

2 años. 2+

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

**CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA APLICANDO
UN COMPUTADOR DIGITAL**

**TRABAJO ESCRITO
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
PRESENTA**

JAVIER COSIO TENORIO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

CAPITULO 1

INTRODUCCION AL ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

- 1.1 *Desarrollo de los Sistemas de Potencia.*
- 1.2 *Estudio de Carga.*
- 1.3 *Estudio de Estabilidad.*
- 1.4 *Cálculo de Fallas.*

CAPITULO 2

ANALISIS DE LA MATRIZ Zbus

- 2.1 *Descripción de la Matriz Zbus.*
- 2.2 *Algoritmo para la obtención de Zbus.*

CAPITULO 3

ANALISIS DE CORTO CIRCUITO DE UN SISTEMA TRIFASICO

- 3.1 *Falla Trifásica a Tierra.*
- 3.2 *Falla de Una Fase a Tierra.*

CAPITULO 4

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL USO DE COMPUTADORES DIGITALES EN PROBLEMAS DE INGENIERIA

- 4.1 *Conceptos Generales sobre Computadores Digitales.*
- 4.2 *Orientación de los Computadores Digitales hacia Problemas de Ingeniería.*

CAPITULO 5

ANALISIS POR COMPUTACION DEL PROBLEMA A RESOLVER

- 5.1 *Descripción del Programa.*
- 5.2 *Ejemplo Ilustrativo.*

CAPITULO 1

INTRODUCCION AL ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

1.1 DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos para convertir, transportar y distribuir energía eléctrica; estos elementos son: las fuentes de energía, la planta generadora, las líneas de transmisión, los sistemas de distribución y las cargas. Las líneas de transmisión son el enlace entre la estación generadora y los sistemas de distribución, siendo estos últimos quienes conectan todas las cargas individuales de una determinada área a la línea de transmisión.

La ubicación de una planta hidroeléctrica esta determinada por la presencia de energía hidráulica, no siendo este el caso de las plantas térmicas, las cuales están generalmente situadas cerca de un centro de carga grande, por lo que, generalmente, las plantas hidroeléctricas requieren de líneas de transmisión largas, y las plantas térmicas requieren de líneas de transmisión cortas.

Para transmitir energía eléctrica económicamente, a una distancia considerablemente grande, es necesario que el voltaje sea alto, y un voltaje alto se obtiene fácilmente con corriente alterna. Un voltaje de 20,000 volts, puede ser generado directamente, y para voltajes mayores es conveniente usar transformadores, ya que es difícil aislar los generadores para estos voltajes. El voltaje de transmisión es generalmente muy alto para usos comerciales, así que para su distribución debe ser reducido al valor deseado por medio de transformadores.

El desarrollo de los sistemas de corriente alterna se inició en Estados Unidos en 1885, cuando George Westinghouse compró las patentes sobre sistemas de transmisión de corriente alterna desarrollados por L. Gauland y J. D. Gibbs de Francia. En esa época, William Stanley, socio de Westinghouse, experimentó con transformadores en su laboratorio en Great Barrington, Massachusetts, de manera que en el invierno de 1885-86, Stanley pudo instalar el primer sistema de distribución experimental de corriente alterna, el cual suministraba energía a 150 lámparas de la ciudad. La primera línea de transmisión en Estados Unidos fué puesta en operación en 1890, y transportaba energía eléctrica generada por una planta hidráulica a una distancia de 13 millas de Willamette Falls a Portland, Oregon.

La primera línea de transmisión fué monofásica, y la energía fué usada para alumbrado. En mayo de 1888, Nikola Tesla presentó los planos del motor de inducción de dos fases y el motor síncrono. Las ventajas de los motores polifásicos fueron apreciados inmediatamente, y un sistema de distribución de dos fases de corriente alterna fué mostrado al público en la Exposición de Chicago de 1893. A partir de entonces la transmisión de energía eléctrica por medio de corriente alterna, especialmente corriente alterna trifásica, reemplazó gradualmente a los sistemas de corriente directa.

Una de las razones de la rápida aceptación de los sistemas de corriente alterna, fué el transformador, el cual hace posible la transmisión de energía eléctrica a un voltaje mayor que el voltaje de generación ó al voltaje de utilización. Un voltaje más alto de transmisión requiere menos corriente de línea para la transmisión de una determinada cantidad de potencia, y por lo tanto, resultan menores las pérdidas $I^2 R$, en la línea. Además un generador de corriente alterna es un dispositivo más simple que un generador de corriente directa, lo que resulta una ventaja adicional de los sistemas de corriente alterna.

Hasta 1917, los sistemas eléctricos eran operados como unidades individuales, pero la demanda de grandes cantidades de potencia, y la necesidad de aumentar la seguridad en los sistemas, sugirió la interconexión de sistemas vecinos. La interconexión de sistemas tiene ventajas económicas debido a que se requiere un menor número de máquinas de reserva para operar en los picos de carga y se requieren menos máquinas corriendo sin carga para tomar un aumento no esperado de carga.

La planeación de la operación, el mejoramiento y la expansión de los sistemas de potencia requiere estudios de carga, de cálculo de fallas y de estudios de estabilidad. Tanto los computadores analógicos, como los computadores digitales son de un gran valor para resolver los problemas que he mencionado, habiendo hecho los computadores una gran contribución a la planeación y operación de sistemas de potencia.

1.2 ESTUDIO DE CARGA

El estudio de carga es la determinación de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia, en varios puntos de una red eléctrica, bajo condiciones reales ó supuestas, en operación balanceada. Los estudios de carga son esenciales en la planeación del desarrollo futuro del sistema, debido a que la operación satisfactoria del sistema depende del conocimiento de los efectos de interconexiones con otros sistemas de potencia, de nuevas cargas, nuevas plantas generadoras y nuevas líneas de transmisión, antes de que estas sean instaladas.

El cálculo manual de los efectos de los cambios en un sistema complejo son tan tediosos y llevan tanto tiempo, que es necesario un analizador de redes de corriente alterna, ó un computador digital.

Desde 1929 los analizadores de redes de corriente alterna han sido usados por ingenieros para hacer estudios de carga. Actualmente, los computadores digitales son usados para hacer tales estudios en los sistemas grandes, y aún cuando todavía se usan los analizadores, las necesidades futuras serán resueltas totalmente por medio de computadores digitales.

Un analizador de redes de corriente alterna, es una réplica a escala del sistema real. Consiste de un número determinado de fuentes de voltaje de corriente alterna, las cuales pueden ser ajustadas en magnitud y fase y un número de resistencias, inductancias y capacitancias, todas ellas ajustables. Las fuentes de voltaje y los elementos de circuito pueden ser conectadas para representar la red real por medio de sus circuitos equivalentes a una escala conveniente. Las medidas tomadas en el analizador se pueden convertir fácilmente por medio de factores de multiplicación a los valores que existirán en la red real, ó estos pueden ser leídos directamente en escalas convenientes graduadas del analizador.

Los computadores digitales proporcionan la misma información que se obtiene de los analizadores. Los computadores digitales ejecutan sumas, restas, multiplicaciones y divisiones con los datos de entrada de acuerdo a un programa que es leído en la máquina para un problema

particular. Las respuestas se imprimen cuando el problema esta resuelto, y además se pueden obtener resultados parciales durante el proceso, para indicar el avance realizado hacia la solución final.

El Ingeniero debe formular las ecuaciones que se aplican al problema que va a ser resuelto en el computador y deberán ser preparadas las instrucciones para hacer que la máquina ejecute en la secuencia correcta y paso a paso las operaciones necesarias para obtener la solución.

Al cambiar los datos suministrados a un computador programado para ejecutar un estudio de carga, o alternando las conexiones en un analizador de redes, se puede determinar el efecto de cualquier cambio en el sistema. Por ejemplo, los capacitores se conectan a menudo en paralelo a la carga ó en varios puntos a lo largo de una línea, con el objeto de mejorar el factor de potencia y por lo tanto disminuir la componente reactiva de la corriente que circula en una carga que tenga un factor de potencia atrasado. La instalación del capacitor del tamaño adecuado, aumentará el voltaje en esa parte del sistema durante los períodos de baja carga, en caso de no contar con los dispositivos de control adecuados.

Los estudios de carga efectuados en un computador digital, son valiosos para planear adiciones a un sistema y para determinar el mejor procedimiento de operación del sistema.

1.3 ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD

La corriente que circula en un generador de corriente alterna, o en un motor síncrono, depende de la magnitud de su voltaje interno, del ángulo de fase de su voltaje interno con respecto al ángulo de fase del voltaje interno de cada una de las otras máquinas conectadas en el sistema y de las características de la red y de las cargas. Por ejemplo, en dos generadores de corriente alterna conectados en paralelo y sin ninguna conexión externa entre ellos, excepto su circuito en paralelo, no circulará entre ellos ninguna corriente, si sus voltajes internos son iguales en magnitud y fase. Si sus voltajes internos son iguales en magnitud pero de diferente ángulo de fase, la diferencia de sus voltajes no será cero, y una corriente circulará, determinada por la diferencia de voltajes y la impedancia del circuito. Una máquina suministrará potencia a la otra, la cual trabajará como motor, en lugar de trabajar como generador.

Los ángulos de fase de los voltajes internos dependen de la posición de los rotores de las máquinas. Si no se mantuviera el sincronismo entre los generadores de un sistema de potencia, los ángulos de fase de sus voltajes internos estarían cambiando constantemente, uno con respecto al otro, y sería imposible una operación satisfactoria del sistema.

Los ángulos de fase de los voltajes internos de las máquinas síncronas permanecen constantes siempre que las velocidades de las máquinas permanezcan constantes a la velocidad que corresponda a la frecuencia de operación del sistema.

Cuando la carga de un generador, ó la carga del sistema completo cambia, la corriente en el generador ó a través del sistema cambiará. Si el cambio en corriente no resulta en un cambio en magnitud de los voltajes internos de las máquinas, los ángulos de fase de los voltajes internos deben cambiar. De manera que, se necesitan cambios momentáneos en velocidad para obtener un ajuste en los ángulos de fase de los voltajes, uno con respecto a otros, puesto que los ángulos de fase son determinados por la posición relativa de los rotores.

Si alguna máquina no permanece en sincronismo con el resto del sistema, resultarán grandes corrientes circulantes, y si se tiene un diseño adecuado del sistema, la operación de relevadores e interruptores desconectarán esa máquina del sistema. En resumen, el problema de estabilidad, es el problema de mantener la operación síncrona de los generadores y motores del sistema.

Los estudios de estabilidad están clasificados según si ellos involucran condiciones uniformes ó condiciones transitorias.

Hay un límite definido de la cantidad de potencia que un generador de corriente alterna es capaz de generar y la cantidad de carga que un motor es capaz de llevar. Se presentan problemas de estabilidad al intentar aumentar la entrada mecánica a un generador ó la carga mecánica a un motor, más allá de la cantidad definida de potencia llamada 'límite de estabilidad'.

Un valor límite de potencia se alcanza, aún si el aumento se hace gradualmente. Al presentarse disturbios en un sistema causados por aplicación repentina de carga por ocurrir fallas en el sistema, por la pérdida de excitación en el campo de un generador, pueden causar la pérdida del sincronismo, aún cuando el cambio en el sistema, causado por el disturbio no exceda el límite de estabilidad.

El valor límite de potencia es llamado "límite de estabilidad transitorio" ó "límite de estabilidad uniforme", de acuerdo si el punto de inestabilidad es alcanzado por un cambio en las condiciones del sistema repentino o gradual.

Afortunadamente se han encontrado métodos de mejorar la estabilidad y de predecir los límites de operación estable, ya sea bajo condiciones uniformes ó bajo condiciones transitorias. El estudio de estabilidad de un sistema de dos máquinas es menos complejo que el

estudio de sistemas con varias máquinas, y la mayoría de los métodos para mejorar la estabilidad en un sistema pueden ser estudiados al analizar un sistema de dos máquinas.

Tanto los computadores digitales como los analizadores de redes de corriente alterna, son usados ventajosamente en predecir los límites de estabilidad de un sistema complejo.

1.4 CALCULO DE FALLAS

El American Institute of American Engineers, define una falla en un conductor eléctrico como sigue: Una falla en un conductor es una falla parcial ó total en el aislamiento ó continuidad de un conductor.

La mayoría de las fallas en las líneas de transmisión de 115 KV y de voltajes mayores, son causados por rayos, los cuales producen un arco en los aisladores. El alto voltaje entre un conductor y la torre que lo soporta, causa la ionización, la cual da una trayectoria a tierra para la carga inducida por el rayo. Una vez que la trayectoria se establece, la baja impedancia resultante a tierra, permite el flujo de corriente desde el conductor a tierra y a través de tierra al neutro del transformador ó generador conectado a tierra, cerrándose así el circuito.

Al abrirse los interruptores para aislar la parte de la línea afectada por la falla, del resto del sistema, se interrumpe el flujo de corriente en la trayectoria ionizada y permite la desionización. Después de un intervalo de 20 ciclos aproximadamente para permitir la desionización, los interruptores pueden cerrarse sin que se restablezca el arco.

Las fallas permanentes de línea a tierra, son causadas por cadenas de aisladores contaminados o dañados, por daños permanentes en las torres y por fallas en los pararrayos.

La experiencia ha mostrado que entre el 70 y 80 por ciento de las fallas en líneas de transmisión, son fallas monofásicas a tierra. El menor número de fallas involucran todas las fases y son llamadas fallas trifásicas.

Otros tipos de fallas que se presentan en las líneas de transmisión son fallas de línea a línea y falla de doble línea a tierra. Todas las fallas anteriores, excepto las fallas trifásicas son fallas no simétricas y causan un desbalance entre las fases.

La corriente que circula en un sistema de potencia inmediatamente después de que ocurre

una falla difiere de la que circula unos pocos ciclos antes que los interruptores abran la línea en ambos lados de la falla, y estas dos corrientes difieren ampliamente de la corriente que circularía bajo condiciones normales si la falla no fuera aislada del resto del sistema por la operación de los interruptores.

La selección adecuada de los interruptores depende de la corriente que circula inmediatamente después de que ocurre la falla, y la corriente que el interruptor debe interrumpir. El cálculo de fallas consiste en determinar estas corrientes para varios tipos de fallas en diferentes puntos del sistema. Los datos obtenidos del cálculo de fallas también se utilizan para la selección de los relevadores, los cuales controlan la operación de los interruptores.

Para un sistema simple, el cálculo analítico de corriente de fallas es práctico, pero para sistemas más complejos, el ingeniero debe auxiliarse de computadores digitales, ó de analizadores de redes de corriente alterna.

El análisis por componentes simétricos es una herramienta poderosa que hace el cálculo de fallas no simétricas casi tan sencillo, como el cálculo de fallas trifásicas.

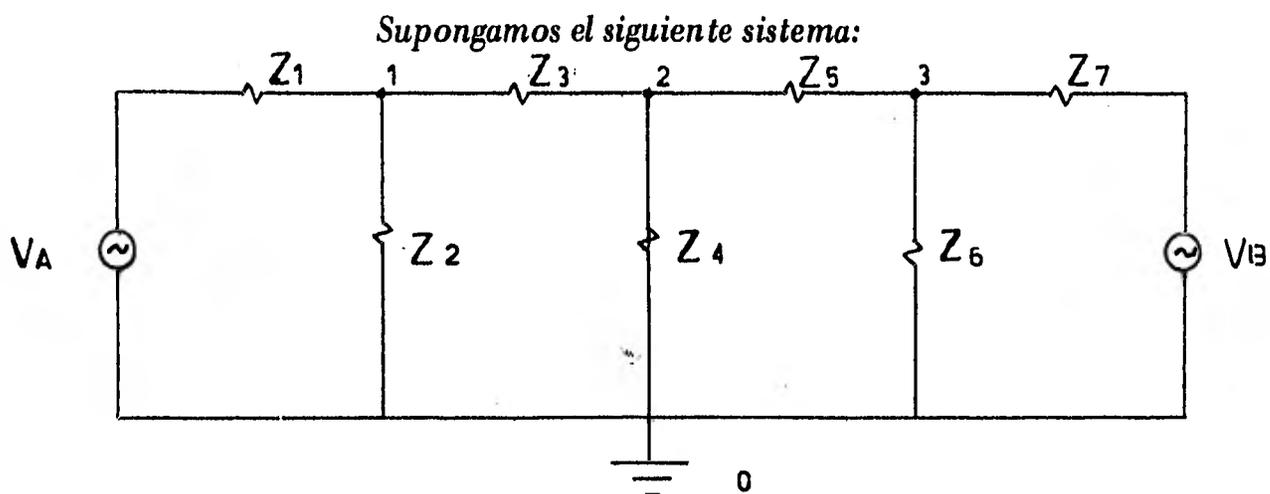
El conocimiento de componentes simétricas es necesario ya sea que el cálculo de fallas se lleve a cabo analíticamente ó con un computador digital o en un analizador de redes de corriente alterna.

CAPITULO 2

ANALISIS DE LA MATRIZ *Zbus*

2.1 DESCRIPCION DE LA MATRIZ Z bus

El método que se empleará en la solución por computación, es el conocido como Zbus, de cuya matriz se hará una descripción matemática a continuación:



Análisis por corrientes:

Para el nodo 1:

$$\frac{V_1 - V_A}{Z_1} + \frac{V_1}{Z_2} + \frac{V_1 - V_2}{Z_3} = 0$$

Para el nodo 2:

$$\frac{V_2 - V_1}{Z_3} + \frac{V_2}{Z_4} + \frac{V_2 - V_3}{Z_5} = 0$$

Para el nodo 3:

$$\frac{V_3 - V_2}{Z_5} + \frac{V_3}{Z_6} + \frac{V_3 - V_B}{Z_7} = 0$$

Arreglando las ecuaciones anteriores:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}\right) V_1 - \frac{1}{Z_3} V_2 &= \frac{V_A}{Z_1} \\ -\frac{1}{Z_3} V_1 + \left(\frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5}\right) V_2 - \frac{1}{Z_5} V_3 &= 0 \\ -\frac{1}{Z_5} V_2 + \left(\frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_6} + \frac{1}{Z_7}\right) V_3 &= \frac{V_B}{Z_7} \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que $1/Z = Y$, se puede escribir el sistema anterior en función de las admitancias.

$$\begin{aligned} (Y_1 + Y_2 + Y_3) V_1 - Y_3 V_2 &= I_A \\ -Y_3 V_1 + (Y_3 + Y_4 + Y_5) V_2 - Y_5 V_3 &= 0 \\ -Y_5 V_2 + (Y_5 + Y_6 + Y_7) V_3 &= I_B \end{aligned}$$

Tomando como regla, que si la corriente entra al nodo, es positiva.

Consecuentemente, cuando la corriente salga del nodo se considerará negativa. Siendo V_1 , V_2 , V_3 voltajes al nodo de referencia.

El sistema anterior de ecuaciones, puede escribirse en forma general de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 + Y_{13} V_3 &= I_1 \\ Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 + Y_{23} V_3 &= I_2 \quad \dots\dots\dots (2.1) \\ Y_{31} V_1 + Y_{32} V_2 + Y_{33} V_3 &= I_3 \end{aligned}$$

El coeficiente Y_{11} se llama admitancia propia del nodo 1 y es la suma de todas las admitancias conectadas al nodo 1. De igual forma, Y_{22} e Y_{33} son las admitancias de los nodos 2 y 3 respectivamente iguales a la suma de las admitancias conectadas a los nodos 2 y 3.

El coeficiente Y_{12} es la coadmitancia de los nodos 1 y 2 y es la suma de todas las admitancias que unen ambos nodos. De igual forma, Y_{23} e Y_{13} son las coadmitancias de los elementos que unen los nodos 2 y 3, 1 y 3, respectivamente. Todas las coadmitancias tienen signo negativo. Obsérvese que $Y_{13} = Y_{31}$, $Y_{23} = Y_{32}$.

La intensidad I_1 es la suma de todas las corrientes de fuentes que pasan por el nodo 1. Las intensidades I_2 e I_3 son las sumas de las corrientes que pasan por los nodos 2 y 3 respectivamente.

Así el sistema general descrito anteriormente puede escribirse en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.2)$$

A la matriz de admitancias se le identificará como Y_{bus} , así para el sistema de ecuaciones (2.2):

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.3)$$

Al invertir la matriz Y_{bus} se obtiene la matriz Z_{bus} , por definición:

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Así para el sistema representado por (2.2):

$$Z_{bus} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Puesto que Y_{bus} es simétrica con respecto a la diagonal principal, Z_{bus} será de la misma manera simétrica respecto a su diagonal principal.

Expresando en forma compacta el sistema (2.2) se tiene:

$$I = Y_{bus} V \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Premultiplicando ambos miembros de (2.6) por $Y_{bus}^{-1} = Z_{bus}$ se obtiene:

$$V = Z_{bus} I \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Donde V e I son las matrices que representan los voltajes y corrientes de los nodos respectivamente.

Desarrollando el sistema (2.7) se obtiene que:

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 + Z_{13} I_3 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 + Z_{23} I_3 \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$V_3 = Z_{31} I_1 + Z_{32} I_2 + Z_{33} I_3 \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Para entender la importancia que tiene la matriz Zbus en el cálculo de las corrientes de corto circuito efectuaremos el siguiente análisis:

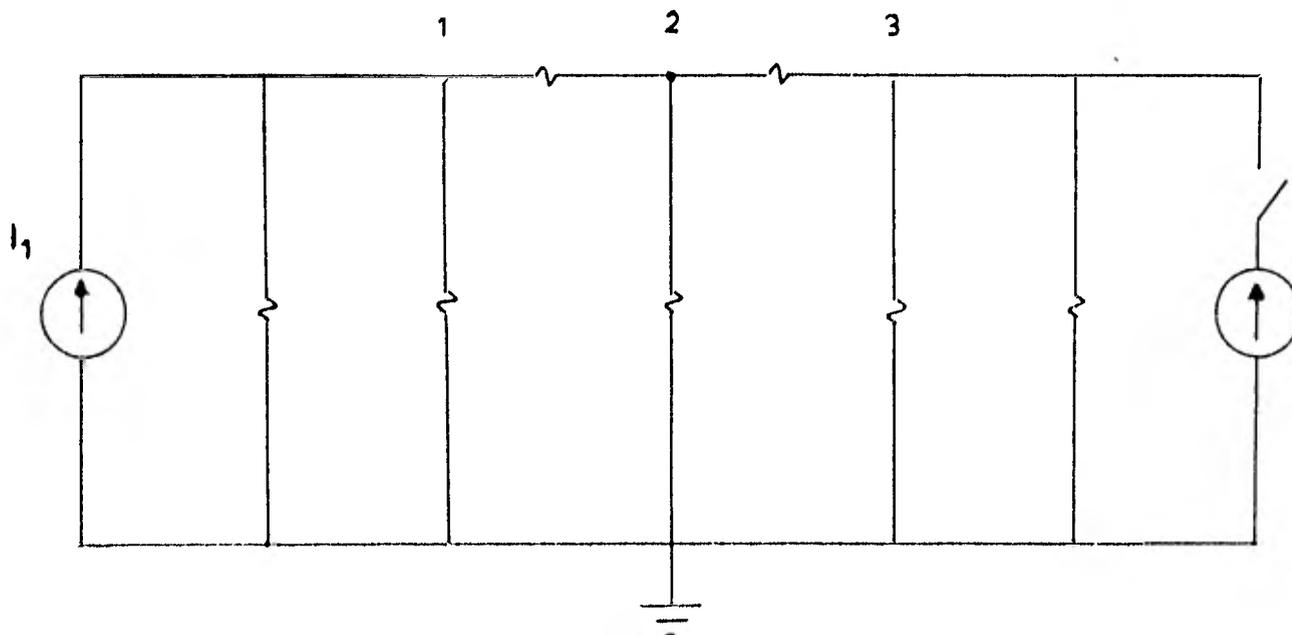
En la ecuación (2.8) y tomando en consideración el principio de superposición hacemos:

$$I_2 = I_3 = 0$$

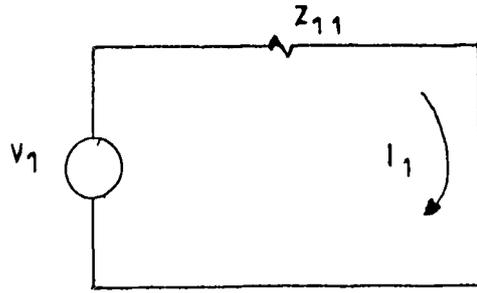
De esta manera la impedancia Z_{11} se determina poniendo en circuito abierto las fuentes de corriente en el nodo 2 y 3, y aplicando la corriente I_1 en el nodo 1 así:

$$Z_{11} = \frac{V_1}{I_1}$$

La siguiente figura muestra al sistema en estas condiciones:



Este circuito puede reducirse al siguiente:



Como puede observarse, esta figura representa precisamente el circuito equivalente de Thevenin.

Donde:

Z_{11} es la impedancia equivalente de Thevenin.

I_1 representa la corriente a tierra del nodo 1.

Este mismo análisis puede extenderse a las ecuaciones (2.9) y (2.10) para determinar las corrientes a tierra de los nodos 2 y 3 respectivamente así:

en (2.9) si $I_1 = I_3 = 0$

$$Z_{22} = \frac{V_2}{I_2}$$

en (2.10) si $I_1 = I_2 = 0$

$$Z_{33} = \frac{V_3}{I_3}$$

Esta matriz Z_{bus} , tiene la enorme ventaja de que, en su diagonal principal están alojadas las impedancias de Thevenin (para cualquier sistema que se trate).

El método anteriormente descrito es bastante satisfactorio, salvo un inconveniente, para sistemas sumamente grandes, la matriz de admitancias resulta de grandes dimensiones, y para invertir una matriz como ésta en una computadora, requiere de una memoria considerable. Este inconveniente ha sido solventado mediante un método por el cual puede ser obtenida la matriz Z_{bus} directamente.

2.2 ALGORITMO PARA LA OBTENCION DE LA MATRIZ Zbus.

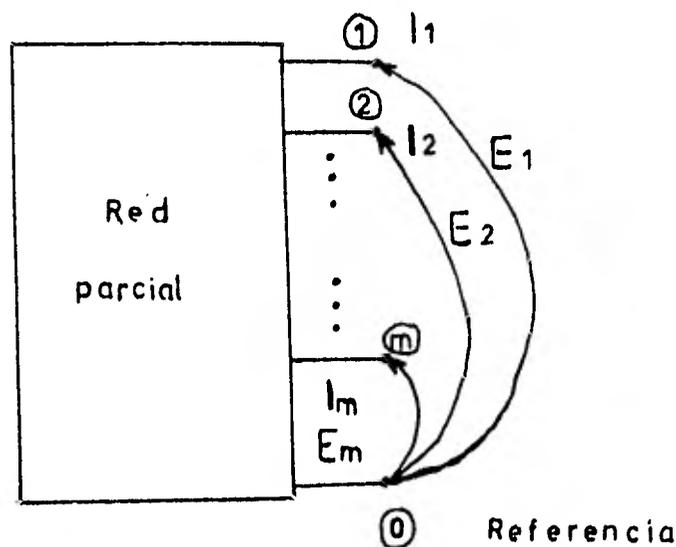
Como se mencionó en el inciso anterior, existe un método basado en un algoritmo por medio del cual puede ser obtenida la matriz Zbus directamente de los datos proporcionados por los parámetros del sistema.

Este método es conveniente para un análisis de corto circuito por computadora, el cual proporciona una economía considerable en tiempo y costo, además de una mayor precisión que si ese mismo sistema se resolviera en forma manual, el cual es largo, tedioso y expuesto a errores.

El principio del algoritmo consiste en la formación de la matriz Zbus en etapas, simulando la construcción de redes parciales cada que se agrega un nuevo elemento. De esta manera se forma una nueva matriz cada que se conecta un elemento nuevo a la red.

Supongamos que la matriz Zbus se conoce para una red parcial de m buses y un nodo de referencia o. La ecuación y su representación gráfica es como se muestra a continuación.:

$$\bar{E}_{bus} = Z_{bus} \bar{I}_{bus}$$



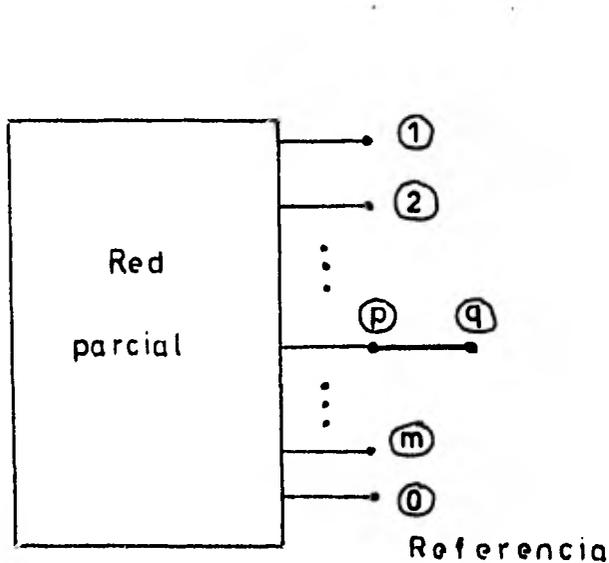
Donde:

\bar{E}_{bus} = Vector $m \times 1$ cuyos elementos son los voltajes de bus medidos con respecto al nodo de referencia.

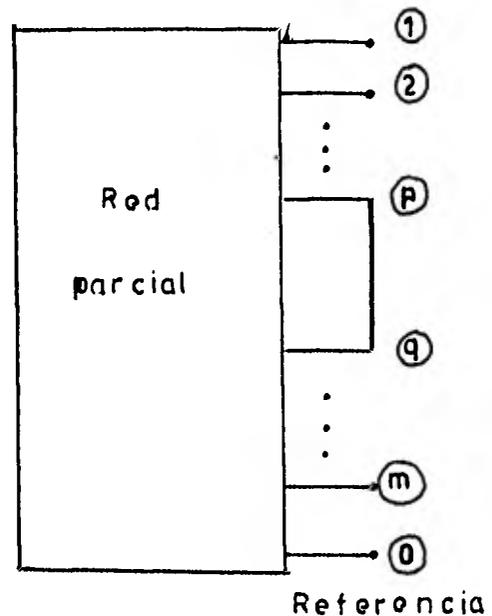
\bar{I}_{bus} = Vector $m \times 1$ cuyos elementos son las corrientes de bus.

Cuando se agrega un elemento $p - q$ a la red parcial, dicho elemento puede ser una rama ó una cuerda como se ilustra a continuación:

p = nodo de salida.
 q = nodo de entrada.



Adición de una rama



Adición de una cuerda

Si $p - q$ es una rama, un nuevo bus q se suma al circuito parcial y la nueva matriz Z_{bus} resultante es de $(m + 1) \times (m + 1)$. Los nuevos vectores de corriente y voltaje serán de $(m + 1) \times 1$. Para obtener la nueva matriz Z_{bus} se requiere unicamente calcular los elementos de la nueva fila y columna.

Si $p - q$ es una cuerda, ningún nuevo bus se agregará al circuito parcial. En este caso, las dimensiones de las matrices que se presenten al sistema no cambian, sin embargo todos los elementos de la matriz Z_{bus} vuelven a ser calculados para considerar los efectos de la nueva cuerda que se agregó.

En la siguiente tabla se encuentra representado el algoritmo, a partir del cual se obtiene la matriz Z_{bus} directamente:

	(p) No es nodo de referencia	(p) Si es nodo de referencia
RAMA	$Z_{qi} = Z_{pi}$ $i = 1, 2, \dots, m$ para $i \neq q$	$Z_{qi} = 0$ $i = 1, 2, \dots, m$ para $i \neq q$
(Agrega un nuevo bus)	$Z_{qq} = Z_{pq} - z_{pq}$ para $i = q$	$Z_{qq} = z_{pq}$ para $i = q$
CUERDA	$Z_{li} = Z_{pi} - Z_{qi}$ $i = 1, 2, \dots, m$ para $i \neq l$	$Z_{li} = -z_{qi}$ $i = 1, 2, \dots, m$ para $i \neq l$
(No agrega un nuevo bus)	$Z_{ll} = Z_{pl} - Z_{ql} + z_{pq}$ para $i = l$	$Z_{ll} = -Z_{ql} + z_{pq}$ para $i = l$

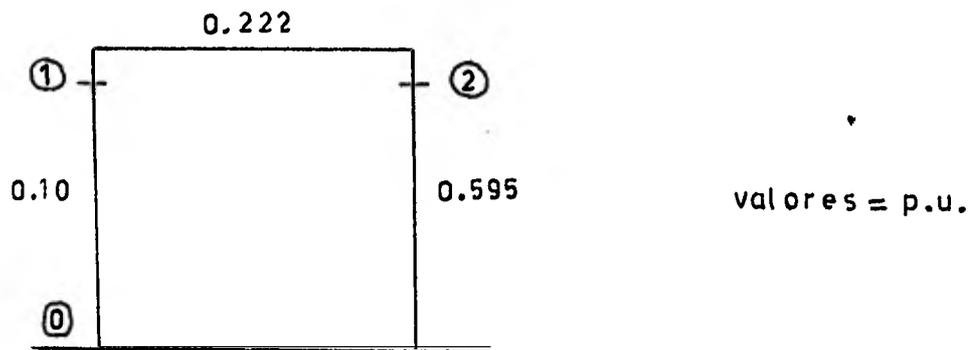
Y para poder modificar los elementos, o sea para eliminar el nodo "l":

$$Z_{ijnueva} = Z_{ijvieja} - \frac{Z_{il} \cdot Z_{lj}}{Z_{ll}}$$

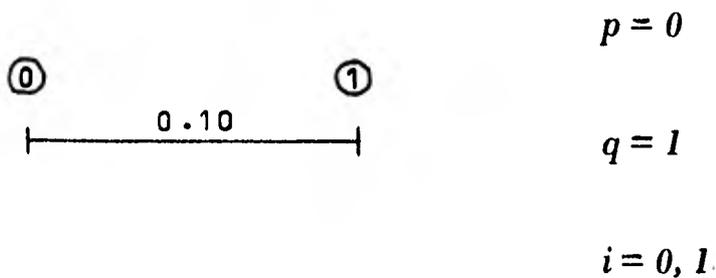
$$i, j = 1, 2, \dots, m$$

Para análisis, el primer nodo que se analice debe estar conectado al de referencia.

Para entender más claramente la forma como funciona este algoritmo se hará uso del siguiente sistema, el cual analizaremos:



Iniciemos el análisis:



p si es nodo de referencia y además agrega un nuevo nodo, observando el algoritmo vemos que se utilizan las siguientes fórmulas:

para $i \neq q$ $Z_{qi} = 0$

para $i = q$ $Z_{qq} = z_{pq}$ (impedancia de la rama)

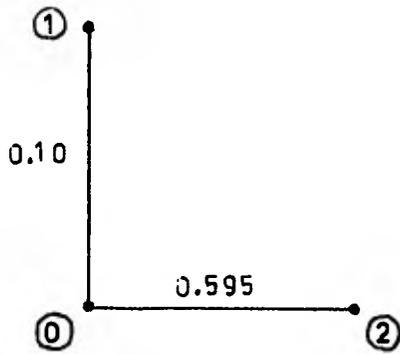
Sustituyendo valores:

$$Z_{10} = 0$$

$$Z_{11} = 0.10$$

	0	1
0	0	0
1	0	0.10

Agregamos un nuevo elemento:



$$p = 0$$

$$q = 2$$

$$i = 0, 1, 2$$

p si es nodo de referencia y agrega un nuevo nodo, por lo que se presenta el mismo caso anterior; sustituyendo valores en las mismas fórmulas:

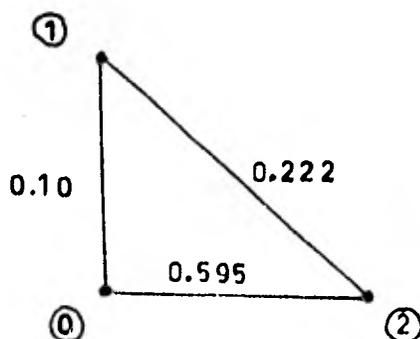
$$Z_{20} = 0$$

$$Z_{21} = 0$$

$$Z_{22} = 0.595$$

	0	1	2
0	0	0	0
1	0	0.10	0
2	0	0	0.595
	0	1	2

Agregamos otro elemento



$$p = 1$$

$$q = 2$$

$$i = 0, 1, 2$$

p no es nodo de referencia y además no agrega un nuevo bus, por lo que es una nueva cuerda, utilizándose las siguientes fórmulas tomadas del algoritmo:

para $i \neq l$ $Z_l = Z_{pi} - Z_{qi}$

para $i = l$ $Z_{ll} = Z_{pl} - Z_{ql} + z_{pq}$

Sustituyendo valores:

$$Z_{l0} = Z_{10} - Z_{20} = 0 - 0 = 0$$

$$Z_{l1} = Z_{11} - Z_{21} = 0.10 - 0 = 0.10$$

$$Z_{l2} = Z_{12} - Z_{22} = 0 - 0.595 = -0.595$$

$$Z_{ll} = Z_{1l} - Z_{2l} + z_{12} = 0.10 + 0.595 + 0.222 = 0.917$$

	0	1	2	l
0	0	0	0	0
1	0	0.10	0	0.10
2	0	0	0.595	-0.595
l	0	0.10	-0.595	0.917

Para la eliminación del nodo l, utilizaremos las siguientes ecuaciones:

$$Z_{ijnueva} = Z_{ijvieja} - \frac{Z_{il} \cdot Z_{lj}}{Z_{ll}}$$

$$i = 1$$

$$j = 1$$

$$Z_{11, nueva} = Z_{11, vieja} - \frac{Z_{11} \cdot Z_{11}}{Z_{11}} = 0.0891$$

$$i = 1$$

$$j = 2$$

$$Z_{12, nueva} = Z_{12, vieja} - \frac{Z_{11} \cdot Z_{12}}{Z_{11}} = 0.065$$

$$i = 2$$

$$j = 2$$

$$Z_{22, nueva} = Z_{22, vieja} - \frac{Z_{21} \cdot Z_{12}}{Z_{11}} = 0.209$$

Vaciando estos nuevos valores, nuestra matriz modificada nos queda:

	0	1	2
0	0	0	0
1	0	0.0891	0.065
2	0	0.065	0.209

Que es precisamente la matriz Z_{bus} , a partir de la cual, como se mencionó anteriormente, se obtienen las corrientes de Corto Circuito.

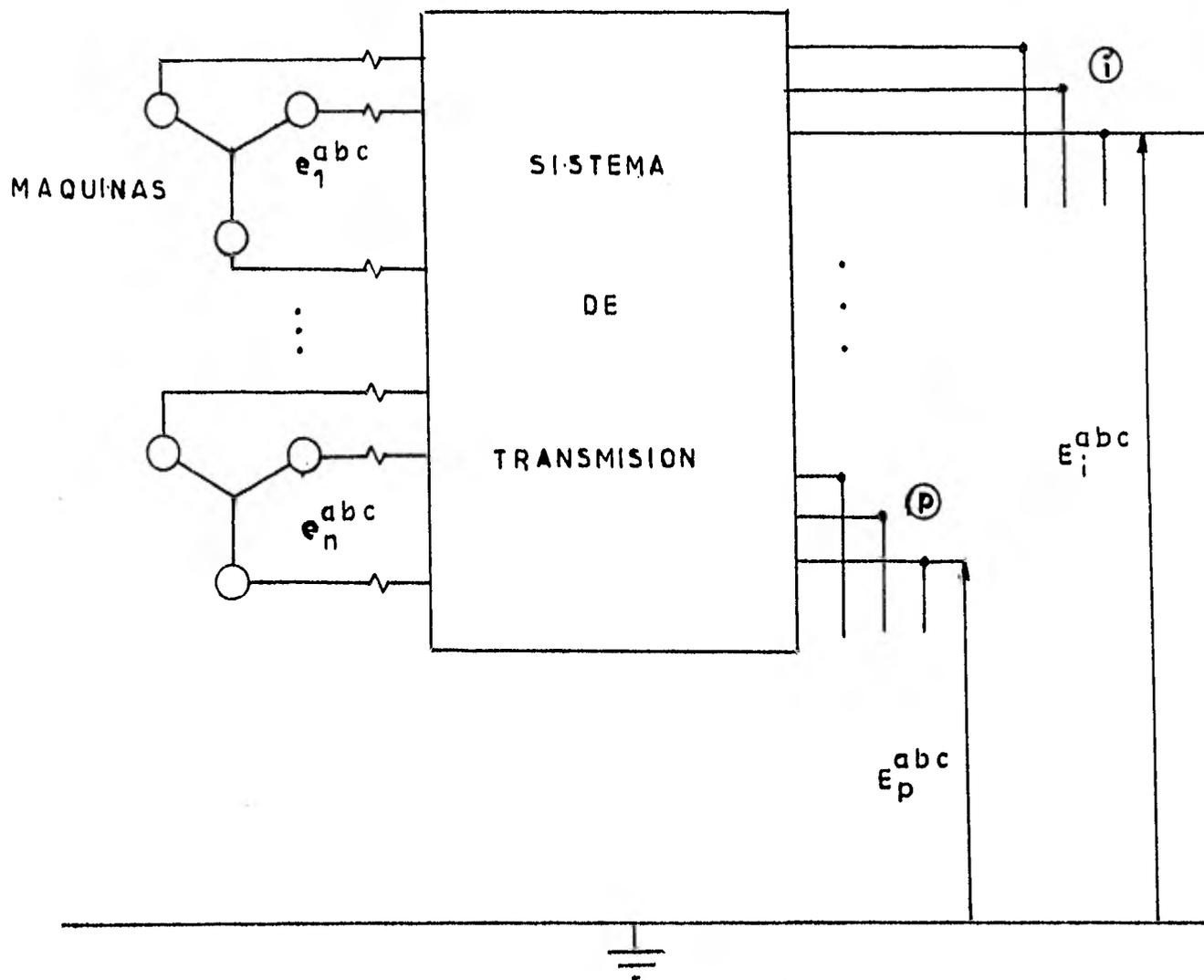
CAPITULO 3

ANALISIS DE CORTO CIRCUITO DE UN SISTEMA TRIFASICO

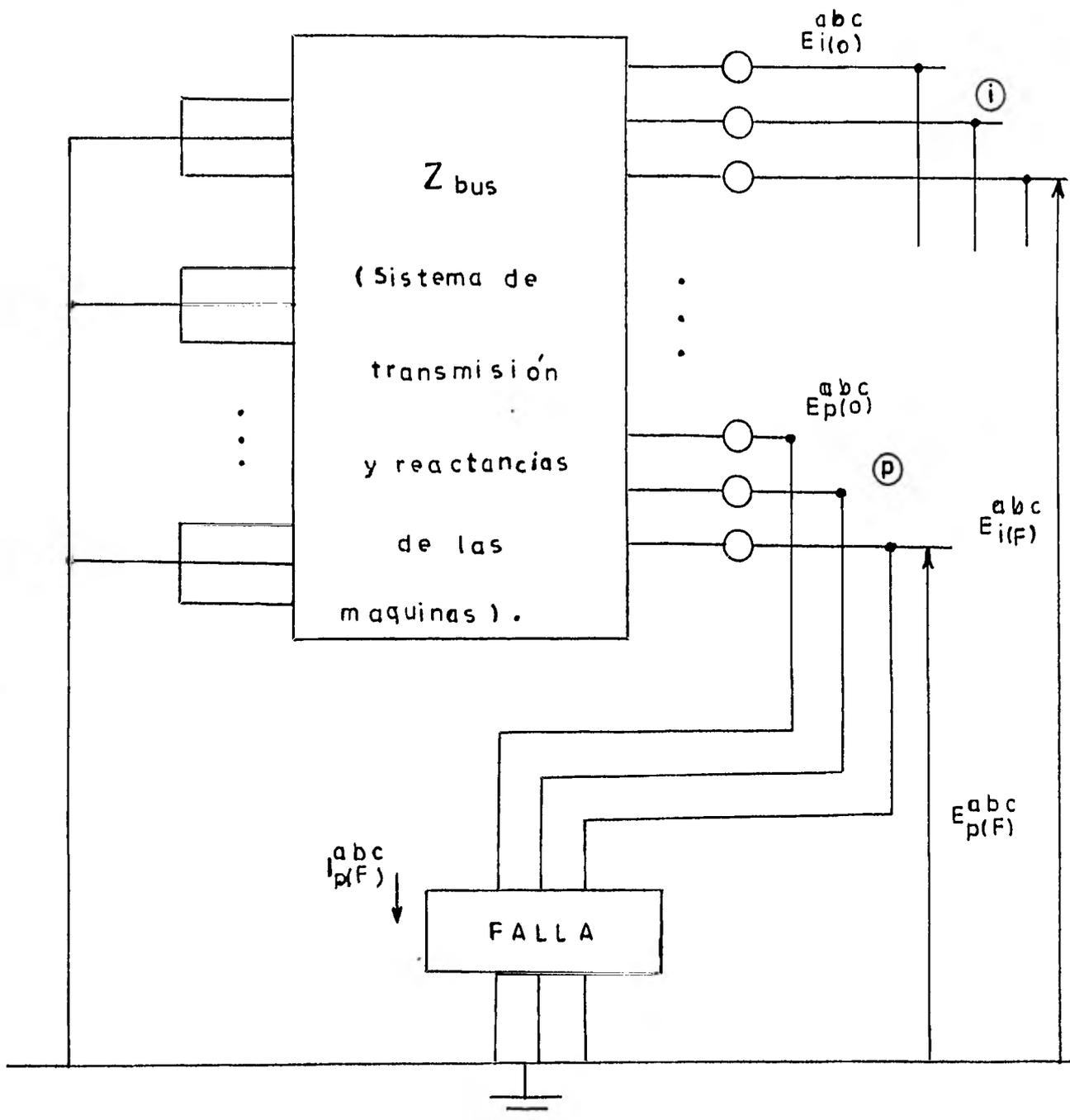
ANALISIS DE CORTO CIRCUITO DE UN SISTEMA TRIFASICO

El uso de Zbus proporciona un método adecuado para el cálculo de las corrientes y voltajes durante un corto circuito cuando se escoge a tierra como referencia. Una vez que se forma Zbus, los elementos de esta matriz pueden usarse directamente para calcular las corrientes y voltajes asociados con los diferentes tipos de fallas.

Supongase un sistema eléctrico de potencia trifásico bajo condiciones en estado estable, el cual se representa en forma simplificada en la siguiente figura



La representación de una falla en el bus p del sistema anteriormente descrito se muestra en la siguiente figura:



Analizando el sistema a partir del teorema de Thevenin se deduce que las impedancias internas incluyendo las reactancias de las máquinas están representadas por la matriz Z_{bus} , y que el voltaje de circuito abierto está representado por el voltaje en los buses antes de la falla.

De esta manera la ecuación que representa al sistema durante la falla es:

$$\bar{E}_{bus(F)}^{abc} = \bar{E}_{bus(0)}^{abc} - \bar{Z}_{bus} \bar{I}_{bus(F)}^{abc} \dots \dots (3.1)$$

Donde:

$\bar{E}_{bus(F)}^{abc}$ Es el vector que representa los voltajes trifásicos desconocidos $E_{i(F)}^{abc}$ $i = 1, 2, \dots, p, \dots, n$

$\bar{E}_{bus(0)}^{abc}$ Es el vector que representa los voltajes conocidos, que son los voltajes antes de ocurrir la falla $E_{i(0)}^{abc}$ $i = 1, 2, \dots, p, \dots, n$

$\bar{I}_{bus(F)}^{abc}$ Es el vector que representa las corrientes durante la falla en el bus p .

\bar{Z}_{bus}^{abc} Es una matriz de dimensión $n \times n$, y cuyos elementos son matrices de 3×3 .

La ecuación (3.1) puede escribirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E_{1(F)}^{abc} &= E_{1(0)}^{abc} - Z_{1p}^{abc} I_{p(F)}^{abc} \\ E_{2(F)}^{abc} &= E_{2(0)}^{abc} - Z_{2p}^{abc} I_{p(F)}^{abc} \\ &\dots \dots \dots (3.2) \\ E_{p(F)}^{abc} &= E_{p(0)}^{abc} - Z_{pp}^{abc} I_{p(F)}^{abc} \\ &\dots \dots \dots \\ E_{n(F)}^{abc} &= E_{n(0)}^{abc} - Z_{np}^{abc} I_{p(F)}^{abc} \end{aligned}$$

El vector que representa al voltaje trifásico en el bus de falla p de acuerdo con la figura es:

$$E_{p(F)}^{abc} = Z_f^{abc} I_{p(F)}^{abc} \dots\dots(3.3)$$

La matriz Z_f^{abc} depende del tipo de falla. Sustituyendo la ecuación (3.3) en la ecuación (3.2) se tiene:

$$Z_f^{abc} I_{p(F)}^{abc} = E_{p(0)}^{abc} - Z_{pp}^{abc} I_{p(F)}^{abc} \dots\dots(3.4)$$

Resolviendo (3.4) para $I_{p(F)}^{abc}$:

$$I_{p(F)}^{abc} = (Z_f^{abc} + Z_{pp}^{abc})^{-1} E_{p(0)}^{abc} \dots\dots(3.5)$$

Sustituyendo $I_{p(F)}^{abc}$ en (3.3):

$$E_{p(F)}^{abc} = Z_f^{abc} (Z_f^{abc} + Z_{pp}^{abc})^{-1} E_{p(0)}^{abc} \dots\dots(3.6)$$

Similarmente puede obtenerse el voltaje de falla para los otros buses sustituyendo $I_{p(F)}^{abc}$ en las ecuaciones (3.2):

$$E_{i(F)}^{abc} = E_{i(0)}^{abc} - Z_{ip}^{abc} (Z_f^{abc} + Z_{pp}^{abc})^{-1} E_{p(0)}^{abc} \dots\dots(3.7)$$

Las corrientes que circulan a través de los elementos del sistema pueden calcularse por medio de los voltajes obtenidos en las ecuaciones (3.6) y (3.7):

$$\bar{i}_{ij}^{abc} = \bar{y}^{abc} \bar{v}_{ij}^{abc} \dots\dots(3.8)$$

Donde: \bar{y}^{abc}

es la matriz que contiene los elementos de la matriz de admitancia primitiva.

Todas las ecuaciones obtenidas anteriormente pueden simplificarse cuando se aplican las componentes simétricas a un circuito trifásico simétrico, así la matriz primitiva de impedancias Z_{pq}^{abc} puede diagonalizarse mediante la transformación:

$$Z_{pq}^{012} = T_s^{-1} Z_{pq}^{abc} T_s$$

Donde:

$$T_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}$$

Así:

$$Z_{pq}^{012} = \begin{pmatrix} Z_{pq}^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{pq}^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{pq}^{(2)} \end{pmatrix}$$

Donde: $Z_{pq}^{(0)}$, $Z_{pq}^{(1)}$, $Z_{pq}^{(2)}$ son las impedancias de secuencia cero, positiva y negativa respectivamente. Para el caso de un circuito trifásico simétrico las impedancias de secuencias positiva y negativa son iguales.

Es costumbre suponer que los voltajes en todos los buses antes de la falla son iguales en magnitud y ángulo de fase. Suponiendo que la magnitud del voltaje $E_{i(0)}$ de línea a tierra es igual a uno por unidad. Entonces:

$$E_{i(0)}^{abc} = \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$$

Transformándolo en componentes simétricas:

$$E_{i(0)}^{012} = T_s^{-1} E_{i(0)}^{abc}$$

Entonces:

$$E_{i(0)}^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix}$$

De la misma manera la matriz de falla Z_f^{abc} puede ser transformada por medio de T_s en la matriz Z_f^{012} .

Así las ecuaciones (3.5), (3.6), (3.7) y (3.8) pueden ser escritas en términos de las componentes simétricas como se presenta a continuación:

$$I_{p(F)}^{012} = (Z_f^{012} + Z_{pp}^{012})^{-1} E_{p(0)}^{012} \quad \dots \dots \dots (3.9)$$

$$E_{p(F)}^{012} = Z_f^{012} (Z_f^{012} + Z_{pp}^{012})^{-1} E_{p(0)}^{012} \quad \dots \dots \dots (3.10)$$

$$E_{i(F)}^{012} = E_{i(0)}^{012} - Z_{ip}^{012} (Z_f^{012} + Z_{pp}^{012})^{-1} E_{p(0)}^{012} \quad \dots \dots \dots (3.11)$$

La corriente de falla en el elemento $i - j$ es:

$$I_{ij}^{012} = \bar{Y}_{ij}^{012} (E_{i(F)}^{012} - E_{j(F)}^{012}) \quad \dots \dots \dots (3.12)$$

Siendo \bar{Y}_{ij}^{012} la admitancia original del elemento $i - j$ en términos de sus componentes simétricas.

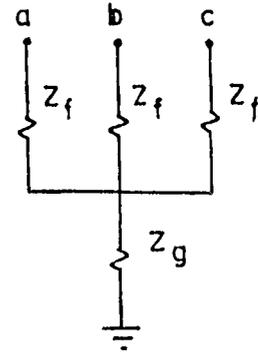
El estudio se enfocará al análisis de fallas monofásicas y trifásicas a tierra, ya que como se mencionó anteriormente son el tipo de fallas que con mayor frecuencia ocurre en líneas de transmisión.

3.1 FALLA TRIFASICA A TIERRA.

Las corrientes y voltajes para este tipo de falla pueden obtenerse sustituyendo la matriz de impedancias correspondiente en términos de sus componentes simétricas en las ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11).

La matriz de impedancias de falla para una falla trifásica a tierra es:

$$Z_f^{012} = \begin{pmatrix} Z_f + 3Z_g & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{pmatrix}$$



Por lo tanto la corriente de falla en el bus p será:

$$\begin{pmatrix} I_{p(F)}^{(0)} \\ I_{p(F)}^{(1)} \\ I_{p(F)}^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_f + 3Z_g + Z_{pp}^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & Z_f + Z_{pp}^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & Z_f + Z_{pp}^{(1)} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{pmatrix}$$

La cual se reduce a:

$$\begin{pmatrix} I_{p(F)}^{(0)} \\ I_{p(F)}^{(1)} \\ I_{p(F)}^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{Z_f + Z_{pp}^{(1)}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

En términos de las componentes fasoriales será:

$$\begin{pmatrix} I_{P(F)}^a \\ I_{P(F)}^b \\ I_{P(F)}^c \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_f + Z_{pp}^{(1)}} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$$

Similarmenete para el voltaje en el bus p:

$$\begin{pmatrix} E_{P(F)}^{(0)} \\ E_{P(F)}^{(1)} \\ E_{P(F)}^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{3} Z_f}{Z_f + Z_{pp}^{(1)}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

En términos de las componentes fasoriales:

$$\begin{pmatrix} E_{P(F)}^a \\ E_{P(F)}^b \\ E_{P(F)}^c \end{pmatrix} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_{pp}^{(1)}} \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$$

El voltaje para los otros buses sustituyendo en las ecuaciones (3.11).

$$\begin{pmatrix} E_{i(F)}^{(0)} \\ E_{i(F)}^{(1)} \\ E_{i(F)}^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \left(1 - \frac{Z_{ip}^{(1)}}{Z_f + Z_{pp}^{(1)}} \right) \\ 0 \end{pmatrix}$$

En términos de las componentes fasoriales:

$$\begin{pmatrix} E_{i(F)}^a \\ E_{i(F)}^b \\ E_{i(F)}^c \end{pmatrix} = \left(1 - \frac{z_{ip}^{(1)}}{z_f + z_{pp}^{(1)}} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$$

El cálculo de las corrientes en los otros elementos del sistema se calculan a partir de la ecuación (3.12):

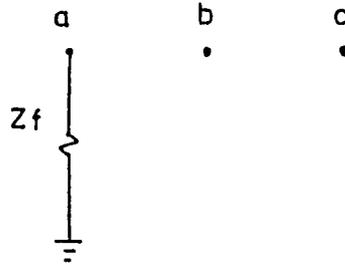
$$\begin{pmatrix} i_{ij(F)}^{(0)} \\ i_{ij(F)}^{(1)} \\ i_{ij(F)}^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ y_{ij}^{(1)} (E_{i(F)}^{(1)} - E_{j(F)}^{(1)}) \\ 0 \end{pmatrix}$$

En términos de las componentes fasoriales:

$$\begin{pmatrix} i_{ij}^a \\ i_{ij}^b \\ i_{ij}^c \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} y_{ij}^{(1)} (E_{i(F)}^{(1)} - E_{j(F)}^{(1)}) \begin{pmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{pmatrix}$$

3.2 FALLA DE UNA FASE A TIERRA.

Los voltajes y corrientes para este tipo de falla pueden obtenerse a partir de la matriz de admitancias de falla, la cual para una falla de fase a tierra en la fase a será:

$$Y_f^{012} = \frac{Y_f}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$


Sustituyendo ésta matriz en la ecuación:

$$I_{P(F)}^{012} = Y_f^{012} (U + Z_{pp}^{012} Y_f^{012})^{-1} E_{P(0)}^{012}$$

La cual se obtiene en forma similar a como se obtuvo la ecuación (3.9):

$$\begin{bmatrix} I_{P(F)}^{(0)} \\ I_{P(F)}^{(1)} \\ I_{P(F)}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{Y_f}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+Z_{pp}^{(0)} \frac{Y_f}{3} & Z_{pp}^{(0)} \frac{Y_f}{3} & Z_{pp}^{(0)} \frac{Y_f}{3} \\ Z_{pp}^{(1)} \frac{Y_f}{3} & 1+Z_{pp}^{(1)} \frac{Y_f}{3} & Z_{pp}^{(1)} \frac{Y_f}{3} \\ Z_{pp}^{(1)} \frac{Y_f}{3} & Z_{pp}^{(1)} \frac{Y_f}{3} & 1+Z_{pp}^{(1)} \frac{Y_f}{3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix}$$

La cual se reduce a:

$$\begin{bmatrix} I_{P(F)}^{(0)} \\ I_{P(F)}^{(1)} \\ I_{P(F)}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

En términos de las componentes fasoriales la corriente de falla en el bus p se obtiene premultiplicando la ecuación anterior por T_s :

$$\begin{pmatrix} I_{P(F)}^a \\ I_{P(F)}^b \\ I_{P(F)}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3}{Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

El voltaje de falla en el bus p será:

$$\begin{pmatrix} E_{P(F)}^{(0)} \\ E_{P(F)}^{(1)} \\ E_{P(F)}^{(2)} \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f} \begin{pmatrix} -Z_{pp}^{(0)} \\ Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f \\ -Z_{pp}^{(1)} \end{pmatrix}$$

En términos de las componentes fasoriales:

$$\begin{pmatrix} E_{P(F)}^a \\ E_{P(F)}^b \\ E_{P(F)}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3Z_f}{Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f} \\ a^2 - \frac{Z_{pp}^{(0)} - Z_{pp}^{(1)}}{Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f} \\ a - \frac{Z_{pp}^{(0)} - Z_{pp}^{(1)}}{Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f} \end{pmatrix}$$

El voltaje en los otros buses será:

$$\begin{pmatrix} E_{i(F)}^{(0)} \\ E_{i(F)}^{(1)} \\ E_{i(F)}^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{\sqrt{3}}{Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f} \begin{pmatrix} Z_{ip}^{(0)} \\ Z_{ip}^{(1)} \\ Z_{ip}^{(2)} \end{pmatrix}$$

En términos de las componentes fasoriales:

$$\begin{bmatrix} E_{i(F)}^a \\ E_{i(F)}^b \\ E_{i(F)}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{pp}^{(0)} + 2Z_{pp}^{(1)} + 3Z_f} \begin{bmatrix} z_{ip}^{(0)} + 2z_{ip}^{(1)} \\ z_{ip}^{(0)} - z_{ip}^{(1)} \\ z_{ip}^{(0)} - z_{ip}^{(1)} \end{bmatrix}$$

Las corrientes en los demás elementos del sistema se calculan a partir de la ecuación (3.12):

$$\begin{bmatrix} i_{ij(F)}^{(0)} \\ i_{ij(F)}^{(1)} \\ i_{ij(F)}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ij}^{(0)} (E_{i(F)}^{(0)} - E_{j(F)}^{(0)}) \\ y_{ij}^{(1)} (E_{i(F)}^{(1)} - E_{j(F)}^{(1)}) \\ y_{ij}^{(2)} (E_{i(F)}^{(2)} - E_{j(F)}^{(2)}) \end{bmatrix}$$

En términos de las componentes fasoriales:

$$\begin{bmatrix} i_{ij}^a \\ i_{ij}^b \\ i_{ij}^c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 3 i_{ij(F)}^{(1)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

CAPITULO 4

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL USO DE COMPUTADORES DIGITALES

EN PROBLEMAS DE INGENIERIA

4.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE COMPUTADORES DIGITALES.

Los computadores electrónicos son llamados computadores digitales debido a que trabajan con números y tienen la habilidad de contar. La función de contar ha sido enormemente mejorada desde la invención del ábaco, la máquina sumadora y la calculadora de escritorio. Actualmente los computadores digitales pueden manejar datos alfabéticos y numéricos, y en vez de estar limitados a operaciones matemáticas simples, pueden efectuar cálculos complicados, manejar información alfabética y tomar decisiones lógicas, todo esto a una gran velocidad.

Una vez que el trabajo que quiere realizarse en un computador digital ha sido adecuadamente definido, en términos de que es lo que va a hacerse, el siguiente paso es decidir como va a hacerse. En este paso es necesario expresar el proceso a seguir en términos de operaciones que van a ejecutarse en el computador. Uno de los principales métodos con que se cuenta en este paso es un diagrama de flujo general, que muestra la secuencia de operaciones en forma gráfica.

La etapa siguiente en el proceso, es programar. Esto incluye dos actividades, una de ellas es hacer un diagrama de flujo detallado, mostrando con mayor exactitud que es lo que va a hacerse en cada paso del proceso. La otra actividad es la codificación del programa.

Ahora bien, el lenguaje en el que el computador puede aceptar instrucciones es muy diferente del lenguaje con el cual nosotros describimos comunmente el proceso de los datos, por lo que será necesario traducir el procedimiento a seguir al lenguaje del computador.

La codificación es el proceso de establecer un procedimiento en un lenguaje aceptable por el computador. En muy pocos casos es necesario hacer el trabajo completo de traducir todo el proceso a la forma final de instrucciones, en forma que ellas puedan ser ejecutadas por el computador. Generalmente las instrucciones son escritas en forma simbólica, siendo esta forma algo similar al lenguaje de la máquina, pero considerablemente más conveniente para

quien escribe el programa. La traducción final del programa escrito en forma simbólica al lenguaje de máquina se hace con la ayuda del mismo computador.

La programación y codificación incluyen mucho trabajo de detalle, por lo que la mayoría de los programas no operan correctamente en la primera prueba, así que es necesario depurar el programa, es decir, localizar y corregir los errores y probarlo con casos hipotéticos hasta estar seguros que procesa los datos correctamente.

4.2 ORIENTACION DE LOS COMPUTADORES DIGITALES HACIA PROBLEMAS DE INGENIERIA

Los grandes avances técnicos en el diseño y producción de computadores digitales desde 1950, han puesto a disposición de los ingenieros una herramienta poderosa. Este avance ha hecho económicamente posible la utilización de computadores digitales para cálculos de rutina, que se encuentran frecuentemente en un trabajo de ingeniería. Además ha dado la capacidad para ejecutar cálculos más avanzados, que anteriormente eran imposibles de realizar, debido a su complejidad ó porque consumían mucho tiempo.

La planeación, diseño y operación de los sistemas de potencia, requieren de un análisis continuo para evaluar la operación real del sistema y para asegurar la efectividad de plantas adicionales para la expansión del sistema. Estos estudios tienen un papel importante para dar al sistema de potencia, un alto grado de seguridad, y para asegurar la máxima utilización del capital invertido.

La necesidad de tener una ayuda para el cálculo en sistemas de potencia, llevó en 1929 a el diseño de una computadora analógica, llamada analizador de redes de corriente alterna.

Este dispositivo hizo posible el estudio de una gran variedad de condiciones de operación del sistema, tanto para el diseño del sistema presente como futuro. Dió la capacidad para determinar flujos de energía y voltajes en el sistema durante condiciones normales, ó durante condiciones de emergencia y para estudiar la conducta transitoria del sistema, resultante de condiciones de falla.

Las primeras aplicaciones de computadores digitales al análisis de sistemas de potencia, se tuvieron en 1940. Sin embargo, la mayoría de esas primeras aplicaciones, eran de alcance limitado debido a la pequeña capacidad de las calculadoras de tarjetas perforadas. Por esta razón no fué sino hasta 1957 en que la American Electric Power Service Corporation, terminó un programa para hacer un estudio de flujos. Esta primera aplicación tuvo tal éxito, que todos los estudios siguientes, emplearon computadores digitales, en lugar de

usar analizadores de redes. El éxito condujo al desarrollo de programas para el cálculo de corto circuitos y para cálculos de estabilidad. Actualmente los computadores digitales, son una herramienta indispensable en todas las fases de planeación, diseño y operación de sistemas de potencia.

El desarrollo de los computadores digitales ha dado las siguientes ventajas a los ingenieros, para realizar estudios en sistemas de potencia:

- a) Medios más eficientes y económicos para llevar a cabo cálculos de rutinas requeridos en la planeación, diseño y operación de un sistema de potencia.*
- b) Una mejor utilización de los conocimientos de ingeniería, al relevar al ingeniero de cálculos tediosos y permitirle tener más tiempo para desarrollar trabajos técnicos.*
- c) La capacidad para ejecutar estudios de ingeniería más efectivos; al aplicar procedimiento de cálculo, para obtener un número de soluciones alternas para un problema particular, proporcionándole una base sólida para tomar sus decisiones.*
- d) La capacidad para llevar a cabo estudios, que anteriormente no era posible realizar, debido al volúmen de cálculo que involucraban.*

Los dos factores más importantes que han contribuido a la realización de estos beneficios, son la disminución del costo de los equipos, y el desarrollo de técnicas eficientes de cálculo.

Ahora que se ha logrado una reducción considerable de equipos, el principal esfuerzo debe ser dirigido hacia la orientación de problemas de ingeniería a soluciones por medio de computadores.

El proceso de aplicar un computador a la solución de problemas de ingeniería, abarca un número de pasos, que son los siguientes:

- 1.- Definición del Problema. Inicialmente, el problema debe ser definido en forma precisa y los objetivos determinados. Este puede ser el paso más difícil de todo el proceso. Se debe tomar en consideración, los datos disponibles para entrada, el alcance del problema y sus limitaciones, los resultados deseados y su importancia relativa, para tomar una decisión técnica. Esta fase requiere de el juicio de ingenieros capaces y experimentados.*
- 2.- Formulación matemática. Después que el problema ha sido definido, es necesario desarrollar un problema matemático para representar al sistema físico. Esto requiere especificar las características de los componentes individuales del sistema, así como las relaciones que gobiernan la interconexión de los elementos, pueden ser usados diferentes modelos matemáticos, para representar a un mismo sistema, y una formulación puede resultar en un número diferente de ecuaciones de otro, como por ejemplo, en el caso de problemas de redes, los cuales pueden ser resueltos usando, ya sea, ecuaciones de red ó ecuaciones de nodo. La formulación matemática del problema, por consiguiente, incluye el diseño de un cierto número de modelos, y la selección del mejor modelo para describir al sistema.*
- 3.- Selección de la técnica de solución. La formulación de los problemas de ingeniería involucran expresiones matemáticas, tales como ecuaciones de sistemas no lineales, ecuaciones diferenciales, etc. Las cuales no pueden ser resueltas directamente por un computador digital. Un computador está limitado a efectuar solo a cierto tipo de operaciones: suma, resta, multiplicación, división, algunas funciones trigonométricas, logaritmos. Por consiguiente, la solución para cualquier problema, debe ser obtenido por técnicas numéricas, basadas en las anteriores operaciones.*

Es importante en esta fase, seleccionar un método que sea práctico para hacer el cálculo en la máquina, y en particular, que produzca el resultado deseado en un tiempo razonable. También deberá de hacerse una cuidadosa consideración del grado de precisión requerido.

- 4.- Diseño del programa. La secuencia de pasos lógicos por medio de las cuales un problema particular, va a ser resuelto, la memoria disponible, el acceso de datos, y la asignación de unidades de entrada y salida, son aspectos importantes en el diseño del programa. Los objetivos son principalmente, desarrollar un procedimiento que elimine cálculos repetitivos innecesarios, y que permanezca dentro de la capacidad del computador.*
- 5.- Programación. Un computador tiene una serie de instrucciones que consisten en códigos de operación y de direcciones, que es capaz de interpretar y ejecutar. Además de las instrucciones aritméticas y de entrada y salida se dispone de instrucciones lógicas, para ser usadas en dirigir la secuencia de cálculo. Las traducciones de los pasos detallados y precisos para ser ejecutados en la solución del problema, a una lista organizada de instrucciones, es el proceso de programación. Un programa puede ser desarrollado usando instrucciones de computador en forma simbólica, ó puede ser escrito en super lenguaje, tal como FORTRAN.*
- 6.- Verificación del programa. Existen muchas oportunidades para cometer errores en el desarrollo de un programa. Por consiguiente, deberán de ejecutarse una serie de revisiones sistemáticas, para asegurar que la formulación de problema, el método de solución, y la operación del programa, es correcto.*
- 7.- Aplicación. Los programas de ingeniería, se pueden clasificar, en general, en dos grupos. El primero consiste de programas para uso especial, los cuales son desarrollados en un período relativamente corto, y se emplean para la solución de problemas simples de ingeniería.*

El segundo grupo consiste de programas de uso general, y son diseñados para el análisis de problemas grandes de ingeniería. Estos programas se aplican extensamente en los estudios regulares de uno o más departamentos de ingeniería. Su uso puede tener un efecto en el enfoque a un problema de ingeniería, y a la organización del estudio. De manera que es importante que se tome en consideración la manera en la cual un programa va a ser empleado. Algunos aspectos que deben ser considerados son los medios de recopilar y preparar los datos, el tiempo de proceso y la presentación de los resultados. Los programas de éste tipo llegan a formar parte integral de un estudio de sistemas de potencia.

La importancia relativa de cada uno de estos pasos, varía de problema a problema. Sin embargo, todos los pasos están íntimamente relacionados y juegan un papel importante en las decisiones que deben ser tomadas. De primordial importancia es la interrelación de la formulación matemática de un problema y la selección de la técnica de solución. Frecuentemente es difícil evaluar la influencia de estos dos factores, sin desarrollar un programa completo y ejecutar cálculos reales para comparar las diferentes alternativas.

CAPITULO 5

ANALISIS POR COMPUTACION DEL PROBLEMA A RESOLVER

5.1 DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El programa calcula las corrientes de corto circuito en por unidad en el nodo donde ocurre la falla y las contribuciones de cada elemento en toda la red, tanto para el caso de una falla trifásica como para una falla monofásica a tierra.

Como datos entran:

IP e IQ *Que son los números para etiquetar los nodos terminales de un elemento.*

ZEL 0 y ZEL 1 *Son las impedancias de secuencia cero y positiva respectivamente en por unidad del elemento con nodos terminales IP e IQ.*

Dándose su lectura en forma iterativa, perfectamente identificados por medio de subíndices; como datos complementarios se dan:

NBUS *Número de nodos en el sistema*

NELEM. *Número de elementos + 1*

El nodo por el que empieza el análisis, debe estar conectado al de referencia, nodo número ① (debe ser IP), el cual tiene que haber sido referido anteriormente.

Fundamentalmente el programa esta basado en el uso de la matriz Zbus, de la cual se hizo un análisis en el Capitulo 2.

El algoritmo para obtenerla está hecho expresamente para ser usado en un computador digital, el cual consiste principalmente en iteraciones y comparaciones lógicas.

Como es de comprenderse al hacerse el análisis de una red eléctrica por el método aquí tratado, existen muchas iteraciones y comparaciones, ya que es un barrido minucioso el que se realiza en la red para su estudio y ejecución correcta, por lo que no se describirá que es lo que hace cada una de ellas, y solo se dirá que existen 4 iteraciones principales: las dos primeras basadas precisamente en el algoritmo descrito en el Capítulo 2 para la formación de las matrices Zbus de secuencia cero y positiva respectivamente; las dos siguientes para el cálculo de las corrientes de corto circuito tanto para el caso de falla trifásica como monofásica a tierra, a partir de las matrices antes formadas, siendo estos dos últimos cálculos, el objetivo del presente programa.

Si el sistema se encuentra formado por 5 nodos y 7 líneas (que unen a dichos nodos) como el ejemplo resuelto, los resultados obtenidos son los siguientes:

Corriente de falla en el nodo 2 y corrientes en todas las líneas.

Corriente de falla en el nodo 3 y corrientes en todas las líneas.

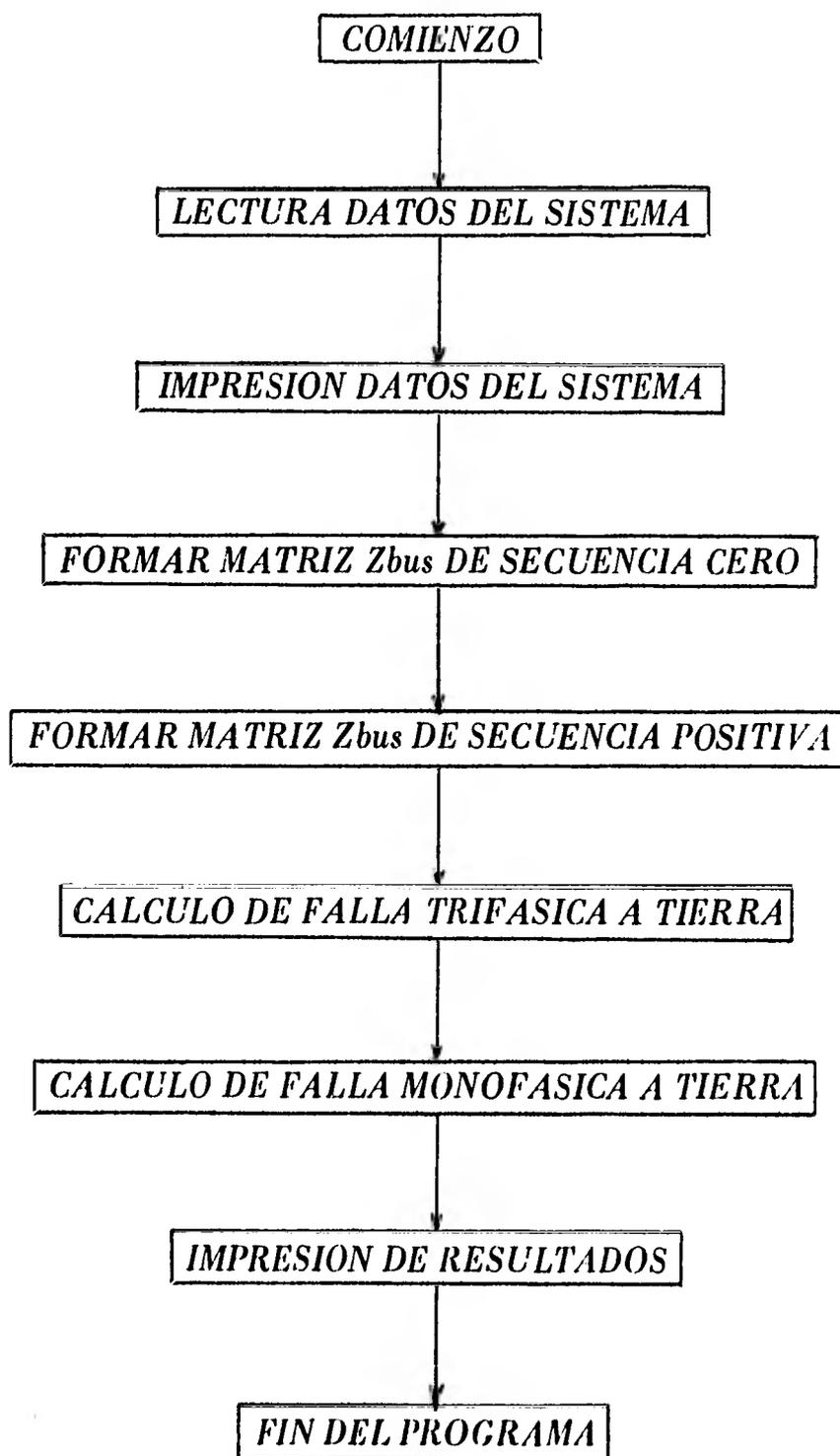
Corriente de falla en el nodo 4 y corrientes en todas las líneas.

Corriente de falla en el nodo 5 y corrientes en todas las líneas.

Primero entrega los resultados para una falla trifásica y posteriormente para una falla monofásica a tierra.

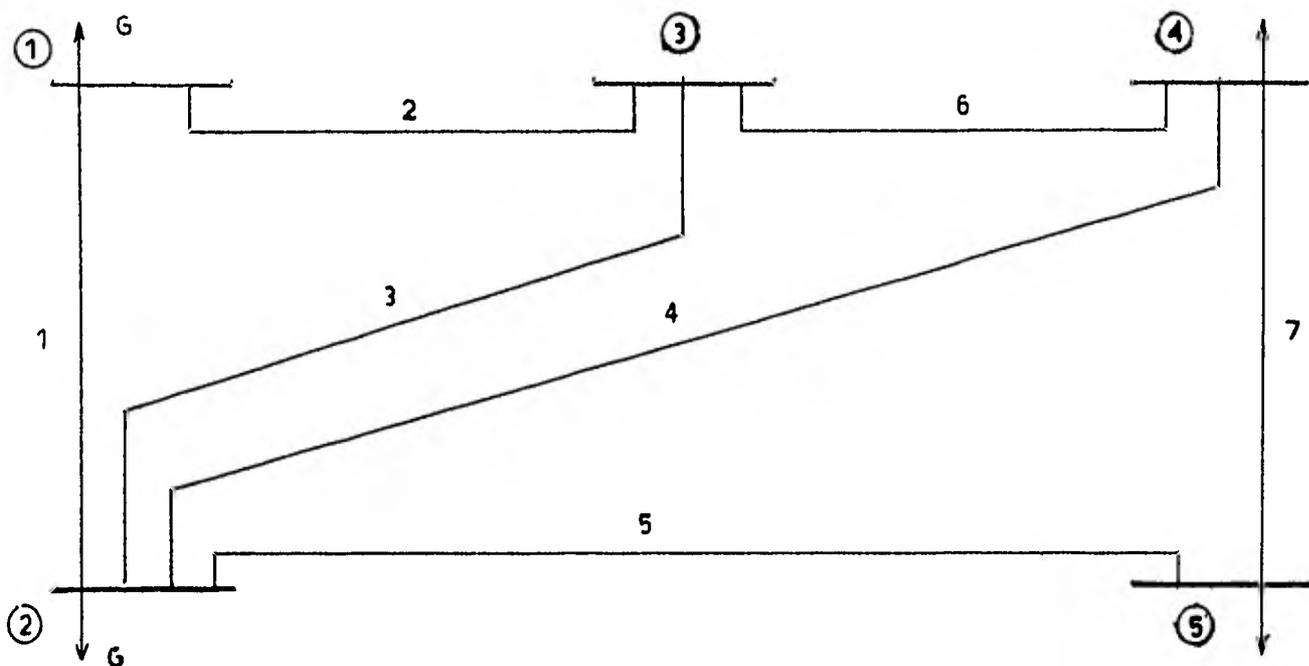
A continuación se presenta un diagrama de flujo el cual describe en forma genérica el comportamiento del programa.

DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL PROGRAMA DE CORTO CIRCUITO



5.2 EJEMPLO ILUSTRATIVO

El funcionamiento del Programa, será ilustrado para el Sistema de Potencia que se muestra a continuación:



Como puede observarse, el Sistema de potencia, se encuentra formado por 5 nodos (números encerrados en círculos), de los cuales 2 son de generación (1 y 2), y 4 son de carga (3, 4 y 5); puede observarse que el nodo 2 es tanto de generación como de carga.

Logicamente existe un nodo de referencia, que en este caso particular fue elegido el número 1.

Los datos de los nodos son los siguientes:

Nodo	Voltaje	GENERACION		CARGA	
		Megawatts	Megavars	Megawatts	Megavars
1	$1.0 + j 0.0$	100	50	0	0
2	$1.0 + j 0.0$	100	50	20	10
3	$1.0 + j 0.0$	0	0	45	15
4	$1.0 + j 0.0$	0	0	40	5
5	$1.0 + j 0.0$	0	0	60	10

Por lo que se refiere a las líneas, son 7 las que componen el sistema, los datos de las mismas son los siguientes:

<i>Elemento (NELEM.)</i>	<i>Nodo – Nodo (IP) – (IQ)</i>	<i>Impedancia de secuencia 0 (ZEL 0)</i>	<i>Impedancia de secuencia positiva ZEL 1)</i>
1	1 – 1	0.0	0.0
2	1 – 2	0.02	0.50
3	1 – 3	0.08	0.25
4	2 – 3	0.06	0.40
5	2 – 4	0.06	0.35
6	2 – 5	0.04	0.60
7	3 – 4	0.10	0.45
8	4 – 5	0.20	0.07

Puede observarse en la anterior tabla de datos que aparecen 8 elementos en vez de los 7 mostrados en el diagrama del ejemplo, esto obedece a un artificio propio del programa, el cual consiste en agregar un elemento ficticio al sistema con el fin de referir el primer nodo en la lista (nodo número ①).

En consecuencia este elemento ficticio debe anteceder a cualquier otro (incluso el primero conectado al nodo ①). Los valores para las impedancias de secuencia cero y positiva de este elemento valen cero.

Es por esta razón que se define la variable NELEM., (igual al número de elementos del sistema + 1 para tomar en cuenta el elemento ficticio adicional.

A continuación se muestra un listado del programa fuente así como los datos del presente ejemplo; posteriormente aparecen los resultados: primero los correspondientes al estudio de falla trifásica y enseguida los de falla monofásica a tierra.

```

DIMENSION IBUS(99),ZBUS0(99,99),ZBUS1(99,99),ZLLO(99),ZLL1(99)
DIMENSION IP(99),IQ(99),ZELO(99),ZEL1(99)
5000 READ(5,6000) NBUS,NELEM
6000 FORMAT (I2,I2)
C
C      NBUS = NUMERO DE NODOS
C
C      NELEM = NUMERO DE ELEMENTOS + 1
C
C      DO 5500 I=1,NELEM
C
C      LECTURA DE DATOS PARA CADA ELEMENTO
C
5500 READ (5,6500) IP(I),IQ(I),ZELO(I),ZEL1(I)
6500 FORMAT (I2,I2,F15.4,F15.4)
C
C      IP E IQ SON LOS NODOS TERMINALES DEL ELEMENTO CON IMPEDANCIA
C      ZELO Y ZEL1
C
C      IF(NBUS.EQ.0) GO TO 60
C      WRITE(6,1000)
1000 FORMAT(1H1,/,53X,'*****',/,53X,'*           *',/,53X,
*'* DATOS *',/,53X,'*           *',/,53X,'*****',//)
C      WRITE(6,1010) NBUS,NELEM
1010 FORMAT(//,6X,'*** NUMERO DE NODOS = ',I2,' NUMERO DE',
*' ELEMENTOS = ',I2,' ***',//)
C      WRITE(6,1020)
C
C      IMPRIME EL ENCABEZADO PARA DATOS
C
1020 FORMAT(///,9X,' NODO A NODO ',11X,' IMP SEC 0 ',
*9X,' IMP SEC POS ')
C      DO 1 I=2,NELEM
C      IF(I.EQ.100) WRITE (6,1020)
C      IF(I.EQ.50) WRITE (6,1020)
1030 FORMAT(10X,I2,7X,I2,8X,F15.4,5X,F15.4)
C
C      IMPRIME LOS DATOS DE CADA ELEMENTO
C
1 WRITE (6,1030) IP(I),IQ(I),ZELO(I),ZEL1 (I)
C
C      COMIENZA EL CALCULO DE LA MATRIZ ZBUS0
C
C      MBUS=0
C      DO 3 I=1,NELEM
C
C      DETERMINA SI EL ELEMENTO ESTA CONECTADO AL NODO DE REFERENCIA
C
C      IF(IP(I)-1) 4,5,4
C      5 CONTINUE
C
C      IP ES NODO DE REFERENCIA
C
C      MBUS=MBUS+1
C      IBUS(MBUS)=IQ(I)
C      MM1=MBUS-1
C      IF(MM1)35,35,36
C      36 DO 8 J=1,MM1
C      8 ZBUS0(J,MBUS)=0.0
C      ZBUS0(MBUS,J)=0.0
C      35 CONTINUE
C      ZBUS0(MBUS,MBUS)=ZELO(I)
C      GO TO 3
C      4 IF(PBUS) 19,19,32
C
C      IP NO ES NODO DE REFERENCIA

```

```

C
19 WRITE(6,520)
520 FORMAT (/,10X,'PRIMER ELEMENTO EN LA LISTA NO ESTA CONECTADO'
*' A LA REFERENCIA')
GO TO 60
32 DO 11 J=1,MBUS
IF(IQ(I)-IBUS(J)) 11,12,11
C
C DETERMINA SI IQ ES BUS NUEVO
C
11 CONTINUE
DO 30 J=1,MBUS
IF(IP(I)-IBUS(J)) 30,34,30
30 CONTINUE
540 WRITE (6,530)
530 FORMAT(/,10X,'IPBUS=',I2,' NO ESTA EN LISTA DE BUSES')
GO TO 60
34 CONTINUE
C
C ELEMENTO ES UNA RAMA IQ ES BUS NUEVO
C
MBUS=MBUS+1
IBUS(MBUS)=IQ(I)
MH1= MBUS - 1
DO 42 L= 1,MBUS
IF (IP(I)-IBUS(L)) 42,43,42
42 CONTINUE
510 WRITE(6,501)
501 FORMAT('LOS DATOS NO ESTAN EN ORDEN ADECUADO')
GO TO 60
43 IPBUS= L
IF(MM1) 37,37,38
38 DO 13 J=1,MM1
ZBUS0(J,MBUS)=ZBUS0(J,IPBUS)
13 ZBUS0(MBUS,J)=ZBUS0(J,MBUS)
37 CONTINUE
ZBUS0(NBUS,MBUS)=ZBUS0(IPBUS,MBUS)+ ZELO(I)
GO TO 3
C
C ELEMENTO ES UNA CUERDA , IQ NO ES BUS NUEVO
C
12 DO 40 L= 2,MBUS
IF(IP(I)-IBUS(L)) 40,41,40
40 CONTINUE
GO TO 510
41 IPBUS= L
IQBUS= J
DO 14 K=1,MBUS
14 ZLLO(K)= ZBUS0(K,IPBUS)-ZBUS0(K,IQBUS)
MP1 = MBUS+1
ZLLO(MP1) = ZLLO(IPBUS)-ZLLO(IQBUS)+ZELO(I)
DO 15 K=2,MBUS
DO 15 L = K,MBUS
FACTO = ZLLO(K) * ZLLO(L)
ZBUS0(K,L) = ZBUS0(K,L)-(FACTO/ZLLO(MP1))
15 ZBUS0(L,K) = ZBUS0(K,L)
3 CONTINUE
C
C TERMINA EL CALCULO DE LA MATRIZ ZBUS0
C COMIENZA EL CALCULO DE LA MATRIZ ZBUS1
C
MBUS = 0
DO 300 I= 1,NELEM
C
C DETERMINA SI EL ELEMENTO ESTA CONECTADO AL NODO DE REFERENCIA
C

```

```

IF(IP(I)-1) 400,500,400
500 CONTINUE
C
C   IP ES NODO DE REFERENCIA
C
    MBUS=MBUS+1
    IBUS(MBUS)=IQ(I)
    MM1 = MBUS-1
    IF(MM1) 350,350,360
360 DO 80 J=1,MM1
    ZBUS1(J,MBUS) = 0.0
    80 ZBUS1(MBUS,J) = 0.0
350 CONTINUE
    ZBUS1(MBUS,MBUS) = ZEL1(I)
    GO TO 300
400 IF(MBUS) 190,190,320
C
C   IP NO ES NODO DE REFERENCIA
C
190 GO TO 19
320 DO 110 J= 1,MBUS
    IF(IQ(I)-IBUS(J)) 110,120,110
C
C   DETERMINA SI IQ ES BUS NUEVO
C
110 CONTINUE
    DO 310 J=1,MBUS
    IF (IP(I)-IBUS(J)) 310,340,310
310 CONTINUE
    GO TO 540
340 CONTINUE
C
C   ELEMENTO ES RAMA IQ ES BUS NUEVO
C
    MBUS = MBUS+1
    IBUS(MBUS)= IQ(I)
    MM1 =MBUS-1
    DO 420 L=1,MBUS
    IF (IP(I)-IBUS(L)) 420,430,420
420 CONTINUE
    GO TO 510
430 IPBUS = L
    IF(MM1) 370,370,380
380 DO 130 J=1,MM1
    ZBUS1(J,MBUS)=ZBUS1(J,IPBUS)
130 ZBUS1(MBUS,J) = ZBUS1(J,MBUS)
370 CONTINUE
    ZBUS1(MBUS,MBUS)= ZBUS1(IPBUS,MBUS) + ZEL1(I)
    GO TO 300
C
C   ELEMENTO ES UNA CUERDA , IQ NO ES BUS NUEVO
C
120 DO 401 L=2,MBUS
    IF (IP(I)-IBUS(L)) 401, 410, 401
401 CONTINUE
    GO TO 510
410 IPBUS = L
    IQBUS = J
    DO 140 K=1,MBUS
140 ZLL1(K) = ZBUS1(K,IPBUS) - ZBUS1(K,IQBUS)
    MP1 = MBUS + 1
    ZLL1(MP1) = ZLL1(IPBUS) - ZLL1(IQBUS) + ZEL1(I)
    DO 150 K = 2,MBUS
    DO 150 L = K,MBUS
    FACT1 = ZLL1(K) * ZLL1(L)
    ZBUS1(K,L) = ZBUS1(K,L) - (FACT1/ZLL1(MP1))

```

```

150 ZBUS1(L,K) = ZBUS1(K,L)
300 CONTINUE
C
C   TERMINA EL CALCULO DE LA MATRIZ ZBUS1
C
C
C   COMIENZA EL CALCULO DE FALLA TRIFASICA A TIERRA
C
C   CALCULO DE LA CORRIENTE TOTAL DE FALLA
C
DO 2010 I = 2,MBUS
LBUS3 = IBUS(I)
COFA3 = 1.0/ZBUS1(I,I)
WRITE (6,2500)
2500 FORMAT(1H1,///,5X,97(1H-))
WRITE (6,2510) LBUS3,COFA3
2510 FORMAT(/,5X,'FALLA TRIFASICA A TIERRA EN EL NODO ',I2,5X,'=',
*F8.4,3X,'EN POR UNIDAD')
WRITE (6,2520)
2520 FORMAT(/,5X,97(1H-))
WRITE (6,2530)
2530 FORMAT(//,15X,'CORRIENTES DE LINEAS',/,15X,' DE NODO A NODO',
*10X,'EN POR UNIDAD')
C
C   CALCULO DE LAS CORRIENTES EN LAS DEMAS RAMAS DE LA RED
C
DO 2020 J = 2,NELEM
IF (IP(J)-1) 2310 ,2320,2310
2320 DO 2030 K = 2,MBUS
IF (IQ(J) - IBUS(K)) 2030,2340,2030
2030 CONTINUE
2340 FACT3 = ZBUS1 (I,K) / ZBUS1 (I,I)
GO TO 2800
2310 DO 2040 K = 2,MBUS
IF (IP(J)-IBUS(K)) 2040,2050,2040
2040 CONTINUE
2050 DO 2060 L = 2,MBUS
IF (IQ(J)-IBUS(L))2060,2070,2060
2060 CONTINUE
2070 FACT3 = (ZBUS1(I,L)-ZBUS1(I,K))/ZBUS1(I,I)
2800 COFA3 = FACT3/ZEL1(J)
WRITE (6,2540) IP(J) ,IQ(J), COFA3
2540 FORMAT(20X,I2,8X,I2,11X,E12.5)
2020 CONTINUE
2010 CONTINUE
C
C   COMIENZA EL CALCULO DE FALLA DE UNA FASE A TIERRA
C
C   CALCULO DE LA CORRIENTE TOTAL DE FALLA
C
DO 3010 I = 2,MBUS
LBUS1 = IBUS(I)
COFA1 = 3.0 / ( ZBUS0(I,I) + 2.0 * ZBUS1(I,I))
WRITE (6,3500)
3500 FORMAT (1H1,///,5X,97(1H-))
WRITE (6,3510) LBUS1,COFA1
3510 FORMAT(/,5X,'FALLA DE FASE A TIERRA EN EL NODO ',I2,5X,'=',
*F8.4,3X,'EN POR UNIDAD')
WRITE (6,3520)
3520 FORMAT (/,5X,97(1H-))
WRITE (6,3530)
3530 FORMAT(//,15X,'CORRIENTES DE LINEAS',/,15X,' DE NODO A NODO',
*10X,'EN POR UNIDAD')
C
C   CALCULO DE LAS CORRIENTES EN LAS DEMAS RAMAS DE LA RED
C

```

```

DO 3020 J= 2,NELEM
IF (IP(J)-1) 3310, 3320,3310
3320 DO 3030 K = 2,MBUS
IF (IQ(J)-IBUS(K)) 3030,3340,3030
3030 CONTINUE
3340 FACT1 = ZBUS1 (I,K) / (ZBUS0(I,I) + 2.0 * ZBUS1(I,I))
GO TO 3800
3310 DO 3040 K=2,MBUS
IF (IP(J) - IBUS(K)) 3040,3050,3040
3040 CONTINUE
3050 DO 3060 L = 2,MBUS
IF (IQ(J) - IBUS(L)) 3060,3070,3060
3060 CONTINUE
3070 FACT1=(ZBUS1(I,L)-ZBUS1(I,K))/(ZBUS0(I,I)+2.0*ZBUS1(I,I))
3800 COFA1 = 3.0 * FACT1 / ZEL1(J)
WRITE (6,3540) IP(J) , IQ(J), COFA1
3540 FORMAT(20X,I2,8X,I2,11X,E12.5)
3020 CONTINUE
3010 CONTINUE
C
C TERMINA EL CALCULO DE FALLA DE UNA FASE A TIERRA
C
60 CONTINUE
GO TO 5000
STOP
END

```

 * *
 * DATOS *
 * *

*** NUMERO DE NODOS = 5 NUMERO DE ELEMENTOS = 8 ***

NODO	A	NODO	IMP SEC 0 [\]	IMP SEC POS
1		2	0.0200	0.5000
1		3	0.0800	0.2500
2		3	0.0600	0.4000
2		4	0.0600	0.3500
2		5	0.0400	0.6000
3		4	0.1000	0.4500
4		5	0.2000	0.0700

 FALLA TRIFASICA A TIERRA EN EL NODO 2 = 3.9927 EN POR UNIDAD

CORRIENTES DE LINEAS

DE NODO	A	NODO	EN POR UNIDAD
1		2	0.20000E+01
1		3	0.19927E+01
2		3	-0.12546E+01
2		4	-0.48483E+00
2		5	-0.25327E+00
3		4	0.73809E+00
4		5	0.25327E+00

 FALLA TRIFASICA A TIERRA EN EL NODO 3 = 5.3301 EN POR UNIDAD

CORRIENTES DE LINEAS

DE NODO	A	NODO	EN POR UNIDAD
1		2	0.13301E+01
1		3	0.40000E+01
2		3	0.83741E+00
2		4	0.32361E+00
2		5	0.16905E+00
3		4	-0.49266E+00
4		5	-0.16905E+00

FALLA TRIFASICA A TIERRA EN EL NODO 4 = 2.9483 EN POR UNIDAD

CORRIENTES DE LINEAS			EN POR UNIDAD
DE NODO	A	NODO	
1		2	0.12263E+01
1		3	0.17221E+01
2		3	-0.45653E+00
2		4	0.11054E+01
2		5	0.57742E+00
3		4	0.12655E+01
4		5	-0.57742E+00

FALLA TRIFASICA A TIERRA EN EL NODO 5 = 2.6572 EN POR UNIDAD

CORRIENTES DE LINEAS			EN POR UNIDAD
DE NODO	A	NODO	
1		2	0.11288E+01
1		3	0.15284E+01
2		3	-0.45569E+00
2		4	0.85841E+00
2		5	0.72604E+00
3		4	0.10727E+01
4		5	0.19311E+01

FALLA DE FASE A TIERRA EN EL NODO 2 = 5.7922 EN POR UNIDAD

CORRIENTES DE LINEAS				
DE	NODO	A	NODO	EN POR UNIDAD
	1		2	0.29014E+01
	1		3	0.28908E+01
	2		3	-0.18200E+01
	2		4	-0.70334E+00
	2		5	-0.36742E+00
	3		4	0.10708E+01
	4		5	0.36742E+00

FALLA DE FASE A TIERRA EN EL NODO 3 = 7.4717 EN POR UNIDAD

CORRIENTES DE LINEAS				
DE	NODO	A	NODO	EN POR UNIDAD
	1		2	0.18645E+01
	1		3	0.56072E+01
	2		3	0.11739E+01
	2		4	0.45364E+00
	2		5	0.23698E+00
	3		4	-0.69061E+00
	4		5	-0.23698E+00

FALLA DE FASE A TIERRA EN EL NODO 4 = 4.4225 EN POR UNIDAD

CORRIENTES DE LINEAS			EN POR UNIDAD
DE NODO	A NODO		
1	2		0.18394E+01
1	3		0.25831E+01
2	3		-0.68479E+00
2	4		0.16580E+01
2	5		0.86614E+00
3	4		0.18983E+01
4	5		-0.86613E+00

FALLA DE FASE A TIERRA EN EL NODO 5 = 3.9150 EN POR UNIDAD

CORRIENTES DE LINEAS			EN POR UNIDAD
DE NODO	A NODO		
1	2		0.16631E+01
1	3		0.22519E+01
2	3		-0.67140E+00
2	4		0.12648E+01
2	5		0.10697E+01
3	4		0.15805E+01
4	5		0.28453E+01

BIBLIOGRAFIA

1. *"Analysis of Faulted Power Systems"*, Paul M. Anderson, Iowa State University Press, Iowa, U. S. A., 1973.
2. *"Circuitos Eléctricos"* Joseph A. Edminister, Libros Mc Graw Hill, México, 1969.
3. *"Computer Methods in Power System Analysis"*, Glenn W. Stagg and Ahmed H. El - Abiad, Mc Graw Hill Book Company, New York, U. S. A., 1968.
4. *"Digital Calculation of Line - to - Ground Short Circuits by Matrix Method"*, Ahmed H. El - Abiad, AIEE Vol. 79 Part. III, New York, U. S. A., 1960.
5. *"Electric Energy Systems Theory"*, Olle I. Elgerd, Mc Graw Hill Book Company, New York, U. S. A., 1971.
6. *"Elements of Power System Analysis"*, William D. Stevenson, Jr., Mc Graw Hill Book Company, New York, U. S. A., 1975.
7. *"Programación FORTRAN IV"*, Daniel D. Mc. Cracken, Limusa Niley, S.A., México, 1970.
8. *"Redes Eléctricas Vol. II"*, Jacinto Viqueira Landa, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A., México, 1973.