



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

MANUAL DE USUARIO PARA PROGRAMAS DE FALLAS TRIFASICAS Y MONOFASICAS



MANUAL DE USUARIO PARA PROGRAMAS DE FALLAS TRIFASICAS Y MONOFASICAS

RODOLFO LORENZO BAUTISTA
LEONEL MONROY DEL RIO

DIVISION DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

FI/DIME/87-056

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

APUNTE
82-C

1987
G.- 612243

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.
FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



CLASIFICACIÓN

FACULTAD INGENIERIA

MANUAL DE USUARIO PARA PROGRAMAS DE FALLAS TRIFASICAS Y MONOFASICAS

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio, sin autorización escrita del editor.

DERECHOS RESERVADOS © 1987, respecto a la primera edición en español por la FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO Ciudad Universitaria, México 20, D.F.

COMISIÓN DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA

P R O L O G O

G.-612243

El cálculo de parámetros de líneas de transmisión, sobrevoltajes y el análisis de fallas y estabilidad de los sistemas eléctricos, son algunos de los temas de la asignatura *sistemas eléctricos de potencia* que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y cuya finalidad es analizar y optimizar los sistemas, con el objeto de mejorar su funcionamiento y asegurar la continuidad en el suministro de energía eléctrica por períodos de tiempo cada vez mayores.

La materia *sistemas eléctricos de potencia*, correspondiente al área de la ingeniería eléctrica, se relaciona con otras áreas de la ingeniería como la electrónica de potencia, la ingeniería de control y la computación. Esta última ha permitido el desarrollo de programas para el análisis de los sistemas eléctricos, verificando en tiempos relativamente cortos el comportamiento de éstos bajo diferentes condiciones de operación.

Este manual presenta una introducción referida a las componentes simétricas y su aplicación al análisis de fallas trifásicas y monofásicas, así como la secuencia a seguir para la utilización de los programas de computadora *FATRI* y *FAMON* con la interpretación y análisis de los resultados correspondientes.

Se espera que el alumno aplique los conocimientos adquiridos en sus clases de teoría.

Los programas en forma de paquetes de biblioteca se encuentran disponibles en el Centro de Cálculo de la Facultad de Ingeniería.

Expresamos nuestro agradecimiento a los ingenieros Javier Romeo Arteaga Tijerina, Gabriel Méndez Arceo y Guillermo Tercero Colín por su colaboración en la realización de este manual y de manera especial a las licenciadas Irma Hinojosa Félix y María Cuairán Ruidíaz por su participación en la estructuración didáctica, así como a la pasante Elvia Angélica Torres Rojas por la revisión técnica.

Finalmente invitamos a los usuarios, para que nos hagan llegar al Departamento de Ingeniería Eléctrica, los comentarios y sugerencias que estimen convenientes a fin de mejorar las futuras ediciones

ING. RODOLFO LORENZO BAUTISTA

ING. LEONEL MONROY DEL RIO

de las relaciones con otras áreas de control de la producción de energía eléctrica en el sistema de potencia.

una producción de energía eléctrica en el sistema de potencia.

se espera que el alumno aplique los conocimientos adquiridos en sus cursos.

Las pruebas en forma de paquetes de preguntas se encuentran distribuidas en el Centro de Estudios de Ingeniería Eléctrica.

C O N T E N I D O

| | |
|---|-----|
| PROLOGO | III |
| CONTENIDO | V |
| I. GENERALIDADES | 1 |
| II. COMPONENTES SIMETRICAS. | 7 |
| II.1 DIAGRAMAS DE SECUENCIAS | 13 |
| III. OBTENCION DE LAS MATRICES DE ADMITANCIA NODAL PARA SECUENCIAS POSITIVA, NEGATIVA Y CERO | 17 |
| III.1 FORMACION DE LAS MATRICES DE ADMITANCIA NODAL Y bus | 17 |
| III.2 FORMACION DE LAS MATRICES DE IMPEDANCIA NODAL Z bus | 18 |
| IV. CALCULO ELECTRICO DE LAS REDES DESEQUILI- BRADAS. | 21 |
| V. VOLTAJES Y APORTACIONES DE CORRIENTE EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA. | 45 |
| VI. EJEMPLO DE APLICACION | 49 |
| APENDICE. CASOS ESPECIALES DE TRANSFORMADORES | 71 |

I. GENERALIDADES

El análisis de sistemas eléctricos, trifásicos, equilibrados se reduce al análisis de un sistema monofásico. Ahora bien, cuando se produce un desequilibrio o falla en sistemas monofásicos o trifásicos es necesario un estudio que proporcione información sobre corrientes y voltajes del sistema en condiciones de falla ya que, como se sabe por estudios anteriores, cada fase tiene un valor de voltaje y corriente diferente, además de las contribuciones de corriente y voltaje que existan entre ellas.

Por esta razón, un programa de computadora que analice fallas en sistemas eléctricos, es una herramienta muy útil para cualquier persona interesada en el estudio de fallas en sistemas eléctricos; dicho programa proporciona mayor información en menor tiempo sobre el sistema eléctrico en desequilibrio.

El estudio de corto circuito, además de proporcionar información sobre corrientes y voltajes de un sistema eléctrico durante condiciones de falla, se requiere también para:

- Determinar las características de capacidad interruptiva y momentánea de interruptores y otros dispositivos de protección localizados en el sistema.
- Calcular los esfuerzos dinámicos en barras de subestaciones y tableros.
- Seleccionar conductores y diseñar un adecuado sistema de relevadores de protección, el cual deberá reconocer la existencia de la falla e iniciar la operación de los dispositivos de protección, asegurando así la mínima interrupción y evitando daños a los equipos.

ANALISIS DE FALLAS

Un diagrama unifilar es la representación de un sistema eléctrico balanceado (una, dos, tres fases) mediante una sola fase o hilo. Esta representación ayuda a la simplificación de los cálculos de voltajes, corrien

tes y potencias de los sistemas eléctricos balanceados, en los que cada fase tiene el mismo valor de voltaje (V), corriente (I) y potencia (S).

En este diagrama deben indicarse todos los elementos que integran el sistema, tales como generadores, transformadores, líneas de transmisión y alimentadores, reactores, motores, etc., con sus voltajes y potencias nominales, así como sus impedancias o reactividades referidas a sus características eléctricas nominales.

En el diagrama unifilar también se deben señalar las diferentes fallas que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia, la mayoría de éstas son asimétricas y pueden consistir en corto circuitos asimétricos. Como consecuencia de dichas fallas, circulan corrientes desequilibradas, por lo cual es necesario estudiar estos casos de desequilibrio causados por corto circuitos.

Para un sistema trifásico, las fallas pueden ser:

- a) Falla de una fase a tierra
- b) Falla de dos fases a tierra
- c) Falla entre dos fases
- d) Falla trifásica

de las cuales se consideran dos casos:

- i) Falla franca
- ii) Falla a través de una impedancia

este último caso se presenta, por ejemplo, cuando la falla se establece a través de un arco eléctrico.

Comúnmente los tipos de fallas estudiados son trifásicos y monofásicos.

De acuerdo con el tipo de análisis, se deben seleccionar del diagrama unifilar las reactividades o impedancias apropiadas para la realización del estudio; así por ejemplo, para una falla trifásica se seleccionan únicamente reactividades o impedancias de secuencia positiva (+), mientras que para

el cálculo de una falla de línea a tierra se seleccionan reaccancias o impedancias de secuencia positiva (+), negativa (-) y cero (0).

La impedancia o reactancia de los elementos pasivos (transformadores, líneas de transmisión, cables) se considera constante a través del tiempo.

La impedancia o reactancia de los elementos activos (máquinas rotatorias) se representa en estos estudios como una fuente de voltaje constante en serie con su impedancia, la cual varía a través del tiempo, después de ocurrida la falla.

Estudio de estado

Para el estudio y solución de este tipo de fallas se utiliza el método estándar de *en por unidad* (en p.u.), debido a que el cálculo de los parámetros de los sistemas eléctricos se simplifica si todas las cantidades eléctricas (impedancias, voltajes, corrientes, potencias, etc.), se expresan como el cociente de la cantidad eléctrica y una magnitud de referencia (llamada base) de las mismas unidades.

$$\text{Valor en p.u.} = \frac{\text{valor real}}{\text{valor base}} \quad \dots (I)$$

Con este método se tienen las siguientes ventajas:

- los parámetros de los elementos del sistema tienden a caer en un intervalo relativamente angosto, lo que hace resaltar estos valores y permite detectar errores,
- se eliminan los transformadores ideales que aparecen en la red,
- el voltaje en las diferentes secciones de la red es normalmente cercano a la unidad,
- los fabricantes de equipo eléctrico expresan normalmente la impedancia de sus aparatos en por ciento o en por unidad de los valores nominales que figuran en la placa de características.

Sin embargo, también el método presenta las siguientes desventajas:

- el sistema modifica los componentes de los circuitos equivalentes, haciéndolos más abstractos,
- algunas veces los desplazamientos de fase que están claramente presentes en un circuito normal, desaparecen en el circuito en por unidad.

En el sistema en por unidad existen cuatro cantidades base:

- Potencia base
- Voltaje base
- Corriente base
- Impedancia base

Usualmente se selecciona un valor conveniente para la potencia base en volt-ampere y un voltaje base en determinado nivel, quedando establecidos los voltajes base en otros niveles por la relación de transformación de los transformadores.

Cabe aclarar que el sistema en por unidad es simplemente un método de normalización.

En las fórmulas siguientes, los voltajes base son voltajes de línea a línea en KV y la potencia base es la potencia trifásica en KVA o MVA.

La corriente base y la impedancia base en cada nivel se obtienen a partir de las relaciones:

$$S = V I \quad \text{y} \quad V = I Z$$

de donde, para un sistema trifásico se obtienen las siguientes relaciones:

$$I_{\text{base}} = \frac{KVA_{\text{base}}}{3KV_{\text{base}}} = \frac{MVA_{\text{base}} \times 1000}{3 KV_{\text{base}}} \quad \dots \text{ (II)}$$

$$Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}} = \frac{MVA_{base} \times 1000}{MVA_{base}} \quad \dots \text{ (III)}$$

Cuando las impedancias de los elementos del sistema se expresan en ohms, se convierten en valores en por unidad mediante la siguiente relación:

$$Z_{p.u.} = \frac{\text{Impedancia en ohms} \times MVA_{base}}{(KV_{base})^2} \quad \dots \text{ (IV)}$$

La impedancia de los transformadores, expresada en por ciento y referida a su potencia nominal en KVA, se convierte en valor en por unidad de acuerdo con la siguiente relación:

$$Z_{p.u.} = \frac{\text{Impedancia en } \% \times KVA_{base}}{KVA_{transformador} \times 100} \quad \dots \text{ (V)}$$

La reactancia de los motores y generadores expresada en por unidad y referida a su potencia en KVA, se convierte en la nueva base con la relación:

$$X_{p.u.} = \frac{X_{p.u. \text{ Motor}} \times KVA_{base}}{KVA_{Motor}} \quad \dots \text{ (VI)}$$

Las reactancias para representar las máquinas rotatorias de la compañía suministradora, se determinan suponiendo que los MVA disponibles toman el valor de 1.0 en por unidad referida a una base unitaria en MVA, o que una potencia de 1.0 en por unidad corresponde a una reactancia de 1.0 en p.u. a un voltaje de 1.0 en p.u.

II. COMPONENTES SIMÉTRICAS

:29

Al ocurrir una falla en un sistema trifásico balanceado y dependiendo del tipo de ésta, las magnitudes y posiciones de los voltajes y corrientes varían, convirtiéndose en un sistema desbalanceado, cuyo análisis para la determinación de estas magnitudes y ángulos requiere del método denominado *componentes simétricas*.

Las componentes simétricas son una herramienta matemática, que se aplican comúnmente en el cálculo de fallas en un sistema eléctrico de potencia. El método consiste en que cualquier sistema desbalanceado de N fasores, puede ser resuelto como la suma de N sistemas de fasores balanceados, llamados componentes simétricas de los fasores originales (Teorema de Fortes cue).

Por lo tanto, los fasores desequilibrados de un sistema trifásico pueden descomponerse en tres sistemas equilibrados de fasores que son: un sistema de secuencia positiva (1), un sistema de secuencia negativa (2) y otro de secuencia cero (0), que sumados vectorialmente dan como resultado el sistema de fasores desbalanceado original.

Este conjunto de componentes balanceados son:

1. De secuencia positiva, que consiste de tres fasores de igual magnitud, separados cada uno por 120° y con la misma secuencia de fases que los fasores originales (abc).
2. De secuencia negativa, que consiste de tres fasores de igual magnitud, separados cada uno por 120° y con la secuencia de fases opuesta de los fasores originales (acb).
3. De secuencia cero, que consiste de tres fasores de igual magnitud y con cero grados de espaciamento entre ellos (están en fase).

Esto es:

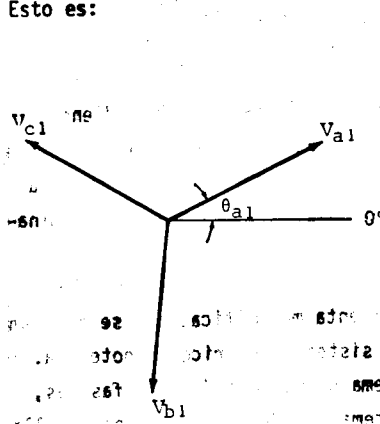


Figura 1 Secuencia positiva

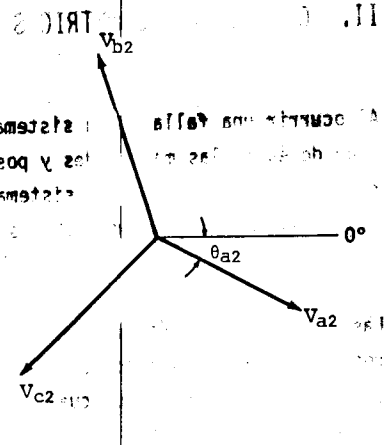


Figura 2 Secuencia negativa

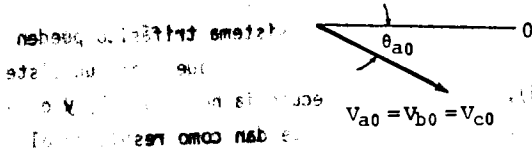


Figura 3 Secuencia cero

Y de esta forma, los fasores desbalanceados originales son iguales a la suma de sus componentes.

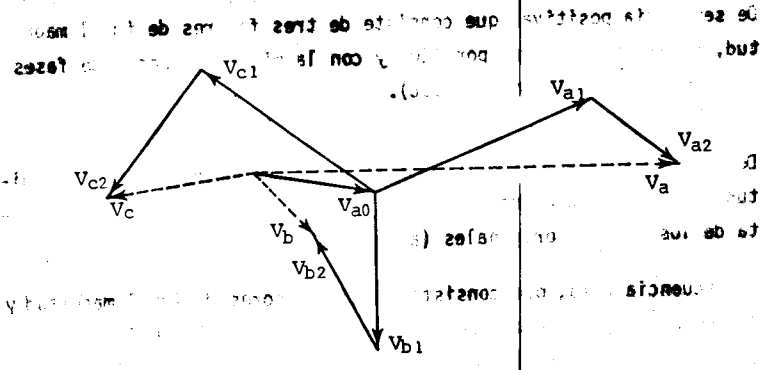


Figura 4

En donde:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

Por otro lado, trabajando con cantidades trifásicas, es conveniente tener un operador fasorial que adelanta 120° al ángulo de fase de cualquier fasor y mantiene constante su magnitud. Llamando a este operador o fasor a , se tiene:

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j2\pi/3}$$

El diagrama fasorial del operador a es por lo tanto:

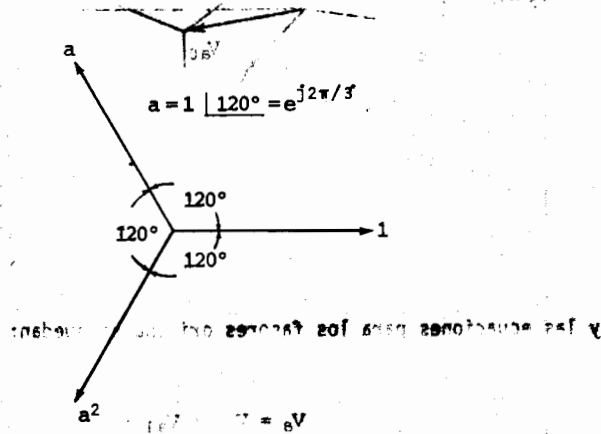


Figura 5

Es conveniente tener presente que el operador a rota un fasor por $+120^\circ$.

Utilizando el operador a en los diagramas fasoriales de secuencia positiva, negativa y cero, se tiene:

$$V_{b1} = a^2 V_{a1}$$

$$V_{b2} = a V_{a2}$$

$$V_{b0} = V_{a0}$$

$$V_{c1} = a V_{a1}$$

$$V_{c2} = a^2 V_{a2}$$

$$V_{c0} = V_{a0}$$

gráficamente:

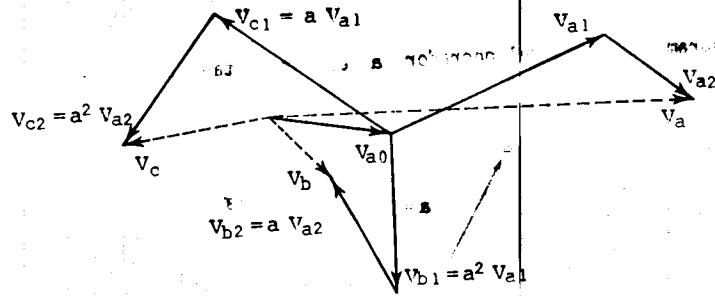


Figura 6

y las ecuaciones para los fasores originales quedan:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$$

$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}$$

En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

y si se hace:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

en donde se verifica que:

$$A^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones para los fasores originales en forma reducida quedan:

$$V_{abc} = A V_{a012}$$

premultiplicando ambos lados de la última ecuación por A^{-1} , se tiene:

$$V_{a012} = A^{-1} V_{abc}$$

esto es:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Aplicando esto mismo para las corrientes, se llega a:

$$I_{abc} = A I_{a012}$$

esto es:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \\ I_c &= I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \end{aligned}$$

y al igual que para los voltajes:

$$I_{a012} = A^{-1} I_{abc}$$

esto es:

$$\begin{aligned} I_{a0} &= \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \\ I_{a1} &= \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) \\ I_{a2} &= \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \end{aligned}$$

Ahora bien, en un sistema trifásico la corriente del neutro es:

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

reemplazando en la última ecuación por y como:

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

en donde:

$$I_n = 3 I_{a0}$$

II.1 DIAGRAMAS DE SECUENCIAS

Una condición para un sistema balanceado o simétrico es que las tres componentes de secuencia positiva, negativa y cero sean independientes entre sí, por lo tanto, al analizar una falla es necesario formar los tres diagramas de secuencias. En el diagrama de secuencia positiva se deberán conocer todos los voltajes en por unidad de los nodos del sistema; en caso contrario, se asignará el valor de 1.0 p.u., a cada nodo, debido a que el voltaje real siempre es cercano a la unidad. En este diagrama deberán mostrarse las impedancias de los generadores, transformadores y líneas de transmisión.

El diagrama de secuencia negativa, generalmente, es idéntico al diagrama de secuencia positiva, excepto que los voltajes de los generadores no deben aparecer y que la reactancia de secuencia negativa de las máquinas síncronas ocasionalmente puede ser diferente al valor de secuencia positiva.

El diagrama de secuencia cero es generalmente similar al diagrama de secuencia negativa, excepto que, dependiendo del tipo de conexiones de los transformadores, es necesario hacer consideraciones especiales y que las impedancias a tierra, tales como reactores o resistencias conectadas entre los neutros de generadores o transformadores y tierra, únicamente se deben mostrar en los diagramas de secuencia cero y con tres veces su valor nominal.

En general, los transformadores conectados en estrella aterrizada permiten el flujo de las corrientes de secuencia cero, desde el sistema que está conectado a un lado del banco al sistema que está conectado al otro lado del banco, de modo que en este caso, la conexión para el banco de transformadores es una conexión en serie en cada uno de los tres diagramas.

mas de secuencia.

Los bancos de transformadores conectados en estrella aterrizada-delta, permiten el flujo de corriente a través del neutro aterrizado, pero blo quean el paso de esta corriente de secuencia cero de un lado a otro del banco; por lo tanto, la impedancia representativa del banco de transfor madores se debe conectar en serie con el neutro y la conexión en delta en circuito abierto.

En un sistema balanceado, las corrientes de secuencia negativa y cero no pueden circular, debido a que las máquinas síncronas o de inducción gene ran solamente voltajes de secuencia positiva. Cuando ocurre una falla y dependiendo del tipo de ésta, se puede considerar como una conversión, en la cual se cambia el voltaje de secuencia negativa y cero en el punto de falla. Así la distribución de las componentes de secuencia negativa y cero pueden ser determinadas, suponiendo que se tiene en los diagramas de secuencia negativa y cero, una sola fuente de voltaje en la falla.

Resumiendo, se puede decir que:

- a) Voltajes de secuencia positiva, negativa y cero inducen únicamente co rrientes de secuencia positiva, negativa o cero, respectivamente.
- b) Corrientes de determinada secuencia sólo podrán producir voltajes de esa misma secuencia.
- c) Por lo tanto, no existe interconexión entre secuencias distintas.
- d) Los elementos activos de la red sólo generan voltaje de secuencia po sitiva; lo anterior es obvio, para que una máquina genere tensiones de secuencia negativa, tendría que girar en sentido contrario. Sería asimismo imposible que V_a , V_b y V_c fueran iguales en magnitud y estuvieran en fase, como es la característica de las cantidades de secuencia cero.
- e) Los voltajes de secuencia negativa y cero se consideran en el punto de falla y disminuyen en magnitud conforme se alejan de éste.
- f) El voltaje de secuencia positiva es cero en el punto de falla y máxi mo en los puntos de generación.

- g) Como las corrientes de secuencia cero están en fase y son de la misma magnitud, necesitan el neutro o la conexión a tierra para poder circular.

Por lo tanto, aplicando el método de las componentes simétricas y suponiendo que las fuerzas electromagnéticas del sistema son equilibradas, los circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero de un sistema eléctrico de potencia son:

- Secuencia positiva:

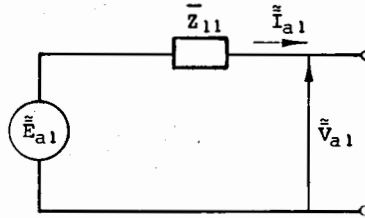


Figura 7

- Secuencia negativa:

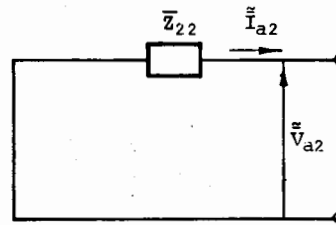


Figura 8

- Secuencia cero:

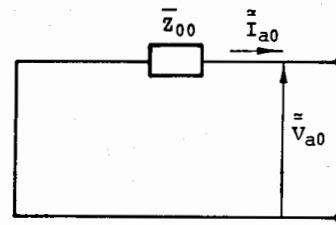


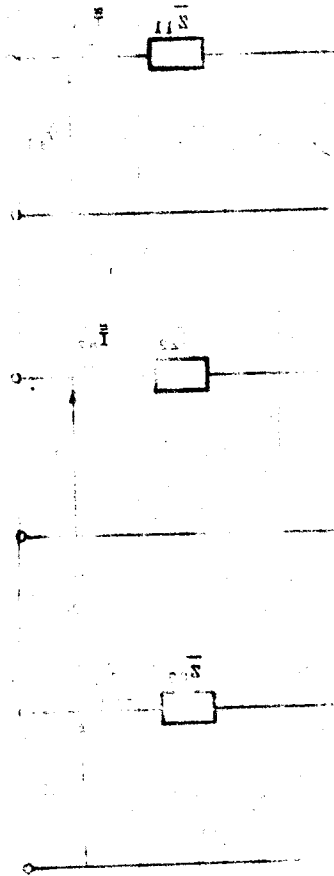
Figura 9

En donde se verifican las siguientes ecuaciones:

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2}$$

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0}$$



III. OBTENCION DE LAS MATRICES DE ADMITANCIA NODAL PARA SECUENCIAS POSITIVA, NEGATIVA Y CERO

La matriz de admitancia nodal, para secuencia positiva, negativa y cero, se encuentra mediante una simple inspección de la red. Esta matriz sirve para obtener la matriz de impedancia nodal, la cual es útil para hacer el análisis en el nodo de falla.

III.1 FORMACION DE LAS MATRICES DE ADMITANCIA NODAL Y bus

En el análisis de circuitos eléctricos, así como en la solución de algunos problemas relacionados con los sistemas eléctricos de potencia, es común la formulación de ecuaciones de red basadas en un análisis nodal y que tomen como punto de partida la aplicación de la ley de corrientes de Kirchhoff. Esta formulación sistemática aplicada a cada nodo de un circuito, representa una excelente base para la solución por computadora de muchos problemas que se presentan en el análisis de los sistemas eléctricos de potencia.

El método nodal de análisis conocido como *método de inspección para formar Y bus* es adecuado para desarrollar una buena formulación del problema por computadora.

Por lo tanto, se deben elaborar los diagramas de secuencia positiva, nega

tiva y cero, indicando todos los elementos que integran el sistema, anotando sus valores de impedancia y admitancia expresados en por unidad y referidos a una base común, para posteriormente obtener las matrices Y bus (+), Y bus (-) y Y bus (0)

III.2 FORMACION DE LAS MATRICES DE IMPEDANCIA NODAL Z bus

En los cursos de circuitos o redes eléctricas, generalmente se analizan los circuitos eléctricos por los métodos de mallas y nodos, y se trabaja de acuerdo con el método adoptado, con las matrices de impedancias de malla (Z malla) o de admitancia nodal (Y bus), las cuales se usan con cierta frecuencia en algunos problemas del análisis de sistemas eléctricos de potencia como es el caso de flujos de energía o despacho económico de carga.

Se puede decir que la matriz de impedancia nodal (Z bus) tiene menos aplicación en los estudios de redes eléctricas; sin embargo en el análisis de los sistemas de potencia tiene aplicaciones específicas como es el caso de estudios de corto circuito, en donde los métodos computacionales requieren de planteamientos algorítmicos.

Se pueden mencionar básicamente tres métodos para la formación de la matriz de impedancia nodal:

- i) Obtención de Z bus por inversión de Y bus.
- ii) Obtención de Z bus por algoritmo basado en la topología de la red.
- iii) Obtención de Z bus por un algoritmo que tome en consideración la dispersidad de los elementos de la red.

Los métodos de inversión que se emplean, generalmente, pueden utilizar el determinante y menores, o bien usar un método numérico como el de Gauss-Jordan.

El método de Gauss-Jordan usado para la solución de sistemas lineales se puede emplear para la inversión de matrices no singulares (con determinante diferente de cero). Este método resulta ventajoso para la inversión de matrices de orden más o menos grande, comparativamente con el método de inversión de matrices por menores y cofactores, en el cual se requiere el cálculo del determinante.

Este método usa el mismo algoritmo que el empleado en la solución de sistemas de ecuaciones lineales, es decir se normaliza una fila y se modifica el resto de filas, repitiendo el procedimiento tantas veces como filas tiene la matriz por invertir.

Inicialmente, se amplía la matriz por invertir con una matriz unitaria del mismo orden, es decir, si la matriz por invertir tiene la forma:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

se amplía con una matriz unitaria del mismo orden:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & | & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & | & 0 & 1 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & | & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El algoritmo de solución consiste en normalizar una fila y modificar el resto de elementos para las otras filas, una por una hasta que se modifican todas, de tal forma que la matriz unitaria quede del lado izquierdo de la matriz ampliada, esto es:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ 0 & 1 & 0 & | & b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & 0 & 1 & | & b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$$

donde los elementos $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{32}, b_{33}$, constituyen la matriz inversa que se buscaba.

El método de formación de la matriz de impedancia nodal por algoritmo, basado en la topología de la red, es básicamente computacional y se apoya en la construcción de la matriz de impedancias Z bus, elemento por elemento a partir de los conceptos de topología de redes. Es decir, al agregar elemento a elemento, se debe considerar la gráfica de la red para analizar cuándo un elemento corresponde a una rama de árbol, o cuándo a una unión, o a un eslabón.

Si se desarrolla un algoritmo que tome en consideración la dispersidad de los elementos de la red, la matriz de impedancias nodal se puede formar a partir de la matriz Y bus dispersa, aprovechando que esta matriz es simétrica y a partir de la descomposición:

$$Y_{\text{bus}} = L D L^t$$

donde:

L = Matriz triangular inferior con los elementos de la diagonal principal igual a la unidad ($L_{KK} = 1$).

D = Matriz diagonal.

L^t = Transpuesta de la matriz L .

Finalmente, utilizando alguno de los métodos mencionados anteriormente, se obtienen las matrices de impedancia nodal Z bus (+), Z bus (-) y Z bus (0).

Se recomienda al lector que si desea ampliar este tema, consulte el libro:

STAGG, G. Y EL ABIAD, H.A. *Computer methods in power system analysis*, New York, McGraw-Hill, 1968.

IV. CALCULO ELECTRICO DE LAS REDES DESEQUILBRADAS

El procedimiento que se seguirá para analizar fallas en un sistema eléctrico de potencia puede resumirse en los siguientes puntos:

- Elaborar el diagrama trifilar en el punto donde ocurre la falla, mostrando todas las conexiones de las fases con la falla.
- Escribir las ecuaciones (condiciones) que caracterizan a la falla.
- Transformar los voltajes y/o corrientes de cantidades de fase (a, b, c) a cantidades de secuencia (0, 1, 2), respetando el punto anterior.
- Examinar los voltajes y/o corrientes de secuencia para determinar las conexiones apropiadas de los circuitos equivalentes de secuencia.

El objetivo de un estudio de fallas consiste en determinar las corrientes y voltajes de secuencia ($I_{a0}, I_{a1}, I_{a2}, V_{a0}, V_{a1}, V_{a2}$) y posteriormente determinar las corrientes y voltajes de fase ($I_a, I_b, I_c, V_a, V_b, V_c$).

En un sistema eléctrico de potencia se pueden presentar los siguientes tipos de falla:

Fallas serie

- Salida de una línea de transmisión.
- Salida de un transformador, etc.

Fallas paralelo

- Falla monofásica a tierra (franca o a través de una impedancia).
- Falla bifásica (franca, a través de una impedancia o a tierra).
- Falla trifásica (franca o a través de una impedancia).

En este curso se estudiarán únicamente las fallas en paralelo. Se analizarán, en primer lugar, las corrientes y voltajes en el punto de falla y, posteriormente, se verá el cálculo de las corrientes y voltajes en todas las ramas de la red, cuando se presente una falla en algún punto de esa red.

Para facilitar la deducción de las fórmulas se marcarán las fases de las fallas de manera que resulten simétricas con respecto a la fase a.

FALLA MONOFASICA A TIERRA

1.- Diagrama trifilar.

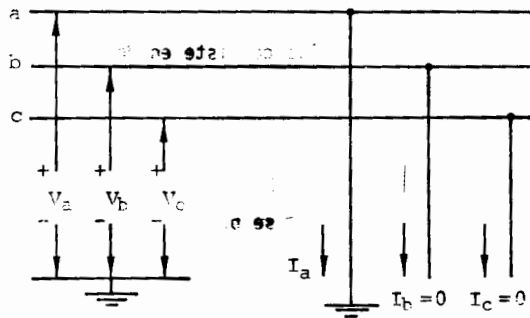


Figura 10

2.- Ecuaciones características de la falla.

$$\begin{aligned} V_a &= 0 \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned}$$

3.- Transformación de voltajes y corrientes.

a) Corrientes de secuencia: I_{a0}, I_{a1}, I_{a2}

$$(1) \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} I_a \quad (1)$$

b) Voltajes de secuencia: V_{a1}, V_{a2}, V_{a0}

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0 \quad (2)$$

4.- Conexiones de los circuitos equivalentes de las ecuaciones (1) y (2).

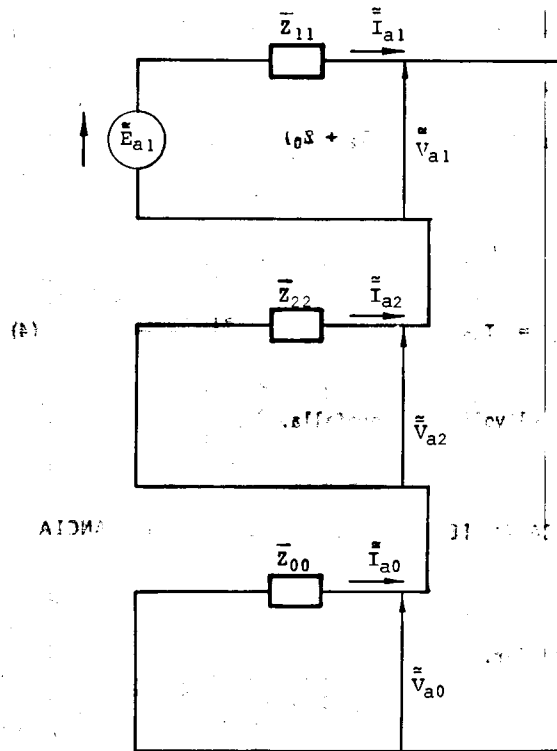


Figura 11 Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero para representar una falla de una fase a tierra.

Del circuito anterior se observa que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (1)$$

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0 \quad (2)$$

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} \quad (3)$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (3)$$

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0}$$

sustituyendo las ecuaciones (3) en la ecuación (2) e indicando todo en función de I_{a1} , se tiene:

$$E_{a1} - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a1} - Z_0 I_{a1} = 0$$

$$E_{a1} = I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

esto es:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (4)$$

en donde E_{a1} es el voltaje de prefalla.

FALLA MONOFASICA A TIERRA A TRAVES DE UNA IMPEDANCIA

1.- Diagrama trifilar.

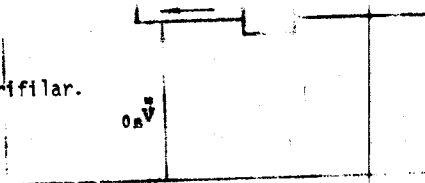


Diagrama trifilar

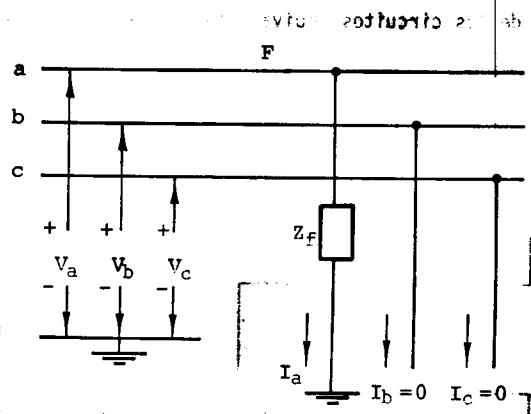
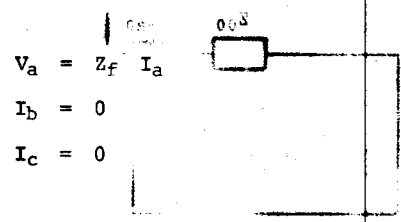


Figura 12

2.- Ecuaciones caracterfsticas de la falla.



$$\begin{aligned} V_a &= Z_f I_a \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned}$$

3.- Transformación de voltajes y corrientes.

a) Corrientes de secuencia:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} I_a \quad (1)$$

b) Voltajes de secuencia:

$$I_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = Z_f I_a = Z_f (3I_{a1}) \quad (2)$$

4.- Conexiones de los circuitos equivalentes de las ecuaciones (1) y (2).

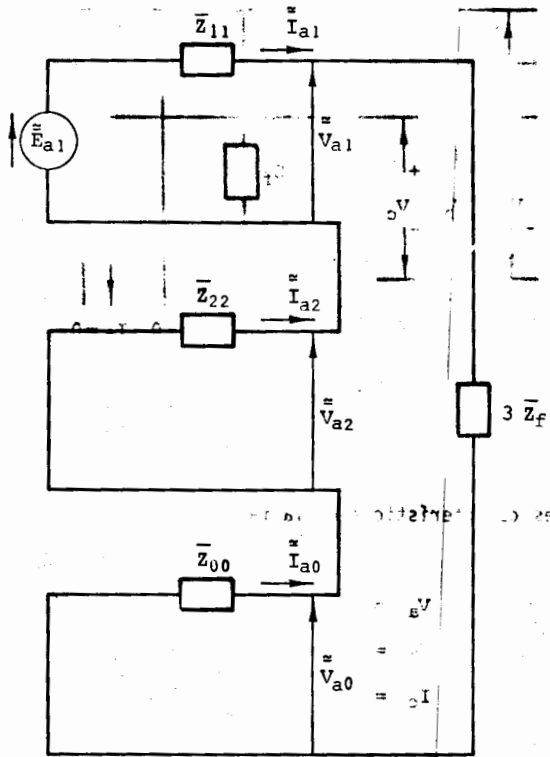


Figura 13 Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero para representar una falla de una fase a tierra.

Del circuito anterior se observa que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (1)$$

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 3 Z_f I_{a1} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{a1} &= E_{a1} - Z_1 I_{a1} \\ V_{a2} &= -Z_2 I_{a2} \\ V_{a0} &= -Z_0 I_{a0} \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_{a1} - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a1} - Z_0 I_{a1} = 3 Z_f I_{a1}$$

sustituyendo las ecuaciones (3) en la ecuación (2) e indicando todo en función de I_{a1} , se tiene:

$$E_{a1} - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a1} - Z_0 I_{a1} = 3 Z_f I_{a1}$$

$$E_{a1} = I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 Z_f)$$

esto es:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3 Z_f} \quad (6)$$

donde E_{a1} es el voltaje de prefalla.

FALLA DE LINEA A LINEA

1.- Diagrama trifilar.

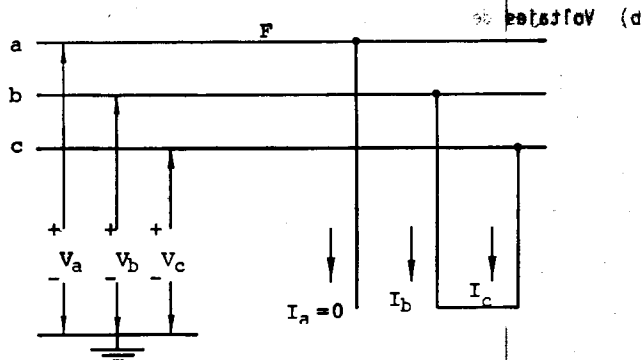


Figura 14

2.- Ecuaciones características de la falla.

$$V_b = V_c$$

$$I_b = -I_c$$

$$I_a = 0$$

3.- Transformación de voltajes y corrientes.

a) Corrientes de secuencia:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix}$$

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{1}{3} (a - a^2) I_b \quad (1)$$

b) Voltajes de secuencia:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \end{bmatrix}$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + 2 V_b)$$

$$V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + (a + a^2) V_b) \quad (2)$$

4.- Conexiones de los circuitos equivalentes de las ecuaciones (1) y (2):

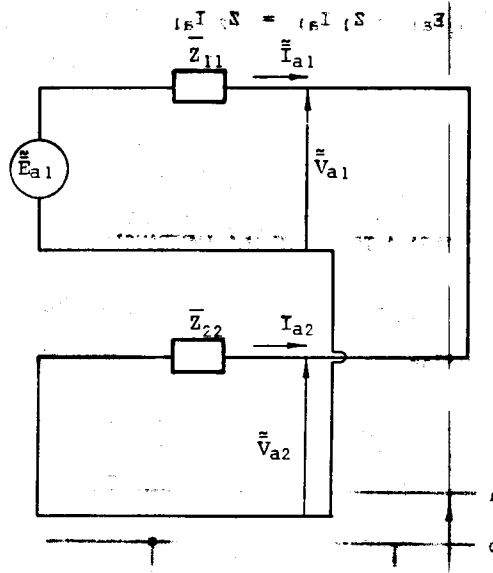


Figura 15 Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia positiva y negativa para representar una falla entre dos fases.

Del circuito anterior se observa que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$I_{a0} = 0 \tag{1}$$

$$I_{a1} = - I_{a2} \tag{2}$$

$$V_{a1} = V_{a2} \tag{2}$$

$$V_{a1} = E_{a1} - I_{a1} Z_1 \tag{3}$$

$$V_{a2} = - Z_2 I_{a2} \tag{3}$$

$$V_{a0} = - Z_0 I_{a0} = 0$$

de las ecuaciones (2) y (3), se tiene:

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a1} = V_{a2} = Z_2 I_{a1}$$

esto es: $E_{a1} - Z_1 I_{a1} = Z_2 I_{a1}$

$$E_{a1} - Z_1 I_{a1} = Z_2 I_{a1}$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2}$$

FALLA DE LINEA A LINEA A TRAVES DE UNA IMPEDANCIA

1.- Diagrama trifilar.

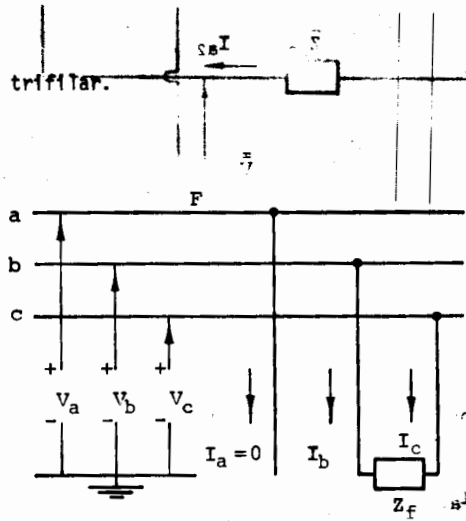


Figura 16

(S)

2.- Ecuaciones características de la falla.

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_c = V_b - Z_f I_b$$

3.- Transformación de voltajes y corrientes.

a) Corrientes de secuencia:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix}$$

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{1}{3} (a - a^2) I_b \quad (1)$$

b) Voltajes de secuencia:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_a \\ V_a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c)$$

y como

$$V_c = V_b - Z_f I_b$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 (V_b - Z_f I_b)) = \frac{1}{3} (V_a + (a + a^2) V_b - a^2 Z_f I_b)$$

... (2a)

$$V_{a2} = 1/3 (V_a + a^2 V_b + a (V_b - Z_f I_b)) = 1/3 (V_a + (a+a^2) V_b - a Z_f I_b)$$



restando (2a) - (2b), se tiene:

$$V_{a1} - V_{a2} = 1/3 (a - a^2) Z_f I_b \quad \dots (2c)$$

pero:

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} = a^2 I_{a1} - a I_{a1} = (a^2 - a) I_{a1} \quad \dots (2d)$$

sustituyendo (2d) en (2c):

$$V_{a1} - V_{a2} = 1/3 (a - a^2) (a^2 - a) Z_f I_{a1}$$

y como:

$$(a - a^2) = 3 \angle 90^\circ$$

$$(a^2 - a) = 3 \angle -90^\circ$$

entonces:

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1}$$

$$V_{a2} = V_{a1} - Z_f I_{a1} \quad \dots (2f)$$

4.- Conexiones de los circuitos equivalentes.

De las ecuaciones (1) y (2f), se tiene:

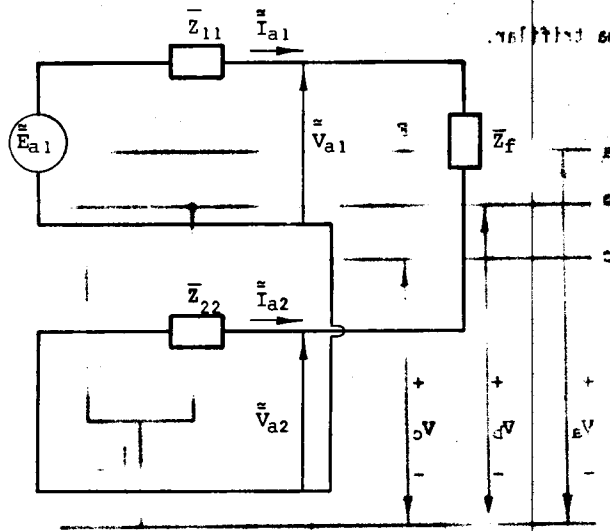


Figura 17 Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia positiva y negativa para representar una falla entre las fases b y c a través de una impedancia.

Del circuito anterior se observa que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$I_a = 0 \quad (1)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (2f)$$

$$V_{a2} = V_{a1} - Z_f I_{a1} \quad (2f)$$

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} \quad (3)$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (3)$$

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0} = 0$$

y se determina que:

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f} = I \quad (4)$$

FALLA DE DOS LINEAS A TIERRA (I) y (II) se las ecuaciones

1.- Diagrama trifilar.

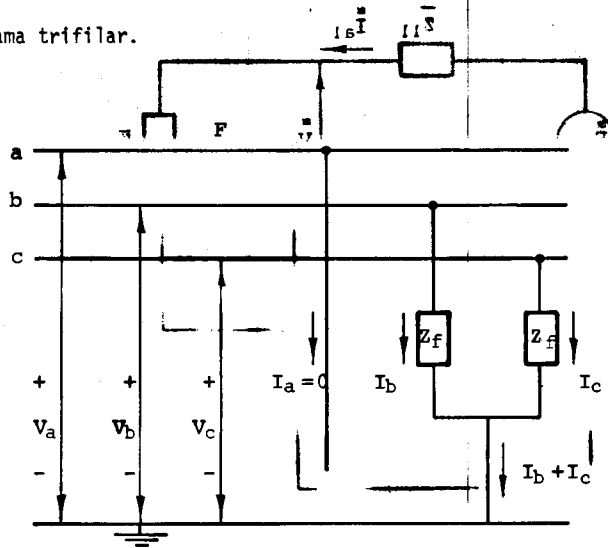


Figura 18

2.- Ecuaciones características de la falla.

$$\begin{aligned}
 (I) \quad & V_b = 0 & 0 &= I_a \\
 & V_c = 0 & I_a I &= I_a I \\
 & I_a = 0 & I_a I - I_a I &= I_a V \\
 & I_n = I_b + I_c & I_a I - I_a I &= I_a V
 \end{aligned}$$

$$(E) \quad V_a = I_a Z_s - I_b Z_s - I_c Z_s = I_a V$$

3.- Transformaciones de voltajes y corrientes.

a) Corrientes de secuencia:

$$(1) \quad I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0 \quad (1)$$

b) Voltajes de secuencia: se sup... Defecto anterior se... estructura f...

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3} V_a = \dots V \quad (2)$$

4.- Conexiones de los circuitos equivalentes.

De las ecuaciones (1) y (2):

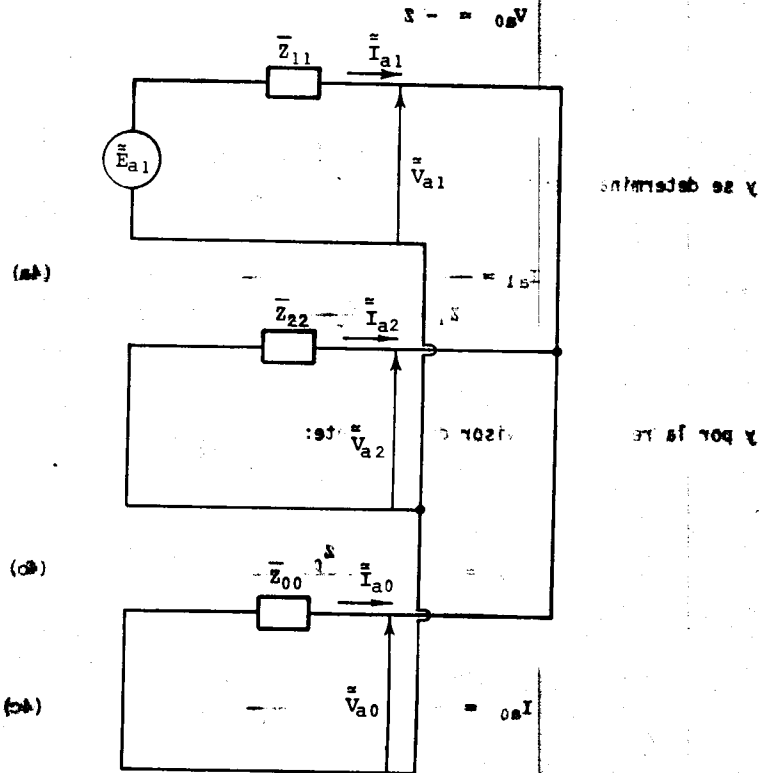


Figura 19 Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia positiva y cero para representar una falla bifásica a tierra.

Del circuito anterior se observa que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$I_{a1} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \quad (2)$$

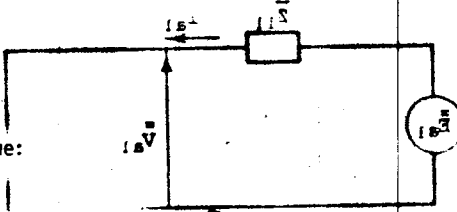
$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1} = -I_{a1} Z_1 = -I_{a1} Z_0 \quad (3)$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (3)$$

De las ecuaciones (1) y (3):

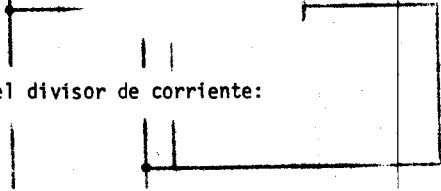
$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0}$$

y se determina que:

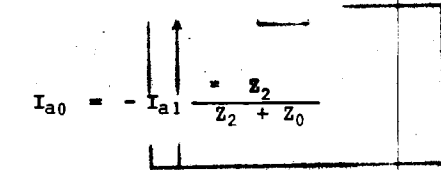


$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (4a)$$

y por la regla del divisor de corriente:



$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (4b)$$



$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0} \quad (4c)$$

FALLA DE DOS LINEAS A TIERRA A TRAVES DE UNA IMPEDANCIA

1.- Diagrama trifilar.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix}$$

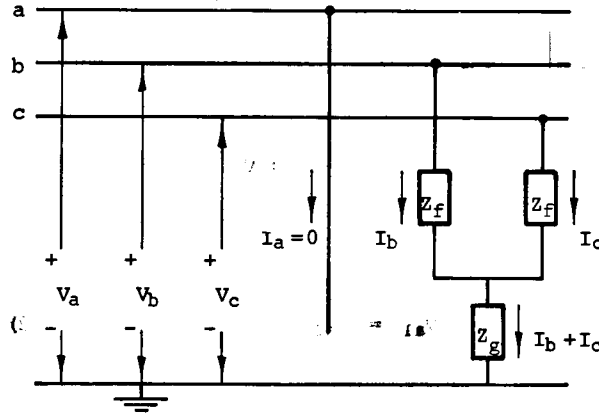


Figura 20

$$\begin{aligned} (a) \quad V_a &= 0 \\ (b) \quad V_b &= Z_f (I_b + I_c) \\ (c) \quad V_c &= Z_f (I_b + I_c) \end{aligned}$$

2.- Ecuaciones características de la falla.

$$\begin{aligned} V_b &= V_c = Z_f (I_b + I_c) \\ I_a &= 0 \\ I_N &= I_b + I_c \end{aligned}$$

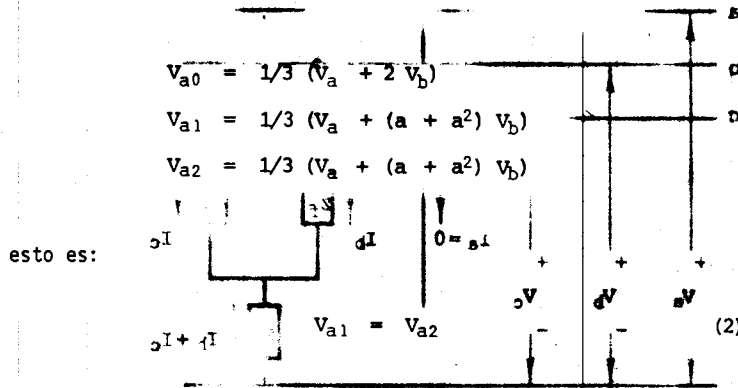
3.- Transformaciones de voltajes y corrientes.

a) Corrientes de secuencia:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0 \quad (1)$$

b) Voltajes de secuencia:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \end{bmatrix}$$



y como $(a + a^2) = -1$

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + 2 V_b) \tag{2a}$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a - V_b) \tag{2b}$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a - V_b) \tag{2c}$$

restando (2b) - (2a), se tiene:

$$V_{a1} - V_{a0} = -V_b = -Z_F (I_b + I_c) \tag{2d}$$

y como:

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \tag{2e}$$

esto es:

$$3 I_{a0} = (I_b + I_c) + I = a I \tag{2f}$$

sustituyendo (2f) en (2d):

$$V_{a1} - V_{a0} = -3 Z_f I_{a0}$$

$$V_{a1} = V_{a0} - 3 Z_f I_{a0}$$

(2g)

4.- Conexiones de los circuitos equivalentes.

De las ecuaciones (1), (2) y (2g):

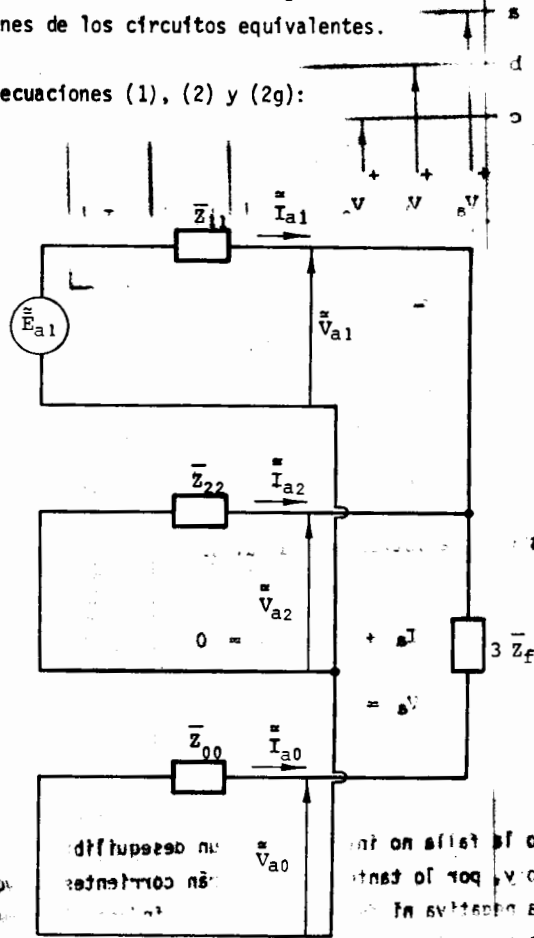


Figura 21 Conexión de los circuitos equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero para representar una falla bifásica a tierra a través de una impedancia.

Del circuito anterior se observa que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0 \quad (1)$$

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (2)$$

$$V_{a1} = V_{a0} - 3 Z_f I_{a0} \quad (2a)$$

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a2} = - Z_2 I_{a2} \quad (3)$$

$$V_{a0} = - Z_0 I_{a0}$$

al igual que para la falla de dos líneas a tierra:

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + \frac{Z_2 (Z_0 + 3 Z_f)}{Z_2 + (Z_0 + 3 Z_f)}}$$

y por la regla del divisor de corriente:

$$I_{a2} = - I_{a1} \frac{(Z_0 + 3 Z_f)}{Z_2 + (Z_0 + 3 Z_f)}$$

$$I_{a0} = - I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + (Z_0 + 3 Z_f)}$$

3.- Transformaciones de voltajes y corrientes.

Como se mencionó anteriormente, en este tipo de falla sólo existe secuencia positiva, esto es:

(1)
$$V_{a1} = V_a$$

a) Corrientes de secuencia:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= I_a \\ I_{b1} &= I_b \\ I_{c1} &= I_c \end{aligned} \quad (1)$$

(2)
$$V_{a1} = V_a$$

b) Voltajes de secuencia:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_a = 0 \\ V_{b1} &= V_b = 0 \\ V_{c1} &= V_c = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

4.- Conexión de los circuitos equivalentes.

De las ecuaciones (1) y (2):

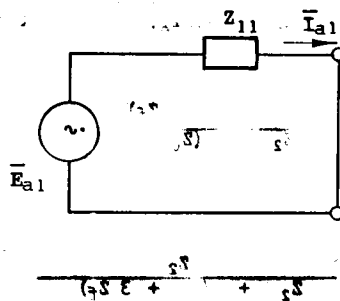


Figura 23

Del circuito anterior se observa que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= I_a \\ V_{a1} &= V_a = 0 \\ V_{a1} &= E_{a1} - Z_1 I_{a1} \end{aligned}$$

y se determina que:

$$\begin{aligned} I_{a1} = I_{a1} &= \frac{E_{a1}}{Z_1} \\ I_{a2} = I_{a0} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Finalmente, de acuerdo con el tipo de análisis, se deben seleccionar del diagrama unifilar las reactancias o impedancias apropiadas para el estudio. Así por ejemplo, para una falla trifásica se seleccionan únicamente reactancias o impedancias de secuencia positiva, mientras que para el cálculo de una falla de línea a tierra se seleccionan reactancias o impedancias de secuencia positiva, negativa y cero.

La impedancia o reactancia de los elementos pasivos (transformadores, líneas de transmisión, cables, etc.) se considera constante a través del tiempo. La impedancia o reactancia de los elementos activos (máquinas rotatorias), se representa en estos estudios como una fuente de voltaje constante en serie con su impedancia, la cual permanece constante durante la falla y varía a través del tiempo después de ocurrir ésta.

V. VOLTAJES Y APORTACIONES DE CORRIENTE EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

En un sistema eléctrico de potencia, la relación entre los voltajes de no do y las corrientes de nodo expresada matricialmente es:

$$V_{\text{bus}} = Z_{\text{bus}} I_{\text{bus}}$$

En forma desarrollada se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_N \end{bmatrix}$$

Si se considera sólo la corriente inyectada I_F en el nodo de falla (su poniendo el nodo 2 por ejemplo) y las demás inyecciones de corriente igual a cero, se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_F \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}$$

Los voltajes para los nodos no fallados a partir de la expresión anterior son:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & I_f \\ \vdots & \vdots \\ Z_{N2} & I_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

en donde estos voltajes se deben únicamente a la corriente de falla (considerando que no existen otras fuentes de corriente).

Las contribuciones de corriente para los nodos adyacentes se pueden calcular como sigue:

$$\begin{bmatrix} V_i - V_j = Z_{ij} I_{ij} \\ I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \end{bmatrix}$$

en donde:

Z_{ij} = es la impedancia primitiva de la línea

i = nodo de inicio

j = nodo de recepción

Como los voltajes en los nodos i y j son (ecuación 1) para los nodos no fallados:

$$\begin{bmatrix} V_i = Z_{iK} I_f \\ V_j = Z_{jK} I_f \end{bmatrix}$$

donde:

$K = \text{nodo fallado}$

sustituyendo estos valores en la ecuación (2), se tiene:

$$I_{ij} = \frac{Z_{iK} I_f - Z_{jK} I_f}{Z_{ij}} \quad (3)$$

$$I_{ij} = \frac{Z_{iK} - Z_{jK}}{Z_{ij}}$$

y por ejemplo, si la falla es trifásica:

$$I_f = I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_{KK}} = \frac{1}{Z_{KK}}$$

la ecuación (3) nos queda:

$$I_{ij} = \frac{Z_{iK} - Z_{jK}}{Z_{ij} Z_{KK}}$$

onde:

$$K = \text{modo falado}$$

substituindo estes valores na equação (2), se tem:

$$I_1 = \frac{\sum_{i=1}^n I_i - \sum_{i=1}^n I_i}{n}$$

$$I_2 = \frac{\sum_{i=1}^n I_i - \sum_{i=1}^n I_i}{n}$$

por exemplo, se a falha é crítica:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = \frac{1}{n}$$

na equação (3) nos dá:

$$I_1 = \frac{\sum_{i=1}^n I_i - \sum_{i=1}^n I_i}{n}$$

VI. EJEMPLO DE APLICACION

FATRI y FAMON, programas destinados a resolver los cálculos para el estudio de fallas trifásicas y monofásicas, utilizan los datos de las líneas (que incluyen sus impedancias así como las reactancias de transformadores y generadores) para formar las matrices de impedancias de secuencia cero y positiva. (La red de secuencia negativa es generalmente la misma que la red de secuencia positiva). Esta información se debe alimentar a la computadora con valores en p.u., puesto que el programa está codificado para operar de esta manera, además los resultados (que incluyen voltajes en los buses, corrientes de corto circuito en el bus de falla y corrientes entre buses) los proporciona en valores en p.u.

Al correr los programas primero se pide el número de buses y de líneas, y enseguida el número de línea, nodo de envío, nodo de recepción, R y X. Una vez alimentada esta información se muestra la matriz de admitancia Y bus, y la matriz de impedancia Z bus, para después proporcionar las corrientes de corto circuito en el bus de falla, voltajes en los buses y corrientes entre buses.

EJEMPLO:

Para el sistema mostrado en el siguiente diagrama unifilar...

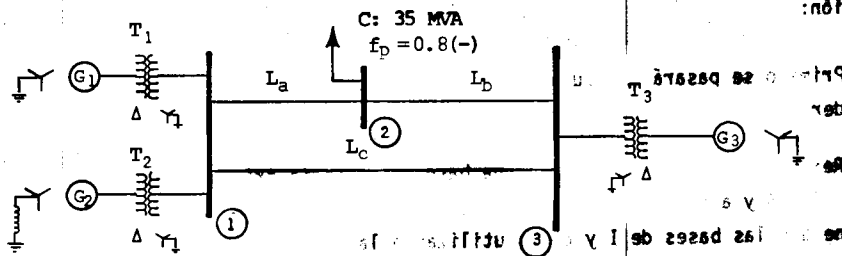


Figura 1

datos:

$$G_1: 100 \text{ MVA}, 13.8 \text{ KV}, \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j0.2 \Omega, \bar{X}_0 = j0.16 \Omega$$

$$G_2: 100 \text{ MVA}, 13.8 \text{ KV}, \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j0.2 \Omega, \bar{X}_0 = j0.16 \Omega, X_n = j0.6 \Omega$$

$$G_3: 100 \text{ MVA}, 6.6 \text{ KV}, \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j0.1 \Omega, \bar{X}_0 = j0.3 \Omega$$

$$T_1: 100 \text{ MVA}, 13.2/115 \text{ KV}, \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_0 = j0.10 \Omega$$

$$T_2: 100 \text{ MVA}, 13.2/115 \text{ KV}, \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_0 = j0.10 \Omega$$

$$T_3: 100 \text{ MVA}, 6.6/110 \text{ KV}, \bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_0 = j0.15 \Omega$$

$$L_a: \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = 10 + j20 \Omega, \bar{Z}_0 = 30 + j110 \Omega$$

$$L_b: \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = 80 + j15 \Omega, \bar{Z}_0 = 23 + j118 \Omega$$

$$L_c: \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = 4 + j10 \Omega, \bar{Z}_0 = 18 + j80 \Omega$$

suponiendo que la carga C está desconectada antes de la falla, calcular:

- A) Para una falla trifásica, las corrientes de falla en todos los buses, las contribuciones de corrientes en cada bus fallado y los voltajes en cada bus.
- B) Para una falla de línea a tierra, las corrientes de falla en cada barra, los voltajes en cada bus y las corrientes entre buses.

Solución:

1. Primero se pasará en p.u., y se arreglará todo el problema para poder hacer uso de los programas.

Refiriendo las impedancias a una base de potencia trifásica de 100 MVA y adoptando una base de voltaje entre hilos de 110 KV, se tiene que las bases de I y de Z, utilizando la ecuación (II), son:

$$I_B = \frac{\text{MVA}_b \times 10^3}{\sqrt{3} \text{ KV}_b} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 110}$$

$$I_B = 524.86 \text{ amp.}$$

de líneas de

de (III):

$$121.0 \text{ r} + 000.0 = \frac{21 \text{ r} + 08}{121} = \frac{\bar{z}_1}{121} = \frac{\bar{z}_2}{121}$$

$$Z_B = \frac{(KV_b)^2}{MVA_b} = \frac{(110 \text{ KV})^2}{100 \text{ MVA}} = 121 \Omega$$

Además se tienen las siguientes bases de voltaje del lado de baja de los transformadores:

de líneas de

del lado de los generadores G_1 y G_2 :

$$V_{BP} = \frac{N_p}{N_s} V_B = \frac{13.2}{115} 110 = 12.63 \text{ KV}$$

donde:

$$100.0 \text{ r} + 001.0 = \frac{0}{100} = \frac{\bar{z}_3}{100}$$

$\frac{N_p}{N_s}$ es la relación de transformación

de

del lado del generador G_3 :

$$V_{BP} = \frac{6.6}{110} 110 = 6.6 \text{ KV}$$

por lo tanto las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero, en p.u., referidas a las bases mencionadas son:

en la línea La:

$$21.0 \text{ r} = \bar{z}_1 = \bar{z}_2 = \bar{z}_0$$

$$\bar{z}_1 = \bar{z}_2 = \frac{Z_1}{Z_B} = \frac{Z_2}{Z_B}$$

$$\bar{z}_1 = \bar{z}_2 = \frac{10 + j20}{121} = 0.083 + j 0.165$$

$$\bar{z}_0 = \frac{Z_0}{Z_B}$$

$$\bar{z}_0 = \frac{30 + j110}{121} = 0.248 + j 0.909$$

en la línea Lb:

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \frac{80 + j 15}{121} = 0.660 + j 0.124$$

$$\bar{Z}_0 = \frac{23 + j 118}{121} = 0.190 + j 0.975$$

en la línea Lc:

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \frac{4 + j 10}{121} = 0.033 + j 0.083$$

$$\bar{Z}_0 = \frac{18 + j 80}{121} = 0.149 + j 0.661$$

las reactancias de los transformadores T_1 y T_2 , referidas a la base de voltaje 12.63/110 KV, son:

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_0 = \left(\frac{V_{BP}}{V_B} \right)^2 X = \left(\frac{13.2}{12.63} \right)^2 j 0.10 = j 0.109$$

las reactancias del transformador T_3 son:

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \bar{X}_0 = j 0.15$$

las reactancias del generador G_1 son:

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \left(\frac{13.8}{12.63} \right)^2 j 0.2 = j 0.239$$

$$\bar{X}_0 = \left(\frac{13.8}{12.63} \right)^2 j 0.16 = j 0.191$$

las reactancias del generador G₂ son:

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = \left(\frac{13.8}{12.63} \right)^2 j 0.2 = j 0.239$$

$$\bar{X}_0 = \left(\frac{13.8}{12.63} \right)^2 j 0.16 = j 0.191$$

$$\bar{X}_n = \left(\frac{13.8}{12.63} \right)^2 j 0.6 = j 0.716$$

las reactancias del generador G₃ son:

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = j 0.1$$

$$\bar{X}_0 = j 0.30$$

2. Enseguida se dibujará el circuito equivalente de impedancias (en p.u.) de secuencia positiva y secuencia cero, para el sistema:

Diagramas de impedancias de secuencia positiva:

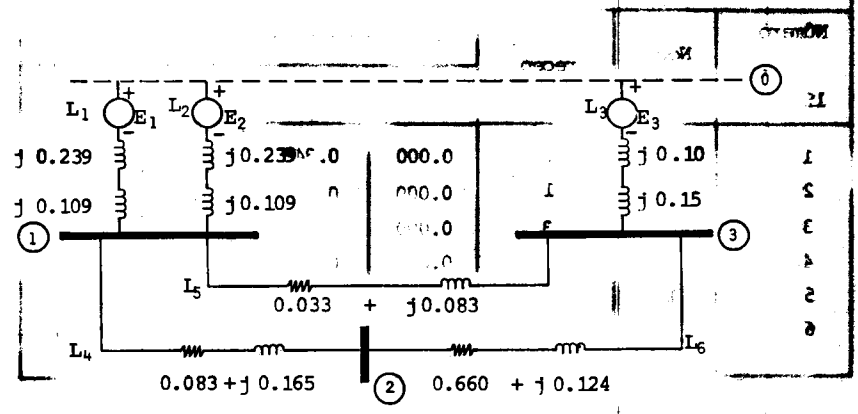


Figura 2

Diagramas de impedancias de secuencia cero:

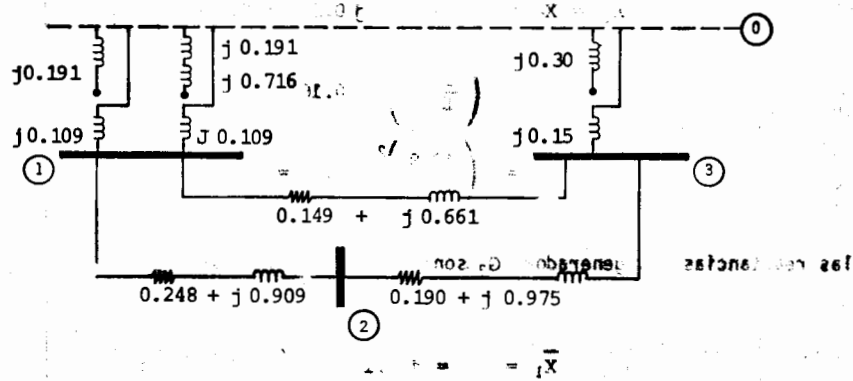


Figura 3

3. Por último, se prepararán los datos para utilizar los programas, llenando la siguiente tabla con base en los diagramas anteriores:

| Número de buses = 3 | | Número de líneas = 6 | | | | |
|---------------------|------------|----------------------|---------------------|-------|---------------------|-------|
| Número de línea | Nodo envío | Nodo recepción | Impedancia sec. (+) | | Impedancia sec. (0) | |
| | | | R | jX | R | jX |
| 1 | 0 | 1 | 0.000 | 0.348 | 0.000 | 0.109 |
| 2 | 0 | 1 | 0.000 | 0.348 | 0.000 | 0.109 |
| 3 | 0 | 3 | 0.000 | 0.250 | 0.000 | 0.150 |
| 4 | 1 | 2 | 0.083 | 0.165 | 0.248 | 0.909 |
| 5 | 1 | 3 | 0.033 | 0.083 | 0.149 | 0.661 |
| 6 | 2 | 3 | 0.660 | 0.124 | 0.190 | 0.975 |

Tabla 1

Para entrar en sesión en la computadora, se realizan las instrucciones siguientes:

- < RETURN>: - - - - - (Oprimir la tecla < RETURN>)
- USERNAME: - - - - - (Teclar la clave y oprimir < RETURN >)
- PASSWORD: - - - - - (Teclar la segunda parte de la clave y oprimir < RETURN>)

Con estas instrucciones se está dentro del sistema.

Para resolver el inciso (A):

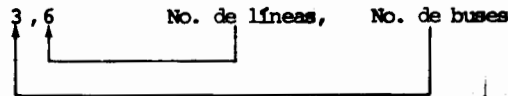
Se llama al programa FATRI, destinado a resolver los cálculos para fallas trifásicas, de la siguiente manera:

RUN SYS \$ BIB: FATRI. EXE

- ahora hace la primera pregunta:

NOTE EL NUMERO DE BUSES REALES Y EL NUMERO DE LINEAS
SEPARADOS POR UNA COMA

Para el ejemplo, se teclaea:



- la segunda pregunta es:

NOTE: No. DE LINEA, NODO DE ENVIO, NODO DE RECEPCION, R, X

- se teclea (directamente de la tabla I):

1, 0, 1, 0.000, 0.348 < RETURN >
 2, 0, 1, 0.000, 0.348 < RETURN >
 3, 0, 3, 0.000, 0.250 < RETURN >
 4, 1, 2, 0.083, 0.165 < RETURN >
 5, 1, 3, 0.033, 0.083 < RETURN >
 6, 2, 3, 0.660, 0.124 < RETURN >

- A continuación muestra los datos que se alimentaron:

PROGRAMA PARA CALCULAR FALLAS TRIFASICAS

EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

ANOTE EL NUMERO DE BUSES (al de referencia se le da el numero cero) Y EL NUMERO DE LINEAS. Ej: 6, 5

NUMERO DE BUSES = 3 NUMERO DE LINEAS = 6

ANOTE: No. Linea, No. de Envío, No. de Recepción, R, X
 Ej: 1, 3, 2, 0, 01, 0, 022

DATOS DE LINEAS

| LINEA | NE | NR | IMPEDANCIA SERIE | |
|-------|----|----|------------------|--------|
| | | | R | jX |
| 1 | 0 | 1 | 0.0000 | 0.3480 |
| 2 | 0 | 1 | 0.0000 | 0.3480 |
| 3 | 0 | 3 | 0.0000 | 0.2500 |
| 4 | 1 | 2 | 0.0830 | 0.1650 |
| 5 | 1 | 3 | 0.0330 | 0.0830 |
| 6 | 2 | 3 | 0.6600 | 0.1240 |

↑ ↑ ↑
 Número Nodo Nodo
 de de de
 línea envío recep.

- enseguida muestra la matriz de admittancia Ybus:

MATRIZ DE ADMITANCIAS Ybus

| | | | |
|-----------|---|----------|-----------|
| Y(1, 1) | = | 6.56939 | -20.98746 |
| Y(1, 2) | = | -2.43302 | 4.83672 |
| Y(1, 3) | = | -4.13637 | 10.40361 |
| Y(2, 1) | = | -2.43302 | 4.83672 |
| Y(2, 2) | = | 3.89651 | -5.11168 |
| Y(2, 3) | = | -1.46349 | 0.27496 |
| Y(3, 1) | = | -4.13637 | 10.40361 |
| Y(3, 2) | = | -1.46349 | 0.27496 |
| Y(3, 3) | = | 5.59987 | -14.67857 |

↑ ↑ ↑
 G jB
 Posición en la matriz

- después aparece la matriz de impedancia Zbus: *

MATRIZ DE IMPEDANCIAS Zbus

| | | | |
|-----------|---|----------|---------|
| Z(1, 1) | = | 0.00441 | 0.11357 |
| Z(1, 2) | = | 0.00671 | 0.10730 |
| Z(1, 3) | = | -0.00633 | 0.08683 |
| Z(2, 1) | = | 0.00671 | 0.10730 |
| Z(2, 2) | = | 0.09999 | 0.22653 |
| Z(2, 3) | = | -0.00964 | 0.09583 |
| Z(3, 1) | = | -0.00633 | 0.08683 |
| Z(3, 2) | = | -0.00964 | 0.09583 |
| Z(3, 3) | = | 0.00909 | 0.12525 |

↑ ↑ ↑
 R jX
 Posición en la matriz

*matriz obtenida al hacer la inversa de Y bus (Z bus = Y⁻¹ bus)

- y para finalizar se tienen los resultados: *jam al 873 00 sbhug*

FALLA EN EL BUS

1
CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO EN EL BUS DE FALLA

DE SECUENCIA 0, 1, 2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.3410E+00 - 8792E+01 0.0000E+00 0.0000E+00

| | | | | | |
|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. |
| <u>Icc(0)</u> | | <u>Icc(1)</u> | | <u>Icc(2)</u> | |

DE FASE A, B, C
0.3410E+00 - 8792E+01 - 7784E+01 0.4101E+01 0.7443E+01 0.4691E+01

| | | | | | |
|------------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. |
| <u>Icc_A</u> | | <u>Icc_B</u> | | <u>Icc_C</u> | |

VOLTAJES EN LOS BUSES

**:suzS stonabcomt ob stnjam sf acosqz zduzssb -*

Voltajes en el bus 1

DE SECUENCIA 0, 1, 2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.5960E-07 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00

| | | | | | |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. |
| <u>V₀</u> | | <u>V₁</u> | | <u>V₂</u> | |

DE FASE A, B, C
0.5960E-07 0.0000E+00 - 2980E-07 - 5162E-07 - 2980E-07 0.5162E-07

| | | | | | |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. |
| <u>V_A</u> | | <u>V_B</u> | | <u>V_C</u> | |

*(suz¹ Y = suz S) suz Y ob suzsvni sf suzoi is sbhugz stnjam**

Voltajes en el bus 2

| | | | | | | | |
|---|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2 | DE SECUENCIA 0, 1, 2 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.3431E-01 | 0.2238E-01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| | DE FASE A, B, C | 0.3431E-01 | 0.2238E-01 | -7.777E-02 | -5.822E-01 | -4.653E-01 | 0.3584E-01 |

Voltajes en el bus 3

| | | | | | | | |
|---|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 3 | DE SECUENCIA 0, 1, 2 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.2388E+00 | -8.526E-01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| | DE FASE A, B, C | 0.2388E+00 | -8.526E-01 | -1.932E+00 | -1.641E+00 | -4.555E-01 | 0.2494E+00 |

CORRIENTES ENTRE BUSES

| | | | | | | | | |
|------|-----|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| DE A | 0 1 | DE SECUENCIA 0, 1, 2 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | -2.874E+01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| | | DE FASE A, B, C | 0.0000E+00 | -2.874E+01 | -2.487E+01 | 0.1437E+01 | 0.2489E+01 | 0.1437E+01 |
| | 0 1 | DE SECUENCIA 0, 1, 2 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | -2.874E+01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| | | DE FASE A, B, C | 0.0000E+00 | -2.874E+01 | -2.487E+01 | 0.1437E+01 | 0.2489E+01 | 0.1437E+01 |
| | 0 3 | DE SECUENCIA 0, 1, 2 | 0.0000E+00 | 0.3410E+00 | 0.9551E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| | | DE FASE A, B, C | 0.3410E+00 | 0.9551E+00 | 0.6566E+00 | -7.729E+00 | -9.976E+00 | -1.822E+00 |
| | 1 2 | DE SECUENCIA 0, 1, 2 | 0.0000E+00 | -2.404E+00 | 0.2082E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| | | DE FASE A, B, C | -2.404E+00 | 0.2082E+00 | 0.3005E+00 | 0.1040E+00 | -6.015E-01 | -3.123E+00 |
| | 1 3 | DE SECUENCIA 0, 1, 2 | 0.0000E+00 | -1.007E+00 | 0.2837E+01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| | | DE FASE A, B, C | -1.007E+00 | 0.2837E+01 | 0.2507E+01 | -1.331E+01 | -2.406E+01 | -1.506E+01 |
| | 2 3 | DE SECUENCIA 0, 1, 2 | 0.0000E+00 | -2.404E+00 | 0.2082E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| | | DE FASE A, B, C | -2.404E+00 | 0.2082E+00 | 0.3005E+00 | 0.1040E+00 | -6.015E-01 | -3.123E+00 |

| | Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. |
|---------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| De secuencia: | | | | | | |
| 0, 1, 2 | | I_0 | | I_1 | | I_2 |
| De fase: | | | | | | |
| A, B, C | | I_A | | I_B | | I_C |

Corrientes entre el bus [] y el bus []

- A continuación muestra los resultados de las fallas en los demás buses, que son análogos a los del bus 1 donde se señaló qué es cada parte.

FALLA EN EL BUS

2

CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO EN EL BUS DE FALLA

DE SECUENCIA 0,1,2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.1631E+01 - 3695E+01 0.0000E+00 0.0000E+00
DE FASE A,B,C
0.1631E+01 - 3695E+01 - 4018E+01 0.4350E+00 0.2384E+01 0.3260E+01

VOLTAJES EN LOS BUSES

BUS

1
DE SECUENCIA 0,1,2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.5926E+00 - 1502E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
DE FASE A,B,C
0.5926E+00 - 1502E+00 - 4264E+00 - 4381E+00 - 1662E+00 0.5883E+00
2
DE SECUENCIA 0,1,2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
DE FASE A,B,C
0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
3
DE SECUENCIA 0,1,2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.6617E+00 - 1919E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
DE FASE A,B,C
0.6617E+00 - 1919E+00 - 4970E+00 - 4771E+00 - 1647E+00 0.6689E+00

CORRIENTES ENTRE BUSES

DE A

0 1
DE SECUENCIA 0,1,2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.4317E+00 0.1703E+01 0.0000E+00 0.0000E+00
DE FASE A,B,C
0.4317E+00 0.1703E+01 0.1259E+01 - 1225E+01 - 1691E+01 - 4777E+00
0 1
DE SECUENCIA 0,1,2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.4317E+00 0.1703E+01 0.0000E+00 0.0000E+00
DE FASE A,B,C
0.4317E+00 0.1703E+01 0.1259E+01 - 1225E+01 - 1691E+01 - 4777E+00
0 3
DE SECUENCIA 0,1,2
0.0000E+00 0.0000E+00 0.7676E+00 0.2647E+01 0.0000E+00 0.0000E+00
DE FASE A,B,C
0.7676E+00 0.2647E+01 0.1908E+01 - 1988E+01 - 2676E+01 - 6386E+00

CORRIENTES ENTRE BUSES

| DE | A | | | | | | | | |
|----|---|--------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| 0 | 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.0000E+00 | 0.2883E+00 | 0.9024E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | | |
| | | DE FASE A, B, C | 0.2883E+00 | 0.9024E+00 | 0.6373E+00 | -0.7009E+00 | -0.9257E+00 | -0.2015E+00 | |
| 0 | 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.0000E+00 | 0.2883E+00 | 0.9024E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | | |
| | | DE FASE A, B, C | 0.2883E+00 | 0.9024E+00 | 0.6373E+00 | -0.7009E+00 | -0.9257E+00 | -0.2015E+00 | |
| 0 | 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | -0.4000E+01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | |
| | | DE FASE A, B, C | 0.0000E+00 | -0.4000E+01 | -0.3464E+01 | 0.2000E+01 | 0.3464E+01 | 0.2000E+01 | |
| 1 | 2 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.0000E+00 | 0.3215E+00 | -0.2601E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | |
| | | DE FASE A, B, C | 0.3215E+00 | -0.2601E+00 | -0.3860E+00 | -0.1484E+00 | 0.6449E-01 | 0.4085E+00 | |
| 1 | 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.0000E+00 | 0.2551E+00 | -0.3682E+01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | |
| | | DE FASE A, B, C | 0.2551E+00 | -0.3682E+01 | -0.3316E+01 | 0.1620E+01 | 0.3061E+01 | 0.2062E+01 | |
| 2 | 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.0000E+00 | 0.3215E+00 | -0.2601E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | |
| | | DE FASE A, B, C | 0.3215E+00 | -0.2601E+00 | -0.3860E+00 | -0.1484E+00 | 0.6449E-01 | 0.4085E+00 | |

FORTRAN STOP

Para resolver el inciso (B):

Se llama al programa FAMON, destinado a resolver los cálculos para fallas de una fase a tierra, de la siguiente manera:

```

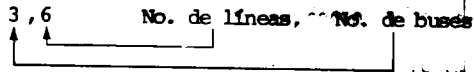
00+30000 0 00+300 3000 3000 3000 3000
00+300 0 300 300 300 300
RUN SYS $ BIB: FAMON. EXE

```

00+300 00 0
00+300 00 0
- la primera pregunta que hace es:

ANOTE EL NUMERO DE BUSES Y EL NUMERO DE LINEAS

se escribe: 3, 6 No. de líneas, No. de buses



- enseguida pregunta:

021.0, 000.0, 0, 0, 0, 0
 00.0, 000.0, 0, 0, 0, 0
 100.0, 000.0, 0, 0, 0, 0

NOTE: NO. DE LINEA, NODO DE ENVIO, NODO DE RECEPCION, R, X

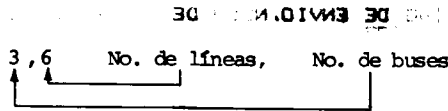
- se teclean directamente de la tabla I los valores de secuencia +:

| | | | | |
|---|---|---|-------|-------|
| 1 | 0 | 1 | 0.000 | 0.348 |
| 2 | 0 | 1 | 0.000 | 0.348 |
| 3 | 0 | 3 | 0.000 | 0.250 |
| 4 | 1 | 2 | 0.083 | 0.165 |
| 5 | 1 | 3 | 0.033 | 0.083 |
| 6 | 2 | 3 | 0.660 | 0.124 |

- enseguida pregunta lo referente a secuencia cero:

NOTE EL NUMERO DE BUSES Y EL NUMERO DE LINEAS

se escribe nuevamente:



- la cuarta pregunta es:

NOTE: No. DE LINEA, NODO DE ENVIO, NODO DE RECEPCION, R, X

- se anota (directamente lo referente a secuencia cero de la tabla I).

| | |
|-----------------------|--|
| 1, 0, 1, 0.000, 0.109 | |
| 2, 0, 1, 0.000, 0.109 | |
| 3, 0, 3, 0.000, 0.150 | |
| 4, 1, 2, 0.248, 0.909 | |
| 5, 1, 3, 0.149, 0.661 | |
| 6, 2, 3, 0.190, 0.975 | |

- a continuación muestra los datos que se alimentaron y los resultados igual que en el inciso (A), donde se utilizó el programa FATRI.

PROGRAMA PARA CALCULAR FALLAS MONOFASICAS

EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

ANALISIS PARA SECUENCIA POSITIVA

ANOTE EL NUMERO DE BUSES (AL DE REFERENCIA SE LE DA EL NUMERO CERO) Y EL NUMERO DE LINEAS. EJ: 4,6

NUMERO DE BUSES = 3 NUMERO DE LINEAS = 6

ANOTE No. LINEA, NODO DE ENVIO, NODO DE RECEPCION, R, X
EJ: 1, 3, 2, 0.01, 0.023

ANALISIS PARA SECUENCIA CERO

ANOTE EL NUMERO DE BUSES (AL DE REFERENCIA SE LE DA EL NUMERO CERO) Y EL NUMERO DE LINEAS. EJ: 4,6

NUMERO DE BUSES = 3 NUMERO DE LINEAS = 6

ANOTE No. LINEA, NODO DE ENVIO, NODO DE RECEPCION, R, X
 EJ : 1,3,2,0,01,0,023

 DATOS DE LINEAS

SECUENCIA POSITIVA

| LINEA | NE | NR | 'IMPEDANCIA SERIE' | |
|-------|----|----|--------------------|--------|
| 1 | 0 | 1 | 0.0000 | 0.3480 |
| 2 | 0 | 1 | 0.0000 | 0.3480 |
| 3 | 0 | 3 | 0.0000 | 0.2500 |
| 4 | 1 | 1 | 0.0430 | 0.1650 |
| 5 | 1 | 3 | 0.0330 | 0.0830 |
| 6 | 2 | 3 | 0.6600 | 0.1240 |

SECUENCIA CERO :

| Número de línea | Nodo de envío | Nodo de recep. | R | jX |
|-----------------|---------------|----------------|--------|--------|
| 1 | 0 | 1 | 0.0000 | 0.1090 |
| 2 | 0 | 1 | 0.0000 | 0.1090 |
| 3 | 0 | 3 | 0.0000 | 0.1500 |
| 4 | 1 | 1 | 0.2480 | 0.9090 |
| 5 | 1 | 3 | 0.1490 | 0.6610 |
| 6 | 2 | 3 | 0.1900 | 0.9750 |

- enseguida muestra las matrices de admitancia Y bus, para secuencia positiva y cero:

 MATRIZ DE ADMITANCIAS Ybus

SECUENCIA POSITIVA

| Y1(| 1, | 1) | == | 6.56939 | -20.98746 |
|-----|----|-----|----|----------|-----------|
| Y1(| 1, | 3) | == | -2.43302 | 4.83672 |
| Y1(| 1, | 3) | == | -4.13637 | 10.40361 |
| Y1(| 3, | 1) | == | -2.43302 | 4.83672 |
| Y1(| 3, | 3) | == | 3.89451 | -5.11168 |
| Y1(| 3, | 1) | == | -1.46349 | 0.27496 |
| Y1(| 3, | 1) | == | -4.13637 | 10.40361 |
| Y1(| 3, | 3) | == | -1.46349 | 0.27496 |
| Y1(| 3, | 3) | == | 5.59987 | -14.67857 |

SECUENCIA CERO

| | | | |
|------------|-----|-----------|------------|
| Y0(1, 1) | == | 0. 60388 | -20. 81223 |
| Y0(1, 2) | === | -0. 27935 | 1. 02390 |
| Y0(1, 3) | === | -0. 32453 | 1. 43970 |
| Y0(2, 1) | === | -0. 27935 | 1. 02390 |
| Y0(2, 2) | === | 0. 47190 | -2. 01201 |
| Y0(2, 3) | === | -0. 19256 | 0. 98812 |
| Y0(3, 1) | === | -0. 32453 | 1. 43970 |
| Y0(3, 2) | === | -0. 19256 | 0. 98812 |
| Y0(3, 3) | == | 0. 51709 | -9. 09449 |

↑
Posición de la matriz

↑
G

↑
jB

después aparecen las matrices de impedancias Z bus, para secuencia po
sitiva y cero:

MATRIZ DE IMPEDANCIAS Zbus'

SECUENCIA POSITIVA

| | | | |
|------------|-----|-----------|----------|
| Z1(1, 1) | == | 0. 00441 | 0. 11357 |
| Z1(1, 2) | === | 0. 00671 | 0. 10730 |
| Z1(1, 3) | === | -0. 00633 | 0. 08683 |
| Z1(2, 1) | === | 0. 00671 | 0. 10730 |
| Z1(2, 2) | === | 0. 09999 | 0. 22653 |
| Z1(2, 3) | === | -0. 00964 | 0. 09583 |
| Z1(3, 1) | === | -0. 00633 | 0. 08683 |
| Z1(3, 2) | === | -0. 00964 | 0. 09583 |
| Z1(3, 3) | == | 0. 00909 | 0. 12523 |

SECUENCIA CERO

| | | | |
|------------|-----|-----------|----------|
| Z0(1, 1) | == | 0. 00067 | 0. 05033 |
| Z0(1, 2) | === | -0. 00127 | 0. 03147 |
| Z0(1, 3) | === | -0. 00184 | 0. 01149 |
| Z0(2, 1) | === | -0. 00127 | 0. 03147 |
| Z0(2, 2) | === | 0. 11213 | 0. 51802 |
| Z0(2, 3) | === | 0. 00350 | 0. 06339 |
| Z0(3, 1) | === | -0. 00184 | 0. 01149 |
| Z0(3, 2) | === | 0. 00350 | 0. 06339 |
| Z0(3, 3) | == | 0. 00507 | 0. 11838 |

↑
Posición en la matriz

↑
R

↑
jX

- y finalmente se tienen los resultados:

FALLA EN EL BUS

IS 881 W

1

CORRIENTES DE CIRCUITO EN EL BUS DE FALLA

30

DE SECUENCIA 0,1,2
 0.1230E+00 - 3600E+01 0.1230E+00 - 3600E+01 0.1230E+00 - 3600E+01
 Parte Parte Parte Parte Parte Parte
 real imag. real imag. real imag. real imag. real imag.
 Icc(0) Icc(1) Icc(2)

DE FASE A, B, C
 0.3690E+00 - 1080E+02 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
 Parte Parte Parte Parte Parte Parte
 real imag. real imag. real imag. real imag.
 IccA IccB IccC

VOLTAJES EN LOS BUSES

BUS

Voltaje en el bus 1

1 DE SECUENCIA 0,1,2
 0.1813E+00 - 3761E-02 0.5906E+00 0.1871E-02 - 4094E+00 0.1871E-02
 Parte Parte Parte Parte Parte Parte
 real imag. real imag. real imag. real imag.
 V0 V1 V2

DE FASE A, B, C
 0.0000E+00 0.0000E+00 - 2719E+00 - 8717E+00 - 2719E+00 0.8603E+00
 Parte Parte Parte Parte Parte Parte
 real imag. real imag. real imag. real imag.
 VA VB VC

Voltajes en el bus 2

2 DE SECUENCIA 0,1,2
 - 1.131E+00 - 8442E-02 0.6129E+00 0.1095E-01 - 3871E+00 0.1095E-01
 DE FASE A, B, C
 0.1127E+00 0.1345E-01 - 2260E+00 - 8854E+00 - 2260E+00 0.8466E+00

Voltajes en el bus 3

| | | | | | | | |
|---|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.4118E-01 | - 8040E-02 | 0.7660E+00 | - 3346E-01 | - 3118E+00 | - 3346E-01 |
| | DE FASE A, B, C | 0.3352E+00 | - 7477E-01 | - 2293E+00 | - 8406E+00 | - 2293E+00 | 0.8914E+00 |

CORRIENTES ENTRE BUSES

| DE A | | (I)001 | | | | | (I)001 |
|------|--------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 0 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.3469E-01 | - 1663E+01 | - 7189E+02 | 0.1697E+01 | - 5433E-02 | - 1176E+01 |
| | DE FASE A, B, C | - 7186E+02 | - 1142E+01 | 0.3847E+02 | 0.6033E+02 | 0.3349E+02 | - 6417E+02 |
| 0 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.3469E-01 | - 1663E+01 | - 7189E+02 | 0.1697E+01 | - 5433E-02 | - 1176E+01 |
| | DE FASE A, B, C | - 7186E+02 | - 1142E+01 | 0.3847E+02 | 0.6033E+02 | 0.3349E+02 | - 6417E+02 |
| 0 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.5350E-01 | - 2742E+00 | - 9993E+02 | 0.2753E+01 | 0.1338E+00 | - 1247E+01 |
| | DE FASE A, B, C | - 9974E+02 | 0.1231E+01 | 0.5341E+02 | 0.8563E+02 | 0.4649E+02 | - 8768E+02 |
| 1 2 | DE SECUENCIA 0,1,2 | - 1426E-01 | 0.7106E-01 | - 9800E-01 | 0.8570E-01 | - 9800E-01 | 0.8570E-01 |
| | DE FASE A, B, C | - 2103E+00 | 0.2425E+00 | 0.8374E-01 | - 1464E-01 | 0.8374E-01 | - 1464E-01 |
| 1 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | - 3934E-01 | 0.2031E+00 | - 3985E-01 | 0.1161E+01 | - 3985E-01 | 0.1161E+01 |
| | DE FASE A, B, C | - 1110E+00 | 0.2526E+01 | - 3497E-02 | - 9583E+00 | - 3497E-02 | - 9583E+00 |
| 2 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | - 1426E-01 | 0.7106E-01 | - 9800E-01 | 0.8570E-01 | - 9800E-01 | 0.8570E-01 |
| | DE FASE A, B, C | - 2103E+00 | 0.2425E+00 | 0.8374E-01 | - 1464E-01 | 0.8374E-01 | - 1464E-01 |
| | Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. | Parte real | Parte imag. | Parte imag. |

De secuencia I₀ I₁ I₂
De fase I_A I_B I_C

Corrientes entre el bus y el bus

FALLA EN EL BUS

CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO EN EL BUS DE FALLA

| | | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.3000E+00 | - 9334E+00 | 0.3000E+00 | - 9334E+00 | 0.3000E+00 | - 9334E+00 |
| DE FASE A, B, C | 0.9000E+00 | - 2800E+01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |

VOLTAJES EN LOS BUSES

G. 612243

BUS

| | | | | | | | |
|---|--------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.2593E-01 | - 1.043E-01 | 0.8978E+00 | - 2.593E-01 | - 1.022E+00 | - 2.593E-01 |
| | DE FASE A, B, C | 0.7667E+00 | - 6.849E-01 | - 4.268E+00 | - 8.507E+00 | - 4.268E+00 | 0.8813E+00 |
| 2 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.5171E+00 | - 5.075E-01 | 0.7586E+00 | 0.2537E-01 | - 2.414E+00 | 0.2537E-01 |
| | DE FASE A, B, C | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | - 7.757E+00 | - 9.421E+00 | - 7.757E+00 | 0.7899E+00 |
| 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.6002E-01 | - 1.976E-01 | 0.9134E+00 | - 3.774E-01 | - 8.655E-01 | - 3.774E-01 |
| | DE FASE A, B, C | 0.7447E+00 | - 9.134E-01 | - 4.737E+00 | - 8.440E+00 | - 4.737E+00 | 0.8880E+00 |

CORRIENTES EN LOS BUSES

DE A

| | | | | | | | |
|-----|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.9748E-01 | - 2.660E+00 | - 7.181E+02 | 0.2580E+01 | 0.7451E-01 | - 2.936E+00 |
| | DE FASE A, B, C | - 7.164E+02 | 0.2020E+01 | 0.3845E+02 | 0.6084E+02 | 0.3348E+02 | - 6.366E+02 |
| 0 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.9748E-01 | - 2.660E+00 | - 7.181E+02 | 0.2580E+01 | 0.7451E-01 | - 2.936E+00 |
| | DE FASE A, B, C | - 7.164E+02 | 0.2020E+01 | 0.3845E+02 | 0.6084E+02 | 0.3348E+02 | - 6.366E+02 |
| 0 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.1040E+00 | - 4.019E+00 | - 9.971E+02 | 0.3654E+01 | 0.1510E+00 | - 3.462E+00 |
| | DE FASE A, B, C | 0.9945E+02 | 0.2905E+01 | 0.5345E+02 | 0.8460E+02 | 0.4652E+02 | - 8.871E+02 |
| 1 2 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.1774E+00 | - 4.866E+00 | 0.9070E-01 | - 7.984E+00 | 0.9070E-01 | - 7.984E+00 |
| | DE FASE A, B, C | 0.3098E+00 | - 2.093E+00 | 0.8675E-01 | 0.3098E+00 | 0.8675E-01 | 0.3098E+00 |
| 1 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.1774E+00 | - 4.866E+00 | 0.9070E-01 | - 7.984E+00 | 0.9070E-01 | - 7.984E+00 |
| | DE FASE A, B, C | 0.1342E+00 | 0.3792E+00 | - 4.081E-01 | - 2.546E+00 | - 4.081E-01 | - 2.546E+00 |
| 2 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.1774E+00 | - 4.866E+00 | 0.9070E-01 | - 7.984E+00 | 0.9070E-01 | - 7.984E+00 |
| | DE FASE A, B, C | 0.3098E+00 | - 2.093E+00 | 0.8675E-01 | 0.3098E+00 | 0.8675E-01 | 0.3098E+00 |

FALLA EN EL BUS

++*+*+*+*+*+*+*

00-34801

CORRIENTES DE FUERTO CIRCUITO EN EL BUS DE FALLA

| | | | | | | |
|--------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| DE SECUENCIA 0,1,2 | 0.1702E+00 | - 2.700E+01 | 0.1702E+00 | - 2.700E+01 | 0.1702E+00 | - 2.700E+01 |
| DE FASE A, B, C | 0.5107E+00 | - 8.101E+01 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |



FACULTAD INGENIERIA

VOLTAJES EN LOS BUSES

BUS

| BUS | DE SECUENCIA | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|--------------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|---|
| 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | - 3070E-01 | - .6927E-02 | 0.7666E+00 | - .3187E-01 | - .2334E+00 | - .3187E-01 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| 2 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | - 1718E+00 | - .1352E-02 | 0.7429E+00 | - .4233E-01 | - .2571E+00 | - .4233E-01 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | - 3205E+00 | - .6469E-02 | 0.6603E+00 | 0.3234E-02 | - .3397E+00 | 0.3234E-02 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| | | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 | - .4808E+00 | - .8757E+00 | - .4808E+00 | 0.8563E+00 | |

CORRIENTES ENTRE BUSES

DE A

| DE | A | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|
| 0 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | 0.6355E-01 | - .2817E+00 | - .7179E+02 | 0.2203E+01 | 0.9158E-01 | - .6706E+00 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| 0 1 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | 0.6355E-01 | - .2817E+00 | - .7179E+02 | 0.2203E+01 | 0.9158E-01 | - .6706E+00 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| 0 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | 0.4313E-01 | - .2137E+01 | - .1001E+03 | 0.2641E+01 | - .1294E-01 | - .1359E+01 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| 1 2 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | 0.3370E-01 | - .1460E+00 | 0.1084E+00 | - .8940E-01 | 0.1084E+00 | - .8940E-01 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| 1 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | 0.9240E-01 | - .4174E+00 | 0.7477E-01 | - .1252E+01 | 0.7477E-01 | - .1252E+01 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| 2 3 | DE SECUENCIA 0,1,2 | | | | | | | |
| | 0.3370E-01 | - .1460E+00 | 0.1084E+00 | - .8940E-01 | 0.1084E+00 | - .8940E-01 | | |
| | DE FASE A, B, C | | | | | | | |
| | | 0.2505E+00 | - .3248E+00 | - .7469E-01 | - .5659E-01 | - .7469E-01 | - .5659E-01 | |

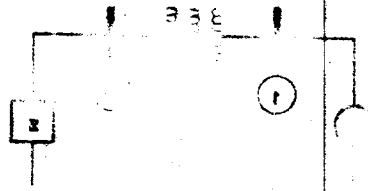
FORTRAN STOP



SCAN

1.- Para el procedimiento PATRI y AMON

Dado el caso de tener un transformador con devanado en serie



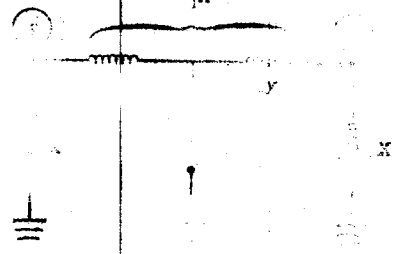
APENDICE

El circuito que se muestra puede no estar conectado a tierra para este caso

$$X_1 = X_2 = X$$

Información para el usuario

| Linea | Impedancia | Resistencia | Inductancia |
|-------|------------|-------------|-------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 |



datos

CASOS ESPECIALES DE TRANSFORMADORES

1.- Para los programas FATRI y FAMON

Dado el caso de tener un transformador con devanado terciario.

Ejemplo:

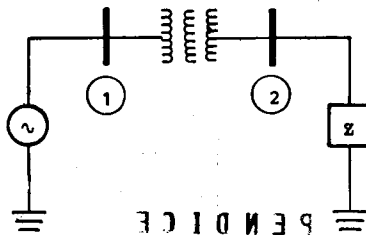
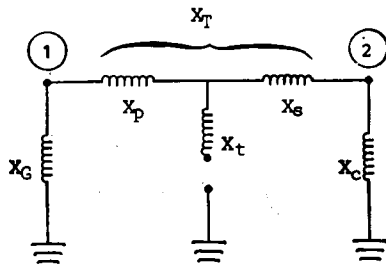


Figura 1

- 1) sucede que el terciario puede no estar conectado a tierra, para este caso, la reactancia X_T que se toma entre los buses es:

$$X_T = X_p + X_s$$

Diagrama de sec (+) y (-)



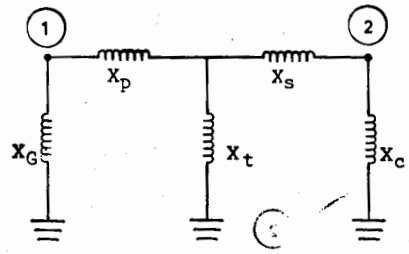
sin conexión del terciario a tierra

Figura 2

Información para alimentar al programa

| 'Línea' | 'N _E ' | 'N _R ' | 'Impedancias serie' |
|---------|-------------------|-------------------|---|
| 1, | 0, | 1, | 0, X _G |
| 2, | 1, | 2, | 0, X _T = X _p + X _s |
| 3, | 0, | 2, | 0, X _C |

11) pero en el caso de tener el devanado terciario conectado a tierra:



con conexión del terciario a tierra

Figura 3

se presenta el problema de no poder definir una reactancia entre los nodos 1 y 2, por lo que para poder resolver tal circunstancia se pueden hacer dos consideraciones:

- a) definir un nodo extra (llamado nodo ficticio), tanto para el diagrama de secuencia (+) y secuencia (-), como para el de secuencia (0).

Ejemplo:

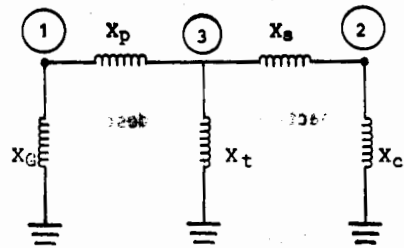


Figura 4

información para alimentar al programa.

| 'Linea' | 'Np' | 'Nr' | 'impedancia serie' |
|---------|------|------|--------------------|
| 1, | 0, | 1, | 0, X _G |
| 2, | 1, | 3, | 0, X _p |
| 3, | 0, | 3, | 0, X _t |
| 4, | 3, | 2, | 0, X _s |
| 5, | 0, | 2, | 0, X _c |

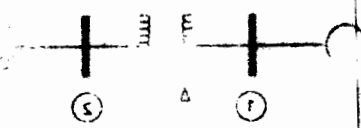


Figura 5

b) transformar la Y a Δ .

Ejemplo:

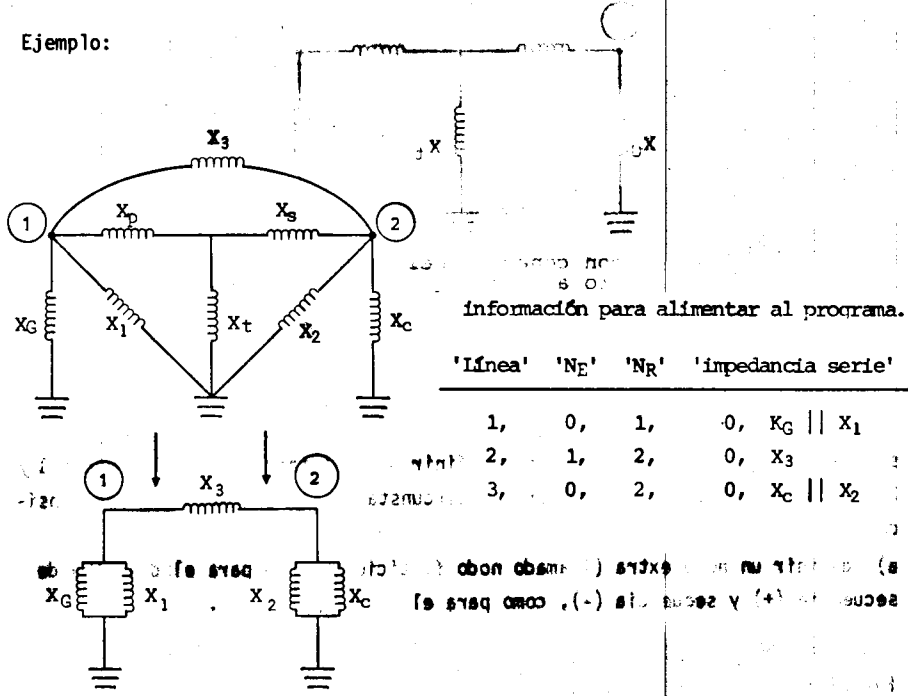


Figura 5

Para el siguiente diagrama unifilar:

2. Para el programa FAMON.

Si se tiene un transformador $\Delta - Y$, entonces su reactancia queda desconectada en el diagrama de impedancias de secuencia cero.

Ejemplo:

Para el siguiente diagrama unifilar:

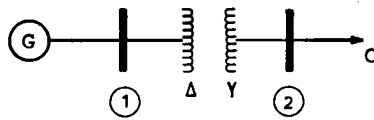


Figura 6

se tiene que sus circuitos equivalentes son:

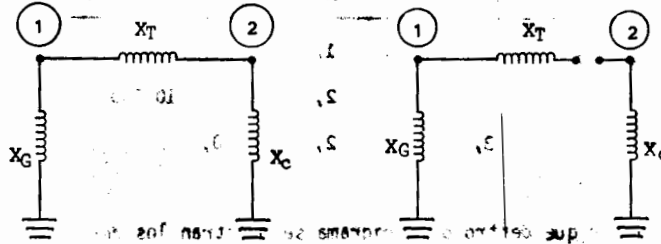


Figura 7

Figura 8

en el caso de $\sec(0)$, se tendría que tomar una reactancia con valor a infinito to que equivaldría a una admitancia de 0.

La formación de Y_{bus} quedaría, para el ejemplo, de la siguiente manera:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_G + Y_T & 0 \\ 0 & Y_C \end{bmatrix}$$

matriz a la cual no se le puede obtener su inversa, y como Z_{bus} es la inversa de Y_{bus} entonces no se podría obtener.

Para solucionar este problema, en lugar de tomar la reactancia de infinito, se toma una reactancia de 10 000 que es lo suficientemente grande para no afectar los resultados, teniéndose así una solución para Z_{bus} , lo cual implica la solución del problema.

información para alimentar al programa

| 'Línea' | 'N _E ' | 'N _R ' | 'Impedancia serie' |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1, | 0, | 1, | 0, X _G |
| 2, | 1, | 2, | 0, 10 000 |
| 3, | 0, | 2, | 0, X _C |

Cabe señalar que dentro del programa se muestran los *datos de líneas* que se dieron, pero la cantidad de 10 000 no está dentro de la capacidad del campo para tales datos, los cuales son casi siempre menores que la unidad. De tal forma la computadora señala dicho dato como XXXXXX, por no tener el campo adecuado para imprimirlo, aunque el resultado no se afecte en lo más mínimo. La XXXXXX ha de interpretarse como una cantidad muy grande.

0.0 ab stonstha... anu a...

... ab stonstha... anu a...

$$\begin{bmatrix} X + pY \\ pX \\ 0 \end{bmatrix} = \text{bus } Y$$

... ab stonstha... anu a...

... ab stonstha... anu a...