

## Capítulo

# III

## CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO.

La planificación, el diseño y la operación de los sistemas eléctricos de potencia, requiere de cuidadosos estudios para evaluar su comportamiento, confiabilidad y seguridad. Los estudios que comúnmente se realizan son: flujos de potencia, estabilidad, coordinación de protecciones, cálculo de cortocircuito, etc. Un buen diseño debe estar basado en un cuidadoso estudio en que se incluye la selección de tensión, adecuado tamaño del equipamiento y selección apropiada de protecciones. La mayoría de los estudios necesita un modelo complejo y detallado el cual represente al sistema de potencia. El estudio de cortocircuito es un ejemplo de éstos, siendo esencial para la selección de equipos, y protecciones.

La duración del cortocircuito es el tiempo en segundos o ciclos durante el cual, la corriente de cortocircuito circula por el sistema. El fuerte incremento de calor generado por tal magnitud de corriente, puede destruir o envejecer los aislantes del sistema eléctrico, por lo tanto es de vital importancia reducir este tiempo al mínimo mediante el uso de las protecciones adecuadas.

Los resultados obtenidos del cálculo de cortocircuito son:

La corriente en los diferentes componentes del sistema.

Las tensiones después de la falla en todas las barras del sistema eléctrico.

### 3.1 NATURALEZA DEL CORTO CIRCUITO.

Podemos decir que una corriente de corto circuito es aquella que circula en un circuito eléctrico cuando existe el contacto entre dos o más conductores al perderse el aislamiento entre ellos o entre ellos y tierra.

La magnitud de la corriente de corto circuito es mucho mayor que la corriente nominal o de carga que circula por el circuito.

En condiciones normales de operación, la carga consume una corriente proporcional al valor de tensión aplicada y la impedancia de la propia carga. Si se presenta un corto circuito en las terminales de la carga, la tensión queda aplicada únicamente a la baja impedancia de los conductores de alimentación y la impedancia de la fuente hasta el punto de corto circuito, ya no oponiéndose la impedancia normal de la carga y generándose una corriente mucho mayor.

### 3.2 FUENTES DE CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO.

Cuando se determinan las magnitudes de las corrientes de corto circuito, es importante que se consideren todas las fuentes de corriente de corto circuito y que las reactancias características de estas fuentes sean conocidas.

Existen 4 fuentes básicas de corriente.

- Generadores.
- Motores y condensadores síncronos.
- Motores de inducción.
- Sistema de la Cia. Suministradora.

Todas ellas alimentan con corriente de corto circuito la falla.

#### *Generadores.*

Los generadores son movidos por turbinas, motores diesel, u otro tipo de primotores. Cuando ocurre un corto circuito en el circuito, el cual está conectado al generador, éste continúa produciendo tensión por que la excitación de campo se mantiene y el primotor sigue moviéndolo a velocidad normal. La tensión generada produce una corriente de corto circuito de gran magnitud, la cual fluye del generador (o generadores) al punto de falla.

Este flujo de corriente se limita únicamente por la impedancia del generador y las impedancias del corto circuito entre el generador y el punto donde ocurre la falla. Si el corto circuito ocurre en las terminales del generador, la corriente queda limitada solamente por la impedancia de la máquina.

#### *Motores Síncronos.*

Los motores síncronos están contruidos substancialmente igual que los generadores; tienen un campo excitado por corriente directa y un devanado en el estator por el cual fluye la corriente alterna. Normalmente el motor toma la potencia de la línea y convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Durante un corto circuito en el sistema, el motor síncrono actúa como un generador y entrega corriente de corto circuito. Tan pronto como el corto circuito se establece, la tensión en el sistema se reduce a un valor mucho muy bajo. Consecuentemente el motor deja de entregar energía a la carga mecánica y empieza a detenerse.

Sin embargo, la inercia de la carga y el rotor impiden al motor que se detenga. En otras palabras, la energía rotatoria de la carga y el rotor mueven al motor síncrono como un primotor mueve a un generador.

La magnitud de la corriente de corto circuito depende de la potencia, tensión nominal y reactancia del motor síncrono.

#### *Motores de inducción.*

La energía de la carga y el rotor de un motor de inducción tienen exactamente el mismo efecto sobre el motor de inducción como en el motor síncrono; siguen moviendo al motor después de que ocurre un corto circuito en el sistema. Sólo existe una diferencia: el motor de inducción no tiene un campo excitado por corriente directa, pero existe un flujo en el motor durante la operación normal. Este flujo actúa en forma similar al flujo producido por el campo de corriente directa en el motor síncrono.

El campo del motor de inducción se produce por inducción desde el estator en lugar del devanado de corriente directa. El flujo del rotor permanece normal mientras se aplica tensión al estator desde una fuente externa (el sistema eléctrico). Sin embargo, si la fuente externa de tensión se elimina súbitamente, esto es, cuando ocurre el corto circuito en el sistema, el flujo en el rotor no puede decaer instantáneamente y la inercia sigue moviendo al motor, se genera una tensión en el devanado del estator causando una corriente de corto circuito que fluye hasta el punto de falla hasta que el flujo del rotor decae a cero.

La magnitud de la corriente de corto circuito producida por el motor de inducción depende de su potencia, tensión nominal, reactancia del motor y la reactancia del sistema hasta el punto de falla. Consecuentemente, el valor inicial simétrico de la corriente de corto circuito es aproximadamente igual a la corriente de arranque a tensión plena del motor.

#### *Sistema de la compañía suministradora.*

Los modernos sistemas eléctricos de las compañías suministradoras, representan una grande y compleja red de plantas generadoras interconectadas.

En un sistema típico, los generadores no se ven afectados por las altas corrientes de corto circuito que se producen en una planta industrial, únicamente aparece en ellos un incremento en su corriente de carga que tiende a permanecer constante.

Las líneas de transmisión y distribución, así como los transformadores, introducen impedancias entre las plantas generadoras y los consumidores industriales; de no ser así las compañías suministradoras serían una fuente muy grande de corriente de falla.

La representación de la compañía suministradora para estudio de corto circuito, será una impedancia equivalente referida al punto de conexión (punto de acometida).

### **3.3 INTRODUCCIÓN A LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS.**

Este método fue desarrollado en 1918 por D. L. Fortescue en “Método de las coordenadas simétricas”; el cual se aplica a la resolución de redes polifásicas, para soluciones analíticas o analizadores de redes. Es útil para la resolución de los sistemas polifásicos desequilibrados: en donde  $n$  fasores relacionados entre sí pueden descomponerse en  $n$  sistemas de vectores equilibrados (componentes simétricos).

## Operador a.

Se define el operador a como un número complejo de módulo unidad y de argumento  $120^\circ$ :

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (3.1)$$

Al multiplicar un fasor por el operador a, se obtiene un nuevo fasor de igual módulo que el primero y girado  $120^\circ$  en el sentido positivo de los ángulos (contrario a las manecillas del reloj). Ver figura 3.0.

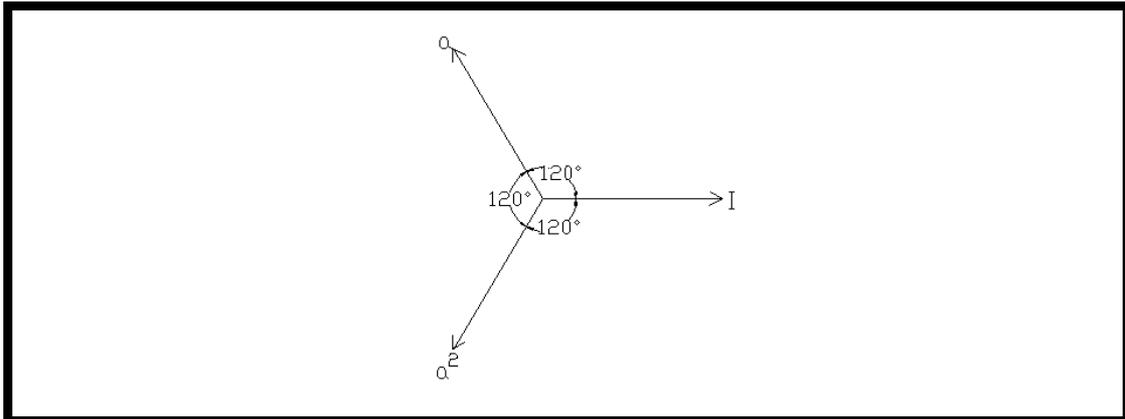


Figura 3.0 Sistema de tres fasores (Bautista, 1992)

De la definición (3.1) del operador “a” resultan evidentes las siguientes relaciones:

	Polar	Rectangular
$a$	$1 \angle 120^\circ$	$-0.5 + j0.866$
$a^2$	$1 \angle 240^\circ$	$-0.5 - j0.866$
$a^3$	$1 \angle 0^\circ$	$1.0 + j0$
$a^4$	$1 \angle 120^\circ$	$-0.5 + j0.866$
$1 + a - a^2$	$1 \angle 60^\circ$	$0.5 + j0.866$
$1 + a^2 - a$	$1 \angle -60^\circ$	$0.5 - j0.866$
$1 - a$	$\sqrt{3} \angle -30^\circ$	$1.5 - j0.866$
$1 - a^2$	$\sqrt{3} \angle 30^\circ$	$1.5 + j0.866$
$a - 1$	$\sqrt{3} \angle 150^\circ$	$-1.5 + j0.866$
$a^2 - 1$	$\sqrt{3} \angle -150^\circ$	$-1.5 - j0.866$
$a - a^2$	$\sqrt{3} \angle 90^\circ$	$0.0 + j1.732$
$a^2 - a$	$\sqrt{3} \angle -90^\circ$	$0.0 - j1.732$
$a + a^2$	$\sqrt{3} \angle 180^\circ$	$-1.0 + j0$
$1 + a + a^2$	0	0

*Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado en sus componentes simétricas.*

Todo sistema trifásico senoidal desequilibrado, representado por tres fasores desequilibrados, puede sustituirse por la suma de tres sistemas de fasores simétricos: un sistema directo o de secuencia positiva; un sistema inverso o de secuencia negativa y un sistema homopolar o de secuencia cero, que constituyen simétricas del sistema desequilibrado.

*Definición del sistema directo o de secuencia positiva.*

Es un sistema trifásico equilibrado que puede representarse por tres fasores de igual módulo. Que forman un ángulo entre dos fasores consecutivos de  $120^\circ$  y que tienen una secuencia de fase a, b, c. En la figura 3.1 se puede observar el diagrama de un sistema de fasores de secuencia positiva.

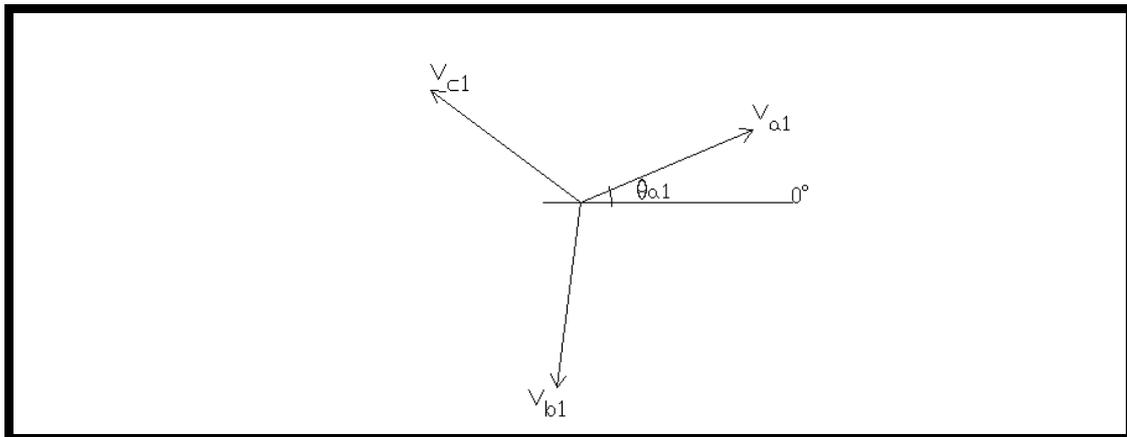


Figura 3.1 Sistema de fasores de secuencia positiva (Bautista, 1992).

Utilizando el operador  $a$ , puede escribirse:

$$v_{b1} = a^2 v_{a1} \quad (3.2)$$

$$v_{c1} = a v_{a1} \quad (3.3)$$

*Definición de sistema inverso o de secuencia negativa.*

Es un sistema trifásico equilibrado que puede representarse por tres fasores de igual módulo, que forman un ángulo entre dos fasores consecutivos de  $120^\circ$  y que tienen una secuencia de fases a, c, b. Obsérvese la figura 3.2 donde se ilustra el diagrama de fasores de secuencia negativa.

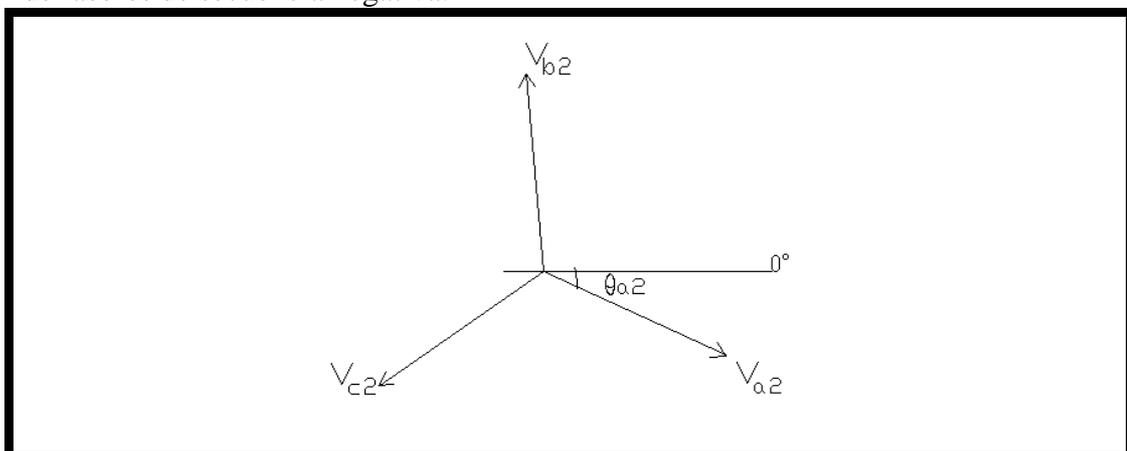


Figura 3.2 Sistema de fasores de secuencia negativa (Bautista, 1992).

Utilizando el operador  $a$ , puede escribirse:

$$v_{b2} = a v_{a2} \quad (3.4)$$

$$v_{c2} = a^2 v_{a2} \quad (3.5)$$

*Definición del sistema homopolar o de secuencia cero.*

Es un sistema trifásico que puede representarse por tres fasores de igual módulo y en fase. Ver figura 3.3

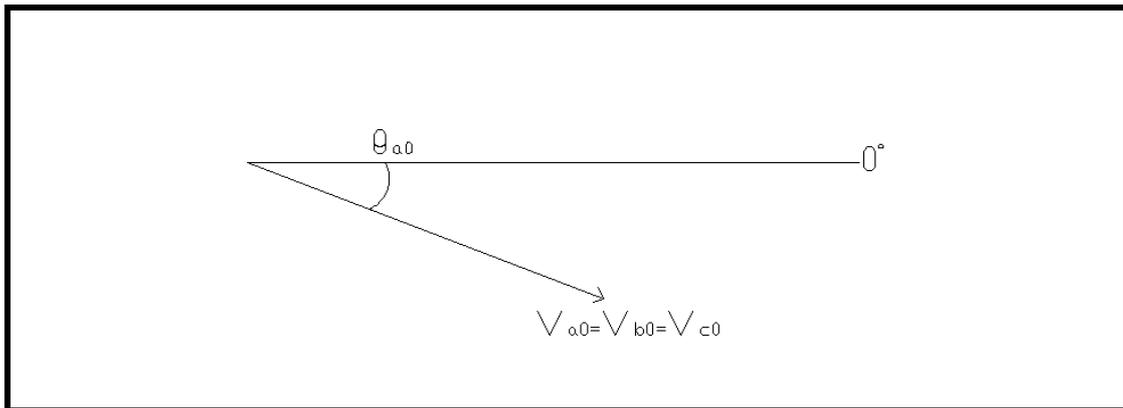


Figura 3.3 Sistema de fasores de secuencia cero (Bautista, 1992).

La suma de los tres sistemas: de secuencia positiva, negativa y cero, nos da un sistema de tres fasores desequilibrados. Ver figura 3.4

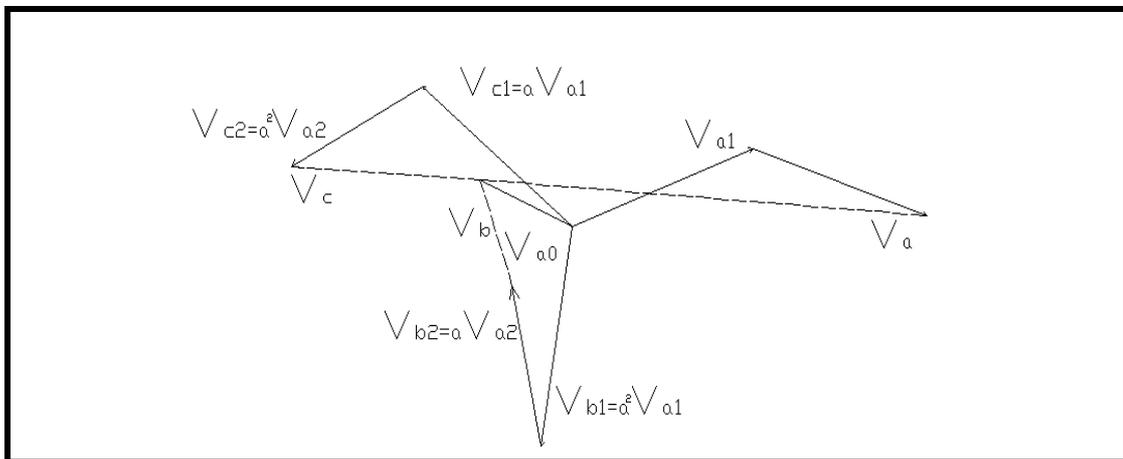


Figura 3.4 Sistema de tres fasores desequilibrados obtenidos sumando los sistemas de secuencia positiva, negativa y cero. (Bautista, 1992).

En general, cualquier sistema de tres fasores desequilibrados puede expresarse como la suma de tres sistemas de fasores: uno de secuencia positiva, uno de secuencia negativa y uno de secuencia cero:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \quad (3.6)$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \quad (3.7)$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (3.8)$$

A partir de las expresiones anteriores podemos obtener las siguientes ecuaciones:

$$I_{a0} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (3.9)$$

$$I_{a1} = \frac{I_a + aI_b + a^2I_c}{3} \quad (3.10)$$

$$I_{a2} = \frac{I_a + a^2I_b + aI_c}{3} \quad (3.11)$$

Estas ecuaciones nos permiten hallar las componentes de secuencia positiva, negativa y cero.

De este modo en forma matricial, las ecuaciones para determinar las tensiones de las fases y las tensiones de secuencia, pueden representarse como:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad \text{Ó} \quad V_{abc} = AV_{012} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{Ó} \quad V_{012} = CV_{abc} \quad (3.13)$$

Donde la matriz C es la matriz inversa de A.

En un sistema trifásico, la corriente que circula por el neutro es:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (3.14)$$

Si el sistema esta en equilibrio, la corriente por el neutro será igual a cero:

$$I_n = 0 \quad (3.15)$$

Si el sistema trifásico no esta en equilibrio habrá una circulación de corriente por el neutro:

$$I_n = 3I_{a0} \quad (3.16)$$

Ecuación básica para el cálculo de corto circuito a tierra.

### 3.4 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO.

Tradicionalmente los métodos de cálculo han sido clasificados como completos y simplificados. Un método completo es aquel que evalúa todos los parámetros del circuito. Un método simplificado utiliza tablas y gráficas, o hace alguna consideración para obtener un resultado aproximado. La utilidad de cada método dependerá del uso que le demos al resultado.

Los métodos más conocidos en orden de complejidad son:

- Método a Bus Infinito
- Método Óhmico o de Impedancias ( $Z_{bus}$ )
- Método por MVA
- Método por unidad
- Método por componentes simétricas

### 3.4.1 MÉTODO DE VALORES EN POR UNIDAD.

El primer paso para calcular la potencia y corriente de corto circuito simétrico, es establecer una base de potencia en kVA o MVA y una base de tensión en kV y convertir todas las impedancias del sistema a valores por unidad en dichas bases.

Después de convertir todas las impedancias a una base común, el sistema puede reducirse a una sola impedancia en el punto de falla por combinaciones sucesivas serie o paralelo o por transformaciones delta estrella. Lo anterior lo conocemos como teorema de Thevenin. En la figura 3.5 se ilustra un circuito reducido por el teorema de Thevenin.

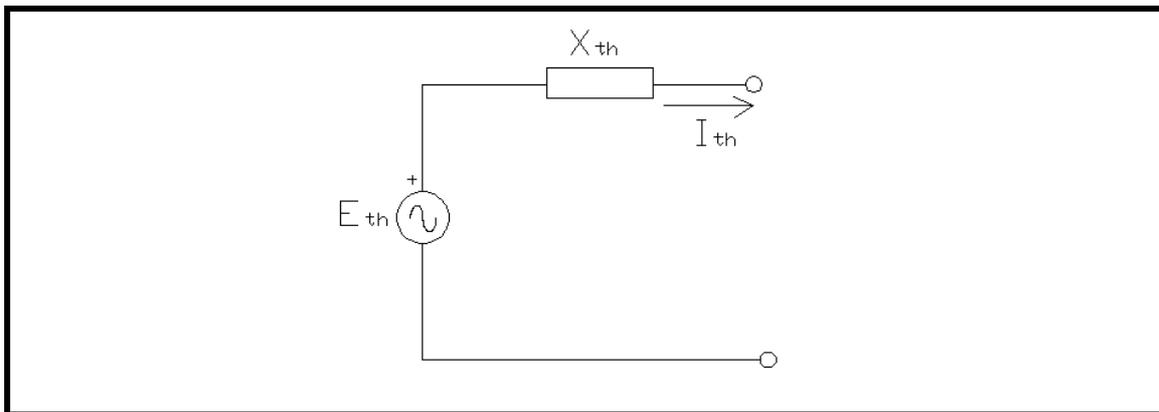


Figura 3.5 Reducción por el teorema de Thevenin.

La corriente de corto circuito se puede calcular por la siguiente relación:

$$I_{p.u.} = \frac{E_{p.u.}}{X_{p.u.}} \quad (3.17)$$

La corriente en Amperes se determina multiplicando la corriente en por unidad por la corriente base:

$$I = I_{p.u.} \times I_{base} \quad (3.18)$$

De donde:

$$I_{base} = \frac{KVA_{base}}{\sqrt{3} \times KV_{base}} \quad (3.19)$$

La potencia de corto circuito será:

$$P_{cc} = \frac{E_{p.u.}^2}{X_{p.u.}} P_{base} \quad (3.20)$$

Para realizar cambio de base, para dos sistemas de base distintos tales como  $E_{base1}$ ;  $S_{base1}$  y  $E_{base2}$ ;  $S_{base2}$ ; tenemos que:

$$X_{p.u1} X_{B1} = X_{p.u2} X_{B2}$$

Despejando obtenemos

$$X_{p.u2} = X_{p.u1} \frac{\frac{E_{B1}^2}{S_{B1}}}{\frac{E_{B2}^2}{S_{B2}}} = X_{p.u1} \frac{S_{B2}}{S_{B1}} \frac{E_{B1}^2}{E_{B2}^2} \quad (3.21)$$

### 3.4.2 MÉTODO DIRECTO O MÉTODO ÓHMICO.

El método directo para el cálculo de las corrientes o potencias de corto circuito se utiliza cuando en el diagrama unifilar se tienen los datos del equipo y del sistema en volts, amperes y ohms directamente.

A diferencia del método de valores por unidad, en este caso consideramos las relaciones de transformación de los transformadores para determinar los valores de impedancia conectadas en el lado de alta o de baja tensión en el sistema.

Con los valores de impedancia en ohms, el sistema puede reducirse a una sola impedancia en el punto de falla por combinaciones sucesivas serie o paralelo o por transformaciones delta- estrella aplicando el teorema de Thevenin. Véase figura 3.5.

La corriente de corto circuito se puede calcular por la siguiente relación:

$$I = \frac{E}{Z} \quad (3.22)$$

Donde: E= Tensión de línea-neutro en el punto de falla en volts

Z= Impedancia equivalente en el punto de falla en ohms

La potencia de corto circuito por fase será:

$$P_{cc} = \frac{E^2}{Z} \quad (3.23)$$

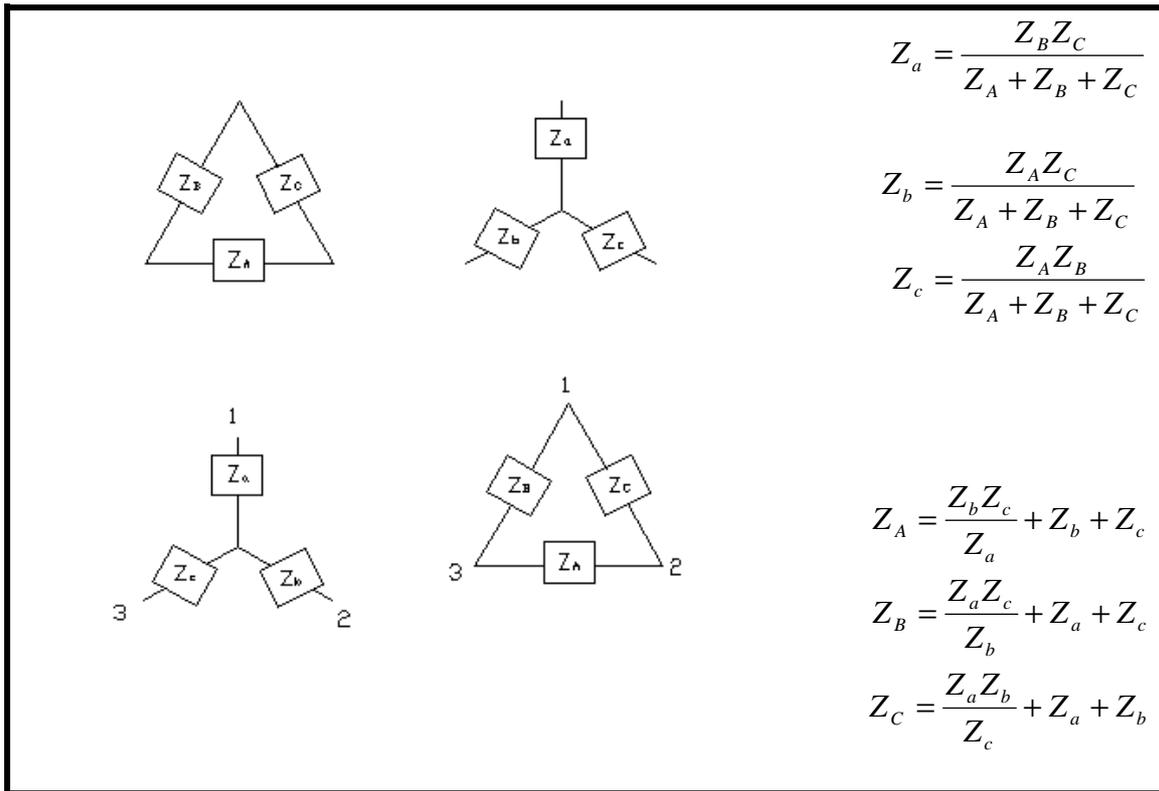


Figura 3.6 Conversiones Delta-Estrella, Estrella-Delta (Bautista, 1992).

### 3.4.3 MÉTODO DE LOS MVA'S.

Donde no sea necesario considerar la resistencia de los elementos que integran al sistema, un método de cálculo puede emplearse para calcular la potencia de corto circuito simétrico en MVA's.

Para este método, únicamente hay que recordar las siguientes relaciones:

1.- La impedancia del equipo deberá convertirse directamente en MVA de corto circuito por la ecuación (3.24) si la reactancia del equipo está en %, o por la ecuación (3.25) si la reactancia está por unidad:

$$MVA_{CC} = \frac{MVA_{equipo} \times 100}{X\% \text{ del equipo}} \tag{3.24}$$

$$MVA_{CC} = \frac{MVA_{equipo}}{X_{pu} \text{ del equipo}} \tag{3.25}$$

2.- La impedancia de líneas y alimentadores deberá convertirse directamente a MVA de corto circuito por la ecuación (3.25) si la reactancia de la línea está en Ohms.

$$MVA_{CC} = \frac{KV^2}{X_{ohms}} \tag{3.26}$$

Donde kV= kilovoltio línea-línea del cable.

3.- Dibujar dentro de rectángulos o círculos todos los MVA de corto circuito de equipos y alimentadores siguiendo el mismo arreglo que éstos tienen en el diagrama unifilar.

4.- Sucesivamente combinar los MVA de cortocircuito del sistema hasta encontrar un valor equivalente en el punto de falla:

- Valores en paralelo se suman directamente.
- Valores en serie se combinan como si fueran impedancias en paralelo.

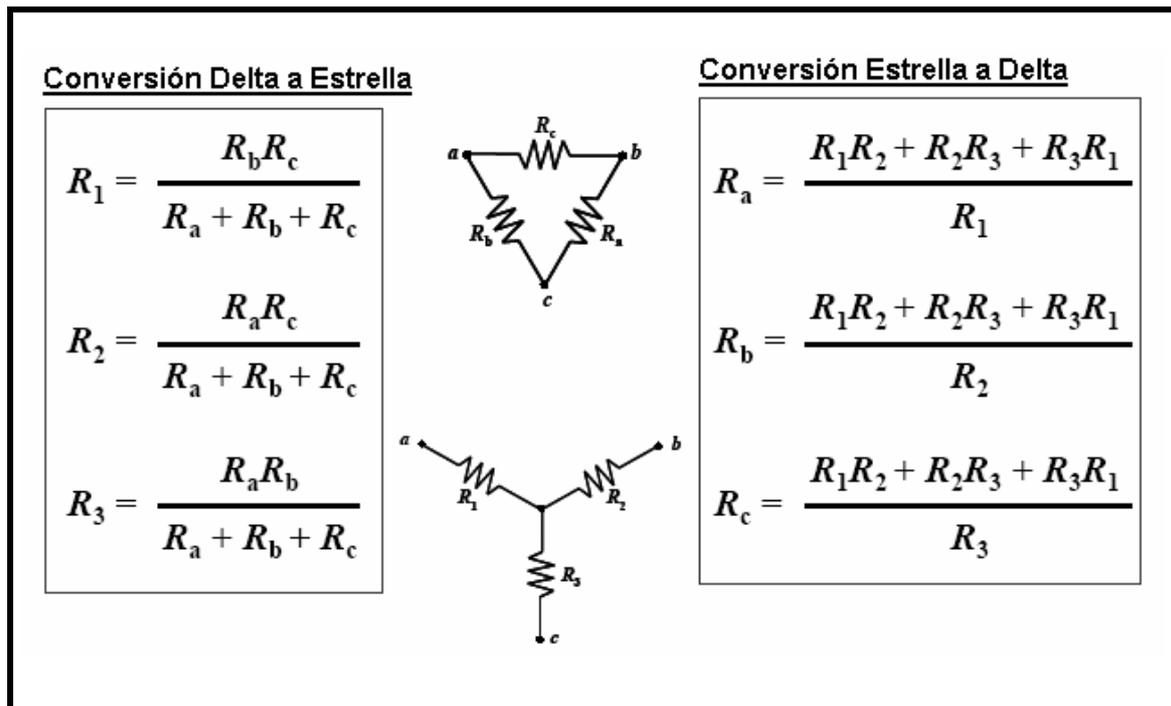


Figura 3.7 Expresiones para transformar Delta-Estrella y Estrella-Delta (Bautista, 1992).

Con el valor encontrado en el punto anterior, calculamos la corriente de corto circuito trifásico en Amperes, para el punto de falla.

$$I_{cc} = \frac{MVA_{cc} \times 1000}{\sqrt{3} \times KV} \quad (3.27)$$

Donde: kV= Tensión línea-línea en kilovolts en el punto de falla.

### 3.4.4 MÉTODO DE $Z_{BUS}$ .

Procedimiento:

1.- Calcular las admitancias de secuencia positiva de las ramas del circuito de impedancias, en por unidad.

$$Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} \quad (3.28)$$

$Z_{ij}$  = Impedancia entre los nodos *i* y *j*

2.- Se forma la matriz de admitancias  $Y_{bus}$  de secuencia positiva por inspección de la red.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

n= No. de barras.

3.- Se calcula la matriz de impedancias de secuencia positiva  $Z_{bus}$

$$Z_{bus} = [Y_{bus}]^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

4.- Se calculan las corrientes de corto circuito en cada barra:

Para la barra k:

$$I_k = \frac{V_k}{Z_{kk}} \quad (3.31)$$

k= 1, 2, 3, ..... n

$V_k$ = Tensión en por unidad en la barra

5.- Se calculan las tensiones nodales en todas las barras del sistema cuando ocurre la falla en la barra "k";

$$V_n = V_{Pn} - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} V_k = V_{Pn} - Z_{nk} I_k \quad (3.32)$$

$V_{Pn}$ = Tensión de prefalla en la barra "n"

6.- Se calculan las corrientes en las ramas al ocurrir la falla:

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{\wp_{ij}} = Y_{ij} (V_i - V_j) \quad (3.33)$$

$V_i$ = Tensión en la barra "i" cuando ocurre la falla en la barra "k"

$V_j$ = Tensión en la barra "j" cuando ocurre la falla en la barra "k"

$\wp_{ij}$  = Impedancia primitiva de la línea entre las barras "i" y "j"

$Y_{ij}$  = Admitancia de la línea entre las barras "i" y "j"

Si se calculan las corrientes sólo en función de las impedancias:

$$I_{ij} = \frac{Z_{ik} - Z_{jk}}{\wp_{ij} Z_{kk}} \quad (3.34)$$