

42
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGÓN

“ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO EN UN
SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MÉCANICO ELÉCTRICO

P R E S E N T A N:

**DAVID LEON SALINAS
MIGUEL ANGEL CASTILLO ALVAREZ**

ASESOR DE TESIS :
ING. FRANCISCO JAVIER CORTES CRUZ

26-3-98

MÉXICO 1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ARAGÓN
DIRECCION
DUPLICADO

DAVID LEON SALINAS
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 4 de julio de 1996, presentada por MIGUEL ANGEL CASTILLO ALVAREZ y usted, relativa a la autorización que se les debe conceder para que el señor profesor, Ing. FRANCISCO JAVIER CORTES CRUZ pueda dirigirles el trabajo de Tesis denominado "ANALISIS DE CORTOCIRCUITO EN UN SISTEMA ELECTRICO INDUSTRIAL", con fundamento en el punto 6 y siguientes del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, México, a 19 de marzo de 1998.
EL DIRECTOR

LIC. CARLOS EDUARDO LEVY VAZQUEZ

Nota: La aceptación del tema de tesis y asesor de la misma fue registrado en la Unidad Académica de esta Escuela con fecha 12 de agosto de 1996.

c c p Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
c c p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/vr



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ARAGON
DIRECCION
DUPLICADO

MIGUEL ANGEL CASTILLO ALVAREZ
P R E S E N T E

En contestación a su solicitud de fecha 4 de julio de 1996, presentada por DAVID LEON SALINAS y usted, relativa a la autorización que se les debe conceder para que el señor profesor, Ing. FRANCISCO JAVIER CORTES CRUZ pueda dirigirles el trabajo de Tesis denominado "ANALISIS DE CORTOCIRCUITO EN UN SISTEMA ELECTRICIO INDUSTRIAL", con fundamento en el punto 6 y siguientes del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, México, a 19 de marzo de 1998.
EL DIRECTOR

LIC. CARLOS EDMUNDO LEVY VAZQUEZ

Nota: La aceptación del tema de tesis y asesor de la misma fue registrado en la Unidad Académica de esta Escuela con fecha 12 de agosto de 1996.

c c p Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
c c p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/vr

TEMA DE TESIS

Cortocircuito

TITULO

Análisis de cortocircuito en un Sistema Eléctrico Industrial

OBJETIVO

Analizar los elementos eléctricos que interactúan durante la falla de cortocircuito en un sistema eléctrico industrial, con la finalidad de conocer la magnitud de la corriente de falla para que en un estudio posterior se puedan coordinar las protecciones necesarias y suficientes para dicho sistema a partir de este análisis.

ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO EN UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.

CAPITULO 1

CONCEPTOS ELEMENTALES.

- 1.1 CONCEPTOS ELEMENTALES.
- 1.2 SISTEMA EN POR UNIDAD.
- 1.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS.
- 1.4 DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA ELÉCTRICO.

CAPITULO 2

ANÁLISIS DE REDES QUE INTERVIENEN DURANTE UN CORTOCIRCUITO

- 2.1 REDES DE SECUENCIA CERO PARA TRANSFORMADORES.
- 2.2 DIAGRAMA DE SECUENCIA DE UN GENERADOR TRIFASICO.
- 2.3 RED DE SECUENCIA CERO PARA CARGAS CONECTADAS EN ESTRELLA Y DELTA.
- 2.4 COMBINACIÓN DE IMPEDANCIAS.
 - 2.4.1 SERIE.
 - 2.4.2 PARALELO.
 - 2.4.3 DELTA-ESTRELLA.
 - 2.4.4 ESTRELLA-DELTA.
- 2.5 REACTANCIA DE LA RED DE ALIMENTACIÓN.
- 2.6 CALCULO DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS.

CAPITULO 3

ELEMENTOS QUE CONTRIBUYEN COMO FUENTES DE CORRIENTE EN UNA FALLA DE CORTOCIRCUITO.

- 3.1 GENERADORES SINCRONOS
- 3.2 MOTORES Y CONDENSADORES SINCRONOS.
- 3.3 MAQUINAS DE INDUCCIÓN.
- 3.4 SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

CAPITULO 4

TIPOS DE FALLAS.

- 4.1 OSCILOGRAMA DE UNA FALLA ASIMÉTRICA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL.
- 4.2 FALLA TRIFASICA BALANCEADA.
- 4.3 FALLA DE LÍNEA A TIERRA
- 4.4 FALLA DE LÍNEA A LÍNEA.
- 4.5 FALLA DOBLE LÍNEA A TIERRA.

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO EN UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL.

- 5.1 DESARROLLO DE UN ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO EN UN SISTEMA ELÉCTRICO.

APÉNDICE A.

APÉNDICE B.

APÉNDICE C.

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFÍA.

1.1 CONCEPTOS ELEMENTALES

* *SISTEMA ELÉCTRICO*

Es el conjunto de elementos (componentes físicos) conectados o relacionados entre si de tal manera que forman y/o interactúan como una unidad dinámica completa para desarrollar un propósito determinado. Cada uno de los elementos del sistema tienen una función específica.

Un sistema eléctrico de potencia sirve para producir (generar) energía eléctrica que los consumidores (la carga) absorben.

La conducción de la energía eléctrica desde la generación hasta la carga se realiza a través de la red de potencia eléctrica. Las plantas eléctricas donde se encuentran los generadores envían la energía a las subestaciones receptoras a través de las líneas de subtransmisión de alta tensión (voltaje), de las subestaciones receptoras, la energía es conducida a las subestaciones de distribución por medio de líneas de subtransmisión a tensiones por lo general inferiores a las anteriores. De las subestaciones de distribución parten líneas radiales que van a los usuarios, estas líneas se llaman alimentadores.

SISTEMA ELÉCTRICO



En el análisis de sistemas eléctricos se tienen dos tipos de elementos los cuáles son:


- a) Elementos pasivos.
- b) Elementos activos.

Los elementos pasivos son aquellos que por lo general son lineales (bajo su rango normal de operación), no tienen partes rotatorias y no generan energía, entre los cuales están las líneas de transmisión, transformadores, reactores y capacitores entre otros.

Los elementos activos son aquellos que sirven como fuente de energía, entre los cuales están los motores, generadores y condensadores síncronos, y algunas cargas como hornos, controles de velocidad, etc.


* RESISTENCIA

Es la oposición de un material para permitir el paso de la corriente eléctrica cuando en sus extremos existe una diferencia de potencial. Algunos ejemplos de resistencias en sistemas eléctricos son las lámparas incandescentes, hornos eléctricos, etc. Las relaciones matemáticas y eléctricas son:

SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN
 R	Ohm (Ω)	$V = IR$ donde $I = V/R$

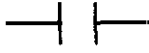
* REACTANCLIA INDUCTIVA

Es el esfuerzo producido por la fuerza contraelectromotriz en una bobina, retardando la corriente respecto del voltaje, idealmente el defasamiento es de 90 grados, pero en la práctica dicho ángulo es menor

SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN
	Henrys (Hy)	$XL = wL = 2\pi fL$ donde: w es la velocidad en radianes/seg. L es la inductancia en Henrys f es la frecuencia en Hertz

* *REACTANCIA CAPACITIVA*

Es la oposición al flujo de la corriente alterna, se basa en la capacidad de un capacitor para almacenar carga o fuerza contraelectromotriz que hace que el voltaje se atrase con respecto a la corriente idealmente el ángulo mide 90 grados, pero en la practica es inferior

SÍMBOLO	UNIDAD	ECUACIÓN
	Faradio (F)	$X_C = I / \omega C = I / 2\pi f C$ donde: ω es la velocidad angular en radianes/seg. C es la capacitancia en Farads f es la frecuencia en Hertz

* *REACTANCIA VARIABLE*

Esta reactancia es la que tenemos en los arrollamientos de las máquinas rotativas durante la presencia de un cortocircuito y se debe a las manifestaciones que ocurren en la máquina durante este intervalo de tiempo, dichas causas son la presencia de campos de excitación en algunas máquinas como lo son generadores sincrónicos, en el movimiento del primotor.

La reactancia variable la podemos conformar en tres diferentes tipos de valores, estos en función de un determinado tiempo y las cuales son:

- Reactancia subtransitoria (X'').
- Reactancia transitoria (X').
- Reactancia sincrónica (X).

*** IMPEDANCIA**

Las relaciones de fase de los componentes resistivos y reactivos (inductores y capacitores) se pueden representar vectorialmente mediante una impedancia de la siguiente forma:

$$Z = R + X$$

$$\text{donde: } X = X_L - X_C$$

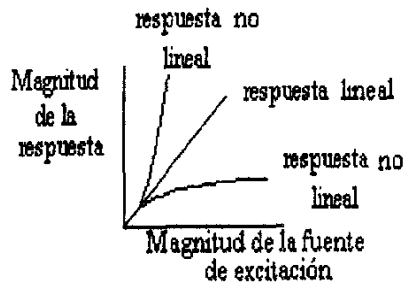
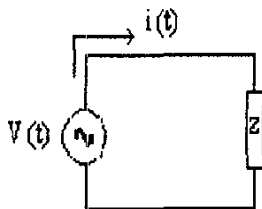
$$X_L = \omega L$$

$$X_C = 1 / \omega C$$

$$\omega = 2\pi f$$

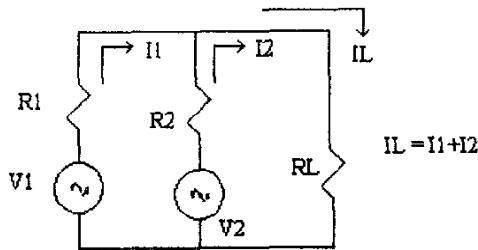
*** CIRCUITO ELEMENTAL**

Sea $V(t)$, la fuente de excitación y Z la impedancia del circuito, de estas condiciones existirá una respuesta $i(t)$ que puede ser lineal o no lineal, dependiendo de la carga (Z) y de la fuente de excitación; el comportamiento de dicho circuito lo observaremos en la siguiente figura:



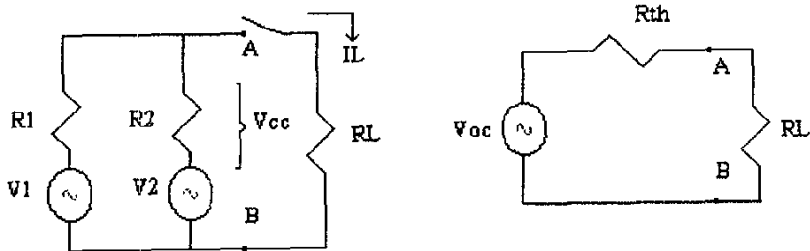
* SUPERPOSICIÓN

En cualquier red resistiva que tenga varias fuentes, el voltaje entre terminales o la corriente a través de cualquier resistor o fuente se puede calcular sumando algebraicamente todos los voltajes o corrientes causados por cada fuente, actuando individualmente, es decir, sustituir cada fuente de voltaje por un cortocircuito y dejar el circuito en cada sustitución con una sola fuente de excitación. Ejemplo:



* TEOREMA DE THEVENIN

Dado cualquier circuito lineal, rearréguese en forma de dos redes A y B conectadas por dos conectores perfectos. Se define un voltaje V_{oc} , como el voltaje de circuito abierto que apareciera en las terminales de A si B se desconectara, de tal forma que no fluyese corriente de A, junto con esta fuente de voltaje de V_{oc} en serie con una resistencia vista desde donde se tienen los puntos A y B. Ejemplo:



** LEYES DE KIRCHOFF*

Dichas leyes son ampliaciones de la ley de Ohm, nos permiten conocer mejor como están relacionadas las unidades eléctricas entre si, cuando los circuitos presentan ramificaciones o derivaciones, dichas leyes se pueden enunciar de la siguiente manera:

- Primera ley: En un circuito cualquiera, la misma cantidad de corriente que va hacia un punto determinado, es la misma que sale de dicho punto.

- Segunda ley: La suma de las caídas de potencial (IR) que se produce en una parte cualquiera de un circuito eléctrico, es igual a la suma de las fuerzas electromotrices que existen de la misma.

** LEY DE JOULE*

Cuando se hace pasar una corriente por un conductor, este se calienta llegando a ponerse incandescente y si el calentamiento continua se fundirá el conductor si la corriente es muy intensa. La ley establece que la cantidad de calor desarrollada en un conductor, es proporcional a la resistencia de este, al cuadrado de la intensidad de la corriente y al tiempo que dura la misma, se coloca un factor de 0.24 comúnmente llamado equivalente mecánico de la electricidad, por ser un watt segundo igual a 0.24 calorías, es decir que se establece la siguiente relación:

$$C = 0.24 RI^2 t$$

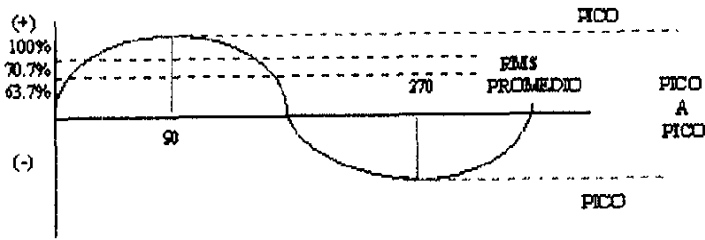
donde: C es el numero de calorías pequeñas
R es la resistencia en Ohm
I es la intensidad de la corriente
t es el tiempo en segundos

** INDUCCIÓN*

La inducción es una propiedad del circuito, no de la corriente ni del voltaje, depende de la forma y dimensiones del circuito. Si se trata de una bobina que tenga núcleo de hierro, material de gran permeabilidad magnética, la inducción será grande, pero cuando se trata de conductores rectos y el medio que los rodea es el aire, que tiene escasa permeabilidad la inducción apenas será notada. Los efectos de la inducción afectan a los valores de la tensión, corriente y potencia de los circuitos.

** REPRESENTACIÓN DE VALORES DE UNA ONDA SENOIDAL*

El valor rms (root mean square) es una forma de promediar valores instantáneos en una onda senoidal de voltaje o corriente y es igual al valor máximo entre raíz de dos, dichas magnitudes dependen del ángulo de fase.



Representación de valores en una onda senoidal

*** POTENCIA REAL**

Es la energía que se transfiere de la fuente a la carga (esta la transforma en calor, movimiento, luz, etc.), se manifiesta solo en elementos resistivos. Esta definida mediante la siguiente relación.

$$P = VI \cos \phi$$

donde: V = Valor del voltaje eficaz
I = Valor de la corriente eficaz
 ϕ = Angulo entre V e I

*** POTENCIA REACTIVA**

Este tipo de energía se puede transferir de la fuente a la carga y de la carga a la fuente, crea un campo magnético en elementos inductivos y un campo eléctrico en elementos capacitivos, se representa mediante la siguiente relación:

$$Q = VI \sin \phi$$

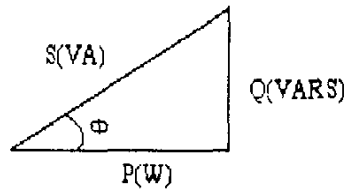
donde: V = Valor del voltaje eficaz
I = Valor de la corriente eficaz
 ϕ = Angulo entre V e Y

*** POTENCIA APARENTE**

Se representa por la letra S, nos indica la cantidad de energía de un sistema en términos de sus valores eficaces de corriente y voltaje.

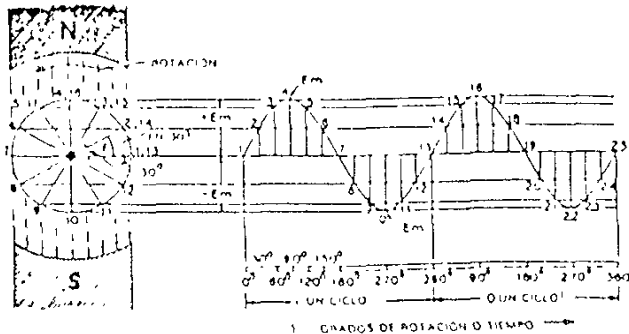
* TRIÁNGULO DE POTENCIAS

Es una representación geométrica que nos relaciona la potencia real, potencia reactiva y potencia aparente



* ONDA SENOIDAL GENERADA POR UNA BOBINA QUE GIRA EN UN CAMPO MAGNÉTICO FIJO

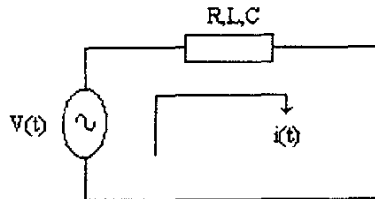
En un generador de C.A., el armazón giratorio produce una onda senoidal de voltaje, dicho armazón lo podemos representar como un vector giratorio r . El ángulo que describe este vector se designa mediante la letra Φ . Los valores instantáneos de voltaje son máximos cuando Φ es igual a 90 grados o 270 grados y son cero cuando el ángulo de fase es igual a 0 y 180 grados. El vector del radio r gira en torno al origen Φ y se considera que lo hace en contra de las manecillas del reloj; la velocidad angular en radianes por segundo del vector r giratorio es la razón a que la rotación del mismo genere el ángulo Φ . Es así como se representa la velocidad angular por ω o $2\pi\phi$ (radianes por segundo) donde 2π es una constante igual a 6.28, y f es la frecuencia en hertz.



** COMPORTAMIENTO DE LA RESPUESTA DE VARIAS CARGAS*

Cuándo se tiene una fuente en un circuito y esta es senoidal la respuesta del circuito para cada una de las cargas tiende a variar, debido a las características de la resistencia, inductancia y capacitancia; en los resistores

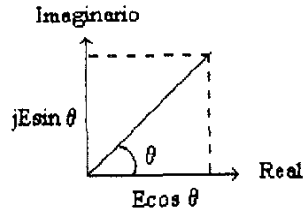
Prácticamente no existe defasamiento entre el voltaje y la corriente, en los capacitores existe un defasamiento del voltaje respecto a la corriente (la corriente se adelanta al voltaje), mientras que en las bobinas la corriente se atrasa respecto al voltaje, dicho ángulo entre estas dos magnitudes idealmente se maneja de 90 grados, pero en la práctica es inferior para los casos inductivos y capacitivos. En la figura siguiente observamos el circuito representativo:



** REPRESENTACIÓN DEL FASOR*

La representación fasorial tiene como fin el de simplificar las funciones del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, representada en forma polar por una magnitud y un ángulo, que gira en sentido antihorario a una velocidad ω (rad/seg.), existen varias formas de representar fasorialmente una función como lo es: rectangular, exponencial y polar, es decir:

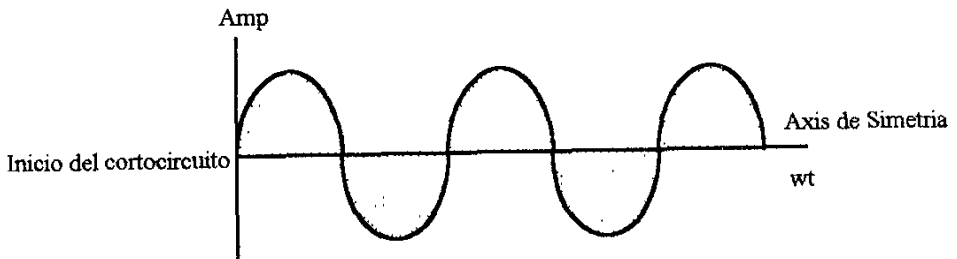
$$E \cos \theta + jE \sin \theta = E e^{j\theta} = E \left| \theta \right.$$



** CORRIENTES SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS*

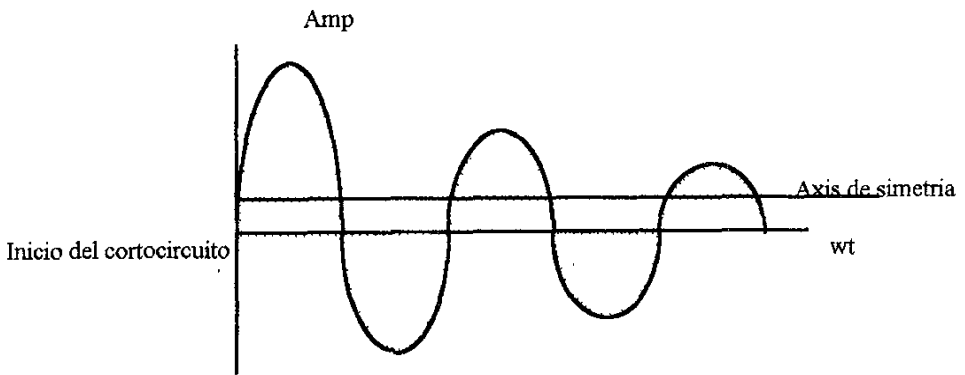
- SIMÉTRICAS

Se dice que la forma de onda de la corriente es simétrica debido a que una parte de la onda (envolvente superior) respecto a la otra parte (envolvente inferior) es simétrica respecto a un eje llamado zero axis. Como un ejemplo tenemos el oscilograma de la corriente de cortocircuito de un generador sincrónico, se tiene simetría en las envolventes de sus picos respecto al eje zero axis, en la gráfica siguiente se observa:



- ASIMÉTRICAS

La gráfica de una corriente asimétrica es aquella en donde no hay relación entre las envolventes superior e inferior respecto al eje zero axis de simetría, en la siguiente figura lo observamos:

**1.2 CANTIDADES EN POR UNIDAD**

Una parte importante en la preparación para el cálculo de las corrientes de cortocircuito, es establecer la impedancia de cada elemento del sistema industrial y convertirla en cantidades en por unidad para que sean comunes o consistentes con todas las demás y así poderlas combinar en serie y en paralelo. Fuentes de valores de impedancia para los elementos del circuito son datos de placa, manuales, catálogos del fabricante y tablas.

Existen dos formas de representar las impedancias de un elemento que son en Ohm y en por unidad (PU); las impedancias individuales de los equipos son a menudo dadas en por ciento, lo cual hace que las comparaciones sean fáciles, pero impedancias en por ciento raramente son usadas sin conversión en los cálculos del sistema. La forma en PU de la impedancia es usada

porque es mas conveniente que la forma Ohmica cuando el sistema contiene varios niveles de voltaje. Impedancias expresadas en PU sobre una base definida pueden ser combinadas directamente, sin importar cuantos niveles de voltaje existan desde la fuente hasta la falla. Como en sistemas industriales tenemos varios niveles de voltaje es necesario expresar las impedancias en PU o sobre una base especifica todos y cada uno de los elementos del sistema como lo son el transformador, generador, motor, cables, etc.

En el sistema en PU hay cuatro cantidades base: Potencia aparente base en volt-ampere, Voltaje base, Corriente base e Impedancia base. La relación entre cantidades base por unidad y reales es como sigue:

$$\text{Cantidad en PU} = \frac{\text{Cantidad real}}{\text{Cantidad base}}$$

Usualmente un valor conveniente seleccionado para la Potencia base aparente es por los MVA del generador o transformador de mayor capacidad, y un Voltaje base es seleccionado tomando dicho valor del transformador de mayor capacidad o del nivel de voltaje en la acometida. Corriente base e Impedancia base en cada nivel son entonces obtenidas por las

relaciones normales. Las siguientes fórmulas se aplican a sistemas trifasicos, donde el voltaje base es el voltaje fase a fase y la potencia aparente es la potencia aparente trifasica:

$$I_{base}(\text{Ampere}) = \frac{KVAbase}{\sqrt{3}KVbase}$$

$$Z_{base}(\text{Ohm}) = \frac{(KVbase)^2}{MVAbase}$$

Las impedancias de los elementos individuales del sistema de potencia usualmente son obtenidas en formas que requieren conversión a las bases referidas para un calculo en PU.

Para convertir a PU cuando se conoce el valor en Ohm se usa la siguiente expresión:

$$Z_{PU} = \frac{Z(\Omega) MVA_{base}}{(KV_{base})^2}$$

De la ecuación anterior se deduce que:

$$Z(\Omega) = \frac{Z_{PU} (KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

Como el valor en Ohm de la impedancia debe permanecer constante independientemente de los valores base seleccionados (base1 o base2), se puede hacer la siguiente igualdad:

$$\frac{Z_{PU_{base1}} (KV_{base1})^2}{MVA_{base1}} = \frac{Z_{PU_{base2}} (KV_{base2})^2}{MVA_{base2}}$$

De la que se deriva la siguiente ecuación para el calculo de impedancias en PU a cantidades base diferentes a las originales (convertir de base1 a base2):

$$Z_{PU_{base2}} = Z_{PU_{base1}} \left(\frac{MVA_{base2}}{MVA_{base1}} \right) \left(\frac{KV_{base1}}{KV_{base2}} \right)^2$$

$$S_{PU} = \frac{S}{S_{base}}$$

$$V_{PU} = \frac{V}{V_{base}}$$

$$I_{PU} = \frac{I}{I_{base}}$$

1.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS

Al determinar las corrientes de cortocircuito, específicamente para una falla asimétrica en donde los vectores de las fases estarán desbalanceados, es común emplear una herramienta que nos ayude a conocer las magnitudes de esos vectores desbalanceados, de lo que se habla es del teorema de Fortescue, presentado en 1918 en una reunión del "American Institute of Electrical Engineers", por C. L. Fortescue. El trabajo de Fortescue demuestra que un sistema desequilibrado de "n" vectores relacionados entre si, puede descomponerse en "n" sistemas de vectores equilibrados denominados componentes simétricas de los vectores originales. Los "n" vectores de cada grupo de componentes son de igual longitud, al igual que los ángulos formados por vectores adyacentes; el método es aplicable a cualquier sistema polifásico desequilibrado, el estudio aquí presentado será para sistemas trifásicos.

Según el teorema de Fortescue, tres vectores desequilibrados de un sistema trifásico puede descomponerse en sistemas equilibrados de vectores. Los conjuntos equilibrados de componentes son:

1.- Componentes de secuencia positiva, formados por tres vectores de igual modulo, con diferencias de fase de 120° y con la misma secuencia de fases que los vectores originales, Como se observa en la siguiente figura:

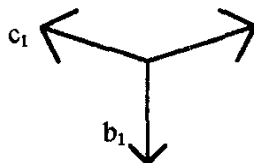


Diagrama vectorial de componentes simétricas de secuencia positiva

Fig 1.3a

2.- Componentes de secuencia negativa, formados por tres vectores de igual modulo, con diferencias de fase de 120° y con la secuencia de fases opuesta a la de los vectores originales Representada en la figura:

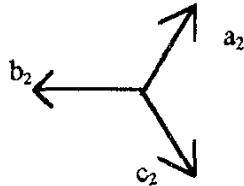


Diagrama vectorial de componentes simétricas de secuencia negativa

Fig 1.3b

3.- Componentes de secuencia cero, formados por tres vectores de igual modulo y con una diferencia de fase nula. Representada en la figura:

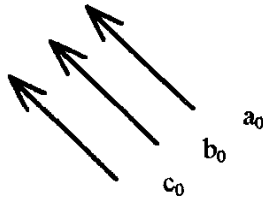


Diagrama vectorial de componentes simétricas de secuencia cero

Fig 1.3c

Suponiendo un sistema desbalanceado de tres vectores, como el de la figura siguiente, donde cada uno de los vectores desequilibrados originales es igual a la suma de sus componentes, los vectores originales expresados en función de sus componentes serian:

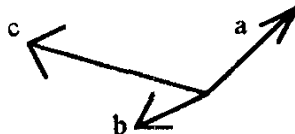


Diagrama vectorial de un sistema desbalanceado

Fig. 1.3d

$$\begin{array}{ll}
 \mathbf{a} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 & \text{----- } \mathbf{a} \\
 \mathbf{b} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 & \text{----- } \mathbf{b} \\
 \mathbf{c} = \mathbf{c}_0 + \mathbf{c}_1 + \mathbf{c}_2 & \text{----- } \mathbf{c}
 \end{array}$$

En un sistema trifásico es conveniente, por los desplazamientos de fase de las componentes simétricas de tensiones y corrientes disponer de un método para indicar la rotación de 120° de un vector. La letra α se utiliza normalmente para designar al operador que origina una rotación de 120° en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj. Tal operador es un número complejo de módulo unidad y argumento de 120° definido por las siguientes expresiones:

$$\alpha = \text{mag } 1 \text{ ang } 120^\circ = -0.5 + j \sqrt{3}/2$$

$$\alpha^2 = \text{mag } 1 \text{ ang } 240^\circ$$

$$\alpha^3 = 1$$

$$\alpha^4 = \alpha$$

$$\alpha^5 = \alpha^2$$

$$\alpha^2 \neq -\alpha$$

$$\alpha + \alpha^2 = -1$$

$$\alpha - \alpha^2 = j\sqrt{3}$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$

$$1 - \alpha = \alpha^2 j\sqrt{3}$$

$$1 - \alpha^2 = \text{mag } \sqrt{3} \text{ ang } 30^\circ$$

$$1 + \alpha^2 = -\alpha$$

Partiendo de las ecuaciones a, b y c se puede ver la descomposición de tres vectores asimétricos en sus componentes simétricas. En primer lugar se observa que el número de magnitudes desconocidas puede reducirse, expresando cada componente de b y c como el producto de una función del operador α y un componente de a. De la figura 1a, 1b y 1c se derivan las relaciones siguientes:

$$\mathbf{b}_1 = \alpha^2 \mathbf{a}_1 \quad \text{----- 1.3.1}$$

$$\mathbf{b}_2 = \alpha \mathbf{a}_2 \quad \text{----- 1.3.2}$$

$$\mathbf{b}_0 = \mathbf{a}_0 \quad \text{----- 1.3.3}$$

$$\mathbf{c}_1 = \alpha \mathbf{a}_1 \quad \text{----- 1.3.4}$$

$$\mathbf{c}_2 = \alpha^2 \mathbf{a}_2 \quad \text{----- 1.3.5}$$

$$\mathbf{c}_0 = \mathbf{a}_0 \quad \text{----- 1.3.6}$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en las ecuaciones a, b y c, se obtiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{b} &= \mathbf{a}_0 + \alpha^2 \mathbf{a}_1 + \alpha \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{c} &= \mathbf{a}_0 + \alpha \mathbf{a}_1 + \alpha^2 \mathbf{a}_2 \end{aligned}$$

o bien en forma matricial

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \text{----- 1.3.7}$$

donde

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

Para encontrar a_0 , a_1 y a_2 el sistema de ecuaciones planteado en la ecuación 1.3.5 se resuelve por la regla de Cramer:

$$\text{Det} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} = (\alpha^4 - \alpha^2) - (\alpha^2 - \alpha) + (\alpha - \alpha^2) = 3(\alpha - \alpha^2)$$

$$a_0 = \frac{\text{Det} \begin{bmatrix} a & 1 & 1 \\ b & \alpha^2 & \alpha \\ c & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}}{\text{Det}[A]} = \frac{a(\alpha^4 - \alpha^2) - b(\alpha^2 - \alpha) + c(\alpha - \alpha^2)}{3(\alpha - \alpha^2)}$$

$$= \frac{a(\alpha - \alpha^2) - b(\alpha - \alpha^2) + c(\alpha - \alpha^2)}{3(\alpha - \alpha^2)} = \frac{1}{3}(a + b + c)$$

$$a_1 = \frac{\text{Det} \begin{bmatrix} 1 & a & 1 \\ 1 & b & \alpha \\ 1 & c & \alpha^2 \end{bmatrix}}{\text{Det}[A]} = \frac{-a(\alpha^2 - \alpha) + b(\alpha^2 - 1) - c(\alpha - 1)}{3(\alpha - \alpha^2)}$$

$$= \frac{a(\alpha - \alpha^2) + ba(\alpha - \alpha^2) + c\alpha^2(\alpha - \alpha^2)}{3(\alpha - \alpha^2)} = \frac{1}{3}(a + ba + c\alpha^2)$$

$$\text{Det} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} = (\alpha^4 - \alpha^2) - (\alpha^2 - \alpha) + (\alpha - \alpha^2) = 3(\alpha - \alpha^2)$$

$$a_2 = \frac{\text{Det} \begin{bmatrix} 1 & 1 & a \\ 1 & \alpha^2 & b \\ 1 & \alpha & c \end{bmatrix}}{\text{Det}[A]} = \frac{a(\alpha - \alpha^2) - b(\alpha - 1) + c(\alpha^2 - 1)}{3(\alpha - \alpha^2)}$$

$$= \frac{a(\alpha - \alpha^2) + b\alpha^2(\alpha - \alpha^2) + c\alpha(\alpha - \alpha^2)}{3(\alpha - \alpha^2)} = \frac{1}{3}(a + b\alpha^2 + c\alpha)$$

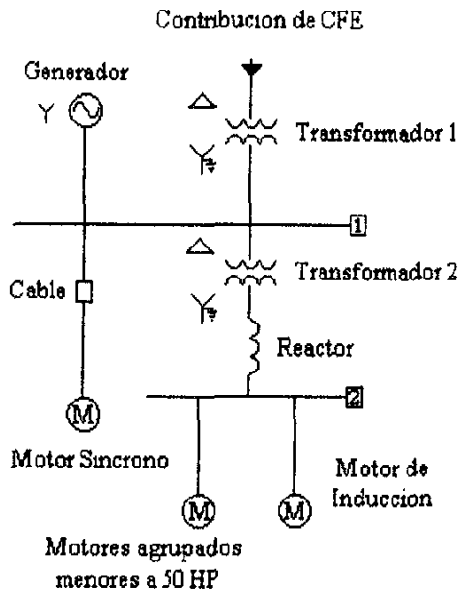
Expresado en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad \text{----- 1.3.6}$$

Estas expresiones muestran como descomponer tres vectores asimétricos en sus componentes simétricas; si se necesitan los componentes b_0 , b_1 , b_2 , c_0 , c_1 y c_2 se pueden determinar por el conjunto de ecuaciones 4. Toda esta teoría se aplica tanto a corrientes como a voltajes.

1.4 DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA ELECTRICO

La figura siguiente nos muestra la representación de un diagrama unifilar de un sistema eléctrico típico, el cual analizaremos mas adelante.



ANÁLISIS DE REDES QUE INTERVIENEN DURANTE UN CORTOCIRCUITO.

2.1 REDES DE SECUENCIA CERO PARA TRANSFORMADORES.

Para comprender el estudio de las redes de secuencia cero, se recordara que por el primario de un transformador no circula corriente a menos que circule por el secundario y despreciando la pequeña corriente de magnetización, la corriente primaria estará determinada por la secundaria y por la relación de transformación. Estos principios sirven de base en el análisis de los casos particulares. Los casos que se analizaran son algunos de los mas importantes, estos en forma gráfica se indicaran por medio de una flecha la trayectoria de circulación de la corriente de secuencia cero, cuando no exista tal indicación la conexión del transformador no permitirá la circulación de las corrientes de secuencia cero.

En el análisis de las corrientes de secuencia cero se partirá del hecho de que las corrientes de secuencia cero de un sistema trifasico son las mismas que uno monofasico, ya que ambas tienen el mismo valor absoluto y ángulo de fase, en cualquier punto de todas las fases del sistema; por lo que las corrientes de secuencia cero circularan solamente si existe una trayectoria de retorno por la cual se complete el circuito. Los circuitos equivalentes de secuencia cero de los transformadores trifasicos merecen una atención especial, ya que las diversas combinaciones posibles de los devanados primario y secundario conectados en estrella y delta varian la red de secuencia cero.

CAPITULO 2 REDES QUE INTERVIENEN DURANTE UN CORTOCIRCUITO

En las figuras 2.1 se observan distintas conexiones de transformadores.

* *Conexión Estrella-Estrella (un neutro a tierra).*

Para que exista una trayectoria cerrada (condición para la circulación de corriente de secuencia cero dependiendo de la conexión) ambos neutros de las conexiones deberán estar aterrizados, en este caso la corriente de secuencia cero no circulara porque solo un neutro esta aterrizado (Fig. 2 1a).

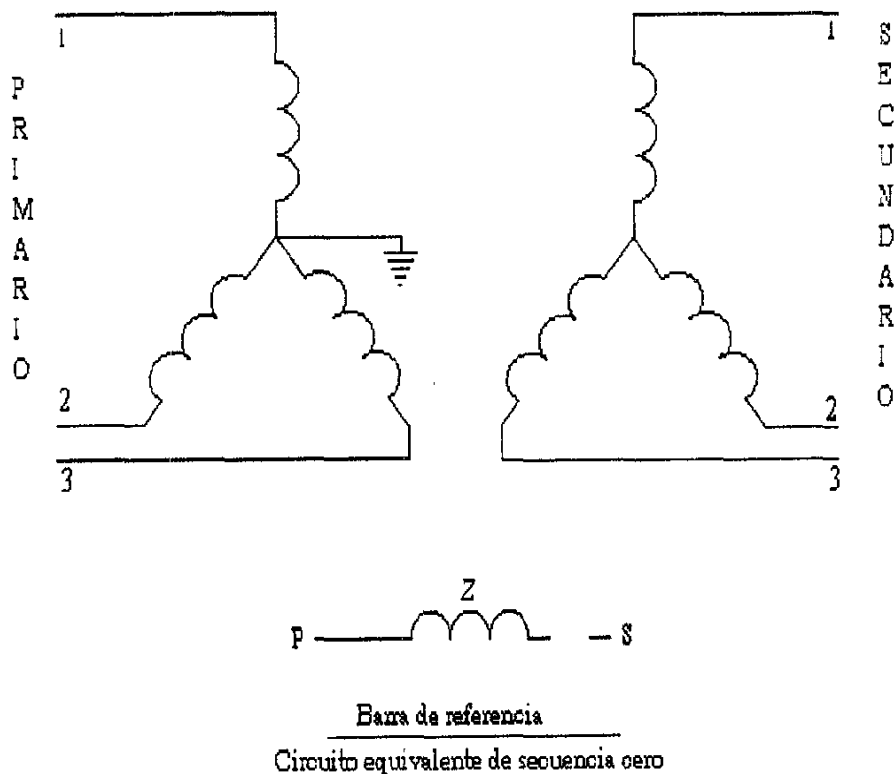


FIG. 2. 1a

CAPITULO 2 REDES QUE INTERVIENEN DURANTE UN CORTOCIRCUITO

** Conexión Estrella-Estrella (ambos neutros aterrizados).*

Cuando ambos neutros de un transformador estrella-estrella están conectados a tierra, si existe una trayectoria en los dos devanados para la circulación de la corriente de secuencia cero. En la red de secuencia cero, los puntos de ambos lados del transformador se unen por la impedancia de secuencia cero del transformador (Fig. 2.1b).

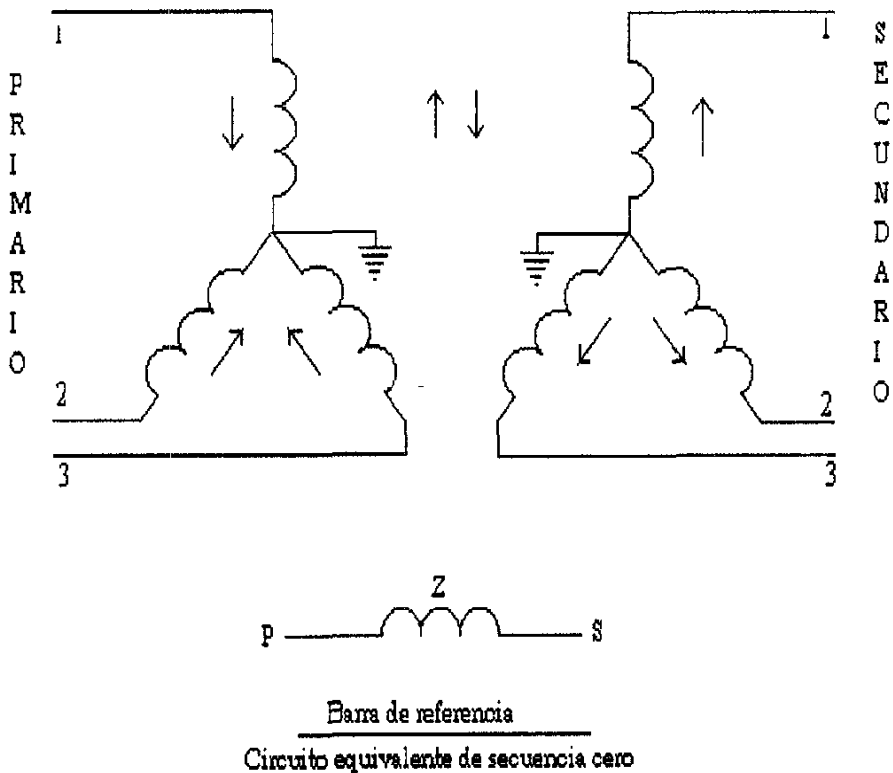


FIG. 2.1b

** Conexión Estrella-Delta (Estrella conectada a tierra).*

Si el neutro de un transformador estrella-delta es conectado a tierra, la corriente de secuencia cero si tiene una trayectoria a tierra a través de la conexión estrella, ya que las corrientes inducidas correspondientes pueden circular en la conexión delta. La corriente de secuencia cero que circula en la delta para equilibrar la corriente de secuencia cero de la estrella, no puede circular en las líneas conectadas a la delta. El circuito equivalente debe proporcionar una trayectoria desde la línea en el lado de la estrella, a través de la resistencia equivalente y de la reactancia de pérdida del transformador, hasta la barra de referencia. Es preciso que haya un circuito abierto entre la línea y la barra de referencia en el lado de la delta. Si la conexión del neutro a tierra contiene una impedancia Z_n , el circuito equivalente de secuencia cero debe tener una impedancia $3Z_n$ en serie con la resistencia equivalente y la reactancia de pérdida del transformador, para conectar la línea en el lado en estrella a tierra (Fig. 2.1c)

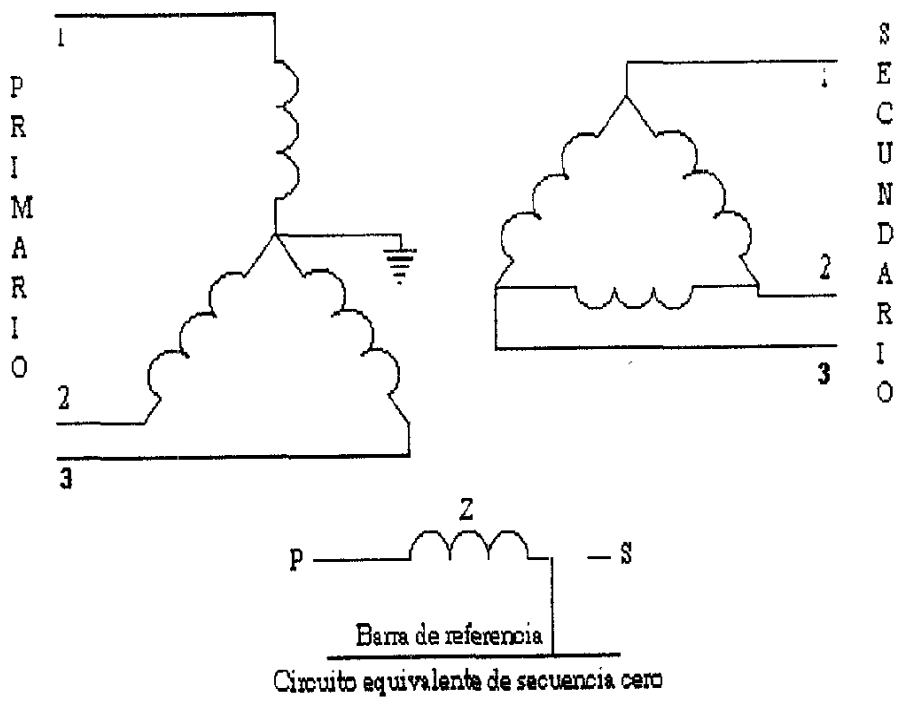


FIG. 2.1c

* *Conexión Estrella-Delta (sin conexión a tierra).*

Si la estrella no esta conectada a tierra, la impedancia Z_n entre el neutro y tierra es infinita. La impedancia $3Z_n$ en el circuito equivalente en el caso anterior para la impedancia de secuencia cero, se hace infinita; la corriente de secuencia cero no puede circular en los devanados del transformador (Fig. 2.1 d).

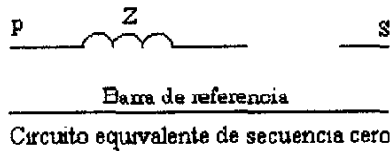
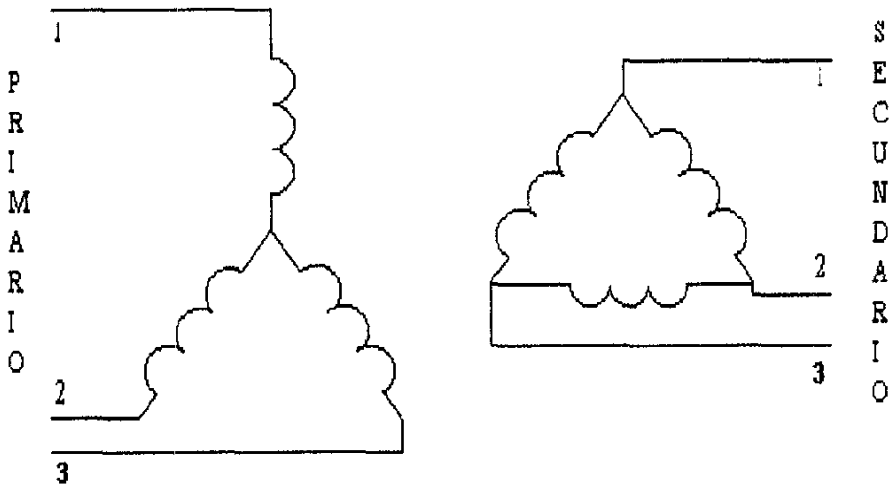
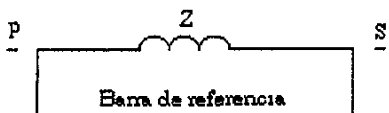
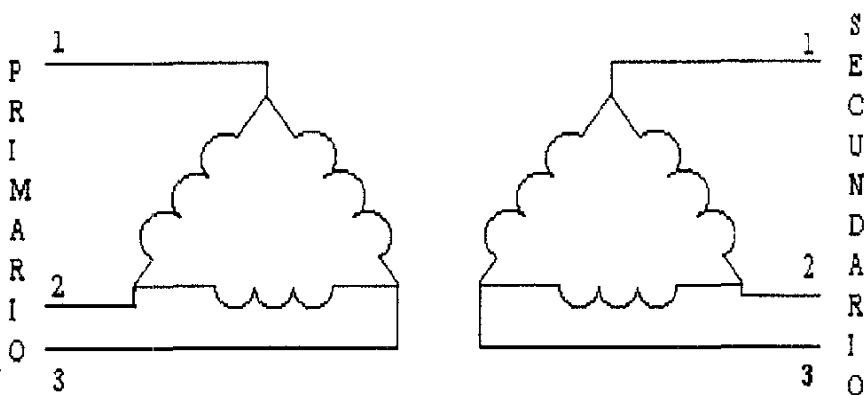


FIG. 2.1d

** Conexión Delta-Delta.*

Como un circuito delta-delta no proporciona trayectoria de retorno a la corriente de secuencia cero, no puede haber dicha corriente, aunque puede circular dentro de los devanados en delta (Fig. 2.1e).



Circuito equivalente de secuencia cero

FIG. 2.1e

2.2 DIAGRAMAS DE SECUENCIA DE UN GENERADOR TRIFASICO.

El análisis de corrientes de secuencia positiva, negativa y cero de un generador en vacío conectado a tierra a través de una impedancia es como el de la figura 2.2a

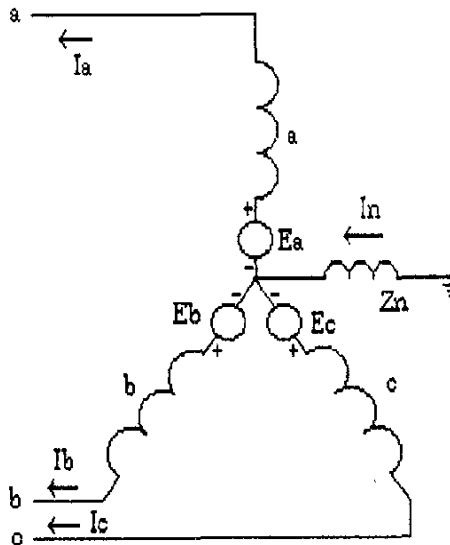


FIG. 2.2a

Haciendo el análisis y aplicando componentes simétricas al circuito del generador se tiene que la corriente de secuencia cero es:

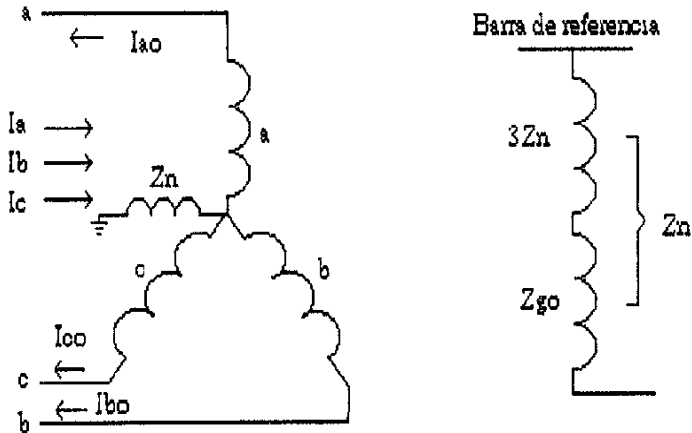
$$I_{a0} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = \frac{I_n}{3} \quad \text{--- 2.2.1}$$

CAPITULO 2 REDES QUE INTERVIENEN DURANTE UN CORTOCIRCUITO

de donde se tiene que:

$$I_n = 3I_{a0} \quad \text{-----} \quad 2.2.2$$

En el circuito de la figura 2.2b se observan las corrientes de secuencia cero y dicha corriente que circula por la impedancia Z_n que esta entre neutro y tierra, es igual a $3 I_{a0}$.



$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = \text{Sentido de las corrientes de secuencia cero}$$

FIG. 2.2b

La caída de tensión de secuencia cero, desde el punto de referencia fase "a" a tierra es igual a $(-3I_{a0}Z_n - I_{a0}Z_{g0})$ como se observa en la figura 2.2c de la red de secuencia cero para el generador, aquí Z_{g0} es la impedancia de secuencia cero por fase del generador.

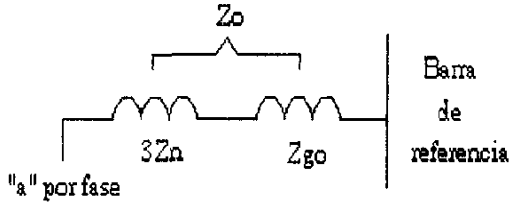


FIG. 2.2c

La red de secuencia cero, es un circuito monofasico por el cual solamente pasa la corriente de secuencia cero de una fase por una impedancia total de secuencia cero:

$$Z_0 = 3 Z_n + Z_{g0} \quad \text{-----} \quad 2.2.3$$

En la figura 2.2d observamos el sentido de la corriente de secuencia positiva para el generador, asi como la red de secuencia positiva.

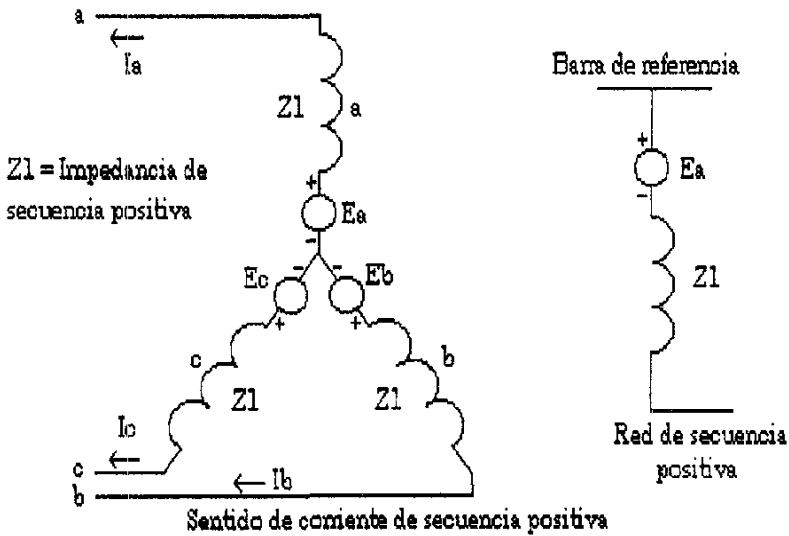
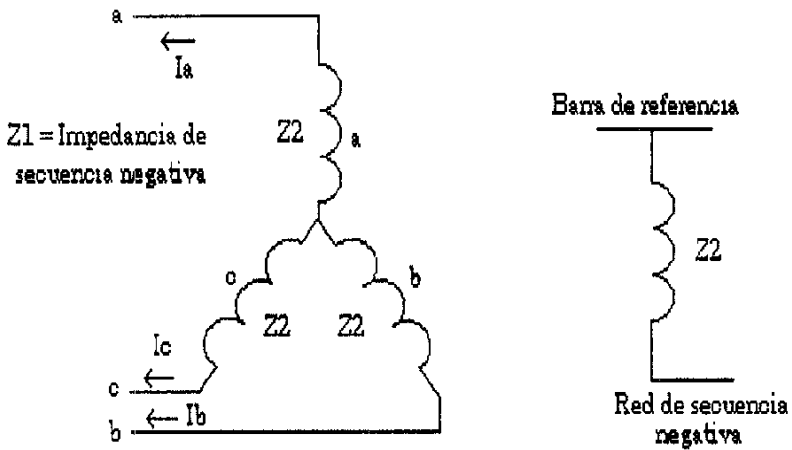


FIG. 2.2d

CAPITULO 2 REDES QUE INTERVIENEN DURANTE UN CORTOCIRCUITO

En el circuito de la figura 2.2e se observa el sentido de la corriente de secuencia negativa, así como la red de secuencia negativa para el generador.



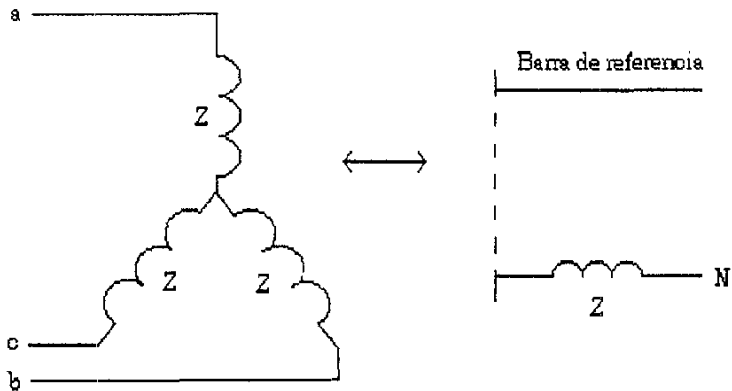
Sentido de corriente de secuencia negativa

FIG. 2.2e

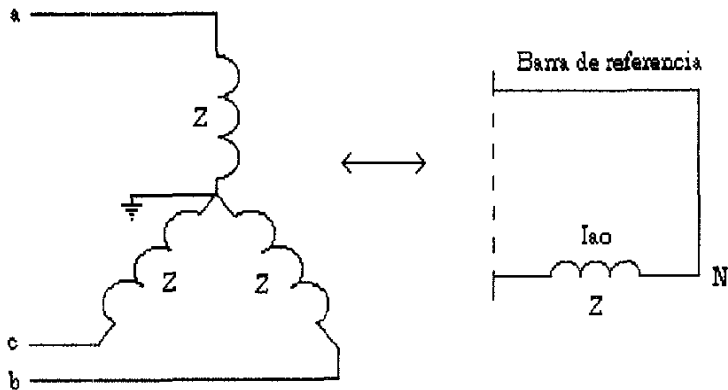
2.3 RED DE SECUENCIA CERO PARA CARGAS CONECTADAS EN ESTRELLA Y DELTA.

En las cuatro figuras siguientes observamos las redes de secuencia cero para cargas conectadas en estrella y delta.

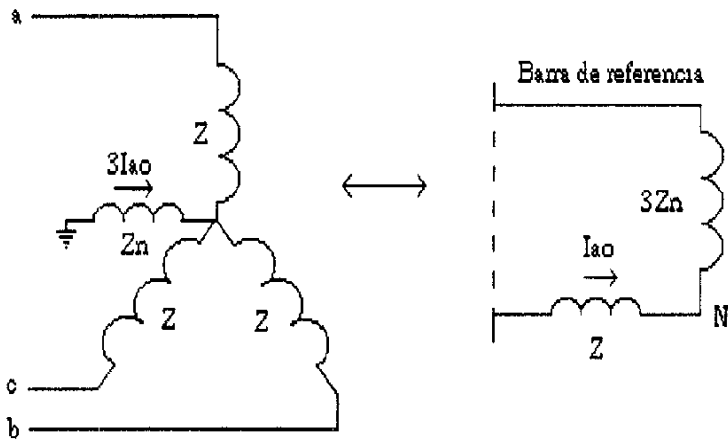
**ESTRELLA*



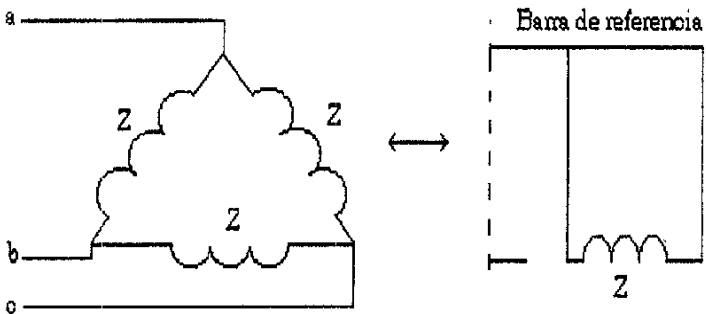
** ESTRELLA ATERRIZADA SIN IMPEDANCIA*



* ESTRELLA ATERRIZADA CON IMPEDANCIA



* DELTA



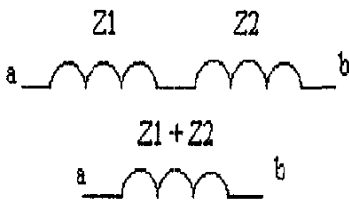
2.4 COMBINACIÓN DE IMPEDANCIAS

El determinar el procedimiento a seguir para simplificar la red de un circuito, es un paso importante para lograr conocer la impedancia equivalente en un punto determinado de la misma; por lo cual comúnmente se emplean las siguientes equivalencias: en serie, en paralelo, de Delta a Estrella y de Estrella a Delta.

CALCULO DE LA IMPEDANCIA O REACTANCIA EQUIVALENTE

Este análisis tiene como fin el determinar la impedancia o reactancia que existe entre un punto de la instalación y la fuente de alimentación (red de suministro eléctrico). Este valor se tiene que calcular para cada uno de los instantes del cortocircuito y para cada punto donde se requiere analizar el efecto de una falla de cortocircuito.

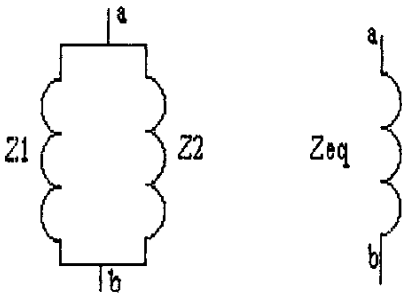
* Para "n" y dos impedancias en serie:



$$Z_{eqn} = \sum_i^n Z_i$$

$$Z_{eq_2} = Z_1 + Z_2$$

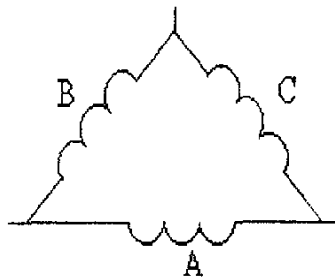
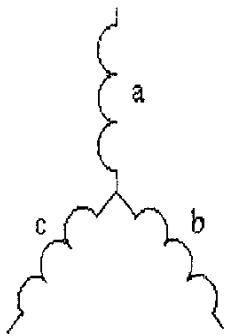
* Para "n" y dos impedancias en paralelo:



$$\frac{1}{Z_{eqn}} = \sum_i^n \frac{1}{Z_i}$$

$$Z_{eq_2} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2}$$

* Para la transformación de una conexión de impedancias en Estrella a una conexión Delta:

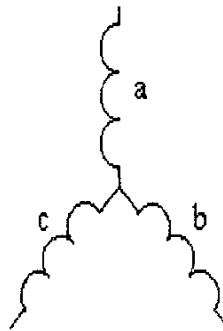
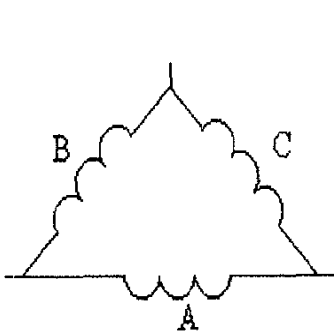


$$A = \frac{bc}{a+b+c}$$

$$B = \frac{ac}{a+b+c}$$

$$C = \frac{ab}{a+b+c}$$

* Para la transformación de una conexión de impedancias en Delta a una conexión Estrella:



$$a = \frac{BC}{A+B+C}$$

$$b = \frac{AC}{A+B+C}$$

$$c = \frac{AB}{A+B+C}$$

Con ayuda de estas simplificaciones se va obteniendo paso a paso un solo valor de Z equivalente (o X equivalente).

2.5 CALCULO DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS

El circuito de la figura 2.5a representa las tres fases de un sistema eléctrico.

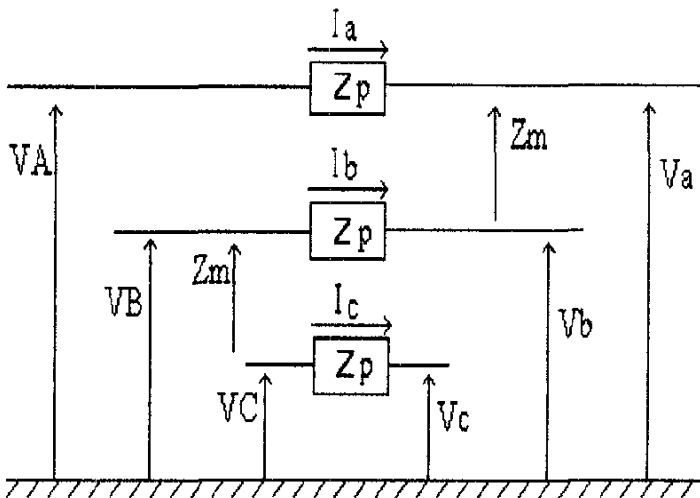


FIG. 2.5a

Donde Z_p y Z_m son las impedancias propias y mutuas de la línea. Partiendo del circuito anterior se tiene el siguiente análisis de caídas de tensión:

$$\delta V_a = V_A - V_a = Z_p I_a + Z_m I_b + Z_m I_c \quad \text{----- 2.5.1}$$

$$\delta V_b = V_B - V_b = Z_m I_a + Z_p I_b + Z_m I_c \quad \text{----- 2.5.2}$$

$$\delta V_c = V_C - V_c = Z_m I_a + Z_m I_b + Z_p I_c \quad \text{----- 2.5.3}$$

En forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} \delta V_a \\ \delta V_b \\ \delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{----- 2.5.4}$$

Aplicando componentes simétricas a la matriz $[\delta V]$ de caídas de tensión y a la matriz $[I]$ de corrientes se tiene:

$$[A][\delta V_{cs}] = [Z][A][I_{cs}] \quad \text{----- 2.5.5}$$

$$[\delta V_{cs}] = [Z][A][I_{cs}][A]^{-1} \quad \text{----- 2.5.6}$$

Donde:

$[\delta V_{cs}]$ es un vector de caídas de voltaje de componentes simétricas.

$[I_{cs}]$ es un vector de corrientes de componentes simétricas.

$\left[\frac{\delta V_{cs}}{\delta I_{cs}} \right] = [Z_{cs}]$ es un vector de impedancias de componentes simétricas.

Por lo que la matriz de componentes simétricas resultante es:

$$[Z_{cs}] = [A]^{-1} [Z] [A] \quad \text{----- 2.5.7}$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$[Z_{cs}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad \text{----- 2.5.8}$$

Resolviendo las matrices se tiene la matriz de componentes simétricas resultante:

$$[Z_{cs}] = \begin{bmatrix} Z_p + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_p - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_p - Z_m \end{bmatrix} \quad \text{----- 2.5.9}$$

Si:

$$Z_0 = \text{Impedancia de secuencia cero} = Z_p + 2Z_m \quad \text{----- 2.5.10}$$

$$Z_1 = \text{Impedancia de secuencia positiva (+)} = Z_p - Z_m \quad \text{----- 2.5.11}$$

$$Z_2 = \text{Impedancia de secuencia negativa (-)} = Z_p - Z_m \quad \text{----- 2.5.12}$$

Simplificando:

$$[Z_{cs}] = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad \text{----- 2.5.13}$$

Si la matriz de caídas de tensión de componentes simétricas es igual al producto de matrices de la matriz de componentes simétricas resultante y de la matriz de corrientes de componentes simétricas entonces se tiene que:

$$[\delta V_{cs}] = [Z_{cs}][I_{cs}] \quad \text{----- 2.5.14}$$

Sustituyendo valores en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} \delta V_0 \\ \delta V_1 \\ \delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{----- 2.5.15}$$

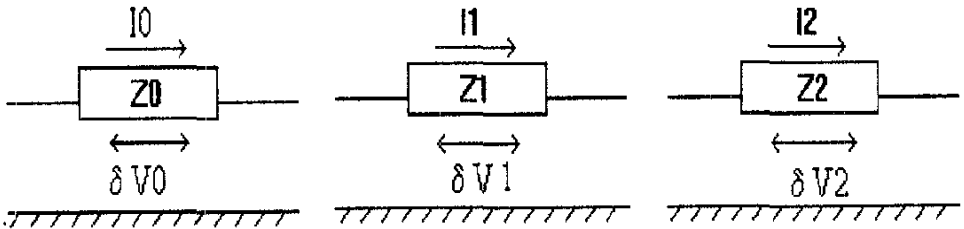
De donde se obtiene:

$$\delta V_0 = I_0 Z_0 \quad \text{----- 2.5.16}$$

$$\delta V_1 = I_1 Z_1 \quad \text{----- 2.5.17}$$

$$\delta V_2 = I_2 Z_2 \quad \text{----- 2.5.18}$$

Representándose a través de la figura siguiente:



De donde se concluye que:

* El sistema trifasico (aun un polifasico) se puede descomponer en tres redes independientes (secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero), cada una con sus respectivos valores de secuencia.

* El valor de la impedancia de secuencia positiva y negativa es el mismo.

ELEMENTOS QUE CONTRIBUYEN A LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Principalmente el flujo de la corriente eléctrica durante un cortocircuito proviene de algunas máquinas eléctricas rotativas al contener capacitores que pueden producir descargas de corriente con un valor de frecuencia y magnitud elevada.

Para una planta industrial, los elementos que contribuyen con corriente de cortocircuito se pueden dividir en varias categorías en base a la ocurrencia, de las cuales mencionaremos solo las siguientes por ser las más comunes:

- 1 - Generadores síncronos.
- 2.- Motores y condensadores síncronos.
- 3.- Motores de inducción.
- 4.- Sistema eléctrico de suministro.

3.1 GENERADORES SÍNCRONOS

Los generadores síncronos son máquinas eléctricas, cuya función principal es la de transformar energía mecánica en energía eléctrica. Son generadores de corriente alterna y deben ser impulsados a una velocidad constante muy precisa, pues la frecuencia de la FEM generada es determinada por dicha velocidad, esta velocidad es la velocidad sincrónica.

La acción de la generación de energía depende del movimiento relativo de los conductores con respecto a las líneas de fuerza; los generadores constan de dos partes esenciales: el campo y la armadura; se pueden construir con el campo móvil y la armadura fija o viceversa, el primer arreglo es el que más se usa ya que el devanado de la armadura es más complejo que el del campo, por que es más fácil aislar el devanado de la armadura, por el sistema de enfriamiento ya que el núcleo del estator es grande y permite la circulación de aire forzado por medio de ducto de enfriamiento, etc.

CAP. 3 ELEMENTOS QUE CONTRIBUYEN A LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Al ocurrir un cortocircuito en las terminales de un generador síncrono la magnitud de la corriente de falla al principio es muy elevada, en un transcurso aproximadamente de cuatro a seis ciclos el valor de esta decae en forma exponencial hasta un valor estable, esto es debido al comportamiento de la reactancia del generador y a la persistencia del flujo producido por el movimiento del primotor, la corriente de falla persistirá a menos que se anule con algún medio de desconexión.

La figura 3.1a nos muestra el comportamiento en forma general de un cortocircuito en un generador síncrono

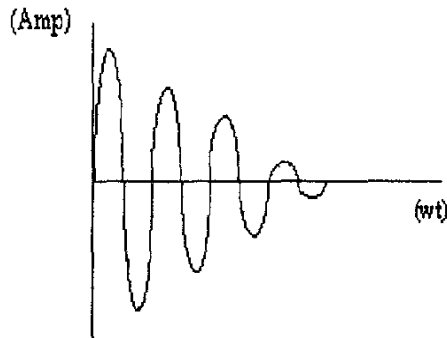


Fig 3.1a

La placa de datos de los generadores síncronos contienen dos valores de reactancia subtransitoria, una referida al voltaje de saturación que es pequeña y otra referida a la corriente sin saturar que es grande; la que se emplea para el cálculo de las corrientes de cortocircuito es la referida al voltaje de saturación.

CAP. 3 ELEMENTOS QUE CONTRIBUYEN A LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

La representación del generador síncrono en un cortocircuito se realiza mediante una fuente de voltaje en serie con una impedancia que varía con el tiempo, esa impedancia variable consiste principalmente de reactancia, en la figura 3.1b se observa el circuito equivalente:

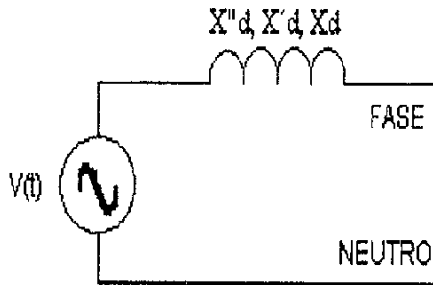


Fig 3.1b

Para propósitos de cálculo de cortocircuito, las normas industriales han establecido tres nombres específicos para los valores de la reactancia variable, llamadas:

$X''d$ = Reactancia subtransitoria; determina la corriente durante el primer ciclo después de haber ocurrido la falla, en aproximadamente 0.10 seg. la reactancia se incrementa a:

$X'd$ = Reactancia transitoria; considerada para determinar la corriente después de varios ciclos a 60 Hz, en cerca de $\frac{1}{2}$ a 2 seg. la reactancia se incrementa a:

Xd = Reactancia síncrona; este es el valor que determina la corriente que fluye después que la condición de estado estable es alcanzada.

Como la mayoría de los dispositivos para protección contra fallas, tales como interruptores y fusibles, operan adecuadamente antes de que se alcance la condición de estado estable, la reactancia síncrona del generador es rara vez usada en el cálculo de cortocircuito.

3.2 MOTORES Y CONDENSADORES SINCRONOS

El motor sincrónico es aquel motor en el cual su rotor está sincronizado con el campo giratorio producido por el estator que es excitado a su vez con corriente alterna, produciendo un campo magnético giratorio alrededor del rotor; si se energiza el rotor con corriente directa este tenderá a alinearse con el campo producido por el estator, lo cual producirá un par en el rotor al tratar de alinearse ambos campos.

Los motores sincrónicos no tienen arranque propio y deben llevarse próximos a la velocidad sincrónica antes de que pueda continuar girando por sí mismo.

Al ocurrir un cortocircuito en un motor lo que ocurre es que al recibir poca energía del sistema hace que aumente la fuerza contraelectromotriz de la máquina ocasionando un flujo de corriente del motor hacia el sistema; la duración de esta corriente de falla y la magnitud depende de el intervalo de tiempo en que este presente el campo magnético de la máquina y de la capacidad en potencia (Hp) de la misma. Los condensadores sincrónicos son tratados en la misma forma que los motores sincrónicos.

La gráfica del comportamiento de la magnitud de la corriente de cortocircuito en función del tiempo de ocurrencia del mismo se observa a continuación:

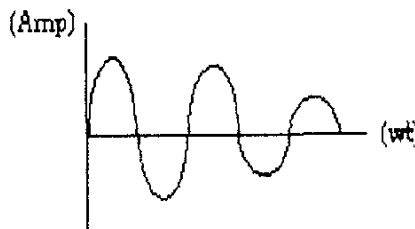


Fig 3.2a

El circuito equivalente del generador es utilizado para el motor síncrono, una fuente de voltaje constante en serie con las tres reactancias X''_d , X'_d y X_d son usadas para establecer los valores de la corriente a tres puntos de tiempo, en la figura siguiente lo observamos:

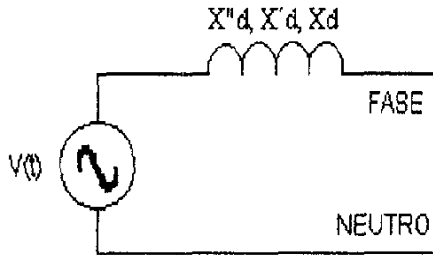


Fig 3.2b.

3.3 MOTORES DE INDUCCIÓN

El motor de inducción está compuesto por un rotor y un estator, en el estator se produce un campo magnético como consecuencia de la alimentación con corriente alterna, al inducirse la corriente en el rotor crea un propio campo magnético el cual se interacciona con el campo producido por el estator, obteniéndose un par sobre el rotor y haciendo que gire, los dos tipos de rotores usados en motores de inducción son el de jaula de ardilla y el rotor devanado.

Las contribuciones de cortocircuito de un motor de inducción son debidas a la presencia de el flujo magnético generado por inducción del estator (el intervalo de duración es de aproximadamente cuatro ciclos), debido a que al ocurrir un cortocircuito el voltaje cae a cero y sin diferencia de potencial el flujo tiende a caer.

Para cálculos de falla un generador de inducción puede ser tratado de la misma manera que el motor de inducción. Las maquinas de inducción (tipo jaula de ardilla y rotor devanado) contribuyen con corriente de cortocircuito de la siguiente manera:

MOTOR JAULA DE ARDILLA

Estos motores contribuyen con corriente de falla debido a la inercia al mover al motor en la presencia de un flujo de campo producido por inducción del estator en lugar de un devanado de campo de corriente directa. Dicha contribución desaparece de las terminales del motor en unos cuantos ciclos gradualmente, esto es debido a que el flujo inducido disminuye al perder la fuente de voltaje causada por una falla en las terminales del motor.

MOTOR DE ROTOR DEVANADO

Dichos motores normalmente operando con sus anillos del rotor cortocircuitados contribuirán con corriente de falla en la misma forma como contribuyen los motores de jaula de ardilla. Algunas veces motores grandes de rotor devanado operando con alguna resistencia externa mantenida en los circuitos del rotor puede tener constante de tiempo bajas para que su contribución a la falla no sea significativa y pueda ser despreciada.

Debido a que el campo de excitación no es sostenido, no hay valor de estado estable de la corriente de falla como en el caso de las maquinas sincronas. El circuito equivalente que se emplea para las maquinas de inducción son tres reactancias, pero los valores de las reactancias transitorias y sincronas se aproximan a infinito, como consecuencia a los motores de inducción se les asigna solo un valor de reactancia subtransitoria X''_d , Este valor de reactancia es muy cercano al valor de reactancia de rotor bloqueado. La figura 3.3a nos ilustra este concepto:

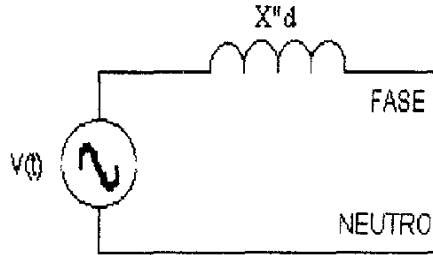


Fig 3.3a

La gráfica de la magnitud de cortocircuito en función del tiempo de permanencia del flujo magnético para las maquinas de inducción se observa en la siguiente figura:

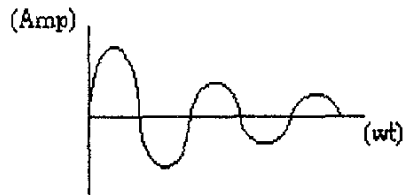


Fig 3.3b

3.4 SISTEMA EXTERNO DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los generadores remotos del sistema de suministro de energía eléctrica son una fuente de corriente de cortocircuito, a menudo transmitida a través de un transformador. El circuito equivalente del generador puede ser usado para representar este sistema. Los generadores del sistema eléctrico están usualmente lejos de las plantas industriales. La corriente de contribución a una falla en una planta remota representa simplemente un pequeño incremento en la corriente de carga de las grandes centrales generadoras. El sistema eléctrico es por lo tanto usualmente representado en la planta por una impedancia equivalente de un solo valor referida al punto de conexión.

4 TIPOS DE FALLAS

En un sistema eléctrico industrial se pueden establecer varias condiciones anormales en el suministro de energía eléctrica, las cuales son llamadas comúnmente fallas eléctricas, entre las principales tenemos las siguientes.

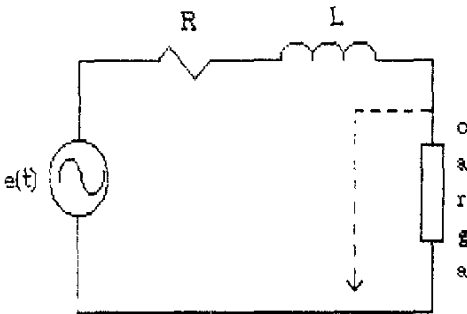
- a) Falla trifásica balanceada.
- b) Falla de línea a tierra
- c) Falla de línea a línea.
- d) Falla de doble línea a tierra.

La falla trifásica es la que comúnmente contribuye con mayor corriente de cortocircuito

La falla de línea a tierra es aproximadamente de un 87% del valor de la falla trifásica, aunque en algunos sistemas pueda alcanzar un valor de 125%, esto es debido al tipo de arreglo de la planta o sistema como pueden ser la conexión de los transformadores por ejemplo.

4.1 OSCILOGRAMA DE UNA FALLA ASIMÉTRICA EN UN SISTEMA INDUSTRIAL

Analizando el circuito básico que se presentaría cuando ocurriera una falla en un sistema eléctrico industrial con el fin de conocer el tipo de respuesta en terminos generales que se tendria. Considerando el circuito de la figura 4.1a.



$$e(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \theta)$$

Fig 4.1a

Antes de que ocurriera la falla

$$i(t) = i(0) = cte$$

La expresión que rige al circuito anterior es:

$$e(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad \text{----- 4.1.1}$$

Analizando la respuesta total $i(t)$ nuestra expresión final seria (consultar apendice B):

$$i(t) = [I\sqrt{2} \cos(\omega t + \theta + \delta)] \left[(\sqrt{2} I \cos(\theta + \delta)) e^{-\frac{R}{L}t} + C e^{-\frac{R}{L}t} \right] \text{ ----- 4.1.2}$$

Cuya representacion gráfica se muestra en la figura 4.1b:

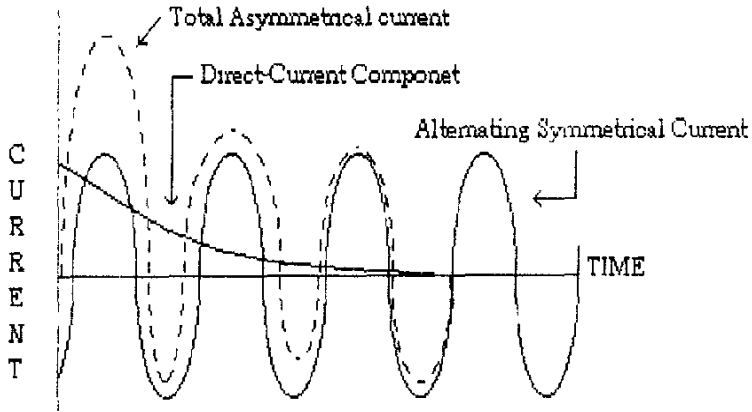


Fig 4 1b

4.2 FALLA TRIFASICA BALANCEADA

La figura 4.2a nos ilustra una falla trifasica balanceada:

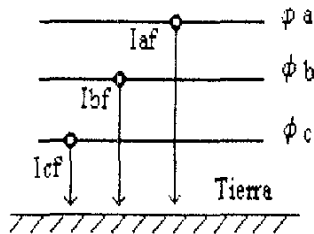


Fig. 4.2a

A partir de esta figura se observa que

$$I_{af} + I_{bf} + I_{cf} = 0 \quad (\text{falla balanceada}) \quad \text{----- 4.2.1}$$

$$V_{af} = V_{bf} = V_{cf} = 0 \quad (\text{fase tierra}) \quad \text{----- 4.2.2}$$

La última ecuación nos muestra el voltaje de fase a tierra, como el circuito está balanceado y con la ayuda de las componentes simétricas podemos hacer la siguiente aseveración:

$$I + a^1 + a^2 = 0 \quad \text{----- 4.2.3}$$

donde "a" es un operador

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad a^2 = 1 \angle 240^\circ \quad a^3 = 1 \angle 360^\circ$$

sustituyendo la expresión 4.2.3 en 4.2.1 y haciendo las corrientes de fase falladas (b y c) en función de la fase (a) con el operador "a" tendremos la siguiente ecuación:

$$I_{bf} = a^2 I_{af} \quad \text{----- 4.2.4}$$

$$I_{cf} = a I_{af} \quad \text{----- 4.2.5}$$

aplicando componentes simétricas a las corrientes se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_{0f} \\ I_{1f} \\ I_{2f} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} \quad \text{----- 4.2.6}$$

Desarrollando el determinante de la ecuación anterior tendremos las corrientes de falla de secuencia positiva, negativa y cero

I_{0f} : es la corriente de secuencia cero de una falla trifásica balanceada.

I_{1f} : es la corriente de secuencia positiva de una falla trifásica balanceada.

I_{2f} : es la corriente de secuencia negativa de una falla trifásica balanceada.

$$I_{0f} = \frac{I_{af} + I_{bf} + I_{cf}}{3} = 0 \quad \text{----- 4.2.7}$$

de acuerdo a la expresión 4.2.1, que nos muestra básicamente que al confluir las corrientes de fase a tierra el flujo de corrientes equivalente es nula.

Para I1f:

$$\begin{aligned}
 I1f &= \frac{Iaf + a Ibf + a^2 Icf}{3} \\
 &= \frac{Iaf + a^3 Iaf + a^3 Iaf}{3} && \text{----- 4.2.8} \\
 &= Iaf
 \end{aligned}$$

Para I2f:

$$\begin{aligned}
 I2f &= \frac{Iaf + a^2 Ibf + a Icf}{3} \\
 &= \frac{Iaf + a Iaf + a^2 Iaf}{3} && \text{----- 4.2.9} \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

como tenemos que los voltajes de fase son iguales y nulos de acuerdo con la ecuación 4.2.2, se cumple que:

$$V0f = V1f = V2f = 0 \quad \text{----- 4.2.10}$$

De acuerdo al anterior análisis tenemos que es una falla trifásica balanceada, la única red que interviene es la de secuencia positiva. El circuito equivalente de dicha falla es el siguiente:

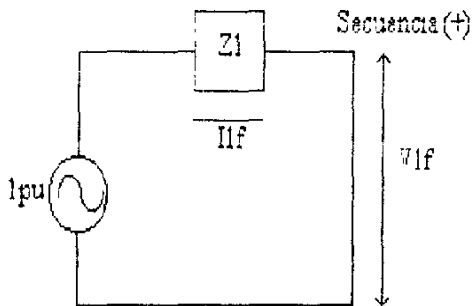


Fig 4.2b

4.3 FALLA DE LÍNEA A TIERRA

La figura 4.3a nos ilustra este tipo de falla:

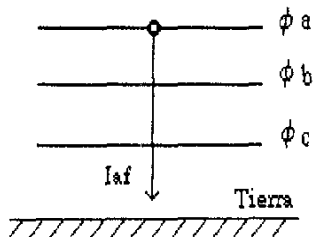


Fig 4.3a

A partir de la figura anterior es posible deducir que las corrientes de falla en las fases donde no ocurre la falla son iguales y son nulas, el voltaje de falla en la fase "a" es igual a cero

$$I_{bf} = I_{cf} = 0 \text{ (fases no falladas)} \quad \text{----- 4.3.1}$$

$$V_{af} = 0 \quad \text{----- 4.3.2}$$

Partiendo de las condiciones que impone la falla y que son representadas en las ecuaciones 4.3.1 y 4.3.2, así como la aplicación de las componentes simétricas se tiene.

$$\begin{bmatrix} I_{0f} \\ I_{1f} \\ I_{2f} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{af} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{----- 4.3.3}$$

Desarrollando la expresión anterior se tiene:

$$I_{0f} = I_{1f} = I_{2f} = \frac{I_{af}}{3} \quad \text{----- 4.3.4}$$

Aplicando componentes simétricas a los voltajes tenemos

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{0f} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} \quad \text{----- 4.3.5}$$

Partiendo de la ecuacion anterior observamos que

$$V_0f + V_1f + V_2f = 0 \quad \text{----- 4.3.6}$$

El circuito equivalente que nos ilustra las expresiones 4.3.4 y 4.3.6 se observa a continuacion:

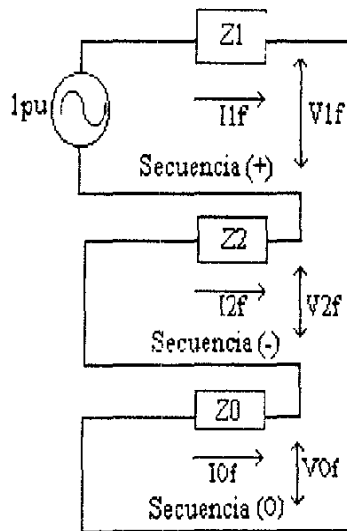


Fig 4.3b

4.4 FALLA DE LÍNEA A LÍNEA

El circuito de la figura 4.4a nos muestra una representación de una falla de línea a línea (falla doble línea).

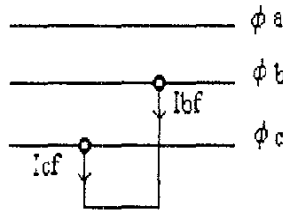


Fig 4.4a

Partiendo de la figura anterior observamos:

$$I_{af} = 0 \quad \text{----- 4.4.1}$$

$$I_{cf} = -I_{bf} \quad \text{----- 4.4.2}$$

$$V_{bf} = V_{cf} \quad \text{----- 4.4.3}$$

Aplicando componentes simétricas a las corrientes se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_{0f} \\ I_{1f} \\ I_{2f} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{bf} \\ -I_{bf} \end{bmatrix} \quad \text{----- 4.4.4}$$

Desarrollando se tiene.

$$I0f = 0 \quad \text{----- 4.4.5}$$

$$\begin{aligned} I1f &= \frac{(a - a^2) Ibf}{3} \\ &= \frac{j\sqrt{3} Ibf}{3} \quad \text{----- 4.4.6} \\ &= \frac{j Ibf}{\sqrt{3}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I2f &= \frac{(a^2 - a) Ibf}{3} \\ &= \frac{-j\sqrt{3} Ibf}{3} \quad \text{----- 4.4.7} \\ &= \frac{-j Ibf}{\sqrt{3}} \end{aligned}$$

De las expresiones 4.4.6 y 4.4.7 se tiene que:

$$I1f = -I2f \quad \text{----- 4.4.8}$$

Aplicando componentes simétricas a los voltajes

$$\begin{bmatrix} V0f \\ V1f \\ V2f \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vaf \\ Vbf \\ Vcf \end{bmatrix} \quad \text{----- 4.4.9}$$

Desarrollando.

$$\begin{aligned}
 V_{0f} &= \frac{V_{af} + V_{bf} + V_{cf}}{3} & \text{----- 4.4.10} \\
 &= \frac{V_{af} + 2V_{bf}}{3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{1f} &= \frac{V_{af} + a V_{bf} + a^2 V_{bf}}{3} & \text{----- 4.4.11} \\
 &= \frac{V_{af} - V_{bf}}{3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{2f} &= \frac{V_{af} + a^2 V_{bf} + a V_{bf}}{3} & \text{----- 4.4.12} \\
 &= \frac{V_{af} - V_{bf}}{3}
 \end{aligned}$$

De las dos ultimas ecuaciones se observa:

$$V_{1f} = V_{2f} \quad \text{----- 4.4.13}$$

Para que se cumplan las condiciones planteadas en las ecuaciones 4.4.8 y 4.4.13 es necesario que los circuitos equivalentes de las secuencias se conecten como se indica en la grafica siguiente:

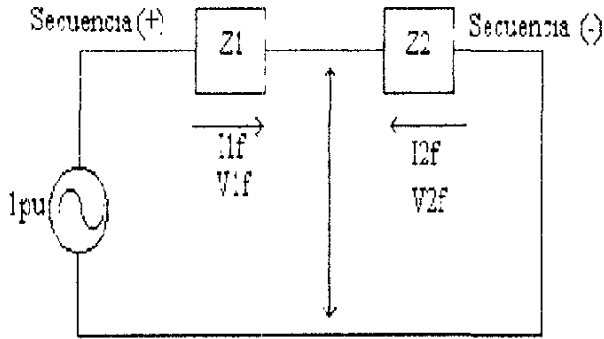


Fig 4 4b

4.5 FALLA DOBLE LÍNEA A TIERRA

La figura 4.5a nos muestra este tipo de falla.

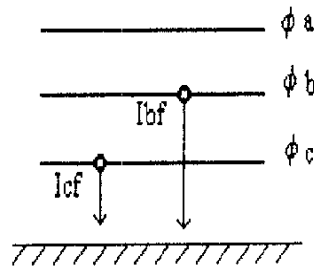


Fig 4.5a

Partiendo de la figura anterior se deduce que:

$$I_{af} = 0 \quad \text{----- 4.5.1}$$

$$V_{bf} = V_{cf} = 0 \quad \text{----- 4.5.2}$$

Aplicando componentes simétricas a las corrientes:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0f} \\ I_{1f} \\ I_{2f} \end{bmatrix} \quad \text{----- 4.5.3}$$

De donde se obtiene:

$$I_{0f} + I_{1f} + I_{2f} = 0 \quad \text{----- 4.5.4}$$

Aplicando componentes simétricas a los voltajes:

$$\begin{bmatrix} V_{0f} \\ V_{1f} \\ V_{2f} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cf} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{----- 4.5.5}$$

Obteniendo:

$$V_{0f} = V_{1f} = V_{2f} = \frac{V_{af}}{3} \quad \text{----- 4.5.6}$$

Para que se cumplan las condiciones planteadas en las ecuaciones 4.5.4 y 4.5.6 es necesario que los circuitos equivalentes de las secuencias se conecten como se indica en la figura siguiente.

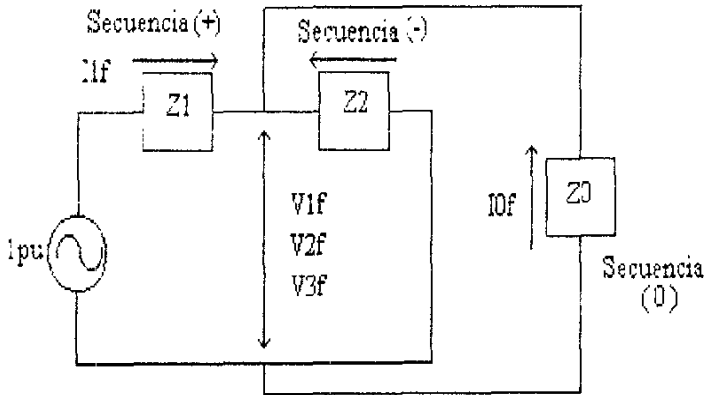


Fig. 4 5b

5 CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

Aplicando el procedimiento descrito en la norma IEEE/ST 141-1993, determinar las corrientes de falla trifasica y de linea a tierra en los buses 1 y 2 del diagrama unifilar de la figura siguiente, bajo las siguientes consideraciones:

- * Para las fallas trifasicas balanceadas se colocaran las corrientes de las tres redes indicadas en la norma.
- * Para las fallas de linea a tierra se calcularan las corrientes de la tercera red
- * Las impedancias de secuencia (+), (-) y (0) de cada uno de los elementos del sistema son iguales.

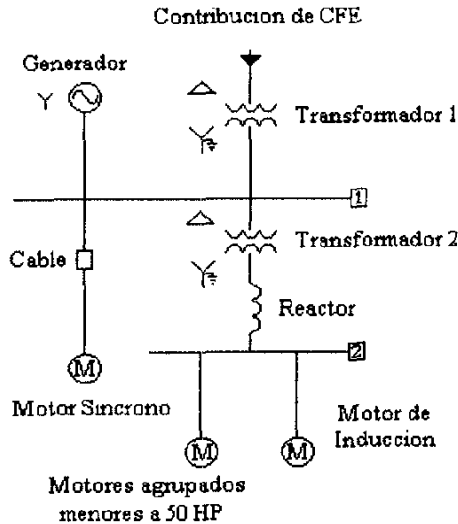


DIAGRAMA UNIFILAR

DATOS DEL SISTEMA ELECTRICO INDUSTRIAL.

GENERADOR

25 MVA
 13.8 KV
 $X/R = 45$
 $X'd = 9\%$
 $X'd = 13.5\%$

CONTRIBUCION CFE

800 MVAcc
 69 KV
 $X/R = 22$

REACTOR

$Z = 0.001\Omega$ (Dato de placa)
 $X/R = 80$

MOTOR SINCRONO

6000 HP
 13.2 KV
 $FP = 0.80$
 $E_f = 0.9325$
 $X/R = 30$
 720 rpm
 $X'd = 0.20$ pu

MOTOR DE INDUCCION

100 HP
 460 V
 $FP = 0.80$
 $E_f = 0.9325$
 $X/R = 8$
 $I_{rb} = 6$ pu

TRANSFORMADOR 1

20 MVA
 69 - 13.8 KV
 $Z = 7\%$ (dato de placa)
 $X/R = 21$
 $R = 6.6$ Ohm (dato de placa, puesta a tierra)

TRANSFORMADOR 2

1.5 MVA
 13.8 - 0.480 KV
 $Z = 5\%$ (dato de placa)
 $X/R = 8$

*MOTORES DE INDUCCION**AGRUPADOS (menores de 50 HP)*

100 HP (suma total)
 460 V
 $X/R = 6.6$
 $I_{rb} = 5.9643$ pu

CABLE

1 Condulet/fase de 500 MCM Cobre
 75 grado centigrado
 Ducto no magnetico
 Circuito de 450 mts
 $DMG = 2$ pulgadas

SELECCION DE LAS CANTIDADES BASE

100 MVA

69 KV Para el primario del transformador 1

13.8 KV Para el bus 1

13.8 KV Para el bus 2

*CALCULO DE IMPEDANCIAS EN PU**GENERADOR*

Primera y segunda red

Conversion de base 1 a base 2

$$X''_{dpu} = 0.09 \left(\frac{100MVA}{25MVA} \right) \left(\frac{13.8KV}{13.8KV} \right)^2$$

$$Z_{pubase2} = Z_{pubase1} \left(\frac{MVA_{base2}}{MVA_{base1}} \right) \left(\frac{KV_{base1}}{KV_{base2}} \right)^2$$

$$X''_{dpu} = 0.09 pu \left(\frac{100MVA}{25MVA} \right) \left(\frac{13.8KV}{13.8KV} \right)^2$$

$$\underline{\underline{X''_{dpu} = 0.36 pu}}$$

Partiendo de la relacion

$$\frac{X}{R} = 45$$

$$R = \frac{X}{45}$$

$$R'' \text{ dpu} = \frac{0.36 \text{ pu}}{45}$$

$$\underline{\underline{R'' \text{ dpu} = 0.008 \text{ pu}}}$$

Tercera red

$$X'' \text{ dpu} = 0.135 \text{ pu} \left(\frac{100 \text{ MVA}}{25 \text{ MVA}} \right) \left(\frac{13.8 \text{ KV}}{13.8 \text{ KV}} \right)^2$$

$$\underline{\underline{X'' \text{ dpu} = 0.54 \text{ pu}}}$$

$$R' \text{ dpu} = \frac{X' \text{ dpu}}{45}$$

$$R' \text{ dpu} = \frac{0.54}{45}$$

$$\underline{\underline{R' \text{ dpu} = 0.012 \text{ pu}}}$$

La contribucion de CFE tiene un barraje infinito a comparacion del sistema que alimenta, siempre es constante por lo tanto no hay variacion.

Para las tres redes

$$Z_p = \frac{MVbase (KVcc)^2}{MVAcc (KVbase)}$$

$$Z_{CFE} = \frac{KVAbase}{KVcc}$$

$$= \frac{100000KVA}{800000KVA}$$

$$Z_{pu} = 0.125 pu$$

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}}$$

$$= \frac{0.125 pu}{\sqrt{1 + (22)^2}}$$

$$R_{pu} = 0.02606 pu$$

$$X_{pu} = R_{pu} \left(\frac{X}{R}\right)$$

$$= 0.02606(22)$$

$$X_{pu} = 0.57341 pu$$

MOTOR SINCRONO

Primera red

$$X_{pu} = X^* d \left(\frac{KVAbase * FP * EF \sqrt{KVmotor}}{0.76 * HP} \sqrt{\frac{KVbase}{KV}} \right)^2$$

$$= 0.20 \left(\frac{100000KVA * 0.8 * 0.9325 \sqrt{13.2KV}}{0.746 * 6000} \sqrt{\frac{13.2KV}{13.8KV}} \right)^2$$

$$\underline{X_{pu} = 3.0498 pu}$$

$$R_{pu} = \frac{X_{pu}}{X}$$

$$= \frac{3.0498}{30}$$

$$\underline{R_{pu} = 0.1017 pu}$$

Segunda red

Tomando el valor (IEEE 141-1993) indicado en la tabla 4.1

$$X_{pu} = 1.5 * 3.0498 pu$$

$$\underline{X_{pu} = 4.5747 pu}$$

$$R_{pu} = 1.5 * 0.1017 pu$$

$$\underline{R_{pu} = 0.15255 pu}$$

MOTOR DE INDUCCION

Primera red.

El factor multiplicativo es 1.2, de acuerdo a la tabla 4.1 de maquinas rotativas IEEE Std 141-1993.

$$X_{pu} = \left(\frac{1}{I_{RB}} \right) \left(\frac{KV_{Abase} * FP * EF}{0.746 * HP} \right) \left(\frac{KV_M}{KV_{base}} \right)^2$$

$$X'' d = 1.2 \left(\frac{1}{6 pu} \right) \left(\frac{100000 * 0.8 * 0.9325}{0.746 * 100} \right) \left(\frac{0.46 KV}{0.46 KV} \right)^2$$

$$\underline{\underline{X' d = 183.6805 pu}}$$

$$R'' pu = \frac{X'' pu}{\frac{X}{R}}$$

$$= \frac{183.6805}{8}$$

$$\underline{\underline{R'' pu = 22.9601 pu}}$$

Segunda red

El factor multiplicativo es 3 para la seleccion de interruptores de acuerdo a la tabla 4.1 IEEE Std 141-1993

$$X'' pu = 3 \left(\frac{1}{6 pu} \right) \left(\frac{100000 KVA * 0.8 * 0.9325}{0.746 * 100 HP} \right) \left(\frac{0.46 KV}{0.46 KV} \right)^2$$

$$\underline{\underline{X'' pu = 459.2013 pu}}$$

$$R'' pu = \frac{459.2013}{8}$$

$$\underline{\underline{R'' pu = 57.4002 pu}}$$

MOTORES DE INDUCCION AGRUPADOS (MENORES DE 50HP)

Unicamente en la primera red

El factor multiplicativo es 1.67 tomado de la tabla 4.2 IEEE Std 141-1993

$$X'' pu = \left(\frac{1}{Irb} \right) \left(\frac{KVAbase}{\sum HP} \right) \left(\frac{KV_M}{KVbase} \right)^2$$

$$= 1.67 \left(\frac{1}{5.9643 pu} \right) \left(\frac{100000}{100 HP} \right) \left(\frac{0.46}{0.48} \right)^2$$

$$\underline{\underline{X'' pu = 257.1521 pu}}$$

$$R'' pu = \frac{X'' pu}{\frac{X}{R}}$$

$$= \frac{257.1521}{6.6}$$

$$\underline{\underline{R'' pu = 38.9624 pu}}$$

TRANSFORMADOR 1

Para las tres redes

$$\begin{aligned}
 Z_{pu} &= Z_T \left(\frac{MVA_{base}}{MVA_T} \right) \left(\frac{KV_T}{KV_{base}} \right)^2 \\
 &= 0.07 pu \left(\frac{100 MVA}{20 MVA} \right) \left(\frac{69 KV}{69 KV} \right)^2 \\
 \underline{\underline{Z_{pu} = 0.35 pu}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{pu} &= \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R} \right)^2}} \\
 &= \frac{0.35}{\sqrt{1 + (21)^2}} \\
 \underline{\underline{R_{pu} = 0.0166 pu}} \\
 X_{pu} &= R_{pu} * \left(\frac{X}{R} \right) \\
 &= 0.0166 * 21 \\
 \underline{\underline{X_{pu} = 0.3496 pu}}
 \end{aligned}$$

TRANSFORMADOR 2

Para las tres redes

$$Z_{pu} = Z_r \left(\frac{MVA_{base}}{MVA_r} \right) \left(\frac{KV_r}{KV_{base}} \right)^2$$

$$= 0.05 pu \left(\frac{100 MVA}{1.5 MVA} \right) \left(\frac{13.8 KV}{13.8 KV} \right)^2$$

$$\underline{\underline{Z_{pu} = 3.333 pu}}$$

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R} \right)^2}}$$

$$= \frac{3.3333 pu}{\sqrt{1 + (8)^2}}$$

$$\underline{\underline{R_{pu} = 0.4134 pu}}$$

$$X_{pu} = R_{pu} * \left(\frac{X}{R} \right)$$

$$= 0.4134 pu * 8$$

$$\underline{\underline{X_{pu} = 3.3076 pu}}$$

REACTOR

Para las tres redes

$$Z_{pu} = Z_R \left(\frac{MVA_{base}}{(KV_{base})^2} \right)$$

$$= 0.0011 \left(\frac{100 MVA}{(0.48)^2} \right)$$

$$\underline{\underline{Z_{pu} = 0.4340 pu}}$$

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + \left(\frac{X}{R} \right)^2}}$$

$$= \frac{0.4340 pu}{\sqrt{1 + (80)^2}}$$

$$\underline{\underline{R_{pu} = 0.0054 pu}}$$

$$X_{pu} = R_{pu} * \left(\frac{X}{R} \right)$$

$$= 0.0054 pu * 80$$

$$\underline{\underline{X_{pu} = 0.4339 pu}}$$

CABLE

$$X_B = 0.052917 \text{Log}_{10} D - 0.057107$$

$$X_{pu} = (X_A + X_B) \left(\frac{ft}{1000} \right) \left(\frac{MVAbase}{KVbase^2} \right) \left(\frac{XMG}{X_NMG} \right) \left(\frac{3}{NUC} \right)$$

$$R_{pu} = R \left(\frac{ft}{1000} \right) \left(\frac{MVAbase}{KVbase^2} \right) \left(\frac{K + GO}{K + GR} \right) \left(\frac{3}{NUC} \right)$$

donde.

X_B es el factor de correccion por esparcimiento.

D esparcimiento equivalente

X_A Reactancia del alimentador a 1ft de esparcimiento

ft longitud del alimentador en ft

MVAbase Potencia base en MVA

Kvbase Voltaje base en KV

XMG Reactancia de un circuito trifasico tipico instalado en un ducto magnetico

X_NMG Reactancia de un circuito trifasico tipico instalado en un ducto magnetico

NUC Cantidad de conductores en el alimentador

GR Temperatura en °C a la cual se encuentra la resistencia del alimentador

GO Temperatura en °C a la cual se desea calcular la resistencia del alimentador

R Resistencia del alimentador a la temperatura GR

K Variable en funcion del material del conductor

K= 234.5 para cobre recocido (100% conductividad)

K =241.5 para cobre estrado duro (79.3% conductividad)

K= 228.1 para aluminio

Para las tres redes

$$X_A = \frac{0.0839\Omega}{1000ft} \quad a \quad 1ft$$

$$R = \frac{0.0246\Omega}{1000ft} \quad a \quad 50^\circ C \quad 60Hz$$

$$\begin{aligned} X_B &= 0.052917 \text{ Log}_{10}(2 \text{ plg}) - 0.057107 \\ &= \frac{-0.0412\Omega}{1000ft} \end{aligned}$$

$$450\text{metros} = 147.6377ft$$

$$\begin{aligned} X_\Omega &= (0.0839 - 0.0412) \left(\frac{1\Omega}{1000ft} \right) (147.6377ft) \\ &= \underline{\underline{0.006304\Omega}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{pu} &= 0.006304 \left(\frac{100MVA}{(13.8Kv)^2} \right) \left(\frac{1}{1} \right) \left(\frac{3}{3} \right) \\ &= \underline{\underline{0.00331pu}} \end{aligned}$$

Se emplean estos valores cuando el circuito esta en un ducto no magnetico.

$$R_{\Omega 75^{\circ}C} = \left(\frac{0.0246\Omega}{1000ft} \right) \left(147.6377ft \left(\frac{234.5 + 75^{\circ}C}{234.5 + 50^{\circ}C} \right) \right)$$

$$= \underline{\underline{0.003951\Omega}}$$

$$R_{pu} = 0.003951\Omega \left(\frac{100MVA}{(13.8Kv)^2} \right) \left(\frac{3}{3} \right)$$

$$= \underline{\underline{0.00207 pu}}$$

TABLA DE CANTIDADES CALCULADAS EN POR UNIDAD

ELEMENTO	1 ^{ra} RED		2 ^{da} RED		3 ^{ra} RED	
	R	X _j	R	X _j	R	X _j
Transformador 1	0.0166	0.3496	0.0166	0.3496	0.0166	0.3496
Transformador 2	0.4134	3.3076	0.4134	3.3076	0.4134	3.3076
Reactor	0.0054	0.4339	0.0054	0.4339	0.0054	0.4339
Cable	0.0021	0.0033	0.0021	0.0033	0.0021	0.0033
CFE	0.0261	0.5734	0.0261	0.5734	0.0261	0.5734
Generador	0.0800	0.3600	0.0800	0.3600	0.0120	0.5400
Motor sincrono	0.1017	3.0498	0.1525	4.5747	No existe valor	
Motor de Induccion	22.9601	183.6805	57.4002	459.2013	No existe valor	
Motores agrupados	38.9624	257.1521	No existe valor		No existe valor	

Diagrama de reaktancias de secuencia positiva para la primera red.

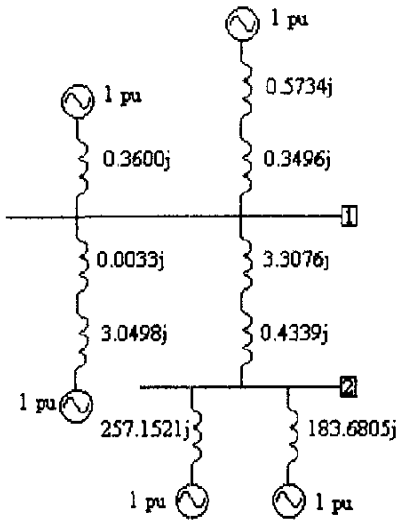
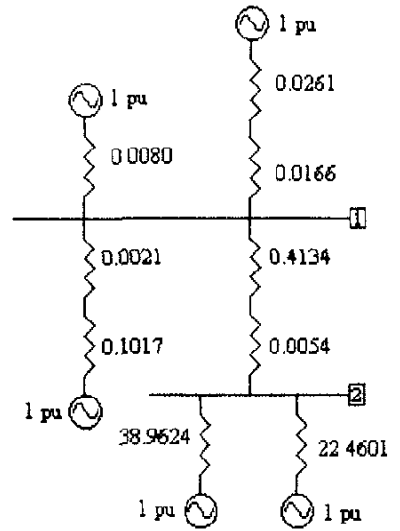
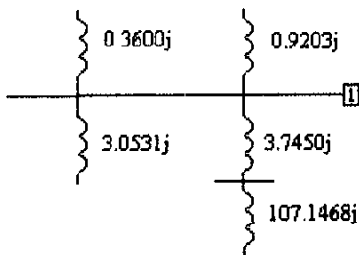


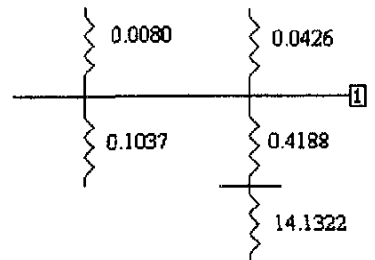
Diagrama de resistencias de secuencia positiva para la primera red.

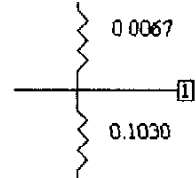
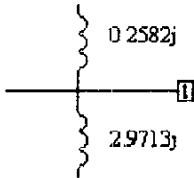
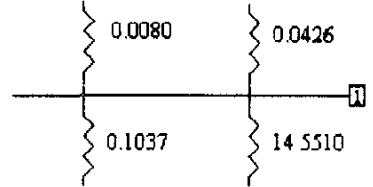
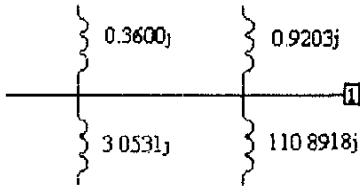


Circuito equivalente de thevenin en el bus 1



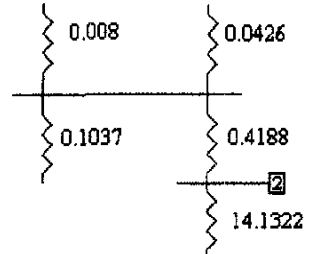
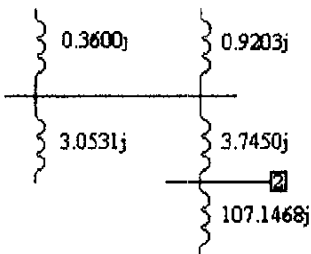
Circuito equivalente de thevenin en el bus 1

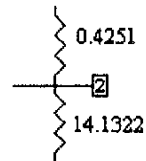
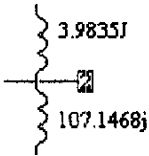
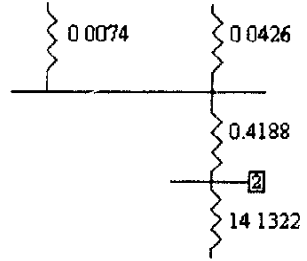
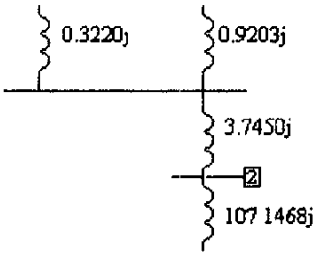




Circuito equivalente de thevenin en el bus 2

Circuito equivalente de thevenin en el bus 2





ESTE TEST NO DEBE
 SER USADO PARA
 NINGUN PROPÓSITO
 COMERCIAL

Diagrama de reactancias de secuencia positiva para la segunda red.

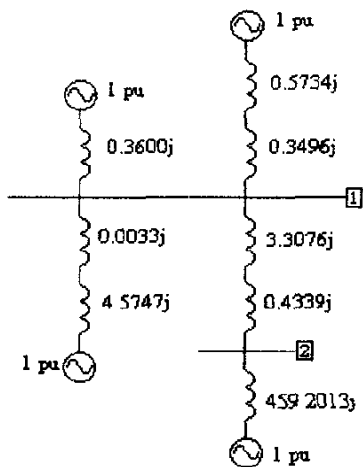
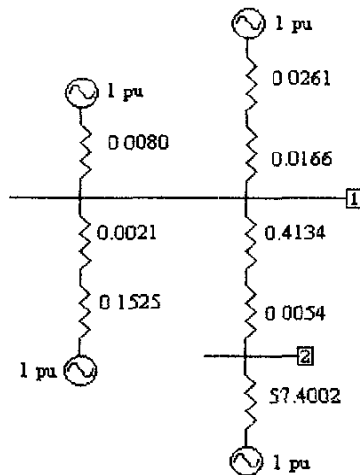
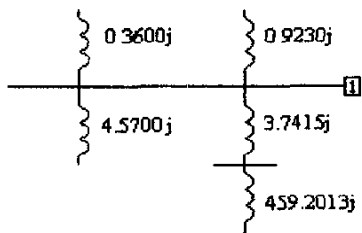


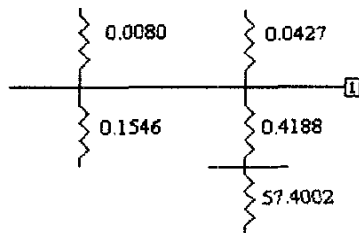
Diagrama de resistencias de secuencia positiva para la segunda red.



Circuito equivalente de Thevenin en el bus 1



Circuito equivalente de Thevenin en el bus 1



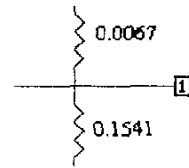
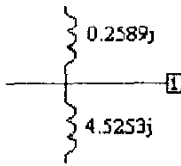
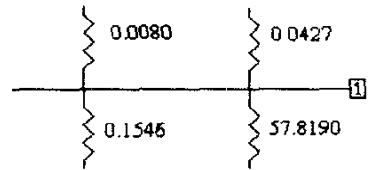
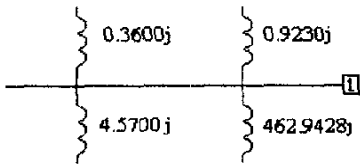
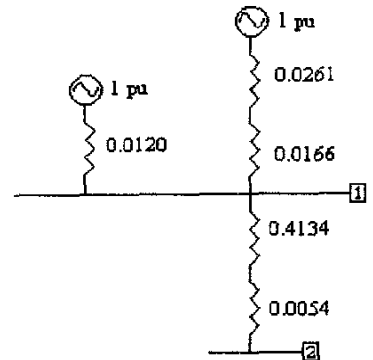
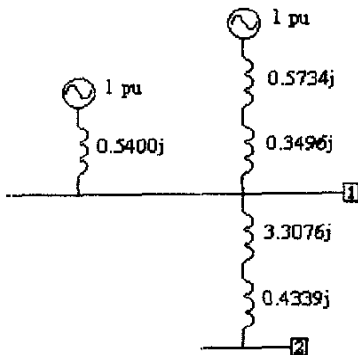


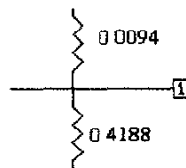
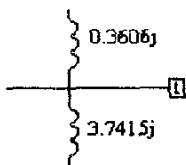
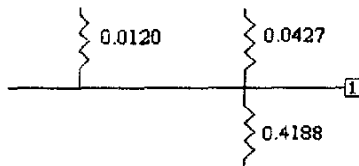
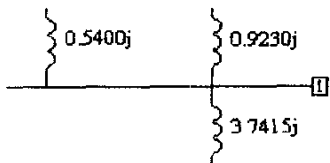
Diagrama de reactancias de secuencia positiva para la tercera red.

Diagrama de resistencias de secuencia positiva para la tercera red.



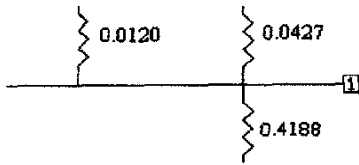
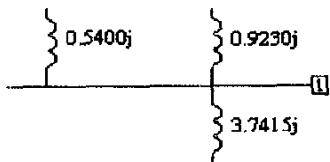
Circuito equivalente de Thevenin en el bus 1

Circuito equivalente de Thevenin en el bus 1



Circuito equivalente de Thevenin en el bus 2

Circuito equivalente de Thevenin en el bus 2





EQUIVALENTE DE THEVENIN EN LOS PUNTOS DE FALLA
FALLA TRIFASICA BALANCEADA

PRIMERA RED

BUS	Rpu	Xpu	X/R	KV	Zpu	APLICACION	Fm	Icc (KA)	Pcc (MVA)
1	0.0063	0.2375	37.7	13.8	0.2375	Interruptor	1.6	28.1849	673.684
1	0.0063	0.2375	37.7	13.8	0.2375	Fusible	1.550	27.3041	652.631
2	0.4127	3.8405	9.3	0.480	3.8626	Interruptor	1.218	37.93	31.533
2	0.4127	3.8405	9.3	0.480	3.8626	Fusible	1.550	46.71	40.128

SEGUNDA RED

BUS	Rpu	Xpu	X/R	KV	Zpu	INTENSIDAD	Fm	Icc (KA)	Pcc (MVA)
1	0.0064	0.2448	38.25	13.8	0.2448	Simetrica	1.16	19.824	473.855
1	0.0064	0.2448	38.25	13.8	0.2448	Total	1.29	22.395	531.322

TERCERA RED

BUS	Rpu	Xpu	KV	Zpu	Icc (KA)
1	0.0091	0.3122	13.8	0.3123	13.396
2	0.4252	4.0821	0.480	4.1042	29.308

donde:

$$I_{cc} = I_{pu} * I_{base} * F_m$$

$$I_{base} = \frac{KV_{Abase}}{\sqrt{3} * KV_{base}}$$

$$P_{cc} = \sqrt{3} * I_{cc} * KV$$

Para obtener las corrientes de falla de línea a tierra, es necesario obtener el valor en pu de la resistencia de puesta a tierra del transformador 1; es decir:

$$R_{pu} = R(\Omega) \left(\frac{MV_{Abase}}{KV_{base}^2} \right)$$

$$= 6.6\Omega \left(\frac{100MVA}{13.8KV^2} \right)$$

$$\underline{\underline{R_{pu} = 3.4657 pu}}$$

Diagrama de reactancias de secuencia cero para la tercera red.

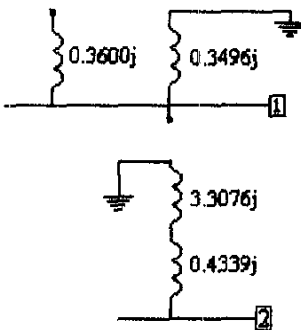
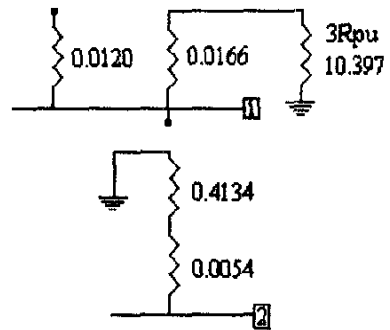
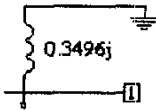


Diagrama de resistencias de secuencia cero para la tercera red.



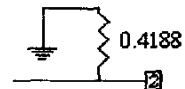
Circuito equivalente de thevenin en el bus 1

Circuito equivalente de thevenin en el bus 1



Circuito equivalente de thevenin en el bus 2

Circuito equivalente de thevenin en el bus 2



Para una falla de línea a tierra la resistencia y reactancia equivalente de secuencia positiva negativa y cero, requeridas para el calculo son:

Para el bus 1:

$$\begin{aligned}
 R_{eqpu} &= 2R_{pu3^{ra} \text{ red}} + R_{pu} \\
 &= 2(0.0091) + 10.4136 \\
 &= \underline{\underline{10.4318}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{eqpu} &= 2X_{pu3^{ra}red} + X_{pu} \\
 &= 2(0.3122) + 0.3496 \\
 &= \underline{\underline{0.9740}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{eqpu} &= \sqrt{(R_{eqpu})^2 + (X_{eqpu})^2} \\
 &= \sqrt{(10.4318)^2 + (0.9740)^2} \\
 &= \underline{\underline{10.4772}}
 \end{aligned}$$

Para el bus 2:

$$\begin{aligned}
 R_{eqpu} &= 2R_{pu3^{ra}red} + R_{pu} \\
 &= 2(0.4252) + 0.4188 \\
 &= \underline{\underline{1.2692}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{eqpu} &= 2X_{pu3^{ra}red} + X_{pu} \\
 &= 2(4.0821) + 3.7415 \\
 &= \underline{\underline{11.9057}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{eqpu} &= \sqrt{(R_{eqpu})^2 + (X_{eqpu})^2} \\
 &= \sqrt{(1.2692)^2 + (11.9057)^2} \\
 &= \underline{\underline{11.9773}}
 \end{aligned}$$

EQUIVALENTE DE THEVENIN EN LOS PUNTOS DE FALLA
FALLA DE LINEA A TIERRA

BUS	R_{pu}	X_{pu}	Z_{pu}	KV	I_{cc} (KA)
1	10.4318	0.9740	10.4772	13.8	1.1978
2	1.2692	11.9057	11.9773	0.480	30 1300

APENDICE A

ANALISIS PARA OBTENER LA INVERSA DE UNA MATRIZ

Sea la matriz A, la inversa de dicha matriz es a A^{-1} , la cual es proporcional a:

$$[A^{-1}] = \frac{[COF[A]]^T}{Det.[A]} \quad \dots\dots\dots 1$$

Si:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 2$$

$$COF[A] = \begin{bmatrix} m_{11} & -m_{12} & m_{13} \\ -m_{21} & m_{22} & -m_{23} \\ m_{31} & -m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 3$$

$$m_{11} = \begin{bmatrix} \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} = \alpha^4 - \alpha^2 = (\alpha^2 - \alpha)(\alpha^2 + \alpha) \quad \dots\dots\dots 4$$

$$m_{12} = m_{21} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha \\ 1 & \alpha^2 \end{bmatrix} = \alpha^2 - \alpha \quad \dots\dots\dots 5$$

$$m_{13} = m_{31} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 \\ 1 & \alpha \end{bmatrix} = \alpha - \alpha^2 \quad \dots\dots\dots 6$$

$$m_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 \end{bmatrix} = \alpha^2 - 1 \quad \dots\dots\dots 7$$

$$m_{23} = m_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & \alpha \end{bmatrix} = \alpha - 1 \quad \dots\dots\dots 8$$

$$m_{33} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 \end{bmatrix} = \alpha^2 - 1 \quad \dots\dots\dots 9$$

Sustituyendo las expresiones 4, 5, 6, 7, 8 y 9 en la ecuación 3, obtenemos:

$$COF[A] = \begin{bmatrix} (\alpha^2 - \alpha)(\alpha^2 + \alpha) & -(\alpha^2 - \alpha) & \alpha - \alpha^2 \\ -(\alpha^2 - \alpha) & \alpha^2 - 1 & -(\alpha - 1) \\ \alpha - \alpha^2 & -(\alpha - 1) & \alpha^2 - 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 10$$

$$[COF[A]]^T = \begin{bmatrix} (\alpha^2 - \alpha)(\alpha^2 + \alpha) & -(\alpha^2 - \alpha) & \alpha - \alpha^2 \\ -(\alpha^2 - \alpha) & \alpha^2 - 1 & -(\alpha - 1) \\ \alpha - \alpha^2 & -(\alpha - 1) & \alpha^2 - 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 11$$

Obteniendo el determinante de A a partir de la ecuación 2, tenemos:

$$Det[A] = m_{11} - m_{12} + m_{13}$$

$$\begin{aligned} Det[A] &= (\alpha^4 - \alpha^2) - (\alpha^2 - \alpha) + (\alpha - \alpha^2) && \dots\dots\dots 12 \\ &= \alpha^4 - \alpha^2 - \alpha^2 + \alpha + \alpha - \alpha^2 \end{aligned}$$

tomando en cuenta:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 \mid 120^\circ \\ \alpha^2 &= 1 \mid 240^\circ \\ \alpha^3 &= 1 \mid 360^\circ \\ \alpha^4 &= 1 \mid 120^\circ \end{aligned}$$

tenemos que:

$$\alpha^4 - \alpha^2 = \alpha - \alpha^2 \quad \dots\dots\dots 13$$

Sustituyendo la expresión anterior en la ecuación 12

$$\begin{aligned} Det[A] &= (\alpha - \alpha^2) + (\alpha - \alpha^2) + (\alpha - \alpha^2) && \dots\dots\dots 14 \\ &= 3(\alpha - \alpha^2) \end{aligned}$$

Sustituyendo las expresiones 14 y 11 en la ecuación 1 tenemos:

$$[A^{-1}] = \frac{\begin{bmatrix} (\alpha^2 - \alpha)(\alpha^2 + \alpha) & -(\alpha^2 - \alpha) & \alpha - \alpha^2 \\ -(\alpha^2 - \alpha) & \alpha^2 - 1 & -(\alpha - 1) \\ \alpha - \alpha^2 & -(\alpha - 1) & \alpha^2 - 1 \end{bmatrix}}{3(\alpha - \alpha^2)}$$

..... 15

$$= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -(\alpha^2 - \alpha) & 1 & 1 \\ 1 & \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha - \alpha^2} & \frac{-(\alpha - 1)}{\alpha - \alpha^2} \\ 1 & \frac{-(\alpha - 1)}{\alpha\alpha^2} & \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha - \alpha^2} \end{bmatrix}$$

Simplificando la siguiente expresión tenemos:

$$\alpha^2 + \alpha + 1 = 0 \quad \text{..... 16}$$

$$1 = -(\alpha^2 + \alpha) \quad \text{..... 17}$$

$$\alpha^2 - 1 = (\alpha + 1)(\alpha - 1)$$

$$\alpha - \alpha^2 = \alpha(1 - \alpha) = -\alpha(\alpha - 1)$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1|120^0} = 1|-120^0 = 1|240^0 = \alpha^2$$

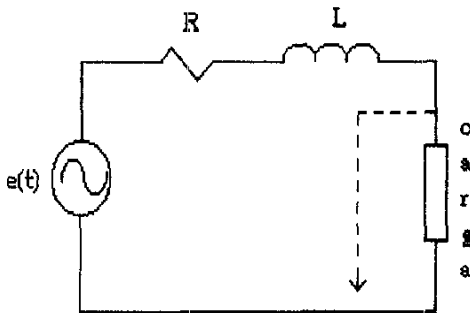
$$\begin{aligned} \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha - \alpha^2} &= \frac{(\alpha + 1)(\alpha - 1)}{-\alpha(\alpha - 1)} = -\frac{\alpha + 1}{\alpha} \\ &= -1 - \frac{1}{\alpha} = -\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad \dots\dots\dots 18 \\ &= -(1 + \alpha^2) = -1 - \alpha^2 = \alpha \end{aligned}$$

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha - \alpha^2} = \frac{1 - \alpha}{\alpha(1 - \alpha)} = \frac{1}{\alpha} = \alpha^2 \quad \dots\dots\dots 19$$

Sustituyendo las expresiones obtenidas en las ecuaciones 17, 18 y 19 en la ecuación 15; obtenemos finalmente la matriz inversa de A.

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}$$

Analizando el circuito básico que se presentaría cuando ocurriera una falla en un sistema eléctrico industrial con el fin de conocer el tipo de respuesta en términos generales que se tendría. Considerando el circuito de la figura B1:



$$e(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \theta)$$

Asumiendo que en el instante $t=0$ ocurre una falla en el circuito de la figura anterior; momentos antes de la falla, la corriente eléctrica en la carga es:

$$i(t) = i(0) = cte$$

La expresión matemática que nos relaciona al circuito al ocurrir la falla es:

$$e(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \theta) \quad \dots\dots 1$$

La respuesta total de la corriente es:

$$i(t)_T = i_{HOMOGENEA} + i_{COMPLEMENTARIA}$$

Resolviendo la ecuación 1 en su forma homogénea tenemos:

$$R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = 0 \quad \dots\dots 2$$

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{R}{L} i(t) = 0$$

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L} i(t) \quad \dots\dots 3$$

Dividiendo entre i:

$$\frac{\frac{di(t)}{dt}}{i} = -\frac{R}{L} \quad \dots\dots 4$$

Recordando:

$$\frac{\frac{di(t)}{dt}}{i} = \frac{d}{dt} \ln|i(t)|$$

Tenemos:

$$\frac{d}{dt} \ln|i(t)| = -\frac{R}{L}(t)$$

$$d \ln|i(t)| = -\frac{R}{L}(t)dt \quad \dots 5$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\int d \ln|i(t)| = -\int \frac{R}{L}(t)dt$$

Tomando exponenciales en ambos lados tenemos:

$$i(t) = e^{-\int \frac{R}{L}dt + C} = C e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$i(t) = i_{\text{HOMOGENEA}}$$

$$= i_{CD} \quad \dots 6$$

$$= C e^{-\frac{R}{L}t}$$

Retomando la ecuación 1 y resolviéndola con su forma complementaria tenemos:

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{R}{L}i(t) = \sqrt{2} \frac{V}{L} \text{Cos}(wt + \theta) \quad \dots 7$$

Empleando el factor de integración

$$\mu(t) = e^{\int a(t) dt}$$

Donde

$$a(t) = \frac{R}{L}$$

$$\begin{aligned} \mu(t) &= e^{\int \frac{R}{L}(t) dt} \\ &= e^{\frac{R}{L}t} \end{aligned} \quad \dots\dots 8$$

Multiplicando la ecuación 8 con la ecuación 7 tenemos:

$$e^{\frac{R}{L}t} \frac{di(t)}{dt} + e^{\frac{R}{L}t} \frac{R}{L} i(t) = e^{\frac{R}{L}t} \sqrt{2} \frac{V}{L} \cos(\omega t + \theta) \quad \dots\dots 9$$

Simplificando el lado izquierdo de la ecuación 9 tenemos:

$$e^{\frac{R}{L}t} \left[\frac{di(t)}{dt} + \frac{R}{L} i(t) \right] = e^{\frac{R}{L}t} \sqrt{2} \frac{V}{L} \cos(\omega t + \theta) \quad \dots\dots 10$$

Observando que el lado izquierdo de la ecuación 10 es un producto de dos funciones:

$$\frac{d}{dt} \left(e^{\frac{R}{L}t} i(t) \right) = e^{\frac{R}{L}t} \sqrt{2} \frac{V}{L} \cos(\omega t + \theta) \quad \dots\dots 11$$

$$d\left(e^{\frac{R}{L}t} i(t)\right) = e^{\frac{R}{L}t} \sqrt{2} \frac{V}{L} \cos(\omega t + \theta) dt \quad \dots 12$$

Integrando la ecuación 12

$$\int d\left(e^{\frac{R}{L}t} i(t)\right) = \int e^{\frac{R}{L}t} \sqrt{2} \frac{V}{L} \cos(\omega t + \theta) dt$$

$$e^{\frac{R}{L}t} i(t) = \sqrt{2} \frac{V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt \quad \dots 13$$

Resolviendo el lado derecho de la ecuación 13 como una integral de la forma

$$\int u dv = uv - \int v du$$

Tenemos:

$$\sqrt{2} \frac{V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt$$

$$u = e^{\frac{R}{L}t} \quad dv = \cos(\omega t + \theta) dt \quad \dots 14$$

$$du = \frac{R}{L} e^{\frac{R}{L}t} dt \quad v = \frac{1}{\omega} \text{sen}(\omega t + \theta)$$

Resolviendo la ecuación 14 se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2}V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt &= \\ &= \frac{\sqrt{2}V}{L} \left[e^{\frac{R}{L}t} \frac{1}{\omega} \text{sen}(\omega t + \theta) - \int \frac{R}{L} e^{\frac{R}{L}t} \frac{1}{\omega} \text{sen}(\omega t + \theta) dt \right] \quad \dots 15 \\ &= \frac{\sqrt{2}V}{L} \left[\frac{e^{\frac{R}{L}t}}{\omega} \text{sen}(\omega t + \theta) - \frac{R}{L\omega} \int e^{\frac{R}{L}t} \text{sen}(\omega t + \theta) dt \right] \end{aligned}$$

Haciendo la integral de la expresión 15 de la forma:

$$\begin{aligned} \int u dv &= uv - \int v du \\ u &= e^{\frac{R}{L}t} & dv &= \text{sen}(\omega t + \theta) dt \\ du &= \frac{R}{L} e^{\frac{R}{L}t} dt & v &= -\frac{1}{\omega} \cos(\omega t + \theta) \end{aligned}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 15:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{2}V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt &= \quad \dots 16 \\ &= \frac{\sqrt{2}V}{L} \left[\frac{e^{\frac{R}{L}t}}{\omega} \text{sen}(\omega t + \theta) - \frac{R}{L\omega} \left[-\frac{e^{\frac{R}{L}t}}{\omega} \cos(\omega t + \theta) + \int \frac{R}{L\omega} e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt \right] \right] \end{aligned}$$

$$\frac{\sqrt{2}V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt = \dots 17$$

$$= \frac{\sqrt{2}V}{L} \left[\frac{e^{\frac{R}{L}t}}{\omega} \operatorname{sen}(\omega t + \theta) + \frac{R}{L\omega^2} e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) - \frac{R^2}{L^2\omega^2} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt \right]$$

Simplificando en la ecuación 17 la integral del lado izquierdo con respecto a la integral que aparece en el último miembro de la ecuación del lado derecho, que representa a la integral desconocida ya que aparece en el primer miembro de la ecuación con coeficiente de uno y con un coeficiente de $-\frac{a^2}{b^2}$ en el último miembro del lado derecho de tiene:

$$\frac{\sqrt{2}V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt + \frac{\sqrt{2}V}{L} \left(\frac{R^2}{L^2\omega^2} \right) \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt$$

$$\frac{\sqrt{2}V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt \left(1 + \frac{R^2}{L^2\omega^2} \right) \dots 18$$

$$\frac{\sqrt{2}V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt \left(\frac{L^2\omega^2 + R^2}{L^2\omega^2} \right)$$

Regresando y sustituyendo en la ecuación 17 se tendrá:

$$\frac{\sqrt{2}V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt \left(\frac{L^2\omega^2 + R^2}{L^2\omega^2} \right) = \frac{\sqrt{2}V}{L} \left[\frac{e^{\frac{R}{L}t}}{\omega} \text{sen}(\omega t + \theta) + \frac{R}{L\omega^2} e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) \right] + C$$

$$\frac{\sqrt{2}V}{L} \int e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) dt = \frac{\frac{\sqrt{2}V}{L} \left[\frac{e^{\frac{R}{L}t}}{\omega} \text{sen}(\omega t + \theta) + \frac{R}{L\omega^2} e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) \right]}{\left(\frac{L^2\omega^2 + R^2}{L^2\omega^2} \right)} + C \quad \dots 19$$

$$= \frac{\sqrt{2}V \left[L\omega e^{\frac{R}{L}t} \text{sen}(\omega t + \theta) + RLe^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) \right]}{L^2\omega^2 + R^2} + C$$

Retomando la ecuación 13 y sustituyendo 19 en 13:

$$e^{\frac{R}{L}t} i_c(t) = \frac{\sqrt{2}V \left[L\omega e^{\frac{R}{L}t} \text{sen}(\omega t + \theta) + RLe^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) \right]}{L^2\omega^2 + R^2} + C$$

$$i_{\text{complementaria}}(t) = \dots \quad 20$$

$$= i_c(t) = \frac{\sqrt{2}V \left[L\omega e^{\frac{R}{L}t} \text{sen}(\omega t + \theta) + RLe^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) \right]}{L^2\omega^2 + R^2} + Ce^{-\frac{R}{L}t}$$

Para encontrar el valor de C, evaluamos para $i_c(0) = 0$ en la expresión anterior:

$$i_c(0) = 0 = \frac{\sqrt{2}V \left[Lwe^{\frac{R}{L} \cdot 0} \operatorname{sen}(0 + \theta) + RL e^{\frac{R}{L} \cdot 0} \cos(0 + \theta) \right]}{L^2\omega^2 + R^2} + Ce^{-\frac{R}{L} \cdot 0}$$

$$= \frac{\sqrt{2}V [Lw \operatorname{sen} \theta + RL \cos \theta]}{L^2\omega^2 + R^2} + C \quad \dots\dots 21$$

$$C = -\frac{\sqrt{2}V}{L^2\omega^2 + R^2} [Lw \operatorname{sen} \theta + RL \cos \theta]$$

Sustituyendo la ecuación 21 en la ecuación 20 se tendrá:

$$i_c(t) = \dots\dots 22$$

$$= \frac{\sqrt{2}V \left[Lwe^{\frac{R}{L}t} \operatorname{sen}(\omega t + \theta) + RL e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) \right]}{L^2\omega^2 + R^2} - \frac{\sqrt{2}V}{L^2\omega^2 + R^2} [Lw \operatorname{sen} \theta + RL \cos \theta] e^{-\frac{R}{L}t}$$

Recordando $i_{\text{TOTAL}} = i(t)_{\text{GENERAL}} = i_{\text{HOMOGENEA}} + i(t)_{\text{COMPLEMENTARIA}}$

$$i(t) = \dots\dots 23$$

$$= Ce^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\sqrt{2}V \left[Lwe^{\frac{R}{L}t} \operatorname{sen}(\omega t + \theta) + RL e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) \right]}{L^2\omega^2 + R^2} - \frac{\sqrt{2}V [Lw \operatorname{sen} \theta + RL \cos \theta]}{L^2\omega^2 + R^2} e^{-\frac{R}{L}t}$$

Para simplificar hacemos $\frac{V}{R^2 + L^2 \omega^2} = I$

$$i(t) = \dots\dots 24$$

$$= C e^{-\frac{R}{L}t} + \sqrt{2}I \left[L \omega e^{\frac{R}{L}t} \sin(\omega t + \theta) + RL e^{\frac{R}{L}t} \cos(\omega t + \theta) \right] - \sqrt{2}I [L \omega \sin \theta + RL \cos \theta] e^{-\frac{R}{L}t}$$

Para simplificar aun mas hacemos:

$$\tan \varphi = \frac{-\omega L}{RL} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}$$

donde $\sin \varphi = -\omega L$
 $\cos \varphi = R$

Analizando el segundo miembro de la ecuación 24 en función de la expresión anterior tenemos:

$$(-\sin \varphi^* \sin(\omega t + \theta)) + (\cos \varphi^* \cos(\omega t + \theta)) = \dots\dots 25$$

$$= -\frac{1}{2} [\cos(\varphi - \omega t - \theta) - \cos(\varphi + \omega t + \theta)] + \frac{1}{2} [\cos(\varphi - \omega t - \theta) + \cos(\varphi + \omega t + \theta)]$$

$$= -\frac{1}{2} \cos(\varphi - \omega t - \theta) + \frac{1}{2} \cos(\varphi + \omega t + \theta) + \frac{1}{2} \cos(\varphi - \omega t - \theta) + \frac{1}{2} \cos(\varphi + \omega t + \theta)$$

$$= \cos(\varphi + \omega t + \theta)$$

Analizando el tercer miembro de la ecuación 24 en función de la expresión 25 tenemos:

$$\begin{aligned}
 &(-\operatorname{sen} \varphi^* \operatorname{sen} \theta) + (\cos \varphi^* \cos \theta) = \\
 &= -\frac{1}{2} [\cos(\varphi - \theta) - \cos(\varphi + \theta)] + \frac{1}{2} [\cos(\varphi - \theta) + \cos(\varphi + \theta)] \quad \dots\dots 26 \\
 &= -\frac{1}{2} \cos(\varphi - \theta) + \frac{1}{2} \cos(\varphi + \theta) + \frac{1}{2} \cos(\varphi - \theta) + \frac{1}{2} \cos(\varphi + \theta) \\
 &= \cos(\varphi + \theta)
 \end{aligned}$$

Sustituyendo las ecuaciones 25 y 26 en la ecuación 24 se tiene:

$$i(t) = C e^{-\frac{R}{L}t} + \sqrt{2} I (\cos(\omega t + \theta + \varphi) - \sqrt{2} I (\cos \theta + \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \dots\dots 27$$

Al analizar el circuito de la figura B-1 tenemos las dos componentes de la respuesta total ($i_{\text{TOTAL}} = \text{Componente de AC} + \text{Componente de DC}$) las cuales son:

$$AC \quad \sqrt{2} I \cos(\omega t + \theta + \varphi) \quad \dots\dots 28$$

$$DC \quad \left(C - \sqrt{2} I \cos(\theta + \varphi) \right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \dots\dots 29$$

Específicamente el valor rms de la corriente de falla es:

$$I_{rms} = \sqrt{(\text{Componente de AC})^2 + (\text{Componente de DC})^2}$$

$$= \sqrt{2I^2(\cos(\omega t + \theta + \phi))^2 + \left(C - \sqrt{2}I(\cos(\theta + \phi))^2 e^{-\frac{2R}{L}t}\right)^2} \quad \dots\dots 30$$

Si el valor de la corriente inicial es despreciable en este caso cuando $(\theta + \phi) = 0$; tenemos un valor máximo rms cuando el valor de $t=0$:

$$I_{rms} = I \sqrt{3} \quad \dots\dots 31$$

Este valor es 73% mucho mayor que al inicio de la falla, por lo anterior el decaimiento de la componente de DC es muy importante en la aplicación de los interruptores.

Si el interruptor opera en un tiempo t_1 después de haber iniciado la falla, el valor máximo rms de corriente a interrumpir será:

$$I_{rms} = \sqrt{I^2 + 2 I e^{-\frac{2R}{L}t}} \quad \dots\dots 32$$

De acuerdo a la ecuación 32 analizamos el porque de el manejar siempre las condiciones mas severas del cortocircuito, como lo indicamos en la expresión 31.

APENDICE C

MÉTODO DE LA NORMA ANSI/IEEE 141-1993

Este método esta basado en la aplicación de ciertos criterios (factores de multiplicación) sobre el calculo de las corrientes de cortocircuito, los cuales dependen del punto del sistema en el cuál se analiza la falla, de la relación X/R de los equivalentes correspondientes del sistema reducido, el tiempo en que se inicie la apertura de los contactos primarios del interruptor.

En la norma se elaboran tres redes (circuitos equivalentes del sistema eléctrico) para los cálculos de las corrientes de cortocircuito. La diferencia entre cada red es el valor de la impedancia de las máquinas rotativas, el cuál varia en función de la red.

PRIMERA RED

Al analizar esta red se obtendrán las corrientes de cortocircuito momentáneas que circulan durante el primer ciclo después de haber ocurrido la falla, para elaborar esta red se deberán tomar en cuenta los factores por los cuales están afectadas todas las fuentes de corriente que contribuyen con corriente de falla, es decir, los valores subtransitorios de acuerdo a las tablas C1 y C2 (A1 y A2 de la norma ANSI/IEEE-141-1993), considerando los motores menores de 50 Hp agrupados en un equivalente.

ROTATING-MACHINE REACTANCE (OR IMPEDANCE) MULTIPLIERS

Type of Rotating Machine	First-Cycle Network	Interrupting Network
All turbine generators; all hydrogenerators with amortisseur windings, all conenser.	1.0 X'd	1.0 X'd
Hydrogenerators without amortisseur windings.	0.75 X'd	0.75 X'd
All synchronous motors.	1.0 X'd	1.5 X'd
Induction motors		
Above 1000 hp at 1800 r/min or less	1.0 X'd	1.5 X'd
Above 250 hp at 3600 r/min	1.0 X'd	1.5 X'd
All others, 50 hp and above	1.2 X'd	3 X'd
All smaller than 50 hp	Neglect	Neglect

From ANSI/IEEE C37.010-1979 (2) and ANSI/IEEE C37.5-1979 (3)

TABLE C1

COMBINET NETWORK ROTATING-MACHINE REACTANCE (OR IMPEDANCE) MULTIPLIERS
(CHANGES TO TABLE 4.1 FOR COMPREHENSIVE MULTIVOLTAGE SYSTEM CALCULATIONS)

Type of Rotating Machine	First-Cycle Network	Interrupting Network
Induction motors		
All others, 50 hp and above	1.2 X'd *	3.0 X'd ***
All smaller than 50 hp	1.67 X'd **	Neglect

- * or estimate the first-cycle network $X=0.20$ per unit based on motor rating
- ** or estimate the first-cycle network $X=0.28$ per unit based on motor rating
- *** or estimate the interrupting network $X=0.50$ per unit based on motor rating

TABLE C2

Las corrientes calculadas en esta red pueden tener diferentes usos:

- 1) Para la selección de capacidades de los fusibles de protección.
- 2) Para seleccionar las capacidades de interruptores.

Para ambos casos se deberán calcular las corrientes de cortocircuito simétricas y asimétricas, el factor de asimetría se determina de acuerdo a los siguientes criterios:

Para fusibles (ANSI/IEEE C37.41-1981):

- Un valor de 1.2 si el voltaje es menor de 15 KV y si la relación es menor a 4.
- Un valor de 1.55 para todos los demás casos.

Para interruptores en baja tensión menores o iguales a 1 KV (NEMA AB I-1986):

El factor varia en función de la relación X/R .

Para interruptores en media y alta tensión arriba de 1 KV (ANSI/IEEE C37.010-1979 Y C37.5-1979):

El valor es de 1.6 en todos los casos.

SEGUNDA RED

Del análisis de está red obtenemos la corriente interruptiva de cortocircuito que ocurre en el momento en que los contactos del interruptor inician su apertura, los resultados deberán usarse para la selección de interruptores en media y alta tensión (arriba de 1 KV).

Durante la realización de está red, se deberán afectar las impedancias subtransitorias de las máquinas rotatorias por los factores indicados en las tablas C1 y C2 (A1 y A2 de la norma ANSI/IEEE-141-1993).

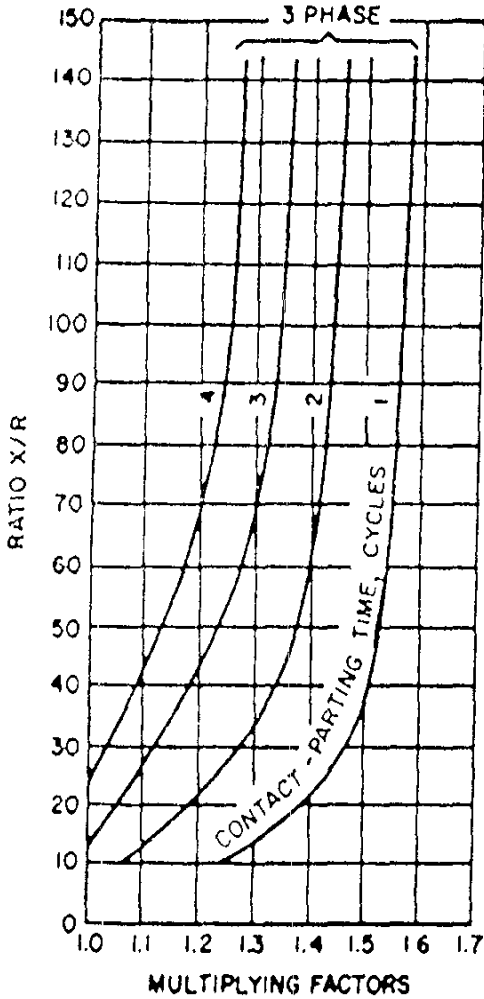
Con la relación X/R de los circuitos equivalentes interruptivos al punto de la falla, se determina el factor de multiplicación utilizando las curvas de las figuras C3, C4, C5 y C6 de la norma. La norma recomienda emplear factores de multiplicación remotos que impondrían las condiciones más severas a las fallas. En esta red se desprecian los motores agrupados de capacidades menores de 50 Hp.

TERCERA RED

Del análisis de esta red se obtienen las corrientes que se requieren para el calculo de los ajustes de los relevadores de retardo de tiempo (mayores de 6 ciclos),

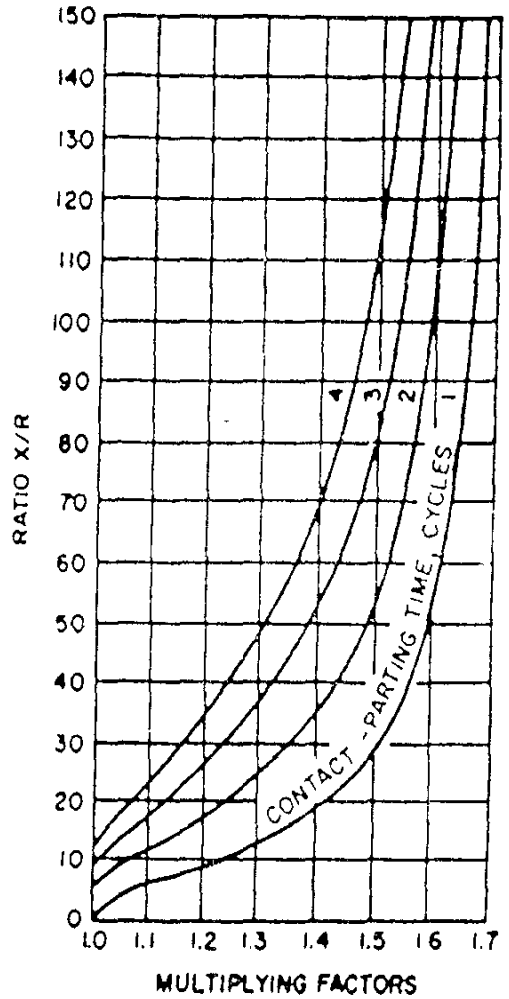
El circuito equivalente de la red que se analiza, deberá elaborarse considerando únicamente los valores de impedancia transitoria de los generadores e impedancias de los equipos estáticos (cables, transformadores, reactores, etc.) instalados entre ellos y los puntos de falla, despreciando las contribuciones de todos los motores.

El factor de multiplicación para esta red es de 1 para todos los casos. En los ajustes de los relevadores instantáneos se utilizan las corrientes momentáneas de cortocircuito obtenidas en el análisis de la primera red.



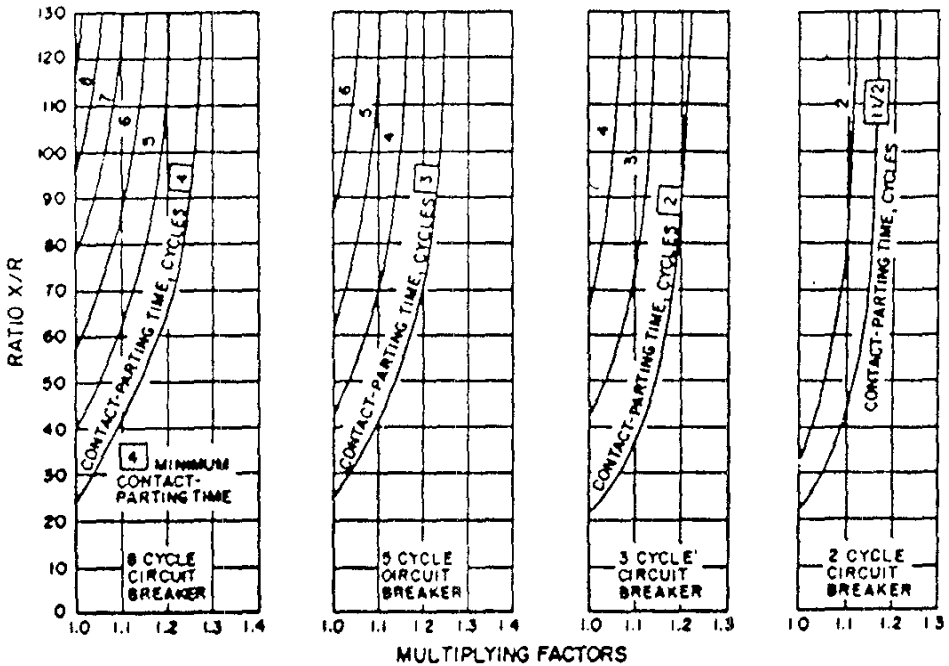
MULTIPLYING FACTORS (TOTAL CURRENT RATING BASIS) FOR THREE-PHASE FAULTS.

FIGURA C3



MULTIPLYING FACTORS (TOTAL CURRENT RATING BASIS) FOR THREE-PHASE AND LINE-TO GROUND FAULTS

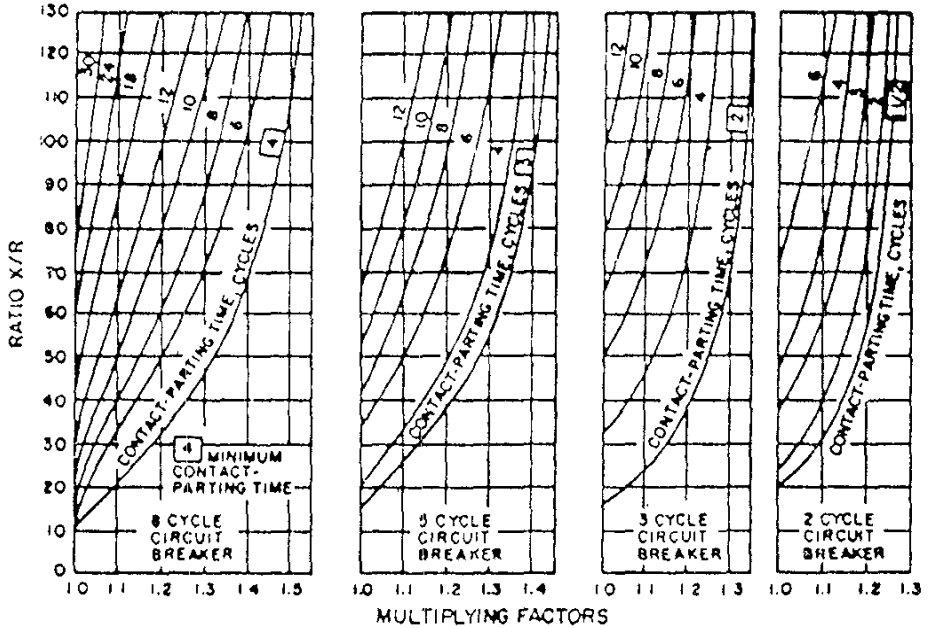
FIGURA C4



NOTE: Though no more than one transformation or with external reactance in series that is less than 1.5 time generator subtransient reactance (local) (ANSI/IEEE C37.010-1979)

MULTIPLYING FACTORS FOR THREE-PHASE FAULTS FED PREDOMINANTLY FROM GENERATORS

FIGURA C5



NOTE: Though two or more transformation or with external reactance in series that is equal to or above 1.5 time generator subtransient reactance (remote) (ANSI/IEEE C37.010-1979)

MULTIPLYING FACTORS FOR THREE-PHASE AND LINE-TO-GROUND FAULTS
 FED PREDOMINANTLY FROM GENERATORS

FIGURA C6

CONCLUSIONES

Del trabajo anteriormente desarrollado se puede concluir que un cortocircuito es el establecimiento de un flujo de corriente eléctrica muy alta debido a una conexión por un circuito de baja impedancia, que prácticamente siempre ocurre por accidente. Aun en las instalaciones con las protecciones mas sofisticadas se producen fallas por cortocircuito. Las corrientes de falla así como las fuerzas electrodinámicas -atracción/repulsión entre conductores- que se producen con un cortocircuito pueden provocar daños importantes en la instalación ,equipos y al personal mismo.

El objetivo del estudio de cortocircuito es el de calcular el valor máximo y mínimo de la corriente y su comportamiento durante el tiempo que permanece el cortocircuito.

El valor máximo calculado de las corriente de falla es usado para seleccionar dispositivos de una capacidad interruptiva adecuada a la misma; conocer el esfuerzo al que son sometidos los equipos durante el tiempo transcurrido desde que se presenta la falla hasta que se interrumpe la circulación de la corriente.

El valor mínimo calculado es usado para establecer la sensibilidad requerida de los relevadores de protección

BIBLIOGRAFIA

- B. M. WEEDY. *Sistemas Electricos de Gran Potencia*. Editorial Reverte 1988.
- H. W. KABISAWA. *Electrical Power Engineering*. Editorial Mc Graw Hill 1993.
- C. L. HADHWA. *Electrical Systems*. Editorial John Wiley and Sons 1991.
- CORRALES MARTIN. *Introduccion a los Fenomenos Transitorios*. Editorial Marcombo.
- ALLAN GREENWOOD. *Electrical Transients in Power Systems*. Editorial Wyley Interciencia
- A. P. SAKIS MELIPOULAS. *Power System Grounding and Transients Introduction*. Editorial Marcel Dekker Inc. NY 1988.
- DONALD BEEMAN. *Industrial Power Systems Handbook*. Editorial Mc Graw Hill 1955.
- STEVENSON. *Analisis de Sistemas Electricos de Potencia*. Editorial Mc Graw Hill 1965.
- ROBERTO ESPINOZA Y LARA. *Sistemas de distribucion*. Editorial Noriega Limusa.

ESTANDARES Y NORMAS

ANSI

- C37.010-1979 APPLICATION GUIDE FOR AC HIGH VOLTAGE
C37013-1989 IEEE Standart for AC-High Voltaje Generator.
Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.
- c37.41-1988 IEEE Standart Desing Tests for High-Voltaje Fuses
Distribution Enclosed Single-Pole Air Switces
Fuse Disconnecting Switches and Accessories.
- Standard 141-1993 SHORT-CIRCUIT CURRENT CALCULATIONS.