

MÓDULO II. PROBLEMAS RESUELTOS Y PROPUESTOS DE FALLOS EN SISTEMAS DE POTENCIA

PRESENTACIÓN

Con este segundo módulo, formado por los capítulos III y IV, se pretende, una vez asimilados los conceptos teóricos dados para sistemas de potencia trabajando en régimen transitorio (debido a una sobrecarga, un cortocircuito o la rotura accidental de una fase), puedan llevarse a la práctica mediante la resolución de problemas de diversa complejidad. Concretamente el módulo está dividido en dos capítulos bien diferenciados, ya que mientras que el capítulo III (problemas resueltos de cálculo de fallos en sistemas eléctricos de potencia) permite afianzar los conocimientos adquiridos y ganar confianza en la resolución de problemas, el capítulo IV (problemas propuestos de cálculo de fallos en sistemas de potencia) propone una serie de enunciados con sus respectivas soluciones para que el lector pueda ejercitarse en su resolución y comprobar así el nivel de asimilación obtenido a lo largo del estudio de la materia del libro.

El capítulo III está formado por problemas completamente resueltos y comentados del cálculo de los sistemas eléctricos de potencia con funcionamientos anómalos, es decir, con fallos eléctricos. Así el cálculo de sobrecargas, cortocircuitos, dimensionado de sistemas de protección, puestas a tierra, o la selectividad entre protecciones entrarán a formar parte de este capítulo. Para la resolución de estos problemas se han utilizado los métodos explicados en los capítulos II y II de teoría, recordándose que aunque no son los únicos que permiten el cálculo de fallos en sistemas de potencia, sí son los más utilizados. En concreto, el capítulo está formado por diez problemas, estructurados de forma que la dificultad aumenta de forma progresiva, por ello, se aconseja seguir el orden establecido por el libro para una mejor comprensión y más rápida asimilación de los mismos. El capítulo está formado por dos problemas de cálculo de cortocircuitos trifásicos, lo que nos permitirá dimensionar los dispositivos de protección (relés térmicos, magnéticos, diferenciales y fusibles), así como analizar sus sistemas de coordinación o selectividad entre sus componentes. Los tres problemas siguientes versan sobre la aplicación de las componentes simétricas y el empleo de las redes de secuencia, para hallar las solicitaciones eléctricas con cualquiera de los tipos de cortocircuitos explicados, en el punto de la falta. Finalmente, los últimos tres problemas hacen referencia al cálculo de las corrientes y tensiones de cortocircuito no sólo en el punto donde se produce la falta, sino en cualquier parte de la red. Sin duda es en estos tres últimos problemas donde puede comprenderse con más claridad las ventajas que ofrece la utilización de las redes de secuencia y el método de las componentes simétricas, ya que los cálculos se llevan hasta sus últimas consecuencias.

En el capítulo IV, con una experiencia ya adquirida en la resolución de problemas de fallos o defectos eléctricos que pueden afectar a un sistema de potencia, se proponen unos enunciados de problemas con sus respectivas soluciones. En este capítulo se ha dado importancia a los defectos debidos a sobrecargas, así como al cálculo de los más diversos tipos de cortocircuitos. Concretamente, los primeros enunciados versan sobre el diseño de las protecciones eléctricas, el poder de cierre o de corte y la selectividad entre los sistemas de protección; estos problemas nos introducirán en el estudio de uno de los cortocircuitos más violentos, el cortocircuito trifásico. Posteriormente, un buen número de problemas versan sobre el cálculo de las solicitaciones eléctricas en el punto de falta para los diversos tipos de cortocircuitos, siendo ya necesario el empleo de las componentes simétricas. Finalmente, los últimos enunciados de problemas se corresponden con el estudio más completo de los fallos eléctricos, ya que en ellos no sólo se calculan las corrientes y tensiones para cualquier cortocircuito en el punto de la falta, sino que se extiende su cálculo a cualquier punto de la red. Son los problemas más reales y en los que el método de las componentes simétricas y redes de secuencia destacan por su eficacia. Este capítulo abarca un total de 20 enunciados de problemas con sus respectivas soluciones.

CONTENIDOS

- Capítulo III: Problemas resueltos de cálculo de fallos en sistemas eléctricos de potencia.
- Capítulo IV: Problemas propuestos de cálculo de fallos en sistemas eléctricos de potencia.

OBJETIVOS

Problemas resueltos de cálculo de fallos en sistemas eléctricos de potencia

- Conocer las particularidades de los sistemas y dispositivos de protección actuales (relé térmico, magnético, diferencial, fusibles, etc.).
- Conocer las características que definen la coordinación de los sistemas de protección.
- Saber que es la intensidad y el factor de arranque en un relé térmico.
- Saber que es el poder de corte, el poder de cierre y la potencia aparente de desconexión.
- Saber calcular los factores (q , μ , y χ) en las tablas correspondientes.
- Calcular las impedancias equivalentes directas de cortocircuito en un punto determinado de la red.
- Calcular los cortocircuitos trifásicos en cualquier punto de un circuito.
- Saber dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar para diversos componentes y disposiciones de las redes eléctricas.
- Saber calcular las impedancias equivalentes para las redes directa, inversa y homopolar para redes con diferentes niveles de tensión.
- Saber calcular las intensidades y tensiones de cortocircuito en el punto de falta, delante de los cortocircuitos bifásicos, bifásicos a tierra y monofásicos a tierra.
- Saber calcular la corriente máxima asimétrica de cortocircuito y la intensidad de corte en una falta.
- Saber calcular las intensidades y tensiones de cortocircuito no sólo en el punto de falta, sino en cualquier punto del circuito delante de los cortocircuitos bifásicos, bifásicos a tierra y monofásicos a tierra.

Problemas propuestos de cálculo de fallos en sistemas eléctricos de potencia

- Conocer las particularidades de los sistemas y dispositivos de protección actuales (relé térmico, magnético, diferencial, fusibles, etc.). Conocer las características que definen la coordinación de los sistemas de protección.
- Saber que es la intensidad y el factor de arranque en una sobrecarga. Saber que es el poder de corte, el poder de cierre y la potencia aparente de desconexión. Saber calcular los factores (q , μ , y χ) en las tablas correspondientes.
- Calcular las impedancias equivalentes directas de cortocircuito en un punto determinado de la red.
- Calcular los cortocircuitos trifásicos en cualquier punto de un circuito.
- Saber calcular la corriente máxima asimétrica de cortocircuito y la intensidad de corte en una falta.
- Saber dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar para diversos componentes, niveles de tensión y disposiciones de redes eléctricas.
- Saber calcular las intensidades y tensiones de cortocircuito en el punto de falta, delante de los cortocircuitos bifásicos, bifásicos a tierra y monofásicos a tierra.
- Saber calcular las intensidades y tensiones de cortocircuito no sólo en el punto de falta, sino en cualquier punto del circuito delante de los cortocircuitos bifásicos, bifásicos a tierra y monofásicos a tierra.

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..... $X''=0.16$ $X_2=0.18$ $X_0=0.05$

Transformador....25MVA...120/20kV..... $\epsilon_{cc}=0.07$Dyn11.....n=6

Líneas :

Línea L_1 $X_{L1}=8.5 \Omega$ $R_{L1}=2.5 \Omega$

Línea L_2 $X_{L2}=0.11 \Omega$ $R_{L2}=0.09 \Omega$

Línea L_3 $X_{L3}=0.57 \Omega$ $R_{L3}=0.5 \Omega$

- 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

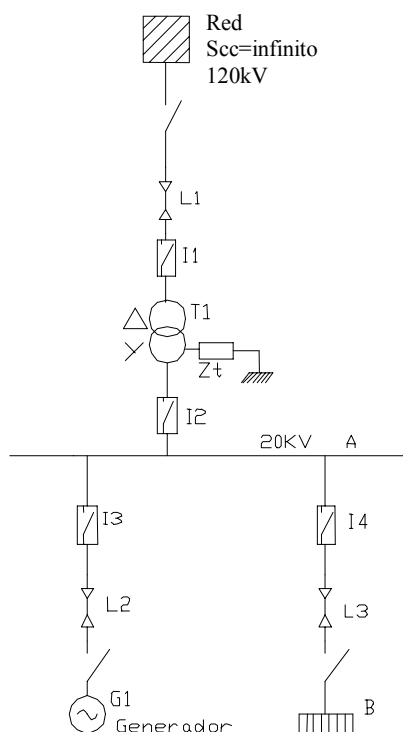


Figura 3.1 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.1

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)**

$$Z_Q = 1.1 \cdot \frac{U_Q^2}{S_Q} = 1.1 \cdot \frac{120^2}{\infty} = 0\Omega$$

- **Transformador (a 120kV)**

$$Z_T = \epsilon_{cc} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = 0.07 \cdot \frac{120000^2}{25 \cdot 10^6} = 40.32\Omega$$

$$R_T = \epsilon_{CCR} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = 0.005 \cdot \frac{120000^2}{25 \cdot 10^6} = 2.88\Omega \quad (\text{El valor de 0.005 se ha obtenido en tablas})$$

$$\bar{X}_T = \sqrt{Z_T - R_T} = j40.21\Omega$$

$$\bar{Z}_T = (R + jX) = (2.88 + j40.21) = 40.31 \angle 85.9^\circ \Omega$$

- **Generador (a 20kV)**

$$X_{1g} = X'' \cdot \frac{U_g^2}{S_g} = 0.16 \cdot \frac{20000^2}{14 \cdot 10^6} = j4.57\Omega \quad R_{1g} = 0.07 \cdot X_{1g} = 0.32\Omega$$

$$X_{2g} = X'' \cdot \frac{U_g^2}{S_g} = 0.18 \cdot \frac{20000^2}{14 \cdot 10^6} = j5.14\Omega \quad \bar{Z}_g' = (R + jX) = (0.32 + j4.57) = 4.58 \angle 86^\circ \Omega$$

- **Líneas (línea 1º a 120kV, líneas 2º y 3º 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**

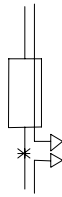
$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{120}{20} = 6$$

- **Intensidad de cortocircuito que afectan a cada interruptor (cortocircuitos trifásicos)**

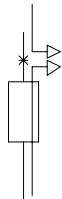
Los interruptores automáticos sirven para proteger un circuito contra las sobrecargas y los cortocircuitos. Pero primeramente resulta imprescindible protegerlos a ellos mismos, es por ello que se determina que poder de corte y que poder de cierre les corresponde delante de los cortocircuitos más desfavorables que pueden darse (cuando se produce un cortocircuito muy cercano a ellos, ya que en éstas 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 1º (a 120kV)**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3U}'' &= 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = 1,1 \cdot \frac{120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 8,86 \angle 73,6^\circ} = 8601,6 \angle -73,6^\circ A \\ \bar{Z}_{KU} &= \bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} = (2,5 + j8,5) = 8,86 \angle 73,6^\circ \Omega \\ \bar{I}_{k3D}'' &= 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = 1,1 \cdot \frac{120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 209,4 \angle 85,2^\circ} = 365 \angle -85,2^\circ A \\ \bar{Z}_{KD} &= \bar{Z}_T + (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_G) \cdot m^2 = (17,64 + j208,7) = 209,4 \angle 85,2^\circ \Omega\end{aligned}$$

- **Interruptor 2º (a 20kV)**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3U}'' &= 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = 1,1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1,361 \angle 83,7^\circ} = 9332,6 \angle -83,7^\circ A \\ \bar{Z}_{KU} &= \bar{Z}_Q' + \bar{Z}_{L1}' + \bar{Z}_T' = (0,149 + j1,353) = 1,361 \angle 83,7^\circ \Omega \\ \bar{I}_{k3D}'' &= 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = 1,1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 4,7 \angle 85^\circ} = 2702,5 \angle -85^\circ A \\ \bar{Z}_{KD} &= (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_G) = (0,41 + j4,68) = 4,7 \angle 85^\circ \Omega\end{aligned}$$

- **Interruptor 3º (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 4º (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 (χ), 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 1º**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{sU} &= \sqrt{2} \cdot \chi_{1U} \cdot \bar{I}_{k3}'' = 17030.3 \angle -73.6^\circ \text{ A} \rightarrow \chi_{1U} = 1.4 \\ \bar{I}_{sD} &= \sqrt{2} \cdot \chi_{1D} \cdot \bar{I}_{k3}'' = 929.1 \angle -85.2^\circ \text{ A} \rightarrow \chi_{1D} = 1.8\end{aligned}$$

$$\text{Con: } \frac{R}{X_L} = \frac{2.5}{8.5} = 0.294 \text{ entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{1U} = 1.4$$

$$\text{Con: } \frac{R}{X_L} = \frac{17.64}{208.7} = 0.084 \text{ entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{1D} = 1.8$$

- **Interruptor 2º**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{sU} &= \sqrt{2} \cdot \chi_{2U} \cdot \bar{I}_{k3}'' = 22701 \angle -83.7^\circ \text{ A} \rightarrow \chi_{2U} = 1.72 \\ \bar{I}_{sD} &= \sqrt{2} \cdot \chi_{2D} \cdot \bar{I}_{k3}'' = 6803.0 \angle -85^\circ \text{ A} \rightarrow \chi_{2D} = 1.78\end{aligned}$$

$$\text{Con: } \frac{R}{X_L} = \frac{0.149}{1.353} = 0.1101 \text{ entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{2U} = 1.72$$

$$\text{Con: } \frac{R}{X_L} = \frac{0.410}{4.68} = 0.087 \text{ entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{2D} = 1.78$$

- Interruptor 3º

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 4º

$$\bar{I}_{sU} = \sqrt{2} \cdot \chi_{4U} \cdot \bar{I}_{k3}'' = 28944.9 \angle -84^\circ A \rightarrow \chi_{4U} = 1.7$$

$$\bar{I}_{sD} = \sqrt{2} \cdot \chi_{4D} \cdot \bar{I}_{k3}'' = 0 A \quad (\text{no existe aportación inferior ya que en barras "B" hay consumidores}).$$

$$\text{Con: } \frac{R}{X_L} = \frac{0.1105}{1.050} = 0.1050 \quad \text{entrando en la tabla 12.1, obtenemos: } \chi_{4U} = 1.70$$

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 " μ " 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 " 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.

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 " 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 cuando se produce un cortocircuito, obteniéndose el cociente anterior:

• Interruptor 1º

$$\bar{I}_{aU} = \bar{I}_{k3U}'' \cdot \mu_U \cdot q_U = 8601.6 \angle -73.6^\circ A \rightarrow \mu_U = 1$$

$$\bar{I}_{aD} = \bar{I}_{k3D}'' \cdot \mu_D \cdot q_D = 273.7 \angle -85.2^\circ A \rightarrow \mu_D = 0.75$$

$$\frac{I_{k3D}''}{I_{ng}} = \frac{365.6}{404.1} = 5.46 \quad \text{y con la tabla 12.2, obtenemos: } \mu_D = 0.75$$

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".

$$\bar{I}_{aD} = \bar{I}_{k3}'' \cdot \mu \cdot q = 0 \text{ A (ya que no existe aportación de corriente por la parte inferior)}$$

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 4º

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3B}'' &= \bar{I}_{K3I4}'' = 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_K} = 1,1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1,73 \angle 69,35^\circ} = 7342 \angle -69,35^\circ \text{ A} \\ \bar{Z}_K &= ((\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T) // (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_g)) + \bar{Z}_{L3} = 1,73 \angle 69,35^\circ \Omega\end{aligned}$$

Esta intensidad de cortocircuito total, se repartirá por las dos ramas de la siguiente forma:

• Interruptor 2º: (rama de la red)

$$\bar{I}_{k3I2}'' = \bar{I}_{k3B}'' \cdot \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{L2})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{g1})} = 5697,4 \angle -69,1^\circ \text{ A}$$

• Interruptor 3º: (rama del generador)

$$\bar{I}_{k3I3}'' = \bar{I}_{k3B}'' \cdot \frac{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_T + \bar{Z}'_{L1})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{g1})} = 1644,7 \angle -70,4^\circ \text{ A}$$

• Interruptor 1º

$$\bar{I}_{k3I1}'' = \bar{I}_{k3I2}'' \cdot \frac{1}{m} = 949,5 \angle -69,1^\circ \text{ A}$$

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:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{k3A}'' &= 1,1 \cdot \frac{\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_K} = 1,1 \cdot \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1,055 \angle 83,99^\circ} = 12038 \angle -84^\circ \text{ A} \\ \bar{Z}_K &= (\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T) // (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_g) = 1,056 \angle 84^\circ \Omega\end{aligned}$$

Esta corriente total de cortocircuito se repartirá entre las ramas del transformador y del generador de la siguiente forma:

- **Interrupor 2° (rama transformador)**

$$\bar{I}_{k3I2}'' = \bar{I}_{k3A}'' \cdot \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{L2})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{g1})} = 9341.5 \angle -83.7^\circ A$$

- **Interrupor 3° (rama generador)**

$$\bar{I}_{k3I3}'' = \bar{I}_{k3A}'' \cdot \frac{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_T + \bar{Z}'_{L1})}{(\bar{Z}'_Q + \bar{Z}'_{L1} + \bar{Z}'_T + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{g1})} = 2696.5 \angle -85^\circ A$$

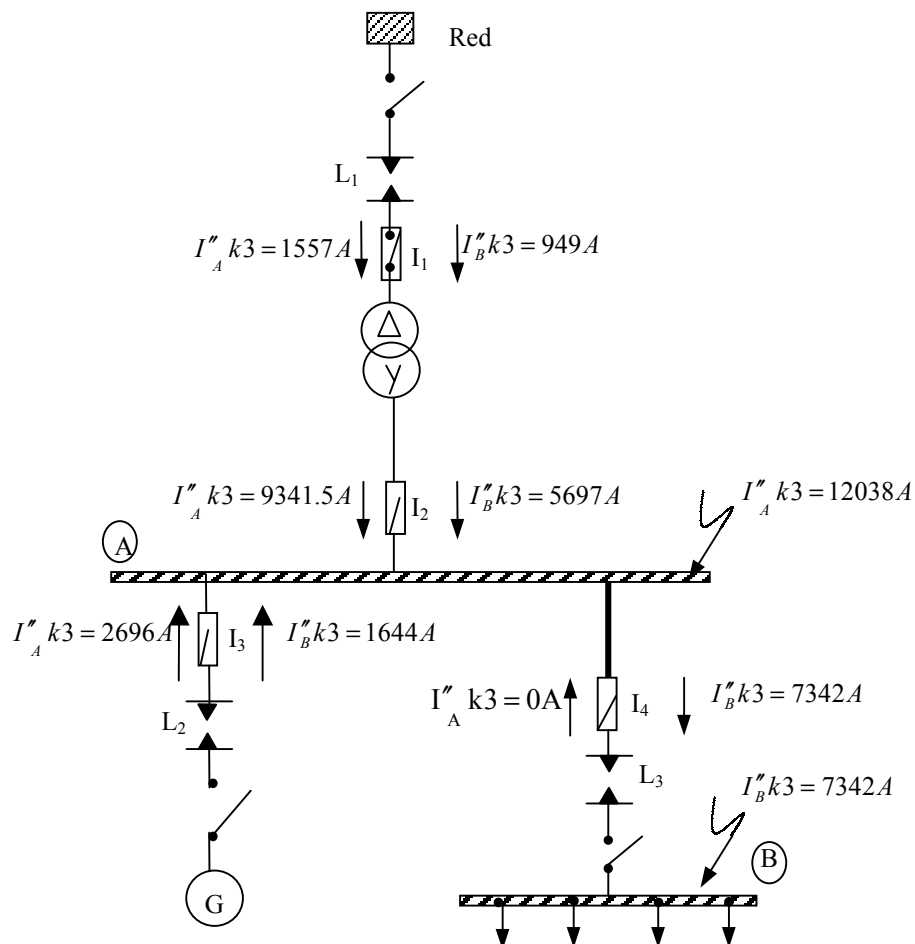
- **Interrupor 1°**

$$\bar{I}_{k3I1}'' = \bar{I}_{k3I2}'' \cdot \frac{1}{m} = 1557 \angle -83.7^\circ A$$

- **Interrupor 4°**

$$\bar{I}_{k3}'' = \bar{I}_{k3I4}'' = 0 \angle 0^\circ A \quad (\text{no existe aportación de corriente por parte de los consumidores}).$$

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:

$$I_{1n} = 400 \text{ A} \quad I_{1\text{mag}} = 3 \cdot I_n = 1200 \text{ A} < I''_{AK3} = 1557 \text{ A} \text{ con un retardo de } 0.5 \text{ sg}$$
- El interruptor I_2 , tiene que actuar tanto para faltas en "A" como para faltas en "B":

$$I_{2n} = 1250 \text{ A} \quad I_{2\text{mag}} = 4 \cdot I_n = 5000 \text{ A} < I''_{BK3} = 5697 \text{ A} \text{ con un retardo de } 0.3 \text{ sg}$$
- El interruptor I_3 , tiene que actuar tanto para faltas en "A" como para faltas en "B":

$$I_{3n} = 800 \text{ A} \quad I_{3\text{mag}} = 1.5 \cdot I_n = 1200 \text{ A} < I''_{BK3} = 1645 \text{ A} \text{ con un retardo de } 0.3 \text{ sg}$$
- El interruptor I_4 , tiene que actuar ante faltas en "B", y aguas abajo de "B", como no sabemos cuánto "aguas abajo", adoptamos:

$$I_{4n} = 1250 \text{ A} \quad I_{4\text{mag}} = 4 \cdot I_n = 5000 \text{ A} < I''_{K3B} = 7342 \text{ A} \text{ con un retardo de } 0.1 \text{ sg}$$

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..... $\cos \varphi = 0.94$ $I_{arr}/I_n = 5$ $\eta = 70\%$ $n = 1500$ rpm.

Transformador.....20MVA.....110/10KV..... $\varepsilon_{cc} = Z_1 = Z_2 = 12\%$ $Z_o = 0.9 \cdot Z_1$ $X_n = j1\Omega$

$$\varepsilon_{RCC} = X_1 = X_2 = 0.6\%$$

L_1 $Z_1 = Z_2 = (0.8 + j2.8)\Omega$ $X_o = 2.5 \cdot X_1$

L_2 $Z_1 = Z_2 = (0.015 + j0.2)\Omega$ $X_o = 2.5 \cdot X_1$

L_3 $Z_1 = Z_2 = (0.04 + j0.4)\Omega$ $X_o = 2.5 \cdot X_1$

- 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

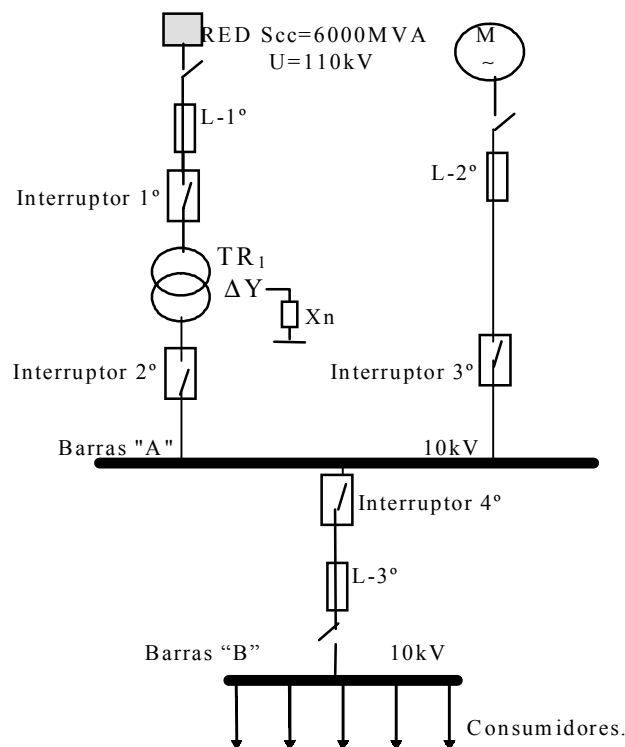


Figura 3.2 Esquema unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.2

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 (I_c) y elección de las intensidades nominales mediante los valores dados en el enunciado**

$$S_n = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot U_n \rightarrow I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \Rightarrow \begin{array}{l} \text{- Valor nominal} \\ I_{c1} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = 105A \\ I_{c2} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 1155A \\ I_{c3} = \frac{16 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10^3} = 924A \\ I_{c4} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10^3} = 1155A \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{- Adoptamos} \\ I_{n1} = 400A \\ I_{n2} = 1600A \\ I_{n3} = 1250A \\ I_{n4} = 1600A \end{array}$$

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).

$$\begin{aligned} I_{arrq1} &= I_{c1} \cdot 1.1 = 115.5A \\ I_{arrq2} &= I_{c2} \cdot 1.1 = 1270.5A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{arrq3} &= I_{c3} \cdot 1.1 = 1016.4A \\ I_{arrq4} &= I_{c4} \cdot 1.1 = 1270.5A \end{aligned}$$

- **Quedando los coeficientes de arranque**

$$C_{arrq-1} = \frac{I_{arr1}}{I_{n1}} = 0.29$$

$$C_{arrq-2} = \frac{I_{arr2}}{I_{n2}} = 0.79$$

$$C_{arrq-3} = \frac{I_{arr3}}{I_{n3}} = 0.81$$

$$C_{arrq-4} = \frac{I_{arr4}}{I_{n4}} = 0.79$$

Para el interruptor "I₂" 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)**

$$\bar{Z}_Q = 1.1 \frac{U_n^2}{S_n} = 1.1 \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{6000 \cdot 10^6} = 2.22 \Omega$$

$$\bar{X}_Q = 0.995 \cdot \bar{Z}_Q = 0.995 \cdot 2.22 = j2.207 \Omega$$

$$R_Q = 0.1 \cdot X_Q = 0.1 \cdot 2.207 = 0.2207 \Omega$$

$$\bar{Z}_Q = (0.2207 + j2.207) = 2.22 \angle 85^\circ \Omega$$

- **Línea 1º (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)

$$\bar{Z}_M = \frac{1}{\frac{I_{arrq}}{In}} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1}{5} \frac{(10)^2}{16} = 1.25 \Omega \quad \text{como } \frac{MW}{npp} \geq 1 \text{ tendremos:}$$

$$\bar{X}_M = 0.995 \cdot \bar{Z}_M = 0.995 \cdot 1.25 = j1.24 \Omega$$

$$R_M = 0.1 \cdot X_M = 0.1 \cdot 1.24 = 0.124 \Omega$$

$$\bar{Z}_M = (0.124 + j1.24) = 1.25 \angle 84^\circ \Omega$$

- **Línea 2º (a 10kV)**

$$\bar{Z}_{L2} = (0.015 + j0.2) = 0.2 \angle 85^\circ \Omega$$

- **Línea 3º (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).

$$(\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR}) = (4.65 + j77.5) = 77.64 \angle 86.6^\circ \Omega \text{ (calculadas a 110kV)}$$

$$\bar{Z}_A = (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR})' = (0.038 + j0.64) = 0.642 \angle 86.6^\circ \Omega \text{ (calculadas a 10kV)}$$

$$\bar{Z}_B = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega \text{ (calculadas a 10kV)}$$

$$(\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2}) = (16.82 + j174.24) = 175.5 \angle 84.5^\circ \Omega \text{ (calculadas a 110kV)}$$

$$(\bar{Z}_A // \bar{Z}_B)' = \frac{0.9309 \angle 171.1^\circ}{(0.177 + j2.08)} = \frac{0.9309 \angle 171.1^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 0.445 \angle 85.9^\circ = (0.0317 + j0.443) \Omega \text{ (a 10kV)}$$

$$(\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_Q)' = (1.0207 + j5) = 5.1 \angle 78.7^\circ \Omega \text{ (calculadas a 110kV)}$$

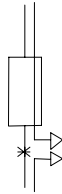
- **Intensidades de cortocircuito que afectan a cada interruptor (suponiendo cortocircuitos trifásicos)**

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

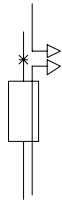
cortocircuitos más desfavorables que pueden darse (cuando se produce un cortocircuito muy cercano a ellos, lo que determina las más bajas impedancias y por tanto las más elevadas intensidades).

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 1º**

$$\bar{I}_{1uK3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{1u}} = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1})} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 5.1 \angle 78.7^\circ} = 13698 \angle -78.7^\circ A$$

$$\bar{Z}_{1u} = (\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_Q) = (1.0207 + j5) = 5.1 \angle 78.7^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_{1DK3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_Q + \bar{Z}'_{L2} + \bar{Z}'_M)} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 247.6 \angle 85.3^\circ} = 282 \angle -85.3^\circ A$$

$$\bar{Z}_{1D} = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_M) = (20.45 + j246.8) = 247.6 \angle 85.3^\circ \Omega$$

- **Interruptor 2º**

$$\bar{I}_{2uK3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.642 \angle 86.6^\circ} = 9892 \angle -86.6^\circ A$$

$$\bar{Z}_{2u} = (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR}) = (0.038 + j0.64) = 0.642 \angle 86.6^\circ \Omega$$

$$\bar{I}_{2DK3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_M)} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.45 \angle 84.5^\circ} = 4380 \angle -85^\circ A$$

$$\bar{Z}_{2D} = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2}) = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega$$

- **Interruptor 3°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{3uK3}'' &= \frac{1.1\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_M)} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.45 \angle 84.5^\circ} = 4380 \angle -85^\circ A \\ \bar{Z}_{3U} &= (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega \\ \bar{I}_{3DK3}'' &= \frac{1.1\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.642 \angle 86.6^\circ} = 9892 \angle -86.6^\circ A \\ \bar{Z}_{3D} &= (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR})' = (0.038 + j0.64) = 0.642 \angle 86.6^\circ \Omega\end{aligned}$$

- **Interruptor 4°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{4uK3}'' &= \frac{1.1\bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \left[(\bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_M) // (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T) \right]'} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.445 \angle 85.9^\circ} = 14272 \angle -85.9^\circ A \\ \bar{Z}_{4U} &= (\bar{Z}_A // \bar{Z}_B)' = \frac{0.9309 \angle 171.1^\circ}{(0.177 + j2.08)} = \frac{0.9309 \angle 171.1^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 0.445 \angle 85.9^\circ = (0.0317 + j0.443) \Omega \\ \bar{I}_{4DK3}'' &= \frac{1.1 \cdot 0}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{L3}} = 0 A \quad (\text{Ya que no existe corriente por la parte inferior de este interruptor})\end{aligned}$$

- **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 χ , 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°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{S1-U} &= \sqrt{2} \cdot \bar{I}_{1uK3}'' \cdot \chi_{1u} = \sqrt{2} \cdot 13698 \angle -78.7^\circ \cdot 1.55 = 30026 \angle -78.7^\circ A \\ \bar{Z}_{1U} &= (\bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_Q) = (1.0207 + j5) = 5.1 \angle 78.7^\circ \Omega \quad \frac{R_{1U}}{X_{1U}} = \frac{1.021}{5} = 0.204 \rightarrow X_{1u} = 1.55 \\ \bar{I}_{S1-D} &= \sqrt{2} \cdot \bar{I}_{1DK3}'' \cdot \chi_{1D} = \sqrt{2} \cdot 282 \angle -85.3^\circ \cdot 1.81 = 722 \angle -85.3^\circ A \\ \bar{Z}_{1D} &= (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_M) = (20.45 + j246.8) \Omega \quad \frac{R_{1D}}{X_{1D}} = \frac{20.45}{246.8} = 0.083 \rightarrow X_{1D} = 1.81\end{aligned}$$

- **Interruptor 2°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{S2-U} &= \sqrt{2} \cdot \bar{I}_{2uK3}'' \cdot \chi_{2u} = \bar{I}_{S3-D} = \sqrt{2} \cdot 9892 \angle -86.6^\circ \cdot 1.87 = 26160 \angle -86.6^\circ A \\ \bar{Z}_{2U} &= \bar{Z}_A = (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR})' = (0.038 + j0.64) \Omega \quad \frac{R_{2U}}{X_{2U}} = \frac{0.038}{0.64} = 0.059 \rightarrow X_{1u} = 1.87 \\ \bar{I}_{S2-D} &= \sqrt{2} \cdot \bar{I}_{2DK3}'' \cdot \chi_{2D} = \bar{I}_{S3-U} = \sqrt{2} \cdot 4380 \angle -85^\circ \cdot 1.79 = 11088 \angle -85^\circ A \\ \bar{Z}_{2D} &= \bar{Z}_B = (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega \quad \frac{R_{2D}}{X_{2D}} = \frac{0.139}{1.44} = 0.096 \rightarrow X_{2D} = 1.79\end{aligned}$$

- **Interruptor 3°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{S3-U} &= \sqrt{2} \cdot I''_{2D \cdot K3} \cdot \chi_{3U} = I_{S2-D} = \sqrt{2} \cdot 4380 \angle -85^\circ \cdot 1.79 = 11088 \angle -85^\circ A \\ \bar{Z}_{3U} = \bar{Z}_B &= (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2}) = (0.139 + j1.44) = 1.45 \angle 84.5^\circ \Omega \quad \frac{R_{3U}}{X_{3U}} = \frac{0.139}{1.44} = 0.0965 \rightarrow X_{3U} = 1.79 \\ \bar{I}_{S3-D} &= \sqrt{2} \cdot I''_{2u \cdot K3} \cdot \chi_{3D} = \bar{I}_{S2-U} = \sqrt{2} \cdot 9892 \angle -86.6^\circ \cdot 1.87 = 26160 \angle -86.6^\circ A \\ \bar{Z}_{3D} = \bar{Z}_A &= (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{TR})' = (0.038 + j0.64) \Omega \quad \frac{R_{3D}}{X_{3D}} = \frac{0.038}{0.64} = 0.059 \rightarrow X_{3D} = 1.87\end{aligned}$$

- **Interruptor 4°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{S4-U} &= \sqrt{2} \cdot I''_{4u \cdot K3} \cdot X_{4u} = \sqrt{2} \cdot 14272 \angle -85.2^\circ \cdot 1.85 = 37340 \angle -85.20^\circ A \\ \bar{Z}_{4U} &= (\bar{Z}_A // \bar{Z}_B) = 0.445 \angle 85.9^\circ = (0.0317 + j0.443) \Omega \quad \frac{R_{4U}}{X_{4U}} = \frac{0.0318}{0.443} = 0.07 \rightarrow X_{4U} = 1.85 \\ \bar{I}_{S4-D} &= 0 \quad (\text{De las barras "B" no existe aportación de corriente ya que son consumidores}).\end{aligned}$$

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°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{a1-U} &= \bar{I}''_{K3U} \cdot \mu_U \cdot q_U = 13698 \angle -78.7^\circ \cdot 1 = 13698 \angle -78.7^\circ A \\ \mu_U = q_U &= 1 \quad \text{Sin máquinas asíncronas, y con una acometida (generador alejado).} \\ \bar{I}_{a1-D} &= \bar{I}''_{K3D} \cdot \mu_D \cdot q_D = 282 \angle -85.3^\circ \cdot 0.86 \cdot 0.73 = 177 \angle -85.3^\circ A \\ \frac{I''_{K3D}}{I'_{nM}} &= \frac{282}{924} = \frac{282}{84} = 3.35 \quad \text{con } t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_D = 0.78; \quad q_D = 0.73 \quad (\text{ver su cálculo más adelante}).\end{aligned}$$

- **Interruptor 2°**

$$\begin{aligned}\bar{I}_{a2-U} &= \bar{I}''_{K3-U} \cdot \mu_U \cdot q_U = 9892 \angle -86.6^\circ \cdot 1 = 9892 \angle -86.6^\circ A \\ \mu_U = 1, \quad q_U &= 1 \quad \text{no está afectado por máquinas síncronas ni asíncronas.} \\ \bar{I}_{a2-U} &= \bar{I}_{a3u} = 4380 \angle -85^\circ \cdot 0.78 \cdot 0.73 = 2494 \angle -85^\circ A\end{aligned}$$

$$\frac{I''_{K3U}}{I_n} = \frac{4380}{(924)} = 4.74 \quad \text{con } t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_U = 0.78. q_U = 0.73 \text{ (ver cálculo de coeficientes más adelante)}$$

• **Interruptor 3º**

$$\bar{I}_{a3-U} = \bar{I}''_{K3-U} \cdot \mu_U \cdot q_U = 4380 \angle -85^\circ \cdot 0.78 \cdot 0.73 = 2494 \angle -85^\circ A$$

$$\frac{I''_{K3U}}{I_{nM}} = \frac{4380}{924} = 4.74 \quad \text{con } t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_U = 0.78$$

Cálculo del coeficiente (q_U):

$$I_{nM} = \frac{S_{nM}}{V_{nM} \sqrt{3}} = \frac{16 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 924 A$$

$$P_{Motor} = S \cdot \cos \phi = 16 \cdot 10^6 \cdot 0.94 = 15.10^6 MW$$

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \Rightarrow p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = \frac{3000}{1500} = 2$$

$$\eta = 0.7 \text{ (rendimiento del grupo de motores)}$$

$$P_{real} = 15 \cdot 10^6 \cdot 0.7 = 10.53 MW$$

$$\frac{MW}{pp} = \frac{10.53}{2} = 5.26 \frac{MW}{pp}$$

Entrando en la gráfica tendremos: $q_U = 0.73$

Por su parte la corriente de corte inferior será:

$$\bar{I}_{a3-D} = \bar{I}_{a2-U} = 9892 \angle -86.6^\circ \cdot 1 = 9892 \angle -86.6^\circ A$$

• **Interruptor 4º**

$$\bar{I}_{a4-U} = \bar{I}_{a2-U} + \bar{I}_{a3-U} = 12386 \angle -86^\circ A$$

$$\bar{I}_{a4-D} = \bar{I}''_{K34D} \cdot \mu_D \cdot q_D = 0 \cdot \mu \cdot q = 0 \text{ (no hay contribución de corriente por la parte inferior).}$$

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:

$$\bar{I}_{AK3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{AK3}''} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.445 \angle 85.4^\circ} = 14272 \angle -85.4^\circ A$$

$$\bar{Z}_{AK3}'' = \left[(\bar{Z}_T + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_Q)' // (\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' \right] = \bar{Z}_A' // \bar{Z}_B' = 0.445 \angle 85.4^\circ \Omega$$

- **Interruptor I_2**

$$\bar{I}_{I2K3}'' = \bar{I}_{AK3}'' \frac{(\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})'}{(\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' + (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)'} = 14272 \angle -85.4^\circ \frac{1.45 \angle 84.5^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 9901 \angle -86.6^\circ A$$

- **Interruptor I_1**

$$\bar{I}_{I1K3}'' = \frac{\bar{I}_{I2K3}''}{m} = \frac{9901 \angle -86.6^\circ}{11} = 900 A \angle -86.6^\circ \Omega$$

- **Interruptor I_3**

$$\bar{I}_{I3K3}'' = \bar{I}_{BK3}'' \frac{(\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)'}{(\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' + (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)'} = 14272 \angle -85.4^\circ \frac{0.642 \angle 86.6^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 4384 \angle -84^\circ A$$

- **Interruptor I_4**

$$\bar{I}_{I4K3}'' = 0 A \text{ (no hay contribución de corriente por parte de los consumidores).}$$

- **Cortocircuito en las barras "B"**

La intensidad de cortocircuito total en barras "B" y será:

$$\bar{I}_{BK3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{BK3}''} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.846 \angle 85.1^\circ} = 7507 \angle -85.1^\circ A$$

$$\bar{Z}_{BK3}'' = (\bar{Z}_{AK3}'' + \bar{Z}_{L3})' = (0.0718 + j0.843) = 0.846 \angle 85.1^\circ \Omega$$

- **Interruptor I_4** . La intensidad en el interruptor I_4 , coincide con la intensidad total de cortocircuito en barras "B".

$$\bar{I}_{I4K3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{BK3}''} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.846 \angle 85.1^\circ} = 7507 \angle -85.1^\circ A = \bar{I}_{BK3}''$$

- **Interruptor I_2**

$$\bar{I}_{I2K3}'' = \bar{I}_{BK3}'' \frac{(\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})'}{(\bar{Z}_M + \bar{Z}_{L2})' + (\bar{Z}_Q + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_T)'} = 7507 \angle -85.1^\circ \frac{1.45 \angle 84.5^\circ}{2.09 \angle 85.2^\circ} = 5208 \angle -85.7^\circ A$$

- **Interruptor I_1**

$$\bar{I}_{I1K3}'' = \frac{\bar{I}_{I2K3}''}{m} = \frac{5208 \angle -85.7^\circ}{11} = 473.5 \angle -85.7^\circ A$$

- *Interruptor I_3 .*

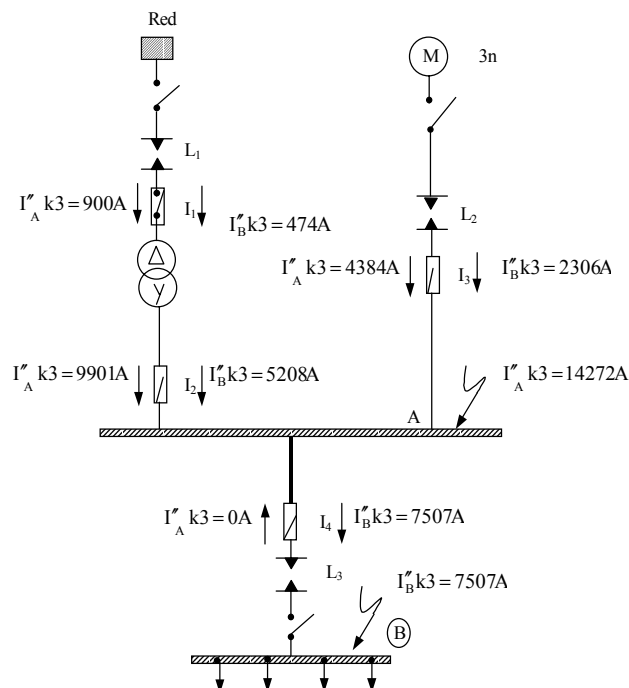
$$\overline{I}_{I3K3}'' = \overline{I}_{BK3}'' \frac{(\overline{Z}_Q + \overline{Z}_{L1} + \overline{Z}_T)'}{(\overline{Z}_M + \overline{Z}_{L2})' + (\overline{Z}_Q + \overline{Z}_{L1} + \overline{Z}_T)'} = 7507 \angle -85.1^\circ \frac{0.642 \angle 86.6^\circ}{2.09 \angle 85.2} = 2306 \angle -85.6^\circ A$$

- **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 I₄.
 - Falta en las barras "B" → Actuará I₄ y I₂ ó I₃.
 - Falta en las barras "A" → Actuará en I₂, I₃ y I₁.
 - I_{aM} = Sin_M = S·924 = 4620 A. Durante 10 seg.
- El interruptor I₁, no queremos que actúe ante faltas en "B", pero sí ante faltas en "A". Por tanto:
- $$I_{1n} = 400 \text{ A} \quad I_{1mag} = 2 \cdot I_n = 800 \text{ A} < I_{A3}'' = 900 \text{ A} \quad \text{retardo de 0.5 sg}$$
- El interruptor I₂, tiene que actuar tanto para faltas en "A" como para faltas en "B":
- $$I_{2n} = 1600 \text{ A} \quad I_{2mag} = 3 \cdot I_n = 4800 \text{ A} < I_{B3}'' = 5280 \text{ A} \quad \text{retardo de 0.3 sg}$$
- El interruptor I₄, tiene que actuar ante faltas en "B" y aguas abajo de "B", como no sabemos cuánto "aguas abajo", adoptamos:
- $$I_{4n} = 1600 \text{ A} \quad I_{4mag} = 3 \cdot I_n = 4800 \text{ A} < I_{B4}'' = 7507 \text{ A} \quad \text{retardo de 0.1 sg}$$

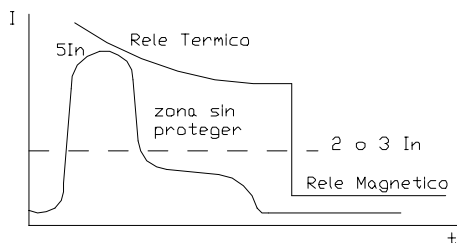


- El interruptor I_3 es el más problemático, ya que incorpora un motor.

Teóricamente tendría que actuar tanto para faltas en "A" como con faltas en "B", pues la menor intensidad es: $I_B'' k3 = 2306A$ y la $I_{3 mag} < 2306 A$. Pero el motor arranca a $5I_n = 5 \cdot 924 = 4620A$. Por tanto su intensidad deberá quedar por encima de este valor.

- **Protección de motores**

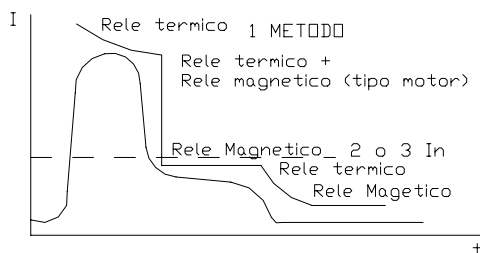
En el caso de que existan motores asíncronos las protecciones, se tienen que dimensionar de otra forma. Esto es debido a la gráfica intensidad-tiempo. En un motor, si lo protegemos de la misma forma que en los casos anteriores, dejaríamos una zona sin proteger, como vemos en la figura siguiente:



Para evitar este inconveniente podemos optar por dos formas de protección diferentes:

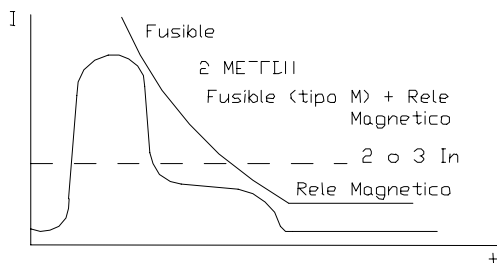
1. Mediante un relé térmico y un relé magnético de tipo motor

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.....	$\varepsilon_{x1cc} = \varepsilon_{x2cc} = 22.5\%$	$X_0 = 0.9 \cdot X_1$	$X_n = 3.75\%$
T_{R2}	50 MVA.....	100/10KV.....	$\varepsilon_{x1cc} = \varepsilon_{x2cc} = 14.4\%$	$X_0 = 0.9 \cdot X_1$	$X_n = 0\%$
L_1	$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = (0.06 + j0.12)\Omega \dots \bar{Z}_0 = 2.5\bar{Z}_1$				
L_2	$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = (2 + j6)\Omega \dots \bar{Z}_0 = 2.5\bar{Z}_1$				

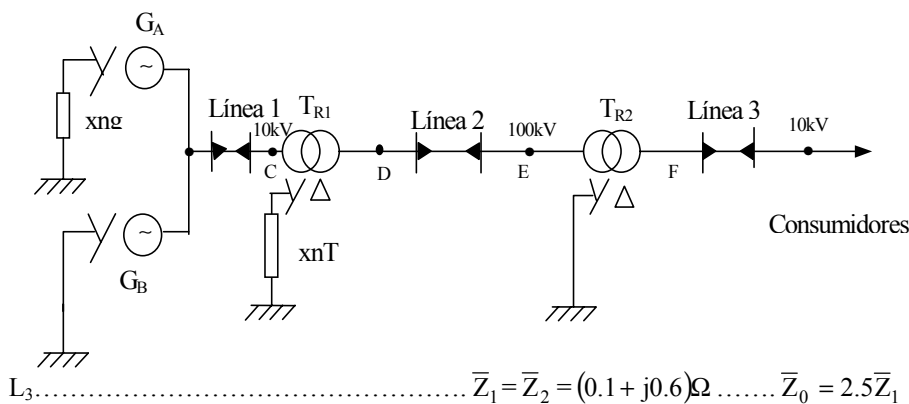


Figura 3.3 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.3

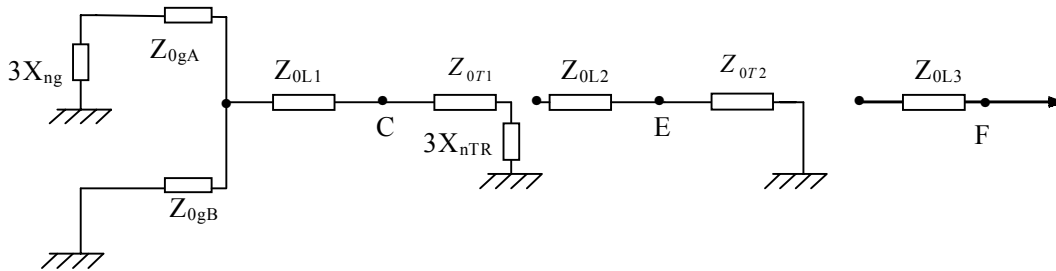
HALLAR

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.)

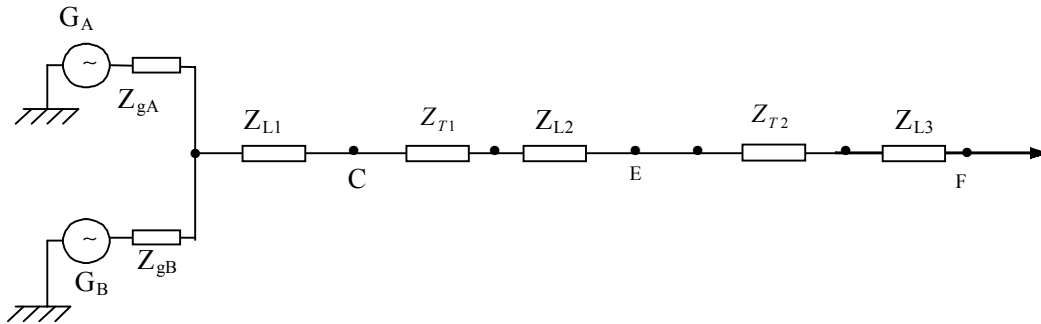
RESOLUCIÓN

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} $\bar{X}_{1T1} = \bar{X}_{2T1} = 0.225 \frac{(100)^2}{50} = j45\Omega$ $\bar{X}_{0T1} = 0.9 \bar{X}_{1T1} = j40.5\Omega$ $\bar{X}_{nT1} = j7.5\Omega$

- T_{R2} $\bar{X}_{1T2} = \bar{X}_{2T2} = 0.1425 \frac{(100)^2}{50} = j28.8\Omega$ $\bar{X}_{0T2} = 0.9 \bar{X}_{1T2} = j25.92\Omega$ $\bar{X}_{nT2} = 0\Omega$
- L_1 $\bar{Z}_{1L1} = \bar{Z}_{2L1} = (6 + j12) = 13.4\angle 63.43^\circ \Omega$
 $\bar{Z}_{oL1} = 2.5\bar{Z}_{1L1} = (15 + j30) = 33.5\angle 63.4^\circ \Omega$
- L_2 $\bar{Z}_{1L2} = \bar{Z}_{2L2} = (2 + j6) = 6.32\angle 71.6^\circ \Omega$
 $\bar{Z}_{oL2} = 2.5\bar{Z}_{1L2} = (5 + j15) = 15.8\angle 71.6^\circ \Omega$
- L_3 $\bar{Z}_{1L3} = \bar{Z}_{2L3} = (10 + j60) = 60.8\angle 80.5^\circ \Omega$
 $\bar{Z}_{oL3} = 2.5\bar{Z}_{1L3} = (25 + j150) = 152\angle 80.5^\circ \Omega$

• **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)**

$$\bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{C1} = \left[(\bar{Z}_{gA} // \bar{Z}_{gB}) + \bar{Z}_{L1} \right] = [(j0.6 // j0.47) + (0.06 + j0.12)] = j0.2636 + (0.06 + j0.12)\Omega$$

$$\bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{2C} = (0.06 + j0.384) = 0.388\angle 81.1^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{0C} = \left[(3X_{ngA} + X_{ogA}) // X_{ogB} \right] + Z_{oL1} // \left[(3X_{nTR1} + Z_{oT1}) \right] =$$

$$\bar{Z}_{0C} = \left[(3 \cdot j0.1 + j0.24) // j0.188 \right] + (0.15 + j0.3) // \left[(3 \cdot (j0.075) + j0.405) \right] =$$

$$\bar{Z}_{0C} = (j0.54 // j0.188) + (0.15 + j0.3) // (j0.63) =$$

$$\bar{Z}_{0C} = (j0.1394) + (0.15 + j0.3) // (j0.63) = [0.15 + j0.4390] // j0.63 = 0.271\angle 79.2^\circ = (0.0507 + j0.27)\Omega$$

$$\bar{Z}_C = \bar{Z}_{1C} + \bar{Z}_{2C} + \bar{Z}_{0C} = (0.170 + j1.033) = 1.047\angle 80.7^\circ \Omega$$

• **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)

$$I''_{k3} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{1C}} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 0.388 \angle 81.1^\circ} = 16368 \angle -81.1^\circ \text{ A}$$

$$I''_{k2} = \frac{1.1 \cdot U_n}{(Z_{1C} + Z_{2C})} = \frac{1.1 \cdot 10000 \angle 0^\circ}{2 \cdot 0.388 \angle 81.1^\circ} = 14175.3 \angle -81.1^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}''_{k1} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{(\bar{Z}_{1C} + \bar{Z}_{2C} + \bar{Z}_{0C})} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 10000 \angle 0^\circ}{1.047 \angle 80.7^\circ} = 18197 \angle -80.7^\circ \text{ A}$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I_s":** (aplicando el coeficiente χ , gráfica 12.1)

Para hallar esta corriente es necesario recordar que:

- La corriente máxima asimétrica de cortocircuito "I_s" 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 " χ ", 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:

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{s3} &= \sqrt{2} \cdot I''_{k3} \cdot X_3 = \sqrt{2} \cdot 16368 \angle -81.1^\circ \cdot 1.62 = 37500 \angle -81.1^\circ \text{ A} \\ \text{con } \frac{R_1}{X_1} &= \frac{0.06}{0.384} = 0.156 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_3 = 1.62 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{s2} &= \sqrt{2} \cdot I''_{k2} \cdot X_2 = \sqrt{2} \cdot 14175.3 \angle -81.1^\circ \cdot 1.62 = 32476 \angle -81.1^\circ \text{ A} \\ \text{Con } \frac{R_1 + R_2}{X_1 + X_2} &= \frac{2 \cdot 0.06}{2 \cdot 0.384} = 0.156 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_2 = 1.62 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{s1} &= \sqrt{2} \cdot I''_{k1} \cdot X_1 = \sqrt{2} \cdot 18197 \angle -80.17^\circ \cdot 1.61 = 41432 \angle -80.17^\circ \text{ A} \\ \text{Con } \frac{R_1 + R_2 + R_0}{X_1 + X_2 + X_0} &= \frac{0.170}{1.033} = 0.164 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_1 = 1.61 \end{aligned}$$

- **La corriente simétrica de corte "I_a" 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:

$$\bar{I}_{a3} = I''_{k3} \cdot \mu \cdot q = I_{agA} + I_{agB}$$

En esta fórmula aparecen dos coeficientes:

- Coeficiente μ : se obtiene en las gráficas 12.2 de los anexos para cada generador (existirán tantos μ , 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 μ . 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 (μ), 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 " μ " y " q " para cada una de las máquinas eléctricas del circuito (generadores síncronos, y motores asíncronos respectivamente), ya podemos buscar las correspondientes " I_a " (una para cada máquina eléctrica). La " I_a " que nos interesa es la total (la del punto de cortocircuito), por tanto, debemos ir sumando cada una de las " I_a " parciales obtenidas en cada máquina hasta llegar al punto de cortocircuito. La suma total de todas las contribuciones será la " I_a " 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 " μ " 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 " I_a ".

Operando en consecuencia con lo comentado anteriormente, y para las barras "C", tendremos:

$$\bar{I}_{aC} = I''_{k3} \cdot \mu \cdot q = I_{agA} + I_{agB} = (5248.5 + j7067.3) = 12315.8 \angle -81.1^\circ A$$

$$I_{ng1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 1154.7 A$$

$$I_{ng2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 1732 A$$

Si $\bar{I}''_{k3C} = 16368 \angle -81.1^\circ A$ La aportación de cada generador será:

$$\bar{I}''_{g1K3} = \bar{I}''_{C K3} \frac{\bar{Z}_{gB}}{\bar{Z}_{gB} + \bar{Z}_{gA}} = 16368 \angle -81.1^\circ \frac{j0.47}{(j0.47 + j0.6)} = 7189.7 \angle -81.1^\circ A$$

$$\bar{I}''_{g2K3} = \bar{I}''_{C K3} \frac{\bar{Z}_{gA}}{\bar{Z}_{gB} + \bar{Z}_{gA}} = 16368 \angle -81.1^\circ \frac{j0.6}{(j0.47 + j0.6)} = 9178.3 \angle -81.1^\circ A$$

$$\text{Entonces } \frac{I''_{gAK3}}{I''_{ngA}} = \frac{7189.7}{1154.7} = 6.22 \quad \frac{I''_{gBK3}}{I''_{ngB}} = \frac{9178.3}{1732} = 5.3 \text{ (con un } tv=0.1sg)$$

$$\mu_{gA} = 0.73 \quad \mu_{gB} = 0.77$$

$$I_{agA} = I''_{gAk3} \cdot \mu_{gA} \cdot q_{gA} = 7189.7 \angle -81.1^\circ \cdot 0.73 \cdot 1 = 5248.5 \angle -81.1^\circ A$$

$$I_{agB} = I''_{gBk3} \cdot \mu_{gB} \cdot q_{gB} = 9178.3 \angle -81.1^\circ \cdot 0.77 \cdot 1 = 7067.3 \angle -81.1^\circ A$$

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).

$$\begin{aligned}\bar{I}_{K3}'' &= \frac{1.1 \cdot 100000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 89.7 \angle 84.9^\circ} = 708 \angle -84.9^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{K2}'' &= \frac{1.1 \cdot 100000 \angle 0^\circ}{2 \cdot 89.7 \angle 84.9^\circ} = 613.15 \angle -84.9^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{K1}'' &= \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 100000 \angle 0^\circ}{205.14 \angle 85.5^\circ} = 928.8 \angle -85.5^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I_s":** (aplicando el coeficiente χ , gráfica 12.1)

Recordando todo lo expuesto en la primera pregunta de este problema sobre la intensidad "I_a" 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:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{S3}'' &= \sqrt{2} \cdot 708 \angle -84.9^\circ \cdot 1.74 = 1742.2 \angle -84.9^\circ \text{ A} \\ \text{con } \frac{R_1}{X_1} &= \frac{8}{89.3} = 0.09 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_3 = 1.74 \\ \bar{I}_{S2}'' &= \sqrt{2} \cdot 613.15 \angle -84.9^\circ \cdot 1.74 = 1508.12 \angle -84.9^\circ \text{ A} \\ \text{con } \frac{R_1 + R_2}{X_1 + X_2} &= \frac{2 \cdot 8}{2 \cdot 89.3} = 0.09 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_2 = 1.74 \\ \bar{I}_{S1}'' &= \sqrt{2} \cdot 928.8 \angle -85.5^\circ \cdot 1.78 = 2338 \angle -85.5^\circ \text{ A} \\ \text{con } \frac{R_1 + R_2 + R_0}{X_1 + X_2 + X_0} &= \frac{16}{204.5} = 0.078 \rightarrow \text{gráfica 12.1, } \chi_1 = 1.78\end{aligned}$$

- **La corriente simétrica de corte "I_a" 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:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{K3}'' &= 708 \angle -84.9^\circ \text{ A} \text{ que pasada al otro extremo del transformador (barras "C"), nos da:} \\ \bar{I}_{K3}'' &= 7080 \angle -84.9^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

Por tanto, la contribución de cada generador será, aplicando los divisores de intensidad:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{gAK3}'' &= 7080 \angle -84.9^\circ \frac{j0.47}{(j0.47 + j0.6)} = 3110 \angle -84.9^\circ \text{ A} \\ I_{ngA} &= 1154.7 \text{ A} \\ \bar{I}_{gBK3}'' &= 7080 \angle -84.9^\circ \frac{j0.6}{(j0.47 + j0.6)} = 3970 \angle -84.9^\circ \text{ A} \\ I_{ngB} &= 1732 \text{ A}\end{aligned}$$

Entonces:

$$\frac{I''_{K3gA}}{I_{ngA}} = \frac{3110}{1154.7} = 2.69 \rightarrow \mu_{gA} = 0.92 \text{ con } tv=0.1s \text{ (gráfica 12.2).}$$

$$\frac{I''_{K3gB}}{I_{ngB}} = \frac{3970}{1732} = 2.292 \rightarrow \mu_{gB} = 0.98 \text{ con } tv=0.1s \text{ (gráfica 12.2).}$$

$$I_{agA} = 3110 \angle -84.9^\circ \cdot 0.92 = 2861.2 \angle -84.9^\circ A$$

$$I_{agB} = 3970 \angle -84.9^\circ \cdot 0.98 = 3890.6 \angle -84.9^\circ A$$

$$I_{a3E} = 6751.8 \angle -84.9^\circ A$$

$$\bar{I}'_{a3E} = \frac{\bar{I}_{a3E}}{m_1} = 675.18 \angle -84.9^\circ A$$

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 "Is":** (aplicando el coeficiente χ , gráfica 12.1).

Recordando todo lo expuesto en la primera pregunta de este problema sobre la intensidad "Is", 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_a" 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:

$$\bar{I}_{aF} = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB} = 1562.8 \angle -84.2^\circ \cdot 1.1 + 1995 \angle -84.2^\circ \cdot 1.1 = 3557.9 \angle -84.2^\circ A$$

$$\text{Con } I_{ngA} = 1154.7A \quad I_{ngB} = 1732A$$

Sí 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 μ 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_{k3}". 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	$X''_d=X_1=X_2=20\%$	$X_0=6\%$	$X_n=j4\Omega$
G_2 :	100MVA	10KV	$X''_d=X_1=X_2=20\%$	$X_0=10\%$	$X_n=0$
G_3 :	25MVA	25KV	$X''_d=X_1=X_2=25\%$	$X_0=10\%$	$X_n=0$
T_{R1} y T_{R2} :	20MVA	110/10KV	$\varepsilon_{cc}=X_1=X_2=9\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
T_{R3} :	60MVA	110/25KV	$\varepsilon_{cc}=X_1=X_2=10\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
T_{R4} :	100MVA	110/10KV	$\varepsilon_{cc}=X_1=X_2=8\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
L_1 :			$X_1=X_2=j30\Omega$	$X_0=j50\Omega$	
L_2 :			$X_1=X_2=j30\Omega$	$X_0=j60\Omega$	
L_3 :			$X_1=X_2=j40\Omega$	$X_0=j90\Omega$	

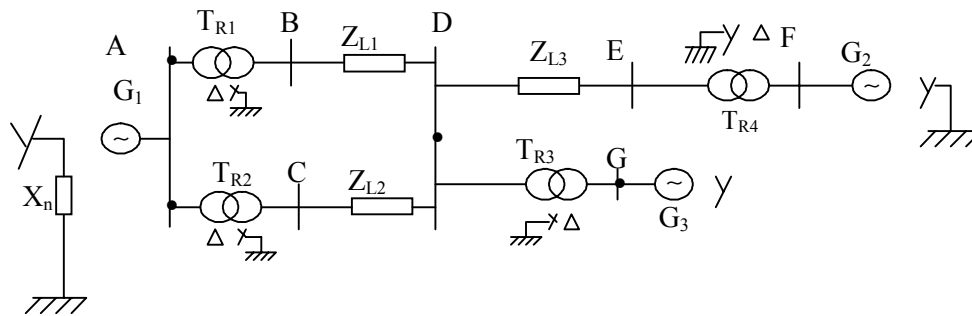


Figura 3.4 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.4

HALLAR

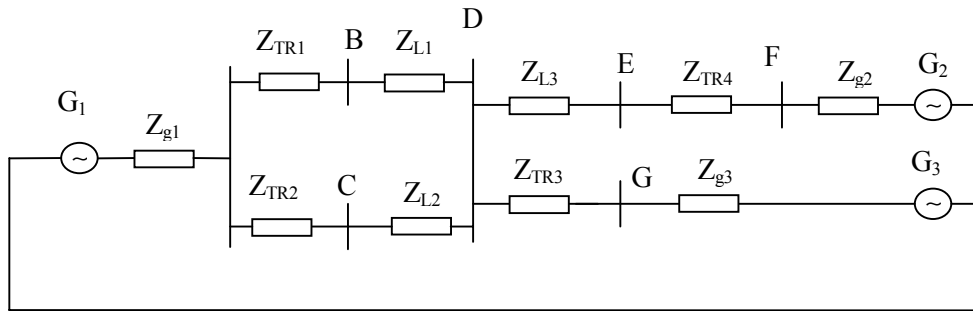
- 1 Dibujar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar, de la red representada.
- 2 En el supuesto de producirse unos cortocircuitos (monofásicos, bifásicos, trifásicos) en las barras de interconexión "D", ¿cuáles serán las corrientes iniciales de cortocircuito y las máximas corrientes asimétricas 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

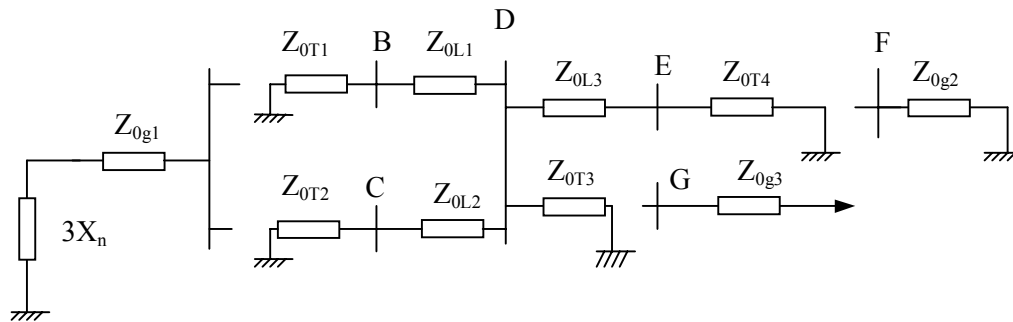
1. Redes de secuencia directa, indirecta y homopolar

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_1 $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.20 \frac{(10)^2}{40} = j0.5\Omega$ $\bar{X}_0 = 0.06 \frac{(10)^2}{40} = j0.15\Omega$ $X_n = j4\Omega$
- G_2 $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.20 \frac{(10)^2}{100} = j0.2\Omega$ $\bar{X}_0 = 0.1 \frac{(10)^2}{100} = j0.10\Omega$ $X_n = 0\Omega$
- G_3 $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.25 \frac{(25)^2}{25} = j6.25\Omega$ $\bar{X}_0 = 0.1 \frac{(25)^2}{25} = j2.5\Omega$ $X_n = 0\Omega$
 $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j6.25}{\left(\frac{25}{10}\right)^2} = j1\Omega$ $\bar{X}_0 = \frac{j2.5}{\left(\frac{25}{10}\right)^2} = j0.4\Omega$ $X_n = 0\Omega$
- $T_{R1}=T_{R2}$ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.09 \frac{(10)^2}{20} = j0.45\Omega$ $\bar{X}_0 = j0.405\Omega$ $X_n = 0\Omega$
- T_{R3} $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.10 \frac{(25)^2}{60} = j1.04\Omega$ $\bar{X}_0 = j0.936\Omega$ $X_n = 0\Omega$
 $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j1.04}{\left(\frac{25}{10}\right)^2} = j0.166\Omega$ $\bar{X}_0 = j0.15\Omega$ $X_n = 0\Omega$
- T_{R4} $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(10)^2}{100} = j0.08\Omega$ $\bar{X}_0 = j0.072\Omega$ $X_n = 0\Omega$
- L_1 $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j30}{\left(\frac{110}{10}\right)^2} = j0.25\Omega$ $\bar{X}_0 = \frac{j50}{11^2} = j0.41\Omega$
- L_2 $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j30}{11^2} = j0.25\Omega$ $\bar{X}_0 = \frac{j60}{11^2} = j0.496\Omega$

$$\bullet L_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j40}{11^2} = j0.33\Omega \quad \bar{X}_0 = \frac{j90}{11^2} = j0.74\Omega$$

• **Cálculo de impedancias (todas las impedancias están calculadas a 110kV)**

$$\begin{aligned} \bullet G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j0.5 \cdot 11^2 = j60.5\Omega & \bar{X}_0 &= j0.15 \cdot 11^2 = j18.15\Omega & X_n &= j44\Omega \\ \bullet G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j0.2 \cdot 11^2 = j24.2\Omega & \bar{X}_0 &= j0.1 \cdot 11^2 = j12.1\Omega & X_n &= 0\Omega \\ \bullet G_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j6.25 \left(\frac{110}{25} \right)^2 = j121\Omega & \bar{X}_0 &= j2.5 \left(\frac{110}{25} \right)^2 = j48.4\Omega & X_n &= 0\Omega \\ \bullet T_{R1}=T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= 0.09 \frac{(110)^2}{20} = j54.45\Omega & \bar{X}_0 &= j54.45 \cdot 0.9 = j49\Omega & X_n &= 0\Omega \\ \bullet T_{R3} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= 0.10 \frac{(110)^2}{60} = j20.14\Omega & \bar{X}_0 &= 0.9 \cdot j24.14 = j18.11\Omega & X_n &= 0\Omega \\ \bullet T_{R4} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= 0.08 \frac{(110)^2}{100} = j9.68\Omega & \bar{X}_0 &= 0.9 \cdot j9.68 = j8.71\Omega & X_n &= 0\Omega \\ \bullet L_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j30\Omega & \bar{X}_0 &= j50\Omega \\ \bullet L_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j30\Omega & \bar{X}_0 &= j60\Omega \\ \bullet L_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 &= j40\Omega & \bar{X}_0 &= j90\Omega \end{aligned}$$

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)**

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1D} = \bar{Z}_{2D} &= [\bar{Z}_{g1} + (\bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{L1}) // (\bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L2})] // [(\bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{TR4} + \bar{Z}_{g2}) // (\bar{Z}_{TR3} + \bar{Z}_{g3})] = \\ \bar{Z}_{1D} = \bar{Z}_{2D} &= [j60.5 + (j84.45 // j84.45)] // [(j73.88) // (j141.14)] = (j102.7) // (j73.88 // j141.14) = \\ \bar{Z}_{1D} = \bar{Z}_{2D} &= (j102.7 // j48.49) = 32.95 \angle 90^\circ = (0 + j32.95)\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{oD} &= [(\bar{Z}_{0T1} + \bar{Z}_{0L1}) // (\bar{Z}_{0T2} + \bar{Z}_{0L2})] // [(\bar{Z}_{0L3} + \bar{Z}_{0T4}) // (\bar{Z}_{0T3})] = \\ \bar{Z}_{oD} &= [j99 // j109] // [(j98.71) // (j18.11)] = (j51.88 // j15.30) = \\ \bar{Z}_{oD} &= 11.82 \angle 90^\circ = (0 + j11.82)\Omega \end{aligned}$$

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)**

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= [(\bar{Z}_{g1} + (\bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{L1}) // (\bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L2})) // (\bar{Z}_{TR3} + \bar{Z}_{g3})] + (\bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{TR4}) // [\bar{Z}_{g2}] = \\ \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= [j0.5 + (j0.7 // j0.7)] // (j1.166) + (j0.41) // j0.2 = [(j0.85 // j1.166) + j0.41] // (j0.2) = \\ \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= ((j0.49 + j0.41) // j0.2) = (j0.9 // j0.2) = (0 + j0.164) = 0.164 \angle 90^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{oF} = \bar{Z}_{og2} = (0 + j0.1) = 0.1 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{TF} = \bar{Z}_{oF} + \bar{Z}_{1F} + \bar{Z}_{2F} = (0 + j0.428) = 0.428 \angle 90^\circ \Omega$$

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)

$$\bar{I}_{K1}'' = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 110000 \angle 0^\circ}{72.72 \angle 90^\circ} = 2696.6 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K2}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (32.95 \angle 90^\circ)} = 1836 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3}'' = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} = \frac{1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 32.95 \angle 90^\circ} = 2120 \angle -90^\circ A$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "I_s":** (aplicando el coeficiente χ , 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_a" 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:

$$\bar{I}_{a3} = \bar{I}_{K3}'' \cdot \mu \cdot q = \bar{I}_{agA} + \bar{I}_{agB}$$

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:

$$\bar{I}_{K3}'' = 2120 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3g2g3}'' = 2120 \angle -90^\circ \left(\frac{102.7 \angle 90^\circ}{151.2 \angle 90^\circ} \right) = 1440 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3g2}'' = 1440 \angle -90^\circ \frac{141.14 \angle 90^\circ}{215 \angle 90^\circ} = 945 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3g3}'' = 1440 \angle -90^\circ \frac{73.88 \angle 90^\circ}{215 \angle 90^\circ} = 495 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K3g1}'' = 2120 \angle -90^\circ \left(\frac{48.5 \angle 90^\circ}{151.2 \angle 90^\circ} \right) = 680 \angle -90^\circ A$$

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.

$$\bullet \bar{V}_{3R} = \bar{V}_{3S} = \bar{V}_{3T} = 0$$

$$\bullet \bar{V}_2 = \frac{c \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3}} \frac{2\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{1.1 \cdot 11000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \frac{2 \cdot 32.95 \angle 90^\circ}{2 \cdot 32.95 \angle 90^\circ} = 69859.4 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$\bullet \bar{V}_{2T} = \sqrt{3} \cdot c \cdot \bar{U}_n \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_0 + \bar{Z}_0 \bar{Z}_2} = \sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 11000 \angle 0^\circ \frac{389.4 \angle 180^\circ}{1864.6 \angle 180^\circ} = 43768 \angle 0^\circ \text{ V}$$

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_s ”:** (aplicando el coeficiente χ , 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:

$$\bar{I}_{s1} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (44515 \angle -90^\circ) = 125907 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{s2} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (33537 \angle -90^\circ) = 94857 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{s3} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (38725 \angle -90^\circ) = 109530 \angle -90^\circ A$$

- **La corriente simétrica de corte “ I_a ” trifásica será (todas a 10kV):** (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:

$$\bar{I}''_{k3} = 38725 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{K3g2} = 38725 \angle -90^\circ \frac{0.9 \angle 90^\circ}{1.1 \angle 90^\circ} = 31684 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{K3g1,g3} = 38725 \angle -90^\circ \frac{0.2 \angle 90^\circ}{1.1 \angle 90^\circ} = 7041 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{K3g1} = 7041 \angle -90^\circ \frac{1.166 \angle 90^\circ}{2.016 \angle 90^\circ} = 4072.3 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{K3g3} = 7041 \angle -90^\circ \frac{0.85 \angle 90^\circ}{2.016 \angle 90^\circ} = 2968.7 \angle -90^\circ A$$

Recordar que las intensidades nominales halladas a 10kV (g_1 y g_2) y 25kV (g_3) son:

$$I_{ng1} = \frac{40 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 2309.4 A$$

$$I_{ng2} = \frac{100 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 5773.5 A$$

$$I_{ng3} = \frac{25 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 577.35 A$$

Por tanto las relaciones intensidad de cortocircuito, intensidad nominal serán (a igual nivel de tensión):

$$\frac{I''_{K3g1}}{I_{ng1}} = \frac{4072.3}{2309.4} = 1.76 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_1 = 1$$

$$\frac{I''_{K3g2}}{I_{ng2}} = \frac{31684}{5773} = 5.5 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_2 = 0.75$$

$$\frac{I''_{K3g3}}{I_{ng3}} = \frac{2968.7}{577.35} = \frac{2968.7}{577.35 \cdot \frac{11}{4.4}} = \frac{2968.7}{1443.4} = 2.05 \rightarrow t_v = 0.1 \text{ sg} \rightarrow \mu_3 = 1$$

$$\bar{I}_{aF} = (4072.3 \angle -90^\circ) \cdot 1.1 + (31684 \angle -90^\circ) \cdot 1.0.75 + (2968.7 \angle -90^\circ) \cdot 1.1 = 30804 \angle -90^\circ A$$

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: $\bar{a} = 1\angle 0^\circ$ $\bar{a}^2 = 1\angle 120^\circ$ $\bar{a}^3 = 1\angle 240^\circ$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{K2Es}^* &= jc\bar{U}_n \frac{\bar{a}\bar{Z}_2 - \bar{Z}_o}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1\bar{Z}_3 + \bar{Z}_2\bar{Z}_o} = \\ \bar{I}_{K2Et}^* &= -jc\bar{U}_n \frac{\bar{a}^2\bar{Z}_2 - \bar{Z}_o}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1\bar{Z}_3 + \bar{Z}_2\bar{Z}_o} = \\ I''_{K2EE} &= -\sqrt{3}c\bar{U}_n \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1\bar{Z}_3 + \bar{Z}_2\bar{Z}_o} =\end{aligned}$$

Con:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_1\bar{Z}_3 + \bar{Z}_2\bar{Z}_o &= 1864.6\angle 180^\circ = (-1864.6 + j0)\Omega \\ \bar{a}\bar{Z}_2 - \bar{Z}_o &= 32.95\angle 210^\circ - 11.82\angle 90^\circ = 40.18\angle -135.3^\circ \Omega \\ \bar{a}^2\bar{Z}_2 - \bar{Z}_o &= 32.95\angle 330^\circ - 11.82\angle 90^\circ = 40.18\angle -44.8^\circ \Omega\end{aligned}$$

Por tanto:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{K2Es}^* &= 1.1 \cdot 110000 \left(\frac{40.18\angle -135.3^\circ + 90^\circ}{1864.6\angle 180^\circ} \right) = 2607.4\angle 134.7^\circ A = (-1836 + j1853)A \\ \bar{I}_{K2Et}^* &= 1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ \left(\frac{40.18\angle (-44.8^\circ - 90^\circ)}{1864.6\angle 180^\circ} \right) = 2607.4\angle 45.2^\circ = (1836 + j1850)A \\ I''_{K2EE} &= \sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 110000 \angle 0^\circ \left(\frac{32.95\angle 90^\circ}{1864.6\angle 180^\circ} \right) = 3703.5\angle -90^\circ A\end{aligned}$$

(0+j3703.2)

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	$\varepsilon_{cc}=X_1=X_2=14\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
T_{R2} :	70MVA	120/30KV	$\varepsilon_{cc}=X_1=X_2=12\%$	$X_0=0.9 \cdot X_1$	$X_n=0$
L_1 :			$X_1=X_2=j25\Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1$	
L_2 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 :			$X_1=X_2=j10\Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1$	

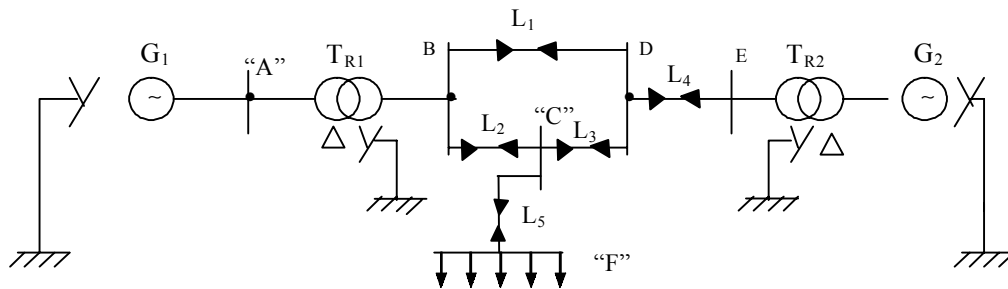


Figura 3.5 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.5

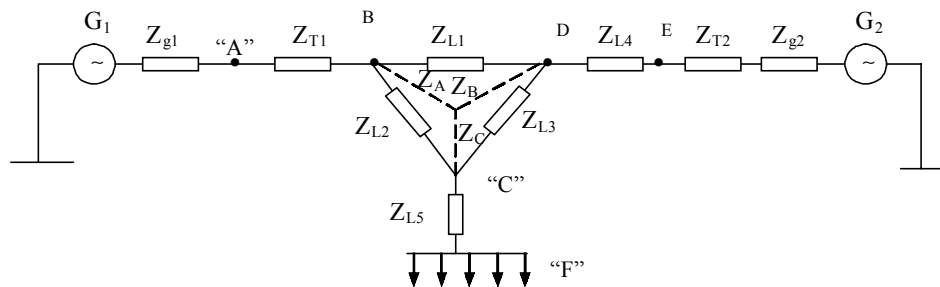
HALLAR

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 "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).
3. 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} , 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). Finalmente indicar las corrientes de cortocircuito bifásico a tierras (I''_{kEE} , I''_{kSE} , I''_{kTE}) que se producirían en las barras citadas.
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).

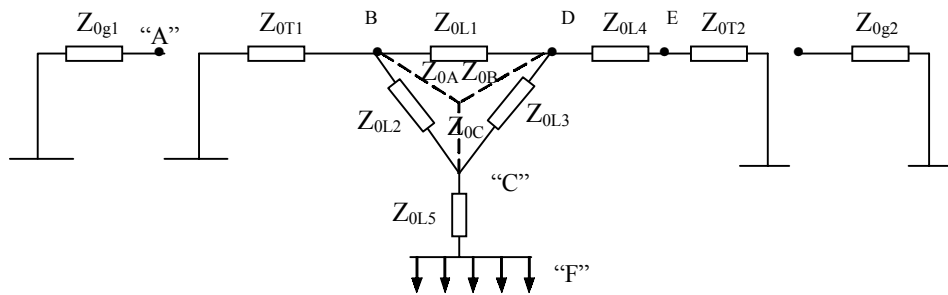
RESOLUCIÓN

1. Redes de secuencia directa, inversa y homopolar

- Red de secuencia 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)**

- $G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.16 \frac{(30)^2}{30} = j4.8\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \frac{(30)^2}{30} = j1.2\Omega \quad X_n = j0\Omega$
- $G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.18 \frac{(30)^2}{60} = j2.7\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \frac{(30)^2}{60} = j0.6\Omega \quad X_n = j0\Omega$
- $T_{R1} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.14 \frac{(30)^2}{30} = j4.2\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.9 \cdot X_1 = j3.78\Omega \quad X_n = j0\Omega$
- $T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.12 \frac{(30)^2}{70} = j1.542\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.9 \cdot X_1 = j1.39\Omega \quad X_n = j0\Omega$
- $L_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j25}{\left(\frac{120}{30}\right)^2} = j1.562\Omega \quad \bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j3.91\Omega$
- $L_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j20}{4^2} = j1.25\Omega \quad \bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j3.125\Omega$
- $L_3 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j20}{4^2} = j1.25\Omega \quad \bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j3.125\Omega$

- L₄ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j22}{4^2} = j1.375\Omega$ $\bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j3.44\Omega$
- L₅ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j10}{4^2} = j0.625\Omega$ $\bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j1.562\Omega$

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:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{YAO} &= 2.5 \cdot \bar{Z}_{YA1} = 2.5 \cdot j0.481 = j1.202\Omega \\ \bar{Z}_{YBO} &= 2.5 \cdot \bar{Z}_{YB1} = 2.5 \cdot j0.481 = j1.202\Omega \\ \bar{Z}_{YCO} &= 2.5 \cdot \bar{Z}_{YC1} = 2.5 \cdot j0.385 = j0.961\Omega\end{aligned}$$

• **Cálculo de impedancias (todas las impedancias están calculadas a 120kV)**

- G₁ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j4.8 \left(\frac{120}{30} \right)^2 = j76.8\Omega$ $\bar{X}_0 = j1.2 \left(\frac{120}{30} \right)^2 = j19.2\Omega$ $X_n = j0\Omega$
- G₂ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j2.7 \left(\frac{120}{30} \right)^2 = j43.2\Omega$ $\bar{X}_0 = j0.6 \left(\frac{120}{30} \right)^2 = j9.6\Omega$ $X_n = j0\Omega$
- T_{R1} $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.14 \frac{(120)^2}{30} = j67.2\Omega$ $\bar{X}_0 = 0.9 \cdot X_1 = j60.48\Omega$ $X_n = j0\Omega$
- T_{R2} $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.12 \frac{(120)^2}{70} = j24.68\Omega$ $\bar{X}_0 = 0.9 \cdot X_1 = j22.22\Omega$ $X_n = j0\Omega$
- L₁ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j25\Omega$ $\bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j62.5\Omega$
- L₂ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j20\Omega$ $\bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j50\Omega$
- L₃ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j20\Omega$ $\bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j50\Omega$
- L₄ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j22\Omega$ $\bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j55\Omega$
- L₅ $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j10\Omega$ $\bar{X}_0 = 2.5 \cdot \bar{X}_1 = j25\Omega$

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)**

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1A} = \bar{Z}_{2A} &= \left[(\bar{Z}_{g2} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_B + \bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1}) \right] // (\bar{Z}_{g1}) = \\ \bar{Z}_{1A} = \bar{Z}_{2A} &= [(j2.7 + j1.542 + j1.375 + j0.481 + j0.481 + j4.2)] // (j4.8) = [(j10.78) // (j4.8)] = \\ \bar{Z}_{1A} = \bar{Z}_{2A} &= (0 + j3.32) = 3.32 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{0A} = \bar{Z}_{og1} = j1.2\Omega$$

$$\bar{Z}_{TA} = \bar{Z}_{1A} + \bar{Z}_{2A} + \bar{Z}_{0A} = j7.84\Omega$$

- **Impedancias vistas desde las Barras "C" (120kV)**

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{2C} &= \left[(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A) \right] // (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_C) = \\ \bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{2C} &= [(j76.8 + j67.2 + j7.692) // (j7.692 + j22 + j24.68 + j43.2)] + (j6.15) = \\ \bar{Z}_{1C} = \bar{Z}_{2C} &= [(j151.69) // (j97.57)] + (j6.15) = (j59.38 + j6.15) = (0 + j65.53) = 65.53 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{0C} &= \left[(\bar{Z}_{oTR1} + \bar{Z}_{oA}) \right] // (\bar{Z}_{oB} + \bar{Z}_{oL4} + \bar{Z}_{oTR2}) + \bar{Z}_{oC} = ((j60.48 + j19.23) // (j19.23 + j55 + j22.22) + j15.38) = \\ \bar{Z}_{0C} &= (j79.71) // (j96.45) + (j15.38) = (j43.64 + j15.38) = (0 + j59.1) = 59.1 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{TC} &= \bar{Z}_{1C} + \bar{Z}_{2C} + \bar{Z}_{0C} = (0 + j190.18) = 190.16 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

- **Impedancias vistas desde las Barras "F" (120kV)**

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= \left[(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A) \right] // (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_C + \bar{Z}_{L5}) = \\ \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= [(j76.8 + j67.2 + j7.692) // (j7.692 + j22 + j24.68 + j43.2)] + (j6.15 + j10) = \\ \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= [(j151.69) // (j97.57)] + (j16.15) = (j59.38 + j16.15) = (0 + j75.53) = 75.53 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{0F} &= \left[(\bar{Z}_{oTR1} + \bar{Z}_{oA}) \right] // (\bar{Z}_{oB} + \bar{Z}_{oL4} + \bar{Z}_{oTR2}) + (\bar{Z}_{oC} + \bar{Z}_{oL5}) = ((j79.71) // (j96.45) + (j15.38 + j25)) = \\ \bar{Z}_{0F} &= (j43.64) + (j40.38) = (0 + j84.02) = 84.02 \angle 90^\circ \Omega \\ \bar{Z}_{TF} &= \bar{Z}_{1F} + \bar{Z}_{2F} + \bar{Z}_{0F} = (0 + j235.1) = 235.1 \angle 90^\circ \Omega\end{aligned}$$

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)).

$$\begin{aligned}\bar{I}_{K3A}'' &= \frac{1.130000\angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 3.32\angle 90^\circ} = 5738.7\angle -90^\circ A & \bar{I}_{S3} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (5738.7\angle -90^\circ) = 16231.5\angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{K2A}'' &= \frac{1.130000\angle 0^\circ}{2 \cdot 3.32\angle 90^\circ} = 4969.8\angle -90^\circ A & \bar{I}_{S2} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (4969.8\angle -90^\circ) = 14057\angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{K1A}'' &= \frac{1.130000\angle 0^\circ \sqrt{3}}{7.84\angle 90^\circ} = 7290.5\angle -90^\circ A & \bar{I}_{S1} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (7290.5\angle -90^\circ) = 20620.6\angle -90^\circ A\end{aligned}$$

- **La corriente simétrica de corte " I_a " 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:

$$\bar{I}_{K3A}'' = \frac{1.130000\angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 3.32\angle 90^\circ} = 5738.7\angle -90^\circ A$$

- 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)).

$$\begin{aligned}\bar{I}_{K3C}^* &= \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 65.53 \angle 90^\circ} = 1163 \angle -90^\circ A & \bar{I}_{S3} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1163 \angle -90^\circ) = 3289 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{K2}^* &= \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (65.53 \angle 90^\circ)} = 1007.2 \angle -90^\circ A & \bar{I}_{S2} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1007.2 \angle -90^\circ) = 2848.8 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{K1}^* &= \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \sqrt{3}}{190.16 \angle 90^\circ} = 1202.3 \angle -90^\circ A & \bar{I}_{S1} &= \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1202.3 \angle -90^\circ) = 3400.6 \angle -90^\circ A\end{aligned}$$

- Las corrientes de cortocircuito bifásico a tierras serán:

- Calculamos la I''_{K2EE} 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: $\bar{a} = 1 \angle 0^\circ$ $\bar{a}^2 = 1 \angle 120^\circ$ $\bar{a}^3 = 1 \angle 240^\circ$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{K2Es}^* &= j c \bar{U}_{nc} \frac{\bar{a} \bar{Z}_2 - \bar{Z}_o}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_3 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_o} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \cdot 108 \angle (-122^\circ + 90^\circ)}{12042 \angle 180^\circ} = 1184 \angle 148^\circ A \\ \bar{I}_{K2Et}^* &= -j c \bar{U}_{nc} \frac{\bar{a}^2 \bar{Z}_2 - \bar{Z}_o}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_3 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_o} = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \cdot 108 \angle (-58.3^\circ - 90^\circ)}{12042 \angle 180^\circ} = 1184 \angle 31.7^\circ A \\ I''_{K2EE} &= -\sqrt{3} c \bar{U}_{nc} \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \bar{Z}_3 + \bar{Z}_2 \bar{Z}_o} = -\sqrt{3} \cdot 1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \frac{65.54 \angle 90^\circ}{12042 \angle 180^\circ} = 1244.3 \angle 90^\circ A\end{aligned}$$

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_a " 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:

$$\vec{I}_{k3g1}'' = 1163 \angle -90^\circ \cdot \frac{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})} = 1163 \angle -90^\circ \cdot \frac{97.57 \angle 90^\circ}{249.3 \angle 90^\circ} = 455 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{k3g2}'' = 1163 \angle -90^\circ \cdot \frac{(\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})} = 1163 \angle -90^\circ \cdot \frac{151.7 \angle 90^\circ}{249.3 \angle 90^\circ} = 708 \angle -90^\circ A$$

- 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 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 $q=I$ siempre, ya que no existen motores asíncronos en el circuito) a 120kV de tensión serán:

$$\bar{I}_{ag1} = \mu_1 \cdot q \cdot \bar{I}_{K3g1}'' = 0.87 \cdot 1 \cdot (455 \angle -90^\circ) = 395.87 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{ag2} = \mu_2 \cdot q \cdot \bar{I}_{K3g2}'' = 0.93 \cdot 1 \cdot (708 \angle -90^\circ) = 658.4 \angle -90^\circ A$$

- Finalmente, la intensidad total de corte en el punto de cortocircuito (barras "C") será:

$$\bar{I}_{aC} = \bar{I}_{ag1} + \bar{I}_{ag2} = 395.87 \angle -90^\circ + 658.4 \angle -90^\circ = 1054.2 \angle -90^\circ A$$

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 " I_s ", 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)).

$$\vec{I}_{K3F}'' = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 7.53 \angle 90^\circ} = 1009 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S3} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (1009 \angle -90^\circ) = 2854 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{K2F}'' = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (75.53 \angle 90^\circ)} = 873.82 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S2} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (873.82 \angle -90^\circ) = 2471.5 \angle -90^\circ A$$

$$\vec{I}_{K1F}'' = \frac{1.1 \cdot 120000 \angle 0^\circ \cdot \sqrt{3}}{235.1 \angle 90^\circ} = 972.5 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S1} = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot (972.5 \angle -90^\circ) = 2750.6 \angle -90^\circ A$$

- La corriente simétrica de corte " I_a " 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:

- 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:

$$\bar{I}''_{K3F} = \frac{1.120000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 7.53 \angle 90^\circ} = 1009 \angle -90^\circ A$$

- Mediante divisores de intensidad hallamos las aportaciones que cada generador proporciona a esta corriente total de cortocircuito:

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{k3g1} &= 1009 \angle -90^\circ \frac{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})} = 1009 \angle -90^\circ \frac{97.57 \angle 90^\circ}{249.3 \angle 90^\circ} = 395 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}''_{k3g2} &= 1009 \angle -90^\circ \frac{(\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})}{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2}) + (\bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_{g1})} = 1009 \angle -90^\circ \frac{151.7 \angle 90^\circ}{249.3 \angle 90^\circ} = 614 \angle -90^\circ A \end{aligned}$$

- 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 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 $q=I$ siempre, ya que no existen motores asíncronos en el circuito) a 120kV de tensión serán:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{ag1} &= \mu_1 \cdot q \cdot \bar{I}''_{K3g1} = 0.91 \cdot 1 \cdot (395 \angle -90^\circ) = 35.45 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_{ag2} &= \mu_2 \cdot q \cdot \bar{I}''_{K3g2} = 0.98 \cdot 1 \cdot (614 \angle -90^\circ) = 601.72 \angle -90^\circ A \end{aligned}$$

- 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 :			$X_1=X_2=j10 \Omega$	$X_0=2.5 \cdot X_1=25j \Omega$	

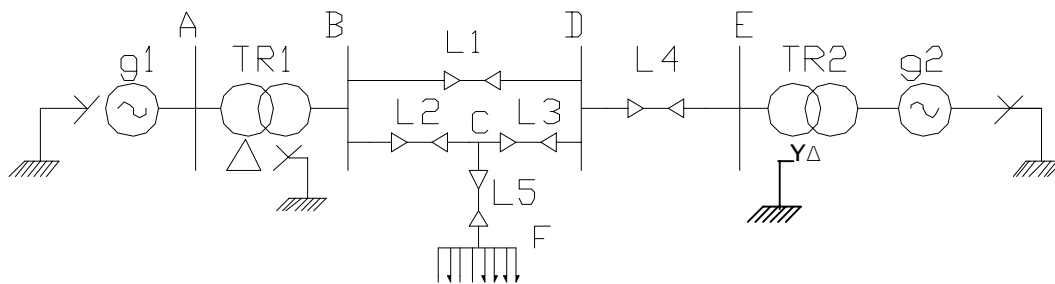


Figura 3.6 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.6

HALLAR

- 1 Las redes de secuencia directa, inversa y homopolar del sistema de potencia.
- 2 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).
- 3 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

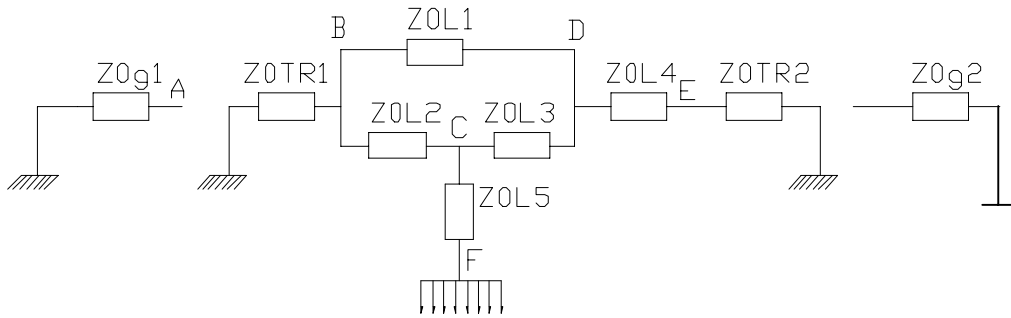
• Cálculo de impedancias a 25kV

$$G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = X_d'' \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.12 \cdot \frac{25000^2}{40 \cdot 10^6} = j1.875 \Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \cdot \frac{25000^2}{40 \cdot 10^6} = j0.625 \Omega \quad X_n=0$$

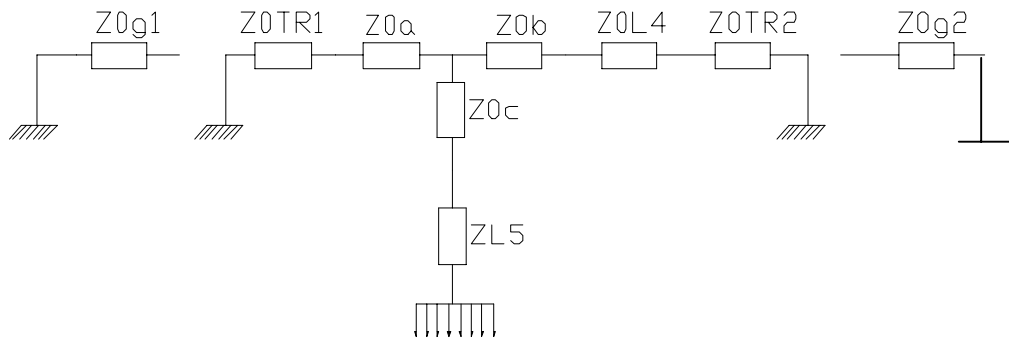
$$G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.16 \cdot \frac{25000^2}{50 \cdot 10^6} = j2 \Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \cdot \frac{25000^2}{50 \cdot 10^6} = j0.5 \Omega \quad X_n=0$$

$$T_{R1} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \epsilon_{xcc} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = 0.12 \cdot \frac{25000^2}{40 \cdot 10^6} = j1.875 \Omega \quad \bar{X}_0 = 0.9 \cdot \bar{X}_1 = j1.687 \Omega \quad X_n=0$$

- 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)**

$$\bar{Z}_{1A} = \bar{Z}_{2A} = (\bar{Z}_{g1}) // [\bar{Z}_{g2} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_B + \bar{Z}_A + \bar{Z}_{TR1}] = (j1.875) // [j6.578] = (0 + j1.46) = 1.46 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{oA} = \bar{Z}_{og1} = (0 + j0.625) = 0.625 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{TA} = \bar{Z}_{1A} + \bar{Z}_{2A} + \bar{Z}_{oA} = (j1.46 + j1.46 + j0.625) = (0 + j3.545) = 3.545 \angle 90^\circ \Omega$$

- **Impedancias vistas desde las Barras "F" (a 120 KV)**

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{1F} = \bar{Z}_{2F} &= [(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A) // (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})] + (\bar{Z}_C + \bar{Z}_{L5}) = \\ &= [(j43.2 + j43.2 + j7.692) // (j7.692 + j22 + j24.6 + j46.08)] + (j16.15) = (j94.09 // j100.37) + (j25.38) = \\ &= (j48.57) + (j16.15) = (0 + j64.72) = 64.72 \angle 90^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{oF} &= [(\bar{Z}_{oTR1} + \bar{Z}_{oA}) // (\bar{Z}_{oB} + \bar{Z}_{oL4} + \bar{Z}_{oTR2})] + (\bar{Z}_{oC} + \bar{Z}_{oL5}) = \\ &= [(j38.88 + j19.23) // (j19.23 + j55 + j22.22)] + (j15.38 + j25) = (j58.11 // j96.45) + (j40.38) = \\ &= (j36.26 + j40.38) = (0 + j76.64) = 76.64 \angle 90^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{TF} = \bar{Z}_{1F} + \bar{Z}_{2F} + \bar{Z}_{oF} = (0 + j206.1) = 206.1 \angle 90^\circ \Omega$$

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).

$$\bar{I}_{K3}^* = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_1} = \frac{1.1 \cdot 25000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 1.46 \angle 90^\circ} = 10874.75 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K2}^* = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = \frac{1.1 \cdot 25000 \angle 0^\circ}{2 \cdot 1.46 \angle 90^\circ} = 9417.8 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{K1}^* = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n \cdot \sqrt{3}}{\bar{Z}_T} = \frac{1.1 \cdot \sqrt{3} \cdot 25000 \angle 0^\circ}{3.545 \angle 90^\circ} = 13436.2 \angle -90^\circ A$$

- **Corrientes máximas asimétricas de cortocircuitos "Is":** (aplicando el coeficiente χ , gráfica 12.1)

Recordando todo lo expuesto en la primera pregunta del problema 3.3 referente a la intensidad "Is", 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:

$$\bar{I}_S = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot \bar{I}''_k \text{ Como } R=0, \text{ siempre } \chi = 2 \text{ (gráfica 12.1, de los anexos)}$$

$$\bar{I}_{S3} = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot \bar{I}''_{K3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (10874.75 \angle -90^\circ) = 30758.44 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S2} = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot \bar{I}''_{K2} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (9417.8 \angle -90^\circ) = 26637.56 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S1} = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot \bar{I}''_{K1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (13436.2 \angle -90^\circ) = 38002.2 \angle -90^\circ A$$

Con estos valores se adopta para todos los casos un Poder de Cierre de 50KA.

- **La corriente simétrica de corte "I_a" 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: $\bar{I}''_{AK3} = 10874.75 \angle -90^\circ A$

Sí 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 μ_{g1} y μ_{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_s":** (aplicando el coeficiente χ , gráfica 12.1)

Recordando todo lo expuesto en la primera pregunta del problema 3.3 referente a la intensidad "I_s" 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:

$$\bar{I}_S = \chi \cdot \sqrt{2} \cdot \bar{I}''_K \quad \text{Como } R=0, \text{ siempre } \chi = 2 \text{ (gráfica 12.1, de los anexos)}$$

$$\bar{I}_{S3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \bar{I}''_{K3} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (1177.5 \angle -90^\circ) = 3330.6 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S2} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \bar{I}''_{K2} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (1019.8 \angle -90^\circ) = 2884.4 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}_{S1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \bar{I}''_{K1} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot (1109.3 \angle -90^\circ) = 3137.6 \angle -90^\circ A$$

Con estos valores se adopta para todos los casos un Poder de Cierre de 5KA.

- **La corriente simétrica de corte "I_a" 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:

$$\text{Como: } \bar{I}''_{FK3120KV} = 1177.54 \angle -90^\circ A$$

Mediante divisores de intensidad, buscamos las aportaciones que cada generador da a esta corriente de cortocircuito:

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{FK3g1} &= \bar{I}''_{FK3} \cdot \frac{(\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})}{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A) + (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})} = \\ &= \bar{I}''_{FK3} \cdot \frac{(j7.692 + j22 + j24.6 + j46.08)}{(2(j43.2) + j7.692) + (j7.69 + j22 + j24.6 + j46.08)} = 1177.54 \angle -90^\circ \frac{j100.4}{j194.5} = 607.8 \angle -90^\circ A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}''_{FK3g2} &= \bar{I}''_{FK3} \cdot \frac{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A)}{(\bar{Z}_{g1} + \bar{Z}_{TR1} + \bar{Z}_A) + (\bar{Z}_B + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{TR2} + \bar{Z}_{g2})} = \\ &= \bar{I}''_{FK3} \cdot \frac{(j43.2 + j43.2 + j7.692)}{(2(j43.2) + j7.692) + (j7.692 + 22 + j24.6 + j46.08)} = 1177.54 \angle -90^\circ \frac{j94.1}{j194.5} = 569.7 \angle -90^\circ A \end{aligned}$$

Que a bajo nivel de tensión (25kV) será:

$$\bar{I}''_{FK3g125KV} = 607.8 \angle -90^\circ \left(\frac{120}{25} \right) = 2917.4 \angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}''_{FK3g225KV} = 569.7 \angle -90^\circ \cdot (4.8) = 2734.6 \angle -90^\circ A$$

Con unas intensidades nominales, en módulo, de los generadores de:

$$I_{ng1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{40 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 25 \cdot 10^3} = 923.76 A$$

$$I_{ng2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{50 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 25 \cdot 10^3} = 1154.7 A$$

Encontramos μ_{g1} y μ_{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.....	$X_1=X_2= 21.875\%$	$X_0= 7.5\%$	$X_n= 12.5\%$
T_{R1}	60 MVA.....	25/150 kV.....	$X_1=X_2= 11.25\%$	$X_0= 7.5\%$	$X_n= 0$
T_{R2}	80 MVA.....	25/150 kV.....	$X_1=X_2= 18\%$	$X_0= 18\%$	$X_n= 0$
Línea.....			$X_1=X_2= j 14.1\Omega$	$X_0= j 56.3\Omega$	

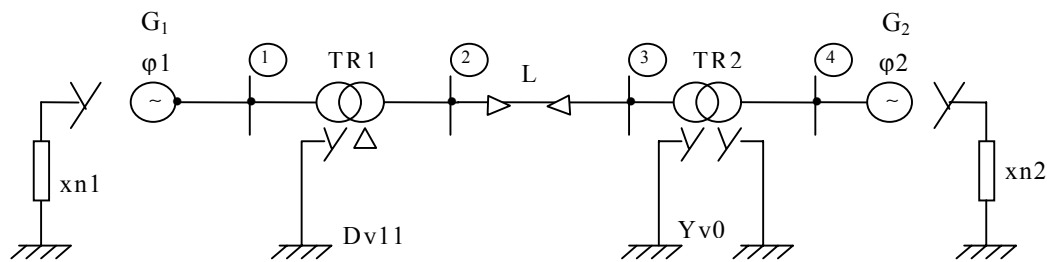


Figura 3.7 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.7

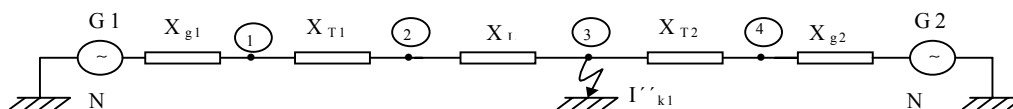
HALLAR

Si en las barras "3", se produce un cortocircuito Fase-tierra:

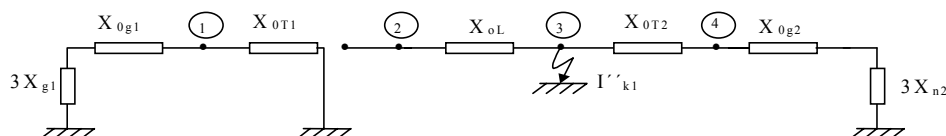
1. Todas las intensidades del circuito.
2. Las tensiones de línea en el punto de fallo (barras "3").
3. Las tensiones de línea en bornes de G_1 , (barras "1").

RESOLUCIÓN

- Redes de secuencia directa, inversa y homopolar
- Redes de secuencia directa e inversa (sin generadores)



- Red de secuencia homopolar



$$\bar{Z}_T = (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0) = (0 + j397.9) = 397.9 \angle 0^\circ \Omega$$

- **La corriente de cortocircuito total, así como las componentes simétricas totales en las barras del cortocircuito, con una falta monofásica a tierra, será:**

$$\bar{I}_{K1}^* = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n \sqrt{3}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{1.1 \cdot (150000 \angle 0^\circ) \sqrt{3}}{397.9 \angle 90^\circ} = (1.1) 652.94 \angle -90^\circ A$$

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	$T_{R2} \text{ (primario)}$
$\bar{I}_{R1} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{149 \angle -90^\circ}{289.7 \angle -90^\circ} = 111.96 \angle -90^\circ A$	$\bar{I}_{R1} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{j140.7}{j289.7} = 105.7 \angle -90^\circ A$
$\bar{I}_{R2} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{149 \angle -90^\circ}{289.7 \angle -90^\circ} = 111.96 \angle -90^\circ A$	$\bar{I}_{R2} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{j140.7}{j289.7} = 105.7 \angle -90^\circ A$
$\bar{I}_{R0} = 217.65 \angle -90^\circ \frac{253.18 \angle -90^\circ}{\infty} = 0 A$	$\bar{I}_{R0} = 217.65 \angle -90^\circ A$

- **Las intensidades serán:**
- **EN LA LÍNEA L₁ Y EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR T_{R1}: (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 G₁: (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 G₁, 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 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 G₁**

En nuestro caso, perdemos tensión al pasar de la línea 1° (150kV) a los bornes del generador G₁ (25kV). 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:

$$\bar{I}'_{R1} = \bar{I}_{R1} \cdot m \cdot 1\angle -30^\circ = 111.96\angle -90^\circ \left(\frac{150}{25} \right) 1\angle -30^\circ = 671.76\angle -120^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R2} = \bar{I}_{R2} \cdot m \cdot 1\angle 30^\circ = 111.96\angle -90^\circ \left(\frac{150}{25} \right) 1\angle 30^\circ = 671.76\angle -60^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R0} = 0 A$$

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.

- **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 transcurrirían 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:

$$\bar{I}'_{R1} = \bar{I}_{R1} \cdot m \cdot 1\angle 0^\circ = 105.7\angle -90^\circ \cdot \left(\frac{150}{25}\right) \cdot 1\angle 0^\circ = 634.2\angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R2} = \bar{I}_{R2} \cdot m \cdot 1\angle 0^\circ = 105.7\angle -90^\circ \cdot \left(\frac{150}{25}\right) \cdot 1\angle 0^\circ = 634.2\angle -90^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R0} = \bar{I}_{R0} \cdot m \cdot 1\angle 0^\circ = 217.65\angle -90^\circ \cdot \left(\frac{150}{25}\right) \cdot 1\angle 0^\circ = 1305.9\angle -90^\circ A$$

- **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

$$\bar{V}_{RN} = \bar{V}_{R1} + \bar{V}_{R2} + \bar{V}_{R0} = 70855.56 \angle 0^\circ + 15747 \angle 180^\circ + 55104.62 \angle 180^\circ = 0 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{SN} = \bar{V}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R0} = 70855.6 \angle 240^\circ + 15747 \angle 300^\circ + 55104.6 \angle 180^\circ = 111613.15 \angle -137.8^\circ V$$

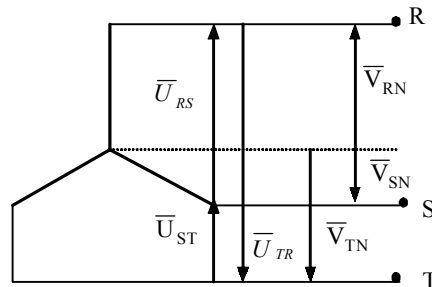
$$\bar{V}_{TN} = \bar{V}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{R0} = 70855.6 \angle 120^\circ + 15747 \angle 60^\circ + 55104.6 \angle 180^\circ = 111613.15 \angle 137.8^\circ V$$

• Cálculo de las tensiones de línea en el punto de cortocircuito

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_{RS} &= \bar{V}_{RN} - \bar{V}_{SN} = 0 \angle 0^\circ - 111613.2 \angle -137.8^\circ = 111613.15 \angle 42.2^\circ V \\ \bar{U}_{ST} &= \bar{V}_{SN} - \bar{V}_{TN} = 111613.2 \angle -137.8^\circ - 111613.15 \angle 137.8^\circ = 149945.7 \angle -90^\circ V \\ \bar{U}_{TR} &= \bar{V}_{TN} - \bar{V}_{RN} = 111613.15 \angle 137.8^\circ - 0 \angle 0^\circ = 111613.15 \angle 137.8^\circ V \end{aligned} \right\} \Sigma \bar{U}_L = 0 \angle 0^\circ V$$

La suma de las tensiones de línea, aún con cortocircuito con fugas a tierra, debe ser siempre cero.

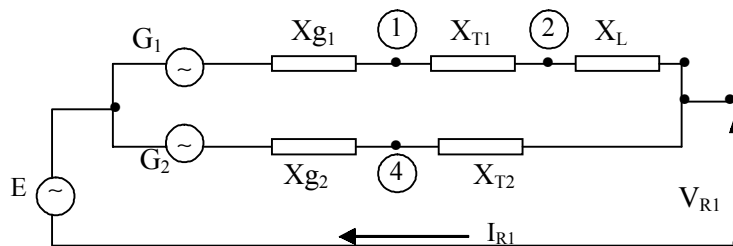
Para el cálculo de estas tensiones de línea nos puede ayudar el siguiente gráfico, donde se relacionan las tensiones de fase con las tensiones de línea:



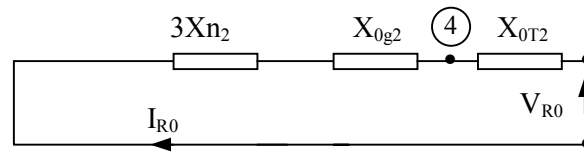
3 Tensiones de línea en barras "1" del generador G₁ (25kV)

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 G₁**

$$\bar{V}'_{RN} = \bar{V}'_{R1} + \bar{V}'_{R2} + \bar{V}'_{R0} = 12860 \angle -30^\circ + 1573.9 \angle 210^\circ + 0 \angle 0^\circ = 12148.5 \angle -36.44^\circ V$$

$$\bar{V}'_{SN} = \bar{V}'_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{V}'_{R0} = 12860 \angle (-30^\circ + 240^\circ) + 1573.9 \angle (210^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 12148 \angle -143.6^\circ V$$

$$\bar{V}'_{TN} = \bar{V}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{V}'_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}'_{R0} = 12860 \angle (-30^\circ + 120^\circ) + 1573.9 \angle (210^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 14433.6 \angle 90^\circ V$$

• **Cálculo de las tensiones de línea en las barras del generador G₁**

$$\bar{U}'_{RS} = \bar{V}'_{RN} - \bar{V}'_{SN} = 12148.5 \angle -36.4^\circ - 12148.5 \angle -143.6^\circ = 19551.5 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}'_{ST} = \bar{V}'_{SN} - \bar{V}'_{TN} = 12148.5 \angle -143.6^\circ - 14433.6 \angle 90^\circ = 23749 \angle -114^\circ V$$

$$\bar{U}'_{TR} = \bar{V}'_{TN} - \bar{V}'_{RN} = 14433.6 \angle 90^\circ - 12148.5 \angle -36.44^\circ = 23753 \angle 114^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}_L = 240 \angle 0.87^\circ V$$

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_2100MVA.....20kV..... $X''_d=X_1=X_2=20\%$ $X_0=4\%$ $X_n=5\%$
 T_{R1}, T_{R2}100MVA.....20kV/345kV..... $X''_d=X_1=X_2=8\%$ $X_0=8\%$ $X_n=0\%$
 Línea..... $X_1=X_2=j178.5\ \Omega$ $X_0=j595.1\ \Omega$

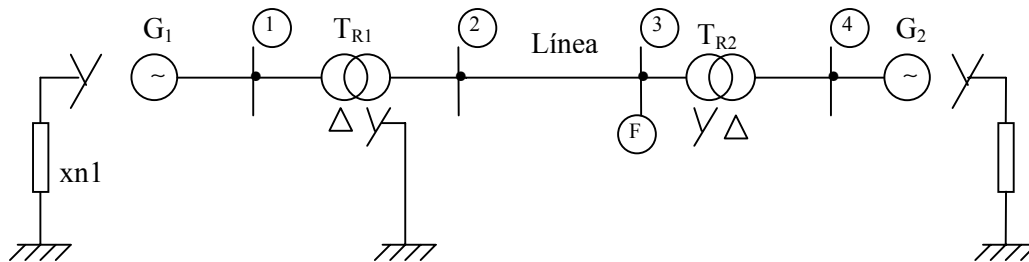


Figura 3.8 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.8

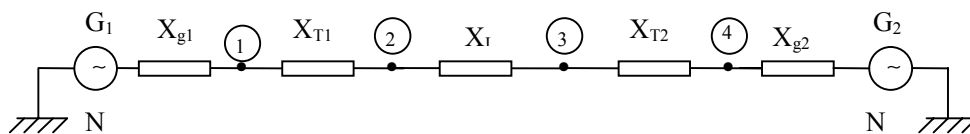
HALLAR

Si el sistema está operando a voltaje nominal y sin corriente antes del fallo, delante de una falta bifásica, en las barras "3":

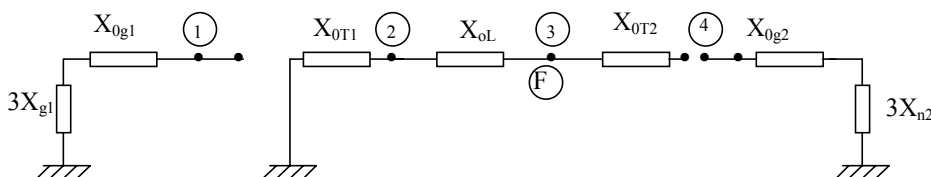
- 1 Todas las intensidades del circuito.
- 2 Las tensiones de línea en barras "3" (punto de cortocircuito).
- 3 Tensiones de línea en barras "4".

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**

- $G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.2 \frac{(20)^2}{100} = j0.8\Omega \quad \bar{X}_o = 0.04 \frac{(20)^2}{100} = j0.16\Omega \quad \bar{X}_n = 0.05 \left(\frac{20}{100} \right)^2 = j0.2\Omega$
- $G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.2 \frac{(20)^2}{100} = j0.8\Omega \quad \bar{X}_o = 0.04 \frac{(20)^2}{100} = j0.16\Omega \quad \bar{X}_n = 0.05 \left(\frac{20}{100} \right)^2 = j0.2\Omega$
- $T_{R1} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_o = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_n = 0$
- $T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_o = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_n = 0$
- Línea $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j178.5}{(17.25)^2} = j0.6\Omega \quad \bar{X}_o = \frac{j595.1}{(17.25)^2} = j2\Omega$

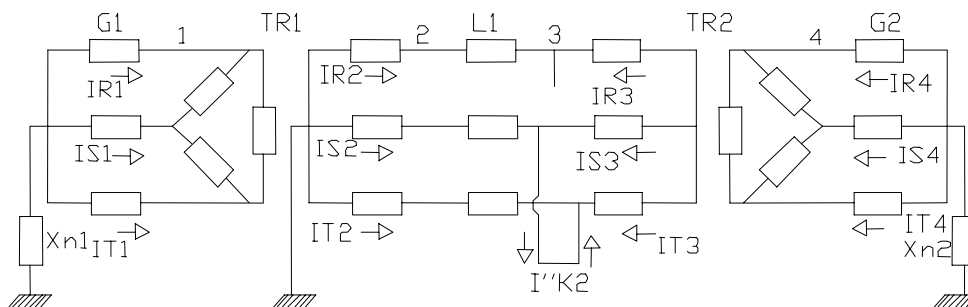
- **Cálculo de impedancias a 345kV**

- $G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j0.8)(17.25)^2 = j238\Omega \quad \bar{X}_o = (j0.16)(17.25)^2 = j47.6\Omega \quad \bar{X}_n = j59.5\Omega$
- $G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j0.8)(17.25)^2 = j238\Omega \quad \bar{X}_o = (j0.16)(17.25)^2 = j47.6\Omega \quad \bar{X}_n = j59.5\Omega$
- $T_{R1} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_o = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_n = 0$
- $T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_o = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_n = 0$
- Línea $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j178.5\Omega \quad \bar{X}_o = j595.1\Omega$

- **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**

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{TR1} + \bar{X}_L) // (\bar{X}_{RT2} + \bar{X}_{g2}) = (j511.72 // j333.22) = (0 + j201.8) = 201.8 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{X}_o = (\bar{X}_{oTR1} + \bar{X}_{oL}) = (j95.22 + j595.1) = (0 + j690.32) = 690.32 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{X}_T = \bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_o = (j201.8 + j201.8 + j690.32) = (0 + j1093.92) = 1093.92 \angle 90^\circ \Omega$$

- **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: $\bar{a} = 1 \angle 0^\circ$ $\bar{a}^2 = 1 \angle 120^\circ$ $\bar{a}^3 = 1 \angle 240^\circ$

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 493.5 \angle -90^\circ + 493.5 \angle 90^\circ + 0 \angle 0^\circ = 0 \angle 0^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 493.5 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 493.5 \angle (90^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 854.76 \angle 180^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 493.5 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 493.5 \angle (90^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 854.76 \angle 0^\circ A$$

$$\Sigma \bar{I} = 0 \angle 0^\circ A$$

$$\text{O bien, directamente: } \bar{I}_S = \frac{1.1 \cdot \bar{U}_n}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} = \frac{1.1 \cdot 345000 \angle 0^\circ}{2 \cdot (201.8 \angle 90^\circ)} = (1.1) 854.8 \angle 180^\circ A$$

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:

$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 194.62\angle -90^\circ + 194.62\angle 90^\circ + 0\angle 0^\circ = 0\angle 0^\circ A \\ \bar{I}_S &= \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 194.62\angle (-90^\circ + 240^\circ) + 194.62\angle (90^\circ + 120^\circ) + 0\angle 0^\circ = 337\angle 180^\circ A \\ \bar{I}_T &= \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 194.62\angle (-90^\circ + 120^\circ) + 194.62\angle (90^\circ + 240^\circ) + 0\angle 0^\circ = 337\angle 0^\circ A\end{aligned}$$

$$\Sigma \bar{I} = 0\angle 0^\circ A$$

- **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:

$$\begin{aligned}\bar{I}'_{R1} &= \bar{I}_{R1} \cdot m \angle -30^\circ = 194.62\angle -90^\circ \cdot 17.25 \angle -30^\circ = 3357.2\angle -120^\circ A \\ \bar{I}'_{R2} &= \bar{I}_{R2} \cdot m \angle 30^\circ = 194.62\angle 90^\circ \cdot 17.25 \angle 30^\circ = 3357.2\angle 120^\circ A \\ \bar{I}'_{R0} &= 0\angle 0^\circ A\end{aligned}$$

- ***Cálculo de las intensidades de línea en los bornes del generador G_1***

$$\begin{aligned}\bar{I}'_R &= \bar{I}'_{R1} + \bar{I}'_{R2} + \bar{I}'_{R0} = 3357.2\angle -120^\circ + 3357.2\angle 120^\circ + 0\angle 0^\circ = 3357.2\angle 180^\circ A \\ \bar{I}'_S &= \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R0} = 3357.2\angle (-120^\circ + 240^\circ) + 3357.2\angle (120^\circ + 120^\circ) + 0\angle 0^\circ = 3357.2\angle 180^\circ A \\ \bar{I}'_T &= \bar{I}'_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}'_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}'_{R0} = 3357.2\angle (-120^\circ + 120^\circ) + 3357.2\angle (120^\circ + 240^\circ) + 0\angle 0^\circ = 6714.4\angle 0^\circ A\end{aligned}$$

$$\Sigma \bar{I}' = 0\angle 0^\circ A$$

- **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:

$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 298.9\angle -90^\circ + 298.9\angle 90^\circ + 0\angle 0^\circ = 0\angle 0^\circ A \\ \bar{I}_S &= \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 298.9\angle (-90^\circ + 240^\circ) + 298.9\angle (90^\circ + 120^\circ) + 0\angle 0^\circ = 517.7\angle 180^\circ A \\ \bar{I}_T &= \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 298.7\angle (-90^\circ + 120^\circ) + 298.7\angle (90^\circ + 240^\circ) + 0\angle 0^\circ = 517.7\angle 0^\circ A\end{aligned}$$

$$\Sigma \bar{I} = 0\angle 0^\circ A$$

- **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:

$$\bar{I}'_{R1} = \bar{I}_{R1} \cdot m \angle -30^\circ = 298.9 \angle -90^\circ \cdot 17.25 \angle -30^\circ = 5156 \angle -120^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R2} = \bar{I}_{R2} \cdot m \angle 30^\circ = 298.9 \angle 90^\circ \cdot 17.25 \angle 30^\circ = 5156 \angle 120^\circ A$$

$$\bar{I}'_{R0} = 0 \angle 0^\circ A$$

- **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**

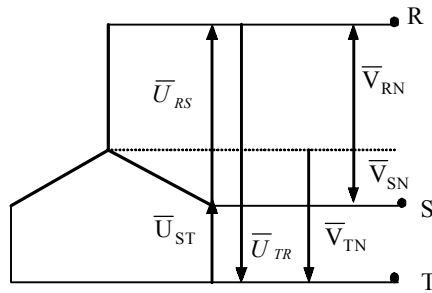
$$\bar{U}_{RS} = \bar{V}_{RN} - \bar{V}_{SN} = 199186 \angle 0^\circ - 99592.9 \angle 180^\circ = 298778.9 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}_{ST} = \bar{V}_{SN} - \bar{V}_{TN} = 99592.9 \angle 180^\circ - 99592.9 \angle 180^\circ = 0 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}_{TR} = \bar{V}_{TN} - \bar{V}_{RN} = 99592.9 \angle 180^\circ - 199186 \angle 0^\circ = 298778.9 \angle 180^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}_{\text{línea}} = 0 \angle 0^\circ$$

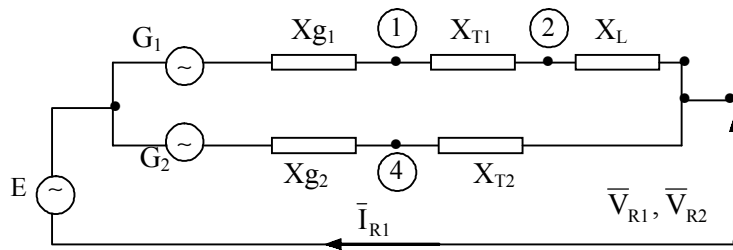
Para el cálculo de estas tensiones de línea nos puede ayudar el siguiente gráfico, donde se relacionan las tensiones de fase con las tensiones de línea:



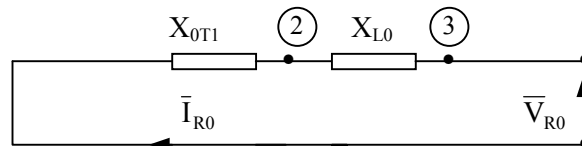
3 Tensiones de línea en barras "4" (20kV)

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):

$$\begin{aligned}\bar{V}''_{R1} &= \frac{\bar{V}_{R1}}{m} \cdot 1 \angle -30^\circ = \frac{99597.5 \angle 0^\circ}{17.25} \cdot 1 \angle -30^\circ = 5773.77 \angle -30^\circ V \\ \bar{V}''_{R2} &= \frac{\bar{V}_{R2}}{m} \cdot 1 \angle 30^\circ = \frac{99597.5 \angle 0^\circ}{17.25} \cdot 1 \angle 30^\circ = 5773.77 \angle 30^\circ V \\ \bar{V}''_{R0} &= 0 \angle 0^\circ V\end{aligned}$$

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".)

$$\bar{V}'_{R1} = \bar{E}' - \bar{I}'_{R1} \bar{X}_{lg2} = \frac{20000 \angle -30^\circ}{\sqrt{3}} - 5156 \angle -120^\circ \cdot 0.8 \angle 90^\circ = 7422.2 \angle -30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R2} = -\bar{I}'_{R2} \bar{X}_{2g2} = -5156 \angle 120^\circ \cdot 0.8 \angle 90^\circ = 4124.8 \angle 30^\circ V$$

$$\bar{V}'_{R0} = -\bar{I}'_{R0} \bar{X}_{og2} = 0 \angle 0^\circ V$$

- **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..... $\text{excc} = X_1 = X_2 = X_0 = 8\%$ $X_n = 0\%$
 Línea..... $X_1 = X_2 = j 178.5\Omega$ $X_0 = j 595.1\Omega$

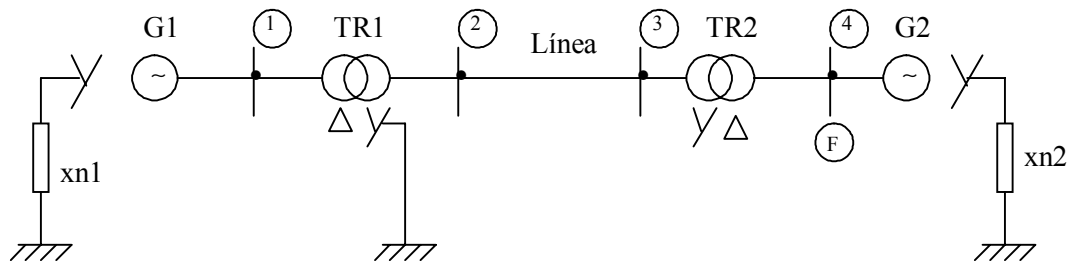


Figura 3.9 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.9

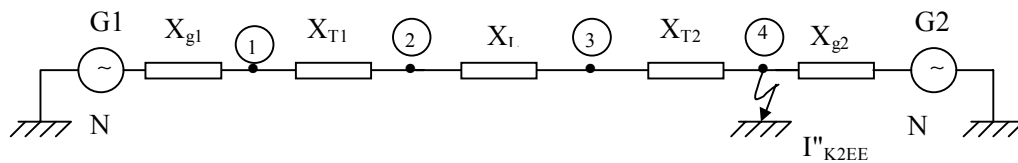
HALLAR

Se produce una falta bifásica a tierra en barras "4":

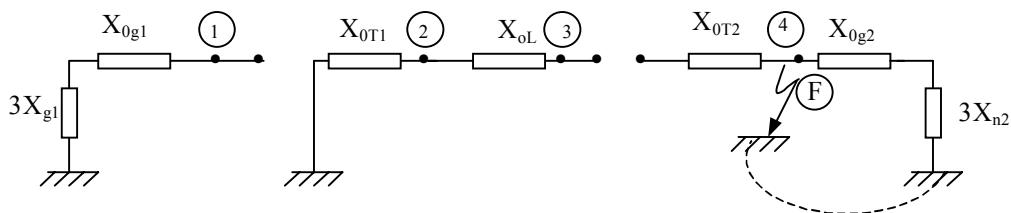
1. Todas las intensidades del circuito.
2. Tensiones de línea en el punto de cortocircuito (barras "4").
3. Tensiones de línea en los bornes del generador (barras "1").
4. Tensiones de línea en los bornes del secundario del transformador T_{R1} (barras "2").

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**

- $G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.2 \frac{(20)^2}{100} = j0.8\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \frac{(20)^2}{100} = j0.16\Omega \quad \bar{X}_n = 0.05 \left(\frac{20}{100} \right)^2 = j0.2\Omega$
- $G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.2 \frac{(20)^2}{100} = j0.8\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.04 \frac{(20)^2}{100} = j0.16\Omega \quad \bar{X}_n = 0.05 \left(\frac{20}{100} \right)^2 = j0.2\Omega$
- $T_{R1} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_n = 0$
- $T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.08 \frac{(20)^2}{100} = j0.32\Omega \quad \bar{X}_n = 0$
- Línea $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \frac{j178.5}{(17.25)^2} = j0.6\Omega \quad \bar{X}_0 = \frac{j595.1}{(17.25)^2} = j2\Omega$

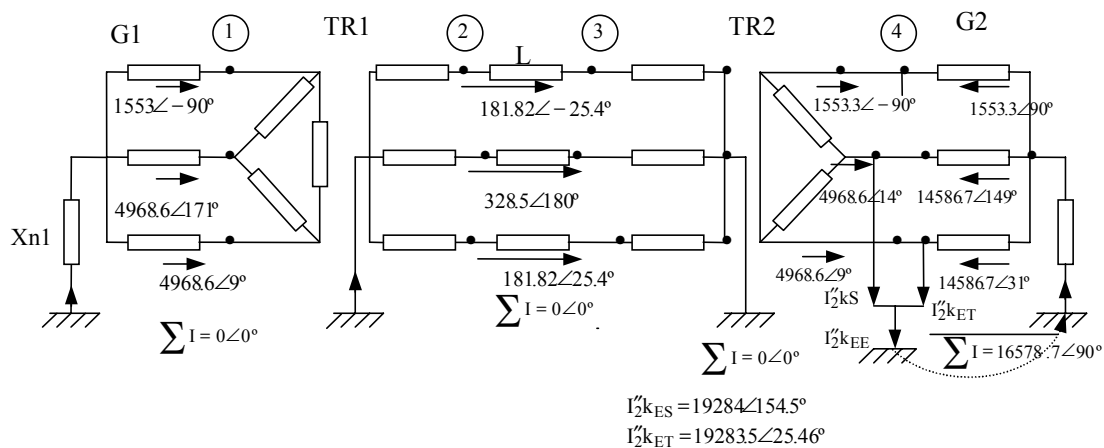
- **Cálculo de impedancias a 345kV**

- $G_1 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j0.8)(17.25)^2 = j238\Omega \quad \bar{X}_0 = (j0.16)(17.25)^2 = j47.6\Omega \quad \bar{X}_n = j59.5\Omega$
- $G_2 \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = (j0.8)(17.25)^2 = j238\Omega \quad \bar{X}_0 = (j0.16)(17.25)^2 = j47.6\Omega \quad \bar{X}_n = j59.5\Omega$
- $T_{R1} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_n = 0$
- $T_{R2} \quad \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_0 = 0.08 \frac{(345)^2}{100} = j95.22\Omega \quad \bar{X}_n = 0$
- 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 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**

$$\bar{Z}_{41} = \bar{Z}_{42} = \left[(\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{TR1} + \bar{X}_L + \bar{X}_{TR2}) // (\bar{X}_{g2}) \right] = [(j2.04 // j0.8)] = (0 + j0.574) = 0.574 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{4_o} = [(\bar{X}_{og_2} + 3\bar{X}_{n_2})] = [j0.16 + 3(j0.2) = (0 + j0.76) = 0.76\angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_T = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_o = (j0.574 + j0.574 + j0.76) = (0 + j1.908) = 1.908\angle 90^\circ \Omega$$

- **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: $\bar{a} = 1\angle 0^\circ$ $\bar{a}^2 = 1\angle 120^\circ$ $\bar{a}^3 = 1\angle 240^\circ$

$$\bar{I}_R = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 12815.5\angle -90^\circ + 7301.18\angle 90^\circ + 5514.3\angle 90^\circ = 0\angle 0^\circ A$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 12815.5\angle (150^\circ) + 7301.18\angle (90^\circ + 120^\circ) + 5514.3\angle 90^\circ = 19285.4\angle 154.6^\circ A$$

$$\bar{I}_T = \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^2 + \bar{I}_{R0} = 12815.5\angle (30^\circ) + 7301.18\angle (90^\circ + 240^\circ) + 5514.3\angle 90^\circ = 19285.4\angle 25.4^\circ A$$

$$\bar{I}_{2_{KEE}}'' = \bar{I}_{2_{KES}}'' + \bar{I}_{2_{KET}}'' = 16544.37\angle 90^\circ A$$

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 _{R2}	Generador G ₂
$\bar{I}_{R1} = \bar{I}_{R1_T} \frac{j0.8}{j2.84} = 3610\angle -90^\circ A$	$\bar{I}_{R1} = 12815.5\angle -90^\circ \frac{j2.04}{j2.84} = 9205.5\angle -90^\circ A$
$\bar{I}_{R2} = \bar{I}_{R2_T} \frac{j0.8}{j2.84} = 2056.7\angle 90^\circ A$	$\bar{I}_{R2} = 7301.18\angle 90^\circ \frac{j2.04}{j2.84} = 5244.5\angle 90^\circ A$
$\bar{I}_{R0} = \bar{I}_{R0_T} \cdot 0 = 0\angle 0^\circ A$	$\bar{I}_{R0} = \bar{I}_{R0_T} = 5514.3\angle 90^\circ A$

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:

$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 9205.5 \angle -90^\circ + 5244.5 \angle 90^\circ + 5514.3 \angle 90^\circ = 1553.3 \angle 90^\circ A \\ \bar{I}_S &= \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 9205.5 \angle (150^\circ) + 5244.5 \angle (90^\circ + 120^\circ) + 5514.3 \angle 90^\circ = 14586.7 \angle 149^\circ A \\ \bar{I}_T &= \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}_{R0} = 9205.5 \angle (30^\circ) + 5244.5 \angle (90^\circ + 240^\circ) + 5514.3 \angle 90^\circ = 14586.7 \angle 31^\circ A \\ \Sigma \bar{I} &= 16578.70 \angle 90^\circ A\end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 3610 \angle -90^\circ + 2056.7 \angle 90^\circ + 0 \angle 0^\circ = 1553.3 \angle -90^\circ A \\ \bar{I}_S &= \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R0} = 3610 \angle (-90^\circ + 240^\circ) + 2056.7 \angle (90^\circ + 120^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 4968.6 \angle 171^\circ A \\ \bar{I}_T &= \bar{I}_{R1} \cdot \bar{a} + \bar{I}_{R2} \cdot \bar{a}^{-2} + \bar{I}_{R0} = 3610 \angle (-90^\circ + 120^\circ) + 2056.7 \angle (90^\circ + 240^\circ) + 0 \angle 0^\circ = 4968.6 \angle 9^\circ A \\ \Sigma \bar{I} &= 0 \angle 0^\circ A\end{aligned}$$

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 L_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 L_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**

$$\bar{U}_{RS} = \bar{V}_{RN} - \bar{V}_{SN} = 12567.76 \angle 0^\circ - 0 \angle 0^\circ = 12567.76 \angle 0^\circ V$$

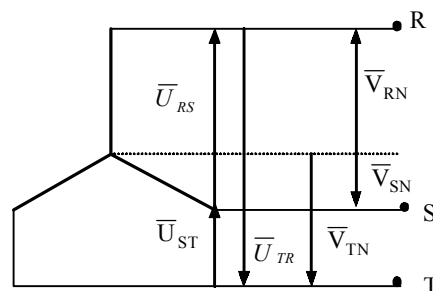
$$\bar{U}_{ST} = \bar{V}_{SN} - \bar{V}_{TN} = 0 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{U}_{TR} = \bar{V}_{TN} - \bar{V}_{RN} = 0 \angle 0^\circ - 12567.76 \angle 0^\circ = 12567.76 \angle 180^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}_{\text{línea}} = 0 \angle 0^\circ$$

La suma de las tensiones de línea, aun con cortocircuito con fugas a tierra, debe ser siempre cero.

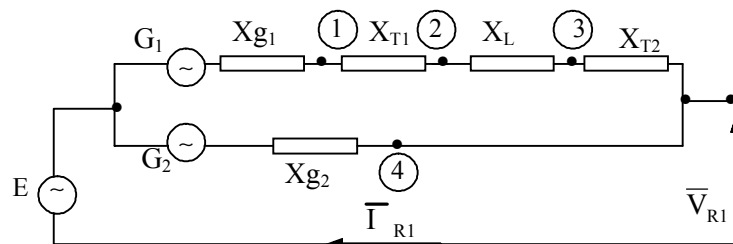
Para el cálculo de estas tensiones de línea, nos puede ayudar el siguiente gráfico, donde se relacionan las tensiones de fase con las tensiones de línea:



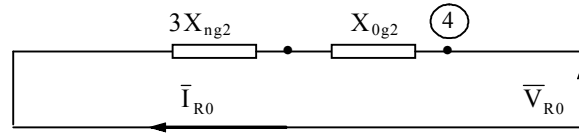
3 Tensiones de línea en barras "1" del generador G₁: (20kV)

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").

$$\bar{V}_{R1}'' = \bar{E}'' - \bar{I}_{R1}'' \cdot X_{g1} = \frac{20000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} - 3610 \angle -90^\circ \cdot 0.8 \angle 90^\circ = 8660 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{R2}'' = -\bar{I}_{R2}'' \cdot X_{g1} = -2056.7 \angle 90^\circ \cdot 0.8 \angle 90^\circ = 1645 \angle 0^\circ V$$

$$\bar{V}_{R0}'' = -\bar{I}_{R0}'' \cdot \bar{X}_{g1} = 0 \angle 0^\circ V$$

- **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**

$$\bar{U}_{RS}'' = \bar{V}_{RN}'' - \bar{V}_{SN}'' = 10305 \angle 0^\circ - 7966 \angle -130.3^\circ = 16608.4 \angle 21.45^\circ V$$

$$\bar{U}_{ST}'' = \bar{V}_{SN}'' - \bar{V}_{TN}'' = 7966 \angle -130.3^\circ - 7966 \angle 130.3^\circ = 12150.6 \angle -90^\circ V$$

$$\bar{U}_{TR}'' = \bar{V}_{TN}'' - \bar{V}_{RN}'' = 7966 \angle 130.3^\circ - 10305 \angle 0^\circ = 16608.4 \angle 158.54^\circ V$$

$$\Sigma \bar{U}_{Línea}'' = 0 \angle 0^\circ V$$

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):

$$\begin{aligned}\bar{V}_{R1}' &= \bar{V}_{R1} \cdot m \cdot 1 \angle -30^\circ = 4190 \angle 0^\circ \cdot 17.25 \cdot 1 \angle 30^\circ = 72277.5 \angle 30^\circ V \\ \bar{V}_{R2}' &= \bar{V}_{R2} \cdot m \cdot 1 \angle 30^\circ = 4190 \angle 0^\circ \cdot 17.25 \cdot 1 \angle -30^\circ = 72277.5 \angle -30^\circ V \\ \bar{V}_{R0}' &= 0 \angle 0^\circ V\end{aligned}$$

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").

$$\begin{aligned}\bar{V}_{R1}' &= \bar{E}' - \bar{I}_{R1}' (\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{TR1}) = \frac{345000 \angle (0^\circ - 30^\circ)}{\sqrt{3}} - 209.27 \angle -60^\circ \cdot 333.27 \angle 90^\circ = 129442.43 \angle 30^\circ V \\ \bar{V}_{R2}' &= -\bar{I}_{R2}' (\bar{X}_{g1} + \bar{X}_{TR1}) = -119.23 \angle 60^\circ \cdot 333.27 \angle 90^\circ = 39735.7 \angle -30^\circ V \\ \bar{V}_{R0}' &= -\bar{I}_{R0}' (\bar{X}_{og1} + \bar{X}_{oTR1}) = 0 \angle 0^\circ V\end{aligned}$$

- **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").

$$\begin{aligned}\bar{V}_{R1}' &= \bar{V}_{R1}' + \bar{I}_{R1}' (\bar{X}_L + \bar{X}_{TR2}) = 72277.5 \angle 30^\circ + 209.27 \angle -60^\circ \cdot 273.72 \angle 90^\circ = 129559 \angle 30^\circ V \\ \bar{V}_{R2}' &= \bar{V}_{R2}' + \bar{I}_{R2}' (\bar{X}_L + \bar{X}_{TR2}) = 72277.5 \angle -30^\circ + 119.23 \angle 60^\circ \cdot 273.72 \angle 90^\circ = 39642 \angle -30^\circ V \\ \bar{V}_{R0}' &= \bar{V}_{R0}' + \bar{I}_{R0}' (\bar{X}_L + \bar{X}_{TR2}) = 0 \angle 0^\circ V\end{aligned}$$

- **Cálculo de las tensiones de fase en las barras "2"**

Utilizando cualquiera de los dos métodos anteriores:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{RN}' &= \bar{V}_{R1}' + \bar{V}_{R2}' + \bar{V}_{R0}' = 129559 \angle 30^\circ + 39642 \angle -30^\circ + 0 \angle 0^\circ = 153224.5 \angle 17^\circ V \\ \bar{V}_{SN}' &= \bar{V}_{R1}' \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{R2}' \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R0}' = 129559 \angle 270^\circ + 39642 \angle 60^\circ + 0 \angle 0^\circ = 89706.6 \angle -90^\circ V \\ \bar{V}_{TN}' &= \bar{V}_{R1}' \cdot \bar{a} + \bar{V}_{R2}' \cdot \bar{a}^2 + \bar{V}_{R0}' = 129559 \angle 150^\circ + 39642 \angle 210^\circ + 0 \angle 0^\circ = 153224.5 \angle 163^\circ V\end{aligned}$$

- **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 0.8Ω .

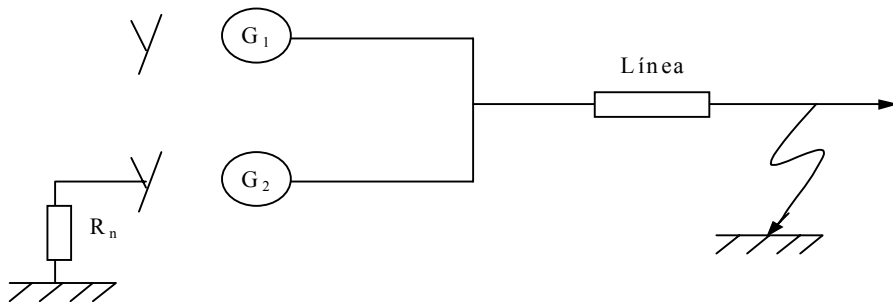


Figura 3.10 Circuito unifilar del sistema de potencia correspondiente al problema 3.10

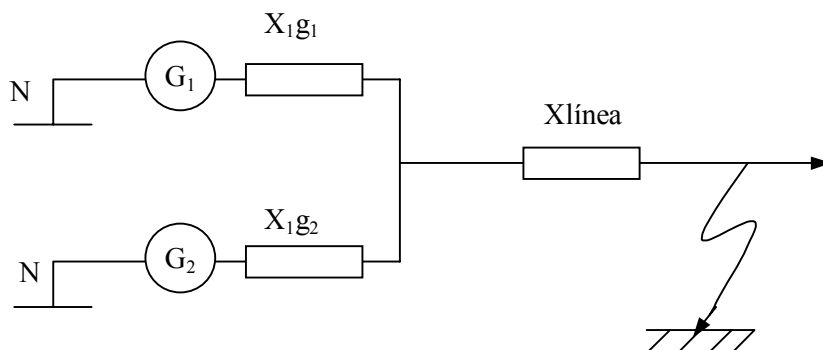
HALLAR

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:

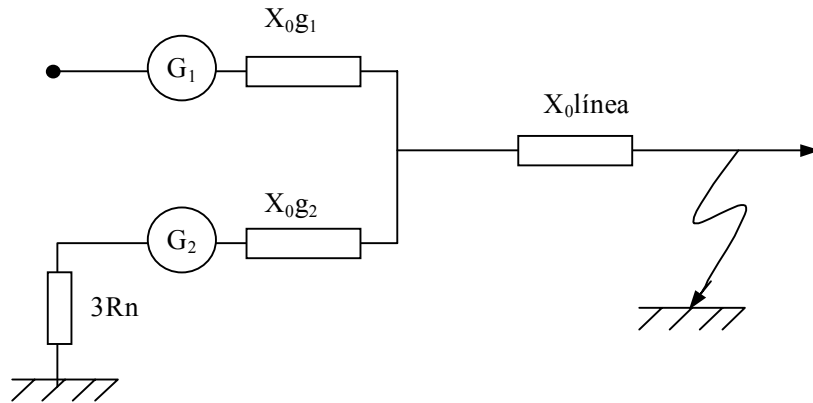
1. La intensidad monofásica de cortocircuito (I_{k1}), en el punto de la falla.
2. La intensidad que circula por la fase “S”, del primer generador (I_{sg1}), al producirse el cortocircuito.
3. La intensidad que circula por la fase “R”, del segundo generador (I_{Rg2}), al producirse el cortocircuito.
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)**

$$\bar{X}_1 = (\bar{X}_1 g_1 // \bar{X}_1 g_2) + \bar{X}_{línea} = (j6 // j6) + (j10) = (0 + j13) = 13 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{X}_2 = (\bar{X}_2 g_1 // \bar{X}_2 g_2) + \bar{X}_{línea} = (j4 // j4) + (j10) = (0 + j12) = 12 \angle 90^\circ \Omega$$

$$\bar{X}_0 = 3\bar{X}_n + \bar{X}_0 g_2 + \bar{X}_{0\text{ línea}} = ((3 \cdot 0.8) + j1 + j20) = (2.4 + j21) = 21.13 \angle 83.48^\circ \Omega$$

$$\bar{X}_T = \bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_0 = (2.4 + j21) + (j13 + j12) = (2.4 + j46) = 46 \angle 87^\circ \Omega$$

- **Cálculo de las componentes simétricas totales de las corrientes en el punto de cortocircuito**

$$\bar{I}_{R1} = \bar{I}_{R2} = \bar{I}_{R3} = \frac{\bar{V}_f}{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_0} = \frac{\frac{10000 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}}}{46 \angle 87^\circ} = 125.5 \angle -87^\circ A$$

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 ($\bar{I}_{k1}$) 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)

$$\bar{I}_{K1} = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{R0} = 3\bar{I}_{R1} = 3 \cdot (125.5 \angle -87^\circ) = 376.5 \angle -87^\circ A$$

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 ($\bar{I}_{sg1}$) 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: $\bar{a} = 1 \angle 0^\circ$ $\bar{a}^{-2} = 1 \angle 120^\circ$ $\bar{a}^{-3} = 1 \angle 240^\circ$

$$\bar{I}_{Sg1}'' = \bar{I}_{R1g1} \bar{a}^{-2} + \bar{I}_{R2g1} \bar{a} + \bar{I}_{R0g1} = (-3.28 + j62.66) = 62.75 \angle -93^\circ A$$

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_1**

$$\bar{V}_R = \bar{V}_{R1} + \bar{V}_{R2} + \bar{V}_{R0} = (5006.4 - j260.1) = 5013.13 \angle 2.93^\circ V$$

$$\bar{V}_S = \bar{V}_{R1} \bar{a}^2 + \bar{V}_{R2} \bar{a} + \bar{V}_{R0} = (-2719.6 - j4581.9) = 5328.2 \angle -120.7^\circ V$$

- **Cálculo de las tensiones de línea en bornes del generador G_1**

$$\begin{cases} \bar{U}_{RS} = \bar{V}_R - \bar{V}_S = (7726 + j484.2) = 9118 \angle 32^\circ V \\ \bar{U}_{ST} = \bar{V}_S - \bar{V}_T = (-11.6 - j9782.9) = 9782.9 \angle -90^\circ V \\ \bar{U}_{TR} = \bar{V}_T - \bar{V}_R = (-7714.4 - j4940.9) = 9161 \angle 147.4^\circ V \end{cases} \quad \Sigma \bar{U}_{LÍNEA} = 0V$$

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.