

Capítulo IV



Ejemplo del libro rojo

1. Fundamentos para el cálculo de las corrientes de corto circuito

La ley de Ohm, $I = E/Z$ es la relación básica que se usa para determinar la corriente de corto circuito I , donde E es el voltaje en movimiento de la fuente, y Z es la impedancia desde la fuente al corto circuito incluyendo la impedancia de la fuente.

La mayoría de los sistemas de potencia industriales tienen fuentes múltiples que suministran corriente al corto circuito ya que cada motor puede contribuir. Un de los pasos en el cálculo de la corriente de corto circuito es la simplificación del sistema con fuentes múltiples.

2. Procedimiento detallado para el cálculo de las corrientes de corto circuito

Establecer la impedancia de cada elemento del circuito y convertir las impedancias que sean consistentes unas con otras para la combinación serie y paralelo.

Las dos formas consistentes que se establecen para expresar las impedancias son Ohms y p.u. (por unidad). Las impedancias de cada equipo se dan en porcentaje, para hacer una comparación fácil, pero las impedancias en porcentaje se usan con poca frecuencia sin la conversión en los cálculos del sistema. La forma en p.u. de la impedancia se aplica porque es más conveniente que la forma Ohmica cuando el sistema cuenta con diferentes niveles de tensión. Las impedancias expresadas en p.u. sobre una base definida se pueden combinar directamente, independientemente de como algunos niveles de tensión existen desde la fuente a la falla. Para obtener esta conveniencia, el voltaje base a cada nivel de tensión debe estar relacionado de acuerdo a las relaciones vuelta de los transformadores de interconexión.

En el sistema en p.u., existen cuatro cantidades base:

- Potencia aparente base en VA,
- Voltaje base,
- Corriente base e
- Impedancia base

La relación de la base de las cantidades en p.u., y actuales es como sigue:

$$\text{Cantidad en p.u. (voltaje, corriente, etc.)} = \text{cantidad actual} / \text{cantidad base}$$

Generalmente se selecciona un valor conveniente para la potencia aparente base en VA, se selecciona un voltaje base a un nivel de tensión que corresponda con el voltaje nominal del transformador. Los voltajes base para otros niveles de tensión se establecen tomando en cuenta las relaciones vueltas de los transformadores. La corriente e impedancia base a cada nivel de tensión se obtienen con las relaciones conocidas. Las siguientes fórmulas se aplican a sistemas trifásicos, donde el voltaje base es el voltaje línea a línea en Volts o KV y la potencia aparente base es la potencia aparente trifásica en KVA o MVA.

$$I_{base} [A] = \frac{KVA_{base} \times 1000}{\sqrt{3} V_{base}} = \frac{KVA_{base}}{\sqrt{3} KV_{base}} = \frac{MVA_{base} 10^6}{\sqrt{3} V_{base}} = \frac{MVA_{base} \times 1000}{\sqrt{3} KV_{base}}$$

$$Z_{base} [\Omega] = \frac{V_{base}}{\sqrt{3} I_{base}} = \frac{(V_{base})^2}{KVA_{base} (1000)} = \frac{(KV_{base})^2 \times 1000}{KVA_{base}} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

Las impedancias de los elementos individuales del sistema de potencia se obtienen de manera que requiere de convertirlas a las bases relacionadas para el cálculo en p.u.

- a). **Las impedancias de los cables**, generalmente se expresan en Ohms. Para convertir a p.u. se utilizan las relaciones que se indican en las siguientes fórmulas, donde la impedancia en p.u. es Z_{pu} .

$$Z_{pu} = \frac{Z_{actual} [\Omega] (MVA_{base})}{KV_{base}^2} = \frac{Z_{actual} [\Omega] (KVA_{base})}{KV_{base}^2 (1000)}$$

- b). **Las impedancias de los transformadores** se dan en porciento de los KVA's nominales de transformadores autoenfriados y se convierte en p.u. con la siguiente relación:

$$Z_{pu} = \frac{Z_{\%} (KVA_{base})}{KVA_{no\ min\ al} (100)} = \frac{Z_{\%} (10) (MVA_{base})}{KVA_{no\ min\ al}}$$

- c). **Las reactancias de los motores** se obtienen de tablas que proporcionan reactancias en p.u. sobre valores nominales del elemento en KVA's y se convierten usando la siguiente relación:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu} (KVA_{base})}{KVA_{no\ min\ al}}$$

El procedimiento para calcular las corrientes de corto circuito del sistema industrial consiste de los siguientes pasos:

1. Preparar los diagramas unifilares del sistema.
2. Coleccionar y convertir los datos de impedancias.
3. Combinar impedancias.
4. Calcular las corrientes de corto circuito.

3. Cálculo de las Corrientes de Corto Circuito de Acuerdo a ANSI C-37's

El paso final es calcular las corrientes de corto circuito. Los detalles del cálculo están influenciados por el voltaje(s) nominales del sistema y los resultados que se desean.

Se examinarán tres redes básicas de impedancias que se usan para obtener los resultados deseados:

- a). **Duty de primer ciclo** para fusible e interruptores de potencia en alta tensión.
- b). **Duty de apertura de contactos** (interrupción) para interruptores de potencia en media y alta tensión.
- c). **Duty de corrientes de corto circuito con retraso en tiempo**, para el ajuste de los relevadores.

Las tres redes tienen los mismos elementos básicos a excepción de las impedancias de las máquinas rotantes. Estas dependen del propósito del estudio, en donde una de sus aplicaciones principales es la selección del equipo de interrupción.

4. Ejemplo del cálculo de la corriente de corto circuito para un sistema de potencia con varios niveles de tensión

El sistema de potencia trifásico a 60 Hz. que se utiliza en este ejemplo se muestra en la figura 1.

Para los propósitos del ejemplo, los buses se numeran del 1 al 4 con los números dentro de triángulos y las máquinas rotantes, fuentes de corrientes de cortocircuito se numeran de S1 hasta S10 con los números dentro de cuadrados.

Los grupos de máquinas rotantes similares se tratan como fuentes individuales, cada una con un valor nominal a la suma de los valores nominales del grupo y las características de la máquina típica en el grupo.

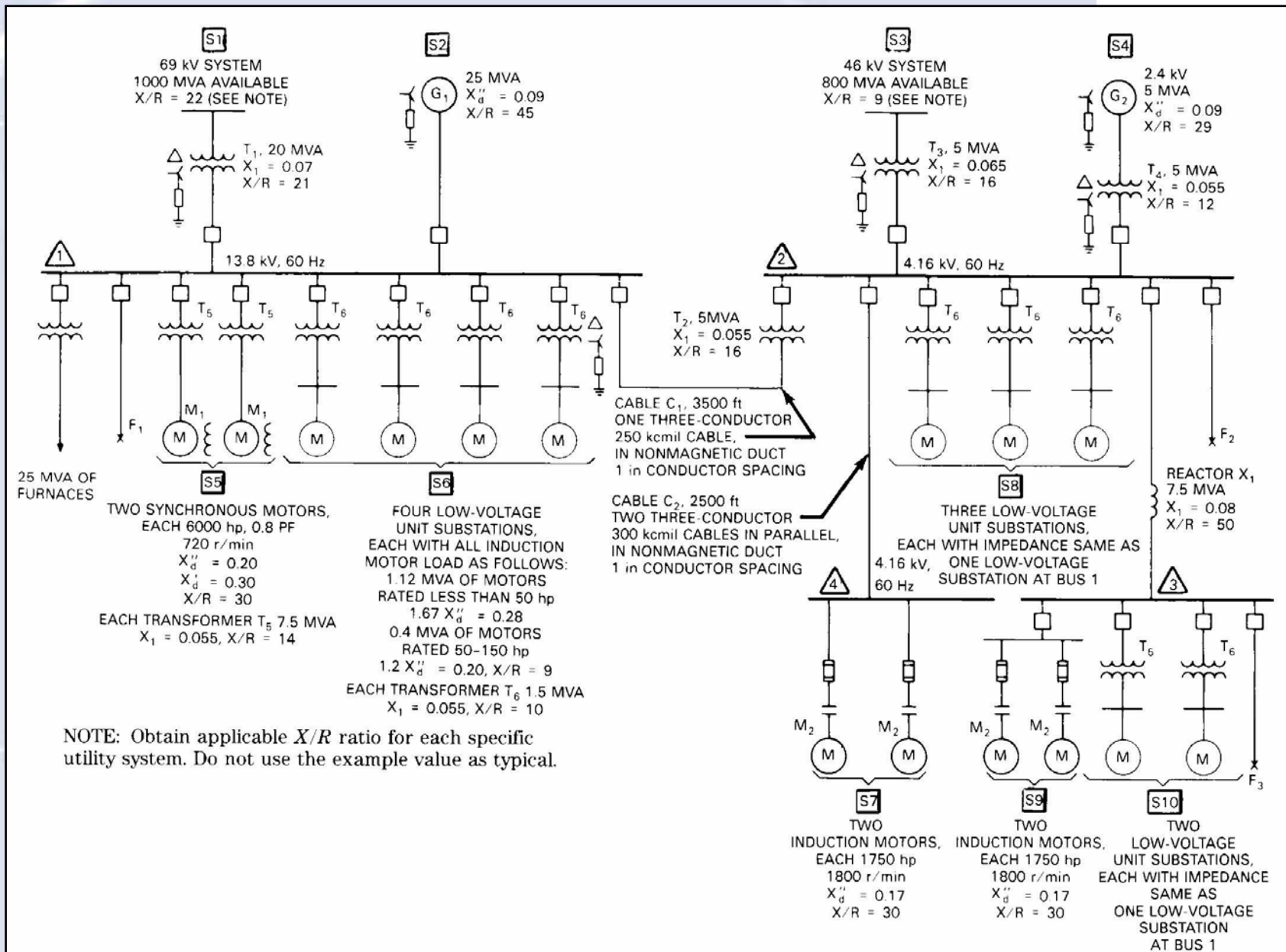


Figura 1. Diagrama Unifilar del sistema ejemplo.

a). **Propósitos del estudio**

Cálculo de los duties de corto circuito en los buses 1, 2, y 3 para compararlos con los valores nominales o las capacidades de los interruptores de potencia.

Los cortos circuitos frontales, trifásicos, se asumen en F_1 , F_2 , y F_3 , que también se denominan buses fallados.

Los buses fallados tienen tensiones de distribución primaria de 13.8 o 4.16 kV's.

Los cálculos del **duty de interrupción** para los interruptores de potencia se basan en la norma IEEE Std C37.010-1979 e IEEE Std C37.5- 1979, que cubren aplicaciones de interruptores de potencia en alta tensión (arriba de 1,000 V, incluyendo media tensión).

Los duties de primer ciclo se calculan para una sola combinación de red, también satisface los requerimientos para aplicaciones en interruptores de potencia en baja tensión en la norma IEEE Std C37.13.1891y para fusibles en baja y alta tensión

La experiencia muestra que los KVA's nominales totales de los motores conectados, generalmente exceden considerablemente los KVA's del transformador de la subestación. Este factor se debe considerar en los estudios para tomar en cuenta los crecimientos a futuro.

b). **Datos del sistema de la suministradora**

Los generadores en planta operan en paralelo con los enlaces del sistema de la suministradora, son las fuentes principales en los buses 1 y 2. La representación de los generadores remotos de la suministradora para los cálculos del corto circuito de la planta, generalmente, se basa en la corriente de corto circuito disponible por la suministradora, o la potencia aparente de corto circuito en MVA's, entregada por la suministradora a un voltaje especificado desde todas las fuentes fuera de la planta, no incluye contribuciones desde las fuentes en la planta. Esta contribución de corto circuito por la suministradora deberá ser la magnitud más alta, probablemente futura más que presente para la selección conservadora del equipo, y deberá también especificar la relación X/R. Estos datos son convertidos a una impedancia equivalente.

c). **Cálculos en p.u. y cantidades base**

Este ejemplo usa cantidades en p.u. para los cálculos. La base para todas las cantidades de potencia en p.u. para todo el sistema es de 10 MVA's. Los voltajes base son diferentes para los diferentes niveles de tensión del sistema. Pero es necesario para todos ellos estar ligados por las relaciones vueltas de los transformadores de interconexión. Cualquier cantidad actual es la magnitud en p.u. de esa cantidad multiplicada por la base aplicable. Por ejemplo, un voltaje de 1.1 p.u. en el bus 1 es actualmente 1.1 veces el voltaje base de 13.8 KV's en el bus 1 = 15.18 KV. Las cantidades base y actuales del sistema en p.u. tienen

relaciones físicas idénticas. Por ejemplo, en sistemas trifásicos la relación que se muestra en la siguiente ecuación aplica a cantidades actuales y a bases de cantidades en p.u.:

$$MVA_{total} = \sqrt{3} (E_{L-L} \text{ en KV})(I_{línea} \text{ en KA})$$

Otras cantidades bases útiles para este ejemplo, obtenidas usando los 10 MVA's base y los voltajes base de la figura 1 en las ecuaciones de los puntos anteriores se listan enseguida:

Voltaje base línea a línea E_{L-L}

	13.8 kV	4.16 kV
Corriente base de línea (kA)	0.4184	1.388
Impedancia base línea a neutro (Ω)	19.04	1.730

Este ejemplo calcula en cada punto de falla un duty de corriente de corto circuito trifásico en p.u. balanceado usando uno de los tres circuitos de secuencia positiva línea a neutro en p.u., energizado por voltaje línea a neutro en p.u. Solamente se listan los voltajes base línea a línea. Para circuitos trifásicos balanceados, los voltajes línea a línea en p.u. de esas bases son idénticos a los voltajes línea a neutro en p.u. de sus correspondientes voltajes base línea a neutro.

d). Impedancias representadas por reactancias

Los cálculos usuales de los duties de corto circuito a voltajes arriba de 1,000 V involucra circuitos en el que la resistencia es pequeña con respecto a la reactancia, así los cálculos manuales se simplifican por la omisión de las resistencias del circuito. Los pequeños errores introducidos hacen que la solución sea conservadora.

Este ejemplo emplea esta simplificación usando solamente las reactancias de los elementos cuando se encuentran las magnitudes de los duties de corto circuito. Sin embargo, los datos de las resistencias son necesarios para determinar las relaciones X/R.

e). Variaciones equivalentes del circuito basados en tiempo y normas

Los cálculos de los duties de corriente de corto circuito para interruptores en alta tensión pueden hacer uso de varios circuitos equivalentes para el sistema de potencia, dependiendo del tiempo posterior a la inserción del corto circuito.

Las reactancias de los elementos pasivos son las mismas en todos los circuitos equivalentes.

La red de aproximadamente 30 ciclos es una representación mínima de la fuente propuesta para investigar como las corrientes de corto circuito mínimas son suficientes para operar relevadores que actúan por corriente. En planta, los generadores se representan con reactancia transitoria o una reactancia más grande relacionada a la magnitud de la corriente de corto circuito de decaimiento del generador en el tiempo de cálculo deseado, para este ejemplo se asumen 1.5 veces la reactancia subtransitoria en la ausencia de información aceptable.

f). Datos de impedancias y conversiones en p.u.

Las reactancias de los elementos pasivos, que se obtienen de la figura 1, se listan en la tabla 1, junto con la conversión de cada reactancia en p.u. sobre la base de 10 MVA's.

Tabla 1. Reactancias de elementos pasivos en p.u., 10 MVA base.

Transformador T_1 ,	$X = 0.07 (10/20) = 0.035 \text{ p.u.}$
Transformador T_2 ,	$X = 0.055 (10/5) = 0.110 \text{ p.u.}$
Transformador T_3 ,	$X = 0.065 (10/5) = 0.130 \text{ p.u.}$
Transformador T_4 ,	$X = 0.055 (10/5) = 0.110 \text{ p.u.}$
Transformador T_5 ,	$X = 0.055 (10/7.5) = 0.0734 \text{ p.u.}$
Transformador T_6 ,	$X = 0.055 (10/1.5) = 0.367 \text{ p. u.}$
Reactor X_1 ,	$X = 0.08 (10/7.5) = 0.107 \text{ p.u.}$
Cable C_1 , de tablas 4A-3 y 4A-6 de 250 kcmil a 1 in de espaciado,	$X = 0.0922 - 0.0571 = 0.0351 \Omega/1000 \text{ ft}$ (No existen correcciones de reactancia ya que este cable de tres conductores se encuentra en ducto no magnético)
De 3,500 ft. de cable, la conversión a p.u. sobre una base de 10 MVA a 13.8 kV	$X = (3500/1000) (0.0351/19.04) = 0.0064 \text{ p.u.}$
Cable C_2 , 300 kcmil a 1 in de espaciado,	$X = 0.0902 - 0.0571 = 0.0331 \Omega /1000 \text{ ft}$
Para 2500 ft. de dos cables en paralelo a 4.16 kV,	$X = (2500/1000) (1/2) (0.0331/1.73) = 0.0239 \text{ p. u.}$

La mayoría de los datos de la figure 1 están en p.u., son los datos de placa de los equipos. Cualquier impedancia original en por ciento, se divide por 100 para obtener una impedancia en p.u.

Las conversiones son cambios de los MVA's base: la multiplicación por la relación de la nueva base en MVA (10 MVA para el ejemplo) a la base vieja en MVA (MVA nominal).

Cuando el voltaje nominal del equipo no es igual que el voltaje base, será necesario hacer conversiones de base de voltaje usando el cuadrado de la relación del voltaje nominal al voltaje base del ejemplo como el multiplicador.

Se utilizan las descripciones físicas de los cables para establecer sus reactancias en Ohms basados en datos de las tablas 4A-3 y 4A-6 (apéndice de norma IEEE Std 141-1993). Dividir una impedancia en Ohms por la impedancia base en Ohms la convierte en p.u.

g). Reactancias subtransitorias de máquinas rotantes, y reactancias del circuito para calcular los duties de corriente de corto circuito de primer ciclo

Las reactancias subtransitorias de máquinas rotantes como fuentes de corrientes de corto circuito modificadas por la combinación de la red de primer ciclo basada en la interpretación de las normas de referencia en baja y alta tensión (IEEE Std C37.010-1979, IEEE Std C37.5-1979 y IEEE Std C37.13-1990), se listan en la tabla 2 junto con las conversiones en p.u. sobre la base del estudio.

Tabla 2. Reactancias Subtransitorias de máquinas rotantes, modificadas para cálculos de duty (momentáneo) de primer ciclo en p.u., 10 MVA base.

Sistema en 69 kV, Generador 1,	$X = 1.0 (10/1000) = 0.01 \text{ p. u.}$ $X_d'' = 0.09 (10/25) = 0.036 \text{ p. u.}$
Sistema en 46 kV, Generador 2,	$X = 1.0 (10/800) = 0.0125 \text{ p.u.}$ $X_d'' = 0.09 (10/5) = 0.18 \text{ p.u.}$
Motor síncrono grande M_1 , aplica la consideración de que los HP's nominales con $FP = 0.8$ son sus KVA nominales,	$X_d'' = 0.20 (10/6) = 0.333 \text{ p.u., cada motor}$
Motor de inducción grande M_2 , aplica que los HP's = kVA,	$X_d'' = 0.17 (10/1.75) = 0.971 \text{ p. u.}$
Grupo de motores en baja tensión, 0.4 MVA, de 50 a 150 HP's,	Primer ciclo $X = 1.2 X_d'' = 0.20 (10/0.4) = 5.0 \text{ p.u.}$
Grupo de motores en baja tensión, 1.12 MVA, menores de 50 HP's,	Primer ciclo $X = 1.67 X_d'' = 0.28 (10/1.12) = 2.5 \text{ p.u.}$

La representación de la reactancia de las máquinas rotantes del sistema de la suministradora se obtiene de la potencia aparente de corto circuito disponible en MVA's, que en nuestro caso es 1.0 p.u. de una base igual a ella misma, y que la potencia aparente de corto circuito

de 1.0 p.u. corresponde a una reactancia (X) de 1.0 p.u. a 1.0 p.u. de voltaje (V), entonces, se convierte esta reactancia a la base del estudio.

h). Reactancias y resistencias del circuito para calcular los duties de corriente (interrupción) de corto circuito

Las reactancias y resistencias como se describieron anteriormente se obtienen y se detallan en la tabla 3.

Tabla 3- relaciones X/R y resistencias para los duties de corto circuito de CA del tiempo de apertura de contactos del interruptor de potencia (interrupción) en alta tensión.

Equipo	X/R	Resistencias
Transformador T ₁	21	$R = 0.035/21 = 0.001\ 667\ \text{p.u.}$
Transformador T ₂	16	$R = 0.110/16 = 0.006\ 88\ \text{p.u.}$
Transformador T ₃	16	$R = 0.130/16 = 0.008\ 12\ \text{p.u.}$
Transformador T ₄	12	$R = 0.11/12 = 0.009\ 16\ \text{p.u.}$
Transformador T ₅	14	$R = 0.0734/14 = 0.005\ 24\ \text{p.u.}$
Transformador T ₆	10	$R = 0.0367/10 = 0.003\ 67\ \text{p.u.}$
Reactor X ₁	50	$R = 0.107/50 = 0.002\ 14\ \text{p.u.}$
Cable C ₁ , la resistencia de CA a 50°C de la tabla 4A-3 es 0.0487 Ω /1000 ft., corrección a 75°C = 1.087 Para 3500 ft. de cable convertido a p.u. sobre una base de 10 MVA y 13.8 kV, $R = (3500/1000) (1.087) (0.0487/19.04) = 0.00972\ \text{p.u.}$		
Cable C ₂ , la resistencia de CA de la tabla 4A-3 es 0.0407 Ω /1000 ft. Para 2500 ft. de dos cables en paralelo sobre una base de 10 MVA en 4.16 kV a 75°C, $R = (2500/1000) (1.087/2) (0.0407/1.73) = 0.0320\ \text{p.u.}$		
Sistema en 69 kV	22	$R = 0.01/22 = 0.000\ 445\ \text{p.u.}$
Generador 1,	45	$R = 0.036/45 = 0.0008\ \text{p. u.}$
Sistema en 46 kV	9	$R = 0.0125/9 = 0.001389\ \text{p.u.}$
Generador 2	29	$R = 0.18/29 = 0.0062\ \text{p. u.}$
Motor síncrono grande M ₁ , usando $X = 1.5 X''_d = 1.5 (0.333) = 0.5\ \text{p.u.}$, $X/R = 30$, $R = 0.5/30 = 0.01667\ \text{p. u.}$		
Motor de inducción grande M ₂ , usando $X = 1.5 X''_d = 1.5 (0.971) = 1.457\ \text{p.u.}$, $X/R = 30$, $R = 1.457/30 = 0.04857\ \text{p.u.}$		
Grupo de motores en baja tensión 50-150 HP's, usando $X = 3.0 X''_d = (3/1.2) (5.0) = 12.5\ \text{p.u.}$, $X/R = 9$, $R = 12.5/9 = 1.389\ \text{p.u.}$		
Grupo de motores en baja tensión abajo de 50 HP's se omiten.		
NOTA: ver tablas 2-4 y 2-5 para reactancias de elementos pasivos, sistemas de la suministradora y generadores.		

i). Reactancias del circuito para calcular las corrientes de corto circuito mínimas a 30 ciclos aproximadamente

La generación mínima para este problema (definido por los operadores del sistema) ocurren con el generador 1 fuera, la conexión abierta del sistema de la suministradora en 46 KV's, y todos los motores desconectados, las reactancias se dan en la tabla 4.

Tabla 4. Reactancias para corrientes de corto circuito en aproximadamente 30 ciclos.

Reactancia S_1, del sistema de la suministradora no cambia
Generador 2, S_4 se representa con la reactancias más grande que la subtransitoria, se asume en $X''_d = 1.5 (0.18) = 0.27$ p.u.
Todas las otras fuentes, $S_2, S_3, S_5 - S_{10}$, se desconectan

4.1. Circuito y cálculo de los duties de corriente de corto circuito de primer ciclo

El circuito que se usa para calcular las corrientes alternas simétricas de los duties de corto circuito de primer ciclo se basan en una combinación de normas para fusibles e interruptores de potencia, se muestran en la figura 2(a).

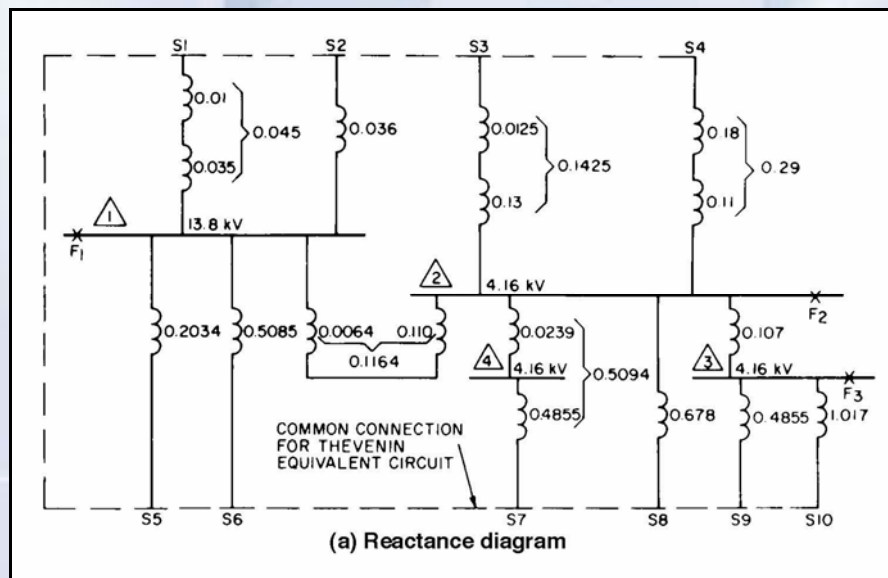
Los circuitos de las fuentes S_5 hasta S_{10} se simplificaron y se indican en la figura 2(a), se basan en impedancias de los elementos en p.u. que se obtuvieron directamente de las tablas 1 y 2. Las identidades de buses y fuentes permanecen en la figura 2(b), aún después de las impedancias de los elementos individuales de la figura 1, pierde identificación cuando se combinan las reactancias.

Tabla 5. Reactancias para las figura 2(a)

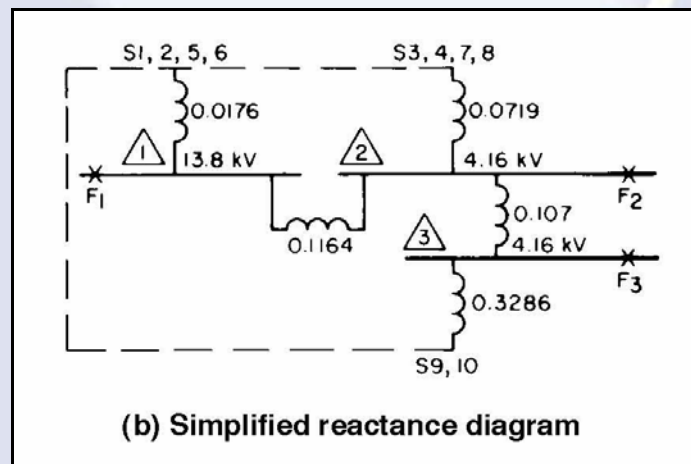
S_5 en el bus 1, dos circuitos en paralelo, cada uno con una X''_d del motor M_1 y la X del transformador T_5 , $X''_d = (1/2) (0.3333 + 0.0734) = 0.2034$ p.u.
S_6 en el bus 1 (después de combinar todos los motores de una subestación para una reactancia X''_d del motor equivalente en baja tensión) $= 2.5 (5)/(2.5 + 5) = 1.667$, Cuatro circuitos en paralelo, cada uno con una X''_d equivalente del motor en serie con un transformador T_6 . $X''_d = (1/4) (1.667 + 0.367) = (1/4) (2.034) = 0.5085$ p.u.
S_7 en el bus 4, dos motores de inducción M_2 , $X''_d = (1/2) (0.971) = 0.4855$ p. u.
S_8 en el bus 2, tres circuitos, cada uno como S_6 en el cálculo del bus 1, $X''_d = (1/3) (2.034) = 0.678$ p. u.
S_9 en el bus 3, dos motores de inducción M_2 , $X''_d = (1/2) (0.971) = 0.4855$ p. u.
S_{10} en el bus 3, dos circuitos, cada uno como S_6 en el cálculo del bus 1, $X''_d = (1/2) (2.034) = 1.017$ p.u.

La conexión de una fuente de CA, la magnitud del voltaje que es el voltaje de prefalla en el bus fallado, entre la conexión común punteada y la falla en el bus fallado causa el flujo de la corriente alterna de corto circuito en p.u.

Las reactancias de la figura 2(a) se simplifican como se muestra en la figura 2(b), sin perder de vista los tres sitios de falla. Las simplificaciones se resumen en la tabla 6. La tabla 6 contiene columnas de reactancias y los recíprocos. Las flechas se utilizan para indicar el cálculo de un recíproco. Las sumas de los recíprocos se utilizan para combinar reactancias en paralelo. Una línea discontinua en la columna de reactancias indica que las reactancias sobre la línea se combinaron.



(a) Diagrama de reactancias.



(b) Diagrama simplificado de reactancias.

Figura 2.- Circuitos de las reactancias del sistema de potencia para el cálculo de los duties de corriente de corto circuito de primer ciclo (momentáneo) para fusibles e interruptores de potencia en baja tensión.

La simplificación final de las reactancias para obtener una X en el punto de falla en cada bus fallado se detallan en la tabla 7. Los resultados para los buses que se especifican son las entradas en las columnas de las reactancias.

Tabla 6.- Combinación de reactancias para la figura 2(a)

S ₁ , S ₂ , S ₅ , S ₆		S ₃ , S ₄ , S ₇ , S ₈		S ₉ , S ₁₀	
X	1/X	X	1/X	X	1/X
0.0450	→ 22.22	0.1425	→ 7.02	0.4855	→ 2.060
0.0360	→ 27.78	0.29	→ 3.45	1.0170	→ 0.983
0.2034	→ 4.91	0.5094	→ 1.96	-----	-----
0.5085	→ 1.97	0.678	→ 1.47	0.32860	← 3.043
-----	-----	-----	-----		
0.0176	← 56.88	0.0719	← 13.90		

Tabla 7.- Combinaciones de reactancias para la X en el punto de falla de cada bus fallado de la figura 2(b).

Falla en F ₁		Falla en F ₂		Falla en F ₃	
X	1/X	X	1/X	X	1/X
0.3286		0.0176		0.1340	→ 7.46
0.107		0.1164		0.0719	→ 13.90
-----		-----		-----	-----
0.4356	→ 2.30	0.1340	→ 7.46	0.0468	← 21.36
0.0719	→ 13.90	0.107		0.107	
-----		0.3286		-----	-----
0.0617	← 16.20	-----		0.1538	→ 6.502
0.1164		0.4356	→ 2.30	0.3286	→ 3.043
-----		0.0719	→ 13.90	-----	-----
0.1781	→ 5.62	-----		0.1048	← 9.545
0.0176	→ 56.82	0.0423	← 23.66		

0.016	← 62.44				

Las corrientes de corto circuito alternas se calculan de reducir el circuito de reactancias X con un voltaje de prefalla E de 1.0 p.u., la corriente rms alterna es E/X en p.u., esta cantidad se multiplica por la corriente base para tener unidades reales en kA. Las corrientes resultantes rms de corto circuito de primer ciclo (alterna solamente) simétricas son entonces:

$$\begin{aligned}
 \text{En } F_1 & \quad I_{\text{sym}} = (1.0/0.016) (0.4184) = 26.15 \text{ kA} \\
 \text{En } F_2 & \quad I_{\text{sym}} = (1.0/0.0423) (1.388) = 32.81 \text{ kA} \\
 \text{En } F_3 & \quad I_{\text{sym}} = (1.0/0.1048) (1.388) = 13.25 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Estas corrientes son útiles como información inicial de la corriente de corto circuito simétrica disponible para los cálculos de los duties de corto circuito para los buses en baja tensión.

Los duties de corriente de corto circuito rms total (asimétrica) para compararlos con las capacidades de cierre y enclave del interruptor de potencia en alta tensión (arriba de 1000 V, incluyendo tensión media) preferentes antes de 1987 (o valores nominales momentáneos para las bases de valores nominales anteriores a 1967) se encuentran usando un **factor de multiplicación de 1.6** de acuerdo a las normas IEEE Std C37.010-1979 e IEEE Std C37.5-1979. Estas corrientes de corto circuito rms totales (asimétricas) de primer ciclo son entonces:

En F ₁	$I_{\text{tot}} = 1.6 (26.15) = 41.8 \text{ kA}$
En F ₂	$I_{\text{tot}} = 1.6 (32.81) = 52.5 \text{ kA}$
En F ₃	$I_{\text{tot}} = 1.6 (13.25) = 21.2 \text{ kA}$

Los duties de corrientes cresta de corto circuito para la comparación con las capacidades de cierre y enclave de interruptores en alta tensión (arriba de 1000 V, incluyendo media tensión) preferentes a 1987 y después se encuentran usando un **factor de multiplicación de 2.7** según la norma IEEE Std C37.010-1979. Esas corrientes cresta de corto circuito de primer ciclo son:

En F ₁	$I_{\text{cresta}} = 2.7 (26.15) = 70.6 \text{ kA}$
En F ₂	$I_{\text{cresta}} = 2.7 (32.81) = 88.6 \text{ kA}$
En F ₃	$I_{\text{cresta}} = 2.7 (13.25) = 35.8 \text{ kA}$

Los duties de corto circuito asimétricos son necesarios para la comparación con los valores nominales de corriente total rms de los fusibles en alta tensión (y media tensión) de CA. Éstos se encuentran usando factores de multiplicación de la norma IEEE Std C37.41-1988. La norma aplicable al circuito de la figura 1 sugiere un **factor de multiplicación para caso general de 1.55**, pero se puede sustituir un multiplicador para caso especial de **1.2 si el voltaje es menor de 15 kV y si la relación X/R es menor de 4**. El circuito de este ejemplo no tendrá relaciones X/R menores a 4. Las corrientes (totales) asimétricas rms de corto circuito de primer ciclo para su aplicación en fusible de alta tensión son:

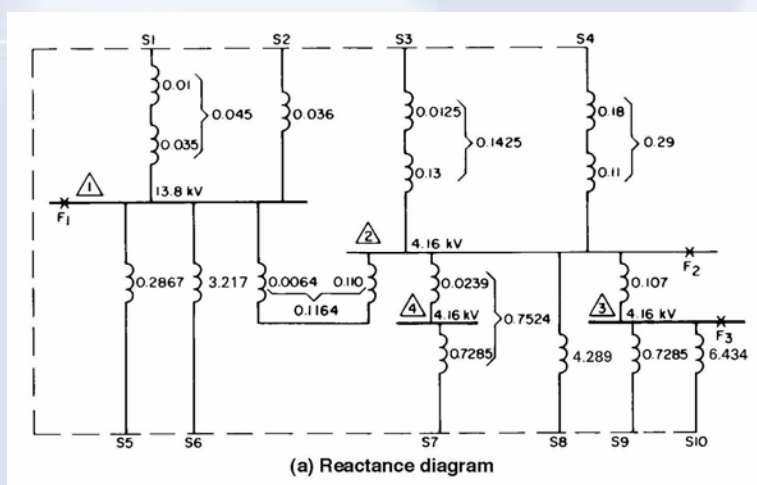
En F ₁	$I_{\text{tot}} = 1.55 (26.15) = 40.73 \text{ kA}$
En F ₂	$I_{\text{tot}} = 1.55 (32.81) = 50.86 \text{ kA}$
En F ₃	$I_{\text{tot}} = 1.55 (13.25) = 20.54 \text{ kA}$

4.2. Circuito y cálculo de los duties de corriente de corto circuito de tiempo de apertura de contactos (interrupción)

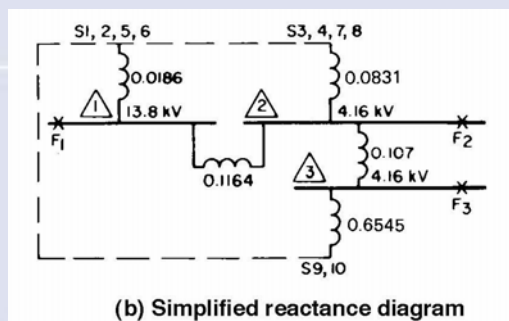
Además del circuito de reactancias del sistema de potencia para calcular las corrientes alternas ($I_{pu} = E/X$), es necesario un circuito de resistencias para establecer las relaciones X/R en los puntos de falla. Los duties se calculan aplicando factores de multiplicación a E/X . Los factores de multiplicación dependen de la relación X/R en el punto de la falla y también sobre otros factores.

Los circuitos que se utilizan para calcular X , E/X , y R en el punto de falla se muestran en las figuras 3(a) y 4(a), respectivamente. Las reactancias de las máquinas rotantes para el circuito de la figura 3(a), se cambio a subtransitoria, como se muestra en la tabla 2. La tabla 8 detalla como estos cambios afectan las especificaciones de la tabla 5 de los circuitos fuente S_5 hasta S_{10} . La tabla 8 incluye las simplificaciones de los circuitos de resistencias de la fuente para la figura 4(a).

La figura 3 (a) y la 4 (a) muestran los pasos de las simplificaciones de reactancias y resistencias, respectivamente. Las tablas 9 y 10 detallan al inicio las especificaciones de reactancia y resistencia de las figuras 3(a) y 4(a), respectivamente. Las simplificaciones finales de reactancias y resistencias para obtener una X y una R en el punto de falla, se detallan en las tablas 11 y 12, respectivamente.



(a) Diagrama de reactancias.



(b) Diagrama simplificado de reactancias.

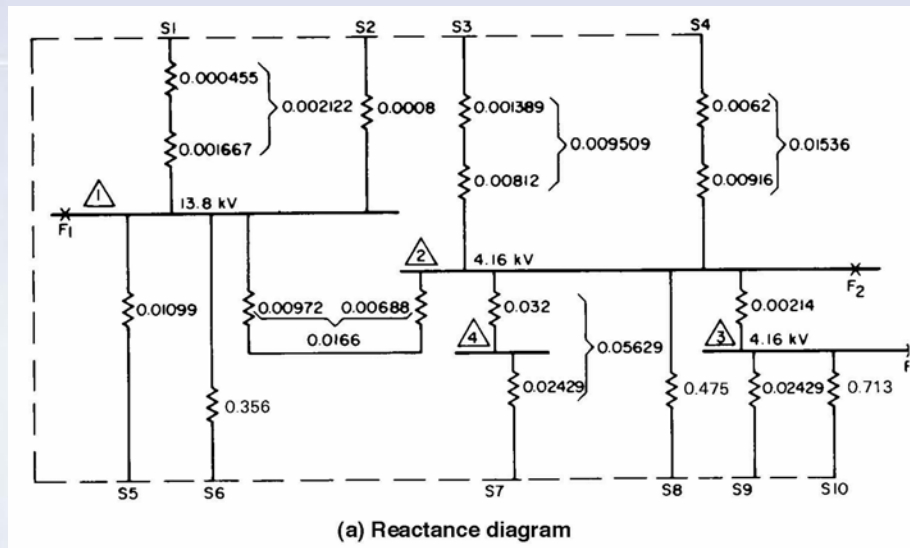
Figura 3.- Circuitos de reactancias del sistema de potencia para calcular las E/X y la X en el punto de falla para los duties de corrientes de corto circuito de tiempo de apertura de contactos (interrupción) para interruptores en alta tensión.

Los valores de E/X en p.u. para cada bus fallado se obtienen fácilmente de la tabla 11, donde E = 1.0 (para este ejemplo); son las entradas finales en las columnas 1/X, opuesto a la entrada del punto de falla. Los valores convertidos a corrientes actuales son como sigue:

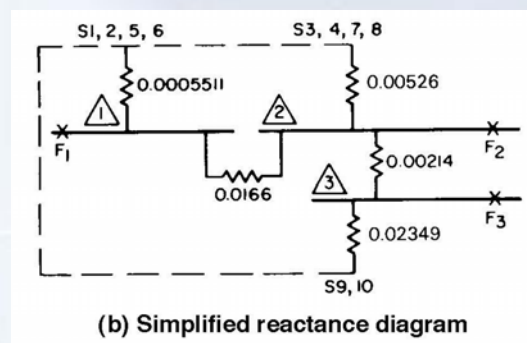
En F ₁	$E/X = 59.03(0.4184) = 24.70 \text{ kA}$
En F ₂	$E/X = 20.75(1.388) = 28.80 \text{ kA}$
En F ₃	$E/X = 7.841(1.388) = 10.88 \text{ kA}$

Los valores de X/R para cada bus fallado se obtienen de la X y la R en el punto de falla que son entradas de las tablas 11 y 12 como sigue:

En F ₁	$X/R = 0.0169/0.000537 = 31.47$
En F ₂	$X/R = 0.0482/0.00348 = 13.85$
En F ₃	$X/R = 0.1275/0.00488 = 26.13$



(a) Diagrama de resistencias.



(b). Diagrama simplificado de resistencias.

Figura 4.- Circuitos de resistencia del sistema de potencia para el cálculo de la R en el punto de falla para duties de corriente de corto circuito (interrupción) de tiempo de apertura de contactos para interruptores de potencia en alta tensión.

Las normas que hacen referencia a lo anterior muestran gráficas de factores de multiplicación que determinan los duties de corriente de corto circuito calculados cuando se aplican a los valores E/R . La gráfica apropiada se selecciona con la siguiente información:

- Corriente de corto circuito monofásica o trifásica (trifásica para este ejemplo).
- Bases nominales de los interruptores de potencia que son aplicados (valores nominales de corriente de corto circuito simétrica presente o valores nominales de corriente de corto circuito total previos).
- Tiempo nominal de interrupción del interruptor de potencia que se aplica.
- Relación X/R en el punto de la falla.
- Proximidad de los generadores.

Tabla 8. Reactancias para la figura 3(a) y resistencias para la figura 4(a).

S_5 en el bus 1, dos circuitos en paralelo, cada uno con $1.5 X''_d$ del motor síncrono M_1 y transformador T_5 , $X = (1/2) (0.5 + 0.0734) = 0.2867 \text{ p.u.}$ $R = (1/2) (0.01667 + 0.00531) = (1/2) (0.02198) = 0.01099 \text{ p.u.}$
S_6 en el bus 1, cuatro circuitos en paralelo, grupo de motores y transformador T_6 , $X = (1/4) (12.5 + 0.367) = (1/4) (12.867) = 3.217 \text{ p.u.}$ $R = (1/4) (1.389 + 0.0367) = (1/4) (1.4257) = 0.356 \text{ p.u.}$
S_7 en el bus 4, dos motores M_2 , $X = (1/2) (1.457) = 0.7285 \text{ p.u.}$ $R = (1/2) (0.04857) = 0.02429 \text{ p.u.}$
S_8 en el bus 2, tres circuitos, cada uno para S_6 en el cálculo del bus 1, $X = (1/3) (12.867) = 4.289 \text{ p.u.}$ $R = (1/3) (1.4257) = 0.475 \text{ p.u.}$
S_9 en el bus 3, dos motores M_2 , $X = (1/2) (1.457) = 0.7285 \text{ p.u.}$ $R = (1/2) (0.04857) = 0.02429 \text{ p.u.}$
S_{10} en el bus 3, dos circuitos, cada uno para S_6 en el cálculo del bus 1, $X = (1/2) (12.867) = 6.434 \text{ p.u.}$ $R = (1/2) (1.4257) = 0.713 \text{ p.u.}$

Tabla 9. Combinaciones de reactancias para la figura 3(a).

S_1, S_2, S_5, S_6		S_3, S_4, S_7, S_8		S_9, S_{10}	
X	1/X	X	1/X	X	1/X
0.045	→ 22.22	0.1425	→ 7.018	0.7285	→ 1.373
0.036	→ 27.78	0.29	→ 3.448	6.434	→ 0.155
0.2867	→ 3.49	0.7524	→ 1.329	-----	-----
3.217	→ 0.31	4.289	→ 0.233	0.6545	← 1.528
-----	-----	-----	-----		
0.0186	← 53.80	0.0831	← 12.028		

Tabla 10.- Combinaciones de resistencias para la figura 4(b).

S_1, S_2, S_5, S_6		S_3, S_4, S_7, S_8		S_9, S_{10}	
R	1/R	R	1/R	R	1/R
0.002122	→ 471.3	0.009509	→ 105.2	0.02429	→ 41.17
0.0008	→ 1250.0	0.01536	→ 65.10	0.713	→ 1.403
0.01099	→ 90.99	0.05629	→ 17.77	-----	-----
0.356	→ 2.81	4.475	→ 2.11	0.02349	← 42.57
-----	-----	-----	-----		
0.0005511	← 1815	0.00526	← 190.3		

Tabla 11.- Combinación de reactancias para la X en el punto de falla de cada bus fallado de la figura 3(b).

Falla en F ₁		Falla en F ₂		Falla en F ₃	
X	1/X	X	1/X	X	1/X
0.6545		0.0186		0.135	→ 7.407
0.107		0.1164		0.0831	→ 12.03
0.7615	→ 1.313	0.135	→ 7.407	0.0514	← 19.44
0.0831	→ 12.03	0.7615	→ 1.313	0.107	
0.0750	← 13.34	0.0831	→ 12.03	0.1584	→ 6.313
0.1164		0.0482	← 20.75	0.6545	→ 1.528
0.1914	→ 5.225			0.1275	← 7.841
0.0186	→ 53.80				
0.0169	← 59.03				

Tabla 12.- Combinaciones de reactancias para la R en el punto de falla en cada bus fallado de la figura 4(b).

Falla en F ₁		Falla en F ₂		Falla en F ₃	
R	1/R	R	1/R	R	1/R
0.02349		0.0005511		0.01715	→ 58.31
0.00214		0.016 6		0.00526	→ 190.3
0.02563	→ 39.02	0.01715	→ 58.31	0.00402	← 248.6
0.00526	→ 190.3	0.00526	→ 190.3	0.00214	
0.00436	← 229.32	0.02563	→ 39.02	0.00616	→ 162.3
0.0166		0.00348	← 287.6	0.02349	→ 42.57
0.02096	→ 47.71			0.00488	← 204.9
0.0005511	→ 1815				
0.000537	← 1863				

La proximidad de los generadores determina la selección entre las gráficas (a) para fallas alimentadas predominantemente desde generadores a través de no más de una transformación o con impedancia externa en serie que sea **menor de 1.5 veces la X''_d del generador** (local en este ejemplo) y (b) para fallas alimentadas predominantemente a través de dos o más transformadores o con impedancia externa en serie que sea **igual o exceda 1.5 veces la X''_d del generador** (remoto en este ejemplo). Las gráficas de los factores de multiplicación locales y remotos de las normas IEEE Std C37.010-1979 e IEEE Std C37.5-1979 se dan en las figuras 2-5 a 2-8. Los factores de multiplicación locales son más pequeños debido a que ellos incluyen los efectos del decaimiento de CA del generador (corriente simétrica). Los factores de multiplicación remotos se basan al no decaimiento de

los generadores de CA remotos hasta el tiempo de apertura de contactos del interruptor de potencia.

Para algunos sistemas que tienen únicamente fuentes remotas y sin generadores en planta, la selección será solamente el factor de multiplicación remoto. Para pocos sistemas que tienen generador en planta como fuente primaria, son necesarios ambos factores de multiplicación.

En este ejemplo, los duties de corto circuito se calculan para interruptores de potencia (bases presentes) nominales para corriente de corto circuito simétrica (SYM) con tiempos de interrupción nominal de 5 ciclos (SYM 5) e interruptores de potencia (bases previas) nominales para corrientes totales de corto circuito (TOT) con tiempos de interrupción nominal de 8 y 5 ciclos (TOT 8 y TOT 5).

Los factores de multiplicación que se obtienen de la gráfica remota y local de las figuras 2.5 y 2.8 se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Factores de multiplicación para la corriente de corto circuito trifásica para E/X para las condiciones del ejemplo.

Sitio de la falla	Relación X/R en el punto de falla	Tipo de interruptor de potencia	Factor de multiplicación	
			Local	Remoto
F ₁	31.47	TOT 8	1.05	1.19
		TOT 5	1.14	1.27
		SYM 5	1.03	1.15
F ₂	13.85	TOT 8	1.0*	1.0*
		TOT 5	1.01	1.06
		SYM 5	1.0*	1.0*
F ₃	26.13	TOT 8	1.02	1.14
		TOT 5	1.10	1.21
		SYM 5	1.00	1.10

* Las normas IEEE Std C37.010-1979 e IEEE Std C37.5-1979 indican que un factor de multiplicación de 1.0 se aplica sin favorecer el chequeo cuando X/R = 15 o menos para interruptores de potencia SYM de todos los tiempos de interrupción nominales y para interruptores de potencia TOT 8.

En este ejemplo, con cada uno de los dos buses principales conectados con la fuente de la suministradora (remoto) y fuente con generador en planta (local para fallas cercanas), no es inmediatamente aparente cuando se aplica el factor de multiplicación. Una técnica que quizás proporciona un margen adicional de conservadurismo es utilizar solamente factores de multiplicación remotos más grandes.

Las corrientes rms de corto circuito del duty de interrupción calculado para fallas trifásicas en el bus 1, usando factores de multiplicación remotos, son como sigue:

- para interruptores de potencia **SYM 5**; $1.15(24.70) = 28.41 \text{ kA-S}$
- para interruptores de potencia **TOT 8**; $1.19(24.70) = 29.39 \text{ kA-T}$
- para interruptores de potencia **TOT 5**; $1.27(24.70) = 31.37 \text{ kA-T}$

La designación kA-T denota un duty de corriente rms en kiloamperes, para que se compare con la capacidad (interrupción) de corriente total de corto circuito de un interruptor de potencia con nominación total. Este es el duty de corriente rms total (asimétrica).

La designación kA-S denota un duty de corriente rms en kiloamperes para que se compare con la capacidad (interrupción) de corto circuito de corriente simétrica de un interruptor de potencia con nominación simétrica. Este es un duty de corriente rms simétrica solamente si el factor de multiplicación para E/X es 1.0, por otro lado, no es simétrico ni asimétrico, pero se encuentra parcialmente entre ellos.

El cálculo de la falla en F_2 para un interruptor de potencia TOT 5 no se detalla en este ejemplo. Los duties para TOT 8 y SYM 5 en el bus 2 se tienen disponibles, ya que los factores de multiplicación de 1.0 se aplican como sigue:

- para interruptores de potencia **SYM 5**; $1.0(28.80) = 28.80 \text{ kA-S}$
- para interruptores de potencia **TOT 8**; $1.0(28.80) = 28.80 \text{ kA-T}$

Las corrientes rms calculadas del duty (interrupción) de corto circuito para fallas trifásicas en el bus 3, utilizan factores de multiplicación remotos, como sigue:

- para interruptores de potencia **SYM 5**; $1.10(10.88) = 11.97 \text{ kA-S}$
- para interruptores de potencia **TOT 8**; $1.14(10.88) = 12.40 \text{ kA-T}$
- para interruptores de potencia **TOT 5**; $1.21(10.88) = 13.16 \text{ kA-T}$

4.3. Comparación de las capacidades de corto circuito de los interruptores de potencia con los duties calculados de corriente de corto circuito con factor de multiplicación remoto.

Los valores nominales de corto circuito o capacidades que se obtienen de estos, para los interruptores de potencia que se aplican en el ejemplo se listan en la tabla 14. Las capacidades que se obtienen de los valores nominales de corto circuito simétricos usan una relación del voltaje nominal máximo al voltaje de operación que se calculan utilizando los voltajes de operación que se listan en la misma tabla 14.

Los interruptores de potencia para que se apliquen en el bus 1, tipos SYM 5 y TOT 8 tienen valores nominales o capacidades de corto circuito iguales o más grandes que los duties correspondientes calculados, estos se listan en la tabla 15 con los duties calculados para la

comparación. Los interruptores de potencia para su aplicación en los buses 2 y 3 se listan en las tablas 16 y 17 respectivamente, con valores nominales o capacidades de corto circuito y los duties calculados.

Tabla 14.- Capacidades de corto circuito de los interruptores de potencia en alta tensión de CA, en KA.

Identificación del tamaño nominal del interruptor de potencia	Voltaje de operación máximo del sistema (kV), ejemplo	TOT 8 Interruptores de potencia con nominación total de 8 ciclos		SYM 5 Interruptores de potencia con nominación simétrico de 5 ciclos.		
		Clasificación momentánea (corriente rms total de primer ciclo)	Clasificación de interrupción (corriente rms total con tiempo de apertura de contactos de 4 ciclos)	Capacidad de cierre y aseguramiento antes de 1987 (corriente rms total de primer ciclo)	Capacidad de cierre y aseguramiento, 1987 y posteriores (corriente cresta de primer ciclo)	Capacidad de corto circuito (corriente rms simétrica con tiempo de apertura de contactos de 3 ciclos)
4.16 - 75	4.16	20	10.5	19	32	10.1
4.16 - 250	4.16	60	35	58	97	33.2
4.16 - 350	4.16	80	48.6	78	132	46.9
13.8 - 500	13.8	40	21	37	62	19.6
13.8 - 750	13.8	60	31.5	58	97	30.4
13.8 - 1000	13.8	80	42	77	130	40.2

2.5.8. Duties de tiempo de apertura de contactos (interrupción) para interruptores en alta tensión usando interpolación ponderada entre factores de multiplicación.

Para un sistema con varias fuentes, incluyendo generadores en planta, que pueden ser clasificados como remotos o locales dependen del sitio de la falla, los cálculos lógicos hacen uso de los factores de multiplicación locales y remotos en un proceso de ponderación. Esto consiste de aplicar el factor de multiplicación remoto a la parte de la corriente de corto circuito simétrica E/X con la que contribuyen las fuentes remotas y el factor de multiplicación local al resto de la relación E/X. La aplicación de los factores de multiplicación local o remoto a la parte E/X con la que contribuye el motor. Esto lo permite la norma IEEE Std C37.010-1979 (5.4.1. nota 5 de la tabla). La parte de la E/X de las fuentes remotas incluyen la contribución de un generador en planta si este es menor de 0.4 veces la corriente del generador para un corto circuito en sus terminales; cualquier corriente más grande del generador corresponde a una reactancia en serie que es menor de 1.5 veces la X''_d del generador y soporta el uso de un multiplicador local para la contribución del generador, de acuerdo a la normas IEEE Std C37.010-1979 e IEEE Std C37.5-1979.

Son necesarios cálculos adicionales para obtener las corrientes de corto circuito con las que contribuyen las fuentes de la suministradora y el generador en planta para los duties de corto circuito que se están investigando. La magnitud de una contribución del generador en planta para cada corto circuito determina si se incluye con fuentes de la suministradora en la parte de la E/X remota.

Tabla 15. Duties de corto circuito calculados para el bus 1 comparados con los valores nominales o capacidades de interruptores de potencia en alta tensión de CA.

Tipo de interruptor de potencia	TOT 8 (Nominación total de 8 ciclos)	SYM 5 (Nominación simétrica de 5 ciclos)
Corriente rms total, duty de primer ciclo, antes de 1987.	41.8 kA	41.8 kA
Corriente cresta, duty de primer ciclo, 1987 y posteriores.		70.6 kA
Corriente rms, duty (interrupción) de corto circuito.	29.4 kA-T	28.4 kA-S
Tamaño nominal del interruptor de potencia.	13.8 - 750	13.8 - 750
Corriente nominal rms momentánea, o capacidad rms de aseguramiento y cierre, anteriores a 1987.	60 kA	58 kA
Capacidad cresta de aseguramiento y cierre, 1987 y posterior.		97 kA
Valor nominal de interrupción o capacidad de corriente de corto circuito.	31.5 kA	30.4 kA

Tabla 16. Duties de corto circuito calculados para el bus 1 comparados con valores nominales o capacidades de interruptores de potencia en alta tensión de CA.

Tipo de interruptor de potencia	TOT 8 (Nominación total de 8 ciclos)	SYM 5 (Nominación simétrica de 5 ciclos)
Corriente rms total, duty de primer ciclo, antes de 1987.	52.5 kA	52.5 kA
Corriente cresta, duty de primer ciclo, 1987 y posteriores.		88.6 kA
Corriente rms, duty (interrupción) de corto circuito.	28.8 kA-T	28.8 kA-S
Tamaño nominal del interruptor de potencia.	4.16 - 250	4.16 - 250
Corriente nominal rms momentánea, o capacidad rms de aseguramiento y cierre, anteriores a 1987.	60 kA	58 kA
Capacidad cresta de aseguramiento y cierre, 1987 y posteriores.		97 kA
Valor nominal de interrupción o capacidad de corriente de corto circuito.	35 kA	33.2 kA

Tabla 17. Duties de corto circuito calculados para el bus 3 comparados con capacidades o valores nominales de interruptores de potencia en alta tensión de CA.

Tipo de interruptor de potencia	TOT 8 (Nominación total de 8 ciclos)	SYM 5 (Nominación simétrica de 5 ciclos)
Corriente rms total, duty de primer ciclo, anteriores a 1987.	21.2 kA	21.2 kA
Corriente cresta, duty de primer ciclo, 1987 y posteriores.		35.8 kA
Corriente rms, duty (interrupción) de corto circuito.	12.4 kA-T	12.0 kA-S
Tamaño nominal del interruptor de potencia	4.16 - 250	4.16 - 250
Corriente nominal rms momentánea, o capacidad rms de aseguramiento y cierre, posteriores a 1987.	60 kA	58 kA
Capacidad cresta de aseguramiento y cierre, 1987 y posteriores.		97 kA
Valor nominal de interrupción o capacidad de corriente de corto circuito	35 kA	33.2 kA

Los cálculos adicionales de las corrientes en las ramas con fuentes del circuito equivalente durante un corto circuito en un sitio especificado, es un proceso de múltiples pasos que no se ilustra (esto se facilita con los programas comerciales disponibles de computadora). Los resultados de los cálculos necesarios para este ejemplo se dan en la tabla 18. También muestran la clasificación local y remota para generadores en planta que contribuyen a los cortos circuitos en F_1 , F_2 , y F_3 .

La interpolación ponderada tiene trascendencia solamente para el corto circuito en F_1 . Para el corto circuito en F_2 , los factores de multiplicación remoto y local son ambos 1.0 (para duties SYM 5 y TOT 8) y la interpolación no tiene efecto. Para el corto circuito en F_3 , puesto que todas las fuentes incluyendo los generadores en planta son clasificadas como remotas, por tanto, se aplican los factores de multiplicación remotos.

Para el corto circuito en F_1 , la parte remota de $E/X = 22.22 + 2.75 + 1.35 = 26.32$ p.u. y el resto de $E/X = 59.03 + 26.32 = 32.71$ p.u. Las corrientes rms del duty (interrupción) de corto circuito calculadas para cortos circuitos trifásicos en el bus 1 (F_1), usan interpolación ponderada de factores de multiplicación como sigue:

- Para interruptores de potencia **SYM 5**; $1.15 (26.32) + 1.03 (32.71) = 64.0$ p.u. o $64.0 (0.4184) = \underline{26.8 \text{ kA-S}}$
- Para interruptores de potencia **TOT 8**; $1.19 (26.32) + 1.05 (32.71) = 65.67$ p.u. o $65.67 (0.4184) = \underline{27.5 \text{ kA-T}}$

Tabla 18. Contribuciones de corriente de fuentes separadas (generadores) para duties (interrupción) de corto circuito simétrica E/X con fuentes clasificadas remota o local (las corrientes están en p.u. sobre los 10 MVA's base de este ejemplo).

Contribuciones de falla y clasificaciones*	Falla en F_1	Falla en F_2	Falla en F_3
Corriente de corto circuito simétrica en la E/X del punto de falla	59.03	20.75	7.84
Clasificación de la contribución de la suministradora en S_1 en 69 kV	22.22 remoto	3.06 remoto	0.99 remoto
Clasificación de la contribución del generador en S_2 en 25 MVA's**	27.78 local	3.83 remoto	1.24 remoto
Clasificación de la contribución de la suministradora en S_3 en 48 kV	2.75 remoto	7.02 remoto	2.28 remoto
Clasificación de la contribución del generador en S_4 en 5 MVA's***	1.35 remoto	3.45 local	1.12 remoto
* La suministradora siempre es remota, los generadores en planta son remotos si la contribución es menor de 0.4 E/X". ** E/X" (para corto circuito trifásico en terminales) = 27.78 p.u. *** E/X" (para corto circuito trifásico en terminales) = 5.5.6 p.u.			

La comparación de estos resultados con los previamente calculados para el bus 1, la tabla 15, muestra que el uso previo de solamente factores de multiplicación remotos da un margen extra de conservatismo del 6 o 7% de este ejemplo.

2.5.9. Circuito y cálculos de las corrientes mínimas de corto circuito de aproximadamente 30 ciclos

El circuito que se utiliza se muestra en la figura 5. Las reactancias de las máquinas rotantes se muestran en la tabla 4. La tabla 5(B) detalla el inicio de las simplificaciones de reactancias de la figura 5(A).

Se asume un voltaje de prefault de 1.0 p.u. la I se calcula en E/X p.u. y la conversión se hace a unidades reales. No se tiene componente de CD restante para causar asimetría. Las corrientes de corto circuito resultantes, simétricas, aproximadamente en 30 ciclos, son como sigue:

$$\text{en } F_1, I = (1.0/0.0413) (0.4184) = 10.14 \text{ kA}$$

$$\text{en } F_2, I = (1.0/0.1133) (1.388) = 12.25 \text{ kA}$$

$$\text{en } F_3, I = (1.0/0.2203) (1.388) = 6.300 \text{ Ka}$$

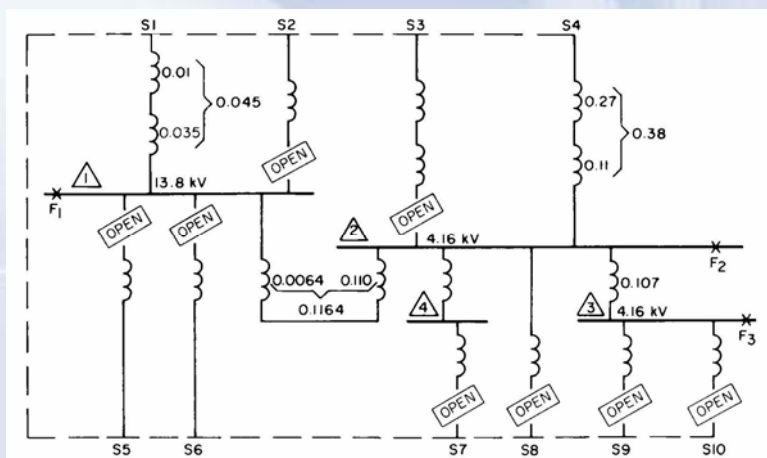


Diagrama de reactancias (a)

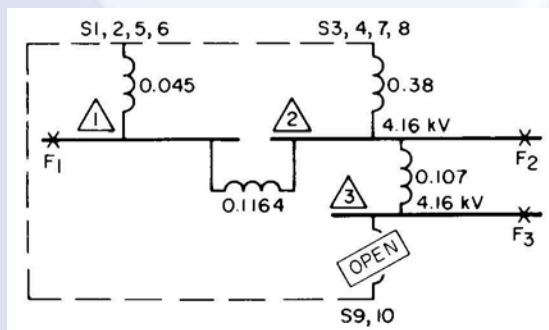
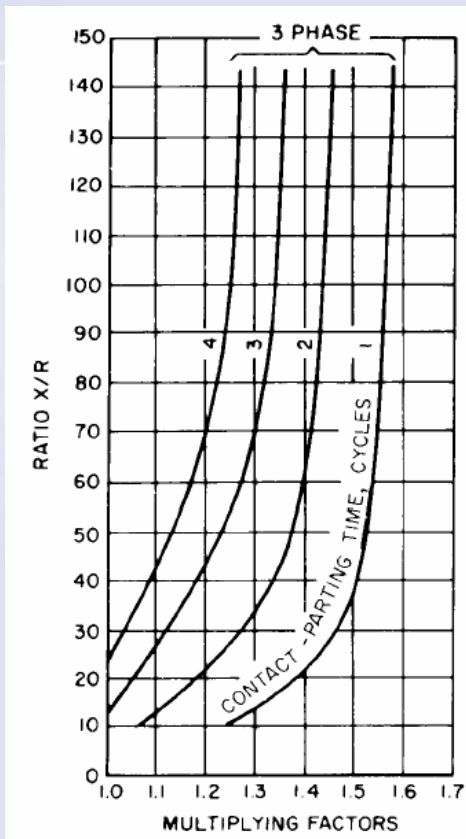


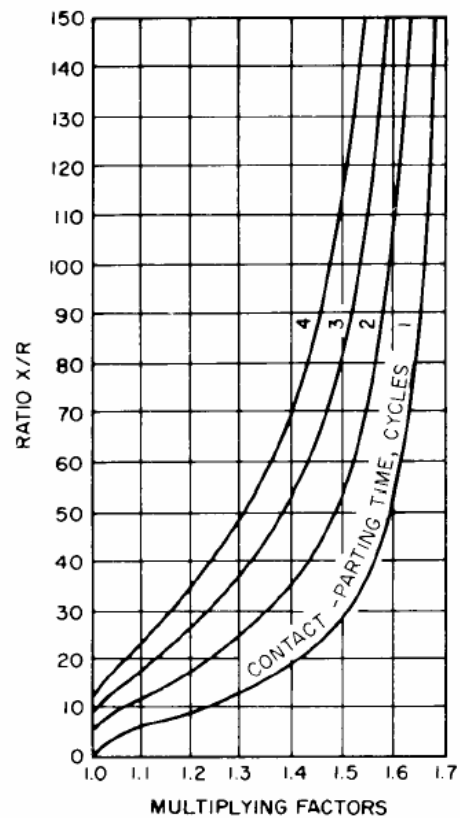
Diagrama de reactancias simplificado (b)

Figura 5. Circuitos de reactancias del sistema de potencia para los cálculos de las corrientes de corto circuito mínimas de aproximadamente 30 ciclos.



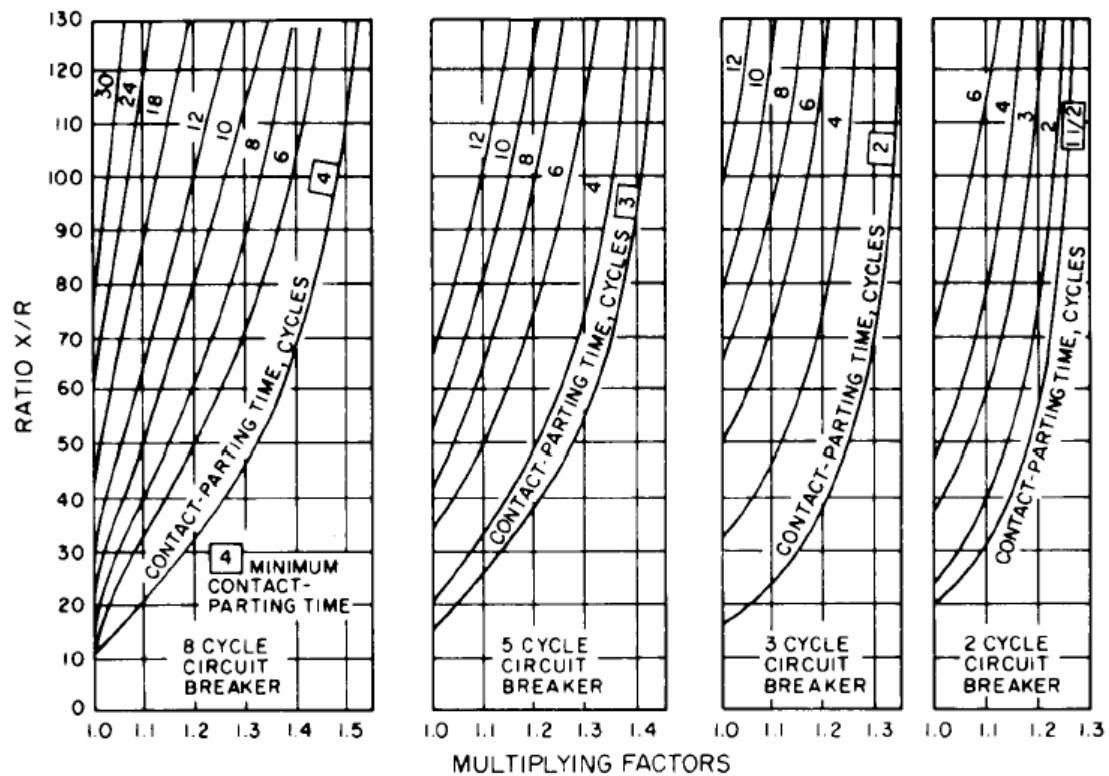
NOTA: Alimentada predominantemente de generadores a través de no más de una transformación o con reactancia externa en serie que es menor de 1.5 veces la reactancia subtransitoria del generador (IEEE Std C37.5-1979).

Figura 2.5. Factores de multiplicación (base corriente total nominal) para fallas trifásicas (local).



NOTE: Alimentada predominantemente a través de dos o más transformaciones o con reactancia externa en serie igual o arriba de 1.5 veces la reactancia subtransitoria del generador (IEEE Std C37.5-1979).

Figura 2.6. Factores de multiplicación (base corriente total nominal) para fallas trifásicas y línea a tierra (remoto).



NOTA: A través de dos o más transformaciones o con reactancia externa en serie que es igual o arriba de 1.5 veces la reactancia subtransitoria del generador (IEEE Std C37.010-1979).

Figura 2.8. Factores de multiplicación para fallas línea a tierra y trifásicas alimentadas predominantemente desde generadores (remotos).