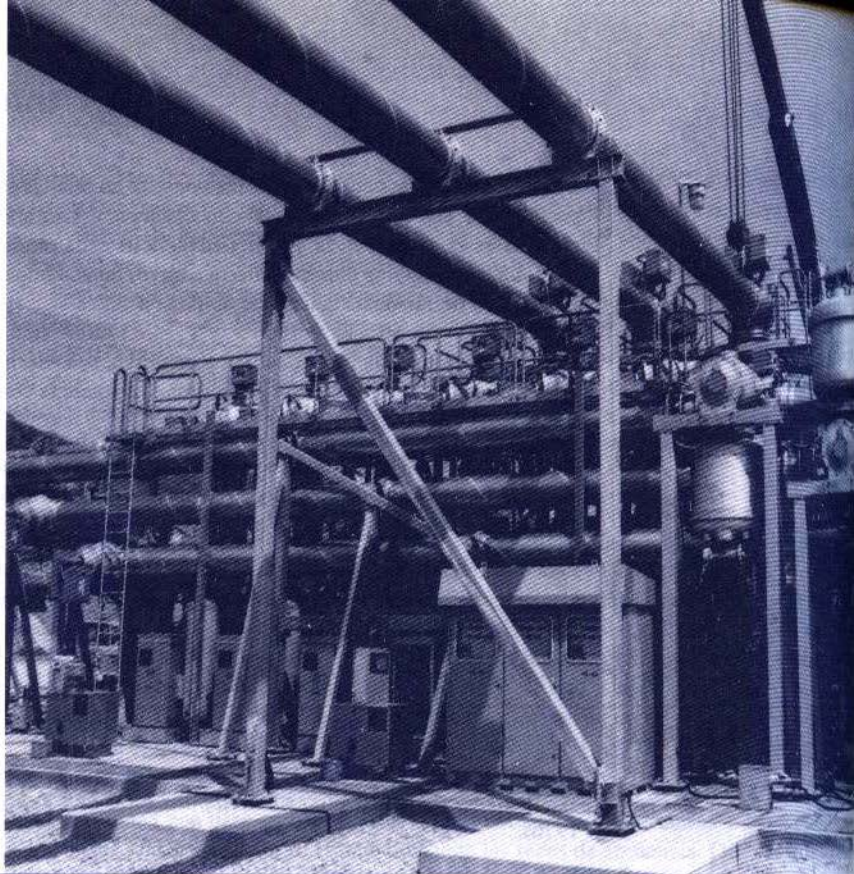


Subestación de 500/220 kV
con transformadores
comunes rellenos de aceite
e interruptores aislados
con gas SF₆ (Cortesía de
Southern California Edison)

9



FALLAS ASIMÉTRICAS

Los cortocircuitos ocurren en los sistemas de potencia trifásicos como sigue, en orden de frecuencia de casos: fallas simples línea a tierra, línea a línea, fallas dobles línea a tierra y fallas trifásicas balanceadas. La trayectoria de la corriente de falla podría tener ya sea impedancia cero, la cual se llama cortocircuito *sólido*, o bien, impedancia distinta de cero. Otros tipos de falla son las de un conductor abierto y las de dos conductores abiertos, que pueden ocurrir cuando se rompen los conductores o cuando una o dos fases de un interruptor se abren de manera inadvertida.

Aunque el cortocircuito trifásico es el que menos ocurre, se consideró primero, en el capítulo 7, debido a su simplicidad. Cuando ocurre una falla trifásica balanceada en un sistema trifásico balanceado, sólo hay corriente de falla de secuencia positiva: las redes de secuencias cero, positiva y negativa, están completamente desacopladas.

Cuando se presenta una falla asimétrica en un sistema balanceado, las redes de secuencia están interconectadas sólo en el lugar de la falla. Como tal, el cálculo de las corrientes de falla se simplifica bastante si se emplean redes de secuencia.

Como en el caso de las fallas trifásicas balanceadas, las fallas asimétricas tienen dos componentes de corriente de falla: una componente ca o simétrica —que incluye corrientes subtransitorias, transitorias y de estado estable— y una componente

de cd. El método simplificado E/X para la selección de interruptores descrito en la sección 7.5 también se aplica a fallas asimétricas. No se considera la corriente de desplazamiento de cd a menos que sea muy grande; por ejemplo, cuando la relación X/R es muy grande.

Comenzamos este capítulo empleando las redes de secuencia cero, positiva y negativa por unidad para representar un sistema trifásico. También se hacen ciertas suposiciones para simplificar los cálculos de las corrientes de falla y se revisa en forma breve la falla trifásica balanceada. En las secciones 9.2, 9.3 y 9.4 presentamos las fallas simples de línea a tierra, línea a línea y doble línea a tierra. El uso de la matriz de impedancias de bus de secuencia positiva para los cálculos de falla trifásica de la sección 7.4 se extiende en la sección 9.5 a los cálculos de fallas asimétricas al considerar una matriz de impedancias de bus para cada red de secuencia. Asimismo, se incluyen ejemplos con el simulador PowerWorld, que se basan en el uso de las matrices de impedancias de bus. El simulador PowerWorld calcula las corrientes de falla simétricas tanto para las fallas trifásicas como asimétricas. El simulador puede emplearse en el diseño de sistemas de potencia para seleccionar, ajustar y coordinar equipo de protección.

CASO DE ESTUDIO

Cuando no se interrumpen de inmediato los cortocircuitos, pueden ocurrir incendios de origen eléctrico y explosiones. Para reducir la probabilidad de que ocurra lo anterior, se recomienda lo siguiente:

- Diseño cuidadoso de ubicación de sistemas de energía eléctrica
- Instalación de equipo de calidad
- Protección del sistema de potencia que provea una rápida detección y eliminación de las fallas (véase el capítulo 10)
- Sistemas automáticos contra incendios
- Programas de mantenimiento formales e intervalos de inspección
- Reparación o retiro de equipo dañado u obsoleto

El artículo siguiente describe incidentes en tres compañías de Estados Unidos durante el verano de 1990 [8].

Incendios en compañías eléctricas estadounidenses

GLENN ZORPETTE

Los incendios de origen eléctrico en subestaciones fueron la causa de tres cortes de energía importantes a mitad del verano en Estados Unidos, dos en el lado oeste de Chicago y uno en el distrito financiero del centro de la ciudad de Nueva York. En Chicago, el

problema comenzó la noche del sábado 28 de julio, con un incendio en la caseta de control núm. 1 de la subestación Commonwealth Edison Co.'s Crawford, según el portavoz Gary Wald.

Unos 40 000 residentes del lado oeste de Chicago se quedaron sin electricidad. A unos 25 000 se les restableció el servicio en un día más o menos, y al resto hasta en tres días. Sin embargo, como parte del restablecimiento, Commonwealth Edison instaló una configuración de línea temporal alrededor de la subestación Crawford. Pero cuando se presentó un segundo incendio el 5 de agosto en otra subestación cercana, algunos

de los sistemas de protección que habrían aislado ese incendio resultaron inadecuados debido a esa nueva configuración. Por tanto, lo que hubiera sido un con-tratiempo menor resultó en una pérdida de energía de un día para 25 000 clientes —los mismos 25 000 cuya electricidad se restableció primero después del incendio de Crawford.

El apagón de Nueva York comenzó alrededor del mediodía el 13 de agosto, después que se dio un incendio eléctrico en el equipo de interrupción en la subestación Consolidated Edison's Seaport, un punto de entrada hacia Manhattan para cinco líneas de transmisión de 138 kilovolts. Para interrumpir el flujo de energía al incendio, Edison tuvo que desconectar las cinco líneas, interrumpiendo la energía a cuatro redes en el centro de Manhattan, según la vocera de Con Ed Martha Liipfert.

La energía se restableció en tres de las redes en unas cinco horas, pero la cuarta red, Fulton —que llevaba electricidad a unas 2 400 residencias separadas y 815 negocios— permaneció sin energía hasta el 21 de agosto. Liipfert mencionó que gran parte

del equipo de la subestación Seaport tendría que ser reemplazado, a un costo estimado en cerca de unos 25 millones de dólares.

La creciente preocupación por las bóvedas eléctricas subterráneas en algunas áreas fue validada trágicamente por una explosión en Pasadena, California que causó la muerte de tres trabajadores en una bóveda. En parte, en respuesta a la explosión, la California Public Utilities Commission adoptó nuevas regulaciones el pasado 21 de noviembre solicitando que las compañías eléctricas del estado establecieran programas formales de mantenimiento, intervalos de inspección y normas para desechar equipo obsoleto o de calidad inferior. "Ellos tienen que mantener una evidencia documentada de sus acciones y nosotros como comisión llevaremos a cabo inspecciones de las bóvedas subterráneas y revisaremos sus registros para estar seguros que mantienen sus bóvedas y equipo en buen estado", dijo Russ Copeland, jefe de la rama de seguridad de empresas eléctricas de la comisión.

9.1

REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA

Un sistema trifásico se representa mediante las redes de secuencia en este capítulo. Las redes de secuencia cero, positiva y negativa de componentes del sistema —generadores, motores, transformadores y líneas de transmisión— como se presentan en el capítulo 8 se pueden usar para construir redes de secuencia cero, positiva y negativa del sistema. Se hacen las consideraciones siguientes:

1. El sistema de potencia opera en condiciones balanceadas de estado estable antes de que ocurra la falla. Por tanto, las redes de secuencia cero, positiva y negativa están desacopladas antes de que ocurra la falla. Durante las fallas asimétricas las redes se interconectan sólo en la ubicación de la falla.
2. Se desprecia la corriente de carga de prefalla. Como resultado, los voltajes internos de secuencia positiva de las máquinas son iguales al voltaje de prefalla V_F . Por tanto, el voltaje de prefalla en cada bus de la red de secuencia positiva es igual a V_F .
3. Se desprecian las resistencias de devanados del transformador y las admittancias serie.

4. Se desprecian las resistencias serie de líneas de transmisión y las admitancias en derivación.
5. Se desprecian la resistencia, saliencia y saturación de armadura de la máquina síncrona.
6. Se desprecian las impedancias de cargas no rotatorias.
7. Se desprecian los motores de inducción (en particular los motores con capacidad nominal de 50 hp o menos) o se representan de la misma manera que las máquinas síncronas.

Observe que en este texto estas suposiciones se hacen para simplificar, pero en la práctica no es prudente hacerlo en todos los casos. Por ejemplo, en los sistemas de distribución primarios y secundarios, las corrientes de prefalla en algunos casos podrían equipararse con las corrientes de cortocircuito, y en otros casos, las resistencias de línea podrían reducir en forma importante las corrientes de falla.

Aunque las corrientes de falla así como las contribuciones a las corrientes de falla en el lado de la falla en transformadores Δ -Y no se ven afectadas por los defasamientos Δ -Y, las contribuciones a la falla desde el otro lado de tales transformadores están afectadas por los defasamientos Δ -Y para fallas asimétricas. Por consiguiente, en este capítulo incluimos los efectos de defasamientos Δ -Y.

Consideramos las fallas en el bus trifásico general de la figura 9.1. Las terminales abc , denotadas como *terminales de falla*, se sacan a fin de hacer las conexiones externas que representan fallas. Antes de que ocurra una falla, las corrientes I_a , I_b e I_c son cero.

En la figura 9.2(a) se ilustran las redes de secuencia generales vistas desde las terminales de la falla. Puesto que el sistema de prefalla está balanceado, las redes de secuencia cero, positiva y negativa no están acopladas. También, los componentes de secuencia de las corrientes de falla, I_0 , I_1 e I_2 , son cero antes que ocurra la falla. Las redes de secuencia generales de la figura 9.2(a) se reducen a sus equivalentes de Thévenin vistos desde las terminales de la falla en la figura 9.2(b). Cada red de secuencia tiene una impedancia equivalente de Thévenin. También, la red de secuencia positiva tiene una fuente de voltaje equivalente de Thévenin, que es igual al voltaje de prefalla V_F .

FIGURA 9.1

Bus trifásico general

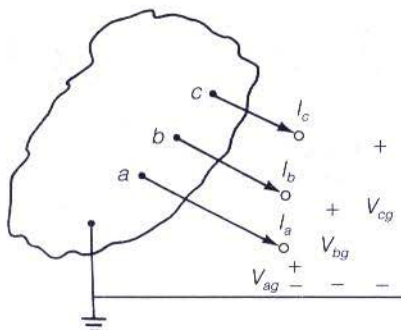
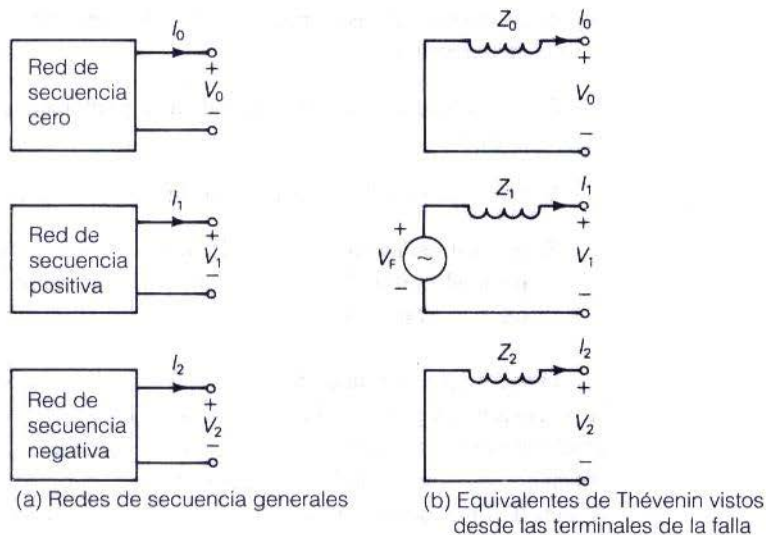


FIGURA 9.2

Redes de secuencia en un bus trifásico general en un sistema balanceado

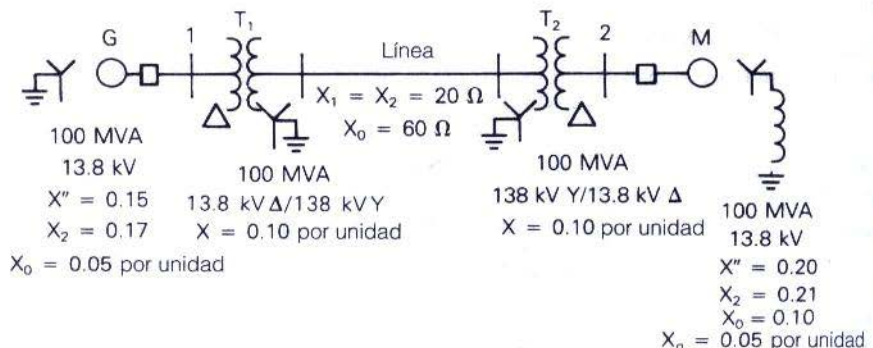


EJEMPLO 9.1 Redes de secuencia de sistemas de potencia y sus equivalentes de Thévenin

En la figura 9.3 se muestra el diagrama unifilar del sistema de potencia considerado en el ejemplo 7.3, donde también se dan las reactancias de secuencia negativa y cero. Los neutros del generador y de los transformadores conectados en Δ -Y están sólidamente conectados a tierra. El neutro del motor se aterriza mediante una reactancia $X_n = 0.05$ por unidad en la base del motor. a) Dibuje las redes de secuencia cero, positiva y negativa por unidad en una base de 100 MVA, 13.8 kV en la zona del generador. b) Reduzca las redes de secuencia a sus equivalentes de Thévenin, vistos desde el bus 2. El voltaje de prefalla es $V_F = 1.05 \angle 0^\circ$ por unidad. No se toma en cuenta la corriente de carga de prefalla y el defasamiento del transformador Δ -Y.

FIGURA 9.3

Diagrama unifilar para el ejemplo 9.1



SOLUCIÓN

- a. Las redes de secuencia se ilustran en la figura 9.4. La red de secuencia positiva es la misma que la de la figura 7.4(a). La red de secuencia negativa es similar a la red de secuencia positiva, excepto que no hay fuentes y se muestran las reactancias de máquina de secuencia negativa. Para este ejemplo se omiten los defasamientos Δ -Y de las redes de secuencia positiva y negativa. En la red de secuencia cero se muestran las reactancias de secuencia cero del generador, el motor y la línea de transmisión. Puesto que el neutro del motor está conectado a tierra mediante una reactancia de neutro X_n , se incluye $3X_n$ en el circuito del motor de secuencia cero. También se toman los modelos del transformador Δ -Y secuencia cero de la figura 8.19.
- b. En la figura 9.5 se ilustran las redes de secuencia reducidas a su equivalente de Thévenin, vistas desde el bus 2. Para el equivalente de secuencia positiva, la fuente de voltaje de Thévenin es el voltaje de prefalla $V_F = 1.05 \angle 0^\circ$ por unidad.

FIGURA 9.4

Redes de secuencia para el ejemplo 9.1

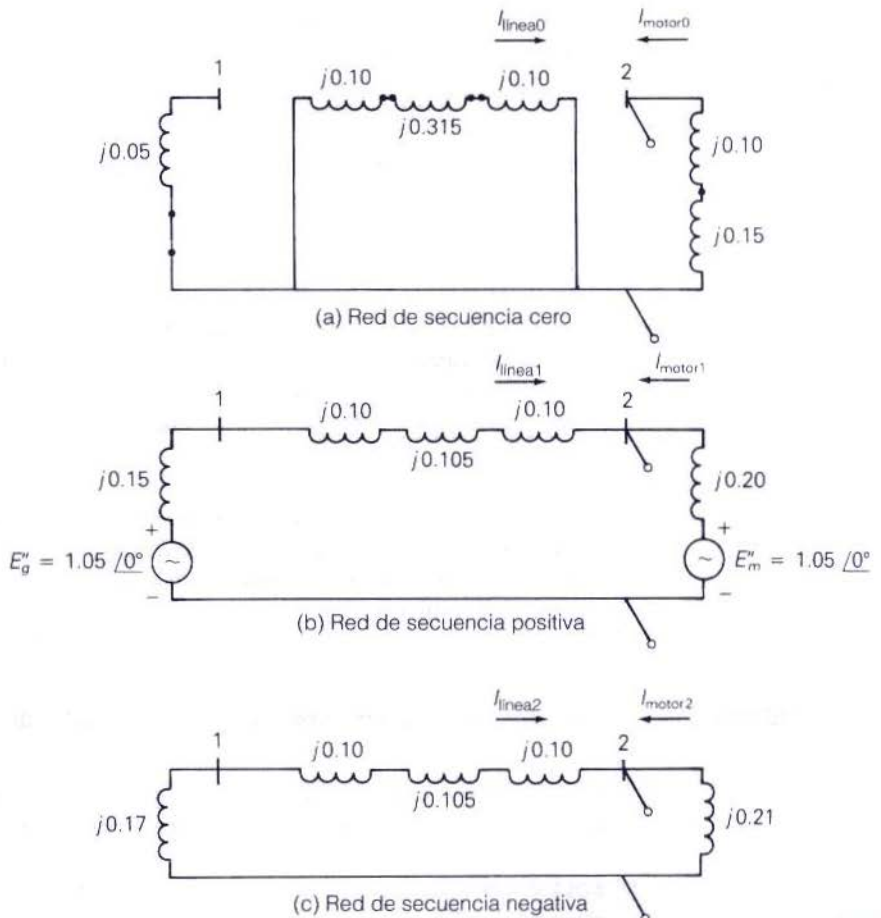
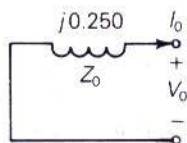
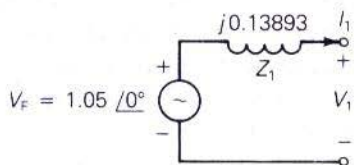


FIGURA 9.5

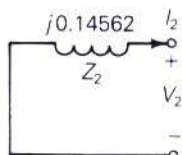
Equivalentes de Thévenin
de las redes de secuencia
para el ejemplo 9.1



(a) Red de secuencia cero



(b) Red de secuencia positiva



(c) Red de secuencia negativa

De la figura 9.4, la impedancia de Thévenin en el bus 2 es la impedancia del motor $j0.20$, como se ve a la derecha del bus 2, en paralelo con $j(0.15 + 0.10 + 0.105 + 0.10) = j0.455$, según se observa a la izquierda; la combinación en paralelo es $j0.20 // j0.455 = j0.13893$ por unidad. De manera similar, la impedancia de Thévenin de secuencia negativa es $j0.21 // j(0.17 + 0.10 + 0.105 + 0.10) = j0.21 // j0.475 = j0.14562$ por unidad. En la red de secuencia cero de la figura 9.4, la impedancia de Thévenin en el bus 2 consiste sólo en $j(0.10 + 0.15) = j0.25$ por unidad, como se observa a la derecha del bus 2. Debido a la conexión Δ del transformador T_2 , la red de secuencia cero a la izquierda del bus 2 está abierta.

Recuerde que para las fallas trifásicas, como se consideró en el capítulo 7, las corrientes de falla están balanceadas y sólo tienen componente de secuencia positiva. Por consiguiente, sólo trabajamos con la red de secuencia positiva al calcular las corrientes de falla trifásicas.

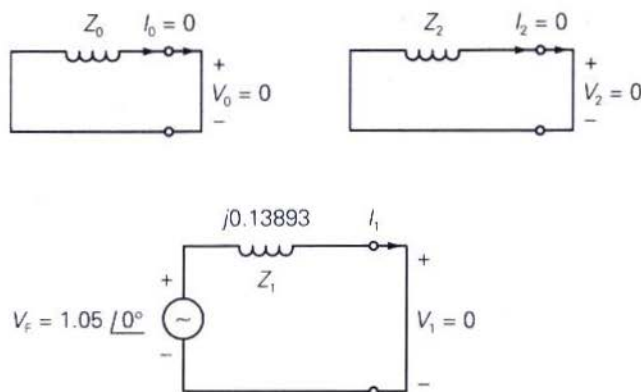
EJEMPLO 9.2 Cálculos de cortocircuito trifásico por medio de redes de secuencia

Calcule las corrientes de falla subtransitorias por unidad en las fases a , b y c para un cortocircuito trifásico sólido a tierra en el bus 2 del ejemplo 9.1.

SOLUCIÓN Las terminales de la red de secuencia positiva de la figura 9.5(b) están en cortocircuito, como se ilustra en la figura 9.6. La corriente de falla de

FIGURA 9.6

Ejemplo 9.2: falla trifásica sólida a tierra en el bus 2



$$I_1 = \frac{V_F}{Z_1} = \frac{1.05 \angle 0^\circ}{j0.13893} = -j7.558 \text{ por unidad}$$

secuencia positiva es que es el mismo resultado que se obtuvo en el inciso c) del ejemplo 7.4. Observe que puesto que en las figuras 9.4 a 9.6 se emplean las reactancias de máquina subtransitorias, la corriente calculada antes es la corriente de falla subtransitoria de secuencia positiva en el bus 2. También, la corriente de secuencia cero I_0 y la corriente de secuencia negativa I_2 son iguales a cero. Por consiguiente, las corrientes de falla subtransitorias en cada fase son, de la ecuación (8.1.16),

$$\begin{bmatrix} I_a'' \\ I_b'' \\ I_c'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -j7.558 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.558 \angle -90^\circ \\ 7.558 \angle 150^\circ \\ 7.558 \angle 30^\circ \end{bmatrix} \text{ por unidad}$$

Las componentes de secuencia de los voltajes línea a tierra en las terminales de la falla son, de la figura 9.2(b),

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (9.1.1)$$

Durante una falla trifásica sólida, las corrientes de falla de secuencia son $I_0 = I_2 = 0$ e $I_1 = V_F/Z_1$; por tanto, de la ecuación (9.1.1), los voltajes de falla de secuencia son $V_0 = V_1 = V_2 = 0$, lo cual debe ser cierto dado que $V_{ag} = V_{bg} = V_{cg} = 0$. Sin embargo, los voltajes de falla no necesitan ser cero durante las fallas asimétricas, como se verá a continuación.

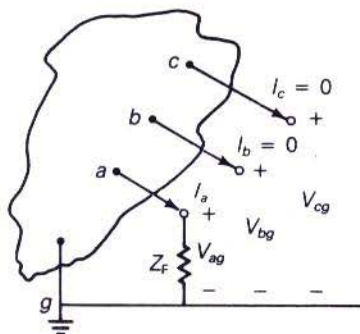
9.2

FALLA SIMPLE DE LÍNEA A TIERRA

Considere una falla simple de línea a tierra de la fase a a tierra en el bus trifásico general que se observa en la figura 9.7(a). Para generalizar, incluimos una impedancia

FIGURA 9.7

Falla simple línea a tierra

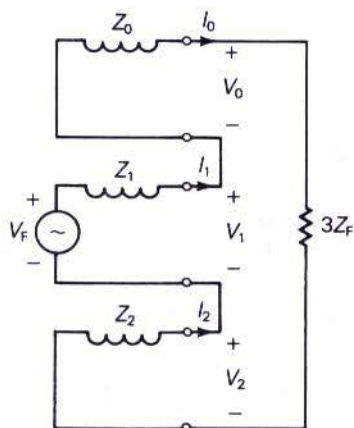


(a) Bus trifásico general

Condiciones de falla en el dominio de fase:

$$V_{ag} = Z_F I_a$$

$$I_b = I_c = 0$$



(b) Redes de secuencia interconectadas

Condiciones de falla en el dominio de las secuencias:

$$I_0 = I_1 = I_2$$

$$(V_0 + V_1 + V_2) = 3Z_F I_1$$

de falla Z_F . En el caso de una falla sólida, $Z_F = 0$, en tanto que para una falla de arco, Z_F es la impedancia de arco. En el caso de una descarga superficial de un aislador de línea de transmisión, Z_F incluye la impedancia de falla total entre la línea y tierra, incluyendo las impedancias del arco y la torre de transmisión, así como el cimientto de la torre si no hay alambres neutros.

Las relaciones que se obtendrán aquí sólo se aplican a una falla simple línea a tierra en la fase a . Sin embargo, puesto que cualquiera de las tres fases se puede marcar de manera arbitraria como la fase a , no se consideran las fallas simples línea a tierra en otras fases.

De la figura 9.7(a):

$$\left. \begin{array}{l} \text{Condiciones de falla en el dominio de la fase} \\ \text{Falla simple línea a tierra} \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_b = I_c = 0 \\ V_{ag} = Z_F I_a \end{array} \quad \begin{array}{l} (9.2.1) \\ (9.2.2) \end{array}$$

Ahora se transforman las ecuaciones (9.2.1) y (9.2.2) al dominio de las secuencias. Utilizando la ecuación (9.2.1) en (8.1.19),

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (9.2.3)$$

También, utilizando la ecuación (8.1.3) y (8.1.20) en la (9.2.2),

$$(V_0 + V_1 + V_2) = Z_F(I_0 + I_1 + I_2) \quad (9.2.4)$$

De (9.2.3) y (9.2.4):

$$\left. \begin{array}{l} \text{Condiciones de falla en el dominio de las secuencias} \\ \text{Falla simple línea a tierra} \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_0 = I_1 = I_2 \\ (V_0 + V_1 + V_2) = (3Z_F)I_1 \end{array} \quad (9.2.5)$$

$$(9.2.6)$$

Las ecuaciones (9.2.5) y (9.2.6) se satisfacen al interconectar las redes de secuencia en serie en las terminales de la falla a través de la impedancia ($3Z_F$), como se muestra en la figura 9.7(b). De esta figura, los componentes de secuencia de las corrientes de falla son:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3Z_F)} \quad (9.2.7)$$

Transformando la ecuación (9.2.7) al dominio de fase mediante la ecuación (8.1.20),

$$I_a = I_0 = I_1 = I_2 = 3I_1 = \frac{3V_F}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + (3Z_F)} \quad (9.2.8)$$

Observe también de las ecuaciones (8.1.21) y (8.1.22),

$$I_b = (I_0 + a^2I_1 + aI_2) = (1 + a^2 + a)I_1 = 0 \quad (9.2.9)$$

$$I_c = (I_0 + aI_1 + a^2I_2) = (1 + a + a^2)I_1 = 0 \quad (9.2.10)$$

Estas ecuaciones resultan obvias, puesto que la falla simple de línea a tierra está en la fase a , no en la fase b o c .

Los componentes de secuencia de los voltajes de línea a tierra en la falla se determinan a partir de la ecuación (9.1.1). Los voltajes de línea a tierra en la falla se pueden obtener transformando los voltajes de secuencia al dominio de fase.

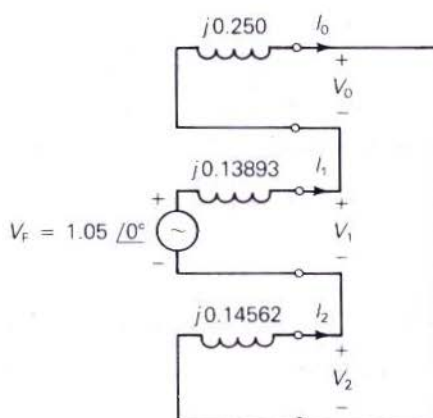
EJEMPLO 9.3 Cálculos para el cortocircuito simple de línea a tierra usando redes de secuencia

Calcule la corriente de falla subtransitoria por unidad y en kA para un cortocircuito simple firme de línea a tierra de la fase a a la tierra en el bus 2 del ejemplo 9.1. También calcule los voltajes por unidad línea a tierra en el bus que tiene la falla (bus 2).

SOLUCIÓN Las redes de secuencia cero, positiva y negativa de la figura 9.5 están conectadas en serie en las terminales de la falla, como se muestra en la figura 9.8.

FIGURA 9.8

Ejemplo 9.3: falla simple de línea a tierra en el bus 2



Puesto que el cortocircuito es sólido, $Z_F = 0$. De la ecuación (9.2.7), las corrientes de secuencia son:

$$\begin{aligned} I_0 = I_1 = I_2 &= \frac{1.05 \angle 0^\circ}{j(0.25 + 0.13893 + 0.14562)} \\ &= \frac{1.05}{j0.53455} = -j1.96427 \text{ por unidad} \end{aligned}$$

De la ecuación (9.2.8), la corriente de falla subtransitoria es

$$I_a'' = 3(-j1.96427) = -j5.8928 \text{ por unidad}$$

La corriente base en el bus 2 es $100/(13.8\sqrt{3}) = 4.1837 \text{ kA}$. Por lo tanto,

$$I_a'' = (-j5.8928)(4.1837) = 24.65 \angle -90^\circ \text{ kA}$$

De la ecuación (9.1.1), las componentes de secuencia de los voltajes en la falla son

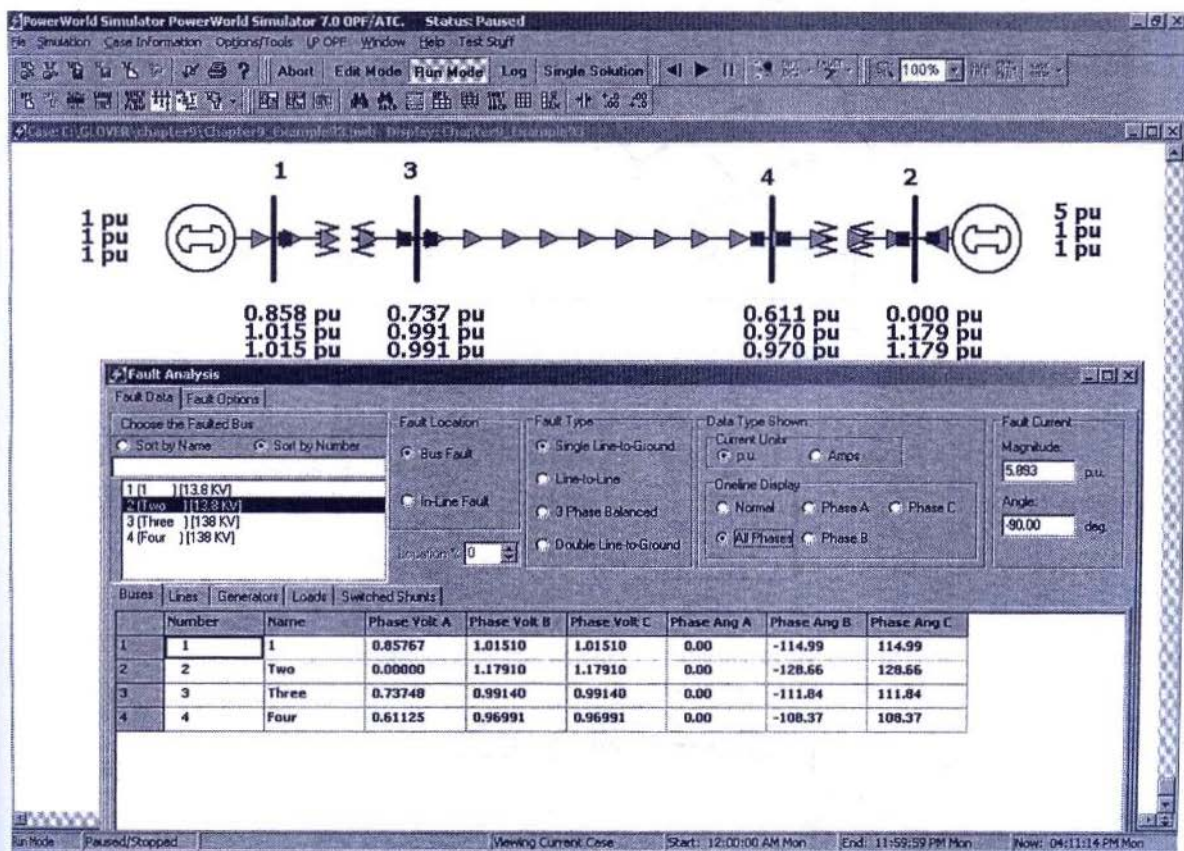
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1.05 \angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j0.25 & 0 & 0 \\ 0 & j0.13893 & 0 \\ 0 & 0 & j0.14562 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j1.96427 \\ -j1.96427 \\ -j1.96427 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -0.49107 \\ 0.77710 \\ -0.28604 \end{bmatrix} \text{ por unidad} \end{aligned}$$

Transformando al dominio de fase, los voltajes de línea a tierra en el bus 2 que tiene la falla son

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.49107 \\ 0.77710 \\ -0.28604 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.179 \angle 231.3^\circ \\ 1.179 \angle 128.7^\circ \end{bmatrix} \text{ por unidad}$$

Observe que $V_{ag} = 0$, según se especifica por las condiciones de falla. Asimismo, $I_b'' = I_c'' = 0$.

Abra el ejemplo 9_3 del simulador PowerWorld para tener una animación de este ejemplo. El proceso para simular una falla asimétrica es casi idéntico al de una falla balanceada. Es decir, a partir del diagrama unifilar, dé click con el botón derecho del ratón en el símbolo del bus que corresponde a la ubicación de la falla. Con esto se muestra el menú local. Seleccione "Fault.." para ver el cuadro de diálogo Fault. Compruebe que se selecciona el bus correcto y, luego, establezca el campo Fault Type en "Single Line-to-Ground". Por último, dé click en **Calculate** para determinar las corrientes y los voltajes de falla. Los resultados aparecen en las tablas de la parte inferior del cuadro de diálogo. Observe que con una falla asimétrica las magnitudes de la fase ya no son idénticas. Los valores pueden ser animados en el diagrama unifilar si se cambia el valor del campo One-Line Display.



9.3

FALLA DE LÍNEA A LÍNEA

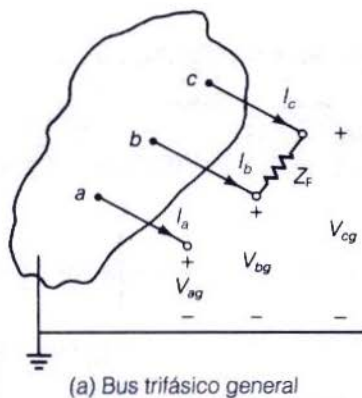
Considere una falla de línea a línea de la fase b a c que se muestra en la figura 9.9(a). De nuevo, para generalizar incluimos una impedancia de falla Z_F . De la figura 9.9(a):

$$\begin{aligned} \text{Condiciones de falla en el dominio de la fase} \quad & \left. \begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_c &= -I_b \end{aligned} \right\} \quad (9.3.1) \\ \text{Falla línea a línea} \quad & V_{bg} - V_{cg} = Z_F I_b \quad (9.3.2) \\ & V_{bg} - V_{cg} = Z_F I_b \quad (9.3.3) \end{aligned}$$

Transformamos las ecuaciones (9.3.1) a (9.3.3) al dominio de las secuencias. Usando las ecuaciones (9.3.1) y (9.3.2) en (8.1.19),

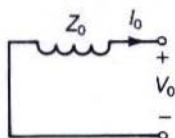
FIGURA 9.9

Falla de línea a línea



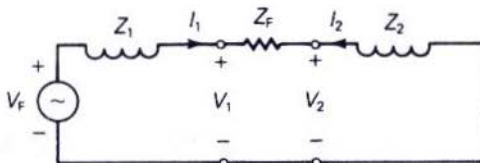
Condiciones de falla en el dominio de fase:

$$\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_c &= -I_b \\ (V_{bg} - V_{cg}) &= Z_F I_b \end{aligned}$$



Condiciones de falla en el dominio de las secuencias:

$$\begin{aligned} I_0 &= 0 \\ I_2 &= -I_1 \\ (V_1 - V_2) &= Z_F I_1 \end{aligned}$$



(b) Redes de secuencia interconectadas

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \\ \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \end{bmatrix} \quad (9.3.4)$$

Usando las ecuaciones (8.1.4), (8.1.5) y (8.1.21) en la (9.3.3),

$$(V_0 + a^2V_1 + aV_2) - (V_0 + aV_1 + a^2V_2) = Z_F(I_0 + a^2I_1 + aI_2) \quad (9.3.5)$$

Observando de la ecuación (9.3.4) que $I_0 = 0$ e $I_2 = -I_1$, la (9.3.5) se simplifica a

$$(a^2 - a)V_1 - (a^2 - a)V_2 = Z_F(a^2 - a)I_1$$

o bien,

$$V_1 - V_2 = Z_F I_1 \quad (9.3.6)$$

Por consiguiente, de las ecuaciones (9.3.4) y (9.3.6):

$$\left. \begin{array}{l} \text{Condiciones de falla en el dominio de las secuencias} \\ \text{Falla de línea a línea} \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_0 = 0 \\ I_2 = -I_1 \\ V_1 - V_2 = Z_F I_1 \end{array} \quad \begin{array}{l} (9.3.7) \\ (9.3.8) \\ (9.3.9) \end{array}$$

Las ecuaciones (9.3.7) a (9.3.9) se satisfacen al conectar las redes de secuencia positiva y negativa en paralelo en las terminales de la falla a través de la impedancia de falla Z_F , como se muestra en la figura 9.9(b). De esta figura, las corrientes de falla son:

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_F}{(Z_1 + Z_2 + Z_F)} \quad I_0 = 0 \quad (9.3.10)$$

Transformando la ecuación (9.3.10) al dominio de fase y usando la identidad $(a^2 - a) = -j\sqrt{3}$, la corriente de falla en la fase b es

$$\begin{aligned} I_b &= I_0 + a^2I_1 + aI_2 = (a^2 - a)I_1 \\ &= -j\sqrt{3}I_1 = \frac{-j\sqrt{3}V_F}{(Z_1 + Z_2 + Z_F)} \end{aligned} \quad (9.3.11)$$

Note también de las ecuaciones (8.1.20) y (8.1.22) que

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (9.3.12)$$

y

$$I_c = I_0 + aI_1 + a^2I_2 = (a - a^2)I_1 = -I_b \quad (9.3.13)$$

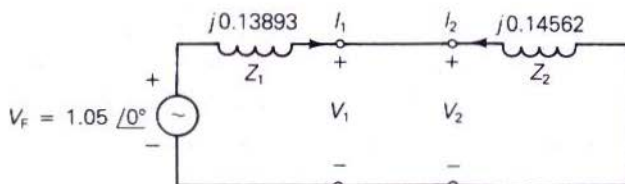
que comprueba las condiciones de falla dadas por (9.3.1) y (9.3.2). Los componentes de secuencia de los voltajes línea a tierra en la falla están dados por la ecuación (9.1.1).

EJEMPLO 9.4 Cálculos de cortocircuito de línea a línea usando redes de secuencia

Calcule la corriente de falla subtransitoria por unidad y en kA para una falla sólida de línea a línea de la fase b a c en el bus 2 del ejemplo 9.1.

FIGURA 9.10

Ejemplo 9.4: falla de línea a línea en el bus 2



SOLUCIÓN Las redes de secuencia positiva y negativa de la figura 9.5 se conectan en paralelo en las terminales de la falla, como se muestra en la figura 9.10. De la ecuación (9.3.10), con $Z_F = 0$, las corrientes de falla de secuencia son

$$I_1 = -I_2 = \frac{1.05 \angle 0^\circ}{j(0.13893 + 0.14562)} = 3.690 \angle -90^\circ$$

$$I_0 = 0$$

De la ecuación (9.3.11), la corriente de falla subtransitoria en la fase b es

$$I_b'' = (-j\sqrt{3})(3.690 \angle -90^\circ) = -6.391 = 6.391 \angle 180^\circ \text{ por unidad}$$

Utilizando 4.1837 kA como la corriente base en el bus 2,

$$I_b'' = (6.391 \angle 180^\circ)(4.1837) = 26.74 \angle 180^\circ \text{ kA}$$

También, de las ecuaciones (9.3.12) y (9.3.13),

$$I_a'' = 0 \quad I_c'' = 26.74 \angle 0^\circ \text{ kA}$$

Los resultados de la falla de línea a línea para este ejemplo se pueden ver en el simulador Power World si se repite el procedimiento del ejemplo 9.3, con la condición de que el valor del campo Fault Type (Tipo de falla) sea "Line-to-Line". ■

9.4

FALLA DE DOBLE LÍNEA A TIERRA

Una falla de doble línea a tierra de la fase b a la fase c a través de la impedancia de falla Z_F a tierra se muestra en la figura 9.11(a). De esta figura:

$$\text{Condiciones de falla en el dominio de fase} \quad \left. \begin{array}{l} I_a = 0 \\ V_{cg} = V_{bg} \end{array} \right\} \quad (9.4.1)$$

$$\text{Falla de doble línea a tierra} \quad \left. \begin{array}{l} V_{cg} = V_{bg} \\ V_{bg} = Z_F(I_b + I_c) \end{array} \right\} \quad (9.4.2)$$

$$V_{bg} = Z_F(I_b + I_c) \quad (9.4.3)$$

Transformando la ecuación (9.4.1) al dominio de las secuencias mediante la ecuación (8.1.20),

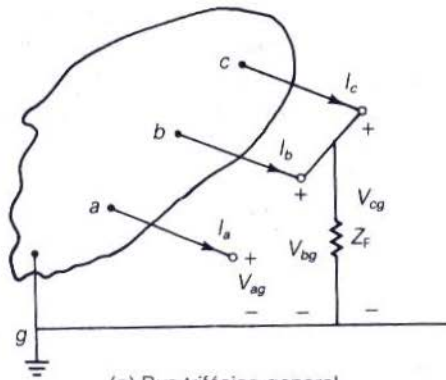
$$I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (9.4.4)$$

También, utilizando las ecuaciones (8.1.4) y (8.1.5) en la (9.4.2),

$$(V_0 + aV_1 + a^2V_2) = (V_0 + a^2V_1 + aV_2)$$

FIGURA 9.11

Falla de doble línea a tierra

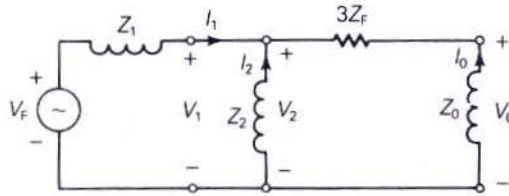


(a) Bus trifásico general

Condiciones de falla en el dominio de fase:

$$I_a = 0$$

$$V_{bg} = V_{cg} = Z_F(I_b + I_c)$$



(b) Redes de secuencia interconectadas

Condiciones de falla en el dominio de las secuencias:

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0$$

$$V_0 - V_1 = (3Z_F)I_0$$

$$V_1 = V_2$$

Simplificando:

$$(a^2 - a)V_2 = (a^2 - a)V_1$$

o bien,

$$V_2 = V_1 \quad (9.4.5)$$

Ahora, usando las ecuaciones (8.1.4), (8.1.21) y (8.1.22) en la (9.4.3),

$$(V_0 + a^2V_1 + aV_2) = Z_F(I_0 + a^2I_1 + aI_2 + I_0 + aI_1 + a^2I_2) \quad (9.4.6)$$

Utilizando la ecuación (9.4.5) y la identidad $a^2 + a = -1$ en la (9.4.6),

$$(V_0 - V_1) = Z_F(2I_0 - I_1 - I_2) \quad (9.4.7)$$

De la ecuación (9.4.4), $I_0 = -(I_1 + I_2)$; por lo tanto, la ecuación (9.4.7) se convierte en

$$V_0 - V_1 = (3Z_F)I_0 \quad (9.4.8)$$

De las ecuaciones (9.4.4), (9.4.5) y (9.4.8), resumimos:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Condiciones de falla en el dominio de la secuencia} \\ \text{Falla de doble línea a tierra} \end{array} \right\} \begin{array}{l} I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (9.4.9) \\ V_2 = V_1 \quad (9.4.10) \\ V_0 - V_1 = (3Z_F)I_0 \quad (9.4.11) \end{array}$$

Las ecuaciones (9.4.9) a (9.4.11) se satisfacen al conectar en paralelo las redes de secuencia cero, positiva y negativa en la terminal de la falla; además, $(3Z_F)$ se incluye en serie con la red de secuencia cero. Esta conexión se muestra en la figura 9.11(b). De esta figura, la corriente de falla de secuencia positiva es

$$I_1 = \frac{V_F}{Z_1 + [Z_2 / (Z_0 + 3Z_F)]} = \frac{V_F}{Z_1 + \left[\frac{Z_2(Z_0 + 3Z_F)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \right]} \quad (9.4.12)$$

Usando la división de corriente en la figura 9.11(b), las corrientes de falla de secuencia negativa y cero son

$$I_2 = (-I_1) \left(\frac{Z_0 + 3Z_F}{Z_0 + 3Z_F + Z_2} \right) \quad (9.4.13)$$

$$I_0 = (-I_1) \left(\frac{Z_2}{Z_0 + 3Z_F + Z_2} \right) \quad (9.4.14)$$

Estas corrientes de falla de secuencia pueden transformarse al dominio de la fase mediante la ecuación (8.1.16). También, las componentes de secuencia de los voltajes de línea a tierra en la falla están dados por la ecuación (9.1.1).

EJEMPLO 9.5 Cálculos de cortocircuito de doble línea a tierra usando redes de secuencia

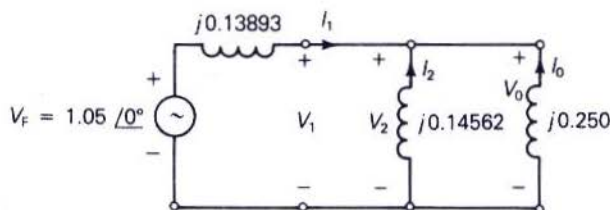
Calcule a) la corriente de falla subtransitoria en cada fase, b) la corriente de falla al neutro y c) las contribuciones a la corriente de falla del motor y de la línea de transmisión, para una falla sólida de doble línea a tierra de la fase *b* a *c* a tierra en el bus 2 del ejemplo 9.1. Desprecie los defasamientos del transformador Δ -Y.

SOLUCIÓN

- a. Las redes de secuencia cero, positiva y negativa de la figura 9.5 están conectadas en paralelo en las terminales de la falla de la figura 9.12. De la ecuación (9.4.12), con $Z_F = 0$,

FIGURA 9.12

Ejemplo 9.5: falla de doble línea a tierra en el bus 2



$$I_1 = \frac{1.05 \angle 0^\circ}{j \left[0.13893 + \frac{(0.14562)(0.25)}{0.14562 + 0.25} \right]} = \frac{1.05 \angle 0^\circ}{j0.23095}$$

$$= -j4.5464 \text{ por unidad}$$

De las ecuaciones (9.4.13) y (9.4.14),

$$I_2 = (+j4.5464) \left(\frac{0.25}{0.25 + 0.14562} \right) = j2.8730 \text{ por unidad}$$

$$I_0 = (+j4.5464) \left(\frac{0.14562}{0.25 + 0.14562} \right) = j1.6734 \text{ por unidad}$$

Transformado al dominio de fase, las corrientes de falla subtransitorias son:

$$\begin{bmatrix} I_a'' \\ I_b'' \\ I_c'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +j1.6734 \\ -j4.5464 \\ +j2.8730 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6.8983 \angle 158.66^\circ \\ 6.8983 \angle 21.34^\circ \end{bmatrix} \text{ por unidad}$$

Usando la corriente base de 4.1837 kA en el bus 2,

$$\begin{bmatrix} I_a'' \\ I_b'' \\ I_c'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6.8983 \angle 158.60^\circ \\ 6.8983 \angle 21.34^\circ \end{bmatrix} (4.1837) = \begin{bmatrix} 0 \\ 28.86 \angle 158.66^\circ \\ 28.86 \angle 21.34^\circ \end{bmatrix} \text{ kA}$$

b. La corriente de falla al neutro es

$$I_n = (I_b'' + I_c'') = 3I_0 = j5.0202 \text{ por unidad}$$

$$= (j5.0202)(4.1837) = 21.00 \angle 90^\circ \text{ kA}$$

c. Sin considerar los defasamientos del transformador Δ -Y, las contribuciones a la corriente de falla del motor y la línea de transmisión se obtienen de la figura 9.4. De la red de secuencia cero, figura 9.4(a), debido a la conexión del transformador, la contribución de la línea a la corriente de falla de secuencia cero es cero. Es decir,

$$I_{\text{línea } 0} = 0$$

$$I_{\text{motor } 0} = I_0 = j1.6734 \text{ por unidad}$$

De la red de secuencia positiva, figura 9.4(b), pueden conectarse las terminales positivas de los voltajes de máquina internos, puesto que $E_g'' = E_m''$. Entonces, por la división de corriente,

$$I_{\text{línea } 1} = \frac{X_m''}{X_m'' + (X_g'' + X_{T1} + X_{\text{línea } 1} + X_{T2})} I_1$$

$$= \frac{0.20}{0.20 + (0.455)} (-j4.5464) = -j1.3882 \text{ por unidad}$$

$$I_{\text{motor } 1} = \frac{0.455}{0.20 + 0.455} (-j4.5464) = -j3.1582 \text{ por unidad}$$

De la red de secuencia negativa, figura 9.4(c), usando la división de corriente,

$$I_{\text{línea } 2} = \frac{0.21}{0.21 + 0.475} (j2.8730) = j0.8808 \quad \text{por unidad}$$

$$I_{\text{motor } 2} = \frac{0.475}{0.21 + 0.475} (j2.8730) = j1.9922 \quad \text{por unidad}$$

Transformando al dominio de fase con las corrientes base de 0.41837 kA para la línea y 4.1837 kA para el motor,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I''_{\text{línea } a} \\ I''_{\text{línea } b} \\ I''_{\text{línea } c} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -j1.3882 \\ j0.8808 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0.5074 \angle -90^\circ \\ 1.9813 \angle 172.643^\circ \\ 1.9813 \angle 7.357^\circ \end{bmatrix} \quad \text{por unidad} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.2123 \angle -90^\circ \\ 0.8289 \angle 172.643^\circ \\ 0.8289 \angle 7.357^\circ \end{bmatrix} \quad \text{kA}$$

$$\begin{bmatrix} I''_{\text{motor } a} \\ I''_{\text{motor } b} \\ I''_{\text{motor } c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j1.6734 \\ -j3.1582 \\ j1.9922 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.5074 \angle 90^\circ \\ 4.9986 \angle 153.17^\circ \\ 4.9986 \angle 26.83^\circ \end{bmatrix} \quad \text{por unidad}$$

$$= \begin{bmatrix} 2.123 \angle 90^\circ \\ 20.91 \angle 153.17^\circ \\ 90.91 \angle 26.83^\circ \end{bmatrix} \quad \text{kA}$$

Los resultados de la falla de doble línea a tierra para este ejemplo se pueden observar en el simulador PowerWorld si se repite el procedimiento del ejemplo 9.3, con la condición de que el valor del campo Fault Type (Tipo de falla) sea "Double Line-to-Ground".

EJEMPLO 9.6 Efecto del defasamiento del transformador Δ -Y sobre las corrientes de falla

Resuelva de nuevo el ejemplo 9.5, con los defasamientos del transformador Δ -Y incluidos. Suponga el defasamiento de la norma americana.

SOLUCIÓN Las redes de secuencia de la figura 9.4 se dibujan de nuevo en la figura 9.13 con los transformadores ideales defasadores que representan los

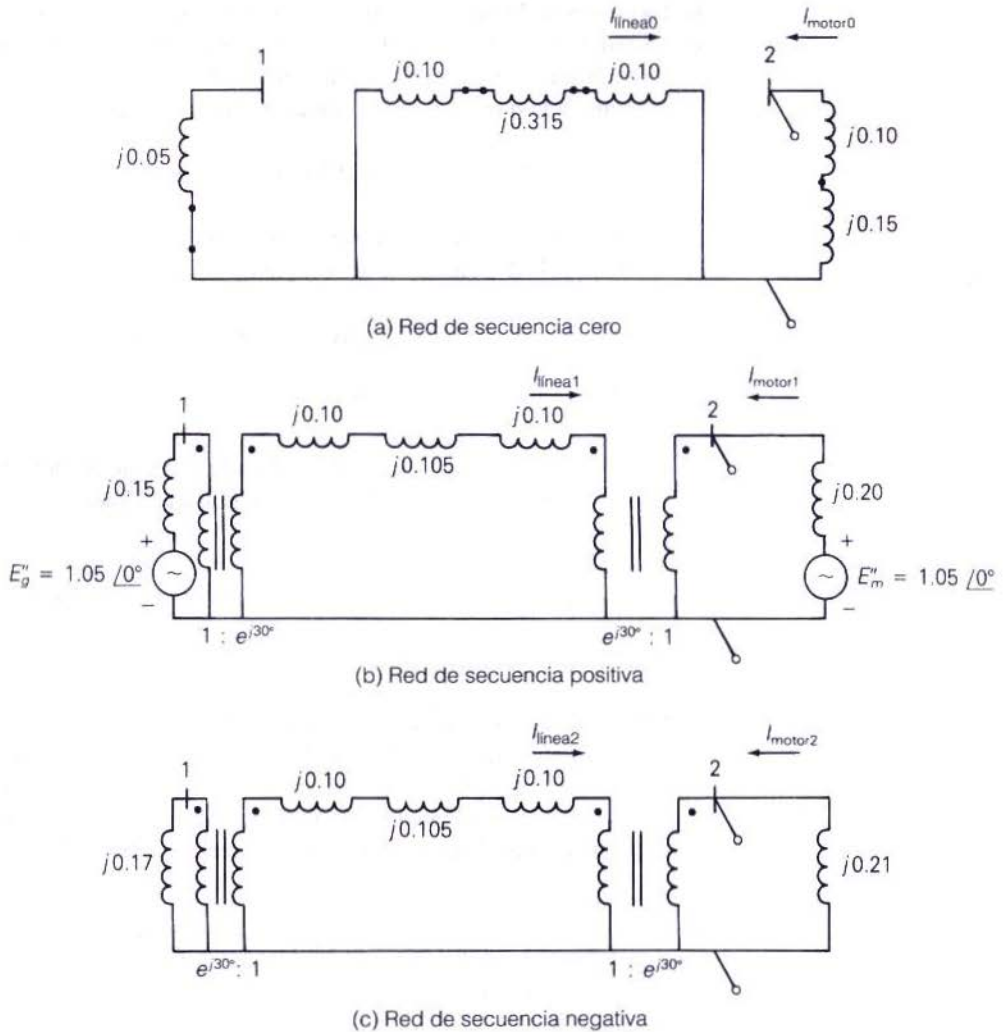


FIGURA 9.13 Redes de secuencia para el ejemplo 9.6

defasamientos Δ -Y. Según la norma americana, las cantidades de secuencia positiva sobre el lado de alto voltaje de los transformadores adelantan a sus cantidades correspondientes en el lado de bajo voltaje por 30° . También, los defasamientos de secuencia negativa son el reverso de los defasamientos de secuencia positiva.

- a.** Recuerde de la sección 3.1 y de la ecuación (3.1.26) que la impedancia por unidad permanece sin cambio cuando se refiere de un lado de un transformador ideal defasador al otro. Por consiguiente, los equivalentes de Thévenin de las redes de secuencia de la figura 9.13, vistos desde el bus fallado 2, son los mismos que los de la figura 9.5. Por lo tanto, las componentes de secuencia así como las componentes de fase de las corrientes de falla son las mismas que las del ejemplo 9.5(a).

- b. La corriente de falla al neutro es la misma que la dada en el ejemplo 9.5(b).
 c. La red de secuencia cero, figura 9.13(a), es la misma que la que se ilustra en la figura 9.4(a). Por consiguiente, las contribuciones a la corriente de falla de secuencia cero de la línea y el motor son las mismas que las dadas en el ejemplo 9.5(c).

$$I_{\text{línea } 0} = 0 \quad I_{\text{motor } 0} = I_0 = j1.6734 \quad \text{por unidad}$$

La contribución a la corriente de falla de secuencia positiva de la línea de la figura 9.13(b) adelanta por 30° a la de la figura 9.4(b). Es decir,

$$I_{\text{línea } 1} = (-j1.3882)(1/\underline{30^\circ}) = 1.3882/\underline{-60^\circ} \quad \text{por unidad}$$

$$I_{\text{motor } 1} = -j3.1582 \quad \text{por unidad}$$

De manera similar, la contribución a la corriente de falla de secuencia negativa de la línea de la figura 9.13(c) está atrasada respecto a la de la figura 9.4(c) por 30° . Es decir,

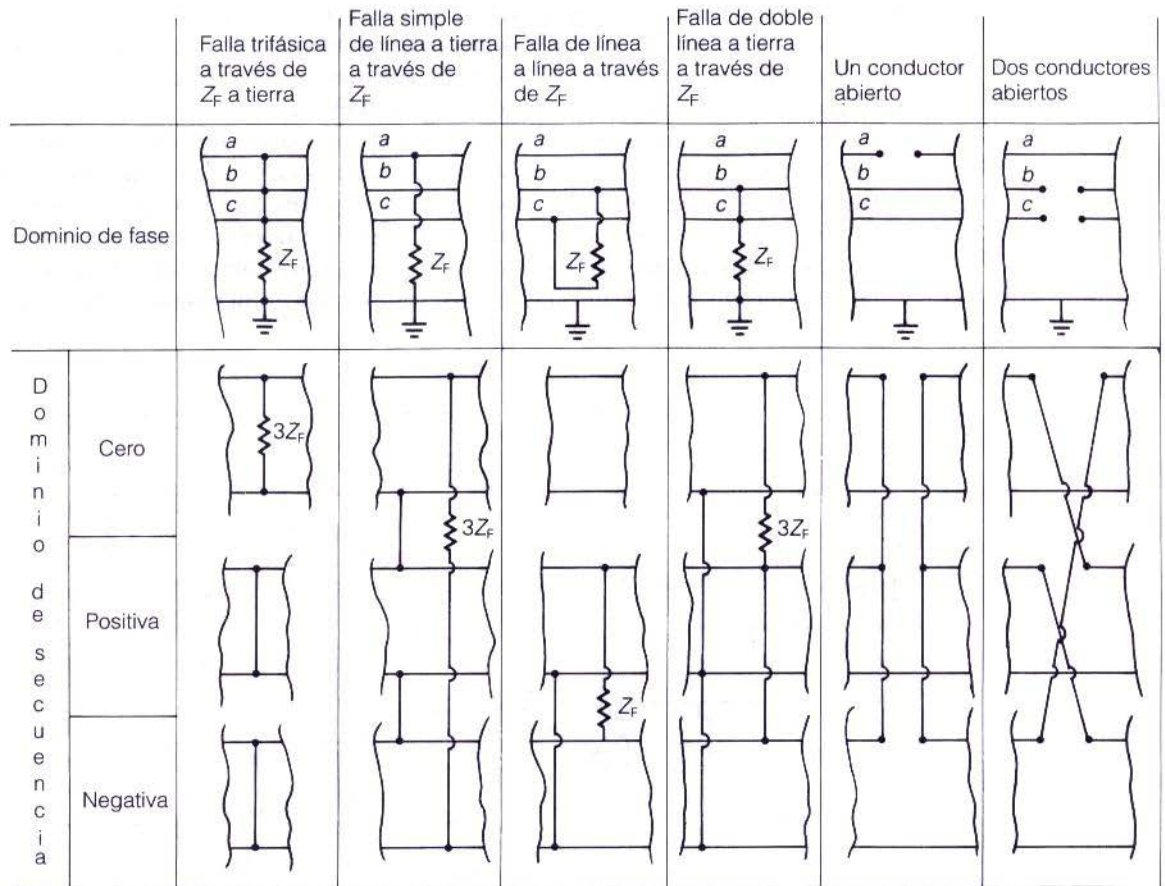
$$I_{\text{línea } 2} = (j0.8808)(1/\underline{-30^\circ}) = 0.8808/\underline{60^\circ} \quad \text{por unidad}$$

$$I_{\text{motor } 2} = j1.9922 \quad \text{por unidad}$$

Por lo tanto, las corrientes de secuencia, así como las corrientes de fase del motor, son las mismas que las del ejemplo 9.5(c). También, las corrientes de secuencia de la línea tienen las mismas magnitudes que las del ejemplo 9.5(c), pero las corrientes de la línea de secuencia positiva y negativa están defasadas $+30^\circ$ y -30° , respectivamente. Transformando las corrientes de línea al dominio de fase:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I''_{\text{línea } a} \\ I''_{\text{línea } b} \\ I''_{\text{línea } c} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1.3882/\underline{-60^\circ} \\ 0.8808/\underline{60^\circ} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1.2166/\underline{-21.17^\circ} \\ 2.2690/\underline{180^\circ} \\ 1.2166/\underline{21.17^\circ} \end{bmatrix} \quad \text{por unidad} \\ &= \begin{bmatrix} 0.5090/\underline{-21.17^\circ} \\ 0.9492/\underline{180^\circ} \\ 0.5090/\underline{21.17^\circ} \end{bmatrix} \quad \text{kA} \end{aligned}$$

En conclusión, los defasamientos del transformador Δ -Y no tienen efecto en las corrientes de falla ni en la contribución a las corrientes de falla en el lado de la falla de los transformadores Δ -Y. Sin embargo, en el otro lado de los transformadores Δ -Y, las componentes de secuencia positiva y negativa de las contribuciones a las corrientes de falla están defasadas por $\pm 30^\circ$, lo cual afecta tanto a la magnitud como al ángulo de las componentes de fase de estas contribuciones de falla para fallas asimétricas. ■

**FIGURA 9.14** Resumen de fallas

En la figura 9.14 se resumen las conexiones de redes de secuencia para la falla trifásica balanceada y las fallas asimétricas consideradas hasta el momento. Las conexiones de redes de secuencia para dos fallas adicionales, un conductor abierto y dos conductores abiertos, también se ilustran en la figura 9.14 y se dejan como ejercicio para que usted las compruebe (véanse los problemas 9.26 y 9.27).

9.5

MATRICES DE IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DE BUS

Utilizamos la matriz de impedancias de bus de secuencia positiva de la sección 7.4 para calcular las corrientes y voltajes durante fallas trifásicas balanceadas. Este método se amplía aquí a las fallas asimétricas mediante la representación de cada red de secuencia como un circuito equivalente de impedancia de bus (o como un

equivalente de rastrillo). Una matriz de impedancias de bus se puede calcular para cada red de secuencia al invertir la matriz de admitancias de bus correspondiente. Para simplificar, se omiten las resistencias, admitancias en derivación, impedancias de carga no rotatorias y corrientes de carga de prefalla.

En la figura 9.15 se muestra la conexión de los equivalentes de rastrillo de secuencia tanto para fallas simétricas como asimétricas en el bus n de un sistema de potencia trifásico de N buses. Cada elemento de impedancia de bus tiene un subíndice adicional 0, 1 o 2, que identifica al equivalente de rastrillo de secuencia donde se localiza. En la figura no se muestran las impedancias mutuas. El voltaje de prefalla V_F se incluye en el equivalente de rastrillo de secuencia positiva. De la figura,

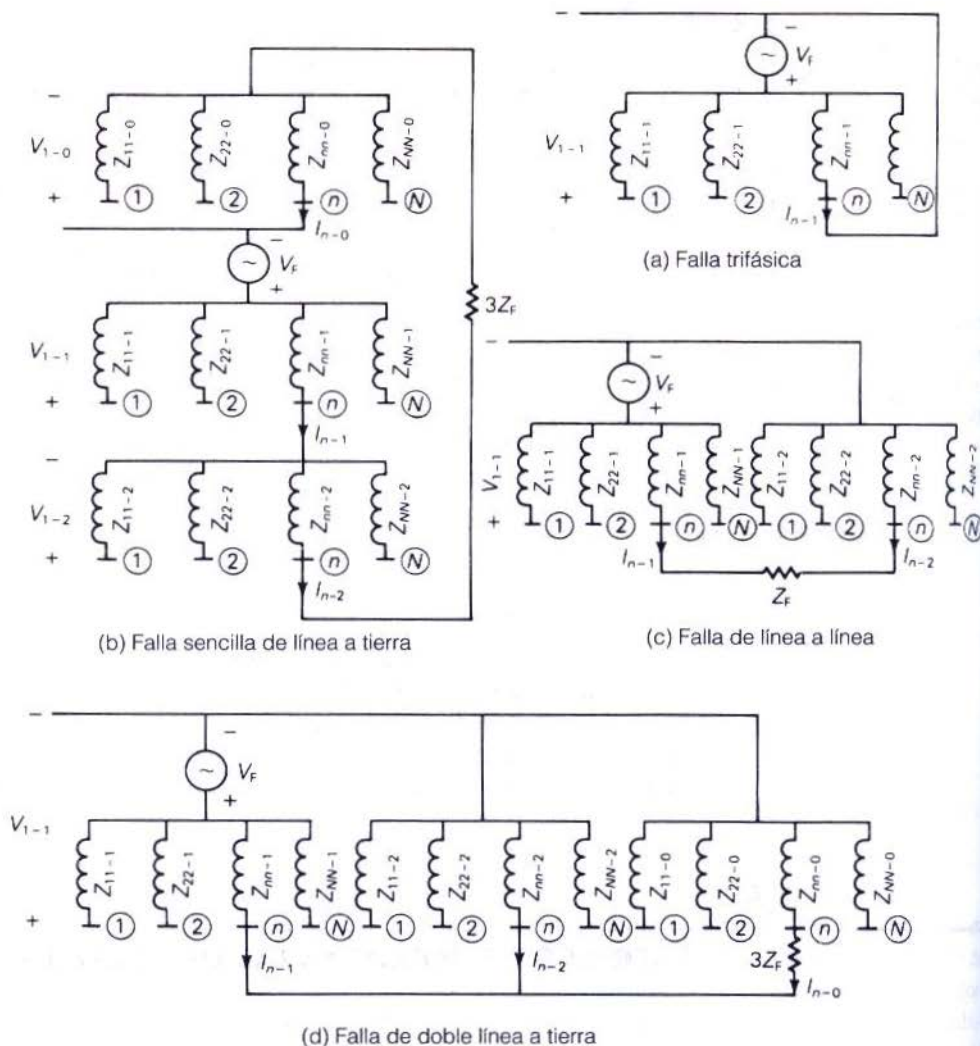


FIGURA 9.15 Conexión de equivalencias de rastrillo de redes de secuencia para fallas de un sistema trifásico (no se muestran impedancias mutuas)

las componentes de secuencia de la corriente de falla para cada tipo de falla en el bus n son como sigue:

Falla trifásica balanceada:

$$I_{n-1} = \frac{V_F}{Z_{nn-1}} \quad (9.5.1)$$

$$I_{n-0} = I_{n-2} = 0 \quad (9.5.2)$$

Falla simple de línea a tierra (fase a a tierra):

$$I_{n-0} = I_{n-1} = I_{n-2} = \frac{V_F}{Z_{nn-0} + Z_{nn-1} + Z_{nn-2} + 3Z_F} \quad (9.5.3)$$

Falla de línea a línea (fase b a c):

$$I_{n-1} = -I_{n-2} = \frac{V_F}{Z_{nn-1} + Z_{nn-2} + Z_F} \quad (9.5.4)$$

$$I_{n-0} = 0 \quad (9.5.5)$$

Falla de doble línea a tierra (fase b a c a tierra):

$$I_{n-1} = \frac{V_F}{Z_{nn-1} + \left[\frac{Z_{nn-2}(Z_{nn-0} + 3Z_F)}{Z_{nn-2} + Z_{nn-0} + 3Z_F} \right]} \quad (9.5.6)$$

$$I_{n-2} = (-I_{n-1}) \left(\frac{Z_{nn-0} + 3Z_F}{Z_{nn-0} + 3Z_F + Z_{nn-2}} \right) \quad (9.5.7)$$

$$I_{n-0} = (-I_{n-1}) \left(\frac{Z_{nn-2}}{Z_{nn-0} + 3Z_F + Z_{nn-2}} \right) \quad (9.5.8)$$

También de la figura 9.15, las componentes de secuencia de los voltajes de línea a tierra en cualquier bus k durante una falla en el bus n son:

$$\begin{bmatrix} V_{k-0} \\ V_{k-1} \\ V_{k-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{kn-0} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{kn-1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{kn-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{n-0} \\ I_{n-1} \\ I_{n-2} \end{bmatrix} \quad (9.5.9)$$

Si el bus k está en el lado sin falla de un transformador Δ -Y, entonces los ángulos de fase de V_{k-1} y V_{k-2} en la ecuación (9.5.9) se modifican para tomar en cuenta los defasamientos Δ -Y. Asimismo, las corrientes de falla de secuencia anteriores y los voltajes de secuencia pueden transformarse al dominio de fase mediante las ecuaciones (8.1.16) y (8.1.9).

EJEMPLO 9.7 Cálculos de cortocircuito simple línea a tierra por medio de $Z_{bus 0}$, $Z_{bus 1}$ y $Z_{bus 2}$

Resultan de interés las fallas en los buses 1 y 2 para el sistema de potencia trifásico del ejemplo 9.1. El voltaje de prefalla es 1.05 por unidad. Se desprecia la corriente de

carga de prefalla. a) Determine las matrices de impedancia de bus de secuencia cero, positiva y negativa por unidad. Encuentre la corriente de falla subtransitoria en valores por unidad para una falla sólida simple de línea a tierra de la fase *a* a tierra b) en el bus 1 y c) en el bus 2. Obtenga los voltajes de línea a tierra por unidad en d) el bus 1 y e) el bus 2 durante la falla simple línea a tierra en el bus 1.

SOLUCIÓN

- a. En relación con la figura 9.4(a), la matriz de admitancias de bus de secuencia cero es

$$Y_{\text{bus } 0} = -j \left[\begin{array}{c|c} 20 & 0 \\ \hline 0 & 4 \end{array} \right] \text{ por unidad}$$

Invirtiendo $Y_{\text{bus } 0}$,

$$Z_{\text{bus } 0} = j \left[\begin{array}{c|c} 0.05 & 0 \\ \hline 0 & 0.25 \end{array} \right] \text{ por unidad}$$

Observe que las reactancias de dispersión de transformadores y la reactancia de la línea de transmisión de secuencia cero de la figura 9.4(a) no tienen efecto en $Z_{\text{bus } 0}$. Las conexiones en Δ del transformador bloquean el flujo de corriente de secuencia cero de los transformadores al bus 1 y 2.

La matriz de admitancias de bus de secuencia positiva, de la figura 9.4(b), es

$$Y_{\text{bus } 1} = -j \left[\begin{array}{c|c} 9.9454 & -3.2787 \\ \hline -3.2787 & 8.2787 \end{array} \right] \text{ por unidad}$$

Invirtiendo $Y_{\text{bus } 1}$,

$$Z_{\text{bus } 1} = j \left[\begin{array}{c|c} 0.11565 & 0.04580 \\ \hline 0.04580 & 0.13893 \end{array} \right] \text{ por unidad}$$

De manera similar, de la figura 9.4(c)

$$Y_{\text{bus } 2} = -j \left[\begin{array}{c|c} 9.1611 & -3.2787 \\ \hline -3.2787 & 8.0406 \end{array} \right] \text{ por unidad}$$

Invirtiendo $Y_{\text{bus } 2}$,

$$Z_{\text{bus } 2} = j \left[\begin{array}{c|c} 0.12781 & 0.05212 \\ \hline 0.05212 & 0.14562 \end{array} \right] \text{ por unidad}$$

- b. De la ecuación (9.5.3), con $n = 1$ y $Z_F = 0$, las corrientes de falla de secuencia son

$$\begin{aligned} I_{1-0} = I_{1-1} = I_{1-2} &= \frac{V_F}{Z_{11-0} + Z_{11-1} + Z_{11-2}} \\ &= \frac{1.05 \angle 0^\circ}{j(0.05 + 0.11565 + 0.12781)} = \frac{1.05}{j0.29346} = -j3.578 \text{ por unidad} \end{aligned}$$

Las corrientes de falla subtransitorias en el bus 1 son, de la ecuación (8.1.16),

$$\begin{bmatrix} I''_{1a} \\ I''_{1b} \\ I''_{1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j3.578 \\ -j3.578 \\ -j3.578 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j10.73 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ por unidad}$$

c. De nuevo, de la ecuación (9.5.3), con $n = 2$ y $Z_F = 0$,

$$\begin{aligned} I_{2-0} = I_{2-1} = I_{2-2} &= \frac{V_F}{Z_{22-0} + Z_{22-1} + Z_{22-2}} \\ &= \frac{1.05 \angle 0^\circ}{j(0.25 + 0.13893 + 0.14562)} = \frac{1.05}{j0.53455} \\ &= -j1.96427 \text{ por unidad} \end{aligned}$$

y

$$\begin{bmatrix} I''_{2a} \\ I''_{2b} \\ I''_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j1.96427 \\ -j1.96427 \\ -j1.96427 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j5.8928 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ por unidad}$$

Éste es el mismo resultado obtenido en el ejemplo 9.3.

d. Las componentes de secuencia de los voltajes de línea a tierra en el bus 1 durante la falla en el bus 1 son, de la ecuación (9.5.9), con $k = 1$ y $n = 1$,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{1-0} \\ V_{1-1} \\ V_{1-2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1.05 \angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j0.05 & 0 & 0 \\ 0 & j0.11565 & 0 \\ 0 & 0 & j0.12781 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j3.578 \\ -j3.578 \\ -j3.578 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -0.1789 \\ 0.6362 \\ -0.4573 \end{bmatrix} \text{ por unidad} \end{aligned}$$

y los voltajes de línea a tierra en el bus 1 durante la falla en el bus 1 son

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{1-ag} \\ V_{1-bg} \\ V_{1-cg} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.1789 \\ +0.6362 \\ -0.4573 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.9843 \angle 254.2^\circ \\ 0.9843 \angle 105.8^\circ \end{bmatrix} \text{ por unidad} \end{aligned}$$

- e. Las componentes de secuencia de los voltajes de línea a tierra en el bus 2 durante la falla en el bus 1 son, de la ecuación (9.5.9), con $k = 2$ y $n = 1$,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{2-0} \\ V_{2-1} \\ V_{2-2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1.05 \angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & j0.04580 & 0 \\ 0 & 0 & j0.05212 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j3.578 \\ -j3.578 \\ -j3.578 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.8861 \\ -0.18649 \end{bmatrix} \text{ por unidad} \end{aligned}$$

Observe que como el bus 1 y el bus 2 están del lado de bajo voltaje de los transformadores Δ -Y en la figura 9.3, no hay desfase en los ángulos de fase de estos voltajes de secuencia. Por lo anterior, los voltajes de línea a tierra en el bus 2 durante la falla en el bus 1 son

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{2-ag} \\ V_{2-bg} \\ V_{2-cg} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.8861 \\ -0.18649 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0.70 \\ 0.9926 \angle 249.4^\circ \\ 0.9926 \angle 110.6^\circ \end{bmatrix} \text{ por unidad} \end{aligned}$$

El simulador PowerWorld calcula la corriente de falla simétrica para cada una de las siguientes fallas en cualquier bus de un sistema de potencia de N buses: falla trifásica balanceada, falla simple de línea a tierra, falla de línea a línea o falla de doble línea a tierra. Para cada falla, el simulador calcula los voltajes de bus y las contribuciones a la corriente de falla de las líneas de transmisión y los transformadores conectados al bus de falla.

Los datos de entrada para el simulador son los de máquinas, las líneas de transmisión y transformadores, como se ilustra en las tablas 9.1, 9.2 y 9.3, así como el voltaje de prefalla V_F y la impedancia de falla Z_F . Cuando los datos de entrada de reactancias de secuencia positiva de las máquinas consisten en reactancias subtransitorias de eje directo, las corrientes de falla simétricas calculadas son las corrientes de falla subtransitorias. Alternativamente, las corrientes de falla transitorias o de estado estable se calculan cuando estos datos de entrada consisten en reactancias transitorias de eje directo o síncronas. Las reactancias serie de secuencia positiva o cero de las líneas de transmisión son las de los circuitos π equivalentes para líneas largas o del circuito π nominal para líneas medias o cortas. Asimismo, recuerde

TABLA 9.1

Datos de máquina síncrona
para el ejemplo 9.8

Bus	X_0 por unidad	$X_1 = X''_d$ por unidad	X_2 por unidad	Reactancia al neutro X_n por unidad
1	0.0125	0.045	0.045	0
3	0.005	0.0225	0.0225	0.0025

TABLA 9.2

Datos de líneas para el ejemplo 9.8

Bus a bus	X_0 por unidad	X_1 por unidad
2-4	0.3	0.1
2-5	0.15	0.05
4-5	0.075	0.025

TABLA 9.3

Datos para transformadores del ejemplo 9.8

Bus (conexión) de bajo voltaje	Bus (conexión) de alto voltaje	Reactancia de dispersión por unidad	Reactancia al neutro por unidad
1 (Δ)	5 (Y)	0.02	0
3 (Δ)	4 (Y)	0.01	0

$$S_{\text{base}} = 100 \text{ MVA}$$

$$V_{\text{base}} = \begin{cases} 15 \text{ kV en buses 1, 3} \\ 345 \text{ kV en buses 2, 4, 5} \end{cases}$$

que la reactancia de secuencia negativa de la línea de transmisión es igual a la reactancia de secuencia positiva de la línea de transmisión. Las reactancias de la máquina, la línea y el transformador se dan por unidad sobre una base común de MVA. Se ignoran las corrientes de carga de prefalla.

El simulador calcula (pero no muestra) las matrices de impedancia de bus de secuencia cero, positiva y negativa, $Z_{\text{bus } 0}$, $Z_{\text{bus } 1}$ y $Z_{\text{bus } 2}$, al invertir las matrices correspondientes de admitancia de bus.

Después que se calculan $Z_{\text{bus } 0}$, $Z_{\text{bus } 1}$ y $Z_{\text{bus } 2}$, las ecuaciones (9.5.1) a (9.5.9) se emplean para calcular las corrientes de falla y los voltajes de secuencia en cada bus durante una falla en el bus 1 para el tipo de falla que elige el usuario del programa (por ejemplo, falla trifásica, o bien, falla simple de línea a tierra, etcétera). Las contribuciones a las corrientes de falla de secuencia de cada línea o rama del transformador conectadas al bus fallado se calculan dividiendo el voltaje de secuencia a través de la rama entre la impedancia de secuencia de la rama. Los ángulos de fase de los voltajes de secuencia positiva y negativa se modifican también para considerar los defasamientos de transformador Δ -Y. Las corrientes y voltajes de secuencia se transforman entonces al dominio de fase mediante las ecuaciones (8.1.16) y (8.1.9). Los cálculos se repiten para la falla en el bus 2, luego el bus 3, y así sucesivamente hasta el bus N .

Los datos de salida para el tipo de falla y la impedancia de falla seleccionados por el usuario consisten en la corriente de falla de cada fase, las contribuciones a la corriente de falla de cada rama conectada al bus fallado para cada fase y los voltajes línea a tierra en cada bus —para una falla en el bus 1, luego el bus 2, y así sucesivamente hasta el bus N .

EJEMPLO 9.8 Simulador PowerWorld

Considere el sistema de potencia de cinco buses cuyo diagrama unifilar se muestra en la figura 6.2. En las tablas 9.1, 9.2 y 9.3 se dan los datos de máquinas, líneas y transformadores. Observe que las conexiones al neutro de los transformadores y el generador 1 están sólidamente aterrizadas, como se indica mediante una reactancia al neutro de cero para estos equipos. Sin embargo, una reactancia al neutro = 0.0025 por unidad está conectada al neutro del generador 2. El voltaje de prefalla es 1.05 por unidad. Por medio del simulador PowerWorld, determine las corrientes y voltajes para una falla simple sólida de línea a tierra en el bus 1, luego el bus 2, y así sucesivamente hasta el bus 5.

SOLUCIÓN Abra el ejemplo 9_8 del simulador PowerWorld para ver una animación de este ejemplo. En las tablas 9.4 y 9.5 se resumen los resultados del simulador PowerWorld para cada una de las fallas. Advierta que estas corrientes de falla son corrientes subtransitorias, puesto que la entrada de reactancias de secuencia positiva de las máquinas consiste en reactancias subtransitorias de eje directo.

TABLA 9.4

Corrientes de falla para el ejemplo 9.8

Bus fallado	Corriente de falla simple de línea a tierra (fase A) por unidad/grados	LIN GEN O TRSF	Bus a bus	Contribuciones a la corriente de falla		
				Fase A	Corriente Fase B	Fase C
				por unidad/grados		
1	46.02/-90.00	G1	TIERRA-1	34.41/ -90.00	5.804/ -90.00	5.804/ -90.00
		T1	5-1	11.61/ -90.00	5.804 90.00	5.804/ 90.00
2	14.14/-90.00	L1	4-2	5.151/ -90.00	0.1124/ 90.00	0.1124/ 90.00
		L2	5-2	8.984/ -90.00	0.1124/ -90.00	0.1124/ -90.00
3	64.30/-90.00	G2	TIERRA-3	56.19/ -90.00	4.055/ -90.00	4.055/ -90.00
		T2	4-3	8.110/ -90.00	4.055/ 90.00	4.055/ 90.00
4	56.07/-90.00	L1	2-4	1.742/ -90.00	0.4464/ 90.00	0.4464/ 90.00
		L3	5-4	10.46/ -90.00	2.679/ 90.00	2.679/ 90.00
		T2	3-4	43.88/ -90.00	3.125/ -90.00	3.125/ -90.00
5	42.16/-90.00	L2	2-5	2.621/ -90.00	0.6716/ 90.00	0.6716/ 90.00
		L3	4-5	15.72/ -90.00	4.029 90.00	4.029/ 90.00
		T1	1-5	23.82/ -90.00	4.700/ -90.00	4.700/ -90.00

TABLA 9.5

Voltajes de bus para el ejemplo 9.8

$V_{prefalla} = 1.05 \angle 0$		Voltajes de bus durante la falla		
Bus fallado	Bus	Fase A	Fase B	Fase C
1	1	$0.0000 \angle 0.00$	$0.9537 \angle -107.55$	$0.9537 \angle 107.55$
	2	$0.5069 \angle 0.00$	$0.9440 \angle -105.57$	$0.9440 \angle 105.57$
	3	$0.7888 \angle 0.00$	$0.9912 \angle -113.45$	$0.9912 \angle 113.45$
	4	$0.6727 \angle 0.00$	$0.9695 \angle -110.30$	$0.9695 \angle 110.30$
	5	$0.4239 \angle 0.00$	$0.9337 \angle -103.12$	$0.9337 \angle 103.12$
2	1	$0.8832 \angle 0.00$	$1.0109 \angle -115.90$	$1.0109 \angle 115.90$
	2	$0.0000 \angle 0.00$	$1.1915 \angle -130.26$	$1.1915 \angle 130.26$
	3	$0.9214 \angle 0.00$	$1.0194 \angle -116.87$	$1.0194 \angle 116.87$
	4	$0.8435 \angle 0.00$	$1.0158 \angle -116.47$	$1.0158 \angle 116.47$
	5	$0.7562 \angle 0.00$	$1.0179 \angle -116.70$	$1.0179 \angle 116.70$
3	1	$0.6851 \angle 0.00$	$0.9717 \angle -110.64$	$0.9717 \angle 110.64$
	2	$0.4649 \angle 0.00$	$0.9386 \angle -104.34$	$0.9386 \angle 104.34$
	3	$0.0000 \angle 0.00$	$0.9942 \angle -113.84$	$0.9942 \angle 113.84$
	4	$0.3490 \angle 0.00$	$0.9259 \angle -100.86$	$0.9259 \angle 100.86$
	5	$0.5228 \angle 0.00$	$0.9462 \angle -106.04$	$0.9462 \angle 106.04$
4	1	$0.5903 \angle 0.00$	$0.9560 \angle -107.98$	$0.9560 \angle 107.98$
	2	$0.2309 \angle 0.00$	$0.9401 \angle -104.70$	$0.9401 \angle 104.70$
	3	$0.4387 \angle 0.00$	$0.9354 \angle -103.56$	$0.9354 \angle 103.56$
	4	$0.0000 \angle 0.00$	$0.9432 \angle -105.41$	$0.9432 \angle 105.41$
	5	$0.3463 \angle 0.00$	$0.9386 \angle -104.35$	$0.9386 \angle 104.35$
5	1	$0.4764 \angle 0.00$	$0.9400 \angle -104.68$	$0.9400 \angle 104.68$
	2	$0.1736 \angle 0.00$	$0.9651 \angle -109.57$	$0.9651 \angle 109.57$
	3	$0.7043 \angle 0.00$	$0.9751 \angle -111.17$	$0.9751 \angle 111.17$
	4	$0.5209 \angle 0.00$	$0.9592 \angle -108.55$	$0.9592 \angle 108.55$
	5	$0.0000 \angle 0.00$	$0.9681 \angle -110.07$	$0.9681 \angle 110.07$

PROBLEMAS

SECCIÓN 9.1

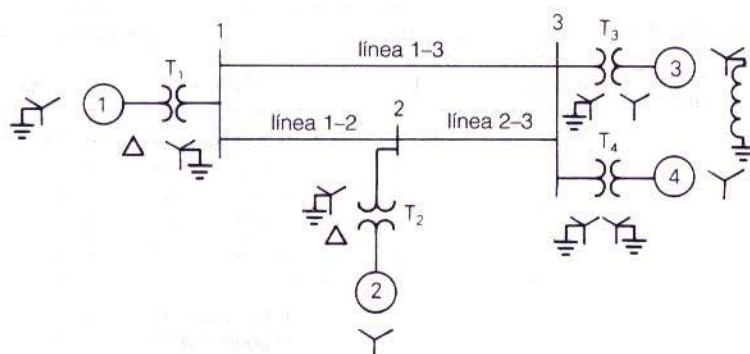
- 9.1 El diagrama unifilar de un sistema de potencia trifásico se ilustra en la figura 9.16. Las capacidades nominales del equipo son las siguientes:

Generadores síncronos:

G1	1000 MVA	15 kV	$X_d'' = X_2 = 0.18$, $X_0 = 0.07$ por unidad
G2	1000 MVA	15 kV	$X_d'' = X_2 = 0.20$, $X_0 = 0.10$ por unidad
G3	500 MVA	13.8 kV	$X_d'' = X_2 = 0.15$, $X_0 = 0.05$ por unidad
G4	750 MVA	13.8 kV	$X_d'' = 0.30$, $X_2 = 0.40$, $X_0 = 0.10$ por unidad

FIGURA 9.16

Problema 9.1

**Transformadores:**

T1	1000 MVA	15 kV Δ /765 kV Y	$X = 0.10$ por unidad
T2	1000 MVA	15 kV Δ /765 kV Y	$X = 0.10$ por unidad
T3	500 MVA	15 kV Y/765 kV Y	$X = 0.12$ por unidad
T4	750 MVA	15 kV Y/765 kV Y	$X = 0.11$ por unidad

Líneas de transmisión:

1-2	765 kV	$X_1 = 50 \Omega$, $X_0 = 150 \Omega$
1-3	765 kV	$X_1 = 40 \Omega$, $X_0 = 100 \Omega$
2-3	765 kV	$X_1 = 40 \Omega$, $X_0 = 100 \Omega$

El inductor conectado al neutro del generador 3 tiene una reactancia de 0.05 por unidad utilizando los valores nominales del generador 3 como base. Dibuje los diagramas de reactancias de secuencia cero, positiva y negativa con una base de 1000 MVA, 765 kV en la zona de la línea 1-2. Desprecie los defasamientos del transformador.

- 9.2** Las fallas en el bus n del problema 9.1 son de interés (el instructor elige $n = 1, 2$ o 3). Determine el equivalente de Thévenin de cada red de secuencia vista desde el bus de falla. El voltaje de prefalla es 1.0 por unidad. Se desprecian las corrientes de carga de prefalla y los defasamientos de transformador Δ -Y. (*Sugerencia:* utilice la conversión Y- Δ de la figura 2.27.)
- 9.3** Determine la corriente de falla subtransitoria por unidad y en kA durante una falla trifásica sólida en el bus fallado seleccionado en el problema 9.2.
- 9.4** Las capacidades nominales para el sistema de potencia de cuatro buses que se muestra en la figura 7.10 son las siguientes:

Generador G1:	500 MVA, 13.8 kV, $X_d'' = X_2 = 0.20$, $X_0 = 0.10$ por unidad
Generador G2:	750 MVA, 18 kV, $X_d'' = X_2 = 0.18$, $X_0 = 0.09$ por unidad
Generador G3:	1000 MVA, 20 kV, $X_d'' = 0.17$, $X_2 = 0.20$, $X_0 = 0.09$ por unidad
Transformador T1:	500 MVA, 13.8 kV Δ /500 kV Y, $X = 0.12$ por unidad
Transformador T2:	750 MVA, 18 kV Δ /500 kV Y, $X = 0.10$ por unidad
Transformador T3:	1000 MVA, 20 kV Δ /500 kV Y, $X = 0.10$ por unidad
Cada línea:	$X_1 = 50$ ohms, $X_0 = 150$ ohms

El inductor conectado al neutro del generador G3 tiene una reactancia de 0.028Ω . Trace los diagramas de reactancias de secuencia cero, positiva y negativa usando una base de 1000 MVA, 20 kV en la zona del generador G3. Ignore los defasamientos del transformador Δ -Y.

- 9.5** Resultan de interés las fallas en el bus n del problema 9.4 (el instructor elige $n = 1, 2, 3$ o 4). Determine el equivalente de Thévenin de cada red de secuencia vista desde el bus fallado. El voltaje de prefalla es 1.0 por unidad. Se omiten las corrientes de carga de prefalla y los defasamientos Δ -Y.
- 9.6** Determine la corriente de falla subtransitoria por unidad y en kA durante una falla sólida trifásica en el bus seleccionado en el problema 9.5.
- 9.7** Las capacidades nominales del equipo para el sistema de potencia de cinco buses de la figura 7.11 son los siguientes:

Generador G1:	50 MVA, 12 kV, $X_d'' = X_2 = 0.20$, $X_0 = 0.10$ por unidad
Generador G2:	100 MVA, 15 kV, $X_d'' = 0.2$, $X_2 = 0.23$, $X_0 = 0.1$ por unidad
Transformador T1:	50 MVA, 10 kV Y/138 kV Y, $X = 0.10$ por unidad
Transformador T2:	100 MVA, 15 kV Δ /138 kV Y, $X = 0.10$ por unidad
Cada línea de 138 kV:	$X_1 = 40$ ohms, $X_0 = 100$ ohms

Trace los diagramas de reactancias de secuencia cero, positiva y negativa usando una base de 100 MVA, 15 kV en la zona del generador G2. Ignore los defasamientos del transformador Δ -Y.

- 9.8** Las fallas en el bus n del problema 9.7 son de interés (el instructor elige $n = 1, 2, 3, 4$ o 5). Determine el equivalente de Thévenin de cada red de frecuencia visto desde el bus fallado. El voltaje de prefalla es 1.0 por unidad. Se desprecian las corrientes de prefalla y defasamientos Δ -Y.
- 9.9** Encuentre las corrientes subtransitorias de falla por unidad y en kA durante una falla sólida trifásica en el bus fallado seleccionado en el problema 9.8.
- 9.10** Considere el sistema mostrado en la figura 9.17. a) Visto desde la falla en F, determine el equivalente de Thévenin de cada red de secuencia. Desprecie los defasamientos Δ -Y. b) Calcule las corrientes de falla para una falla trifásica balanceada en el punto F mediante tres impedancias de falla $Z_{FA} = Z_{FB} = Z_{FC} = j0.5$ por unidad. Los datos del equipo por unidad sobre la misma base son los siguientes:

Generadores sincrónicos:

G1	$X_1 = 0.2$	$X_2 = 0.12$	$X_0 = 0.06$
G2	$X_1 = 0.33$	$X_2 = 0.22$	$X_0 = 0.066$

Transformadores:

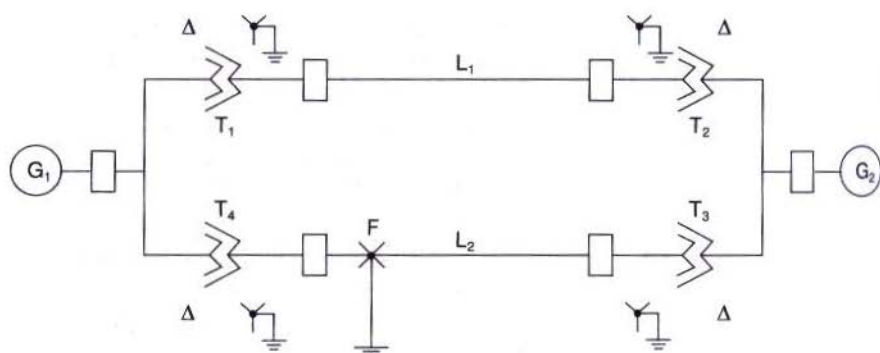
T1	$X_1 = X_2 = X_0 = 0.2$
T2	$X_1 = X_2 = X_0 = 0.225$
T3	$X_1 = X_2 = X_0 = 0.27$
T4	$X_1 = X_2 = X_0 = 0.16$

Líneas de transmisión:

L1	$X_1 = X_2 = 0.14$	$X_0 = 0.3$
L1	$X_1 = X_2 = 0.35$	$X_0 = 0.6$

FIGURA 9.17

Problema 9.10



9.11 Las capacidades nominales del equipo y las reactancias por unidad para el sistema de la figura 9.18 son las siguientes:

Generadores síncronos:

G1	100 MVA	25 kV	$X_1 = X_2 = 0.2$	$X_0 = 0.05$
G2	100 MVA	13.8 kV	$X_1 = X_2 = 0.2$	$X_0 = 0.05$

Transformadores:

T1	100 MVA	25/230 kV	$X_1 = X_2 = X_0 = 0.05$
T2	100 MVA	13.8/230 kV	$X_1 = X_2 = X_0 = 0.05$

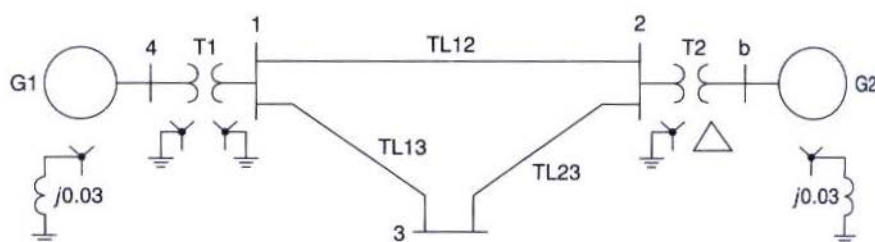
Líneas de transmisión:

TL12	100 MVA	230 kV	$X_1 = X_2 = 0.1$	$X_0 = 0.3$
TL13	100 MVA	230 kV	$X_1 = X_2 = 0.1$	$X_0 = 0.3$
TL23	100 MVA	230 kV	$X_1 = X_2 = 0.1$	$X_0 = 0.3$

Con una base de 100 MVA, 230 kV para las líneas de transmisión, dibuje las redes de secuencia por unidad y redúzcalas a sus equivalentes de Thévenin, visto en el bus 3. Desprecie los defasamientos Δ -Y. Calcule las corrientes de falla para una falla trifásica sólida en el bus 3.

FIGURA 9.18

Problema 9.11



- 9.12** Considere el diagrama unifilar del sistema de potencia simple que se muestra en la figura 9.19. Los datos del sistema por unidad en una base de 100 MVA son los siguientes:

Generadores síncronos:

G1 100 MVA 20 kV $X_1 = X_2 = 0.15$ $X_0 = 0.05$

G2 100 MVA 20 kV $X_1 = X_2 = 0.15$ $X_0 = 0.05$

Transformadores:

T1 100 MVA 20/220 kV $X_1 = X_2 = X_0 = 0.01$

T2 100 MVA 20/220 kV $X_1 = X_2 = X_0 = 0.01$

Líneas de transmisión:

L12 100 MVA 220 kV $X_1 = X_2 = 0.125$ $X_0 = 0.3$

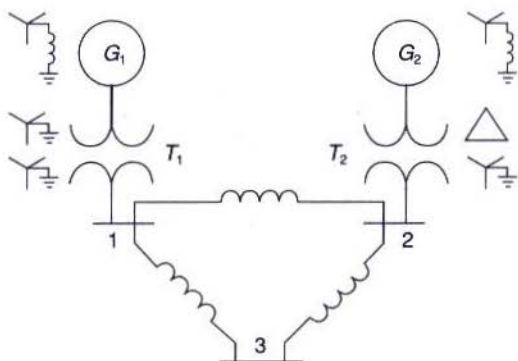
L13 100 MVA 220 kV $X_1 = X_2 = 0.15$ $X_0 = 0.35$

L23 100 MVA 220 kV $X_1 = X_2 = 0.25$ $X_0 = 0.7125$

La conexión del neutro de cada generador está aterrizada mediante un reactor limitante de la corriente de 0.08333 por unidad en una base de 100 MVA. Todos los neutros de cada transformador están sólidamente aterrizados. Los generadores operan sin carga a sus voltajes nominales y frecuencia nominal con sus FEM en fase. Determine la corriente de falla para una falla trifásica balanceada en el bus 3 a través de una impedancia de falla $Z_F = 0.1$ por unidad en una base de 100 MVA. Desprecie los defasamientos Δ -Y.

FIGURA 9.19

Problema 9.12



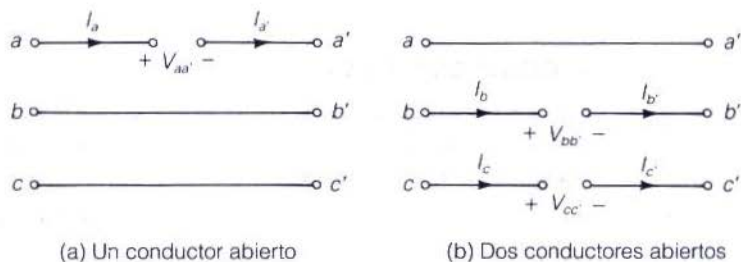
SECCIONES 9.2 a 9.4

- 9.13** Determine la corriente de falla subtransitoria por unidad y en kA, así como los voltajes de línea a tierra por unidad en el bus fallado para una falla simple sólida de línea a tierra en el bus seleccionado en el problema 9.2.
- 9.14** Repita el problema 9.13 para una falla de arco simple línea a tierra con impedancia de arco $Z_F = 30 + j0 \Omega$.

- 9.15** Repita el problema 9.13 para una falla sólida de línea a línea.
- 9.16** Repita el problema 9.13 para una falla sólida de doble línea a tierra.
- 9.17** Repita los problemas 9.1 y 9.13 incluyendo los defasamientos del transformador Δ -Y. Suponga defasamientos de la norma estadounidense. También calcule las componentes de secuencia y las componentes de fase de la contribución a la corriente de falla del generador n ($n = 1, 2$ o 3 según lo que haya especificado el instructor en el problema 9.2).
- 9.18** Un generador síncrono de 500 MVA, 13.8 kV con $X_d'' = X_2 = 0.20$ y $X_0 = 0.05$ por unidad se conecta a un transformador de 500 MVA, 13.8 kV $\Delta/500$ kV Y con reactancia de dispersión de 0.10 por unidad. Las conexiones del neutro del generador y el transformador están solidamente aterrizadas. El generador opera sin carga y al voltaje nominal; el lado de alto voltaje del transformador está desconectado del sistema de potencia. Compare las corrientes de falla subtransitorias para las siguientes fallas sólidas en las terminales de alto voltaje del transformador: falla trifásica, falla simple de línea a tierra, falla de línea a línea y falla de doble línea a tierra.
- 9.19** Determine la corriente de falla subtransitoria por unidad y en kA, así como las contribuciones a la corriente de falla de cada línea y transformador conectado al bus fallado para una falla simple sólida de línea a tierra en el bus seleccionado en el problema 9.5.
- 9.20** Repita el problema 9.19 para una falla sólida de línea a línea.
- 9.21** Repita el problema 9.19 para una falla sólida de doble línea a tierra.
- 9.22** Determine la corriente de falla subtransitoria por unidad y en kA, así como las contribuciones a la corriente de falla de cada línea, transformador y generador conectado al bus fallado para una falla sólida simple de línea a tierra en el bus seleccionado en el problema 9.8.
- 9.23** Repita el problema 9.22 para una falla de arco simple línea a tierra con impedancia de arco $Z_F = 0.05 + j0$ por unidad.
- 9.24** Repita el problema 9.22 para una falla sólida de línea a línea.
- 9.25** Repita el problema 9.22 para una falla sólida de doble línea a tierra.
- 9.26** Como se muestra en la figura 9.20(a), dos buses trifásicos abc y $a'b'c'$ están interconectados mediante cortocircuitos entre las fases b y b' y entre c y c' , con un circuito abierto entre las fases a y a' . Las condiciones de falla en el dominio de fase son $I_a = I_{a'} = 0$ y $V_{bb'} = V_{cc'} = 0$. Determine las condiciones de falla en el dominio de secuencia y verifique la interconexión de las redes de secuencia como se muestra en la figura 9.14 para esta falla de un conductor abierto.

FIGURA 9.20

Problemas 9.26 y 9.27:
fallas de conductores
abiertos



- 9.27** Resuelva de nuevo el problema 9.26 para la falla de dos conductores abiertos de la figura 9.20(b). Las condiciones de falla en el dominio de fase son

$$I_b = I_{b'} = I_c = I_{c'} = 0 \text{ y } V_{aa'} = 0$$

- 9.28** Para el sistema del problema 9.10, calcule la corriente y los voltajes de falla para las siguientes fallas en el punto F: a) una falla sólida simple de línea a tierra; b) una falla de línea a línea a través de una impedancia de fase $Z_F = j0.05$ por unidad; c) una falla de doble línea a tierra de la fase B a C a tierra, donde la fase B tiene una impedancia de falla $Z_F = j0.05$ por unidad, la fase C también tiene una impedancia de falla $Z_F = j0.05$ por unidad y la impedancia de falla común línea a tierra es $Z_G = j0.033$ por unidad.
- 9.29** Para el sistema del problema 9.11, calcule la corriente y los voltajes de falla para las siguientes fallas en el bus 3: a) una falla simple sólida de línea a tierra; b) una falla sólida de línea a línea; c) una falla sólida de doble línea a tierra. Asimismo, para la falla simple de línea a tierra en el bus 3, determine las corrientes y los voltajes en las terminales de los generadores G1 y G2.
- 9.30** Para el sistema del problema 9.12, calcule la corriente de falla en el bus 3 en los siguientes casos: a) una falla simple de línea a tierra a través de una impedancia $Z_F = j0.1$ por unidad, b) una falla de línea a línea a través de una impedancia $Z_F = j0.1$ por unidad, c) una falla de doble línea a tierra a través de una impedancia de falla común a tierra $Z_F = j0.1$ por unidad.
- 9.31** Para el sistema de potencia trifásico con el diagrama unifilar de la figura 9.21, las capacidades nominales del equipo y las reactancias por unidad son las siguientes:

Máquinas 1 y 2:	100 MVA	20 kV	$X_1 = X_2 = 0.2$
	$X_0 = 0.04$	$X_n = 0.04$	
Transformadores 1 y 2:	100 MVA	20Δ/345Y kV	
	$X_1 = X_2 = X_0 = 0.08$		

Elija una base de 100 MVA, 345 kV para la línea de transmisión. Sobre esa base, las reactancias serie de la línea son $X_1 = X_2 = 0.15$ y $X_0 = 0.5$ por unidad. Con un voltaje nominal de sistema igual a 345 kV en el bus 3, la máquina 2 está operando como un motor que extrae 50 MVA a un factor de potencia 0.8 atrasado. Calcule el cambio de voltaje en el bus 3 cuando la línea de transmisión experimenta: a) una falla de un conductor abierto, b) una falla de dos conductores abiertos a lo largo de su espacio entre los buses 2 y 3.

FIGURA 9.21

Problema 9.31



SECCIÓN 9.5

- 9.32** Las matrices de impedancias de bus de secuencia cero, positiva y negativa para un sistema de potencia trifásico de tres buses son

$$\mathbf{Z}_{\text{bus } 0} = j \begin{bmatrix} 0.10 & 0 & 0 \\ 0 & 0.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0.10 \end{bmatrix} \text{ por unidad}$$

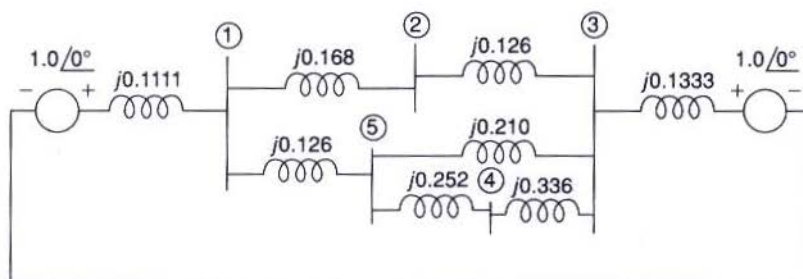
$$\mathbf{Z}_{\text{bus } 1} = \mathbf{Z}_{\text{bus } 2} = j \begin{bmatrix} 0.12 & 0.08 & 0.04 \\ 0.08 & 0.12 & 0.06 \\ 0.04 & 0.06 & 0.08 \end{bmatrix}$$

Determine la corriente de falla por unidad y el voltaje por unidad en el bus 2 para una falla trifásica sólida en el bus 1. El voltaje de prefalla es 1.0 por unidad.

- 9.33** Repita el problema 9.32 para una falla simple sólida de línea a tierra en el bus 1.
- 9.34** Repita el problema 9.32 para una falla sólida de línea a línea en el bus 1.
- 9.35** Repita el problema 9.32 para una falla sólida de doble línea a tierra en el bus 1.
- 9.36** Calcule las matrices de impedancia de bus de 3×3 de secuencia cero, positiva y negativa para el sistema de potencia del problema 9.1. Utilice una base de 100 MVA y 765 kV en la zona de la línea 1 a 2.
- 9.37** Por medio de las matrices de impedancia del bus del problema 9.36, compruebe las corrientes de falla para las fallas de los problemas 9.3, 9.13, 9.14, 9.15 y 9.16.
- 9.38** Calcule las matrices de impedancias de bus de 4×4 de impedancia cero, positiva y negativa para el sistema de potencia dado en el problema 9.4. Utilice una base de 1000 MVA y 20 kV en la zona del generador G3.
- 9.39** Por medio de las matrices de impedancias de bus determinadas en el problema 9.38, verifique las corrientes de falla para las fallas de los problemas 9.6, 9.19, 9.20 y 9.21.
- 9.40** Calcule las matrices de impedancias de bus de 5×5 de secuencia cero, positiva y negativa para el sistema de potencia del problema 9.7. Utilice una base de 100 MVA y 15 kV en la zona del generador G2.
- 9.41** Con las matrices de impedancias de bus determinadas en el problema 9.40, compruebe las corrientes de falla para las fallas de los problemas 9.9, 9.22, 9.23, 9.24 y 9.25.
- 9.42** En la figura 9.22 se ilustra el diagrama de impedancias de secuencia positiva de una red de cinco buses con valores por unidad sobre una base de 100 MVA. Los generadores en los buses 1 y 3 tienen valores nominales de 270 y 225 MVA, respectivamente. Las reactancias de generadores incluyen valores subtransitorios más las reactancias de los transformadores que los conectan a los buses. Las relaciones de espiras de los transformadores son tales que la base de voltaje en cada circuito del generador es igual a la capacidad nominal de este último. a) Construya la matriz de admitancias de bus de secuencia positiva $\mathbf{Y}_{\text{bus } 1}$.

FIGURA 9.22

Problemas 9.42 y 9.43

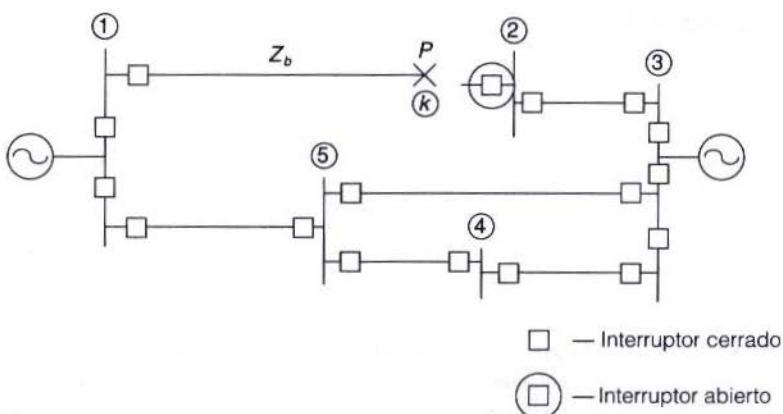


b) Por medio de MATLAB u otro programa de computadora, invierta $Y_{\text{bus } 1}$ para obtener $Z_{\text{bus } 1}$. c) Determine la corriente subtransitoria para una falla trifásica en el bus 4 y las contribuciones a la corriente de falla de cada línea. Desprecie las corrientes de prefalla y suponga un voltaje de prefalla de 1.0 por unidad.

- 9.43** En la red de cinco buses de la figura 9.22 ocurre una falla sólida de línea a tierra en el extremo de la línea de transmisión del bus 2 entre los buses 1 y 2. La falla provoca que se abra el interruptor en el extremo de la línea del bus 2, pero los demás permanecen cerrados. La falla se muestra en la figura 9.23. Calcule la corriente de falla subtransitoria con el interruptor abierto en el extremo de la línea afectada del lado del bus 2. Ignore la corriente de prefalla y suponga un voltaje de prefalla de 1.0 por unidad.

FIGURA 9.23

Problema 9.43



- 9.44** En la figura 9.24 se ilustra el diagrama unifilar de un sistema de cuatro buses. Las capacidades nominales del equipo y las reactancias por unidad son las siguientes:

Máquinas 1 y 2: 100 MVA 20 kV $X_1 = X_2 = 0.2$

$X_0 = 0.04$ $X_n = 0.05$

Transformadores T_1 y T_2 : 100 MVA 20Δ/345Y kV

$X_1 = X_2 = X_0 = 0.08$

Sobre una base de 100 MVA y 345 kV en la zona de la línea de transmisión, las reactancias serie de la línea de transmisión son $X_1 = X_2 = 0.15$ y $X_0 = 0.5$ por unidad. a) Dibuje cada una de las redes de secuencia y determine la matriz de impedancias de bus para cada una. b) Suponga que el sistema está operando con voltaje nominal sin corrientes de prefalla, cuando ocurre una falla sólida línea a línea en el bus 3. Calcule la corriente de falla, los voltajes de línea a línea en el bus afectado y los voltajes de línea a línea en las terminales de la

FIGURA 9.24

Problema 9.44



máquina 2. c) Suponga que el sistema está operando con voltaje nominal sin corrientes de prefalla, cuando ocurre una falla sólida de doble línea a tierra en las terminales de la máquina 2. Calcule la corriente de falla y los voltajes de línea a línea en el bus de la falla.

- 9.45** El sistema de la figura 9.25 es el mismo del problema 9.44 excepto que los transformadores ahora están conectados en Y-Y y tienen una conexión de neutro sólida a tierra en ambos lados. a) Determine la matriz de impedancias de bus para cada una de las tres redes de secuencia. b) Suponga que el sistema está operando con voltaje nominal sin corrientes de prefalla cuando ocurre una falla sólida simple de línea a tierra o une en la fase A en el bus 3. Calcule la corriente de falla, la corriente fuera de fase C de la máquina 2 durante la falla y los voltajes de línea a tierra en las terminales de la máquina 2 durante la falla.

FIGURA 9.25



- 9.46** Los resultados de la tabla 9.5 muestran que durante una falla simple de línea a tierra de la fase “a” el ángulo de fase en los voltajes de dicha fase siempre es cero. Explique por qué es de esperar este resultado.
- PW 9.47** Los resultados de la tabla 9.5 muestran que durante la falla simple de línea a tierra en el bus 2 las magnitudes de voltaje de las fases “b” y “c” en el bus 2 en realidad sobrepasan al voltaje de prefalla de 1.05 por unidad. Utilice el simulador PowerWorld con el caso de ejemplo 9_8 para determinar el tipo de falla del bus 2 que dé la magnitud de voltaje por unidad más alta.
- PW 9.48** Con el caso de ejemplo 9_8 del simulador PowerWorld, grafique la variación en las magnitudes de voltaje de las fases “a”, “b” y “c” durante una falla simple de línea a tierra cuando la reactancia de falla varía de 0 a 2.0 por unidad en pasos de 0.1 por unidad (la impedancia de falla se especifica en la página Fault Options del cuadro de diálogo Fault Analysis).
- PW 9.49** Resuelva de nuevo el ejemplo 9.8, excepto que ahora con una falla de línea a línea en cada uno de los buses. Compare las corrientes de falla con los valores dados en la tabla 9.4.
- PW 9.50** Resuelva de nuevo el ejemplo 9.8, excepto que ahora con una falla doble sólida de línea a tierra en cada uno de los buses. Compare las corrientes de falla con los valores de la tabla 9.4.
- PW 9.51** Resuelva de nuevo el ejemplo 9.8 pero ahora con una nueva línea instalada entre los buses 4 y 5. Los parámetros para esta nueva línea deben ser idénticos a los de la línea existente entre los buses 4 y 5. La nueva línea no está acoplada mutuamente a ninguna otra. ¿Las corrientes de falla son más grandes o más pequeñas que los valores del ejemplo 9.8?
- PW 9.52** Resuelva de nuevo el ejemplo 9.8, excepto que ahora agregue un segundo generador al bus 1. Los parámetros para este nuevo generador son idénticos a los del generador existente en el bus 1. ¿Las corrientes de falla son más grandes o más pequeñas que los valores del ejemplo 9.8?
- PW 9.53** Por medio del caso de diseño 6 del simulador PowerWorld, calcule la corriente de falla por unidad y la corriente suministrada por cada uno de los generadores para una falla simple de línea a tierra en el bus LAUF69. Durante la falla, ¿qué porcentaje de los buses tiene una magnitud de voltaje menor a 0.75 por unidad?
- PW 9.54** Repita el problema 9.53, excepto que coloque ahora la falla en el bus AMANS69.

PROYECTO DE DISEÑO 4 (CONTINUACIÓN): FLUJOS DE POTENCIA/CORTOCIRCUITOS

Tiempo adicional permitido: 3 semanas

Tiempo adicional requerido: 10 horas

Ésta es una continuación del proyecto de diseño 4. Las tareas 1 y 2 se dan en el capítulo 6. La tarea 3 se da en el capítulo 7.

Tarea 4: cortocircuitos: selección del interruptor o fusible

Para el diagrama unifilar que se le asignó (figura 6.13 o 6.14), convierta los datos de reactancia de secuencia cero, positiva y negativa a un valor por unidad utilizando las cantidades base del sistema. Emplee las reactancias subtransitorias de máquinas. Luego, con el simulador PowerWorld cree los archivos de datos de entrada de generadores, líneas de transmisión y transformadores. A continuación ejecute el simulador para calcular las corrientes de falla subtransitorias de: 1) una falla simple de línea a tierra, 2) una falla de línea a línea y 3) una falla sólida de doble línea a tierra en cada bus. Calcule también las matrices de impedancias de bus de secuencia cero, positiva y negativa. Suponga un voltaje de prefalla de 1.0 por unidad. Asimismo, desprecie las corrientes de carga de prefalla y las pérdidas.

Para los estudiantes que tienen asignada la figura 6.13: elija un cortocircuito adecuado de la tabla 7.10 para *cada* lugar mostrado en su diagrama unifilar. Cada interruptor seleccionado debe tener: 1) un voltaje nominal mayor que el voltaje máximo de operación del sistema, 2) una corriente nominal continua por lo menos 30% mayor que la corriente de carga normal (las corrientes de carga normales se calculan en la tarea 2) y 3) una corriente de cortocircuito nominal mayor que la corriente de falla máxima para cualquier tipo de falla en el bus donde se localiza el interruptor (las corrientes de falla se calculan en las tareas 3 y 4). Esta práctica conservadora de seleccionar un interruptor para interrumpir toda la corriente de falla, no sólo la contribución a la corriente de falla a través del interruptor, permite incrementos futuros en las corrientes de falla. *Nota:* suponga que la relación (X/R) en cada bus es menor que 15, tal que los interruptores pueden interrumpir el desplazamiento de cd además de la corriente de falla subtransitoria. El costo del interruptor también debe ser un factor de selección. *No* elija un interruptor que corte 63 kA si para la operación funciona uno de 40 kA o 31.5 kA.

Para los estudiantes que tienen asignada la figura 6.14: en las referencias [9, 10] se encuentran las curvas de “tiempo de fusión” y “tiempo total de liberación” para los fusibles con valor nominal K con capacidades de corriente nominal continua de 15 a 200 A. Seleccione la rama adecuada y los fusibles de derivación a partir de estas curvas para cada una de las tres ubicaciones siguientes en su diagrama unifilar: bus 2, bus 4 y bus 7. Cada fusible seleccionado debe tener una capacidad nominal continua de corriente que sea por lo menos 15% mayor pero no más de 50% mayor que la corriente de carga normal en el bus (las corrientes de carga normal se calculan en la tarea 2). Suponga que los cables para la carga pueden soportar corrientes de sobrecarga continuas de 50%. También, los fusibles de rama deben estar coordinados con los fusibles en derivación; es decir, para toda corriente de falla, el fusible en

derivación debe disiparla antes que se funda el fusible de la rama. Para cada uno de los tres buses, suponga una relación razonable X/R y determine la corriente de falla asimétrica para una falla sólida trifásica (la corriente de falla subtransitoria se calcula en la tarea 3). Después, para los fusibles que fueron seleccionados de [9, 10], determine el tiempo de liberación CT de los fusibles en derivación y el tiempo de fusión MT de los fusibles de las ramas. Para lograr una buena coordinación, la relación MT/CT debe ser menor que 0.75.

PROYECTO DE DISEÑO 6

Tiempo permitido: 3 semanas

Tiempo aproximado requerido: 10 horas

Suponga que como ingeniero de protección para Metropolis Light and Power (MLP) su trabajo consiste en asegurar que las capacidades nominales de interruptores de líneas de transmisión y de transformadores sean suficientes para interrumpir la corriente de falla asociada con cualquier tipo de falla (trifásica balanceada, sencilla de línea a tierra, de línea a línea y de doble línea a tierra). El sistema de potencia MLP se modeló en el caso de diseño 6. En este caso se modelan los valores de secuencia positiva, negativa y cero para cada dispositivo del sistema. Observe que los transformadores de 69/138 kV están en Y aterrizados en el lado de bajo voltaje y en delta en el lado de alto voltaje; los transformadores de 138 kV/345 kV están en Y aterrizados en ambos lados. En este problema de diseño usted debe evaluar las capacidades nominales de los interruptores para las 12 líneas de transmisión de 138 kV y especificar luego los interruptores. Considere las líneas de transmisión de 69 kV y 345 kV o los transformadores.

Procedimiento de diseño

1. Cargue el caso 6 de diseño en el simulador PowerWorld. Ejecute una solución inicial de flujos de potencia para obtener el caso base de operación del sistema.
2. Aplique cada uno de los cuatro tipos de falla a cada uno de los buses de 138 kV para determinar la corriente de falla máxima que experimentará cada una de las líneas de 138 kV.
3. Para cada terminal de las doce líneas de 138 kV elija el interruptor adecuado de la tabla 7.10. Cada interruptor que seleccione debe: a) tener un voltaje nominal mayor que el voltaje máximo de operación del sistema, b) tener una corriente nominal continua por lo menos 30% mayor que la corriente nominal normal para la línea, y c) tener una corriente nominal de interruptores mayor que la corriente de falla máxima para cualquier tipo de falla en el bus donde se localiza el interruptor. Seleccionar un interruptor para obstaculizar toda la corriente de falla, y no sólo la contribución a la corriente de falla a través del interruptor, permite incrementos futuros en las corrientes de falla. Puesto que los interruptores con mayor capacidad nominal son más caros, se debe seleccionar el interruptor con la menor capacidad nominal que cumpla con las restricciones del diseño.

APÉNDICE

TABLA A.1

Valores promedio típicos
de las constantes de una
máquina síncrona

Constante (unidades)	Tipo	Símbolo	Turbo- generador (rotor sólido)	Generador con turbina hidráulica (con amorti- guadores)	Conden- sador síncrono	Motor. síncrono
Reactancias (por unidad)	Síncrona	X_d	1.1	1.15	1.80	1.20
		X_q	1.08	0.75	1.15	0.90
	Transitoria	X'_d	0.23	0.37	0.40	0.35
		X'_q	0.23	0.75	1.15	0.90
	Subtransitoria	X''_d	0.12	0.24	0.25	0.30
		X''_q	0.15	0.34	0.30	0.40
	Secuencia negativa	X_2	0.13	0.29	0.27	0.35
	Secuencia cero	X_0	0.05	0.11	0.09	0.16
Resistencias (por unidad)	Secuencia positiva	R (cd)	0.003	0.012	0.008	0.01
		R (ca)	0.005	0.012	0.008	0.01
	Secuencia negativa	R_2	0.035	0.10	0.05	0.06
Constantes de tiempo (segundos)	Transitoria	T'_{d0}	5.6	5.6	9.0	6.0
		T'_d	1.1	1.8	2.0	1.4
	Subtransitoria	$T''_d = T''_q$	0.035	0.035	0.035	0.036
	Armadura	T_a	0.16	0.15	0.17	0.15

Adaptado de E.W. Kimbark, *Power-System Stability: Synchronous Machines* (Nueva York: Dover Publications, 1956/1968), cap. 12.

TABLA A.2Reactancias de dispersión
típicas de transformador

Capacidad nominal del devanado de más alto voltaje kV	NBA del devanado de más alto voltaje kV	Reactancia de dispersión por unidad*	
Transformadores de distribución			
2.4	30	0.023–0.049	
4.8	60	0.023–0.049	
7.2	75	0.026–0.051	
12	95	0.026–0.051	
23	150	0.052–0.055	
34.5	200	0.052–0.055	
46	250	0.057–0.063	
69	300	0.065–0.067	
Transformadores de potencia de 10 MVA y menores			
8.7	110	0.050–0.058	
25	150	0.055–0.058	
34.5	200	0.060–0.065	
46	250	0.060–0.070	
69	350	0.070–0.075	
92	450	0.070–0.085	
115	550	0.075–0.100	
138	650	0.080–0.105	
161	750	0.085–0.011	
Transformadores de potencia arriba de 10 MVA			
		Autoenfriamiento o enfriados por aire forzado	Enfriados con aceite forzado
8.7	110	0.050–0.063	0.082–0.105
34.5	200	0.055–0.075	0.090–0.128
46	250	0.057–0.085	0.095–0.143
69	350	0.063–0.095	0.103–0.158
92	450	0.060–0.118	0.105–0.180
115	550	0.065–0.135	0.107–0.195
138	650	0.070–0.140	0.117–0.245
161	750	0.075–0.150	0.125–0.250
230	900	0.070–0.160	0.120–0.270
345	1300	0.080–0.170	0.130–0.280
500	1550	0.100–0.200	0.160–0.340
765		0.110–0.210	0.190–0.350

*Las reactancias por unidad se basan en la capacidad nominal del transformador.

TABLA A.3 Características de los conductores de cobre, estirado en frío, conductividad de 97.3%

Dimensiones del conductor		Núm. de hilos	Diám. de hilo solo (pulg.)	Diám. ext. (pulg.)	Resistencia a la ruptura (lb)	Peso (libras por milla)	Capacidad de corriente aprox. (A)	Radio medio geométrico a 60 Hz (pies)	Resistencia r_c (ohms por conductor por milla)								Reactancia inductiva x_L (ohms por conductor por milla a 1 pie de separación)			Reactancia capacitiva de la derivación x_C (megohms por conductor por milla a 1 pie de separación)		
									25°C (77°F)				50°C (122°F)				25 Hz	50 Hz	60 Hz	25 Hz	50 Hz	60 Hz
									cd	25 Hz	50 Hz	60 Hz	cd	25 Hz	50 Hz	60 Hz						
1000 000	---	37	0.1644	1.151	43 830	16 300	1 300	0.0368	0.0585	0.0594	0.0620	0.0634	0.0640	0.0648	0.0672	0.0685	0.1666	0.333	0.400	0.216	0.1081	0.0901
900 000	---	37	0.1560	1.092	39 510	14 670	1 220	0.0349	0.0650	0.0658	0.0682	0.0695	0.0711	0.0718	0.0740	0.0752	0.1693	0.339	0.406	0.220	0.1100	0.0916
800 000	---	37	0.1470	1.029	35 120	13 040	1 130	0.0329	0.0731	0.0739	0.0760	0.0772	0.0800	0.0806	0.0826	0.0837	0.1722	0.344	0.413	0.224	0.1121	0.0934
750 000	---	37	0.1424	0.997	33 400	12 230	1 090	0.0319	0.0780	0.0787	0.0807	0.0818	0.0853	0.0859	0.0878	0.0888	0.1739	0.348	0.417	0.226	0.1132	0.0943
700 000	---	37	0.1375	0.963	31 170	11 410	1 040	0.0308	0.0836	0.0842	0.0861	0.0871	0.0914	0.0920	0.0937	0.0947	0.1759	0.352	0.422	0.229	0.1145	0.0954
600 000	---	37	0.1273	0.891	27 020	9 781	940	0.0285	0.0975	0.0981	0.0997	0.1006	0.1066	0.1071	0.1086	0.1095	0.1799	0.360	0.432	0.235	0.1173	0.0977
500 000	---	37	0.1162	0.814	22 510	8 151	840	0.0260	0.1170	0.1175	0.1188	0.1196	0.1280	0.1283	0.1296	0.1303	0.1845	0.369	0.443	0.241	0.1205	0.1004
500 000	---	19	0.1622	0.811	21 590	8 151	840	0.0256	0.1170	0.1175	0.1188	0.1196	0.1280	0.1283	0.1296	0.1303	0.1853	0.371	0.445	0.241	0.1206	0.1005
450 000	---	19	0.1539	0.770	19 750	7 336	780	0.0243	0.1300	0.1304	0.1316	0.1323	0.1422	0.1426	0.1437	0.1443	0.1879	0.376	0.451	0.245	0.1224	0.1020
400 000	---	19	0.1451	0.726	17 560	6 521	730	0.0229	0.1462	0.1466	0.1477	0.1484	0.1600	0.1603	0.1613	0.1619	0.1909	0.382	0.458	0.249	0.1245	0.1038
350 000	---	19	0.1357	0.679	15 590	5 706	670	0.0214	0.1671	0.1675	0.1684	0.1690	0.1828	0.1831	0.1840	0.1845	0.1943	0.389	0.466	0.254	0.1269	0.1058
350 000	---	12	0.1403	0.710	15 140	5 706	670	0.0225	0.1671	0.1675	0.1684	0.1690	0.1828	0.1831	0.1840	0.1845	0.1918	0.384	0.460	0.251	0.1253	0.1044
300 000	---	19	0.1257	0.629	13 510	4 891	610	0.01987	0.1950	0.1953	0.1961	0.1916	0.213	0.214	0.214	0.215	0.1982	0.396	0.476	0.259	0.1296	0.1080
300 000	---	12	0.1581	0.657	13 170	4 891	610	0.0208	0.1950	0.1953	0.1961	0.1916	0.213	0.214	0.214	0.215	0.1957	0.392	0.470	0.256	0.1281	0.1068
250 000	---	19	0.1147	0.574	11 360	4 076	540	0.01813	0.234	0.234	0.235	0.235	0.256	0.256	0.257	0.257	0.203	0.406	0.487	0.266	0.1329	0.1108
250 000	---	12	0.1443	0.600	11 130	4 076	540	0.01902	0.234	0.234	0.235	0.235	0.256	0.256	0.257	0.257	0.200	0.401	0.481	0.263	0.1313	0.1094
211 600	4/0	19	0.1055	0.528	9 617	3 450	480	0.01668	0.276	0.277	0.277	0.278	0.302	0.303	0.303	0.303	0.207	0.414	0.497	0.272	0.1359	0.1132
211 600	4/0	12	0.1328	0.552	9 483	3 450	490	0.01750	0.276	0.277	0.277	0.278	0.302	0.303	0.303	0.303	0.205	0.409	0.491	0.269	0.1343	0.1119
211 600	4/0	7	0.1739	0.522	9 154	3 450	480	0.01579	0.276	0.277	0.277	0.278	0.302	0.303	0.303	0.303	0.210	0.420	0.503	0.273	0.1363	0.1136
167 800	3/0	12	0.1183	0.492	7 556	2 736	420	0.01559	0.349	0.349	0.349	0.350	0.381	0.381	0.382	0.382	0.210	0.421	0.505	0.277	0.1384	0.1153
167 800	3/0	7	0.1548	0.464	7 366	2 736	420	0.01404	0.349	0.349	0.349	0.350	0.381	0.381	0.382	0.382	0.216	0.431	0.518	0.281	0.1405	0.1171
133 100	2/0	7	0.1379	0.414	5 926	2 170	360	0.01252	0.440	0.440	0.440	0.440	0.481	0.481	0.481	0.481	0.222	0.443	0.532	0.289	0.1445	0.1205
105 500	1/0	7	0.1228	0.368	4 752	1 720	310	0.01113	0.555	0.555	0.555	0.555	0.606	0.607	0.607	0.607	0.227	0.455	0.546	0.298	0.1488	0.1240
83 690	1	7	0.1093	0.328	3 804	1 364	270	0.00992	0.699	0.699	0.699	0.699	0.765				0.233	0.467	0.560	0.306	0.1528	0.1274
83 690	1	3	0.1670	0.360	3 620	1 351	270	0.01016	0.692	0.692	0.692	0.692	0.757				0.232	0.464	0.557	0.299	0.1495	0.1246
66 370	2	7	0.0974	0.292	3 045	1 082	230	0.00883	0.881	0.882	0.882	0.882	0.964				0.239	0.478	0.574	0.314	0.1570	0.1308
66 370	2	3	0.1487	0.320	2 913	1 071	240	0.00903	0.873				0.955				0.238	0.476	0.571	0.307	0.1537	0.1281
66 370	2	1	0.258	0.3003	1 061	220	0.00836	0.864					0.945				0.242	0.484	0.581	0.323	0.1614	0.1345
52 630	3	7	0.0867	0.260	2 433	858	200	0.00787	1.112				1.216				0.245	0.490	0.588	0.322	0.1611	0.1343
52 630	3	3	0.1325	0.285	2 359	850	200	0.00805	1.101				1.204				0.244	0.488	0.585	0.316	0.1578	0.1315
52 630	3	1	0.229	0.249	841	190	0.00745	1.090					1.192				0.248	0.496	0.595	0.331	0.1656	0.1380
41 740	4	3	0.1180	0.254	1 879	674	180	0.00717	1.388				1.518				0.250	0.499	0.599	0.324	0.1619	0.1349
41 740	4	1	0.204	0.204	1 970	667	170	0.00663	1.374				1.503				0.254	0.507	0.609	0.339	0.1697	0.1415
33 100	5	3	0.1050	0.226	1 505	534	150	0.00638	1.750				1.914				0.256	0.511	0.613	0.332	0.1661	0.1384
33 100	5	1	0.1819	0.219	1 591	529	140	0.00590	1.733				1.895				0.260	0.519	0.623	0.384	0.1738	0.1449
26 250	6	3	0.0935	0.201	1 205	424	130	0.00568	2.21				2.41				0.262	0.523	0.628	0.341	0.1703	0.1419
26 250	6	1	0.1620	0.201	1 280	420	120	0.00526	2.18				2.39				0.265	0.531	0.637	0.356	0.1779	0.1483
20 820	7	1	0.1443	0.201	1 030	333	110	0.00468	2.75				3.01				0.271	0.542	0.651	0.364	0.1821	0.1517
16 510	8	1	0.1285	0.201	826	264	90	0.00417	3.47				3.80				0.277	0.554	0.665	0.372	0.1862	0.1552

*Para conductores a 75°C, viento a 1.4 millas por hora (2 pies/s), frecuencia = 60 Hz.

TABLA A.4 Características del cable de aluminio, acero, reforzado (Aluminum Company of America)-ACSR

Palabra clave	Aluminio circular mils	Aluminio		Acero		Diám. ext. (pulg.)	Equivalente* de cobre circular mils o AWG	Resistencia máxima (lb)	Peso (lb por milla)	Radio medio geométrico a 60 Hz (pies)	Capacidad de corriente aprox. (A)	Resistencia r_s (ohms por conductor por milla)								x_s Reactancia inductiva (ohms por conductor por milla a 1 pie de separación, todas las corrientes)	x_s' Reactancia capacitiva en derivación del (megohms por conductor por milla a 1 pie de separación)			
		Diám. de hilo (pulg.)	Diám. de hilo (pulg.)	Diám. de hilo (pulg.)	Resistencia r_s (ohms por conductor por milla)																			
					Corrientes pequeñas a 25°C (77°F)							Capacidad de corriente a 50°C (122°F) a 75% aprox. de capacidad												
					cd							25 Hz	50 Hz	60 Hz	cd	25 Hz	50 Hz	60 Hz	60 Hz			60 Hz		
Joree	2 515 000	76	...	0.1819	19	0.0849	1.880	61 700		0.0621											0.0450	0.337	0.0755	
Thrasher	2 312 000	76	...	0.1744	19	0.0814	1.802	57 300		0.0595											0.0482	0.342	0.0767	
Kiwi	2 167 000	72	4	0.1735	7	0.1157	1.735	49 800		0.0570											0.0511	0.348	0.0778	
Bluebird	2 156 000	84	4	0.1602	19	0.0961	1.762	60 300		0.0588											0.0505	0.344	0.0774	
Chukar	1 781 000	84	4	0.1456	19	0.0874	1.602	51 000		0.0534											0.0598	0.355	0.0802	
Falcon	1 590 000	54	3	0.1716	19	0.1030	1.545	1 000 000	56 000	10 777	0.0520	1 380	0.0587	0.0588	0.0590	0.0591	0.0646	0.0656	0.0675	0.0684	0.359	0.0814		
Parrot	1 510 000	54	3	0.1673	19	0.1004	1.506	950 000	53 200	10 237	0.0507	1 340	0.0618	0.0619	0.0621	0.0622	0.0680	0.0690	0.0710	0.0720	0.362	0.0821		
Plover	1 431 000	54	3	0.1628	19	0.0977	1.465	900 000	50 400	9 699	0.0493	1 300	0.0652	0.0653	0.0655	0.0656	0.0718	0.0729	0.0749	0.0760	0.365	0.0830		
Martin	1 351 000	54	3	0.1582	19	0.0949	1.424	850 000	47 600	9 160	0.0479	1 250	0.0691	0.0692	0.0694	0.0695	0.0761	0.0771	0.0792	0.0803	0.369	0.0838		
Pheasant	1 272 000	54	3	0.1535	19	0.0921	1.382	800 000	44 800	8 621	0.0465	1 200	0.0734	0.0735	0.0737	0.0738	0.0808	0.0819	0.0840	0.0851	0.372	0.0847		
Grackle	1 192 500	54	3	0.1486	19	0.0892	1.338	750 000	43 100	8 082	0.0450	1 160	0.0783	0.0784	0.0786	0.0788	0.0862	0.0872	0.894	0.0906	0.376	0.0857		
Finch	1 113 000	54	3	0.1436	19	0.0862	1.293	700 000	40 200	7 544	0.0435	1 110	0.0839	0.0840	0.0842	0.0844	0.0924	0.0935	0.0957	0.0969	0.380	0.0867		
Curlew	1 033 000	54	3	0.1384	7	0.1384	1.246	650 000	37 100	7 019	0.0420	1 060	0.0903	0.0905	0.0907	0.0909	0.0994	0.1005	0.1025	0.1035	0.385	0.0878		
Cardinal	954 000	54	3	0.1329	7	0.1329	1.196	600 000	34 200	6 479	0.0403	1 010	0.0979	0.0980	0.0981	0.0982	0.1078	0.1088	0.1118	0.1128	0.390	0.0890		
Canary	900 000	54	3	0.1291	7	0.1291	1.162	566 000	32 300	6 112	0.0391	970	0.104	0.104	0.104	0.104	0.1145	0.1155	0.1175	0.1185	0.393	0.0898		
Crane	874 000	54	3	0.1273	7	0.1273	1.149	550 000	31 400	5 940	0.0386	950	0.107	0.107	0.107	0.108	0.1178	0.1188	0.1218	0.1228	0.395	0.0903		
Condor	795 000	54	3	0.1214	7	0.1214	1.093	500 000	28 500	5 399	0.0368	900	0.117	0.118	0.118	0.119	0.1288	0.1308	0.1358	0.1378	0.401	0.0917		
Drake	795 000	26	2	0.1749	7	0.1360	1.108	500 000	31 200	5 770	0.0375	900	0.117	0.117	0.117	0.117	0.1288	0.1288	0.1288	0.1288	0.399	0.0912		
Mallard	795 000	30	2	0.1628	19	0.0977	1.140	500 000	38 400	6 517	0.0393	910	0.117	0.117	0.117	0.117	0.1288	0.1288	0.1288	0.1288	0.393	0.0904		
Crow	715 500	54	3	0.1151	7	0.1151	1.036	450 000	26 300	4 859	0.0349	830	0.131	0.131	0.131	0.132	0.1442	0.1452	0.1472	0.1482	0.407	0.0932		
Starling	715 500	26	2	0.1659	7	0.1290	1.051	450 000	28 100	5 193	0.0355	840	0.131	0.131	0.131	0.131	0.1442	0.1442	0.1442	0.1442	0.405	0.0928		
Redwing	715 500	30	2	0.1544	19	0.0926	1.081	450 000	34 600	5 865	0.0372	840	0.131	0.131	0.131	0.131	0.1442	0.1442	0.1442	0.1442	0.399	0.0920		
Flamingo	666 600	54	3	0.1111	7	0.1111	1.000	419 000	24 500	4 527	0.0337	800	0.140	0.140	0.141	0.141	0.1541	0.1571	0.1591	0.1601	0.412	0.0943		
Rook	636 000	54	3	0.1085	7	0.1085	0.977	400 000	23 600	4 319	0.0329	770	0.147	0.147	0.148	0.148	0.1618	0.1638	0.1678	0.1688	0.414	0.0950		
Grosbeak	636 000	26	2	0.1564	7	0.1216	0.990	400 000	25 000	4 616	0.0335	780	0.147	0.147	0.147	0.147	0.1618	0.1618	0.1618	0.1618	0.412	0.0946		
Egret	636 000	30	2	0.1456	19	0.0874	1.019	400 000	31 500	5 213	0.0351	780	0.147	0.147	0.147	0.147	0.1618	0.1618	0.1618	0.1618	0.406	0.0937		
Peacock	605 000	54	3	0.1059	7	0.1059	0.953	380 500	22 500	4 109	0.0321	750	0.154	0.155	0.155	0.155	0.1695	0.1715	0.1755	0.1775	0.417	0.0957		
Squab	605 000	26	2	0.1525	7	0.1186	0.966	380 500	24 100	4 391	0.0327	760	0.154	0.154	0.154	0.154	0.1700	0.1720	0.1720	0.1720	0.415	0.0953		
Dove	556 500	26	2	0.1463	7	0.1138	0.927	350 000	22 400	4 039	0.0313	730	0.168	0.168	0.168	0.168	0.1849	0.1859	0.1859	0.1859	0.420	0.0965		
Eagle	556 500	30	2	0.1362	7	0.1362	0.93	350 000	27 200	4 588	0.0328	730	0.168	0.168	0.168	0.168	0.1849	0.1859	0.1859	0.1859	0.415	0.0957		
Hawk	477 000	26	2	0.1355	7	0.1054	0.858	300 000	19 430	3 462	0.0290	670	0.196	0.196	0.196	0.196	0.216				0.430	0.0988		
Hen	477 000	30	2	0.1261	7	0.1261	0.883	300 000	23 300	3 933	0.0304	670	0.196	0.196	0.196	0.196	0.216				0.424	0.0980		
Ibis	397 500	26	2	0.1236	7	0.0961	0.783	250 000	16 190	2 885	0.0265	590	0.235				0.259				0.441	0.1015		
Lark	397 500	30	2	0.1151	7	0.1151	0.806	250 000	19 980	3 277	0.0278	600	0.235	Lo mismo que en cd				0.259	Lo mismo que en cd				0.432	0.1006
Linnet	336 400	26	2	0.1138	7	0.0855	0.721	4/0	14 050	2 442	0.0244	530	0.278				0.306				0.451	0.1039		
Oriole	336 400	30	2	0.1059	7	0.1059	0.741	4/0	17 040	2 774	0.0255	530	0.278				0.306				0.445	0.1032		
Ostrich	300 000	26	2	0.1074	7	0.0835	0.680	188 700	12 650	2 178	0.0230	490	0.311				0.342				0.458	0.1057		
Piper	300 000	30	2	0.1000	7	0.1000	0.700	188 700	15 430	2 473	0.0241	500	0.311				0.342				0.462	0.1049		
Partridge	266 800	26	2	0.1013	7	0.0788	0.642	3/0	11 250	1 936	0.0217	460	0.350				0.385				0.465	0.1074		

*Con base en conductividad en cobre de 97% y aluminio de 61%.

†Para conductores a 75°C, aire a 25°C, viento a 1.4 millas por hora (2 pies/s), frecuencia = 60 Hz.

**Corriente aprox. a 75% de capacidad* es 75% de la "capacidad aprox. de corriente en A" y es aproximadamente la corriente que produce una temperatura de conductor de 50°C (elevación de 25°C) con temp. del aire de 25°C y viento de 1.4 millas por hora.