



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**MÁSTER INGENIERO INDUSTRIAL**

**GUIONES DE**

**“GENERACIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN, Y FUENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA”**

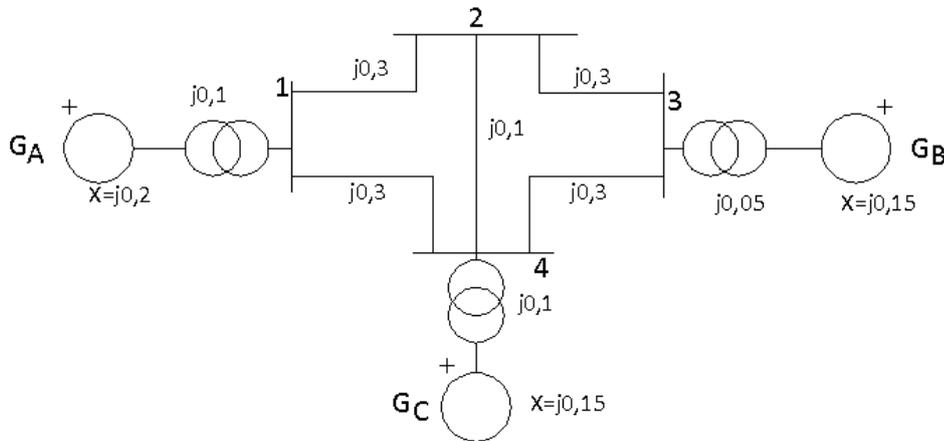
**GUIÓN DE LA  
UNIDAD DIDÁCTICA**

**PROBLEMAS 8  
CORTOCIRCUITO**

Continuación

**JOSÉ RAMÓN ARANDA SIERRA**

**Ejemplo 1.** En el sistema eléctrico de potencia de la figura se conocen los valores por unidad que se indican.



Se pide:

- 1.- Determinar la intensidad de fallo trifásico en el nudo 2.
- 2.- Tensiones en todos los nudos.
- 3.- Intensidad entre los nudos 1 y 4
- 4.- Intensidad del generador 1 al nudo 1.

Solución:

1.- Lo primero es exponer el esquema unifilar en valores por unidad, llamando  $V_f$  a la tensión en la barra 2 antes de que el fallo ocurra.

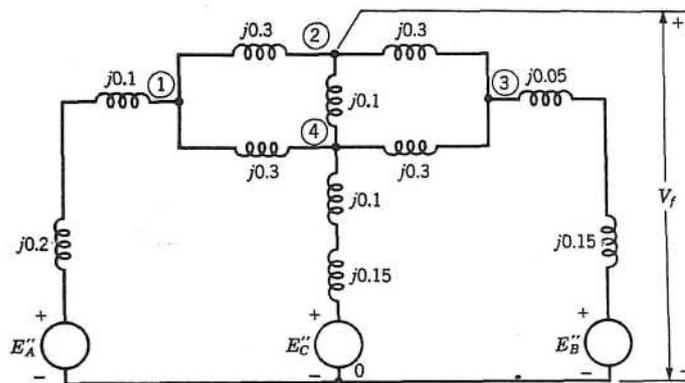


Figura 1.- Diagrama de reactancias

Un fallo trifásico en la barra 2 se representa con el circuito de la fig. 2 donde las tensiones generadas  $V_f$  y  $-V_f$  en serie constituyen un cortocircuito. La tensión  $V_f$  generada por sí sola en esta rama no causará corriente en la rama. Con  $V_f$  y  $-V_f$  en serie la rama es un cortocircuito, y la corriente en la rama es  $I''_f$ . Se han marcado admitancias en vez de

impedancias en valores por unidad sobre este diagrama. Si  $E''_A$ ,  $E''_B$ ,  $E''_C$  y  $V_f$  están en cortocircuito, los voltajes y corrientes se deben solamente a  $-V_f$ . Entonces la única corriente que entra a un nodo desde una fuente es la de  $-V_f$  y es  $-I''_f$  en el nodo 2 ( $I''_f$  desde el nodo 2) y no hay corriente en esta rama hasta la inserción de  $-V_f$ . Las ecuaciones de nodos en forma de matriz para el circuito y con  $-V_f$  como única fuente son:

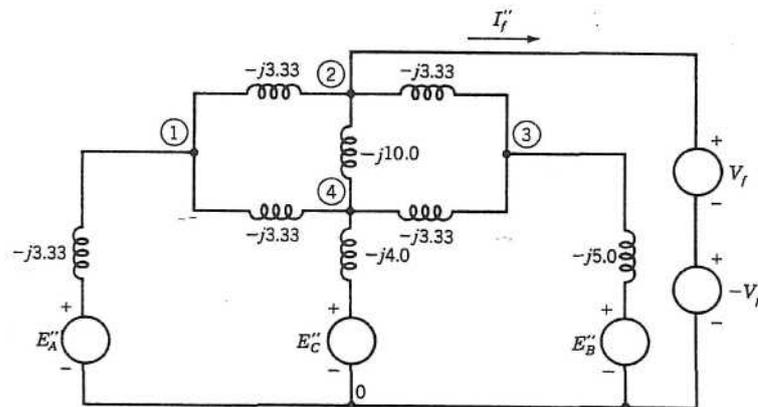


Figura 2. Circuito de la fig. 1 con admitancias en por unidad y fallo trifásico en la barra 2 del sistema simulado por  $-V_f$  y  $-V_f$  en serie.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -I''_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -10.0 & 3.33 & 0.0 & 3.33 \\ 3.33 & -16.67 & 3.33 & 10.0 \\ 0.0 & 3.33 & -11.67 & 3.33 \\ 3.33 & 10.0 & 3.33 & -20.67 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^\Delta \\ -V_f \\ V_3^\Delta \\ V_4^\Delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde el superíndice  $\Delta$  indica que los voltajes se deben solamente a  $-V_f$ . El signo  $\Delta$  se ha elegido para indicar el cambio en tensión debido al fallo. Invertiendo la matriz de admitancia de la barra correspondiente al circuito de la fig. 2 se obtiene la matriz de impedancia de la barra. Las tensiones de barra debidas a  $-V_f$  están dadas por

$$\begin{bmatrix} V_1^\Delta \\ -V_f \\ V_3^\Delta \\ V_4^\Delta \end{bmatrix} = Z_{\text{barra}} \begin{bmatrix} 0 \\ -I''_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

y así

$$I''_f = \frac{V_f}{Z_{22}} \quad (3)$$

2.- Tensiones en todos los nudos.

$$V_1^\Delta = -I_f'' Z_{12} = \frac{-Z_{12}}{Z_{22}} V_f$$

$$V_3^\Delta = \frac{-Z_{32}}{Z_{22}} V_f \quad V_4^\Delta = \frac{-Z_{42}}{Z_{22}} V_f$$
(4)

Cuando la tensión del generador -  $V_f$  entra en cortocircuito en el circuito de la figura 2 y  $E''_A$ ,  $E''_B$ ,  $E''_C$  y  $V_f$  están en el circuito, las corrientes y voltajes en todas las partes del mismo son las que existían antes del fallo. Por el principio de superposición esas tensiones pre-fallo se suman a las dadas por las ecs. (4) encontrando las tensiones existentes después del fallo. Generalmente se supone que el circuito de fallos ha estado sin carga antes del fallo. En tal caso, ninguna corriente fluye antes del fallo y todas las tensiones a través de todo el circuito son las mismas e iguales a  $V_f$ . Suponiendo esto el trabajo se simplifica considerablemente, y aplicando el principio de superposición tenemos:

$$V_1 = V_f + V_1^\Delta = V_f - I_f'' Z_{12}$$

$$V_2 = V_f - V_f = 0$$

$$V_3 = V_f + V_3^\Delta = V_f - I_f'' Z_{32}$$

$$V_4 = V_f + V_4^\Delta = V_f - I_f'' Z_{42}$$
(5)

Estos voltajes existen cuando fluyen corrientes subtransitorias y  $Z_{\text{barra}}$  se forma un circuito que tiene valores subtransitorias para las reactancias del generador.

En términos generales para un fallo sobre una barra K, e ignorando las corrientes de pre-fallo:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_{kk}}$$
(6)

y la tensión post-fallo en la barra n es:

$$V_n = V_f - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} V_f$$
(7)

Utilizando los valores numéricos de la ec. (1) se invierte la matriz cuadrada  $Y_{\text{barra}}$  de esa ecuación y encontramos

$$Z_{\text{barra}} = j \begin{bmatrix} 0.1502 & 0.0807 & 0.0431 & 0.0702 \\ 0.0807 & 0.1471 & 0.0692 & 0.0953 \\ 0.0431 & 0.0692 & 0.1226 & 0.0602 \\ 0.0702 & 0.0953 & 0.0602 & 0.1155 \end{bmatrix}$$
(8)

Por lo común  $V_f$  se supone como  $1,0[0^\circ]$  por unidad, y con esta hipótesis para nuestro circuito de fallos.

$$I_f'' = \frac{1}{j0.1471} = -j6.80 \text{ por unidad}$$

$$V_1 = 1 - \frac{j0.0807}{j0.1471} = 1 - 0.549 = 0.451 \text{ por unidad}$$

$$V_3 = 1 - \frac{j0.0692}{j0.1471} = 1 - 0.470 = 0.530 \text{ por unidad}$$

$$V_4 = 1 - \frac{j0.0953}{j0.1471} = 1 - 0.648 = 0.352 \text{ por unidad}$$

### 3.- Intensidad entre los nudos 1 y 4

Las corrientes en cualquier parte del circuito se pueden deducir de los voltajes e impedancias. Por ejemplo, la corriente de fallo en la rama que conecta los nodos 1 y 4 fluyendo hacia el nodo 4 es:

$$\begin{aligned} I_{1-4}'' &= \frac{V_1 - V_4}{j0.3} = \frac{0.451 - 0.352}{j0.3} = \frac{0.099}{j0.3} \\ &= -j0.330 \text{ por unidad} \end{aligned}$$

### 4.- Intensidad del generador 1 al nudo 1.

La corriente desde el generador conectado al nodo 1 es:

$$\begin{aligned} I_A'' &= \frac{E_A'' - V_1}{j0.3} = \frac{1 - 0.451}{j0.3} = \frac{0.549}{j0.3} \\ &= -j1.83 \text{ por unidad} \end{aligned}$$

Otras corrientes pueden hallarse de forma semejante, y las tensiones y corrientes de fallo sobre cualquier barra se calculan fácilmente a partir de la matriz de impedancias.

\*\*

**EJEMPLO CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS DE BARRA**

Aunque no se puede establecer un circuito físicamente realizable empleando las impedancias del circuito de impedancias de la barra, se puede dibujar un circuito con impedancias mutuas indicadas entre ramas. Un diagrama como tal será de gran ayuda para entender el significado de las ecuaciones desarrolladas en la sección 4.

En la fig. 6 se han dibujado corchetes entre la rama 2 y las otras tres ramas de un circuito que tiene cuatro nodos además del nodo de referencia. Asociados con estos corchetes están los símbolos  $Z_{12}$ ,  $Z_{32}$  y  $Z_{42}$ , los cuales identifican las impedancias mutuas del nodo 2 de la matriz de impedancias de barra. Las impedancias propias de la matriz de impedancias de barra son  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$ ,  $Z_{33}$ , y  $Z_{44}$ . Ninguna rama tiene flujo de corriente cuando el interruptor S está abierto. Cuando S se cierra, la corriente fluye solamente hacia el nodo 2. Se interpretaran los corchetes para significar que la corriente  $I''_f$  hacia el nodo 2 en el circuito induce caídas de tensión de  $I''_f Z_{12}$ ,  $I''_f Z_{32}$  y  $I''_f Z_{42}$  en las ramas conectadas a los nodos 1, 3, y 4 respectivamente. Estas caídas de tensión están en la dirección de los nodos respectivos.

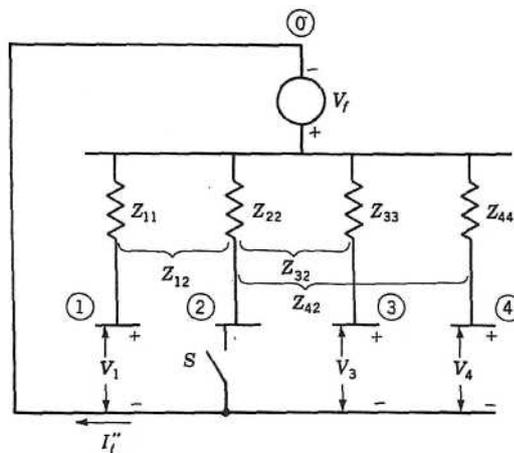


Fig. 6 Red equivalente a la matriz de impedancias de barra con cuatro nodos independientes. Al cerrar el interruptor S se simula un fallo en el nodo 2. Solamente se indican las admitancias mutuas para el nodo 2.

Si en el circuito de la fig. 6 se abre el interruptor S, todos los nodos estarán en la tensión  $V_f$ , como en la fig. 5 si  $E''_A$ ,  $E''_B$ , y  $E''_C$  son iguales a  $V_f$ . Si S está abierto, un examen del circuito muestra que las tensiones, en los cuatro nodos con respecto al nodo 0 de referencia, están a los valores especificados por las ecs. (15). Por tanto, sí se interpretan las impedancias mutuas indicadas para este circuito como se describen anteriormente, el circuito es el equivalente al de la fig. 5 con el interruptor S abierto y el de la fig. 6 con S

cerrado, aun despreciando la corriente pre-fallo.

Claro está que se pueden simular cortocircuitos en las otras barras de una forma similar y extender la aproximación a un circuito general con cualquier número de nodos. Se puede indicar las otras impedancias mutuas del circuito equivalente por medio de corchetes adicionales y no hacerlo tan solo para una, pero se presentan confusiones al tener tantos corchetes para indicar las impedancias mutuas. De hecho, por lo general se omitiran los corchetes cuando se dibuje el circuito para la matriz de impedancias de barra, pero hay que darse cuenta de que la impedancia mutua existe y debe considerarse al interpretar el circuito.

**EJEMPLO 2.** Determina la matriz de impedancias de barra para el circuito del ej. 8.1 para el cual los resultados de un estudio de flujo de cargas se indican en la fig. 8.2. Incluya las reactancias subtransitorias de los generadores. Encuentre la corriente subtransitoria en un fallo trifásico en la barra 2 y la corriente proveniente de la barra afectada sobre cada línea. La corriente pre-fallo se ignora y todas las tensiones se suponen 1.0 antes de que el fallo ocurra. Los generadores en las barras 1 y 3 tienen valores nominales de 75 y 125 MVA, respectivamente. La reactancia subtransitoria de cada generador basada en su propio valor nominal es 0,15 por unidad. La base del sistema es 100 MVA. Ignore todas las resistencias.

**Solución.** Las reactancias subtransitorias del generador convertidas a la base de 100 MVA son:

$$\text{Generador en barra 1: } X''_d = 0.15 \times \frac{100}{75} = 0.20 \text{ por unidad}$$

$$\text{Generador en barra 3: } X''_d = 0.15 \times \frac{100}{125} = 0.12 \text{ por unidad}$$

La red con las admitancias indicadas en por unidad se muestra en la fig. 6, para el cual la matriz de nodos de admitancia es

$$Y_{\text{barra}} = j \begin{bmatrix} -14.17 & 2.5 & 0.0 & 1.67 & 5.0 \\ 2.5 & -10.0 & 5.0 & 2.5 & 0.0 \\ 0.0 & 5.0 & -18.33 & 0.0 & 5.0 \\ 1.67 & 2.5 & 0.0 & -4.17 & 0.0 \\ 5.0 & 0.0 & 5.0 & 0.0 & -10.0 \end{bmatrix}$$

Esta matriz de 5 x 5 se invierte en un computador digital para encontrar la matriz de cortocircuito

$$Z_{\text{barra}} = j \begin{bmatrix} 0.1258 & 0.0780 & 0.0445 & 0.0972 & 0.0852 \\ 0.0780 & 0.1928 & 0.0732 & 0.1468 & 0.0756 \\ 0.0445 & 0.0732 & 0.0933 & 0.0617 & 0.0689 \\ 0.0972 & 0.1468 & 0.0617 & 0.3668 & 0.0794 \\ 0.0852 & 0.0756 & 0.0689 & 0.0794 & 0.1770 \end{bmatrix}$$

La visualización de un circuito como el de la fig. 6 nos ayuda a encontrar las corrientes y tensiones deseadas.

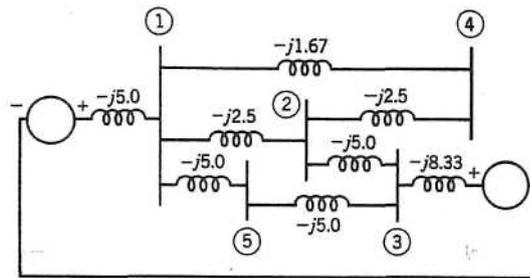


Fig. 6 Diagrama de reactancias para el ej. 4.

La corriente subtransitoria en una falla trifásica sobre la barra 2 es en las barras 1, 3 y 4 las tensiones en por unidad son

$$V_1 = 1.0 - (-j5.187) (j0.0780) = 0.595 \text{ por unidad}$$

$$V_3 = 1.0 - (-j5.187) (j0.0732) = 0.620 \text{ por unidad}$$

$$V_4 = 1.0 - (-j5.187) (j0.1468) = 0.239 \text{ por unidad}$$

las corrientes hacia la falla en por unidad son:

$$\text{Desde la barra 1: } 0.595(-j2.5) = -j1.488$$

$$\text{Desde la barra 3: } 0.620(-j5.0) = -j3.100$$

$$\text{Desde la barra 4: } 0.239(-j2.5) = -j0.598$$

$$-j5.186 \text{ por unidad}$$

Con la misma matriz de cortocircuito se puede encontrar información similar para los fallos sobre cualquiera de las otras barras.

## EJEMPLO DE SELECCIÓN DE INTERRUPTORES

La corriente subtransitoria a la cual se ha dedicado mucho de nuestra atención es la corriente inicial simétrica y no incluye la componente c.c. Como se ha visto, la inclusión de la componente c.c. resulta de un valor de corriente eficaz inmediatamente después del fallo, el cual es mayor que la corriente subtransitoria. Para interruptores en aceite por encima de 5 kV la corriente subtransitoria multiplicada por 1.6 se considera como el valor eficaz de la corriente que hace saltar el interruptor y que debe soportar durante el primer ciclo después que el fallo ocurre. Esta corriente se denomina comente momentánea, y por muchos años los interruptores se especificaron por su corriente momentánea como cualquier otro criterio.

Los valores de un interruptor se especificaban en kVA o MVA. Los kVA de interrupción son iguales a  $\sqrt{3}$  veces los kV de la barra a los cuales el interruptor está conectado por la corriente que el interruptor debe ser capaz de manejar cuando sus contactos se reparan. Esta corriente es, por supuesto, menos que la corriente momentánea y depende de la velocidad del interruptor tal como 8.5; 3 ó  $1^{1/2}$  ciclos, lo cual es una medida del tiempo desde que ocurre el fallo hasta que se extingue el arco.

Se han realizado varios estudios sobre características y aplicaciones de los interruptores. La comente que un interruptor debe suspender es generalmente asimétrica, pues todavía contiene alguna componente c.c. descendente. El plan de especificaciones preferidas para un interruptor c. a. de alto voltaje en aceite establece los valores nominales de la corriente de interrupción de los interruptores en términos de la componente de la corriente asimétrica, la cual es simétrica alrededor del eje cero. Esta corriente apropiadamente se llama capacidad requerida de interrupción simétrica o simplemente corriente nominal simétrica de corto circuito.

A menudo se omite el adjetivo "simétrica". Los nuevos planes de especificaciones están de acuerdo con la base de corriente simétrica de las especificaciones de los interruptores S, comparados con el plan de especificación anterior el cual tiene en cuenta la corriente total (incluye la porción c. c.). La principal diferencia es que en muchos casos el nuevo método de especificación asegura que el interruptor seleccionado sobre la base de

corriente simétrica a interrumpirse es capaz de interrumpir la corriente asimétrica existente y de resistir la corriente momentánea.

Los interruptores se identifican, por la clase de voltaje nominal tal como 69 kV. Entre otros factores especificados están la corriente continua nominal, el voltaje máximo nominal, el factor de intervalo de voltaje K y la corriente de cortocircuito nominal a un máximo de kilovatios establecidos; K determina el intervalo de voltajes, sobre el cual es constante la corriente de cortocircuito nominal por el voltaje de operación. Para un interruptor de 69 kV que tiene un máximo especificado de 72,5 kV, un factor K de intervalo de voltaje de 1,21 y una corriente continua nominal de 1200 A, la corriente nominal de corto circuito a voltaje máximo (corriente simétrica, que puede ser interrumpida a 72,5 kV) es 19000 A. Esto significa que el producto 72,5 x 19000 es el valor constante de la corriente nominal de cortocircuito por el voltaje de operación en el intervalo de 72,5 a 60 kV puesto que  $72,5/1,25 = 60$ . La corriente nominal de cortocircuito a 60 kV es  $19000 \times 1,21$  ó 23000 A. A menores tensiones de operación esta corriente de cortocircuito no debe excederse. A 69 kV la corriente nominal de cortocircuito es:

$$\frac{72.5}{69} \times 19\ 000 = 20\ 000\ \text{A}$$

Interruptores del tipo de 115 kV y mayores tienen un K de 1,0.

Un procedimiento simplificado para calcular la corriente simétrica de cortocircuito, es el llamado método E/X, obviando todas las resistencias, todas las cargas estáticas y todas las corrientes de pre-fallo. La reactancia subtransitoria se usa para los generadores en el método E/X, y para motores sincrónicos la reactancia recomendada es  $X''_d$  del motor por 1,5 lo que es aproximadamente el valor de la reactancia transitoria del motor. Los motores de inducción por debajo de 50 CV no se consideran, y varios factores de multiplicación se aplican a  $X''_d$  de grandes motores de inducción dependiendo de su tamaño. Si no hay motores presentes, la corriente simétrica de corto circuito es igual a la corriente subtransitoria.

La impedancia por la cual debe dividirse el voltaje  $V_f$  para encontrar la corriente de corto circuito debe examinarse cuando se usa el método E/X. En la especificación de un

interruptor para una barra  $K$  esta impedancia  $Z_{kk}$  de la matriz de impedancias de barra con las reactancias de máquina adecuadas donde la corriente de corto circuito está indicada por la ec. (6). Si la razón  $X/R$  de esta impedancia es 15 ó menos, un interruptor de tensión y kVA correctos puede usarse si la especificación de la corriente de interrupción iguala o excede la corriente calculada. Si la razón  $X/R$  no se conoce, la corriente calculada no debe ser mayor al 80% del valor permitido para el interruptor en la barra de tensión existente. La guía de aplicación de la ANSI establece un método para c. a. y c. c. que tiene en cuenta las constantes de tiempo para el decaimiento de la amplitud de corriente si la razón  $X/R$  pasa de 15. El método correcto también considerala velocidad del interruptor.

Este estudio de la selección de los interruptores se presenta no como un estudio de la aplicación de interruptores sino como una manera de indicar la importancia de entender los cálculos de los fallos. El siguiente ejemplo debe clarificar el principio.

**EJEMPLO 3.** Un generador de 25000 kVA a 13,8 kV, con  $X''_d = 15\%$  está conectado a través de un transformador que alimenta cuatro motores idénticos, como se representa en la fig. 7. Cada motor tiene  $X''_d = 20\%$  y  $X'_d = 30\%$  sobre una base de 5000 kVA y 6,9 kV. Los valores trifásicos de régimen del transformador son 25000 kVA, 13,8-6,9 kV, con una reactancia de dispersión del 10%. La tensión en la barra de los motores es de 6,9 kV al producirse un fallo trifásico en el punto  $P$ . Para el fallo especificado determine

- (a). la corriente subtransitoria en el fallo,
- (b) la corriente subtransitoria en el interruptor  $A$ , y
- (c) la corriente simétrica de cortocircuito (como se define para aplicaciones de interruptores) en el fallo en el interruptor  $A$ .

**Solución**

(a) Para una base de 25000 kVA, 13,8 kV en el circuito del generador, los valores base para los motores son 25000 kVA, 6,9 kV. La reactancia subtransitoria de cada motor es:

$$X''_d = 0.20 \frac{25\ 000}{5\ 000} = 1.0 \text{ por unidad}$$

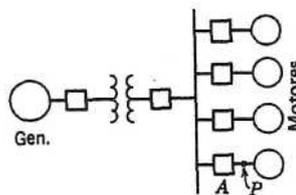


Fig. 7 Diagrama unifilar para el ej. 5.

La fig. 8, es el diagrama de valores subtransitorios de las reactancias.

Para un fallo en  $P$ ,

$$V_f = -1.0 \text{ por unidad}$$

$$Z_{th} = j\ 0.125 \text{ por unidad}$$

$$I''_f = \frac{1.0}{j0.125} = -j8.0 \text{ por unidad}$$

La corriente básica en el circuito a 6.9 kV, es

$$\frac{25\ 000}{\sqrt{3} \times 6.9} = 2\ 090 \text{ A}$$

$$I''_f = 8 \times 2090 = 16720 \text{ A}$$

b) A través del disyuntor  $A$  pasa la contribución del generador y tres de los cuatro

motores.

El generador contribuye con una corriente de

$$-j8.0 \times \frac{0.25}{0.50} = -j4.0 \text{ por unidad}$$

Cada motor aporta el 25% de la restante corriente de fallo o -j 1,0 A por unidad.

A través del interruptor A:

$$I'' = -j4.0 + 3(-j1.0) = -j7.0 \text{ por unidad}$$

$$|I''| = 7 \times 2090 = 14630 \text{ A}$$

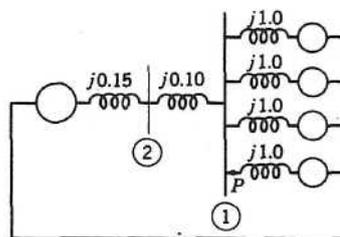


Fig. 8 Diagrama de reactancias para el ej. 5.

(c) Para calcular la corriente a interrumpir, hay que reemplazar la reactancia subtransitoria de j1,0 por la transitoria de j1,5 en los circuitos de los motores en la fig. 8.

Entonces

$$Z_{th} = j \frac{0.375 \times 0.25}{0.375 + 0.25} = j0.15 \text{ por unidad}$$

El generador aporta una corriente de:

$$\frac{1.0}{j0.15} \times \frac{0.375}{0.625} = -j4.0 \text{ por unidad}$$

Cada motor aporta una corriente:

$$\frac{1}{4} \times \frac{1.0}{j0.15} \times \frac{0.25}{0.625} = -j0.67 \text{ por unidad}$$

La corriente simétrica de corto circuito que debe ser interrumpida es:

$$(4,0 + 3 \times 0,67) \times 2090 = 12560 \text{ A}$$

El procedimiento común es referir todos los interruptores conectados a una barra sobre una base de corriente en una falla sobre la barra. En tal caso, las especificaciones de interrupción para la corriente de cortocircuito de los interruptores conectados a la barra de 6.9 kV debe ser al menos

$$4 + 4 \times 0.67 = 6.67 \text{ por unidad}$$

ó

$$6.67 \times 2090 = 13940 \text{ A}$$

Un interruptor de 14.4 kV tiene un voltaje nominal máximo de 15.5 kV y un  $K$  de 2.67. A 15.5 kV su corriente nominal de interrupción de cortocircuito es de  $2.67 \times 8900 = 23760 \text{ A}$ , a una tensión de  $15.5/2.67 = 5.8 \text{ kV}$ . Esta corriente es la máxima que puede interrumpirse aun considerando que el interruptor puede estar en un circuito de menor tensión. La especificación para interrupción de corriente de cortocircuito a 6.9 kV e

$$\frac{15.5}{6.9} \times 8900 = 20000 \text{ A}$$

La capacidad requerida de 13940 A está por debajo del 80% de 20000 A y el interruptor es apropiado con respecto a la corriente de cortocircuito.

La corriente de cortocircuito se puede encontrar usando la matriz de impedancias de barra. Para este propósito se han identificado dos nodos en la fig. 8. El nodo 1 es la barra en el lado de baja tensión del transformador, y el nodo 2 está en el lado de alta tensión. Para una reactancia del motor de 1.5 por unidad

$$Y_{11} = -j10 + \frac{1}{j1.5/4} = -j12.67$$

$$Y_{12} = j10$$

$$Y_{22} = -j10 - j6.67 = -j16.67$$

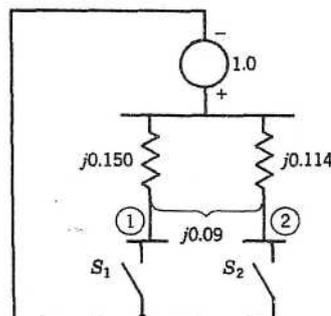


Fig. 8 Red equivalente a la impedancia de la barra para la matriz de impedancias de la barra del ej. 5.

La matriz nodal de admitancia es

$$Y_{\text{barra}} = j \begin{bmatrix} -12.67 & 10.0 \\ 10.0 & -16.67 \end{bmatrix}$$

y su inversa es

$$Z_{\text{barra}} = j \begin{bmatrix} 0.150 & 0.090 \\ 0.090 & 0.114 \end{bmatrix}$$

La fig. 9 es el circuito correspondiente a la matriz de impedancias de barra. Cerrando  $S_1$  con  $S_2$  abierto se representa un fallo sobre la barra 1.

La corriente simétrica de interrupción de cortocircuito en un fallo trifásico sobre el nodo 1 es

$$I_{sc} = \frac{1.0}{j0.15} = -j6.67 \text{ por unidad}$$

lo cual concuerda con nuestros cálculos anteriores. La matriz de impedancias de barra también nos da la tensión en la barra 2 con una falla sobre la barra 1.

$$V_2 = 1.0 - I_{sc} Z_{21} = 1.0 - (-j6.67)(j0.09) = 0.4$$

y, puesto que la admitancia entre los nodos 1 y 2 es  $-j10$ , la corriente en el fallo desde el transformador es

$$(0.4 - 0.0)(-j10) = -j4.0 \text{ por unidad}$$

lo cual también está de acuerdo con el resultado anterior.

También se conoce inmediatamente la corriente de cortocircuito en un fallo trifásico en el nodo 2, que, referida a la fig. 9 con  $S_1$  abierto y  $S_2$  cerrado es

$$I_{sc} = \frac{1.0}{j0.114} = -j8.77 \text{ por unidad}$$

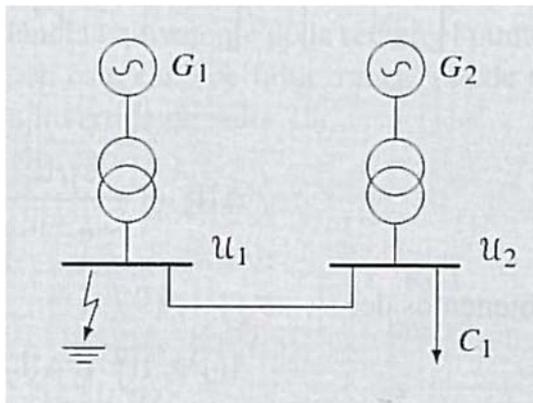
Aun cuando este ejemplo es simple, ilustra el valor de la matriz de impedancias de barra donde los efectos de un fallo en un número de barra van a ser estudiados. La inversión de la matriz no es necesaria como se indica en la sección 7.11;  $Z_{\text{barra}}$  puede generarse directamente por un computador.

**EJEMPLO 4**<sup>1</sup>. En el sistema de la figura se sabe que se produce un cortocircuito simétrico en la barra 1 y los datos del sistema con magnitudes p.u. correspondientes a la potencia base de 300 MVA, son las siguientes:

Generadores	300 MVA	$X''_d = 0,08j$ p.u.
Transformadores	300 MVA	$X = 0,12j$ p.u.
Línea	Sin pérdidas	$X_L = 0,20j$ p.u.
Carga 1	Resistiva	$R_1 = 2,00$ p.u.

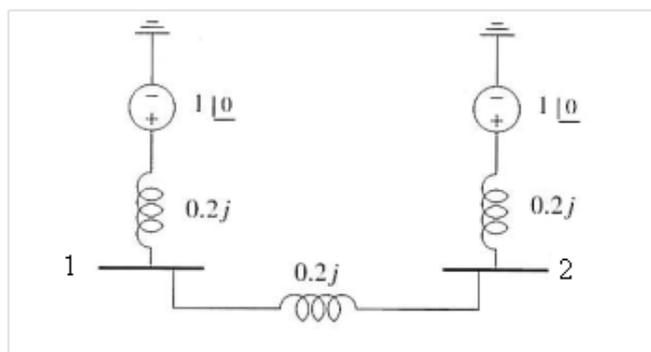
Se sabe, igualmente, que las fuentes con las que se modelan los dos generadores tienen tensiones de  $1\angle 0$  p.u.

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



**Resolución**

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

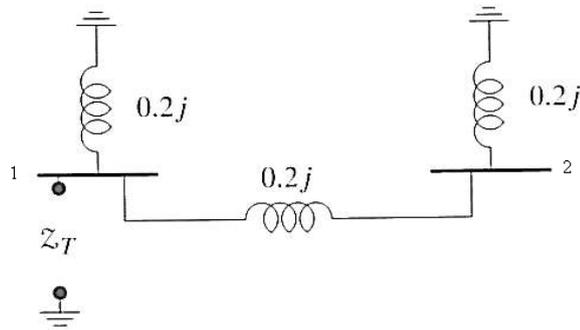


Se calcula en primer lugar el equivalente Thevenin del sistema en el punto del fallo.

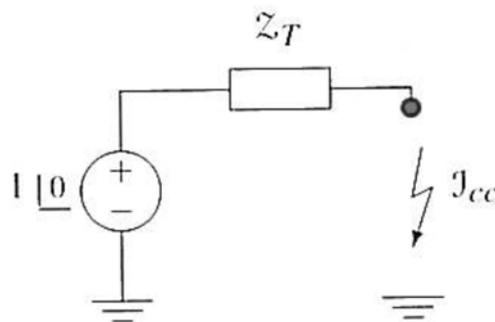
<sup>1</sup> Sistemas de Potencia.- Expósito

Se utiliza la figura siguiente, que corresponde al sistema en el que se han anulado las fuentes de tensión (modelo incremental). Basándose en ella se obtiene:

$$z_T = \frac{0,2j \cdot 0,4j}{0,2j + 0,4j} = 0,1333j$$



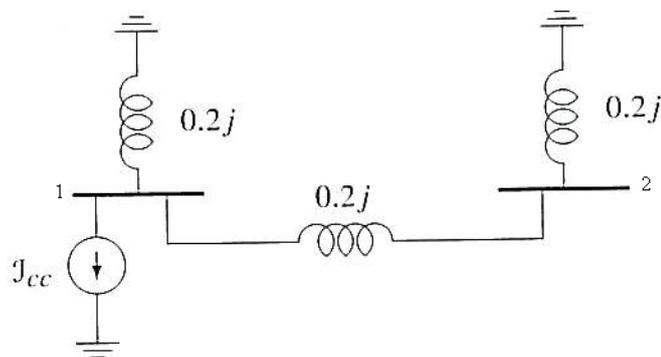
Dicho valor  $z_T$  es el que debe considerarse en el equivalente de la figura siguiente:



Por tanto, la intensidad de corto vale:

$$I_{cc} = \frac{1}{z_T} = -7,5j = 7,5[-90]$$

En el circuito resultante de la figura siguiente (sistema con los elementos pasivos y fallo sustituido por una fuente de intensidad) permite obtener la contribución de cada generador al cortocircuito:



Aplicando la expresión del divisor de intensidades:

$$I_1 = \frac{\frac{1}{0,2j}}{\frac{1}{0,2j} + \frac{1}{0,4j}} I_{cc} = 5,0[-90] p. u.$$

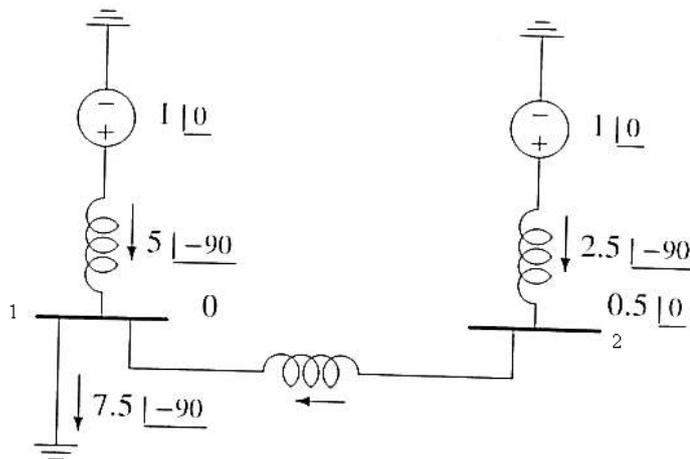
$$I_2 = \frac{\frac{1}{0,4j}}{\frac{1}{0,2j} + \frac{1}{0,4j}} I_{cc} = 2,5[-90] p. u.$$

Las tensiones se obtienen de manera inmediata:

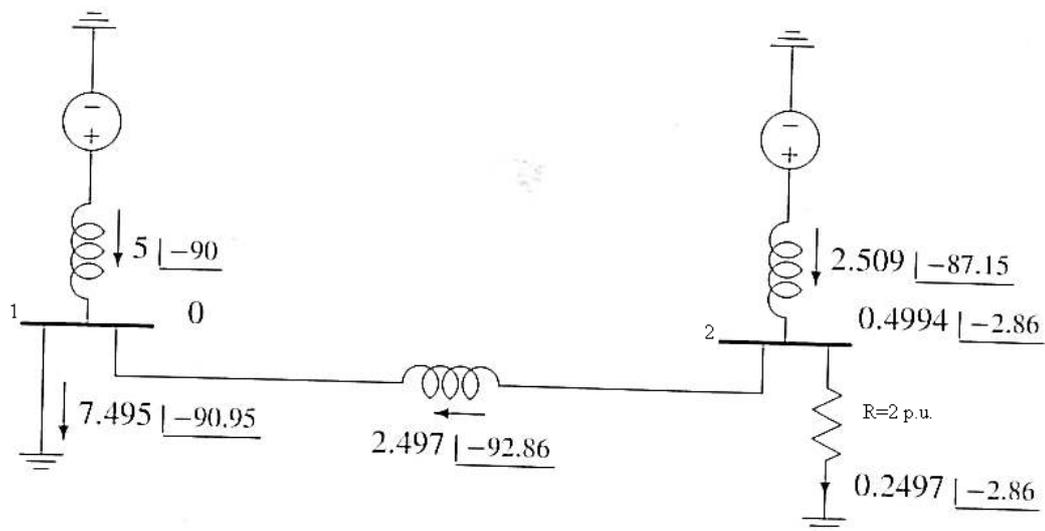
$$\Delta U_1 = -0,2j I_1 = -1,0 p. u.$$

$$\Delta U_2 = -0,2j I_2 = -0,5 p. u.$$

El estado resultante, ignorando el estado de carga previo al fallo, es el que se muestra en la figura:



En la siguiente figura se muestra el resultado si se modela la carga como una resistencia. Se observa como la variación del resultado es mínima:



### EJEMPLOS ADICIONALES

1.- Una tensión alterna de 60 ciclos con un valor eficaz de 100 voltios se aplica a un circuito RL, cerrando un interruptor. La resistencia es de 10 ohmios y la inductancia de 0,1 henrios.

- Determinar el valor de la componente continua de la corriente al cerrar el interruptor si el valor instantáneo de la tensión es de 50 voltios en ese momento.
- ¿Cuál es el valor instantáneo de la tensión que producirá una componente continua máxima de corriente al cerrar el circuito?
- ¿Cuál es el valor instantáneo de la tensión que dará lugar a que no exista componente continua de corriente al cerrar el interruptor?
- Si el interruptor se cierra, cuando el valor instantáneo de la tensión es cero, determinar la corriente instantánea 0.5, 1.5 y 5.5 ciclos después.

2.- Un generador conectado, a través de un disyuntor de 5 ciclos, a un transformador tiene como valores nominales 7500 kVA y 6.9 kV con reactancias  $X''_d = 9\%$ ,  $X'_d = 15\%$  y  $X_d = 100\%$ . Está funcionando sin carga y a la tensión nominal en el momento de producirse un cortocircuito trifásico entre el disyuntor y el transformador. Determinar:

- (a) la corriente permanente de cortocircuito en el disyuntor,
- (b) la corriente eficaz simétrica inicial en el disyuntor,
- (c) la componente continua máxima posible de la corriente de cortocircuito en el disyuntor.

3.- El transformador trifásico conectado al generador descrito en el Prob. 2, tiene los valores nominales siguientes: 7500 kVA, 6.9 $\Delta$ -115Y kV,  $X = 10\%$ . Si se produce un cortocircuito trifásico en el lado de alta tensión del transformador a la tensión nominal y sin carga, determinar:

- (a) la corriente eficaz simétrica inicial en los arrollamientos de alta del transformador,
- (b) la corriente eficaz simétrica en la línea en el lado de baja tensión.

4.- Un generador de 60 ciclos y potencia nominal de 625 kVA a 480 V, con  $X''_d = 0.08$  por unidad, suministra una carga puramente resistiva de 500 kW a 480 V. La carga

está conectada directamente a los terminales del generador. Si se cortocircuitan simultáneamente las tres fases de la carga, determinar la corriente eficaz simétrica inicial en el generador en por unidad sobre una base de 625 kVA y 480 V.

5.- Un generador se conecta á través de un transformador a un motor síncrono. Reducidas a la misma base, las reactancias subtransitorias, por unidad, del generador y el motor son 0,15 y 0,35 respectivamente, y la reactancia de pérdida del transformador es de 0.10 por unidad. En los terminales del motor se produce un fallo trifásico cuando la tensión en los terminales del generador es de 0.9 por unidad y la corriente de salida del generador es de 1.0 por unidad con un factor de potencia en adelanto de 0.8. Determinar la corriente subtransitoria, en por unidad, en el fallo, en el generador y en el motor. Utilizar la tensión terminal en el generador como vector de referencia y obtener la solución:

(a) calculando las tensiones detrás de la reactancia subtransitoria en el generador y el motor, y

(b) utilizando el teorema de Thévenin.