k3} = 3557.9/-84.2^\circ$  A.  
 $I_{s1} = 0/-0^\circ$  A,  $I_{s2} = 7495/-84.2^\circ$  A,  $I_{s3} = 8654.4/-84.2^\circ$  A.
- La corriente de corte trifásica será:  $I_a = 3557.9/-84.2^\circ$  A.
- 4 Las redes de secuencia directa, inversa y homopolar no se indican. Pero con redes parecidas, consultar la sección de problemas resueltos.

### PROBLEMA 4.7

El esquema de la figura representa una sección de una red eléctrica trifásica alimentada por tres generadores situados en los extremos del sistema de potencia. A efectos de diseño de los interruptores de protección, y para conocer la respuesta del circuito en diversos puntos del mismo ante situaciones anómalas, se pide funcionando los generadores sin carga y a la tensión nominal:

#### DATOS

$G_1$ :	.....60MVA.....	20KV.....	$X''_d=X_1=X_2=10\%$ .....	$X_0=8\%$ .....	$X_n=j8\Omega$ ..
$G_2$ :	.....80MVA.....	30KV.....	$X''_d=X_1=X_2=12\%$ .....	$X_0=10\%$ .....	$X_n=0$ .
$G_3$ :	.....25MVA.....	40KV.....	$X''_d=X_1=X_2=15\%$ .....	$X_0=12\%$ .....	$X_n=0$ .
$T_{R1}$ y $T_{R2}$ :	.....30MVA.....	140/20KV.....	$\epsilon_{cc}=X_1=X_2=11\%$ .....	$X_0=0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n=0$
$T_{R3}$ :	.....30MVA.....	140/40KV.....	$\epsilon_{cc}=X_1=X_2=14\%$ .....	$X_0=0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n=0$
$T_{R4}$ :	.....90MVA.....	140/30KV.....	$\epsilon_{cc}=X_1=X_2=12\%$ .....	$X_0=0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n=0$
$L_1$ :	.....	.....	$X_1=X_2=j25\Omega$ .....	$X_0=2.5 \cdot X_1$	
$L_2$ :	.....	.....	$X_1=X_2=j25\Omega$ .....	$X_0=2.5 \cdot X_1$	
$L_3$ :	.....	.....	$X_1=X_2=j50\Omega$ .....	$X_0=2.5 \cdot X_1$	

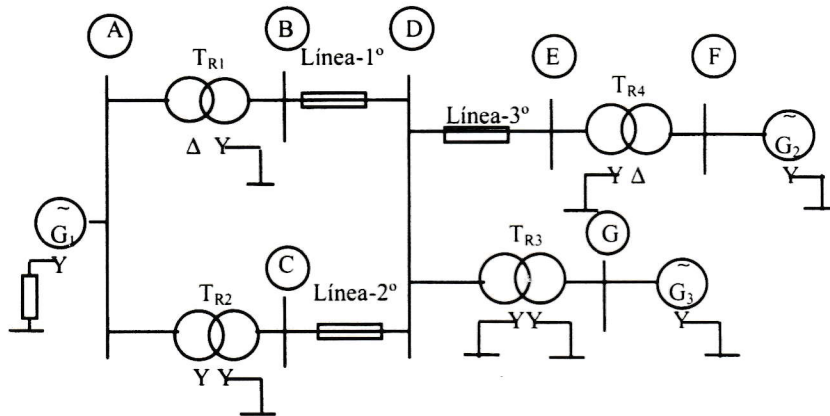


Figura 4.7 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.7

#### HALLAR

- 1 En el supuesto de producirse unos cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, trifásicos) en las barras de interconexión "D", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).
- 2 En el supuesto de producirse los mismos cortocircuitos anteriores (monofásicos, bifásicos, trifásicos) pero ahora en las barras de interconexión "F", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirán ( $I''_{k1}$ ,  $I''_{k2}$ ,  $I''_{k3}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{s3}$ )? Dar el valor, asimismo, de la corriente simétrica de corte en las mismas barras delante de un cortocircuito trifásico ( $I_a$ ) (suponer un tiempo de retardo de 0.1s para los interruptores).

- Si se produce en barras "D" un cortocircuito fase-fase-tierra. Indicar las intensidades iniciales de cortocircuito ( $I''_{k2EE}$ ,  $I''_{k2ES}$ ,  $I''_{k2ET}$ ), así como la tensión de línea en la fase "R" con esta falta.
- Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar, de la red representada.

### RESPUESTAS

- Las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirá en "D" son:  $I''_{k1} = 2141.76/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k2} = 2047.87/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k3} = 2364.68/-90^\circ \text{ A}$ .  
 $I_{S1} = 6057.81/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I_{S2} = 5792.25/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I_{S3} = 6688.32/-90^\circ \text{ A}$ .
  - La corriente de corte trifásica será:  $I_a = 1988.63/-90^\circ \text{ A}$ .
- Las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas de cortocircuito que se producirá en "F" son:  $I''_{k1} = 17113.1/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k2} = 14905.15/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k3} = 17211/-90^\circ \text{ A}$ .  
 $I_{S1} = 48403.1/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I_{S2} = 42158.13/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I_{S3} = 48680/-90^\circ \text{ A}$ .
  - La corriente de corte trifásica será:  $I_a = 12125.8/-90^\circ \text{ A}$ .
- Las corrientes iniciales de cortocircuito que se producirá en "D" con una falta bifásica a tierra son:  
 $I''_{k2EE} = 930.43/-90^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k2ES} = 2100.02/167.2^\circ \text{ A}$ ,  $I''_{k2ET} = 2100.02/12.8^\circ \text{ A}$ .
  - La tensión en la fase "R" con esta falta es:  $U_R = 115875.7/0^\circ \text{ V}$
- Las redes de secuencia directa, inversa y homopolar no se indican. Pero con redes parecidas, consultar la sección de problemas resueltos.

### PROBLEMA 4.8

El esquema de la figura representa una sección de una red eléctrica trifásica alimentada por múltiples puntos. A efectos de diseño del interruptor, y para conocer la respuesta del circuito en diversos puntos del mismo ante situaciones anómalas, se pide funcionando los generadores sin carga y a la tensión nominal:

#### DATOS

- Tensión del punto "F<sub>1</sub>" y del punto "F<sub>2</sub>":.....100KV

G <sub>1</sub> :	.....45MVA.....	20KV.....	X''d=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j0.8Ω.....	X <sub>0</sub> =j0.32Ω.....	X <sub>n</sub> =j0.50Ω
G <sub>2</sub> :	.....55MVA.....	32KV.....	X''d=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j1.8Ω.....	X <sub>0</sub> =j0.72Ω.....	X <sub>n</sub> =0
G <sub>3</sub> :	.....65MVA.....	40KV.....	X''d=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j2.7Ω.....	X <sub>0</sub> =j1.08Ω.....	X <sub>n</sub> =0
T <sub>R1</sub> :	.....50MVA.....	100/20KV.....	εcc=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j0.8Ω.....	X <sub>0</sub> =j0.72Ω.....	X <sub>n</sub> =0
T <sub>R2</sub> :	.....60MVA.....	100/32KV.....	εcc=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j1.7Ω.....	X <sub>0</sub> =j1.53Ω.....	X <sub>n</sub> =0
T <sub>R3</sub> :	.....70MVA.....	100/40KV.....	εcc=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j2.5Ω.....	X <sub>0</sub> =j2.25Ω.....	X <sub>n</sub> =0
L <sub>1</sub> Y L <sub>2</sub> :	.....	.....	X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j20Ω.....	X <sub>0</sub> =j50Ω.....	.....
L <sub>3</sub> :	.....	.....	X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j25Ω.....	X <sub>0</sub> =j62.5Ω.....	.....
L <sub>4</sub> :	.....	.....	X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j14Ω.....	X <sub>0</sub> =j35Ω.....	.....
L <sub>5</sub> :	.....	.....	Z <sub>1</sub> =Z <sub>2</sub> =(5+j10)Ω.....	Z <sub>0</sub> =2.5·Z <sub>1</sub> .....	.....

- Los valores de las impedancias calculadas siempre están dadas al nivel más bajo de tensión

#### HALLAR

- En el supuesto de una falta monofásica fase-tierra en el punto "F<sub>1</sub>", ¿cuál será la corriente inicial de cortocircuito ( $I''_{k1}$ ), que se producirá?
- Si desconectamos G<sub>2</sub> y se produce una falta monofásica fase-tierra en el punto "F<sub>2</sub>", ¿cuál será la corriente máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_a$ ), que soportará el interruptor que se encuentre situado en la fase referida?
- Si desconectamos G<sub>2</sub> y se produce una falta trifásica en el punto "F<sub>2</sub>", ¿cuál será la corriente simétrica de corte ( $I_a$ ), que deberá de interrumpir el interruptor si su tiempo de retardo es de 0.1s?
- Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar de la red representada.

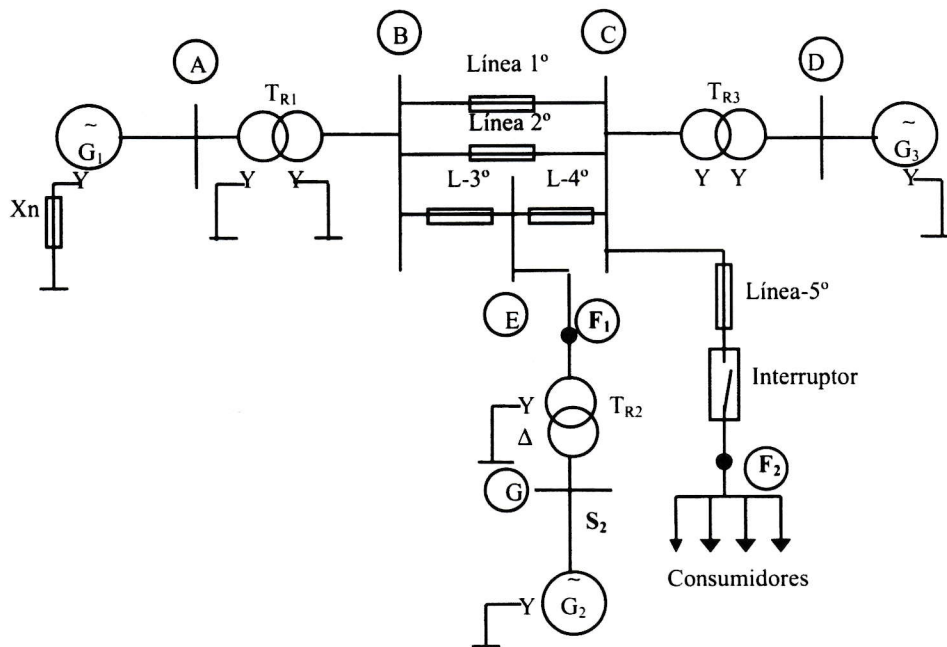


Figura 4.8 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.8

#### RESPUESTAS

- 1 La corriente inicial de cortocircuito que se producirá en "F<sub>1</sub>" es:  $I_{ki} = 4420.5/-90^\circ$  A.
- 2 La corriente máxima asimétrica de cortocircuito en "F<sub>2</sub>" (G<sub>2</sub> desconectado) será:  $I_k = 3623.6/-78.79^\circ$  A.
- 3 La corriente simétrica de corte en "F<sub>2</sub>", (G<sub>2</sub> desconectado), será:  $I_a = 2131.16/-80.3^\circ$  A.
- 4 Las redes de secuencia directa, inversa y homopolar no se indican. Pero con redes parecidas consultar la sección de problemas resueltos.

#### PROBLEMA 4.9

El esquema de la figura representa una sección de una red eléctrica trifásica alimentada por múltiples puntos. A efectos de diseño del interruptor, y para conocer la respuesta del circuito en diversos puntos del mismo ante situaciones anómalas, se pide funcionando los generadores sin carga y a la tensión nominal:

#### DATOS

- Tensión del punto "F<sub>1</sub>" y del punto "F<sub>2</sub>":...120KV. La tensión del punto F<sub>3</sub> es de 40kV

G <sub>1</sub> :	40MVA	20KV	X''d=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = 14%	X <sub>0</sub> = 4%	X <sub>n</sub> = 0%
G <sub>2</sub> :	50MVA	30KV	X''d=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = 16%	X <sub>0</sub> = 4%	X <sub>n</sub> = 2.962%
G <sub>3</sub> :	60MVA	40KV	X''d=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = 12%	X <sub>0</sub> = 4.5%	X <sub>n</sub> =0
T <sub>R1</sub> :	50MVA	120/20KV	εcc=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = 10%	X <sub>0</sub> = 0.9X <sub>1</sub>	X <sub>n</sub> =0
T <sub>R2</sub> :	60MVA	120/30KV	εcc=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = 9%	X <sub>0</sub> = 0.9X <sub>1</sub>	X <sub>n</sub> =0
T <sub>R3</sub> :	64MVA	120/40KV	εcc=X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = 12%	X <sub>0</sub> = 0.9X <sub>1</sub>	X <sub>n</sub> =0
L <sub>1</sub> y L <sub>2</sub> :			X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j20Ω	X <sub>0</sub> = 2.5·X <sub>1</sub>	
L <sub>3</sub> :			X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j18Ω	X <sub>0</sub> = 2.5·X <sub>1</sub>	
L <sub>4</sub> :			X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j22Ω	X <sub>0</sub> = 2.5·X <sub>1</sub>	
L <sub>5</sub> :			X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j24Ω	X <sub>0</sub> = 2.5·X <sub>1</sub>	
L <sub>6</sub> :			Z <sub>1</sub> =Z <sub>2</sub> =(2+j6)Ω	Z <sub>0</sub> =2.5·Z <sub>1</sub>	
L <sub>7</sub> y L <sub>8</sub> :			X <sub>1</sub> =X <sub>2</sub> = j2.6Ω	X <sub>0</sub> = 2.5·X <sub>1</sub>	

- Los valores de las impedancias calculadas siempre están dadas al nivel más bajo de tensión

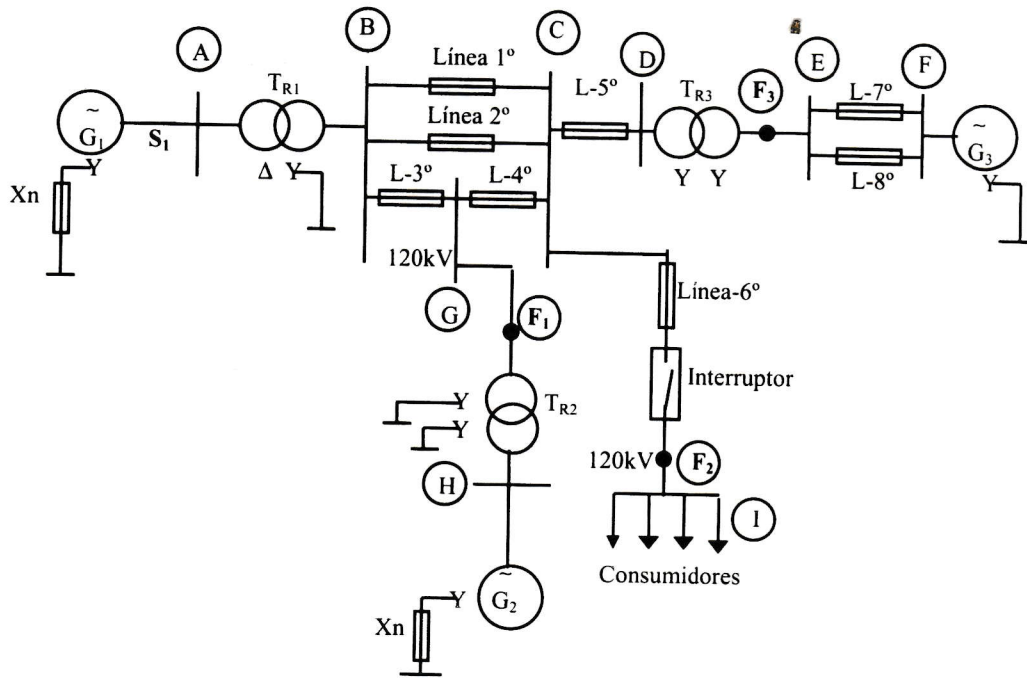


Figura 4.9 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.9

### HALLAR

- 1 En el supuesto de una falta monofásica fase-tierra en el punto "F<sub>1</sub>", ¿cuál será la corriente inicial de cortocircuito ( $I''_{k1}$ ), que se producirá?
- 2 Delante de una falta trifásica en el punto "F<sub>2</sub>", ¿cuál será la corriente simétrica de corte ( $I_a$ ), que deberá ser capaz de interrumpir el interruptor si su tiempo de retardo es de 0.1s?
- 3 Si se produce una falta monofásica fase-tierra en el punto "F<sub>2</sub>", ¿cuál será la corriente máxima asimétrica de cortocircuito ( $I_s$ ), que soportará el interruptor que se encuentre situado en la fase referida?
- 4 Si desconectamos el generador  $G_1$  de la red, mediante  $S_1$ , y se produce una falta bifásica doble fase-tierra en el punto "F<sub>3</sub>", ¿cuales serán las corrientes iniciales de cortocircuito ( $I''_{KEE}$ ,  $I''_{KES}$ ,  $I''_{KET}$ ) que se producirán?
- 5 Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar, de la red representada.

### RESPUESTAS

- 1 La corriente inicial de cortocircuito que se producirá en "F<sub>1</sub>" es:  $I''_{k1} = 2632.5/-90^\circ$  A.
- 2 La corriente simétrica de corte en "F<sub>2</sub>", será:  $I_a = 1883.5/-86.8^\circ$  A.
- 3 La corriente máxima asimétrica de cortocircuito en "F<sub>2</sub>" será:  $I_s = 4811.2/-85.7^\circ$  A.
- 4 Con el generador  $G_1$  desconectado, las corrientes de cortocircuito que se producirán delante de una falta bifásica a tierras en "F<sub>3</sub>" serán:  $I''_{KEE} = 6176/90^\circ$  A.  $I''_{KES} = 7100/-205.8^\circ$  A.  $I''_{KET} = 7100/25.8^\circ$  A.
- 5 Las redes de secuencia directa, inversa y homopolar no se indican. Pero con redes parecidas consultar la sección de problemas resueltos.

### PROBLEMA 4.10

Disponemos de un generador síncrono trifásico, el cual trabaja en vacío (sin carga). Su neutro está puesto a tierra a través de una reactancia. Con esta situación, se produce una falta monofásica a tierras en los bornes del generador como se indica en la figura:

**DATOS**

G.....20000 kVA .....13.8 kV..... $X''d_1 = 35\%$  ..... $X_2 = 25\%$  ..... $X_0 = 10\%$  ..... $X_n = 0\%$

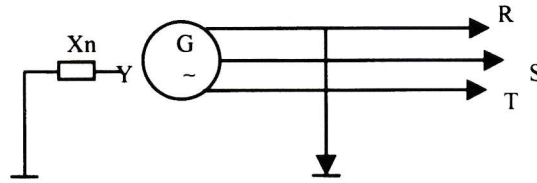


Figura 4.10 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.10

**HALLAR**

- 1 Las corrientes de cortocircuito en los bornes del generador.
- 2 Las tensiones de línea en las tres fases del generador.

**RESPUESTAS**

- 1 Las corrientes de cortocircuito en los bornes del generador son:  
 $I''_{kIRG} = 3590/-90^\circ \text{ A}$ .  $I''_{kSIG} = I''_{kTIG} = 0$ .
- 2 Las tensiones de línea en las tres fases del generador son:  
 $U_{RSG} = 8063/77.7^\circ \text{ V}$ .  $U_{STG} = 15775/-90^\circ \text{ V}$ .  $U_{TRG} = 8063/102.2^\circ \text{ V}$ .

**PROBLEMA 4.11**

Disponemos de un generador síncrono trifásico, el cual trabaja en vacío (sin carga). Su neutro está puesto a tierra a través de una reactancia. Con esta situación, se produce una falta bifásica entre fases en los bornes del generador como se indica la figura:

**DATOS**

G.....20000 kVA .....13.8 kV..... $X''d_1 = 35\%$ ..... $X_2 = 25\%$  ..... $X_0 = 10\%$  ..... $X_n = 0\%$

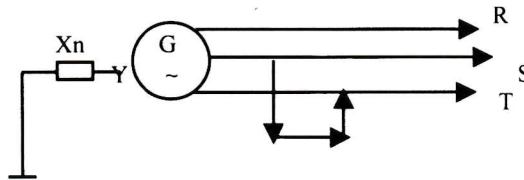


Figura 4.11 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.11

**HALLAR**

- 1 Las corrientes de cortocircuito en los bornes del generador.
- 2 Tensiones de línea en las tres fases del generador.

**RESPUESTAS**

- 1 Las corrientes de cortocircuito en los bornes del generador son:  
 $I''_{kIRG} = 0/0^\circ \text{ A}$ .  $I''_{kSIG} = 2420/180^\circ \text{ A}$ .  $I''_{kTIG} = 2420/0^\circ \text{ A}$ .
- 2 Las tensiones de línea en las tres fases del generador son:  
 $U_{RSG} = 13970/0^\circ \text{ V}$ .  $U_{STG} = 10/0^\circ \text{ V}$ .  $U_{TRG} = 13970/180^\circ \text{ V}$ .

### PROBLEMA 4.12

Disponemos de un generador síncrono trifásico que trabaja en vacío (sin carga). Su neutro está puesto a tierra a través de una reactancia. Con esta situación, se produce una falta bifásica entre fases a tierra en los bornes del generador como se indica en la figura.

#### DATOS

G.....20000 kVA.....13.8 kV..... $X''_{d1} = 35\%$ ..... $X_2 = 25\%$ ..... $X_0 = 10\%$ ..... $X_n = 0\%$

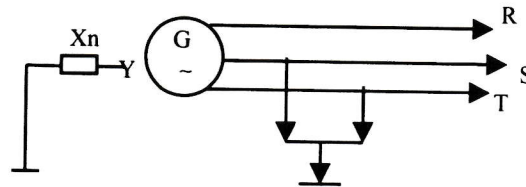


Figura 4.12 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.12

#### HALLAR

- 1 Las corrientes en los bornes del generador.
- 2 Tensiones de línea en las tres fases del generador.

#### RESPUESTAS

- 1 Las corrientes de cortocircuito en los bornes del generador son:  
 $I''_{k1RG} = 0/0^\circ$  A.  $I''_{kS1G} = 3071/136^\circ$  A.  $I''_{kT1G} = 3071/44^\circ$  A.
- 2 Las tensiones de línea en las tres fases del generador son:  
 $U_{RSG} = 4047/0^\circ$  V.  $U_{STG} = 0/0^\circ$  V.  $U_{TRG} = 4047/180^\circ$  V.

### PROBLEMA 4.13

El circuito mostrado en la figura corresponde a un suministro trifásico formado por un generador síncrono trifásico, una línea de transporte de energía eléctrica y un transformador. El extremo de la línea está abierto y por lo tanto el generador trabaja sin carga. Las conexiones existentes, así como las características de las máquinas, son las mostradas en la figura

#### DATOS

$G_1$  .....2500 MVA .....132 kV..... $X/R = 6$  ..... $Z_0 = 0.8 \cdot Z_1$  ..... $X_n = 0\%$   
 $T_{R1}$  .....90 MVA.....132/33kV..... $X_1 = X_2 = 16\%$  ..... $X_0 = 16\%$  ..... $X_n = 0$   
 Línea  $Z_1 = Z_2 = (0.0895 + j 0.2336) \Omega/\text{Km}$   $Z_0 = (0.1965 + j 0.5895) \Omega/\text{km}$  Longitud línea = 32.16 km

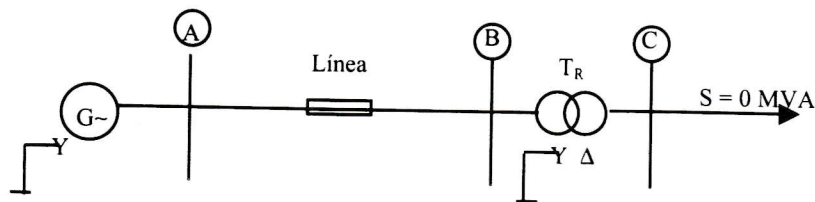


Figura 4.13 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.13

#### HALLAR

- Si el sistema esta operando a voltaje nominal y sin corriente antes del fallo, delante de una falta monofásica (Fase-Tierra), en la fase "R" de las barras "B":

- 1 Con el conexionado existente: la intensidad que circula por las tres fases del generador, así como por el primario del transformador.
- 2 Se desconecta el neutro del generador siguiendo sin cambios las conexiones restantes: la intensidad que circula por las tres fases del generador y por las tres fases del primario del transformador.
- 3 Se desconecta el neutro del transformador, pero el neutro del generador está conectado: la intensidad que circula por las tres fases del generador y por las tres fases del primario del transformador.

### RESPUESTAS

- 1 Con el conexionado existente:
 
$$\begin{array}{lll} I_{RG} = 3106/-74^\circ \text{ A} & I_{SG} = 730/96.7^\circ \text{ A} & I_{TG} = 730/96.7^\circ \text{ A} \\ I_{RTR} = 726/-83.3^\circ \text{ A} & I_{STR} = 726/-83.3^\circ \text{ A} & I_{TTR} = 726/-83.3^\circ \text{ A} \end{array}$$
- 2 Se desconecta el neutro del generador siguiendo sin cambios las conexiones restantes:
 
$$\begin{array}{lll} I_{RG} = 2110/-80.2^\circ \text{ A} & I_{SG} = 1055/99.8^\circ \text{ A} & I_{TG} = 1055/99.8^\circ \text{ A} \\ I_{RTR} = 1055/-80.2^\circ \text{ A} & I_{STR} = 1055/-80.2^\circ \text{ A} & I_{TTR} = 1055/-80.2^\circ \text{ A} \end{array}$$
- 3 Se desconecta el neutro del transformador, pero el neutro del generador está conectado:
 
$$\begin{array}{lll} I_{RG} = 2781/-72.9^\circ \text{ A} & I_{SG} = 0/0^\circ \text{ A} & I_{TG} = 0/0^\circ \text{ A} \\ I_{RTR} = 0/0^\circ \text{ A} & I_{STR} = 0/0^\circ \text{ A} & I_{TTR} = 0/0^\circ \text{ A} \end{array}$$

### PROBLEMA 4.14

Dos generadores síncronos de 40MVA y 10kV, cada uno, se disponen en paralelo, suministrando energía a una línea de distribución. Las impedancias secuenciales de los generadores y la línea son las siguientes:

#### DATOS

	Generadores	Línea
Secuencia directa.....	j 8Ω	j 15Ω
Secuencia inversa.....	j 6Ω	j 15Ω
Secuencia homopolar.....	j 4Ω	j 30Ω

El primer generador tiene su punto neutro conectado a tierra a través de una resistencia de 1Ω, mientras que el segundo generador tiene su punto neutro aislado de tierra.

#### HALLAR

- *Si se produce un cortocircuito entre la fase "R" y tierras en el extremo más alejado de la línea, trabajando los generadores sin carga:*
  - 1 La intensidad monofásica de cortocircuito ( $I''_{k1}$ ), en el punto de la falla.
  - 2 La intensidad que circula por la fase "S", del primer generador ( $I''_{SG1}$ ), al producirse el cortocircuito.
  - 3 La intensidad que circula por la fase "R", del segundo generador ( $I''_{RG2}$ ), al producirse el cortocircuito.
  - 4 La tensión entre líneas  $U_{ST}$  en bornes del segundo generador al producirse el cortocircuito.

#### RESPUESTAS:

- 1 La intensidad monofásica de cortocircuito en la fallas es:  $I''_{k1} = 243.75/-87.6^\circ \text{ A}$ .
- 2 La intensidad de la fase "S", del primer generador es:  $I''_{SG1} = 40.625/-87.6^\circ \text{ A}$ .
- 3 La intensidad de la fase "R" del segundo generador es:  $I''_{RG2} = 81.25/-87.6^\circ \text{ A}$ .
- 4 La tensión entre líneas, en bornes del segundo generador es:  $U_{STG2} = 9860.17/-90^\circ \text{ V}$ .

### PROBLEMA 4.15

Dos generadores síncronos trifásicos de 35MVA y 7.5kV, cada uno, se disponen en paralelo, suministrando energía a una línea de distribución. Las impedancias secuenciales de los generadores y la línea son las siguientes:

**DATOS**

	Generadores	Línea
Secuencia directa.....	$j 6\Omega$ .....	$j 12\Omega$
Secuencia inversa.....	$j 5\Omega$ .....	$j 12\Omega$
Secuencia homopolar.....	$j 2\Omega$ .....	$j 25\Omega$

El primer generador tiene su punto neutro aislado de tierra, mientras que el segundo generador tiene su punto neutro conectado a tierra a través de una resistencia de  $0.8\Omega$ .

**HALLAR**

• *Si se produce un cortocircuito entre la fase "R" y tierra (cortocircuito monofásico), en el extremo más alejado de la línea, y se supone que los generadores antes de la falla trabajan sin carga:*

- 1 La intensidad monofásica de cortocircuito ( $I''_{k1}$ ), en el punto de la falla.
- 2 La intensidad que circula por la fase "S", del primer generador ( $I''_{SG1}$ ), al producirse el cortocircuito.
- 3 La intensidad que circula por la fase "R", del segundo generador ( $I''_{RG2}$ ), al producirse el cortocircuito.
- 4 La tensión entre líneas  $U_{ST}$  en bornes del segundo generador al producirse el cortocircuito.

**RESPUESTAS**

- 1 La intensidad monofásica de cortocircuito es:  $I''_{k1} = 229.5/-87.6^\circ$  A.
- 2 La intensidad de la fase "S", del primer generador es:  $I''_{SG1} = 38.25/92.45^\circ$  A.
- 3 La intensidad de la fase "R" del segundo generador es:  $I''_{RG2} = 153/-87.6^\circ$  A.
- 4 La tensión entre líneas en bornes del segundo generador es:  $U_{STG2} = 7435/-90^\circ$  V.

**PROBLEMA 4.16**

Se dispone de un sistema de energía formado por un generador, un transformador y un grupo de motores asíncronos conectados en paralelo. Los valores característicos de las máquinas y del transformador son las siguientes (los valores dados para el motor son los tomados en su conjunto):

**DATOS**

G .....	7500 MVA.....	4.16 kV.....	$X''d_1 = X_2 = 10\%$ .....	$X_0 = 5\%$ .....	$X_n = 5\%$
$T_R$ .....	7500 MVA.....	4.16/0.6 kV.....	$\epsilon_{exc} = X_1 = X_2 = 10\%$ ...	$X_0 = 0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n = 0\%$
M.....	5000 MVA.....	0.6 kV .....	$X''d_1 = X_2 = 20\%$ .....	$X_0 = 4\%$ .....	$X_n = 2\%$

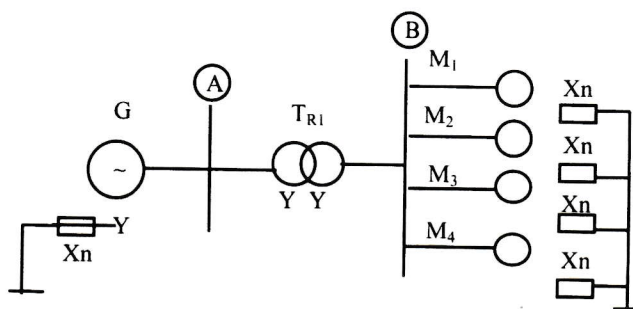


Figura 4.14 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.16

**HALLAR**

• *Si se produce una falta monofásica a tierra en el embarrado "B", y el sistema está operando a voltaje nominal y sin corriente antes del fallo, tomando como tensión de referencia  $E = 1/0^\circ$ :*

- 1 Las intensidades de cortocircuito de todas las fases del generador.
- 2 Las intensidades totales en el punto de defecto a tierra ( $I''_{k1R}$ ,  $I''_{k1S}$ ,  $I''_{k1T}$ ).
- 3 Las intensidades de las tres fases del conjunto de motores delante de la falta.

- 4 Las intensidades de defecto de las tres fases, que van desde el secundario del transformador hasta el punto de defecto.

### RESPUESTAS

- 1 Las intensidades de cortocircuito en todas las fases del generador son:  
 $I_{RG} = 0/0$  A.  $I_{SG} = 2769/90^\circ$  A.  $I_{TG} = 2769/-90^\circ$  A
- 2 Las intensidades totales en el punto de defecto a tierra son:  
 $I''_{kIR} = 55425/-90^\circ$  A  $I''_{kIS} = I''_{kIT} = 0/0^\circ$  A
- 3 Las intensidades de las tres fases del conjunto de motores delante de la falta son:  
 $I_R = 33255/-90^\circ$  A.  $I_S = 11085/-90^\circ$  A.  $I_T = 11085/-90^\circ$  A
- 4 Las intensidades de defecto de las tres fases, en el secundario del transformador, son:  
 $I_R = 22170/-90^\circ$  A.  $I_S = 11085/90^\circ$  A.  $I_T = 11085/90^\circ$  A

### PROBLEMA 4.17

El circuito mostrado en la figura corresponde a una sección de una red de transporte de energía interconectada por varios puntos. El suministro está formado por una acometida trifásica, un generador trifásico, un transformador y un enlace para usuarios. El extremo de la línea de consumidores está abierto y por lo tanto el generador trabaja sin carga. Las conexiones existentes así como las características de las máquinas son las mostradas en la figura

### DATOS

Q.....	2000MVA.....	110kV					
$G_1$ .....	12 MVA.....	20 kV.....	$X''_d = X_2 = 16\%$ .....	$X_o = 5\%$ .....	$X_n = 0\%$		
$T_{R1}$ .....	25 MVA.....	110/20kV.....	$X_1 = X_2 = 7\%$ .....	$X_o = 0.9 \cdot X_1$ .....	$X_n = 0$		
Línea 1°.....			$X_1 = X_2 = j 6.5\Omega$ .....	$X_o = j 15 \Omega$ .....	$X_n = 0$		
Línea 2°.....			$X_1 = X_2 = j 0.11\Omega$ .....	$X_o = j 0.25 \Omega$ .....	$X_n = 0$		
Línea 3°.....			$X_1 = X_2 = j 0.57\Omega$ .....	$X_o = j 1.42\Omega$ .....	$X_n = 0$		

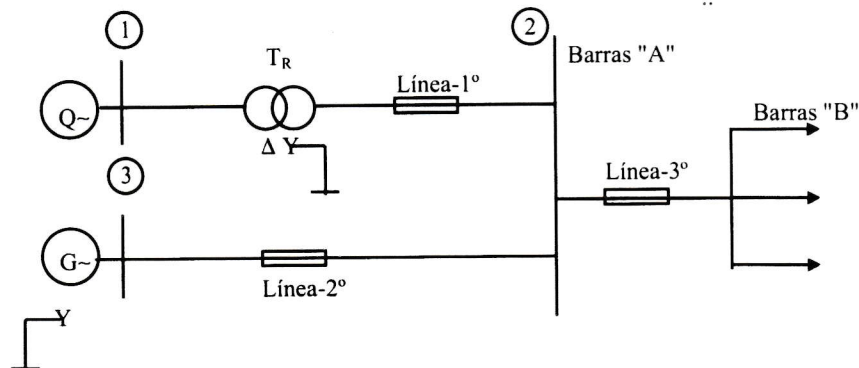


Figura 4.15 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.17

### HALLAR

- Si el sistema está operando a voltaje nominal y sin corriente antes del fallo, delante de una falta monofásica (Fase-Tierra), en la fase "R" de las barras "2":
- 1 Las intensidades que circulan por las tres fases del generador.
  - 2 Las intensidades que circulan por las tres fases del transformador hasta el punto de falta.
  - 3 Las intensidades que circulan por las tres fases de la acometida hacia el punto de falta.

### RESPUESTAS

- 1 Las intensidades que circulan por las tres fases del generador son:  
 $I_{RG} = 4118/-90^\circ$  A  $I_{SG} = 1415/-90^\circ$  A  $I_{TG} = 1415/-90^\circ$  A
- 2 Las intensidades que circulan por las tres fases del transformador hasta el punto de falta son:  
 $I_{RTR} = 8041/-90^\circ$  A  $I_{STR} = 1415/90^\circ$  A  $I_{TTR} = 1415/90^\circ$  A

- 3 Las intensidades que circulan por las tres fases de la acometida hacia el punto de falta son:

$$I_{RQ} = 5460/-90^\circ \text{A} \quad I_{SQ} = 5460/90^\circ \text{A} \quad I_{TQ} = 0/0^\circ \text{A}$$

### PROBLEMA 4.18

Dos generadores síncronos se conectan a una línea de transmisión de energía a través de dos transformadores trifásicos, como se muestra en la figura. Los valores nominales y las reactancias de las máquinas y transformadores son:

#### DATOS

$G_1$ .....	80MVA .....	25kV .....	$X''_d=X_1=X_2=20\%$ .....	$X_0=6\%$ .....	$X_n=j0.2\Omega$
$G_2$ .....	60MVA .....	25kV .....	$X''_d=X_1=X_2=18\%$ .....	$X_0=5\%$ .....	$X_n=j0.1\Omega$
$T_{R1}$ .....	80MVA .....	150/25kV .....	$X''_d=X_1=X_2=11\%$ .....	$X_0=8\%$ .....	$X_n=0\%$
$T_{R2}$ .....	60MVA .....	150/25kV .....	$X''_d=X_1=X_2=15\%$ .....	$X_0=10\%$ .....	$X_n=0\%$
Línea .....			$X_1=X_2=j12\Omega$ .....	$X_0=j30\Omega$	

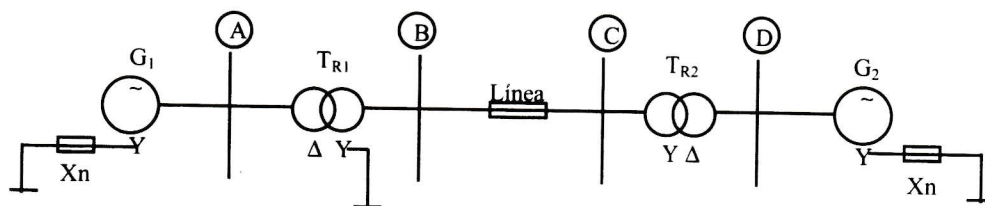


Figura 4.16 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.18

#### HALLAR

Si el sistema esta operando a voltaje nominal y sin corriente antes del fallo, delante de una falta bifásica (Fase-Fase), en las fases "S y T" de las barras "C":

- 1 Intensidad que circula por la fase "T", ( $I''_{k2T}$ ) del generador  $G_1$ .
- 2 Intensidad que circula por la fase "S", ( $I''_{k2S}$ ) desde la línea de transmisión hasta el punto de falta.
- 3 Intensidad que circula por la fase "R", ( $I''_{k2R}$ ) del generador  $G_2$ .
- 4 Voltaje línea-línea  $U_{ST}$ , en bornes del generador  $G_2$ .
- 5 Voltaje línea-línea  $U_{TR}$ , en el punto de falta (barras "C").
- 6 Voltaje línea-línea  $U_{RS}$ , en bornes del generador  $G_2$ .

#### RESPUESTAS

Los valores pedidos son respectivamente:

1.  $I''_{k2T} = 5242.4/0^\circ \text{A}$ .
2.  $I''_{k2S} = 756.7/180^\circ \text{A}$ .
3.  $I''_{k2R} = 2102.8/180^\circ \text{A}$ .
4.  $U_{ST} = 15898/-141.8^\circ \text{V}$ .
5.  $U_{TR} = 131903/180^\circ \text{V}$ .
6.  $U_{RS} = 25000/0^\circ \text{V}$ .

### PROBLEMA 4.19

Dos generadores síncronos se conectan a una línea de transmisión de energía a través de dos transformadores trifásicos, como se muestra en la figura. Los valores nominales y las reactancias de máquinas y transformadores son:

#### DATOS

$G_1$ .....	70MVA .....	25kV .....	$X''_d=X_1=X_2=16\%$ .....	$X_0=6\%$ .....	$X_n=j0.3\Omega$
$G_2$ .....	50MVA .....	25kV .....	$X''_d=X_1=X_2=14\%$ .....	$X_0=5\%$ .....	$X_n=j0.2\Omega$
$T_{R1}$ .....	70MVA .....	150/25kV .....	$X''_d=X_1=X_2=10\%$ .....	$X_0=6\%$ .....	$X_n=0\%$
$T_{R2}$ .....	50MVA .....	150/25kV .....	$X''_d=X_1=X_2=12\%$ .....	$X_0=8\%$ .....	$X_n=0\%$
Línea .....			$X_1=X_2=j20\Omega$ .....	$X_0=j50\Omega$	

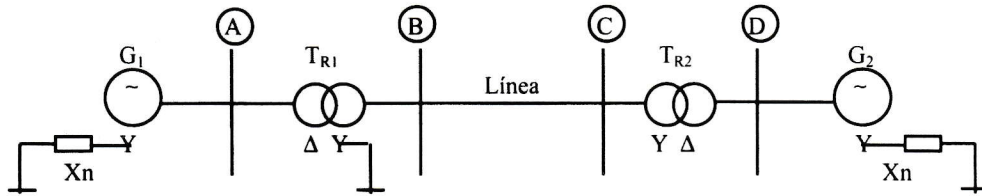


Figura 4.17 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.19

#### HALLAR

- Si el sistema está operando a voltaje nominal y sin corriente antes del fallo, delante de una falta bifásica a tierras (Fase-Fase-Tierra), en las fases "S, T y Tierra" de las barras "D":

- 1 Intensidad que circula por la fase "R", ( $I''_{k2R}$ ) del generador  $G_1$ .
- 2 Intensidad que circula por la fase "S", ( $I''_{k2S}$ ) en la línea de transmisión.
- 3 Intensidad que circula por la fase "T", ( $I''_{k2T}$ ) del generador  $G_2$ .
- 4 Voltaje línea-línea  $U_{ST}$ , al principio de la línea (barras "B").
- 5 Voltaje línea-línea  $U_{TR}$ , en el punto de falta.
- 6 Voltaje línea-línea  $U_{RS}$ , en bornes del generador  $G_1$ .

#### RESPUESTAS

Respectivamente los valores que adoptan las diversas magnitudes eléctricas son:

1.  $I''_{k2R} = 1113.6/-90^\circ$  A.
2.  $I''_{k2S} = 19778.4/180^\circ$  A.
3.  $I''_{k2T} = 8893/36.53^\circ$  A.
4.  $U_{ST} = 86727.9/-44.7^\circ$  V.
5.  $U_{TR} = 14336.1/180^\circ$  V.
6.  $U_{RS} = 86725.2/44.7^\circ$  V.

#### PROBLEMA 4.20

Dos generadores síncronos se conectan a una línea de transmisión de energía a través de dos transformadores trifásicos, como se muestra en la figura. Los valores nominales y las reactancias de las máquinas y transformadores son:

#### DATOS

$G_1$ .....	200MVA	.....30kV	.....	$X''_d=X_1=X_2=18\%$	.....	$X_o=4\%$ .....	$X_n=5\%$
$G_2$ .....	200MVA	.....30kV	.....	$X''_d=X_1=X_2=18\%$	.....	$X_o=4\%$ .....	$X_n=5\%$
$T_{R1}$ .....	200MVA	.....360/30kV	.....	$X''_d=X_1=X_2=10\%$	.....	$X_o=10\%$ .....	$X_n=0\%$
$T_{R2}$ .....	200MVA	.....360/30kV	.....	$X''_d=X_1=X_2=10\%$	.....	$X_o=10\%$ .....	$X_n=0\%$
Línea .....			.....	$X_1=X_2=j178.5\ \Omega$ .....	$X_o=j595.1\ \Omega$		

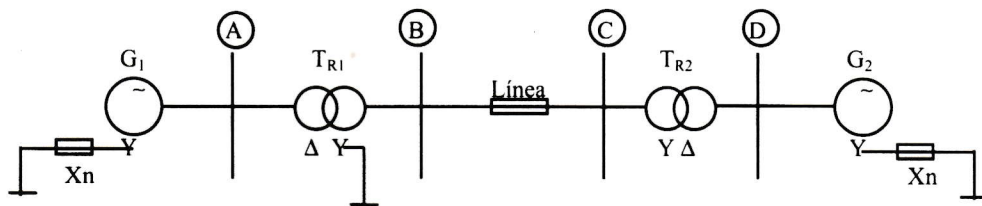


Figura 4.18 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 4.20

#### HALLAR

Si el sistema está operando a voltaje nominal y sin corriente antes del fallo, delante de una falta bifásica (Fase-Fase), en las fases "S y T" de las barras "C":

- 1 Intensidad que circula por la fase "T", ( $I''_{k2T}$ ) del generador  $G_1$ .
- 2 Intensidad que circula por la fase "S", ( $I''_{k2S}$ ) desde la línea de transmisión hasta el punto de falta.

- 3 Intensidad que circula por la fase "R", ( $I''_{k2R}$ ) del generador  $G_2$ .
- 4 Voltaje línea-línea  $U_{ST}$ , en bornes del generador  $G_2$ .
- 5 Voltaje línea-línea  $U_{TR}$ , en el punto de falta (barras "C").
- 6 Voltaje línea-línea  $U_{RS}$ , en bornes del generador  $G_2$ .

**RESPUESTAS**

Los valores pedidos son respectivamente:

- |  |  |  |
|--|--|--|
| 1. $I''_{k2T} = 6931.2/0^\circ \text{ A.}$ | 2. $I''_{k2S} = 500.22/180^\circ \text{ A.}$ | 3. $I''_{k2R} = 6872.4/180^\circ \text{ A.}$ |
| 4. $U_{ST} = 17643.22/-148.2 \text{ V}$    | 5. $U_{TR} = 311768.3/180^\circ \text{ V.}$  | 6. $U_{RS} = 29997.6/0^\circ \text{ V.}$     |

**ESTUDIO DEL CORTOCIRCUITO. APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS EN PU**

\* **SUPUESTO 3.4: ESTUDIO GENERAL DEL CORTOCIRCUITO.**

► En el esquema de la figura 3.7, y como aplicación del estudio de sistemas en pu, determinar para los puntos A, B, C y D, y en los casos que siguen, las magnitudes corriente eficaz y máxima de cortocircuito de choque, capacidad de ruptura del elemento de protección a colocar en los puntos señalados, corriente transitoria de desconexión y corriente permanente de cortocircuito. Las líneas que unen los transformadores de salida de la central con los de las barras de distribución a cargas son idénticas a la del supuesto 2.20.

- Realizar el estudio mediante la asociación final de impedancias.
- Realizar el estudio mediante reducción sucesiva a impedancias y potencias reducidas.

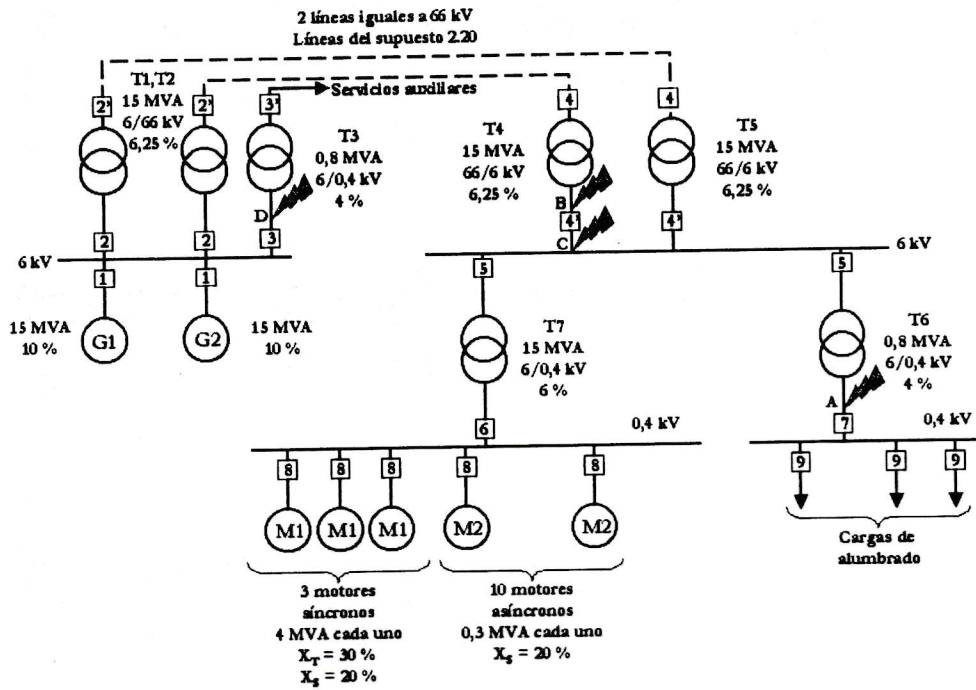


Figura 3.7

Comenzaremos, tal y como se ha explicado en los supuestos anteriores de este capítulo, pasando a magnitudes unitarias las distintas impedancias presentes en el esquema de la figura 3.7.

Una vez realizado, representaremos el diagrama equivalente y procederemos a simplificarlo hasta reducirlo a una única impedancia desde la que la resolución de los distintos apartados planteados será inmediata.

Distinguiremos cuatro zonas: la de generación, la de las líneas de alta, la de unión de los transformadores T4 y T5 con T6 y T7, y la de las cargas (0,4 kV). Las denominaremos, en este orden, como zonas 1 a 4, empleando estos subíndices cuando nos refiramos a magnitudes relacionadas con dichas zonas.

Elegiremos como potencia base para todo el sistema, por ser la potencia predominante en los distintos elementos:

$$S_B = 15 \text{ MVA}$$

y como tensión base, la de las líneas de alta tensión:

$$V_{B2} = 66 \text{ kV}$$

Las tensiones base para las zonas 1, 3 y 4, serán las mismas que las reales de cada zona, en tanto que se mantiene la relación de transformación de forma coherente en todos los transformadores situados entre dos de ellas, por lo que podremos prescindir del cociente de los cuadrados de las tensiones en las expresiones (A3.3) y (A3.5):

$$V_{B1} = 66 \cdot \frac{6}{66} = 6 \text{ kV} ; V_{B3} = 66 \cdot \frac{6}{66} = 6 \text{ kV} ; V_{B4} = 6 \cdot \frac{0,4}{6} = 0,4 \text{ kV}$$

Con ello, pueden calcularse ya las impedancias en pu para las cuatro zonas en que se ha dividido el sistema, empleando las ecuaciones correspondientes del Anexo III.

Generadores G1 y G2:

$$Z_{Gpu} |_{BN} = \frac{10}{100} \cdot j \cdot \frac{15}{15} = 0,1 \cdot j$$

Transformadores T1, T2, T4 y T5:

$$Z_{Tpu} |_{BN} = \frac{6,25}{100} \cdot j \cdot \frac{15}{15} = 0,0625 \cdot j$$

Transformadores T3 y T6:

$$Z_{Tpu} |_{BN} = \frac{4}{100} \cdot j \cdot \frac{15}{0,8} = 0,75 \cdot j$$

Transformador

Líneas de alta

En el supuesto nominal igual a 66 kV, aplicando la reactancia (por ser de las variaciones

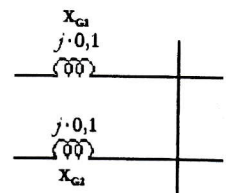
$$Z_{Lpu} |_{BN}$$

Motores M1:

Motores M2:

donde  $X_{SM1pu}$  es la subtransitoria de ca parte imaginaria de es el complejo que motor M2 expresad

El diagrama de prescindido de la pa



Transformador T7:

$$Z_{T7pu} |_{BN} = \frac{6}{100} \cdot j \cdot \frac{15}{15} = 0,06 \cdot j$$

Líneas de alta:

En el supuesto 2.20 vimos que se trataba de una línea de 18 km de longitud, de tensión nominal igual a 66 kV y cuya impedancia por fase era  $Z_{fase} = 0,13 + j \cdot 0,5 \Omega/km$ . Con todo ello, aplicando la expresión (A3.4) del Anexo III, y despreciando la resistencia frente a la reactancia (por ser casi cuatro veces inferior, aunque se propone al lector la comprobación de las variaciones en los cálculos considerando también la resistencia de la línea), se tendrá:

$$Z_{Lpu} |_{BN} = (0,13 + j \cdot 0,5) \cdot 18 \cdot \frac{15}{66^2} = 0,008 + j \cdot 0,031 \approx 0,031 \cdot j$$

Motores M1:

$$X_{TM1pu} |_{BN} = \frac{30}{100} \cdot j \cdot \frac{15}{4} = 1,125 \cdot j$$

$$X_{SM1pu} |_{BN} = \frac{20}{100} \cdot j \cdot \frac{15}{4} = 0,75 \cdot j$$

Motores M2:

$$X_{SM2pu} |_{BN} = \frac{20}{100} \cdot j \cdot \frac{15}{0,3} = 10 \cdot j$$

donde  $X_{SM1pu}$  es el complejo que representa la parte imaginaria de la impedancia subtransitoria de cada motor M1 expresada en pu,  $X_{TM1pu}$  es el complejo que representa la parte imaginaria de la impedancia transitoria de cada motor M1 expresada en pu, y  $X_{SM2pu}$  es el complejo que representa la parte imaginaria de la impedancia subtransitoria de cada motor M2 expresada en pu.

El diagrama de reactancias en pu obtenido se muestra en la figura 3.8 (en él se ha prescindido de la parte resistiva de la impedancia de las líneas):

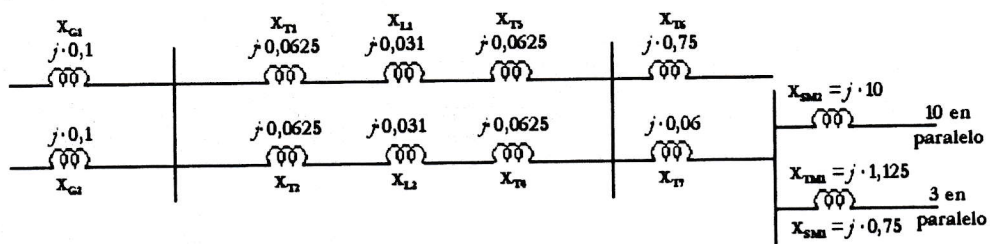


Figura 3.8

• CASO a): Estudio mediante la asociación final de impedancias.

• Cortocircuito en el punto A.

Para determinar la impedancia equivalente hasta el punto de cortocircuito (A en esta ocasión), será necesario, en primer lugar, señalar las que se encuentran en el camino de la corriente de cortocircuito una vez que se produce éste.

El esquema de la figura 3.9 nos muestra el circuito equivalente de reactancias para un cortocircuito en el punto A, válido para el cálculo de la corriente de cortocircuito de choque (valores en el subtransitorio, necesarios para comprobar los máximos esfuerzos electrodinámicos presentes como consecuencia del cortocircuito).

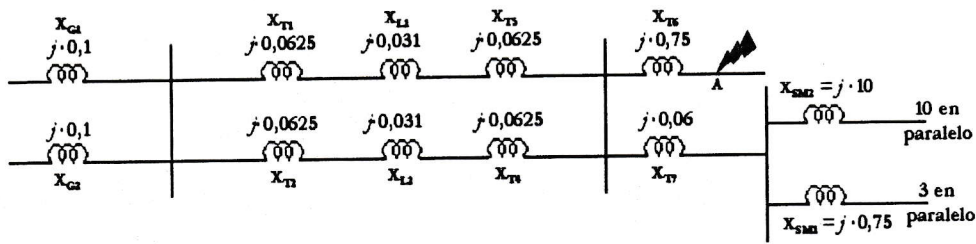


Figura 3.9

En él se ha tenido en cuenta que, para calcular la corriente de cortocircuito de choque, han de tenerse en cuenta las reactancias<sup>2</sup> subtransitorias de los generadores, las reactancias de cortocircuito de los transformadores, las reactancias equivalentes de las líneas, la reactancias subtransitorias de los motores síncronos y las reactancias subtransitorias de los motores asíncronos.

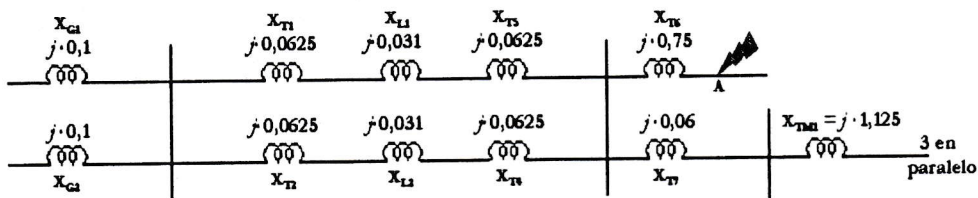


Figura 3.10

Por el contrario, el esquema de la figura 3.10 representa el diagrama equivalente para el cálculo del poder de ruptura, y en él se han considerado la reactancias subtransitorias de los

<sup>2</sup> Es habitual, en estos escalones de tensión, que la impedancia sea prácticamente igual a la reactancia de los elementos, dado que la componente resistiva de la misma es muy inferior a aquella, por lo que suele aceptarse que  $Z \approx X$ . En adelante, se empleará esta aproximación, de ahí que en lugar de referirse a la impedancia en este tipo de problemas, nos refiramos, en ocasiones, a la reactancia.

generadores, las equivalentes de la

El hecho de asíncronos en el c periodos después

Para simplificar que la aproximación poco de los que se

1) En los puntos que nos encontramos los párrafos anteriores de acuerdo con lo

2) En los puntos se determinarán los del Anexo III.

3) Considerar el cortocircuito trifásico

Volviendo sobre el cortocircuito en el punto de corte y función

El disyuntor que el disyuntor de aportación de los

Para encontrar las reactancias dibuja

$$X_{cc} = (((((X_{SM}) \parallel X)))$$

donde el símbolo del mismo.

En éste, como se reduce considerablemente (de todos es conocido) la reactancia equivalente de las reactancias en paralelo

Así, la expresión sigue:

generadores, las reactancias de cortocircuito de los transformadores, las reactancias equivalentes de las líneas y las reactancias transitorias de los motores síncronos.

El hecho de no tener en cuenta a las reactancias subtransitorias de los motores asíncronos en el cálculo del poder de ruptura se debe a que, la influencia de éstos cesa unos periodos después de que tenga lugar el cortocircuito.

Para simplificar los cálculos se tendrán en cuenta las cuestiones siguientes, indicando que la aproximación realizada, no supone pérdida de validez al diferir los resultados muy poco de los que se obtendrían en un cálculo riguroso del cortocircuito:

1) En los puntos de cortocircuito en los que exista influencia de motores (como en el que nos encontramos), la reactancia equivalente se calculará tal y como se ha explicado en los párrafos anteriores, y se determinarán las corrientes de cortocircuito y poder de ruptura de acuerdo con los conjuntos de expresiones (A3.7) y (A3.8) del Anexo III.

2) En los puntos de cortocircuito en los que no exista influencia de motores, se determinarán los valores relacionados con el poder de ruptura mediante la expresión (A3.9) del Anexo III.

3) Consideraremos en adelante, para todos los supuestos de este manual, el estudio del cortocircuito trifásico (o tripolar), por ser, habitualmente, el más desfavorable.

Volviendo sobre el cortocircuito en el punto A, el cálculo de las corrientes de cortocircuito en este punto nos facilitará los datos necesarios para elegir las características de corte y funcionamiento de los disyuntores 7, del lado de baja tensión del transformador.

El disyuntor 6 puede, al mismo tiempo, dimensionarse para las características del 7, ya que el disyuntor situado en 7 será de mayor poder de ruptura al recibir este punto la aportación de los motores al cortocircuito, que sería nula en el punto 6.

Para encontrar la reactancia equivalente  $X_{cc}$  en el punto A, basta con agrupar las reactancias dibujadas en el esquema de la figura 3.9. Así, se tendría:

$$X_{cc} = (((X_{G1} \parallel X_{G2}) + ((X_{T1} + X_{L1} + X_{T5}) \parallel (X_{T2} + X_{L2} + X_{T4}))) \parallel \\ \parallel (((X_{SM1} \parallel X_{SM1} \parallel X_{SM1}) \parallel (X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \\ \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2})) + X_{T7})) + X_{T6}$$

donde el símbolo  $\parallel$  representa el paralelo de los elementos situados a derecha e izquierda del mismo.

En éste, como en la mayoría de los problemas de este tipo, la expresión anterior se reduce considerablemente al ser iguales las reactancias de muchos de los elementos entre sí (de todos es conocido que reactancias en paralelo de igual valor pueden sustituirse por una reactancia equivalente de valor igual al de una de ellas dividido por el número de reactancias en paralelo).

Así, la expresión anterior, una vez agrupadas las reactancias similares, quedaría como sigue:

$$X_{cc} = \left\{ \left[ \left( \frac{X_{G1}}{2} \right) + \left( \frac{X_{T1} + X_{L1} + X_{T5}}{2} \right) \right] \parallel \left[ \left( \frac{X_{SM1}}{3} \parallel \frac{X_{SM2}}{10} \right) + X_{T7} \right] \right\} + X_{T6}$$

$$S_{cc} = \frac{S_B}{Z_{cc}}$$

donde, y tras sustituir los valores en pu encontrados párrafos atrás:

$$\begin{aligned} Z_{cc} &= \left\{ \left[ \left( \frac{0,1 \cdot j}{2} \right) + \left( \frac{0,0625 \cdot j + 0,031 \cdot j + 0,0625 \cdot j}{2} \right) \right] \parallel \left[ \left( \frac{0,75 \cdot j}{3} \parallel \frac{10 \cdot j}{10} \right) + 0,06 \cdot j \right] \right\} + 0,75 \cdot j = \\ &= \{ [(0,05 \cdot j) + (0,078 \cdot j)] \parallel [(0,25 \cdot j \parallel j) + 0,06 \cdot j] \} + 0,75 \cdot j = \\ &= \left\{ 0,128 \cdot j \parallel \left[ \left( \frac{0,25 \cdot j \cdot j}{0,25 \cdot j + j} \right) + 0,06 \cdot j \right] \right\} + 0,75 \cdot j = \\ &= \{ 0,128 \cdot j \parallel [0,2 \cdot j + 0,06 \cdot j] \} + 0,75 \cdot j = \left\{ \frac{0,128 \cdot j \cdot 0,26 \cdot j}{0,128 \cdot j + 0,26 \cdot j} \right\} + 0,75 \cdot j \approx \\ &\approx 0,08 \cdot j + 0,75 \cdot j = 0,83 \cdot j \end{aligned}$$

De igual forma, para encontrar la reactancia equivalente  $X_r$  en el punto A, agruparemos las reactancias dibujadas en el esquema de la figura 3.10, obteniendo:

$$\begin{aligned} Z_r &= \left\{ \left[ \left( \frac{0,1 \cdot j}{2} \right) + \left( \frac{0,0625 \cdot j + 0,031 \cdot j + 0,0625 \cdot j}{2} \right) \right] \parallel \left[ \left( \frac{1,125 \cdot j}{3} \right) + 0,06 \cdot j \right] \right\} + 0,75 \cdot j = \\ &= \{ [(0,05 \cdot j) + (0,078 \cdot j)] \parallel [0,435 \cdot j] \} + 0,75 \cdot j = \\ &= \{ 0,128 \cdot j \parallel 0,435 \cdot j \} + 0,75 \cdot j = \left\{ \frac{0,128 \cdot j \cdot 0,435 \cdot j}{0,128 \cdot j + 0,435 \cdot j} \right\} + 0,75 \cdot j \approx \\ &\approx 0,1 \cdot j + 0,75 \cdot j = 0,85 \cdot j \end{aligned}$$

Obtenidas las reactancias  $X_{cc}$  y  $X_r$  y aplicando el conjunto de expresiones (A3.7) del Anexo III, encontramos que la potencia de cortocircuito de choque, la corriente eficaz de cortocircuito y la corriente máxima de cortocircuito de choque, son, respectivamente:

donde  $x$  ha sido la tensión.

En la expresión  $R_{cc}$  como cero. En repetirse los esquemas sean tenidas en cuenta la suma de los cuadrados.

De igual modo, los valores del poder la corriente permanen

$$S_r = \frac{S_B}{X_r}$$

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{18,072}{30}$$

Para determinar (A3.10) del mismo.

• CASO b): Real reducidas.

• Cortocircuito en

Esta forma de trabajo que la vista referencias bibliográficas obviaremos su aplicación comprobación en otro

Igual que hicimos rigen el estudio:

1) Reduiremos reducida a la potencia

$$S_{cc} = \frac{S_B}{Z_{cc}} = \frac{15}{0,83} = 18,072 \text{ MVA}; I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{18,072}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 26,085 \text{ kA}$$

$$I_{ch} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot x = \sqrt{2} \cdot 26,085 \cdot 1,25 = 46,112 \text{ kA}$$

donde  $x$  ha sido obtenido desde la tabla A3.1 del Anexo III, para interruptores de baja tensión.

En la expresión anterior se ha igualado  $Z_{cc}$  al módulo de  $Z_{cc}$ , habiéndose considerado  $R_{cc}$  como cero. En las situaciones en las que no pueda hacerse tal aproximación deberán repetirse los esquemas de las figuras anteriores con las resistencias de los elementos que sean tenidas en cuenta, obteniendo finalmente el módulo de  $Z_{cc}$  como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de  $X_{cc}$  y de  $R_{cc}$  equivalentes.

De igual modo, aplicando el conjunto de expresiones (A3.8) del Anexo III, obtendremos los valores del poder o potencia de ruptura, de la corriente transitoria de desconexión y de la corriente permanente de cortocircuito:

$$S_r = \frac{S_B}{X_r} = \frac{15}{0,85} = 17,647 \text{ MVA}; I_d = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{17,647}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 25,47 \text{ kA}$$

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{18,072}{30} = 0,6 \Rightarrow \mu_d \approx 0,9 \Rightarrow I_p = \mu_d \cdot I_d = 0,9 \cdot 25,47 = 22,92 \text{ kA}$$

Para determinar  $\mu_d$  se ha empleado la figura A3.1 del Anexo III, así como la expresión (A3.10) del mismo.

- *CASO b): Realizar el estudio mediante reducción sucesiva a impedancias y potencias reducidas.*

- Cortocircuito en el punto A.

Esta forma de resolver el estudio del cortocircuito es algo más complicada de llevar a cabo que la vista en el caso anterior, pero es motivo de tratamiento en numerosas referencias bibliográficas por lo que realizaremos la simulación de la misma en este punto y obviaremos su aplicación en el futuro, dejando para el lector, si así lo desea, la comprobación en otros supuestos o puntos.

Igual que hicimos en el caso anterior, definiremos en primer lugar, las premisas que rigen el estudio:

- 1) Reduciremos todas las reactancias presentes en el circuito a una reactancia única reducida a la potencia base elegida en el sistema, para lo cual se tendrá en cuenta que:

2) Las reactancias conectadas en paralelo se reducen a una de ellas, tomada como base, siendo la reactancia total igual a la reactancia reducida y la potencia total igual a la suma de las potencias asignadas a cada una de ellas.

3) Las reactancias conectadas en serie se suman, reduciendo previamente las potencias a una de ellas, tomada como base, siendo la potencia total igual a la reducida.

Las consideraciones anteriores no son sino una extensión de la ecuación que relaciona la potencia de cortocircuito con la reactancia, dada por (3.1).

La expresión (3.1) puede volver a ser escrita de forma que permita determinar la reactancia reducida equivalente del epígrafe 2) anterior, obteniéndose la expresión (3.2). De igual modo, la expresión (3.3) nos permite conseguir la potencia reducida equivalente citada en el epígrafe 3) anterior.

$$S_{cc} = \frac{S_n}{X_{cc}} \quad (3.1)$$

$$S_2 = \frac{S_1}{X_1} \cdot X_2 \quad (3.2)$$

$$X_2 = \frac{S_2}{S_1} \cdot X_1 \quad (3.3)$$

El esquema de la figura 3.9 nos mostraba el circuito equivalente de reactancias para un cortocircuito en el punto A, válido para el cálculo de la corriente de cortocircuito de choque. Podemos volver a dibujarlo indicando la potencia base a la que están referidas las distintas reactancias del mismo. La figura 3.11 lo aclara:

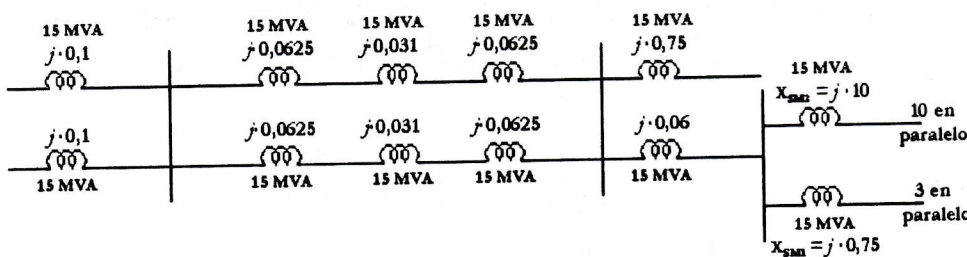


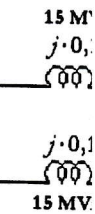
Figura 3.11

En el esquema se comprueba que las potencias para todas las reactancias son iguales a la escogida como base para el sistema.

Podría comenzarse por agrupar las reactancias correspondientes a las líneas de alta y a los transformadores de comienzo y final de línea. Así, y dado que tienen iguales potencias, la reactancia reducida equivalente de las tres se obtendría, de acuerdo con lo indicado párrafos atrás, sumándolas, con una potencia reducida igual a la de ellas (al tener potencias iguales). Consideraremos, llegados a este punto, que en lugar de 3 motores síncronos

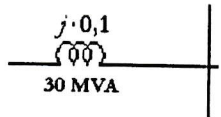
existan 4 motores  
diferencias existen  
de un motor adicio

Con ello, nos q



A continuación  
asociación de reac  
estar en paralelo y  
reducida igual a la  
de todos ellos. De  
de los dos generad  
previa de las líneas

El esquema 3.1  
realizar con la rea  
reactancia reducida



Para realizar la  
del carácter vectoria

existan 4 motores de iguales características, dejando para el lector la comprobación de las diferencias existentes en relación al primer caso. Ello nos permitirá ver la escasa influencia de un motor adicional en relación con el caso anterior.

Con ello, nos quedaría el esquema de la figura 3.12.

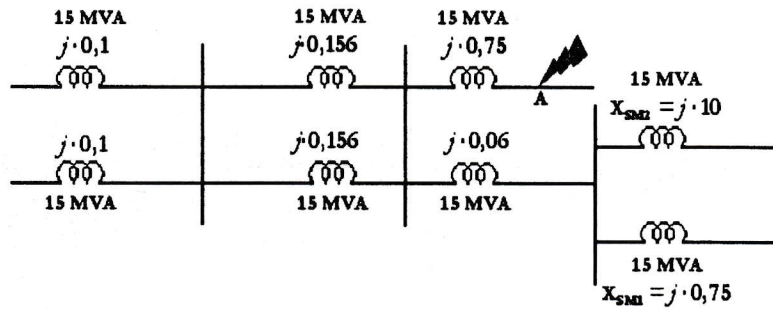


Figura 3.12

A continuación, realizaremos tres agrupaciones. En todas ellas aplicaremos la idea de asociación de reactancias en paralelo. Así, en el caso de los diez motores asíncronos, al estar en paralelo y tener igual reactancia, podrán sustituirse por una reactancia equivalente reducida igual a la de uno de ellos, y por una potencia reducida equivalente igual a la suma de todos ellos. De igual forma se procede para los motores síncronos y para la agrupación de los dos generadores y de las dos reactancias equivalentes resultantes de la agrupación previa de las líneas y de los transformadores.

El esquema 3.13 (I) nos lo indica, destacando además la conversión que se plantea realizar con la reactancia equivalente de los motores síncronos para convertirla a una reactancia reducida equivalente a la que tienen los motores asíncronos.

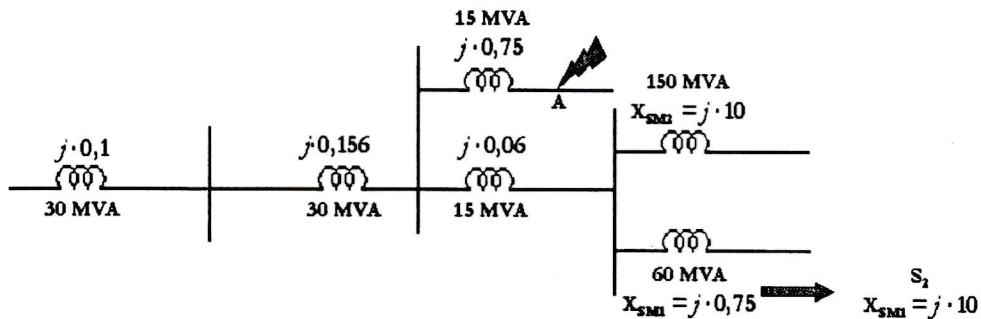


Figura 3.13 (I)

Para realizar la conversión se emplea la expresión (3.2), sobre la que se ha prescindido del carácter vectorial de las reactancias:

$$S_2 = \frac{60}{0,75} \cdot 10 = 800 \text{ MVA}$$

La reducción a una reactancia de los motores síncronos y asíncronos es rápida, siendo suficiente con sumar las potencias manteniendo la reactancia de uno de ellos.

Al mismo tiempo, en la figura 3.13 (II), se han agrupado ya las reactancias dispuestas en serie de 30 MVA (recuérdese que, ante el cortocircuito, el punto A se comporta como si de un "sumidero" de corrientes se tratase, confluyendo todas en él).

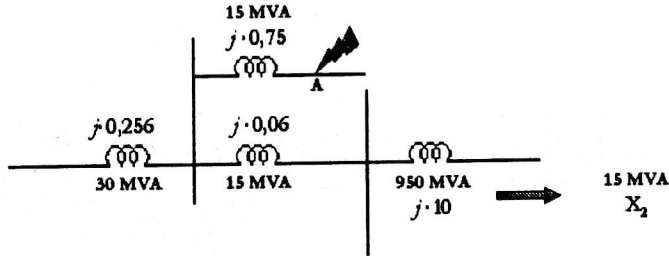


Figura 3.13 (II)

Para realizar la conversión indicada en la figura anterior se emplea la expresión (3.3):

$$Z_2 = \frac{15}{950} \cdot 10 \cdot j = 0,158 \cdot j$$

Una vez reducida la reactancia anterior, puede ser sumada con la de 15 MVA, puesto que están en serie y las potencias son iguales. Esta operación se refleja en la figura 3.14.

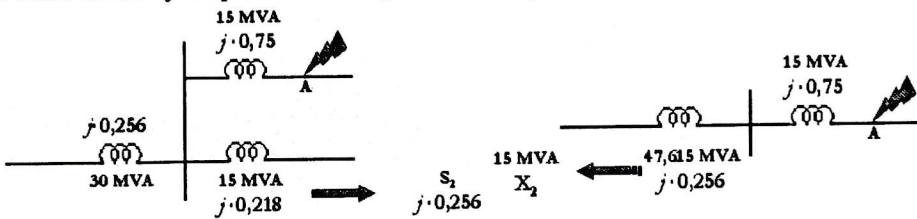


Figura 3.14

Figura 3.15

Nuevamente, sobre la figura 3.14:

$$S_2 = \frac{15}{0,218} \cdot 0,256 = 17,615 \text{ MVA}$$

y sobre la figura 3.15:

$$Z_2 = \frac{15}{47,615} \cdot 0,256 \cdot j = 0,08 \cdot j$$

con lo que, finalmente:

obteniéndose el n complicado que e hubiese hecho para

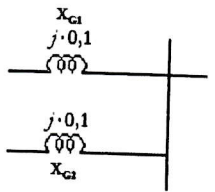
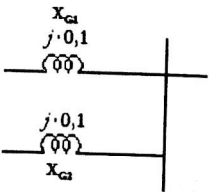
El cálculo de Z

• Cortocircuito

Realizaremos é los dos caminos exp

El suministro de interruptor de la otr

El esquema equ de la figura 3.17:



Para encontrar l reactancias dibujadas

$$\parallel ((X_{SM1} \parallel \lambda$$

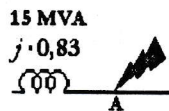


Figura 3.16

obteniéndose el mismo resultado. Sin embargo, este último procedimiento resulta más complicado que el explicado con anterioridad, por lo que se aconseja el primero. Si se hubiese hecho para 3 motores como en el caso anterior, el resultado sería  $X = 0,836 \cdot j$ .

El cálculo de  $Z_r$  se haría de forma similar a la entonces descrita.

• Cortocircuito en el punto B.

Realizaremos éste y el resto de puntos a estudiar, bajo la consideración del primero de los dos caminos explicados para llegar hasta el cálculo de la corriente de cortocircuito.

El suministro de la corriente de cortocircuito se llevará a cabo por la central, a través del interruptor de la otra línea de alta, en paralelo con la contribución de los motores.

El esquema equivalente para el estudio de la corriente de cortocircuito de choque es el de la figura 3.17:

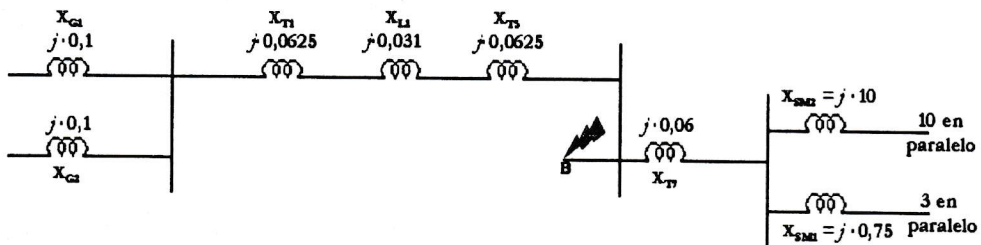


Figura 3.17

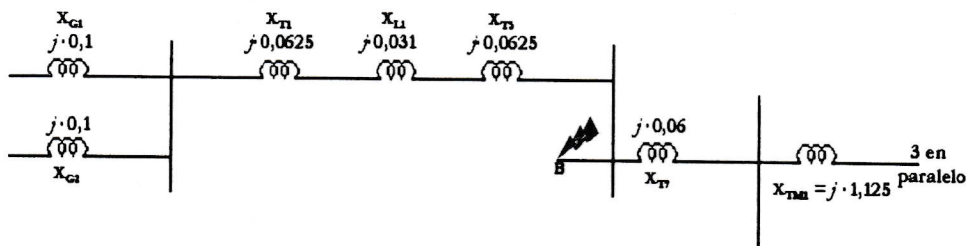


Figura 3.18

Para encontrar la reactancia equivalente  $X_{cc}$  en el punto B, basta con agrupar las reactancias dibujadas en el esquema de la figura 3.17. Así, se tendría:

$$X_{cc} = ((X_{G1} \parallel X_{G2}) + ((X_{T1} + X_{L1} + X_{T5})) \parallel$$

$$\parallel (((X_{SM1} \parallel X_{SM1} \parallel X_{SM1}) \parallel (X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2}$$

$$\parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2} \parallel X_{SM2})) + X_{T7})$$

Agrupando las reactancias que son iguales entre sí:

$$X_{cc} = \left[ \left( \frac{X_{G1}}{2} \right) + (X_{T1} + X_{L1} + X_{T5}) \right] \parallel \left[ \left( \frac{X_{SM1}}{3} \parallel \frac{X_{SM2}}{10} \right) + X_{T7} \right]$$

donde, y tras sustituir los valores en pu encontrados párrafos atrás:

$$\begin{aligned} Z_{cc} &= \left[ \frac{0,1 \cdot j}{2} + (0,0625 \cdot j + 0,031 \cdot j + 0,0625 \cdot j) \right] \parallel \\ &\parallel \left[ \left( \frac{0,75 \cdot j}{3} \parallel \frac{10 \cdot j}{10} \right) + 0,06 \cdot j \right] = \\ &= [(0,05 \cdot j) + (0,156 \cdot j)] \parallel [(0,25 \cdot j \parallel j) + 0,06 \cdot j] = \\ &= 0,206 \cdot j \parallel \left[ \left( \frac{0,25 \cdot j \cdot j}{0,25 \cdot j + j} \right) + 0,06 \cdot j \right] = \\ &= 0,206 \cdot j \parallel [0,2 \cdot j + 0,06 \cdot j] = \frac{0,206 \cdot j \cdot 0,26 \cdot j}{0,206 \cdot j + 0,26 \cdot j} = \\ &= 0,1149 \cdot j \end{aligned}$$

De igual forma, para encontrar la reactancia equivalente  $X_r$  en el punto B, agruparemos las reactancias dibujadas en el esquema de la figura 3.18, obteniendo:

$$\begin{aligned} Z_r &= \left[ \frac{0,1 \cdot j}{2} + 0,0625 \cdot j + 0,031 \cdot j + 0,0625 \cdot j \right] \parallel \left[ \left( \frac{1,125 \cdot j}{3} \right) + 0,06 \cdot j \right] = \\ &= [(0,05 \cdot j) + (0,156 \cdot j)] \parallel [0,435 \cdot j] = \{0,206 \cdot j \parallel 0,435 \cdot j\} = \\ &= \left\{ \frac{0,206 \cdot j \cdot 0,435 \cdot j}{0,206 \cdot j + 0,435 \cdot j} \right\} = 0,1398 \cdot j \end{aligned}$$

Obtenidas las reactancias  $X_{cc}$  y  $X_r$  y aplicando el conjunto de expresiones (A3.7) del Anexo III, encontramos que la potencia de cortocircuito de choque, la corriente eficaz de cortocircuito y la corriente máxima de cortocircuito de choque son, para el punto B, respectivamente:

$$S_{cc} = \frac{S_B}{Z_{cc}} = \frac{15}{0,1149} = 130,548 \text{ MVA}; I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{130,548}{\sqrt{3} \cdot 6} = 12,562 \text{ kA}$$

$$I_{ch} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot x = \sqrt{2} \cdot 12,562 \cdot 1,6 = 28,42 \text{ kA}$$

donde  $x$  ha sido obtenido desde la tabla A3.1 del Anexo III, para interruptores de alta tensión.

De igual modo, los valores del poder la corriente perman

$$S_r = \frac{S_B}{X_r} = \frac{1}{0,1}$$

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{130,548}{30} =$$

De no haber ten la corriente transitor

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{130,548}{30} =$$

• Cortocircuito en

En este punto, la mismos al cortocir cortocircuito en éste

$$\frac{X_{G1}}{j \cdot 0,1}$$

$$\frac{j \cdot 0,1}{X_{G1}}$$

Eso sí, el interruptu remoto que éste sea, lugar cuando el inter se repartiría entre los mitad de la misma).

La figura 3.19 mu

Para encontrar la ahora:

sustituyendo:

De igual modo, aplicando el conjunto de expresiones (A3.8) del Anexo III, obtendremos los valores del poder o potencia de ruptura, de la corriente transitoria de desconexión y de la corriente permanente de cortocircuito en el punto B:

$$S_r = \frac{S_B}{X_r} = \frac{15}{0,1398} = 107,296 \text{ MVA}; I_d = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{107,296}{\sqrt{3} \cdot 6} = 10,325 \text{ kA}$$

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{130,548}{30} = 4,352 \Rightarrow \mu_d \approx 0,5 \Rightarrow I_p = \mu_d \cdot I_d = 0,5 \cdot 10,325 = 5,163 \text{ kA}$$

De no haber tenido en cuenta la influencia de los motores, se podría haber determinado la corriente transitoria de desconexión desde la expresión (A3.9) del Anexo III:

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{130,548}{30} = 4,3516 \Rightarrow \mu \approx 0,82 \Rightarrow I_d = \mu \cdot I_{cc} = 0,82 \cdot 12,562 = 10,3 \text{ kA}$$

• Cortocircuito en el punto C.

En este punto, la influencia de los motores es nula, ya que la posible aportación de los mismos al cortocircuito no pasaría por el interruptor 4'. De hecho, que ocurra el cortocircuito en éste o en cualquier otro punto de la barra de 6 kV resulta indiferente.

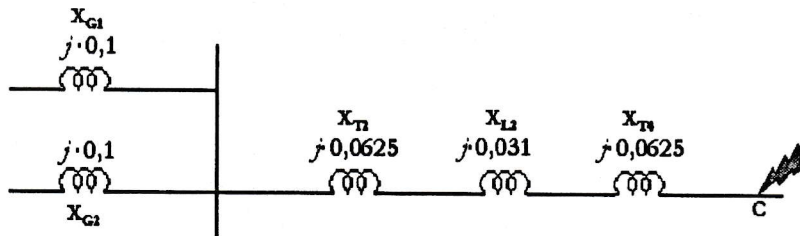


Figura 3.19

Eso sí, el interruptor 4' ha de dimensionarse para el caso más desfavorable posible, por remoto que éste sea, y en el sistema objeto de estudio la situación más desfavorable tiene lugar cuando el interruptor 4' de la otra línea esté abierto (ya que de no estarlo, la corriente se repartiría entre los dos interruptores, y cada uno debería estar diseñado para soportar la mitad de la misma).

La figura 3.19 muestra el diagrama equivalente de reactancias hasta el punto C.

Para encontrar la reactancia equivalente  $X_{cc}$  en el punto C, procedemos como hasta ahora:

$$X_{cc} = (X_{G1} \parallel X_{G2}) + (X_{T2} + X_{L2} + X_{T4})$$

sustituyendo:

$$Z_{cc} = \left[ \frac{0,1 \cdot j}{2} + (0,0625 \cdot j + 0,031 \cdot j + 0,0625 \cdot j) \right] = 0,206 \cdot j$$

La potencia de cortocircuito de choque, la corriente eficaz de cortocircuito y la corriente máxima de cortocircuito de choque son, para el punto C, respectivamente:

$$S_{cc} = \frac{S_B}{Z_{cc}} = \frac{15}{0,206} = 72,816 \text{ MVA}; I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{72,816}{\sqrt{3} \cdot 6} = 7,01 \text{ kA}$$

$$I_{ch} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot x = \sqrt{2} \cdot 7,01 \cdot 1,6 = 15,86 \text{ kA}$$

La corriente transitoria de desconexión ha de deducirse desde la expresión (A3.9) del Anexo III:

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{72,816}{30} = 2,43 \Rightarrow \mu \approx 0,94 \Rightarrow I_d = \mu \cdot I_{cc} = 0,94 \cdot 7,01 \approx 7 \text{ kA}$$

Con el valor de la corriente transitoria de desconexión pueden ya calcularse los valores del poder o potencia de ruptura y de la corriente permanente de cortocircuito, en el punto C:

$$S_r = \mu \cdot S_{cc} = 0,94 \cdot 72,816 = 68,4 \text{ MVA}$$

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{72,816}{30} = 2,43 \Rightarrow \mu_d \approx 0,6 \Rightarrow I_p = \mu_d \cdot I_{cc} = 0,6 \cdot 7 = 4,2 \text{ kA}$$

A la vista de los resultados anteriores, el disyuntor 4' deberá dimensionarse para los valores calculados en el estudio del cortocircuito en el punto B, en tanto que son más desfavorables que estos últimos.

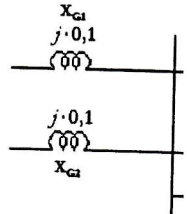
• Cortocircuito en el punto D.

Este punto es el más desfavorable de toda la instalación. La explicación a esta afirmación la encontramos en el hecho de que en este punto llegarían las corrientes procedentes de los generadores y de todos los motores de la instalación. Es más, una vez que determinemos el interruptor 3, tendremos diseñados los interruptores 2, en tanto que las corrientes de cortocircuito que pueden presentarse en 3 son mayores que las que podría haber en 2.

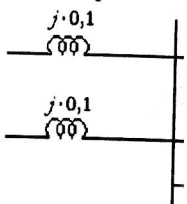
Basta comprobar para demostrarlo que, en el caso de un cortocircuito en las cercanías del interruptor 2 de cualquiera de las dos líneas, la corriente de cortocircuito que llegaría hasta ellos sería la de los generadores más la de los motores, pero la de estos últimos llegaría a través de una línea y no a través de dos como en el caso de un cortocircuito en el punto D. Al llegar a través de una línea, la reactancia del camino será el doble que la de dos líneas en paralelo de igual reactancia, por lo que la corriente, inversamente proporcional a ella, sería la mitad.

De hecho, I  
ruptura con las  
cálculo de los di

La figura s  
cortocircuito en



El esquema ar



Para encontrar  
ahora:

$$Z_{cc} = (0,1 \cdot j) \parallel [0,05 j]$$

$$= [0,05 j] \parallel [0,2 j]$$

sustituyendo:

$$S_{cc} = \frac{15}{0,04356} = 344,37 \text{ MVA}$$

$$I_{ch} = 15,86 \text{ kA}$$

Para encontrar  
las reactancias de l  
de los motores sínc

De hecho, podemos calcular la corriente transitoria de desconexión y el poder de ruptura con las corrientes del punto D y, considerar después, los mismos valores, en el cálculo de los disyuntores a situar en el punto 3.

La figura siguiente nos muestra el esquema equivalente de reactancias para el cortocircuito en el punto D:

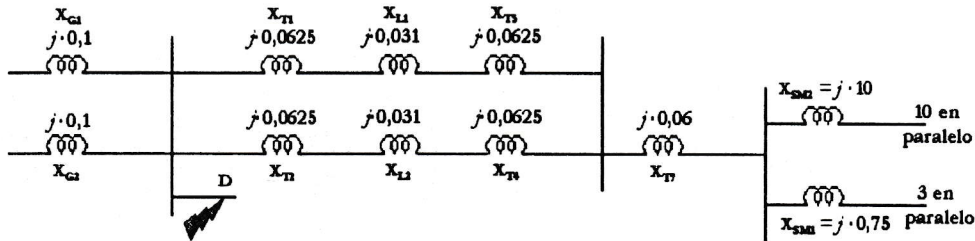


Figura 3.20

El esquema anterior puede ser simplificado con lo visto hasta el momento, quedando:

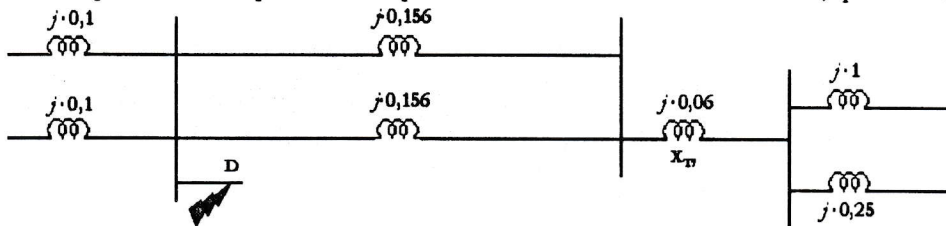


Figura 3.21

Para encontrar la reactancia equivalente  $X_{cc}$  en el punto D, procedemos como hasta ahora:

$$\begin{aligned} Z_{cc} &= (0,1 \cdot j \parallel 0,1 \cdot j) \parallel (((0,156 \cdot j) \parallel (0,156 \cdot j)) + 0,06 \cdot j + (j \parallel j \cdot 0,25)) = \\ &= [0,05 j] \parallel \left[ 0,078 \cdot j + 0,06 \cdot j + \left( \frac{j \cdot j \cdot 0,25}{j + j \cdot 0,25} \right) \right] = \\ &= [0,05 j] \parallel [0,078 \cdot j + 0,06 \cdot j + 0,2 \cdot j] = \frac{0,05 \cdot j \cdot j \cdot 0,338}{0,05 \cdot j + j \cdot 0,338} = 0,04356 \cdot j \end{aligned}$$

sustituyendo:

$$S_{cc} = \frac{15}{0,04356} = 344,35 \text{ MVA}; I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{344,35}{\sqrt{3} \cdot 6} = 33,135 \text{ kA}$$

$$I_{ch} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot x = \sqrt{2} \cdot 33,135 \cdot 1,6 = 74,98 \text{ kA}$$

Para encontrar la reactancia equivalente  $X_r$  en el punto D, sustituiremos el paralelo de las reactancias de los motores en el esquema de la figura 3.21, por la reactancia transitoria de los motores síncronos, quedando el resto igual, por lo que:

$$\begin{aligned} Z_r &= [0,1 \cdot j \parallel 0,1 \cdot j] \parallel \left[ ((0,156 \cdot j) \parallel (0,156 \cdot j)) + 0,06 \cdot j + j \cdot \frac{1,125}{3} \right] = \\ &= [0,05 j] \parallel [0,078 \cdot j + 0,06 \cdot j + j \cdot 0,375] = \\ &= [0,05 j] \parallel [0,513 \cdot j] = \frac{0,05 \cdot j \cdot j \cdot 0,513}{0,05 \cdot j + j \cdot 0,513} = 0,0456 \cdot j \end{aligned}$$

y:

$$S_r = \frac{15}{0,0456} = 328,95 \text{ MVA}; I_d = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{328,95}{\sqrt{3} \cdot 6} = 31,653 \text{ kA}$$

$$\frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{344,35}{30} = 11,478 \Rightarrow \mu_d \approx 0,35 \Rightarrow I_p = 0,35 \cdot 31,653 = 11,08 \text{ kA}$$

Con lo visto, ya se podrían establecer las características **mínimas** que debería tener, por ejemplo, el disyuntor a colocar en el punto D y que, básicamente, serían las siguientes:

- Tensión de servicio de 6 kV.
- Corriente nominal de 76,98 A.
- Poder de ruptura de 328,95 MVA.
- Corriente de conexión de 74,98 kA.
- Corriente de desconexión de 31,653 kA.

Sería cuestión, pues, de consultar el catálogo de alguna casa comercial y elegir un disyuntor que cumpla con los datos anteriores (obviamente, no habrá ninguno que las cumpla exactamente, por lo que deberemos coger uno que las cumpla en exceso). Otro aspecto que habrá que elegir, dependiendo del tipo de instalación, coste, etc, es la clase: neumático, magnético, pequeño volumen de aceite,..., pero éste no es el objetivo de este texto.

**SUPUESTO 3.**  
**REACTANCIA**

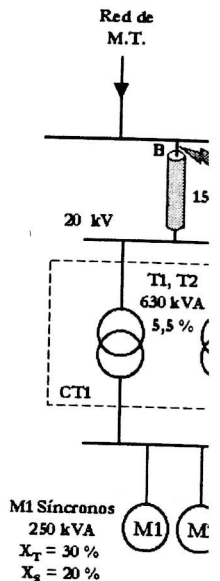
► En el esquema pequeña esa base, conjunto en el supuesto en cuenta

a) La r transfo

b) Se con transfo

c) La con equival

Nota: D resisten



Lo planteado e dudas que se plante

**SUPUESTO 3.5: ESTUDIO DEL CORTOCIRCUITO EN ZONA CON CONEXIÓN A RED DE REACTANCIA TOTAL DESCONOCIDA.**

► En el esquema de la figura 3.22 se observa que una red de media tensión y una pequeña minicentral autogeneradora de 5 MVA, y reactancia del 10 % respecto de esa base, abastecen a tres centros de transformación que a su vez alimentan a un conjunto de fábricas en un polígono. Determinar todas las magnitudes estudiadas en el supuesto anterior para un cortocircuito posible en los puntos A y B, teniendo en cuenta los casos siguientes:

- La red de media tensión tiene una potencia muy superior a la de los transformadores.
- Se conoce que el poder de ruptura del interruptor colocado aguas arriba de los transformadores del CT1 es de 250 MVA.
- La compañía eléctrica nos ha facilitado el dato de la potencia de cortocircuito equivalente de la red de media tensión, indicando que es 500 MVA.

Nota: Despreciar las impedancias de barras y otros elementos, así como la resistencia de las líneas.

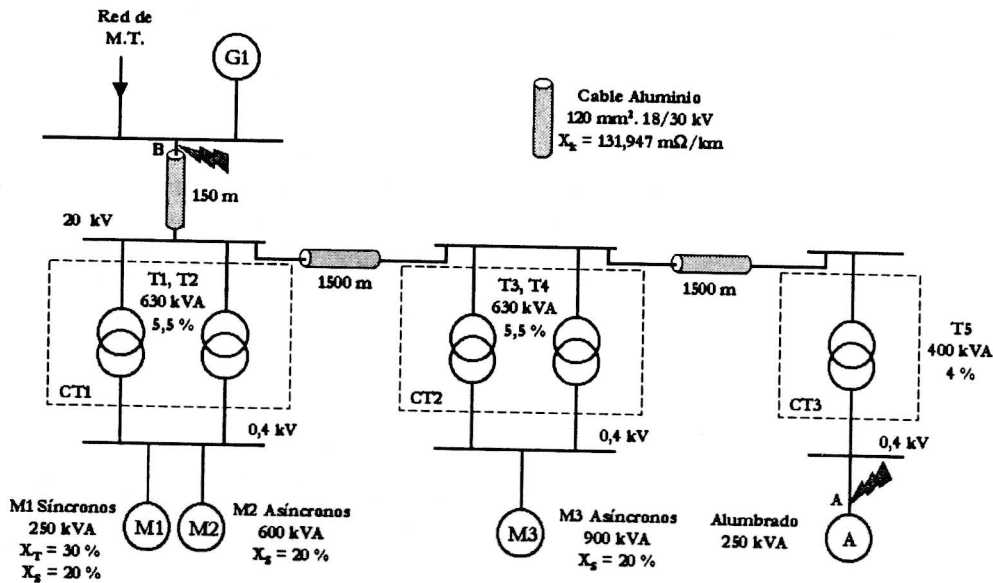


Figura 3.22

Lo planteado en este supuesto como apartados a), b) y c), es una de las más típicas dudas que se plantean cuando se aborda el tema del cálculo de corrientes de cortocircuito.

Así, en la mayoría de las instalaciones eléctricas conectadas a la red de suministro que se realizan hoy en día, nos encontramos con el desconocimiento de la reactancia total de la red hasta el punto de conexión.

Ello conduce a errores en el cálculo de las protecciones de nuestra instalación que, si tenemos en cuenta uno de los (debería serlo) principios fundamentales del cálculo y diseño de instalaciones eléctricas (ante la duda, decantar la decisión del lado de la seguridad), se traducirá en colocar protecciones con un nivel de prestación superior al necesario, con el sobrecoste económico que ello motiva.

Si bien, hoy día esta situación ya no es un problema tan grave (la mayoría de los fabricantes diseñan protecciones con poderes de corte muy elevados, estableciendo grandes saltos entre los poderes de corte de una protección y la que le sigue en su catálogo), sí que en ocasiones, un cálculo más riguroso, nos permitiría ahorrar en la protección sin menoscabo de la seguridad que la misma ha de proporcionar a la instalación y a los usuarios y bienes conectados a la misma.

El apartado c) es lo que en la mayoría de ocasiones ha de hacerse: solicitar el dato de la potencia de cortocircuito que la compañía eléctrica tiene en el punto de conexión. El presente ejercicio se realizará con la potencia de 500 MVA.

Una vez obtenido este dato, se supone que la red se comporta como un generador más con potencia igual a la potencia de cortocircuito proporcionada, y con reactancia, referida a dicha potencia, unidad.

En base a ello, es una práctica acertada, que simplifica notablemente los cálculos, considerar o referir todas las reactancias a la potencia anterior, es decir, tomar la potencia de cortocircuito como potencia base en la conversión a magnitudes unitarias.

En el caso del apartado a), es decir, cuando la red tiene una potencia muy superior en relación a la del transformador, podemos considerar que dicha potencia es prácticamente infinita, con lo que la reactancia de la red (inversamente proporcional a la potencia) será prácticamente cero. Esta consideración está del lado de la seguridad, al estar trabajando con corrientes de cortocircuito superiores a las que, en la práctica, se presentarán. En este caso, suponemos que la tensión en el lado del primario del transformador se mantiene relativamente constante, cuando en el secundario tenga lugar un cortocircuito.

La aproximación anterior es válida cuando la potencia de la red sea muy elevada en relación a la del transformador que alimenta a la instalación, dado que de no serlo, se sobredimensionarían en exceso las protecciones de ésta.

El apartado b) por último, es más difícil de concretar, dado que conocer la capacidad de ruptura del interruptor situado aguas arriba del transformador resulta, en ocasiones, complicado.

Es más, debemos tener la seguridad de que fue diseñado correctamente, ya que de no estarlo podría inducirnos a colocar las protecciones con valores de corte inferiores a los necesarios con el riesgo que ello supone, o superiores, con el sobrecoste que originaría.

Cuando se acepta esta aproximación, se puede admitir que la reactancia unitaria total de la red, en relación a la potencia de ruptura nominal del interruptor, es 1. De la misma forma

que explicamos pá la potencia aparent la base indicada.

Así pues, en el cortocircuito se ten barra de 20 kV que

En el segundo c la corriente de corto

donde se ha consid distintos transforma red es todo lo exis potencia base, la po

Realizaremos cc el más recomendabl

La compañía sui cortocircuito de la n

Tal y como se h lo que la reactancia

Las tensiones : nominales de trans conectados.

Con ello, podría dividirse el sistema (

Generador:

Transformadores

que explicamos párrafos atrás, convendría adoptar como potencia base de todo el sistema, la potencia aparente del transformador, reduciendo el valor de la reactancia total de la red a la base indicada.

Así pues, en el primer caso (red de potencia infinita), para el cálculo de la corriente de cortocircuito se tendría que  $X_{red} = 0 \Omega$ . Considerando que la red de MT comienza justo en la barra de 20 kV que alimenta a los distintos centros.

En el segundo caso (interruptor con poder de ruptura de 250 MVA), para el cálculo de la corriente de cortocircuito se tendría que:

$$X_{red pu} = \frac{1 \cdot 2,920}{250} = 0,01168$$

donde se ha considerado como potencia nominal del transformador, la suma de las de los distintos transformadores que "cuelgan" de la barra de 20 kV, y donde se ha supuesto que la red es todo lo existente hasta dicha barra. El resto del problema se haría tomando como potencia base, la potencia anterior.

Realizaremos completo, a continuación, el tercero de los apartados planteados, por ser el más recomendable en la práctica.

La compañía suministradora, propietaria de la red, nos ha informado que la potencia de cortocircuito de la misma es de 500 MVA.

Tal y como se ha dicho, tomaremos esta potencia como potencia base del sistema, con lo que la reactancia de la red en pu será 1.

$$S_B = 500 \text{ MVA}$$

Las tensiones se mantienen al tener los transformadores las mismas relaciones nominales de transformación que las que establecen las barras entre las que están conectados.

Con ello, podrían calcularse ya las impedancias en pu para las dos zonas en que debería dividirse el sistema (20 kV y 0,4 kV), empleando las ecuaciones conocidas del Anexo III.

Generador:

$$Z_{Gpu} |_{BN} = \frac{10}{100} \cdot j \cdot \frac{500}{5} = 10 \cdot j$$

Transformadores T1 a T4:

$$Z_{Tpu} |_{BN} = \frac{5,5}{100} \cdot j \cdot \frac{500}{0,63} = 43,651 \cdot j$$

Transformador T5:

$$Z_{Tpu}|_{BN} = \frac{4}{100} \cdot j \cdot \frac{500}{0,4} = 50 \cdot j$$

Línea de 150 m:

$$Z_{L1pu}|_{BN} = (j \cdot 131,947 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,15 \cdot \frac{500}{20^2} = 0,02475 \cdot j$$

Líneas de 1500 m:

$$Z_{L2pu}|_{BN} = (j \cdot 131,947 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,5 \cdot \frac{500}{20^2} = 0,2475 \cdot j$$

Motores M1:

$$Z_{TM1pu}|_{BN} = \frac{30}{100} \cdot j \cdot \frac{500}{0,25} = 600 \cdot j$$

$$Z_{SM1pu}|_{BN} = \frac{20}{100} \cdot j \cdot \frac{500}{0,25} = 400 \cdot j$$

Motores M2:

$$Z_{SM2pu}|_{BN} = \frac{20}{100} \cdot j \cdot \frac{500}{0,6} = 166,67 \cdot j$$

Motores M3:

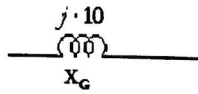
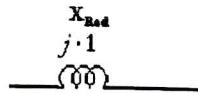
$$Z_{SM3pu}|_{BN} = \frac{20}{100} \cdot j \cdot \frac{500}{0,9} = 111,11 \cdot j$$

con la nomenclatura ya expuesta en ejercicios anteriores.

El diagrama de reactancias en pu obtenido se muestra en la figura 3.23.

- Cortocircuito en el punto A.

La impedancia equivalente hasta el punto de cortocircuito (A), es:



Para encontrar supuesto anterior:

$$Z_{cc} = \left\{ \left[ \left( (1 \cdot j) \right) \right] \right\}$$

Para encontrar subtransitorias de la reactancia transitoria:

$$Z_r = \left\{ \left( (1 \cdot j) \right) \right\}$$

Sustituyendo en l

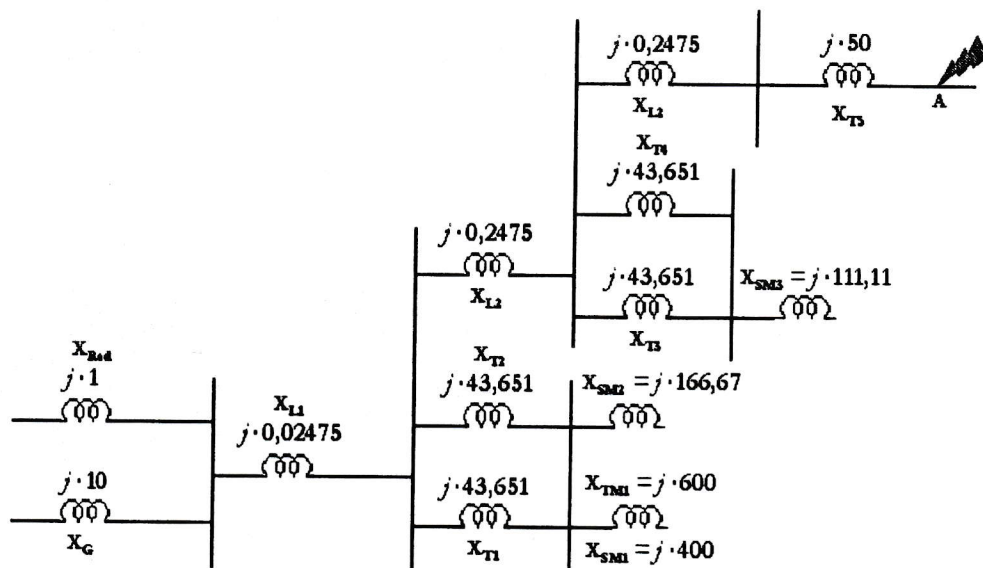


Figura 3.23

Para encontrar la reactancia equivalente  $X_{cc}$  en el punto A, procedemos como en el supuesto anterior:

$$Z_{cc} = \left\{ \left[ \left( (1 \cdot j \parallel 10 \cdot j) + (0,02475 \cdot j) \right) \parallel \left( (400 \cdot j \parallel (166,67 \cdot j)) \right) \right] \parallel \left( (43,651 \cdot j \parallel j \cdot 43,651) \right) \right] \parallel \left( (43,651 \cdot j \parallel 43,651 \cdot j) + 111,1111 \cdot j \right) \right\} + (0,2475 \cdot j + 50 \cdot j)$$

Para encontrar la reactancia equivalente  $X_r$  en el punto A, eliminamos las reactancias subtransitorias de los motores en el esquema de la figura 3.23, quedando únicamente la reactancia transitoria de los motores síncronos. El resto no sufre modificación.

$$Z_r = \left( (1 \cdot j \parallel 10 \cdot j) + (0,02475 \cdot j) \right) \parallel \left( (600 \cdot j) \parallel (43,651 \cdot j \parallel j \cdot 43,651) \right) + 0,2475 \cdot j + 0,2475 \cdot j + 50 \cdot j$$

Sustituyendo en las expresiones anteriores:

$$Z_{cc} = \left\{ \left[ \left( \frac{j \cdot j \cdot 10}{j + j \cdot 10} + 0,02475 \cdot j \right) \parallel \left[ \left( \frac{400 \cdot j \cdot j \cdot 166,67}{400 \cdot j + j \cdot 166,67} \right) + \left( \frac{43,651 \cdot j}{2} \right) \right] \right] + \right. \\ \left. + (0,2475 \cdot j) \right. \\ \left. \parallel \left( \frac{43,651 \cdot j}{2} + 111,1111 \cdot j \right) \right. \\ \left. + (50,2475 \cdot j) \right\} + \\ = \left\{ \left[ \frac{0,93384 \cdot j \cdot j \cdot 139,474}{0,93384 \cdot j + j \cdot 139,474} + 0,2475 \cdot j \right] \parallel j \cdot 132,9366 \right\} + 50,2475 \cdot j = \\ = 51,412 \cdot j$$

con lo que:

$$S_{cc} = \frac{500}{51,412} = 9,725 \text{ MVA}; I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{9,725}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 14,037 \text{ kA}$$

$$I_{ch} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot x = \sqrt{2} \cdot 14,037 \cdot 1,25 = 24,815 \text{ kA}$$

y:

$$Z_r = \frac{0,9338 \cdot j \cdot j \cdot 621,8255}{0,9338 \cdot j + j \cdot 621,8255} + 50,495 \cdot j = 51,427 \cdot j$$

Los valores del poder de ruptura y de la corriente de desconexión son:

$$S_r = \frac{500}{51,427} = 9,7225 \text{ MVA}; I_d = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{9,7225}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 14,033 \text{ kA}$$

prácticamente iguales a los de choque, ya que las reactancias son similares.

• Cortocircuito en el punto B.

La impedancia equivalente hasta el punto de cortocircuito (B), se calcula desde el diagrama de la figura 3.24.

Para encontrar la reactancia equivalente  $X_{cc}$  en el punto B, bastará con resolver el paralelo de las reactancias de la red y de la minicentral. En ocasiones, como se verá en supuestos posteriores, es necesario determinar la corriente de cortocircuito mínima a lo

largo de un cable.  
valor  $Z_{L1} = 0,02475$

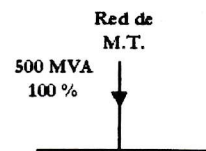
Una vez realiz

con lo que:

$$S_{cc} = \frac{500}{0,909091}$$

$$I_{ch} =$$

Para hallar los  
desconexión, debe  
figura 3.25 se mues



Para calcular la  
la expresión (3.2):

con lo que:

largo de un cable. En este caso, para hallarla bastaría con incluir la reactancia del cable, de valor  $Z_{L1} = 0,02475 \cdot j$ .

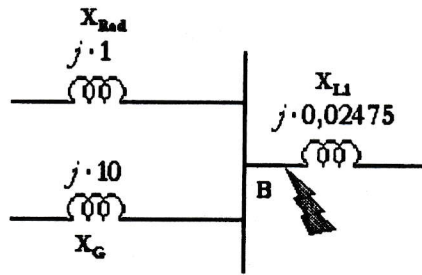


Figura 3.24

Una vez realizado el paralelo de las reactancias de la red y de la minicentral, se tiene:

$$Z_{cc} = \frac{j \cdot j \cdot 10}{j + j \cdot 10} = 0,909091 \cdot j$$

con lo que:

$$S_{cc} = \frac{500}{0,909091} \approx 550 \text{ MVA}; I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{550}{\sqrt{3} \cdot 20} = 15,877 \text{ kA}$$

$$I_{ch} = \sqrt{2} \cdot I_{cc} \cdot x = \sqrt{2} \cdot 15,877 \cdot 1,6 = 35,926 \text{ kA}$$

Para hallar los valores de la potencia de ruptura y de la corriente transitoria de desconexión, debemos encontrar el generador equivalente de la red de media tensión. En la figura 3.25 se muestra la equivalencia.

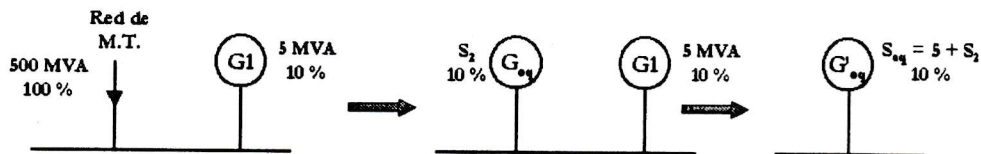


Figura 3.25

Para calcular la potencia aparente equivalente del conjunto red-minicentral, aplicamos la expresión (3.2):

$$S_2 = \frac{500}{100} \cdot 10 = 50$$

con lo que:

$$S_{eq} = 50 + 5 = 55 \text{ MVA}$$

Es decir, la red y la minicentral equivalen a un generador cuya potencia aparente fuese 55 MVA y cuya reactancia, referida a esa base, fuese del 10 %.

Entonces:

$$S_{cc} = \frac{S_n}{X} = \frac{55}{0,1} = 550 ; \frac{S_{cc}}{S_n} = \frac{550}{55} = 10 \Rightarrow \mu \approx 0,72$$

$$S_r = \mu \cdot S_{cc} = 0,72 \cdot 550 = 396 \text{ MVA} ; I_d = \mu \cdot I_{cc} = 0,72 \cdot 15,877 = 11,43 \text{ kA}$$

Por último, en el caso de querer determinar la corriente de cortocircuito mínima a lo largo del cable de 150 metros, bastará con sumar a la reactancia de cortocircuito anterior la de éste, dado que la mínima corriente de cortocircuito tendrá lugar, obviamente, al final del mismo (la impedancia es mayor y la corriente es inversamente proporcional a ella)

Así:

$$Z'_{cc} = 0,90909 \cdot j + 0,02475 \cdot j = 0,93384 \cdot j$$

y:

$$S_{cc} = \frac{500}{0,93384} = 535,424 \text{ MVA} ; I_{cc \text{ min}} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{535,424}{\sqrt{3} \cdot 20} = 15,456 \text{ kA}$$

**SUPUESTO 3.6:**

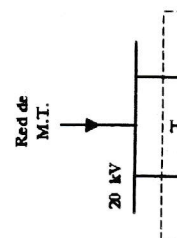
► En el esquema de potencia a tensión de colocados choque, en

a) Con un

b) Con dos salidas.

c) Con tres

Nota: Consulte Anexo 1. Considere el aporte a



• CASO a): Con

• Interruptor II.

En este caso no se considera el aporte de todo el sistema

Aplicaremos las

**SUPUESTO 3.6: ESTUDIO DEL CORTOCIRCUITO EN REDES DE BAJA TENSIÓN.**

► En el esquema de la figura 3.26 se observa que una red de media tensión de potencia de cortocircuito infinita, alimenta a  $n$  transformadores de 800 kVA, con tensión de cortocircuito del 5%, cada uno. Determinar para los puntos donde están colocados los interruptores I1, I2 e I3, la corriente eficaz de cortocircuito de choque, en los casos siguientes:

- Con un transformador y un circuito de salida.
- Con dos transformadores idénticos dispuestos en paralelo y dos circuitos de salida.
- Con  $n$  transformadores idénticos dispuestos en paralelo y  $n$  circuitos de salida.

Nota: Considerar las resistencias y reactancias mostradas en la tabla A3.2 del Anexo III, aceptando la temperatura de 80 °C a la que vienen establecidas. Considérese, para los transformadores, que  $Z_s \approx X_s$ , y despréciase el posible aporte de los motores de la fábrica al cortocircuito.

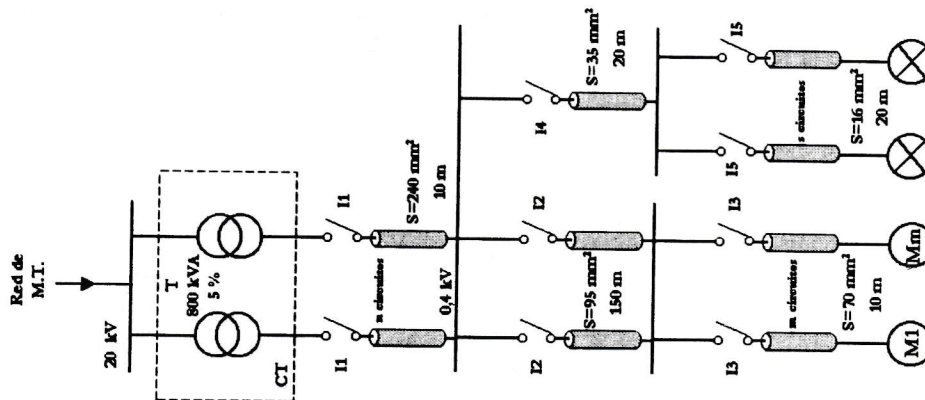


Figura 3.26

- CASO a): Con un transformador y un circuito de salida.

- Interruptor I1.

En este caso no es necesaria la conversión de impedancias a magnitudes unitarias, dado que todo el sistema analizado se encuentra en un mismo nivel de tensión.

Aplicaremos las ecuaciones (A3.11) a (A3.13) del Anexo III.

Al considerar la red de media tensión de potencia de cortocircuito infinita, estamos considerando que la tensión en el lado del primario del transformador se mantiene constante cuando tiene lugar un cortocircuito en el secundario, por lo que la corriente quedará limitada por la impedancia del transformador únicamente.

Para determinar dicha impedancia, aplicaremos la expresión (A3.11) del Anexo III, con lo que resulta:

$$Z_s = \frac{u_{cc} \cdot V_{2n}^2}{S_n \cdot 100} = \frac{5 \cdot 400^2}{800 \cdot 100} = 10 \text{ m}\Omega$$

Lo habitual es determinar los valores de  $X_s$  y de  $R_s$ , para lo cual necesitaríamos en este caso, o bien  $u_{cX}$  (%) o bien  $u_{cR}$  (%). No obstante, en este supuesto se ha indicado que se considere  $Z_s \approx X_s$ , por lo que:

$$X_s = 10 \text{ m}\Omega ; R_s = 0 \text{ m}\Omega$$

El error cometido en la aproximación anterior no es significativo como para afectar a la elección final del dispositivo de protección, por varias razones: los poderes de corte normalizados (catalogados en amplios escalones), el hecho de que se ha considerado infinita la potencia de cortocircuito de la red de media tensión, el hecho de que habitualmente la reactancia equivalente del transformador es muy superior a la resistencia equivalente, ...

Desde las expresiones (A3.12):

$$I_n = \frac{800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1,1547 \text{ kA} ; I_{ccl} = \frac{1,1547}{5} \cdot 100 = 23,094 \text{ kA}$$

Tras consultar el catálogo de ABB Electrocomponentes<sup>3</sup>, podría optarse por un ISOMAX S7, con poder de corte de servicio en cortocircuito ( $I_{cs}$ ) asignado superior a los 23,1 kA calculados. Dentro de las opciones con las que nos encontramos en el catálogo, están los interruptores de 1250 A y de 1600 A de intensidad nominal.

Estos interruptores se presentan con un poder asignado de corte último en cortocircuito ( $I_{cu}$ ), de 50, 65 y 100 kA, con lo que podríamos elegir el de 50 (llamado S7S), y elegir una  $I_{cs}$  del 100 % de la  $I_{cu}$ .

Hay otras opciones posibles, pero se ha intentado aquí ofrecer una para informar sobre la forma de consultar un catálogo una vez realizados los cálculos. Serán las características propias de la instalación, la situación o ubicación del interruptor, el coste, etc, lo que decidirá el modelo óptimo final a elegir, que no ha de ser, necesariamente, el inmediatamente superior al que establecen los cálculos.

<sup>3</sup> En el Anexo III el lector podrá encontrar la tabla identificativa de este interruptor, tal y como aparece en el catálogo de ABB Electrocomponentes S.A., de Enero de 2003. Cortesía de ABB Electrocomponentes S.A., ahora Automation Products, S.A. División Baja Tensión.

• Interruptor

En este caso del cable de 10 m

Además, hab delante, o el situ

No obstante, motores al corto suponemos abie procedería del m

La figura sigu

En base a ello,

y, según (A3.13):

$$I_{cc} =$$

En este caso p  $I_{cu}=35 \text{ kA}$ , siempre  $I_{cs}=75 \% I_{cu}$ , que s donde va colocado inferior a los 35 kA

• Interruptor I3

En este caso ha del cable de 10 m impedancia de las 0,4 kV.

- Interruptor I2.

En este caso hay que sumar a la impedancia de la fuente de alimentación, la impedancia del cable de 10 metros que une la fuente con el embarrado de 0,4 kV primero.

Además, habría que determinar cuál punto es más desfavorable, si el situado justo por delante, o el situado por detrás de la posición que ocupa el interruptor I2.

No obstante, en este supuesto se ha indicado que se desprecie el posible aporte de los motores al cortocircuito, por lo que, la situación más desfavorable es aquella en la que suponemos abierto el interruptor I2 de la otra línea. De tener que considerarlos, se procedería del mismo modo a lo explicado en supuestos anteriores.

La figura siguiente nos muestra el camino para obtener la impedancia equivalente:

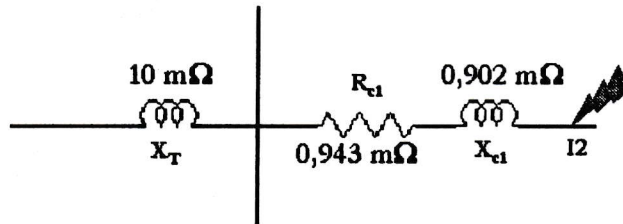


Figura 3.27

En base a ello, la impedancia a sumar es, de acuerdo con la tabla A3.2 del Anexo III:

$$X_{c1} = 0,0902 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,01 \text{ km} = 0,902 \text{ m}\Omega$$

$$R_{c1} = 0,0943 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,01 \text{ km} = 0,943 \text{ m}\Omega$$

y, según (A3.13):

$$I_{cc} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \left( \sqrt{(0,943 + 0)^2 + (0,902 + 10)^2} \right)} = 21,104 \text{ kA}$$

En este caso podría elegirse un interruptor de la serie SXN, por ejemplo el S2N, con  $I_{cu}=35 \text{ kA}$ , siempre que la intensidad nominal de la línea fuese menor o igual a 160 A, y con  $I_{cs}=75 \% I_{cu}$ , que sería superior a los, aproximadamente, 21 kA de cortocircuito en el punto donde va colocado. Quedaría por comprobar que la corriente máxima de cortocircuito fuese inferior a los 35 kA, lo que dependería del coeficiente  $x$  del interruptor empleado.

- Interruptor I3.

En este caso hay que sumar a la impedancia de la fuente de alimentación, la impedancia del cable de 10 metros que une la fuente con el embarrado de 0,4 kV primero, y la impedancia de las líneas de 150 metros que unen el embarrado anterior con el segundo de 0,4 kV.

El diagrama de impedancias equivalente será:

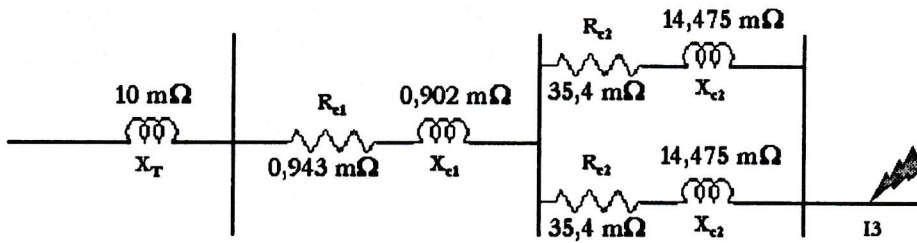


Figura 3.28

En base a ello, la impedancia de cada línea es:

$$X_{e2} = 0,0965 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,15 \text{ km} = 14,475 \text{ m}\Omega$$

$$R_{c2} = 0,236 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,15 \text{ km} = 35,4 \text{ m}\Omega$$

y, según (A3.13):

$$I_{cc} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{35,4}{2} + 0,943 + 0 \right)^2 + \left( \frac{14,475}{2} + 0,902 + 10 \right)^2} \right)} = 8,878 \text{ kA}$$

Podría elegirse prácticamente cualquier interruptor, dado que en la actualidad los poderes de corte se han visto notablemente incrementados, estando los mínimos poderes de corte entre los 4,5 kA y 6 kA, dependiendo de la casa comercial.

Suele ser interesante determinar la corriente de cortocircuito mínima a lo largo del cable para, entre otras cosas, elegir el tipo de curva, la selectividad de las protecciones, etc.

Para el circuito que nos ocupa, habría que calcular la impedancia del circuito de 10 metros y sección 70 mm<sup>2</sup> que enlaza el embarrado de 0,4 kV con cada motor.

De acuerdo con la tabla A3.2 del Anexo III y con la longitud de 0,01 km del circuito:

$$X_{c3} = 0,0975 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,01 \text{ km} = 0,975 \text{ m}\Omega$$

$$R_{c3} = 0,328 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,01 \text{ km} = 3,28 \text{ m}\Omega$$

y, una vez más:

$$I_{cc} = -$$

En este supuesto demostrar que el obstante, se han calculado su inclusión en debiendo proceder

• CASO b): Cc salida.

• Interruptor I

En este caso de cortocircuito en camino inferior e calculada en el apartado cortocircuito ya c

• Interruptor II

En este caso alimentación, en l igual impedancia, ellas, con lo que l doble (de la que se

o, de otra forma:

$$I_{cc} = -$$

desde el diagrama

$$I_{cc} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \left( \sqrt{(3,28 + 18,643)^2 + (0,975 + 18,1395)^2} \right)} = 7,94 \text{ kA}$$

En este supuesto nos hemos centrado en el estudio de instalaciones de baja tensión, para demostrar que el cálculo de las corrientes de cortocircuito se simplifica notablemente. No obstante, se han despreciado posibles aportes de los motores al punto del cortocircuito, y no se han calculado el resto de magnitudes típicas del estudio del cortocircuito. En todo caso, su inclusión en el supuesto no supondría modificaciones conceptuales significativas, debiendo proceder según lo explicado en ejercicios anteriores.

- *CASO b): Con dos transformadores idénticos dispuestos en paralelo y dos circuitos de salida.*

- Interruptor I1.

En este caso el interruptor “vería llegar”, tanto por arriba como por abajo, la corriente de cortocircuito equivalente a un único transformador (no exactamente, puesto que por el camino inferior encontraría la impedancia de los cables de 240 mm<sup>2</sup> y sería algo menor) calculada en el apartado a), por lo que debería dimensionarse para una vez la corriente de cortocircuito ya calculada, al ser la situación más desfavorable posible.

$$I_{cc} = 23,094 \text{ kA}$$

- Interruptor I2.

En este caso el interruptor “vería llegar” la corriente procedente de dos fuentes de alimentación, en lugar de una. Dicho de otra forma, al haber dos fuentes (y dos líneas) de igual impedancia, el paralelo de las dos provoca una impedancia mitad de la de una de ellas, con lo que la corriente será el doble. Por eso, la corriente de cortocircuito toma valor doble (de la que se tendría si hubiese un único transformador), siendo pues:

$$I_{cc} = 2 \cdot 21,104 \text{ kA} = 42,208 \text{ kA}$$

o, de otra forma:

$$I_{cc} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{0,943}{2} + \frac{0}{2} \right)^2 + \left( \frac{0,902}{2} + \frac{10}{2} \right)^2} \right)} = 42,208 \text{ kA}$$

desde el diagrama equivalente siguiente:

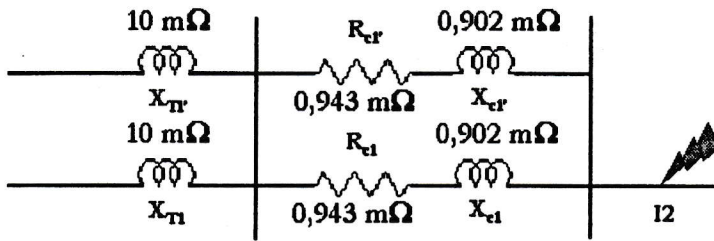


Figura 3.29

• Interruptor I3.

Este apartado es ya inminente, pues simplemente hay que añadir al esquema de la figura 3.29 la última parte del 3.28, esto es, las impedancias del cable de 95 mm<sup>2</sup>, y proceder según lo explicado, resultando:

$$I_{cc} = 10,42 \text{ kA}$$

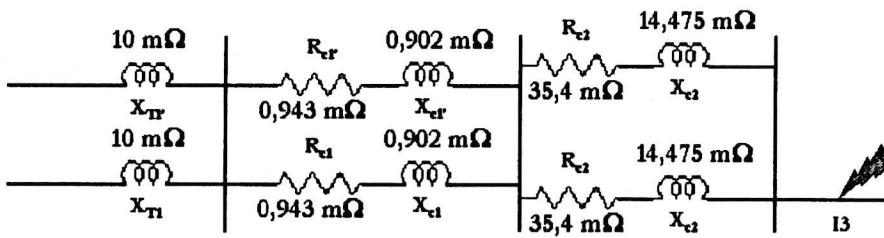


Figura 3.30

• CASO c): Con n transformadores idénticos dispuestos en paralelo y n circuitos de salida.

Con la resolución del caso b), podemos ya plantear las ecuaciones que rigen el estudio de este tipo de problemas, extrapolando los resultados al caso de "n" transformadores dispuestos en paralelo con otros tantos circuitos de salida.

En el Anexo III figuran las expresiones (A3.14) necesarias para el cálculo. Estas ecuaciones suponen que la impedancia de unión entre el interruptor de salida del transformador y el embarrado de 0,4 kV es nula.

La expresión que proporciona el valor de la corriente de cortocircuito en puntos alejados del transformador puede provocar errores (sobredimensionamientos) en instalaciones muy malladas o con presencia de motores, por lo que en esos casos, resulta más apropiado realizar el proceso de agrupación de impedancias desarrollado en los supuestos precedentes. El interruptor I3 calculado en el caso anterior así lo demuestra, al producirse una corriente eficaz de cortocircuito de 10,42 kA, en lugar del doble de la que tenía lugar cuando había un único transformador que era de 8,875 kA.

SUPUESTO 3.

► Construir la figura supuesta:

1

Al tratarse de mismas y no la adn

Las impedancias existente entre la ii serie serían:

Y<sub>12</sub>

Y<sub>13</sub>

Y<sub>23</sub>

con todos los valore

# FALTAS ASIMÉTRICAS

En las faltas asimétricas, la participación de las tres fases del sistema no es equilibrada. Algunas de estas faltas son la falta fase-tierra, la falta fase-fase, fase-fase-tierra, apertura de un conductor y apertura de dos conductores.

En estas faltas, resulta interesante el cálculo en régimen fasorial del régimen permanente que alcanzan las intensidades de falta, para el calibrado de protecciones o el dimensionado de las puestas a tierra de los elementos, así como del régimen subtransitorio, para la selección de interruptores.

La técnica fundamental para el estudio de los circuitos desequilibrados con los que nos encontramos es la transformación a componentes simétricas. En ellas, una terna de magnitudes del dominio de fases, p.e., tensiones

$$u = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}$$

se transforma en otra terna de secuencias (homopolar, directa e inversa)

$$u_s = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

mediante la relación

$$u = T u_s$$

donde  $T$ , la matriz de Fortescue, viene dada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

siendo  $a = 1 \angle 120^\circ$ .

El paso inverso se realiza con  $u_s = T^{-1}u$ , siendo:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Un elemento trifásico de tipo impedancia viene regido por una ecuación  $U = ZJ$ , que tras pasar tensiones e intensidades a componentes simétricas, nos da una relación  $U_s = Z_s J_s$ , donde la matriz del elemento pasa a ser:

$$Z_s = T^{-1} Z T$$

Las componentes simétricas pueden usarse directamente para el cálculo de la potencia compleja:

$$S = U_a J_a^* + U_b J_b^* + U_c J_c^* = 3U_0 J_0^* + 3U_1 J_1^* + 3U_2 J_2^*$$

Bajo la hipótesis de que las impedancias de un elemento trifásico posean simetría cíclica, está garantizado que su conversión al dominio de las componentes simétricas conduce a un modelo desacoplado en secuencias,  $Z_s$  diagonal, con lo que pasamos a hablar de sus impedancias homopolar,  $Z_0$ , directa,  $Z_1$ , e inversa,  $Z_2$ .

## LÍNEAS

En las líneas sin transposiciones no existe simetría cíclica, por lo que su descripción en el dominio de las componentes simétricas conduce a acoplamientos entre las mismas débiles o moderados, que complican su tratamiento exacto.

Cuando existan transposiciones, o las supongamos porque nos baste con un tratamiento aproximado, tendremos  $Z_0 = Z_p + 2Z_m$ ,  $Z_1 = Z_2 = Z_p - Z_m$ , siendo  $Z_p$  la impedancia propia de la fase de la línea y  $Z_m$  la impedancia mutua entre fases. Cabrá esperar, por tanto, valores de  $Z_0$  mayores que los de  $Z_1 = Z_2$ , que en la práctica conllevará una reactancia  $X_0$  unas 3 veces mayor que las  $X_1 = X_2$ .

## GENERADOR

En secuencia directa se utiliza un modelo con el generador en vacío ( $E_0$ ) y reactancia de secuencia directa igual a la reactancia directa del generador para el período bajo estudio:  $X_d$ ,  $X'_d$  o  $X''_d$ .

En secuencia inversa no se utiliza fuente alguna, y como reactancia se usa la reactancia subtransitoria  $X''_d$ .

En secuencia homopolar, teniendo en cuenta que sólo influyen flujos de dispersión, suele tomarse  $X_0 \approx 0$ . Hay que tener en cuenta la conexión del neutro a tierra  $Z_n$ , que se introduce como una impedancia  $3Z_n$ .

## TRANSFORMADOR

Se trata de un elemento estático en el que  $X_1 = X_2 = X_c$ . Sin embargo, hay que hacer consideraciones especiales para el tratamiento tanto del ángulo del grupo de conexión como de la impedancia para la secuencia homopolar.

La consideración respecto al grupo de conexión se refiere a que el desfase introducido en secuencia inversa es de signo contrario al de secuencia directa.

Por otra parte, en el modelado de la secuencia homopolar debemos tener en cuenta que, para que pueda entrar homopolar en el devanado, es imprescindible que se trate de un devanado en estrella con neutro a tierra, y que los demás devanados (secundario e incluso terciario) permitan la circulación de homopolar, bien estando en estrella con neutro a tierra o bien estando en triángulo. En la Figura 13.1 se muestran algunas configuraciones.

En cuanto a la impedancia homopolar que se deberá considerar en el devanado,  $Z_0$ , tendremos en cuenta que en los transformadores de 3 columnas, al no existir camino de retorno para el flujo homopolar, el valor de  $Z_0$  es muy elevado.

Habrà de tenerse en cuenta, igualmente, que la posible impedancia que existiese entre neutro y tierra deberá incluirse en el modelo con valor triple.

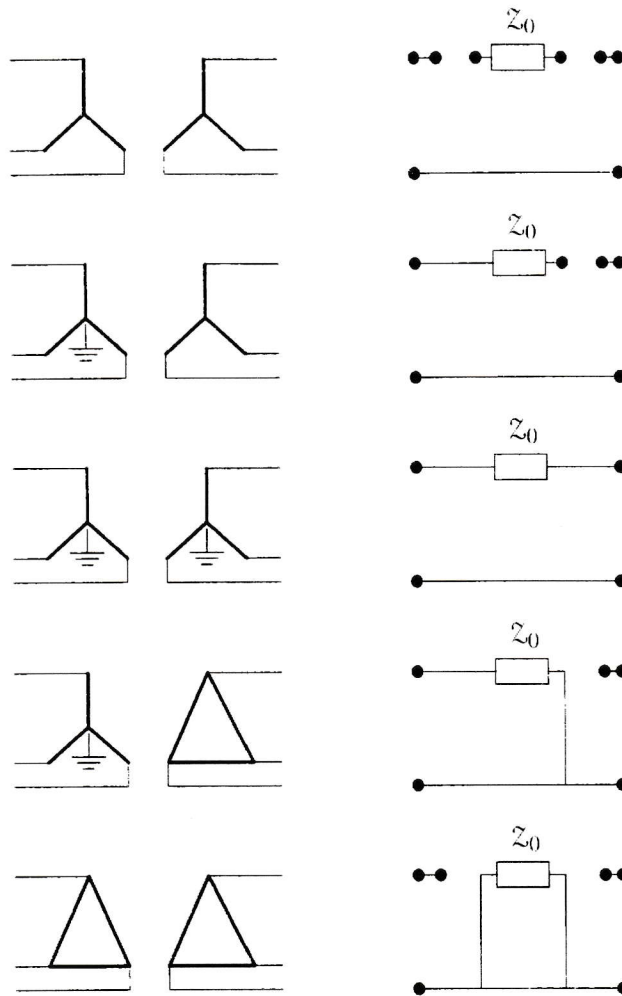


Figura 13.1 Modelo de homopolar de algunos transformadores.

### CARGAS

Como normalmente se considerará el sistema en vacío antes del fallo, no habrá que considerarlas. Pese a ello, si deseásemos modelar una carga como impedancia, consideraremos como iguales directa e inversa,  $Z_1 = Z_2 = Z_c$ . Para la homopolar habrá que tener en cuenta el tipo de conexión de su neutro.

En un sistema de gran dimensión, será necesario disponer de los modelos en las 3 secuencias de los distintos elementos del sistema, conformando de este modo 3 redes de secuencias. A partir de ellas llevaremos a cabo un procedimiento en 4 pasos:

1. A fin de desacoplar cálculos en la medida de lo posible, se deberá encontrar el equivalente Thevenin que cada red de secuencia presente en el punto del fallo, debiendo por tanto satisfacerse la ecuación:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_T^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & Z_T^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & Z_T^{(2)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_{f0} \\ J_{f1} \\ J_{f2} \end{bmatrix} \quad (13.1)$$

donde las tensiones son de fase a tierra y las intensidades circulan desde las redes hacia la falta.

2. Una segunda relación vectorial debe obtenerse de analizar la propia falta. Si disponemos de una matriz de admitancias  $Y_f$  o una matriz de impedancias  $Z_f$  para describirla,  $u = Z_f J_f$ , bastará pasar

las tensiones e intensidades hacia la falta del dominio de las fases al dominio de las componentes simétricas:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = T^{-1} z_f T \begin{bmatrix} J_{f0} \\ J_{f1} \\ J_{f2} \end{bmatrix} \quad (13.2)$$

Las Expresiones (13.1) y (13.2) constituyen 6 ecuaciones con 6 incógnitas que permiten resolver las magnitudes en el punto de la falta.

3. La obtención de cualquier otra magnitud del circuito podrá realizarse desacoplando el efecto de la falta sobre las 3 redes de secuencias, bastando con sustituir en cada secuencia el efecto de la falta por una fuente de intensidad o una fuente de tensión de valores los obtenidos en el paso 2. Hay que tener en cuenta que la sustitución por fuente de intensidad es más conveniente para plantear las ecuaciones nodales de la red de secuencia.

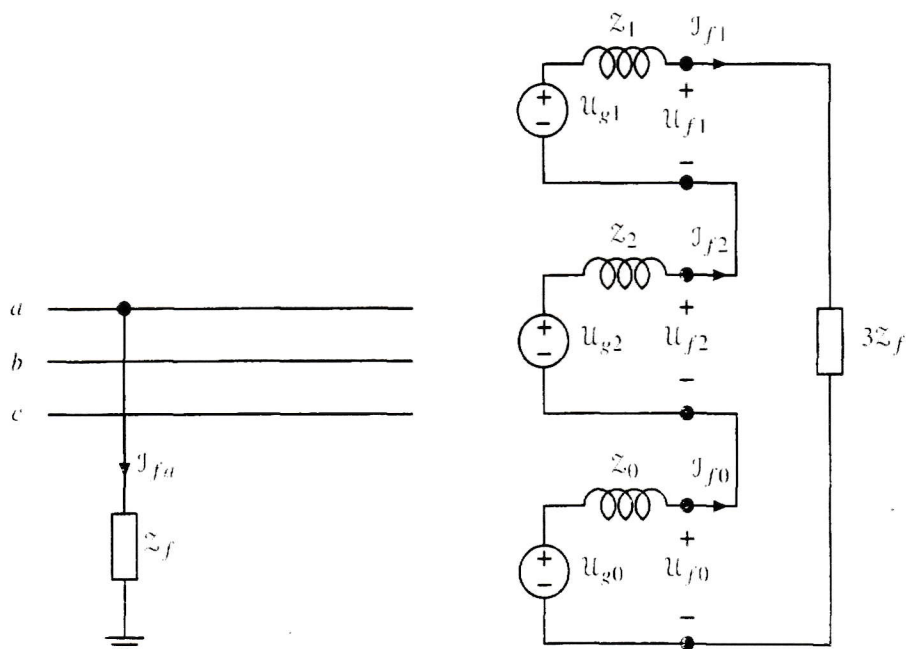
Una vez desacopladas las 3 redes, en lugar de resolver cada circuito en la forma que se ha planteado, podemos aplicar el teorema de compensación (a estos efectos es una aplicación del teorema de sustitución), para calcular los incrementos en un circuito en que la única fuente sea la que modela la falta.

En esta etapa deberá prestarse atención a los desfases introducidos por los transformadores, distintos según la secuencia.

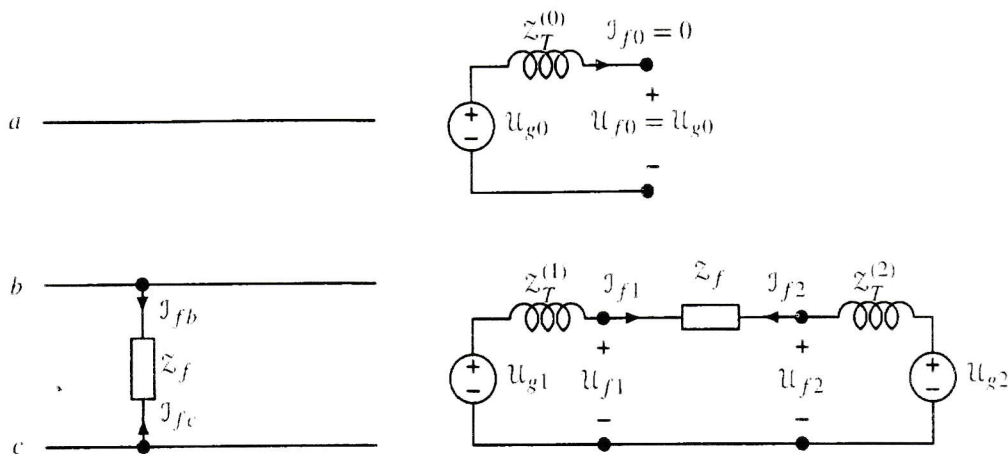
4. Por último, cuando sea necesario, la terna de magnitudes en el dominio de las componentes simétricas deberá trasladarse al dominio de fases.

Existe además una alternativa a la resolución algebraica planteada en el paso 2, que es la de interpretar la Ecuación (13.2) como una interconexión entre las redes de secuencia, las cuales, ya encontramos reducidas a sus equivalentes Thevenin desde el punto de la falta en la Ecuación (13.1).

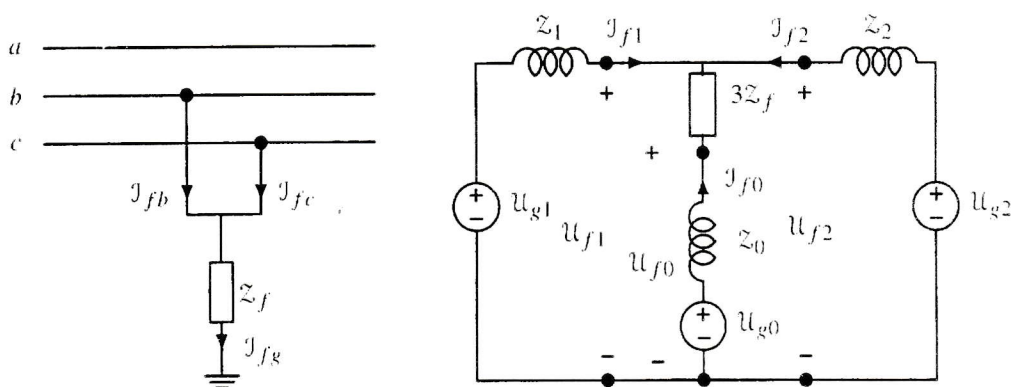
En las Figuras 13.2, 13.3 y 13.4 se muestran dichos esquemas de interconexión para distintos tipos de falta.



**Figura 13.2** Falta fase-tierra en el dominio de fases e interconexión a que da lugar en componentes simétricas.



**Figura 13.3** Falta fase-fase en el dominio de fases e interconexión a que da lugar en componentes simétricas.



**Figura 13.4** Falta fase-fase-tierra en el dominio de fases e interconexión a que da lugar en componentes simétricas.

## PROBLEMAS RESUELTOS

**13.1.** Conocidos los equivalentes Thevenin a las tres secuencias de una red en un determinado nudo, encontrar las ecuaciones de fallo en el dominio de secuencias y su equivalencia como interconexión de circuitos, en las siguientes situaciones:

1. Fallo fase-tierra con impedancia de fallo  $Z_f$ .
2. Fallo fase-fase con impedancia de fallo  $Z_f$ .
3. Fallo fase-fase-tierra con impedancia a tierra  $Z_f$ .

### Resolución

**Fallo fase-tierra con impedancia de fallo  $Z_f$ :** para que este fallo resulte fácil de analizar consideraremos que la fase con fallo es la 'a'. De este modo las ecuaciones del fallo serán:

$$U_a = Z_f J_a \quad J_b = 0 \quad J_c = 0$$

Sustituyendo las magnitudes de fase por sus expresiones en función de magnitudes del dominio de secuencias:

$$\begin{aligned} U_0 + U_1 + U_2 &= Z_f (J_0 + J_1 + J_2) \\ J_0 + a^2 J_1 + a J_2 &= 0 \\ J_0 + a J_1 + a^2 J_2 &= 0 \end{aligned}$$

Restando la tercera ecuación a la segunda:

$$(a^2 - a)J_1 + (a - a^2)J_2 = 0$$

Luego  $J_1 = J_2$ . Usando este resultado en la segunda ecuación:

$$J_0 + (a^2 + a)J_1 = 0$$

Y teniendo en cuenta que  $a^2 + a = -1$ , tenemos  $J_0 = J_1$ .

Sustituyendo en la primera ecuación,  $U_0 + U_1 + U_2 = 3Z_f J_0$ , que junto a  $J_0 = J_1 = J_2$  constituyen las tres ecuaciones del fallo en el dominio de secuencias.

Dichas ecuaciones pueden interpretarse como la interconexión de los 3 circuitos en serie con una impedancia  $3Z_f$ , como se mostró en la Figura 13.2.

**Fallo fase-fase con impedancia de fallo  $Z_f$ :** para facilitar el estudio, consideraremos que el fallo afecta a las fases 'b' y 'c'; así las ecuaciones del fallo serán

$$J_a = 0 \quad J_b + J_c = 0 \quad U_b - U_c = Z_f J_b$$

que expresadas en términos de secuencias queda como:

$$\begin{aligned} J_0 + J_1 + J_2 &= 0 \\ (J_0 + a^2 J_1 + a J_2) + (J_0 + a J_1 + a^2 J_2) &= 0 \\ (U_0 + a^2 U_1 + a U_2) - (U_0 + a U_1 + a^2 U_2) &= Z_f (J_0 + a^2 J_1 + a J_2) \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que  $a^2 + a = -1$  y despejando en la segunda ecuación tenemos  $J_1 + J_2 = 2J_0$ , y sustituyendo en la primera ecuación:  $3J_0 = 0$ , luego:

$$J_0 = 0 \tag{13.3}$$

$$J_1 = -J_2 \tag{13.4}$$

Simplificando la tercera ecuación:

$$(a^2 - a)(U_1 - U_2) = (a^2 - a)Z_f J_1$$

y finalmente  $U_1 - U_2 = Z_f J_1$ , que junto a (13.3) y (13.4) constituyen las tres ecuaciones en el dominio de secuencias que buscábamos. Dichas ecuaciones tienen una interconexión asociada como la mostrada en la Figura 13.3: homopolar aislada y directa en paralelo con inversa a través de una impedancia  $Z_f$ .

**Fallo fase-fase-tierra con impedancia a tierra  $Z_f$ :** como en todos los fallos que afectan a 2 fases, consideraremos que éstas son la 'b' y la 'c'. De este modo las ecuaciones del fallo son:

$$J_a = 0 \quad U_b = U_c \quad U_c = Z_f (J_b + J_c)$$

y en términos de secuencias

$$\begin{aligned} J_0 + J_1 + J_2 &= 0 \tag{13.5} \\ U_0 + a^2 U_1 + a U_2 &= U_0 + a U_1 + a^2 U_c \\ U_0 + a U_1 + a^2 U_2 &= Z_f (J_0 + a^2 J_1 + a J_2 + J_0 + a J_1 + a^2 J_2) \end{aligned}$$

De la segunda ecuación obtenemos  $(a^2 - a)(U_1 - U_2) = 0$  y por tanto:

$$U_1 = U_2 \tag{13.6}$$

De la tercera:

$$U_0 + (a + a^2)U_1 = Z_f (2J_0 + (a^2 + a)(J_1 + J_2))$$

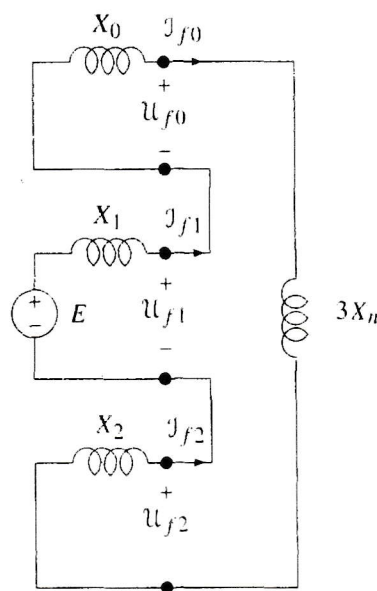
y teniendo en cuenta que  $a + a^2 = -1$  y que de la primera ecuación obtenemos  $J_0 = -J_1 - J_2$ , nos queda  $U_0 - U_1 = 3Z_f J_0$ , que junto a (13.5) y (13.6) constituyen las 3 ecuaciones que buscábamos. En la Figura 13.4 se mostró la interpretación como interconexión de circuitos que tienen dichas ecuaciones: directa en paralelo con inversa y con la configuración en serie de  $3Z_f$  y homopolar.

- 13.2.** Un generador síncrono con reactancias a las tres secuencias de valores  $X_0$ ,  $X_1$  y  $X_2$ , cumple que  $X_1 = X_2 \gg X_0$ . Si su neutro está puesto a tierra a través de una reactancia limitadora  $X_n$ , determinar la condición que debe cumplir dicha reactancia para que la intensidad de un fallo fase-tierra rígido sea mayor que la que aparece en un fallo trifásico rígido.

### Resolución

La intensidad de cortocircuito en el caso de fallo trifásico rígido se obtiene fácilmente como  $J_{cc}^{3f} = E/X_1$ , siendo  $E$  la fuerza electromotriz de secuencia directa del generador.

El caso de fallo fase-tierra rígido puede estudiarse con la interconexión de circuitos de secuencias de la Figura 13.5.



**Figura 13.5** Interconexión para el fallo fase-tierra del generador.

Se ve en esta situación que:

$$J_0 = J_1 = J_2 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0 + 3X_n} = \frac{E}{2X_1 + X_0 + 3X_n}$$

y por tanto

$$J_{cc}^{1f} = J_0 + J_1 + J_2 = 3J_1 = \frac{3E}{2X_1 + X_0 + 3X_n}$$

La condición  $J_{cc}^{1f} > J_{cc}^{3f}$  equivale a:

$$\frac{3E}{2X_1 + X_0 + 3X_n} > \frac{E}{X_1}$$

ó  $3X_1 > 2X_1 + X_0 + 3X_n$ , que se reduce a:

$$X_n < \frac{1}{3}(X_1 - X_0)$$

Como caso concreto, tenemos que en el caso de que el neutro del generador esté rígidamente unido a tierra,  $X_n = 0$ , la intensidad de cortocircuito en el fallo fase-tierra es mayor que en el caso trifásico.

**13.3.** Para la red de la Figura 13.6, con los datos expresados en p.u. bajo una misma base, determinar:

1. Intensidad por el neutro del transformador y las tensiones en bornas del generador, para un fallo fase-tierra en la línea, a 5 km de la barra 2 y con impedancia de fallo  $Z_f = 0.02j$ .
2. Corrientes de cortocircuito y la componente homopolar de las tensiones en el punto de fallo, para un fallo fase-fase en la línea, en el mismo punto y con la misma impedancia de fallo que en el caso anterior.

Datos:

- Generador:  $\begin{cases} X_0 = 0.04 \\ X_1 = 0.1 \\ X_2 = 0.08 \end{cases}$
- Transformador:  $\begin{cases} X_{cc} = 0.15 \\ X_0 = 0.12 \end{cases}$
- Línea:  $L = 20$  km,  $\begin{cases} X_0 = 0.2 \\ X_1 = X_2 = 0.08 \end{cases}$

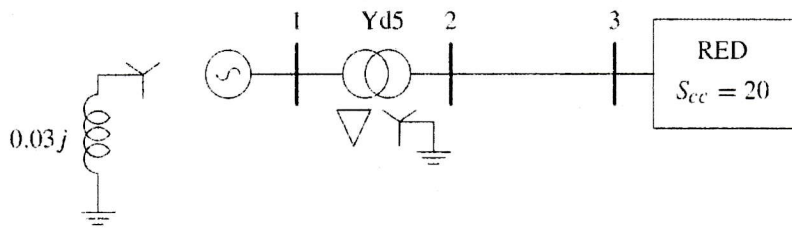


Figura 13.6 Sistema.

**Resolución**

Los circuitos a las 3 secuencias, junto a los equivalentes desde el fallo, se muestran en las Figuras 13.7 (homopolar), 13.8 (directa) y 13.9 (inversa). Nótese que en este punto no se han incluido los desfases introducidos por el transformador, los cuales se tendrán en cuenta sólo al referirnos a magnitudes del generador.

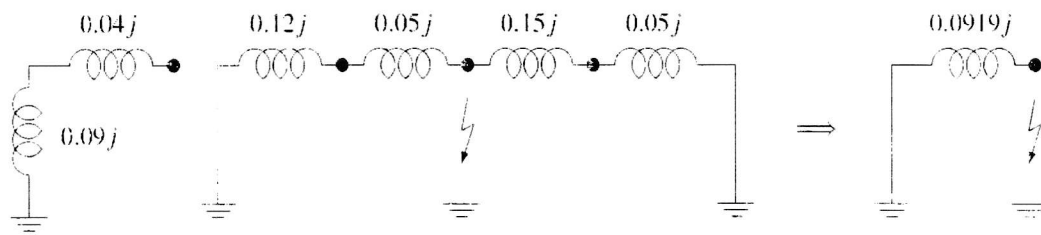


Figura 13.7 Circuito de secuencia homopolar.

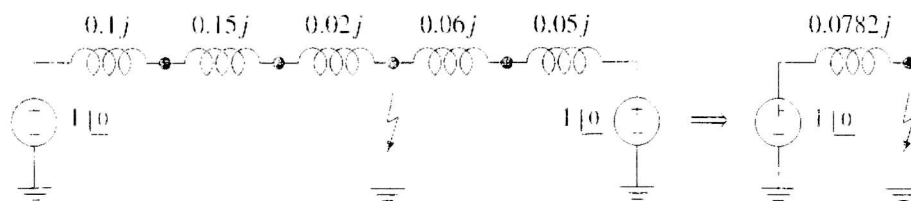


Figura 13.3 Circuito de secuencia directa.

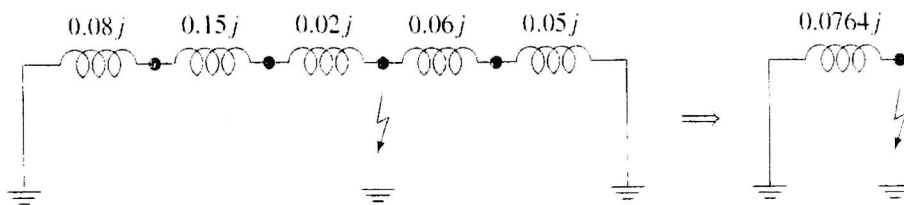


Figura 13.9 Circuito de secuencia inversa.

Fallo fase-tierra: las tres secuencias deben acoplarse como se muestra en la Figura 13.10:

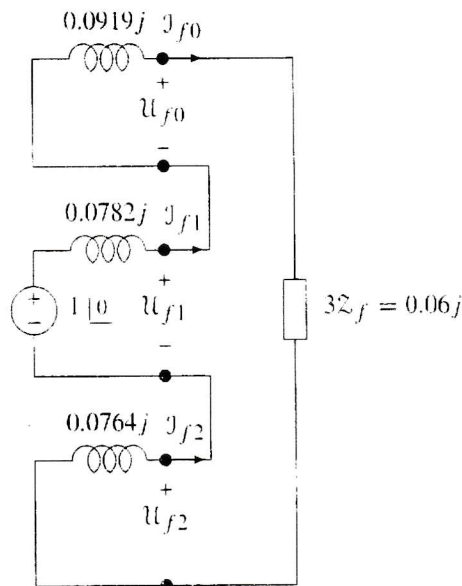


Figura 13.10 Circuito con acoplamiento de secuencias.

que tiene las ecuaciones

$$\begin{aligned}
 J_{f0} &= J_{f1} = J_{f2} = -3.2626j \\
 U_{f0} &= 0.2998 \angle 0 \\
 U_{f1} &= 0.7448 \angle 0 \\
 U_{f2} &= -0.2492 \angle 0
 \end{aligned}$$

Para obtener la intensidad en el neutro del transformador, usamos el circuito de homopolar, en el que se ha sustituido la condición de fallo  $U_{f0}$ , como se muestra en la Figura 13.11. Es inmediato obtener:

$$\begin{aligned}
 J_{r0} &= 1.7635j \\
 |J_N| &= 3|J_{r0}| = 5.29
 \end{aligned}$$

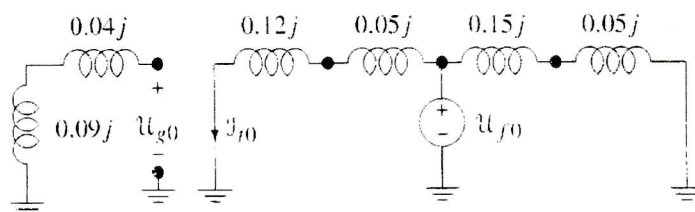


Figura 13.11 Circuito de secuencia homopolar con sustitución del fallo.

Para obtener las tensiones en bornas del generador, buscamos dichas tensiones en el dominio de componentes simétricas:

- Homopolar: de la Figura 13.11 resulta obvio que  $U_{g0} = 0$ .
- Directa: de la Figura 13.12, obtenemos

$$J_{g1} = \frac{1 \angle 0 - U_{f1}}{0.27j} = -0.945j$$

$$U_{g1} = 1 \angle 0 - 0.1jJ_{g1} = 0.9055$$

Designando por  $U'_{g1}$  la tensión que realmente hay en el generador, incluyendo desfase introducido por el transformador:

$$U'_{g1} = U_{g1} \cdot 1 \angle -150 = 0.9055 \angle -150$$

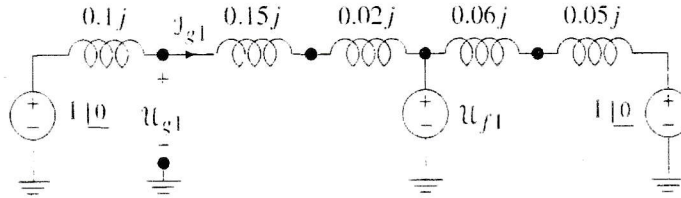


Figura 13.12 Circuito de secuencia directa con sustitución del fallo.

- Inversa: de la Figura 13.13, obtenemos

$$J_{g2} = -U_{f2}/0.25j = -0.9968j$$

$$U_{g2} = -0.08jJ_{g2} = -0.0797$$

Y la tensión incluyendo desfase introducido por el transformador:

$$U'_{g2} = U_{g2} \cdot 1 \angle 150 = 0.0797 \angle 150$$

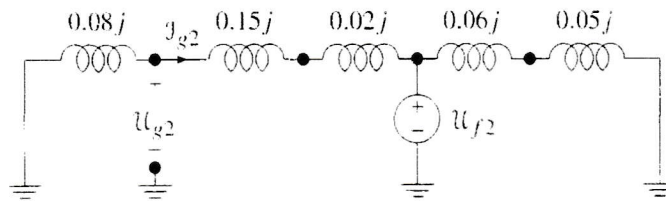


Figura 13.13 Circuito de secuencia inversa con sustitución del fallo.

Transformando dichas tensiones al dominio de fases:

$$\begin{bmatrix} U'_{ga} \\ U'_{gb} \\ U'_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{g0} \\ U_{g1} \\ U_{g2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9479 \angle -154.18 \\ 0.8257 \angle 90 \\ 0.9479 \angle -25.82 \end{bmatrix}$$

**Fallo fase-fase:** para este tipo de fallo, la interconexión de los circuitos de secuencias se muestra en la Figura 13.14, estando la homopolar sin conexión.

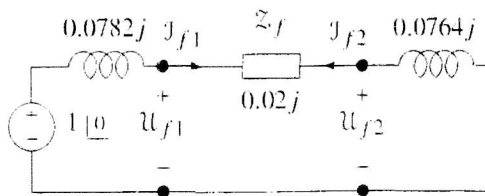


Figura 13.14 Interconexión de los circuitos de secuencia para el fallo fase-fase.

Las ecuaciones en dicha situación son

$$\begin{aligned} u_{f0} &= J_{f0} = 0 \\ J_{f1} &= -J_{f2} = -5.7274j \\ u_{f1} &= 0.5521 \underline{|0} \\ u_{f2} &= 0.4375 \underline{|0} \end{aligned}$$

y transformando al dominio de fases:

$$\begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -9.92 \underline{|0} \\ 9.92 \underline{|0} \end{bmatrix}$$

También podemos obtener las tensiones en el punto del fallo

$$\begin{aligned} u_{f0} &= 0 \\ u_{f1} &= 1 - 0.0782jJ_{f1} = 0.5521 \\ u_{f2} &= -0.0764jJ_{f2} = 0.4376 \end{aligned}$$

y transformando al dominio de fases:

$$\begin{bmatrix} u_{fa} \\ u_{fb} \\ u_{fc} \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u_{f0} \\ u_{f1} \\ u_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9897 \\ 0.5047 \underline{|-168.66} \\ 0.5047 \underline{|168.66} \end{bmatrix}$$

- 13.4.** Se conocen las matrices de impedancias en p.u. de las redes a secuencia directa, inversa y homopolar correspondientes a una red de 4 nudos. El nudo 3 se conecta a un transformador Yy0 con  $X_{cc} = 0.1$  seguido de un generador con  $X_1 = X_2 = 0.1j$ . Estando en vacío, se produce un fallo fase-fase-tierra en el nudo 4. Hallar las intensidades del fallo.

$$\begin{aligned} Z_{n1} = Z_{n2} &= \begin{bmatrix} 0.8026 & 0.1025 & 0.4026 & 0.1067 \\ 0.1025 & 0.4013 & 0.1025 & 0.1234 \\ 0.4026 & 0.1025 & 0.8226 & 0.1230 \\ 0.1067 & 0.1234 & 0.1230 & 0.6500 \end{bmatrix} j \\ Z_{n0} &= \begin{bmatrix} 0.06 & 0.06 & 0.06 & 0.06 \\ 0.06 & 0.7374 & 0.15 & 0.15 \\ 0.06 & 0.15 & 0.69 & 0.12 \\ 0.06 & 0.15 & 0.12 & 0.77 \end{bmatrix} j \end{aligned}$$

**Resolución**

En este problema, es necesario obtener la impedancia equivalente de la red modificada en el nudo 4, a las tres secuencias. Para ello, dada una matriz de impedancias de nudos  $Z_{ni}$  a la secuencia  $i$ , nos planteamos cuál es la nueva impedancia equivalente  $Z_{eq4} = u_4/J_4$  cuando en el nudo 3 se añade una impedancia  $Z_j$  (impedancia de transformador más impedancia de generador), como se muestra en la Figura 13.15.

La matriz de impedancias de nudos nos proporciona la relación:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \end{bmatrix} \tag{13.7}$$

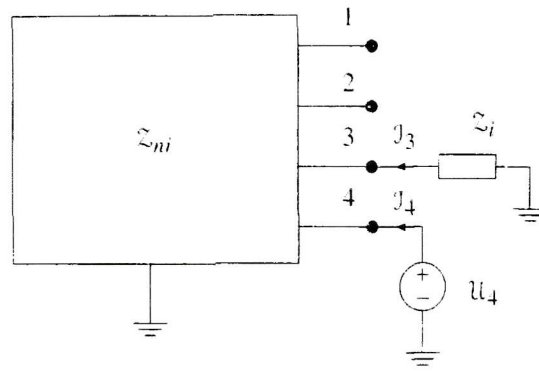


Figura 13.15 Esquema para el cálculo de la nueva impedancia equivalente.

Las condiciones de la red corresponden a imponer

$$\begin{aligned} J_1 &= J_2 = 0 \\ U_3 &= -Z_i J_3 \end{aligned}$$

que junto a la Ecuación (13.7) da:

$$\begin{aligned} U_3 &= Z_{33}J_3 + Z_{34}J_4 = -Z_i J_3 \\ U_4 &= Z_{43}J_3 + Z_{44}J_4 \end{aligned}$$

Despejando  $J_3$  de la primera de estas ecuaciones:

$$J_3 = \frac{-Z_{34}}{Z_i + Z_{33}} J_4$$

y sustituyendo en la segunda

$$U_4 = Z_{43} \frac{-Z_{34}}{Z_i + Z_{33}} J_4 + Z_{44} J_4$$

por lo que la nueva impedancia equivalente en el nudo 4, a la secuencia  $i$ , es

$$Z_{eqi} = U_4/J_4 = Z_{44} - \frac{Z_{43}Z_{34}}{Z_i + Z_{33}}$$

Particularizaremos ahora para las distintas secuencias. Así, para la secuencia homopolar, tenemos  $Z_0 = \infty$ , pues el transformador es Yy sin neutros a tierra. Por este motivo el valor que pudiese tener la impedancia homopolar del generador no es relevante. Tenemos, por tanto, que  $Z_{eq0}$  será el elemento  $Z_{44}$  de la matriz de impedancias de nudos a la secuencia homopolar:

$$Z_{eq0} = Z_{44} = 0.77j$$

Para las secuencias directa e inversa tendremos  $Z_1 = Z_2 = 0.1j + 0.1j = 0.2j$  con lo que:

$$Z_{eq1} = Z_{eq2} = 0.65j - \frac{(0.123j)^2}{0.2j + 0.8226j} = 0.6648j$$

Conocidos los equivalentes Thevenin a las tres secuencias, el fallo fase-fase-tierra se estudia mediante la conexión de circuitos de la Figura 13.16.

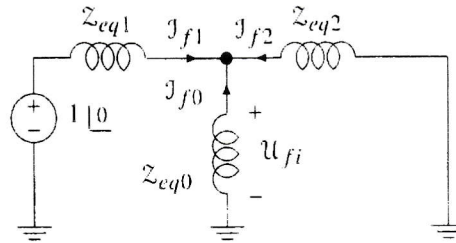


Figura 13.16 Conexión correspondiente al fallo fase-fase-tierra.

Escribiendo la ecuación nodal de dicho circuito:

$$\left( \frac{1}{Z_{eq1}} + \frac{1}{Z_{eq2}} + \frac{1}{Z_{eq0}} \right) u_{fi} = \frac{U_0}{Z_{eq1}}$$

luego  $u_0 = u_1 = u_2 = 0.354 U_0$  y las intensidades del fallo

$$\begin{aligned} J_{f0} &= -u_{f0}/Z_{eq0} = 0.4597j \\ J_{f1} &= (U_0 - u_{f1})/Z_{eq1} = -1.017j \\ J_{f2} &= -u_{f2}/Z_{eq2} = 0.5573j \end{aligned}$$

Las intensidades por las fases hacia el fallo serán:

$$\begin{bmatrix} J_{fa} \\ J_{fb} \\ J_{fc} \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} J_{f0} \\ J_{f1} \\ J_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.5279 \underline{153.17} \\ 1.5279 \underline{126.83} \end{bmatrix}$$

y la intensidad hacia tierra será  $3J_{f0}$ , o lo que es lo mismo

$$J_{fb} + J_{fc} = 1.379j$$

**13.5.** Para la red de la Figura 13.17, y con los datos indicados, expresados en p.u. para una misma base, determinar:

1. Potencia de cortocircuito en el nudo 3.
2. Intensidades por las fases de la línea L1 tras un corto fase-fase en el nudo 2.
3. Módulo de la intensidad por el neutro del transformador Yd5 durante dicho fallo.

Datos:

- Generador:  $\begin{cases} X_0 = 0.05 \\ X_1 = X_2 = 0.1 \end{cases}$
- Transformador Yd5:  $\begin{cases} X_0 = 0.1 \\ X_1 = X_2 = 0.12 \end{cases}$
- Transformador Yy0:  $X_{cc} = 0.15$
- Línea L1:  $\begin{cases} X_0 = 0.16 \\ X_1 = X_2 = 0.04 \end{cases}$
- Línea L2:  $\begin{cases} X_0 = 0.32 \\ X_1 = X_2 = 0.08 \end{cases}$

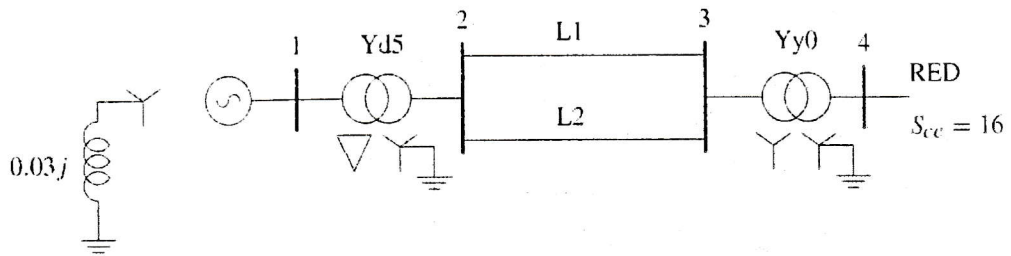


Figura 13.17 Sistema.

**Resolución**

Los circuitos a cada una de las secuencias se muestran en las Figuras 13.18 (homopolar, donde el modelo de la red no es relevante debido a que el transformador Yy0 no deja pasar esta componente), 13.19 (directa) y 13.20 (inversa).

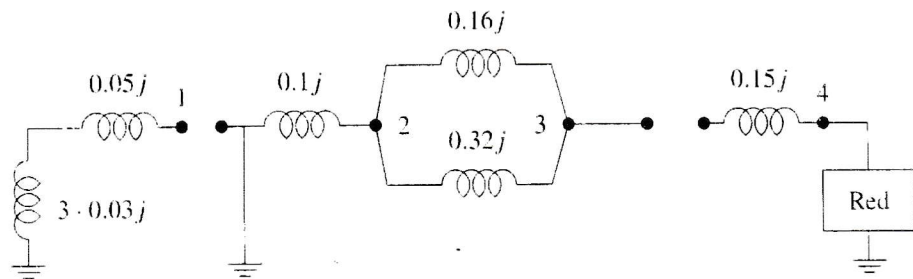


Figura 13.18 Sistema en secuencia homopolar.

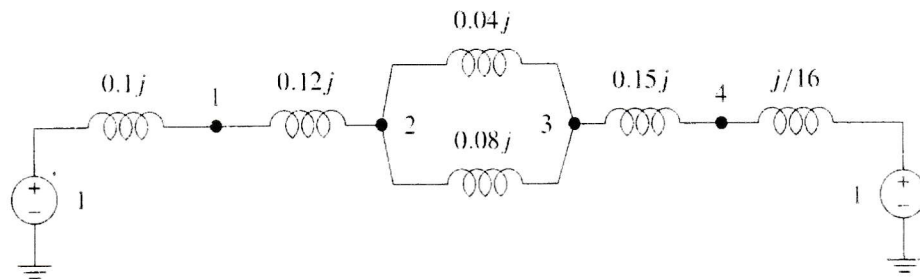


Figura 13.19 Sistema en secuencia directa.

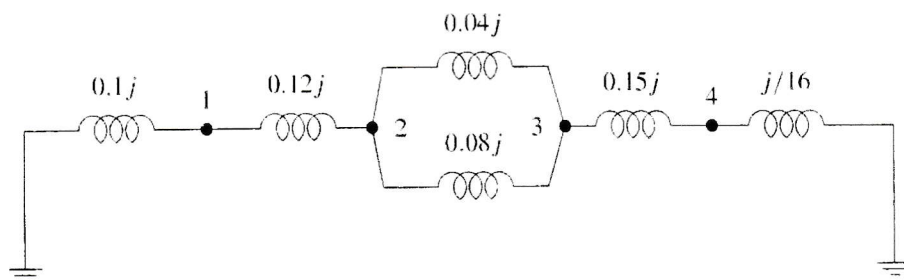


Figura 13.20 Sistema en secuencia inversa.

**Primera cuestión.** Para obtener la potencia de cortocircuito en el nudo 3, es necesario conocer la impedancia Thevenin en dicho nudo, que resulta ser  $X_T = 0.1141$ , por lo que:

$$S_{cc} \approx \frac{1}{X_T} = 8.861$$

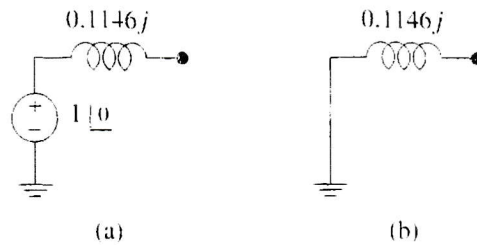


Figura 13.21 Equivalentes Thevenin de los circuitos de secuencias: (a)directa, (b) inversa.

**Segunda cuestión.** Para el estudio de un corto fase-fase, sólo hay que tener en cuenta las secuencias directa e inversa, pues ya se sabe que  $J_0 = 0$ . Los equivalentes Thevenin de dichas secuencias en el nudo 2 se muestran en la Figura 13.21.

Imponiendo las condiciones de fallo fase-fase, obtenemos que el circuito a resolver es el de la Figura 13.22, que conduce a:

$$J_1 = -J_2 = -4.363j$$

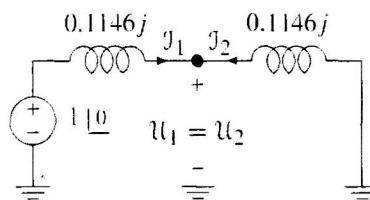


Figura 13.22 Montaje de secuencias para el fallo fase-fase.

Acudiendo otra vez a los circuitos de secuencias directa e inversa y sustituyendo el fallo por fuentes, obtenemos las componentes de secuencia de la intensidad de la línea L1. En este caso, optaremos por sustituir por fuentes de intensidad, como se muestra en las Figuras 13.23 y 13.24, donde tras proceder mediante operaciones de divisor de intensidad llegamos a  $I_{L1}^+ = 1.394j$  del primer circuito y a  $I_{L1}^- = -1.394j$ .

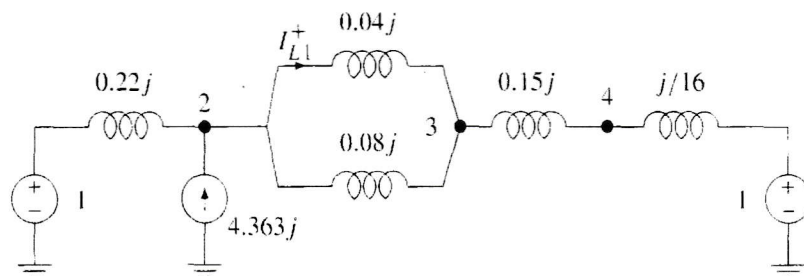


Figura 13.23 Circuito de secuencia directa con fallo sustituido.

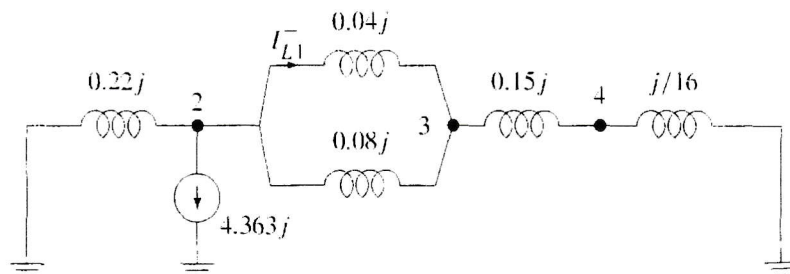


Figura 13.24 Circuito de secuencia inversa con fallo sustituido.

Transformando a intensidades de fase:

$$\begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1.394j \\ -1.394j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.414 \underline{10} \\ -2.414 \underline{10} \end{bmatrix}$$

**Tercera cuestión.** Puesto que  $J_0 = 0$ , no existen intensidades por los neutros de los transformadores.

**13.6.** Ante un fallo fase-fase-tierra en la barra 6 del circuito de la Figura 13.25, calcular la tensión en la barra 5 y la corriente por el neutro de T1.

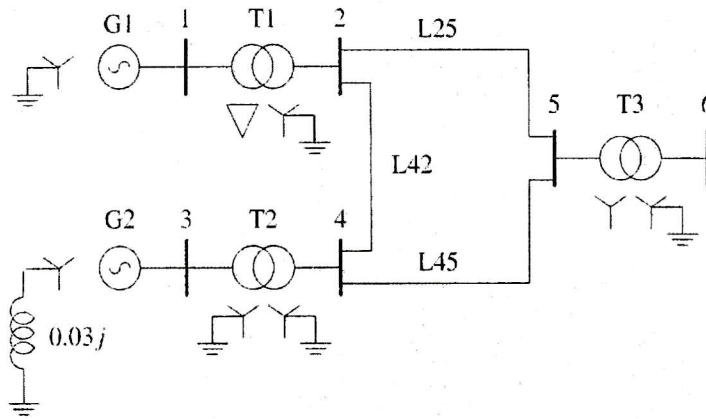


Figura 13.25 Sistema.

Datos:

- Generadores G1, G2:  $\begin{cases} X_0 = 0.09 \\ X_1 = X_2 = 0.35 \end{cases}$
- Transformadores T1, T2:  $X_0 = X_1 = X_2 = 0.1$
- Transformador T3:  $X_0 = X_1 = X_2 = 0.05$
- Línea L42:  $\begin{cases} X_0 = 1.8 \\ X_1 = X_2 = 0.45 \end{cases}$
- Líneas L25, L45:  $\begin{cases} X_0 = 1.15 \\ X_1 = X_2 = 0.35 \end{cases}$

**Resolución**

Los equivalentes monofásicos para las tres secuencias se muestran en las Figuras 13.26, 13.27 y 13.28.

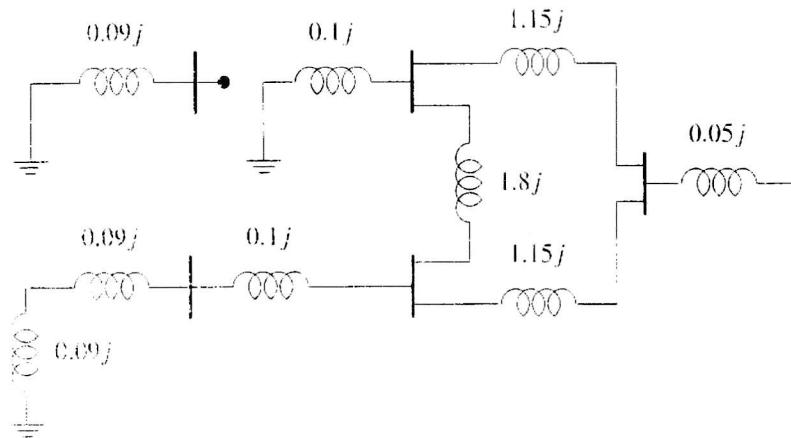


Figura 13.26 Secuencia homopolar.

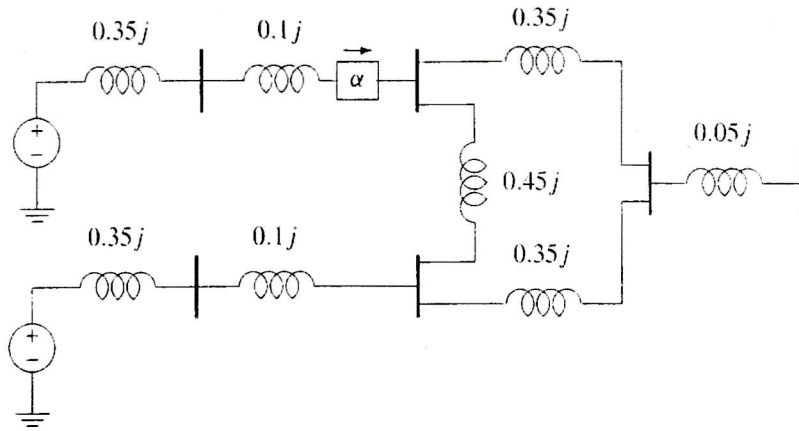


Figura 13.27 Secuencia directa.

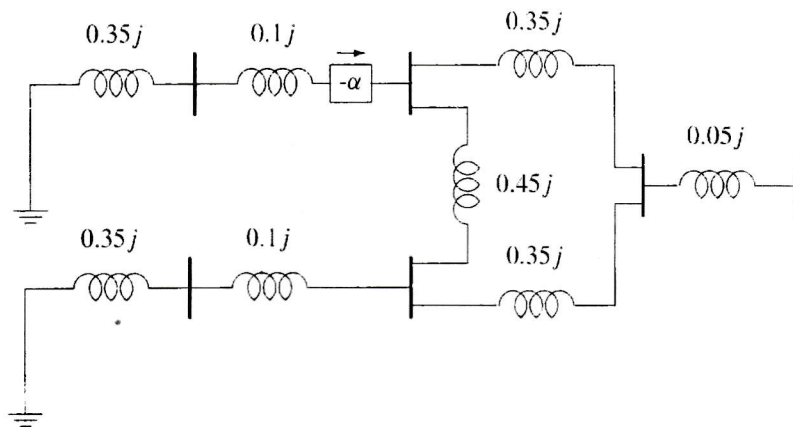


Figura 13.28 Secuencia inversa.

Nótese que el circuito de secuencia inversa es como el de directa pero sin fuentes y con el desfase introducido por el transformador T1, de signo contrario.

Para el cálculo de los equivalentes Thevenin, es conveniente una conversión  $\Delta - Y$ , quedando, para las secuencias directa e inversa el circuito de la Figura 13.30, y para el de homopolar el de la Figura 13.29.

Los equivalentes se muestran en la Figura 13.31, y la interconexión exigida por un fallo fase-fase-tierra en el circuito de la Figura 13.32. Planteando una ecuación nodal en dicho circuito, tenemos:

$$\frac{1 \angle 0}{0.45j} = u_1 \cdot \left( \frac{1}{0.714j} + \frac{2}{0.45j} \right)$$

De donde  $u_0 = u_1 = u_2 = 0.3802 \angle 0$  y las intensidades hacia el fallo:

$$J_0 = \frac{-0.3802}{0.714j} = 0.5323 \angle 90$$

$$J_1 = \frac{1 - 0.3802}{0.45j} = 1.3773 \angle -90$$

$$J_2 = \frac{-0.3802}{0.45j} = 0.845 \angle 90$$

Las tensiones en el nudo 5 se obtienen a partir de las tensiones en el punto del fallo, teniendo en cuenta las caídas en el transformador T3, que en este caso no provoca desfases:

$$u_0^5 = u_0 + 0.05jJ_0 = 0.3536$$

$$u_1^5 = u_1 + 0.05jJ_1 = 0.45$$

$$u_2^5 = u_2 + 0.05jJ_2 = 0.338$$

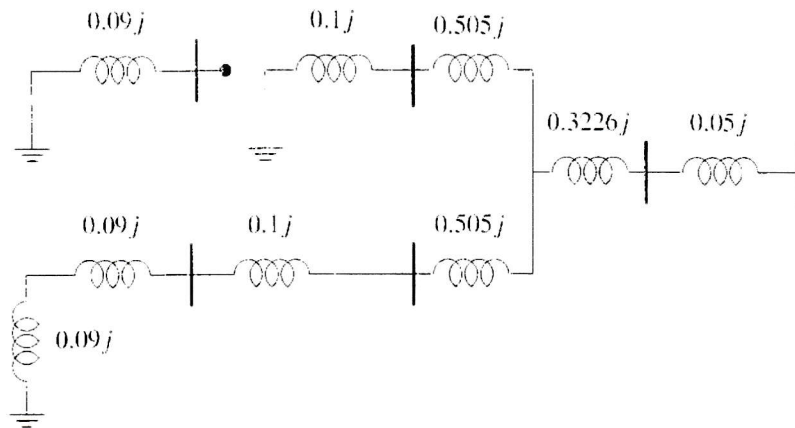


Figura 13.29 Secuencia homopolar tras modificación.

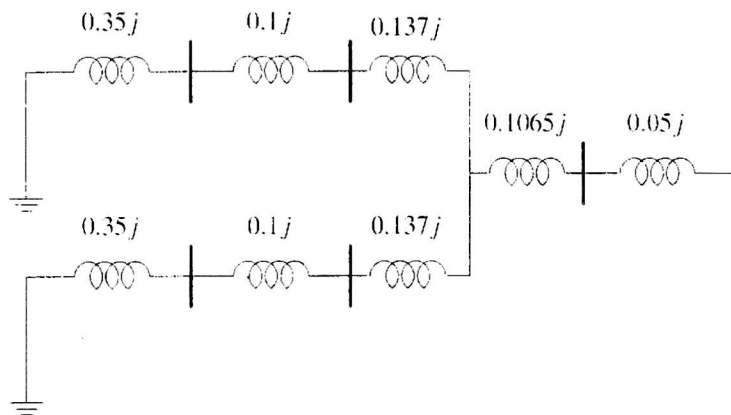


Figura 13.30 Secuencias directa e inversa tras modificación.

Pasando a tensiones de fase:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{U}_a^5 \\ \mathcal{U}_b^5 \\ \mathcal{U}_c^5 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} \mathcal{U}_0^5 \\ \mathcal{U}_1^5 \\ \mathcal{U}_2^5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.1416 \\ 0.105 \angle -112.61 \\ 0.105 \angle 112.61 \end{bmatrix}$$

En cuanto a la corriente por el neutro de T1, ésta puede obtenerse a partir del circuito 13.33, en el que se ha sustituido su aportación al fallo por una fuente de intensidad. Aplicando un divisor de intensidad:

$$\mathcal{I} = \mathcal{I}_0 \frac{0.28 + 0.505}{0.1 + 0.505 + 0.505 + 0.28} = 0.3j$$

Luego, por el neutro de T3 circulará  $\mathcal{I}_N = 3\mathcal{I} = 0.9j$ .

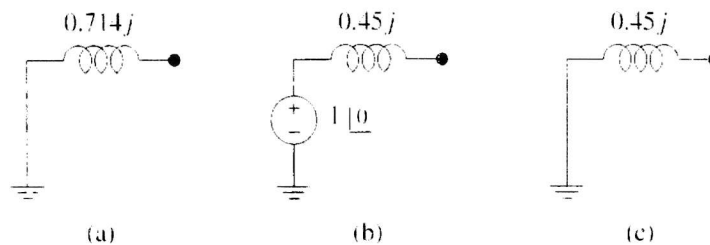


Figura 13.31 Equivalentes de las tres secuencias: (a) homopolar, (b) directa, (c) inversa.

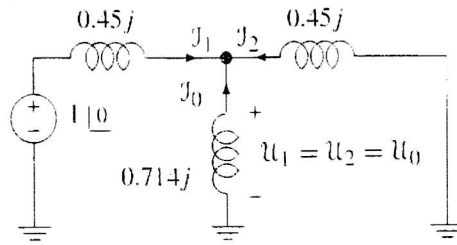


Figura 13.32 Conexión para fallo fase-fase-tierra.

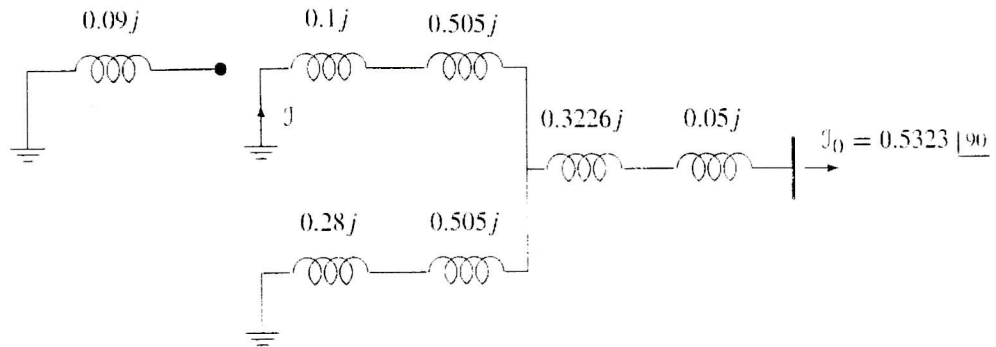


Figura 13.33 Circuito de secuencia homopolar para el cálculo de la intensidad de neutro.

13.7. En la barra 3 del sistema de la Figura 13.34, se produce un contacto a tierra de la fase 'a' simultáneamente con un fallo entre las fases 'b' y 'c'. Calcular las corrientes en el punto del fallo y las tensiones en la barra 1. Datos:

- Generador:  $\begin{cases} X_0 = 0.05 \\ X_1 = X_2 = 0.15 \\ X_g = 0.02 \end{cases}$
- Transformador:  $\begin{cases} X_0 = 0.14 \\ X_1 = X_2 = 0.16 \end{cases}$
- Línea L23:  $\begin{cases} X_0 = 3 \\ X_1 = X_2 = 0.9 \end{cases}$

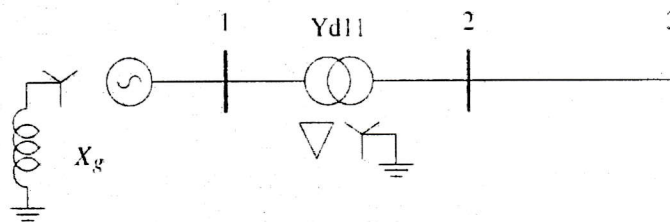


Figura 13.34 Sistema.

**Resolución**

Las Figuras 13.35, 13.36 y 13.37 muestran los circuitos que la red presenta a las tres secuencias, así como sus equivalentes Thevenin. El ángulo de la fuente de tensión en el circuito de directa se ha tomado como 30° a fin de que la tensión de vacío en el nudo 3, y por lo tanto el equivalente Thevenin desde dicha barra, sea origen de fases.

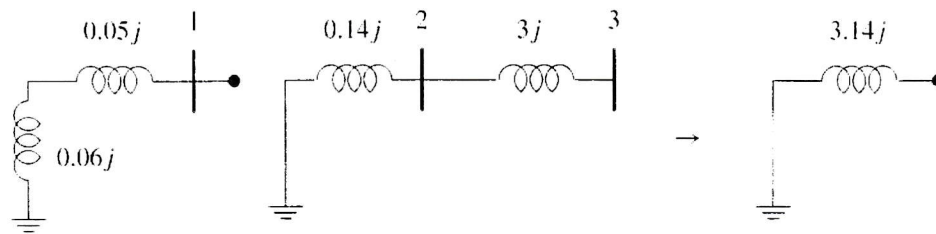


Figura 13.35 Circuito de homopolar.

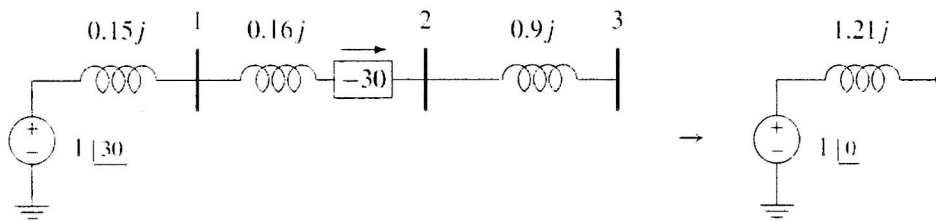


Figura 13.36 Circuito de directa.

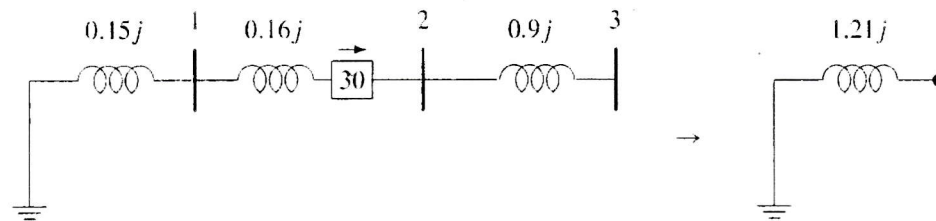


Figura 13.37 Circuito de inversa.

El fallo que se plantea en este problema tiene ecuaciones:

$$\begin{aligned} u_a &= 0 \\ u_b &= u_c \\ J_b + J_c &= 0 \end{aligned}$$

Expresadas en secuencias:

$$\begin{aligned} u_0 + u_1 + u_2 &= 0 \\ u_0 + a^2u_1 + au_2 &= u_0 + au_1 + a^2u_2 \\ J_0 + a^2J_1 + aJ_2 + J_0 + aJ_1 + a^2J_2 &= 0 \end{aligned}$$

La segunda ecuación equivale a  $u_1 = u_2$ , y teniendo en cuenta  $a^2 + a = -1$ , la tercera ecuación se reduce a  $J_1 + J_2 = 2J_0$ . De la primera obtenemos  $u_1 = -u_0/2$ . Estas ecuaciones se satisfacen en el circuito de la Figura 13.38.

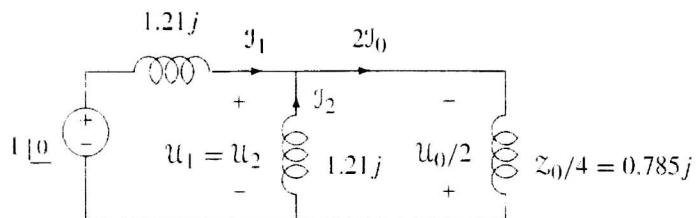


Figura 13.38 Interconexión para el fallo fase-tierra más fase-fase.

Resolviendo dicho circuito, obtenemos:

$$u_1 = u_2 = \frac{1}{\frac{1}{1.21j} + \frac{1}{1.21j} + \frac{1}{0.785j}} = 0.2823$$

y las intensidades

$$j_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{u_1}{0.785j} = -0.1798j$$

$$j_1 = \frac{1 - u_1}{1.21j} = -0.593j$$

$$j_2 = \frac{-u_2}{1.21j} = 0.233j$$

Transformando al dominio de fases:

$$\begin{bmatrix} j_a \\ j_b \\ j_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} j_0 \\ j_1 \\ j_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5398j \\ -0.7153 \\ 0.7153 \end{bmatrix}$$

Para la obtención de las tensiones en la barra 1 sustituimos el efecto del fallo por fuentes de intensidad en el circuito de cada secuencia, como se muestra en las Figuras 13.39, 13.40 y 13.41.

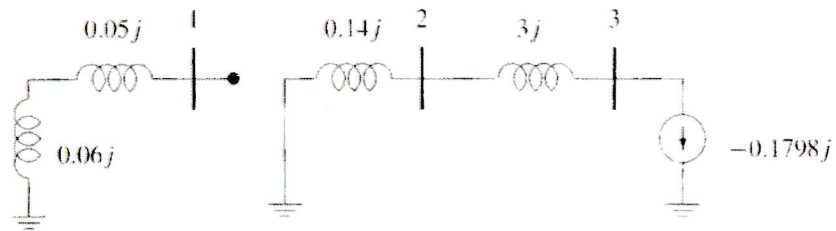


Figura 13.39 Circuito de secuencia homopolar con fallo sustituido.

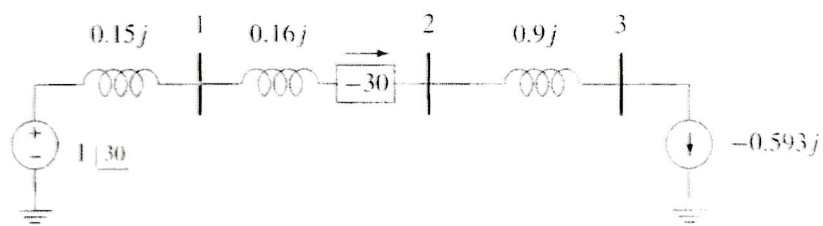


Figura 13.40 Circuito de secuencia directa con fallo sustituido.

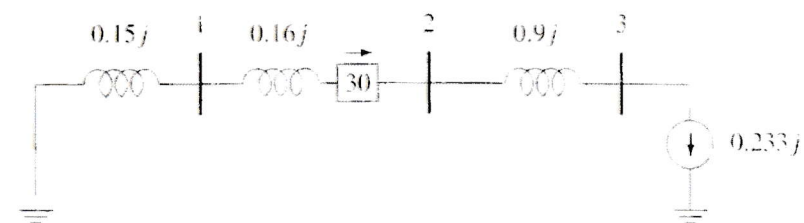


Figura 13.41 Circuito de secuencia inversa con fallo sustituido.

Analizando dichos circuitos tenemos las tensiones en la barra 1 (teniendo en cuenta los desfases):

$$\begin{aligned}
 u_0 &= 0 \\
 u_1 &= 1 \angle_{30} - 0.15j \cdot 0.593 \angle_{-60} = 0.911 \angle_{30} \\
 u_2 &= -0.15j \cdot 0.233 \angle_{60} = 0.035 \angle_{-30}
 \end{aligned}$$

y transformando a fases

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9289 \angle_{28.13} \\ 0.876 \angle_{-90} \\ 0.9289 \angle_{151.8} \end{bmatrix}$$

**13.8.** Por un fallo no deseado en la barra 3 del sistema de la Figura 13.42, se abre la fase 'a' de la línea 2-3.

Determinar:

1. Valor mínimo de la reactancia de puesta a tierra de la carga,  $X_c$ , para que  $|J| < 0.1$ .
2. Tensión de la fase 'a' en bornas del interruptor para dicho valor de  $X_c$ .

Datos:

- Generador:  $\begin{cases} X_0 = 0.05 \\ X_1 = X_2 = 0.1 \end{cases}$
- Transformador T1:  $\begin{cases} X_0 = 0.1 \\ X_1 = X_2 = 0.12 \end{cases}$
- Transformador T2:  $\begin{cases} X_0 = 0.13 \\ X_1 = X_2 = 0.15 \end{cases}$
- Línea L23:  $\begin{cases} X_0 = 0.32 \\ X_1 = X_2 = 0.1 \end{cases}$
- Carga:  $\{X_0 = X_1 = X_2 = 0.3\}$

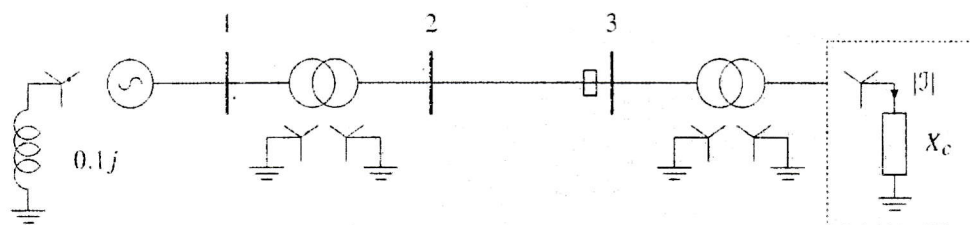


Figura 13.42 Sistema.

**Resolución**

Los circuitos que el sistema presenta a las secuencias se muestran en las Figuras 13.43, 13.44 y 13.45. En ellos se ha distinguido entre la parte del sistema a la izquierda del fallo, hasta el punto 3', y la parte a la derecha, desde la barra 3, a fin de tratar adecuadamente este fallo longitudinal.

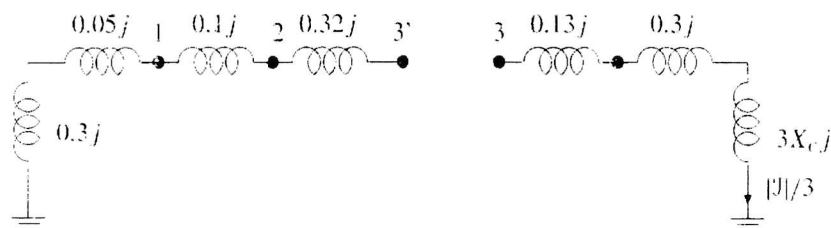


Figura 13.43 Circuito de homopolar.

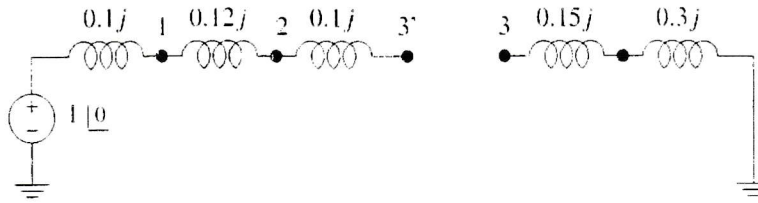


Figura 13.44 Circuito de directa.

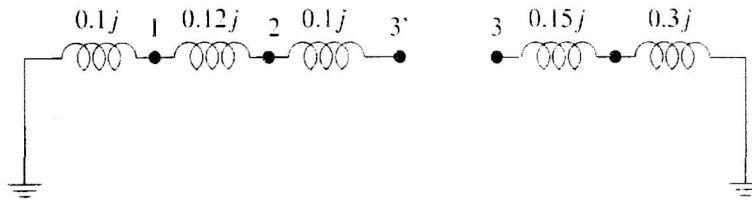


Figura 13.45 Circuito de inversa.

Para escribir las ecuaciones de este fallo, usaremos tensiones  $u_a$ ,  $u_b$  y  $u_c$  de las respectivas fases entre 3' y 3, así como  $J_a$ ,  $J_b$  e  $J_c$ , intensidades por las fases de la línea con sentido de 3' a 3. Dichas referencias se muestran en la Figura 13.46.

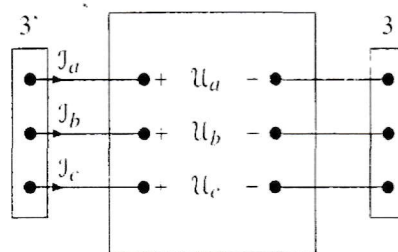


Figura 13.46 Referencias para el fallo de apertura de fase.

Podremos, por tanto, escribir las ecuaciones del fallo como:

$$\begin{aligned} J_a &= 0 \\ u_b &= 0 \\ u_c &= 0 \end{aligned}$$

Pasando a secuencias:

$$\begin{aligned} J_0 + J_1 + J_2 &= 0 \\ u_0 + a^2 u_1 + a u_2 &= 0 \\ u_0 + a u_1 + a^2 u_2 &= 0 \end{aligned}$$

Restando la tercera ecuación a la segunda:  $(a^2 - a)(u_1 - u_2) = 0$ , y por tanto  $u_1 = u_2$ . Sustituyendo en la segunda, tenemos:

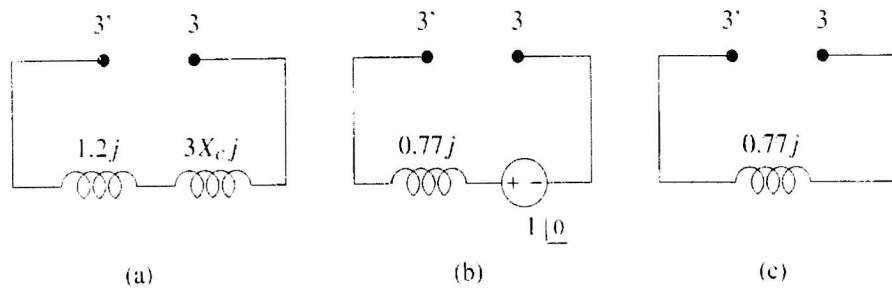
$$u_0 + (a^2 + a)u_1 = 0$$

y puesto que  $a^2 + a = -1$ , concluimos que las tres ecuaciones en secuencias son:

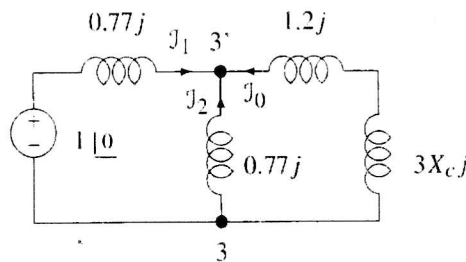
$$\begin{aligned} J_0 + J_1 + J_2 &= 0 \\ u_0 = u_1 = u_2 \end{aligned}$$

Dichas ecuaciones corresponden a una interconexión en paralelo de las tres secuencias. Para que dicha conexión resulte más clara, la realizaremos con los equivalentes Thevenin de cada secuencia entre los

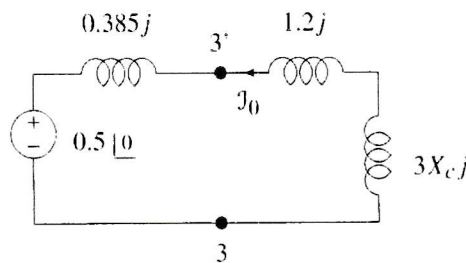
puntos 3' y 3. Dichos equivalentes se muestran en la Figura 13.47; mientras que el circuito de interconexión se muestra en la Figura 13.48.



**Figura 13.47** Equivalentes Thevenin entre 3' y 3 de los circuitos de secuencias: (a) homopolar, (b) directa, (c) inversa.



**Figura 13.48** Circuito de interconexión para el fallo de apertura de fase.



**Figura 13.49** Circuito de interconexión modificado.

Para conseguir el valor de  $J_0$  de este último circuito con facilidad, reducimos las dos ramas de la izquierda hasta conseguir el circuito de la Figura 13.49. De éste obtenemos:

$$J_0 = \frac{-0.5}{1.585j + 3X_cj}$$

y por tanto

$$|J| = |3J_0| = \frac{1.5}{1.585 + 3X_c}$$

La restricción  $|J| < 0.1$  nos lleva a  $X_c > 4.47$ .

La tensión en bornas de la fase 'a' de la protección con  $X_c = 4.47$  es:

$$u_a = u_0 + u_1 + u_2 = 3u_0 = -3J_0X_0 = 3 \frac{-0.5}{1.585j + 3X_cj} (1.2j + 3X_cj) = -1.46$$

13.9. Las matrices de impedancias de nudos de la red de la Figura 13.50 son las siguientes:

$$Z_{n1} = Z_{n2} = j \begin{bmatrix} 0.0454 & 0.0367 & 0.0259 \\ 0.0367 & 0.0793 & 0.0324 \\ 0.0259 & 0.0324 & 0.0405 \end{bmatrix}$$

$$Z_{n0} = j \begin{bmatrix} 0.0245 & 0.0152 & 0.0037 \\ 0.0152 & 0.1240 & 0.0098 \\ 0.0037 & 0.0098 & 0.0175 \end{bmatrix}$$

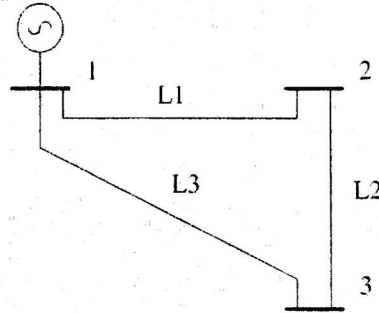


Figura 13.50 Sistema original.

Se añade a la red la línea L4 tal y como se indica en la Figura 13.51, siendo las impedancias a las tres secuencias de dicha línea  $Z_1 = Z_2 = 0.1j$  y  $Z_0 = 0.2j$ .

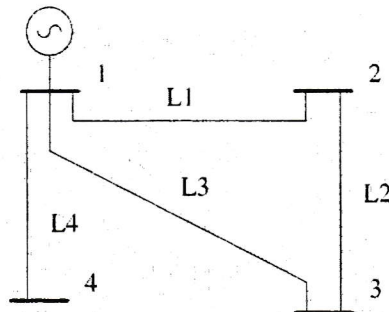


Figura 13.51 Sistema ampliado.

Determinar las intensidades de cortocircuito de la red de la Figura 13.51 para los siguientes tipos de fallos en el nudo 4:

1. Trifásico rígido.
2. Fase-tierra rígido.
3. Fase-fase rígido.
4. Fase-fase-tierra rígido.

Determinar, de igual modo, las tensiones en el punto del fallo en cada caso.

### Resolución

Las matrices de impedancias de nudos nos proporcionan en sus elementos diagonales la impedancia equivalente de la red en los distintos nudos, por lo que tomando en cada secuencia la impedancia correspondiente al nudo 3, basta con considerar la línea L4 para conseguir los equivalentes desde el nudo 4, como se muestra en las Figuras 13.52, 13.53 y 13.54.

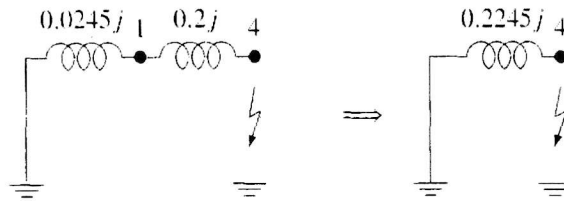


Figura 13.52 Circuito de homopolar y equivalente Thevenin.

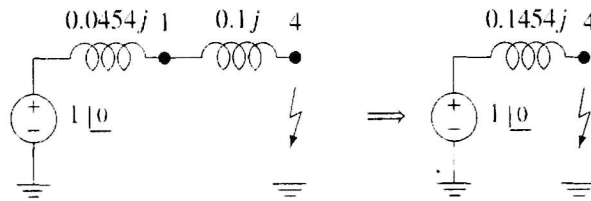


Figura 13.53 Circuito de directa y equivalente Thevenin.

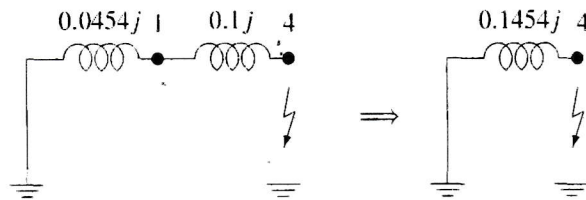


Figura 13.54 Circuito de inversa y equivalente Thevenin.

**Fallo trifásico rígido:** en un fallo equilibrado no intervienen las secuencias inversa y homopolar,  $\mathcal{J}_0 = \mathcal{J}_2 = \mathcal{U}_0 = \mathcal{U}_2 = 0$ , con lo que el estudio se reduce al circuito de directa:

$$\mathcal{J}_{cc} = \frac{1 \angle 0}{0.1454j} = -6.8776j$$

y  $\mathcal{U}_a = \mathcal{U}_b = \mathcal{U}_c = \mathcal{U}_1 = 1 \angle 0 - 1 \angle 0 = 0$ .

**Fallo fase-tierra rígido:** las ecuaciones de este fallo corresponden a la interconexión del circuito de la Figura 13.55.

Es inmediato obtener  $\mathcal{J}_1 = -1.9406j$  y por tanto  $\mathcal{J}_{cc} = -5.8219j$ .

Las tensiones las obtenemos de

$$\mathcal{U}_{f0} = -0.2245j \mathcal{J}_{f0} = -0.4357$$

$$\mathcal{U}_{f1} = 1 - 0.1454j \mathcal{J}_{f1} = 0.7178$$

$$\mathcal{U}_{f2} = -0.1454j \mathcal{J}_{f2} = -0.2822$$

y las tensiones de fase:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{U}_a \\ \mathcal{U}_b \\ \mathcal{U}_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} \mathcal{U}_{f0} \\ \mathcal{U}_{f1} \\ \mathcal{U}_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.0849 \angle -127.04 \\ 1.0849 \angle -127.04 \end{bmatrix}$$

**Fallo fase-fase rígido:** la interconexión para este fallo es la que se muestra en la Figura 13.56.

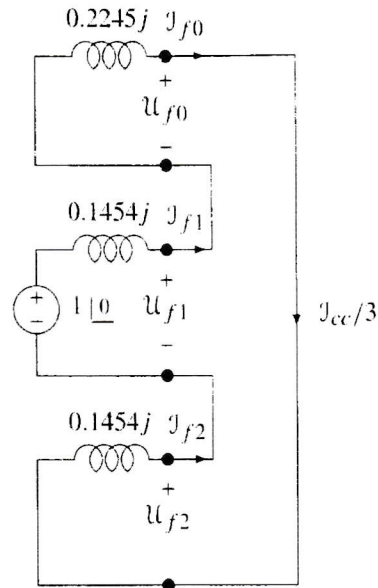


Figura 13.55 Interconexión para el fallo fase-tierra.

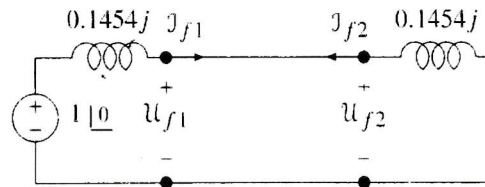


Figura 13.56 Interconexión para el fallo fase-fase.

Las intensidades se obtienen como:

$$J_{f1} = -J_{f2} = \frac{1 \angle 0}{0.1454j + 0.1454j} = -3.4388j$$

que junto a  $J_{f0} = 0$  nos permiten obtener las intensidades del fallo

$$J_b = -J_c = J_{f0} + a^2 J_{f1} + a J_{f2} = -\sqrt{3}j J_{f1} = -5.9562$$

Las tensiones  $U_{fi} = U_{f1} = U_{f2}$  se pueden obtener como:

$$U_{fi} = 0.1454j J_{f1} = 0.5$$

y las tensiones de fases

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} U_{f0} \\ U_{f1} \\ U_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0.5 \\ -0.5 \end{bmatrix}$$

**Fallo fase-fase-tierra rígido:** el circuito de interconexión para este fallo es el de la Figura 13.57, en el que obtenemos las tensiones  $U_{fi}$  a partir de la ecuación nodal

$$\left( \frac{1}{0.2245j} + \frac{1}{0.1454j} + \frac{1}{0.1454j} \right) U_{fi} = \frac{1 \angle 0}{0.1454j}$$

$$U_{fi} = U_{f0} = U_{f1} = U_{f2} = 0.3777$$

Puesto que es obvio que  $U_b = U_c = 0$  sólo tendremos que obtener  $U_a$ :

$$U_a = U_{f0} + U_{f1} + U_{f2} = 3U_{fi} = 1.1331$$

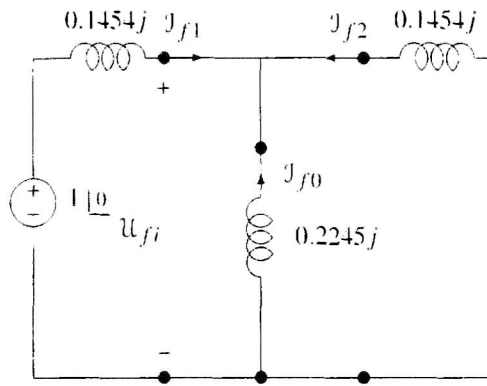


Figura 13.57 Interconexión para el fallo fase-fase-tierra.

En cuanto a las intensidades:

$$J_{f0} = \frac{-u_{f0}}{0.2245j} = 1.6824j$$

$$J_{f1} = \frac{1 - u_{f1}}{0.1454j} = -4.28j$$

$$J_{f2} = \frac{-u_{f2}}{0.1454j} = 2.5976j$$

Las intensidades por las fases del fallo serán:

$$\begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} J_{f0} \\ J_{f1} \\ J_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6.4687 \angle 157.04 \\ 6.4687 \angle 22.96 \end{bmatrix}$$

y la intensidad a tierra  $3J_{f0} = J_b + J_c = 5.047j$ .

- 13.10.** Se conocen las matrices de impedancias de nudos a secuencias directa e inversa,  $Z_{n1}$  y  $Z_{n2}$ , de la red de tres nudos de la Figura 13.58. Dichas matrices, expresadas en p.u. sobre una base  $S_B = 100$  MVA y  $V_B = 66$  kV, son:

$$Z_{n1} = Z_{n2} = j \begin{bmatrix} 0.28 & 0.12 & 0.18 \\ 0.12 & 0.12 & 0.12 \\ 0.18 & 0.12 & 0.25 \end{bmatrix}$$

A la barra 3 se conecta un transformador 66/20 kV con  $X_{cc} = 0.1j$  que alimenta una carga conectada a través del nudo 4, según se muestra en la Figura 13.58.

Suponiendo la red en vacío, se pide:

1. Valor de la reactancia  $X_g$  para limitar la intensidad de falta ante un fallo fase-tierra en la barra 4 a 350 A como máximo.
2. Determinar si sería posible situar un pararrayos en la barra 4 de la red cuando  $X_g = 8$  p.u., teniendo en cuenta la recomendación de la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) de que si se desea conectar un pararrayos en un punto, el valor de  $C_g$  para un fallo en dicho punto cumpla  $C_g \leq 80\%$ .

El coeficiente de tierra,  $C_g$ , se define como:

$$C_g = \frac{\text{Máxima tensión de fase para una falta fase-tierra}}{\text{Máxima tensión de línea antes del fallo}} \cdot 100$$

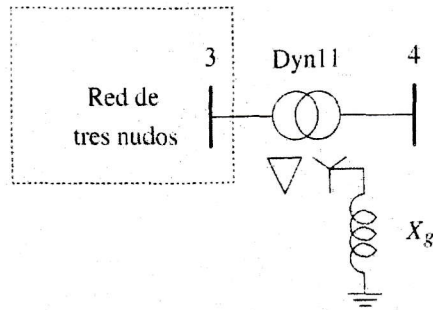


Figura 13.58 Sistema.

**Resolución**

Representamos en las Figuras 13.59 y 13.60 los circuitos a las tres secuencias. Tras obtener las impedancias equivalentes desde el nudo 4 que presentan dichas secuencias,

$$Z_{eq0} = 0.1j + 3X_gj$$

$$Z_{eq1} = Z_{eq2} = 0.25j + 0.1j = 0.35j$$

usamos el circuito de interconexión para el fallo fase-tierra, Figura 13.61, para resolver:

$$J_{f0} = \frac{J_{cc}}{3} = \frac{1}{0.35j + 0.35j + 0.1j + 3X_gj}$$

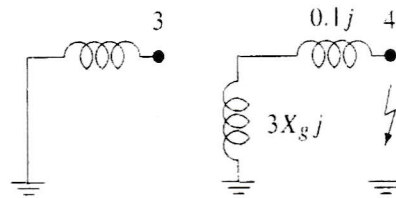


Figura 13.59 Circuito de secuencia homopolar.

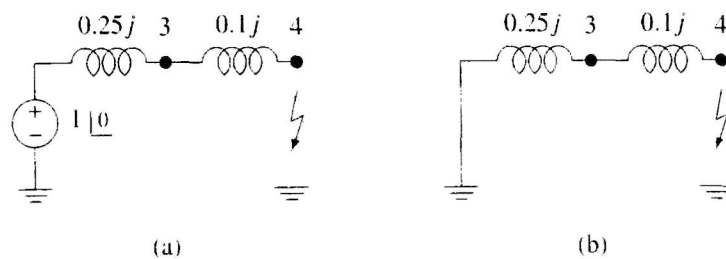


Figura 13.60 Circuitos de secuencias: (a) directa, (b) inversa.

Por tanto, la intensidad de falta en p.u. es:

$$|J_{cc}| = \frac{3}{0.8 + 3X_g}$$

Para pasar la limitación de 350 A a p.u., usaremos la intensidad base

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 2886.751$$

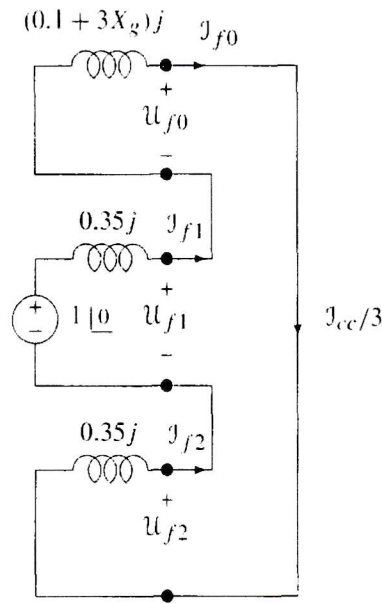


Figura 13.61 Interconexión de circuitos.

por lo que el límite en p.u. es:

$$I_{\text{lim}} = 350/I_B = 0.1212$$

Vemos cómo la restricción  $|J_{cc}| < I_{\text{lim}}$  nos lleva a:

$$X_g \geq \frac{1}{3} \left( \frac{3}{0.1212} - 0.8 \right)$$

y por tanto a  $X_g \geq 7.98$ .

Respecto al segundo apartado, usaremos  $X_g = 8$  para obtener las intensidades:

$$J_{f0} = J_{f1} = J_{f2} = -0.0403j$$

Las tensiones las obtenemos como:

$$U_{f0} = -Z_{eq0}J_{f0} = -0.9718$$

$$U_{f1} = 1 - Z_{eq1}J_{f1} = 0.9859$$

$$U_{f2} = -Z_{eq2}J_{f2} = -0.0141$$

Las tensiones de fase son:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} U_{f0} \\ U_{f1} \\ U_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.696 \angle -149.28 \\ 1.696 \angle 149.28 \end{bmatrix}$$

Tenemos pues que la máxima tensión de fase durante el fallo la encontramos tanto en la fase 'b' como en la fase 'c', y vale  $1.696 \cdot 20/\sqrt{3} = 19.578$  kV. El coeficiente de tierra valdrá:

$$C_g = \frac{19.578}{20} = 0.979$$

y puesto que  $C_g$  ha resultado mayor que 0.8, no se recomienda el uso de pararrayos en el nudo 4.

- 13.11.** Se conocen las matrices de impedancias de nudos de las redes a secuencia directa, inversa y homopolar correspondientes a la red de tres nudos indicada en la Figura 13.62:

$$Z_{n1} = Z_{n2} = j \begin{bmatrix} 0.12 & 0.12 & 0.12 \\ 0.12 & 0.2867 & 0.18 \\ 0.12 & 0.18 & 0.2568 \end{bmatrix} \quad Z_{n0} = j \begin{bmatrix} 0.06 & 0.06 & 0.06 \\ 0.06 & 0.7374 & 0.3503 \\ 0.06 & 0.3503 & 0.6987 \end{bmatrix}$$

1. Calcular las intensidades y tensiones en el nudo 4 cuando se produce un cortocircuito rígido fase-tierra en dicho nudo.
2. Determinar la potencia de cortocircuito en el nudo 4.

Datos:

- Generador G1:  $\begin{cases} X_0 = 0.07 \\ X_1 = X_2 = 0.15 \end{cases}$
- Generador G2:  $\begin{cases} X_0 = 0.05 \\ X_1 = X_2 = 0.12 \end{cases}$
- Transformador T1:  $\begin{cases} X_{cc} = 0.08 \end{cases}$
- Transformador T2:  $\begin{cases} X_{cc} = 0.10 \end{cases}$

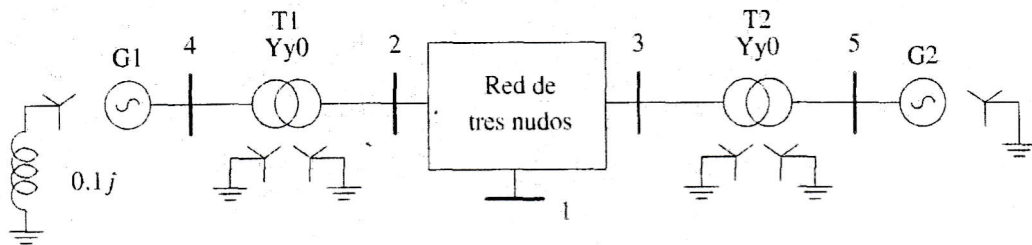


Figura 13.62 Sistema.

### Resolución

Es necesario conocer el equivalente Thevenin de cada secuencia en el nudo 4. El principal problema para ello, es obtener la impedancia equivalente de la red de tres nudos en el nudo 2 cuando en el nudo 3 tiene conectada una impedancia  $Z_i$ , la del transformador 3-5 más la del generador G2. Así, para una secuencia  $i$ ,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}$$

Las dos últimas ecuaciones quedan

$$u_2 = Z_{22}J_2 + Z_{23}J_3$$

$$u_3 = Z_{32}J_2 + Z_{33}J_3$$

y usando  $J_3 = \frac{-u_3}{Z_i}$ , obtenemos:

$$Z'_{22} = \frac{u_2}{J_2} = Z_{22} - \frac{Z_{23}Z_{32}}{Z_i + Z_{33}}$$

Evaluando para las distintas secuencias tendremos:

- Homopolar:  $Z_0 = 0.1j + 0.05j = 0.15j$ , y

$$Z'_{22} = 0.7374j - \frac{0.3503j \cdot 0.3503j}{0.15j + 0.6987j} = 0.5928j$$

- Directa e inversa:  $Z_1 = Z_2 = 0.1j + 0.12j = 0.22j$ , y

$$Z'_{22} = 0.2867j - \frac{0.18j \cdot 0.18j}{0.22j + 0.2568j} = 0.2187j$$

Las Figuras 13.63, 13.64 y 13.65 muestran el sistema a las distintas secuencias. En ellas, tanto la red de tres nudos como los elementos a su derecha se han reducido a sus equivalentes desde el nudo 2.

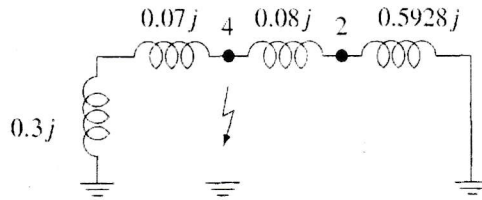


Figura 13.63 Circuito de secuencia homopolar.

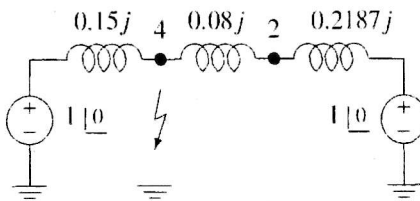


Figura 13.64 Circuito de secuencia directa.

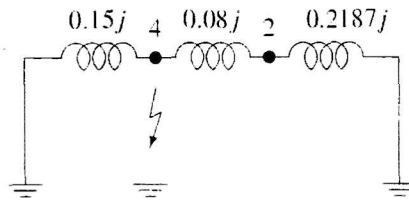


Figura 13.65 Circuito de secuencia inversa.

Para estudiar el fallo en el nudo 4, usaremos el equivalente Thevenin a cada secuencia en dicho nudo, los cuales se muestran en la Figura 13.66.

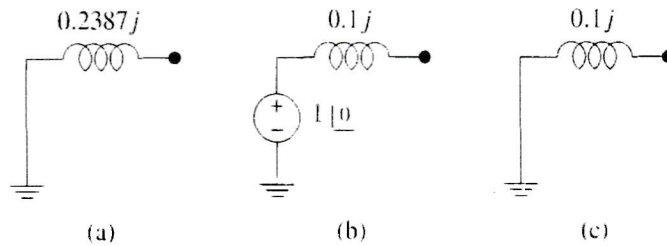


Figura 13.66 Equivalentes Thevenin a secuencias: (a) homopolar, (b) directa, (c) inversa.

Por tratarse de una fallo fase-tierra, el circuito de interconexión será el de la Figura 13.67, del cual se obtiene:

$$I_{f0} = I_{f1} = I_{f2} = \frac{1}{0.2387j + 0.1j + 0.1j} = -2.28j$$

y por tanto la intensidad del fallo

$$I_a = I_{f0} + I_{f1} + I_{f2} = -6.838j$$

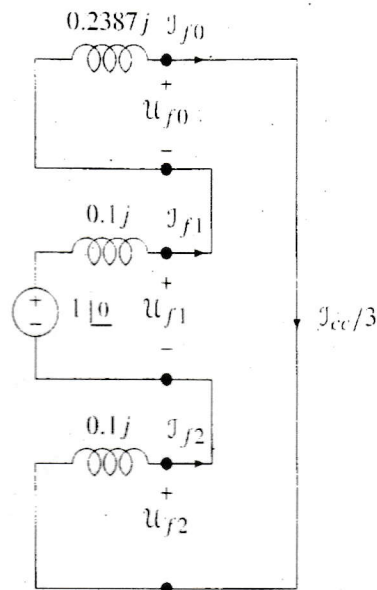


Figura 13.67 Circuito de interconexión para el fallo fase-tierra.

Las tensiones en secuencias las obtenemos de

$$u_{f0} = -Z_{eq0} J_{f0} = -0.5442$$

$$u_{f1} = 1 - Z_{eq1} J_{f1} = 0.772$$

$$u_{f2} = -Z_{eq2} J_{f2} = -0.228$$

y las tensiones de fase:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u_{f0} \\ u_{f1} \\ u_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.19 \angle -133.3 \\ 1.19 \angle 133.3 \end{bmatrix}$$

En cuanto a las intensidades, conocemos las intensidades hacia el fallo, para obtener las aportaciones que hacen tanto el generador G1 como el resto de la red, usaremos los circuitos de secuencias con el fallo sustituido por fuentes de tensión, como se muestra en las Figuras 13.68, 13.69 y 13.70.

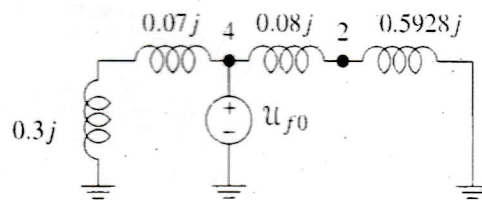


Figura 13.68 Circuito de secuencia homopolar con fallo sustituido.

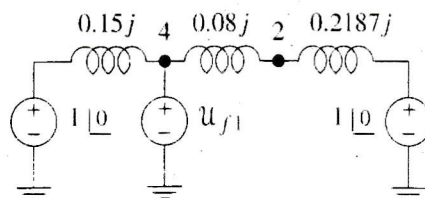


Figura 13.69 Circuito de secuencia directa con fallo sustituido.

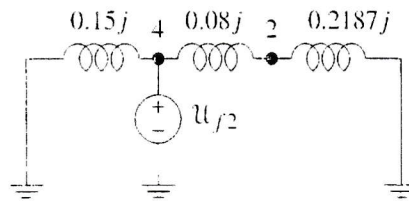


Figura 13.70 Circuito de secuencia inversa con fallo sustituido.

Las distintas aportaciones que obtenemos son:

- Homopolar (Figura 13.68):
  - Generador:  $J_1^s = -1.471j$
  - Red:  $J_1^R = -0.81j$
- Directa (Figura 13.69):
  - Generador:  $J_1^s = -1.518j$
  - Red:  $J_1^R = -0.7622j$
- Inversa (Figura 13.70):
  - Generador:  $J_1^s = -1.518j$
  - Red:  $J_1^R = -0.7622j$

Convirtiendo a intensidades de fase, tenemos:

- Generador:

$$\begin{bmatrix} J_a^g \\ J_b^g \\ J_c^g \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} J_0^g \\ J_1^g \\ J_2^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.507j \\ 0.047j \\ 0.047j \end{bmatrix}$$

- Red:

$$\begin{bmatrix} J_a^R \\ J_b^R \\ J_c^R \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} J_0^R \\ J_1^R \\ J_2^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.3344j \\ -0.0478j \\ -0.0478j \end{bmatrix}$$

El segundo apartado del problema no requiere más que usar la reactancia Thevenin de secuencia directa en el nudo 4, que ya se obtuvo:

$$S_{cc} \approx \frac{1}{X_{eq}} = \frac{1}{0.1} = 10$$

### 13.12. Las matrices de impedancias de nudos para una red de cinco nudos son:

$$Z_{n1} = Z_{n2} = j \begin{bmatrix} 0.1177 & 0.0995 & 0.0263 & 0.0483 & 0.0776 \\ & 0.1526 & 0.0404 & 0.074 & 0.1189 \\ & & 0.0989 & 0.0814 & 0.0580 \\ & & & 0.1492 & 0.1062 \\ & & & & 0.2849 \end{bmatrix}$$

$$Z_{n0} = j \begin{bmatrix} 0.06 & 0.06 & 0 & 0.06 & 0.06 \\ & 0.14 & 0 & 0.14 & 0.14 \\ & & 0.0565 & 0 & 0 \\ & & & 0.6677 & 0.3613 \\ & & & & 0.6102 \end{bmatrix}$$

Al nudo 5 se conectan un transformador de  $Z_{cc} = 0.11j$  y un grupo generador de  $Z_1 = Z_2 = 0.15j$  y  $Z_0 = 0.06j$ , como se indica en la Figura 13.71.

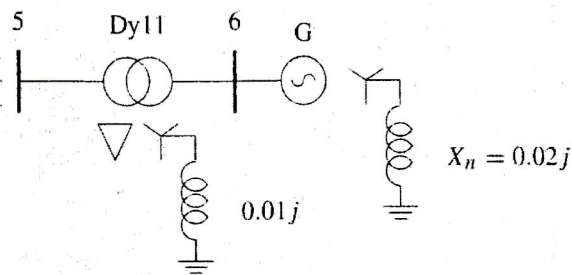


Figura 13.71 Sistema.

1. Calcular las tensiones en las fases de la barra 4 ante un fallo fase-tierra en 6.
2. Valor que debe tener  $X_n$  para que la corriente de fallo sea inferior a 10 p.u.

**Resolución**

Con el elemento  $Z_{55}$  de cada matriz de impedancias de nudos, tenemos la impedancia equivalente de la red en el nudo 5, con lo que podemos representar los circuitos a las tres secuencias del sistema que nos incumbe. Dichos circuitos, junto a los equivalentes Thevenin que presentan en el nudo 6 se muestran en las Figuras 13.72, 13.73 y 13.74.

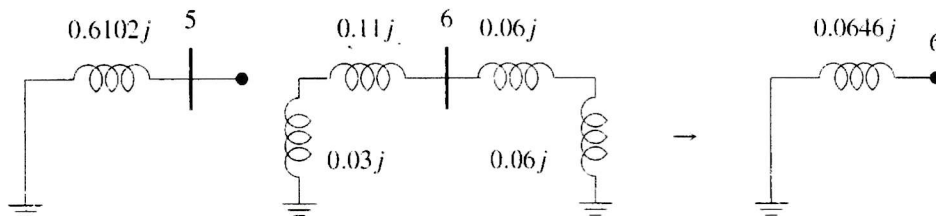


Figura 13.72 Circuito de homopolar.

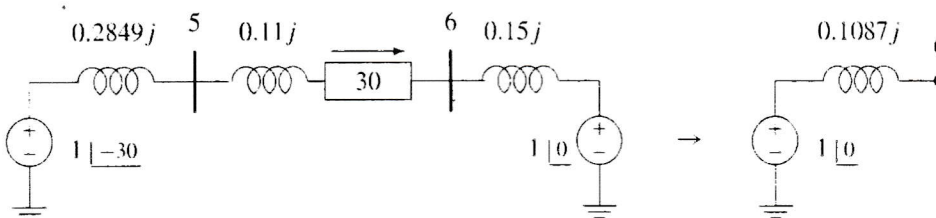


Figura 13.73 Circuito de directa.

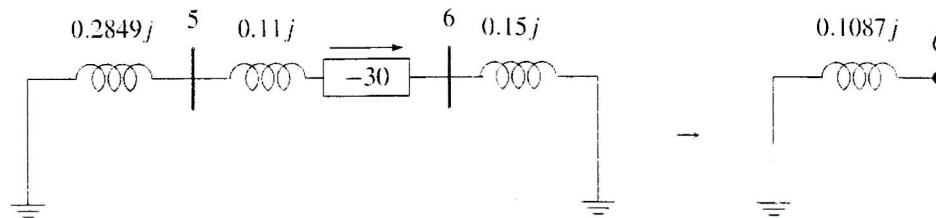


Figura 13.74 Circuito de inversa.

El fallo fase-tierra en el nudo 6 se calcula usando el circuito de interconexión de la Figura 13.75.

$$I_{fi} = I_a/3 = 3.546 \angle -90$$

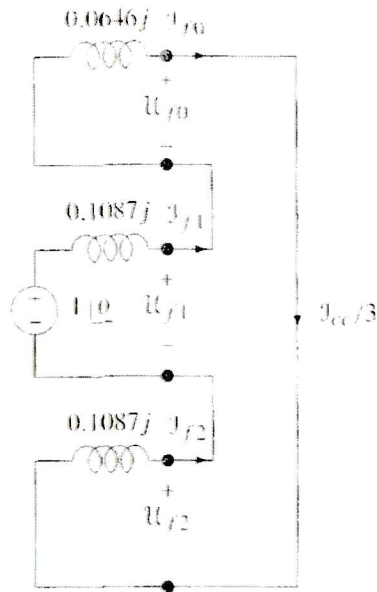


Figura 13.75 Circuito de interconexión para el fallo fase-tierra.

y por tanto la intensidad del fallo será:

$$I_f = 10.638 \angle -90$$

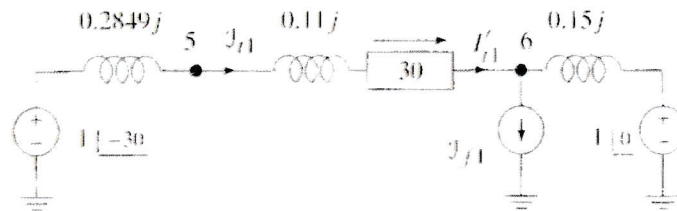


Figura 13.76 Circuito de secuencia directa con fallo sustituido.

Para obtener las intensidades en las distintas secuencias que pasan por el transformador, sustituimos el fallo en el circuito de cada secuencia por una fuente independiente, en esta ocasión usaremos una fuente de intensidad, como mostramos en el circuito de la Figura 13.76 para la secuencia directa. En cada secuencia  $i$ , distinguiremos entre intensidad que llega al nudo 6 a través del transformador,  $I'_{fi}$ , y la intensidad que parte del nudo 5,  $I_{fi}$ ; siendo la diferencia entre ellas en las secuencias directa e inversa sólo la debida al desfase introducido por el transformador. De este modo, obtenemos las  $I'_{fi}$  mediante divisores de intensidad (nótese que en este caso concreto no afectan ni fuentes ni desfases):

$$I'_{f0} = \frac{0.12j}{0.14j + 0.12j} I_{f0}$$

$$I'_{f1} = \frac{0.15j}{0.15j + 0.3949j} I_{f1} = 0.976 \angle -90$$

$$I'_{f2} = \frac{0.15j}{0.15j + 0.3949j} I_{f2} = 0.976 \angle -90$$

Las magnitudes en alta tensión son:

$$I_{f0} = 0$$

$$I_{f1} = I'_{f1} \cdot 1 \angle -30 = 0.976 \angle -120$$

$$I_{f2} = I'_{f2} \cdot 1 \angle 30 = 0.976 \angle -60$$

El teorema de compensación, nos dice que un montaje como el de la Figura 13.77 nos da los  $\Delta u_j$  de los distintos nudos  $j = 1, 2, 3, 4, 5$ , en la situación de fallo en la que la intensidad entrante al nudo 5 es  $-J_{fi}$  en cada secuencia  $i$ .

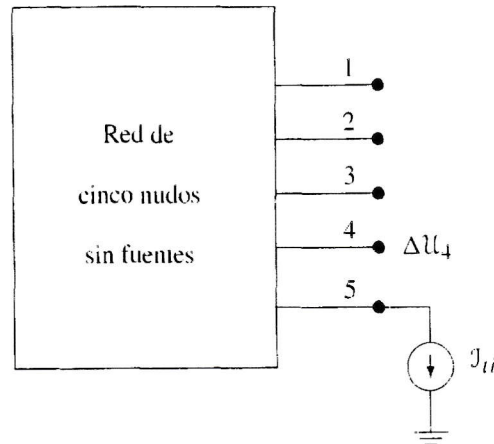


Figura 13.77 Aplicación del teorema de compensación.

- Para secuencia homopolar:

$$\Delta u_4 = Z_{45} \cdot (-J_{f0}) = 0$$

- Secuencia directa:

$$\Delta u_4 = Z_{45} \cdot (-J_{f1}) = 0.1062j \cdot (-0.976 \angle -120) = -0.1036 \angle -30$$

- Secuencia inversa:

$$\Delta u_4 = Z_{45} \cdot (-J_{f2}) = 0.1062j \cdot (-0.976 \angle -60) = -0.1036 \angle 30$$

Sumando a los incrementos calculados, las tensiones previas al fallo, obtenemos las tensiones postfallo del nudo 4:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \angle 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1036 \angle -30 \\ -0.1036 \angle 30 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.9118 \angle 3.26 \\ -0.1036 \angle 30 \end{bmatrix}$$

y pasando a fases

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8206 \\ 0.9234 \angle -110.312 \\ 1 \angle 120 \end{bmatrix}$$

Respecto al Apartado 2, obtendremos en primer lugar la expresión de la impedancia equivalente del circuito de homopolar para una reactancia  $X_n$  genérica. Observando el circuito de la Figura 13.72:

$$Z_{eq0} = \frac{1}{\frac{1}{0.14j} + \frac{1}{0.06j + 3X_nj}}$$

y teniendo en cuenta la restricción  $|J_{fa}| < 10$ , imponemos

$$|J_{fi}| = |J_a|/3 = 10/3 \geq \frac{1}{|Z_{eq0} + 0.1087j + 0.1087j|}$$

tenemos  $|Z_{eq0}| \geq 0.0826$  que conduce a  $X_n \geq 0.047$ .

**13.13.** Se conocen las matrices de impedancias de nudos a las distintas secuencias, de un sistema de 4 nudos incluyendo dos generadores:

$$Z_{n1} = Z_{n2} = j \begin{bmatrix} 0.080 & 0.066 & 0.038 & 0.056 \\ & 0.132 & 0.054 & 0.065 \\ & & 0.118 & 0.084 \\ \dots & & & 0.243 \end{bmatrix} \quad Z_{n0} = j \begin{bmatrix} 0.038 & 0.023 & 0.003 \\ & 0.196 & 0.026 \\ \dots & & 0.056 \end{bmatrix}$$

El circuito equivalente a la secuencia homopolar está abierto en el nudo 4, por lo que dicho nudo no aparece en la matriz correspondiente.

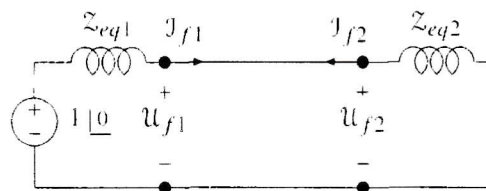
Suponiendo que el sistema es equilibrado y se encuentra inicialmente en vacío, con todas las tensiones a 1.0 p.u., determinar, para un fallo fase-fase rígido en el nudo 2:

1. Las intensidades de cortocircuito en el punto del fallo.
2. Las componentes simétricas de las tensiones en todos los nudos durante el fallo.

**Resolución**

Usando las impedancias equivalentes en el nudo 2 que nos proporcionan las matrices de impedancias de nudos,  $Z_{eq1} = Z_{eq2} = 0.132j$ , y la interconexión correspondiente a un fallo fase-fase, tal y como se muestra en la Figura 13.78, tenemos:

$$J_{f1} = -J_{f2} = \frac{1 \angle 0}{0.132j + 0.132j} = -3.7878j$$



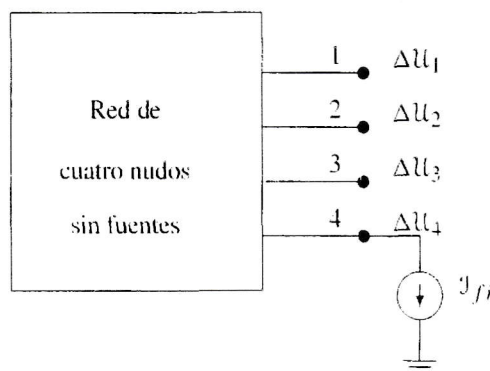
**Figura 13.78** Interconexión para el fallo fase-fase.

La intensidad de homopolar es  $J_{f0} = 0$  en fallos fase-fase.

Pasando a fases:

$$\begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} J_{f0} \\ J_{f1} \\ J_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -6.5608 \\ 6.5608 \end{bmatrix}$$

Para el segundo apartado aplicaremos el teorema de compensación, de modo que, para la secuencia  $i$ , los incrementos de tensiones de los nudos  $j$ ,  $\Delta u_j$ , los obtenemos con la matriz de impedancias de nudos y el vector de intensidades entrantes de cada secuencia, como se muestra en la Figura 13.79.



**Figura 13.79** Aplicación del teorema de compensación.

- Secuencia homopolar:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \end{bmatrix} = Z_{n0} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Secuencia directa:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \end{bmatrix} = Z_{n1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 3.7878j \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.25 \\ -0.5 \\ -0.204 \\ -0.246 \end{bmatrix}$$

- Secuencia inversa:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \end{bmatrix} = Z_{n1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -3.7878j \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.5 \\ 0.204 \\ 0.246 \end{bmatrix}$$

Las tensiones durante el fallo, las obtenemos sumando a los incrementos, las tensiones prefalía (tensión  $1 \underline{0}$  en secuencia directa).

- Secuencia homopolar:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Secuencia directa:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \underline{0} \\ 1 \underline{0} \\ 1 \underline{0} \\ 1 \underline{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.5 \\ 0.795 \\ 0.753 \end{bmatrix}$$

- Secuencia inversa:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.5 \\ 0.204 \\ 0.246 \end{bmatrix}$$