

CALCULO DE CORTOCIRCUITO



Sistemas eléctricos de potencia (SEP)

Las condiciones anormales de funcionamiento de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), se deben a fenómenos transitorios, los cuales se pueden clasificar, de acuerdo al tiempo de duración en las siguientes categorías:

a.- Fenómenos transitorios ultrarápidos

Corresponden sustancialmente a descargas atmosféricas sobre las líneas de transmisión y a los fenómenos.

b.- Fenómenos transitorios medianamente rápidos

En este grupo se incluyen los fenómenos causados por cambios abruptos de la estructura del SEP, o sea los **cortocircuitos** o líneas abiertas.

Cortocircuitos

Se produce un cortocircuito en un sistema de potencia, cuando entran en contacto entre si o con tierra, conductores de distintas fases, en un sistema eléctrico.

Normalmente la corriente de cortocircuito son muy elevadas, entre 5 y 20 veces el valor máximo de la corriente de carga en el punto de falla.

Tipos de Cortocircuitos: Trifásico simétrico, aislado o a tierra, bifásico aislado (cortocircuito entre 2 líneas), bifásico a tierra (entre dos líneas y el conjunto a tierra) y monofásico (una línea conectada a tierra).

Cortocircuitos

En este aspecto, el tipo de cortocircuito más severo es el trifásico, el que además de dar valores elevados de corriente, reduce a cero la capacidad de transmisión de una línea, lo siguen los cortocircuitos bifásico y finalmente el monofásico.

El tipo mas frecuente es el monofásico (aproximadamente el 75 % de los casos) y el menos frecuente es el trifásico (aproximadamente el 5 % de los casos).

Cortocircuitos

Los procesos de cortocircuito son a menudo complejos. Es preciso recurrir a hipótesis simplificadas, a saber:

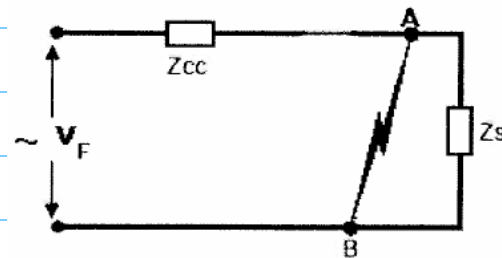
- No se considera la impedancia de arco
- Las impedancias de la red se consideran constantes
- La potencia de alimentación se considera infinita

Cortocircuitos

En forma simplificada, una línea se compone de los siguientes elementos:

- Una fuente de tensión alterna constante V_f
- Una impedancia de cortocircuito Z_{cc} , compuesta de todas las impedancias que hay aguas arriba del COCI y,
- Una impedancia de carga

Cuando se produce una falla, la impedancia entre los puntos A y B es despreciable y aparece una corriente de Cortocircuito permanente, I_{cc} muy elevada, limitada únicamente por Z_{cc}



Esquema simplificado de una línea eléctrica

$$Z_{cc} = R + jX$$

$$I_{cc} = \frac{V_F}{Z_{cc}}$$

Cortocircuito

Cuando se produce un cortocircuito se origina una corriente inicial de cortocircuito cuya amplitud disminuye gradualmente y se llega a un valor que se denomina **Corriente permanente de cortocircuito**.

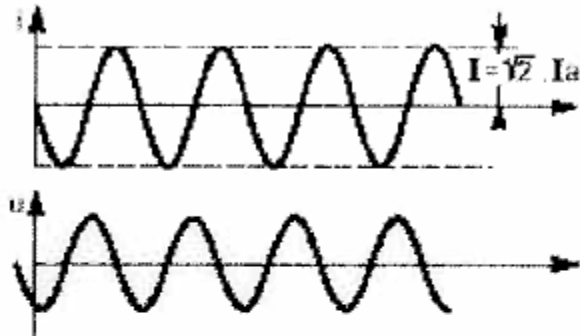
Se pueden producir dos casos:

- a) **Corriente de cortocircuito Simétrica**. Si al instante de producirse el cortocircuito la fem del generador fuese máxima. La intensidad en este caso tiene la forma simétrica.*
- b) **Corriente de cortocircuito asimétrica**. Si en el instante de producirse el cortocircuito la fem del generador fuese distinta de su valor máximo. La intensidad en sus inicios tiene forma asimétrica y amplitud mayor que la simétrica*

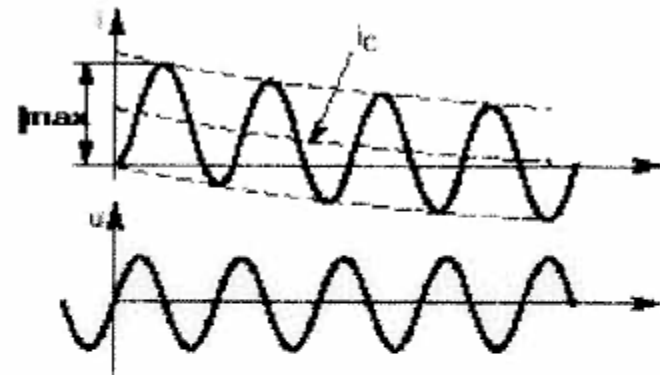
La experiencia indica que la corriente de cortocircuito asimétrica tiene un valor medio de 1,8 veces la simétrica

Cortocircuito

a) simétrico



b) asimétrico



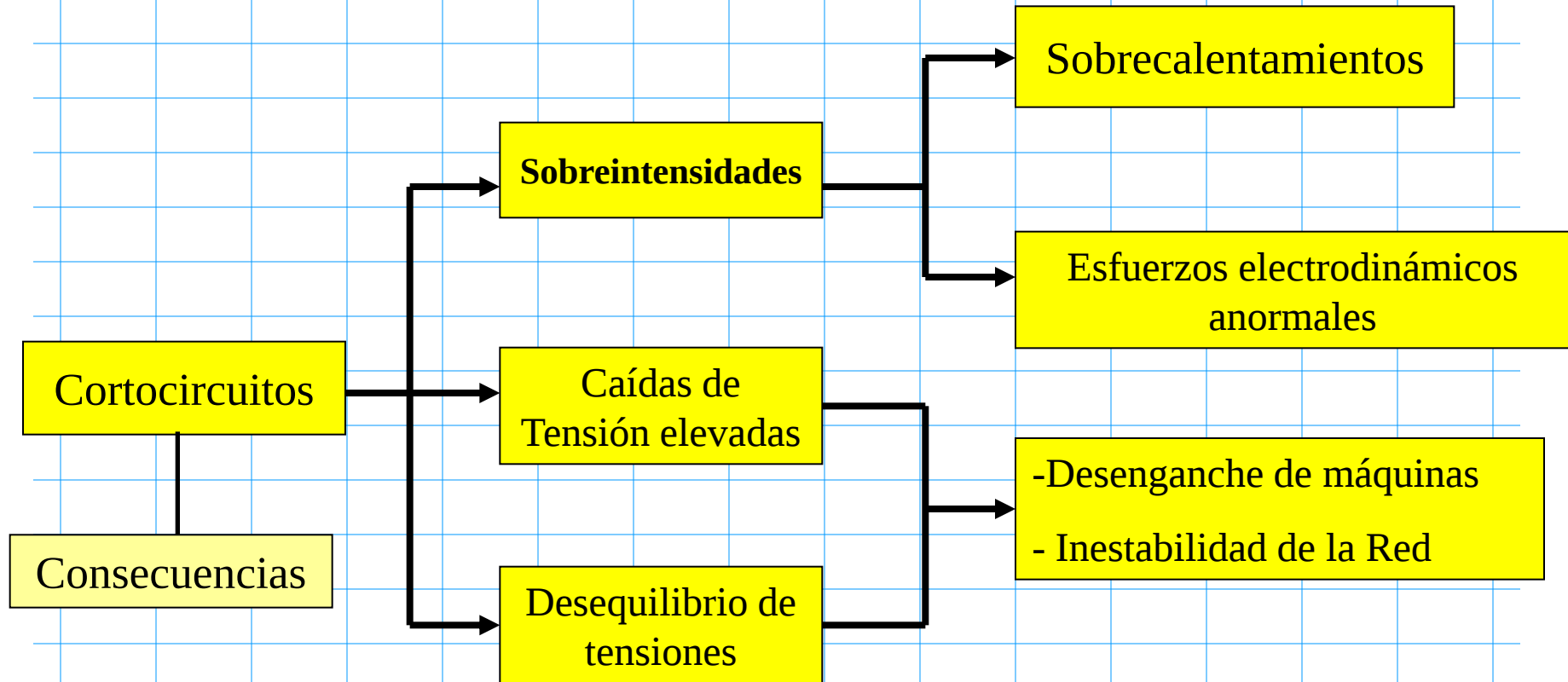
$$I_{\max} = 1,8 \sqrt{2} I_{CC}$$

=

$$I_{\max} = 2,55 I_{CC}$$

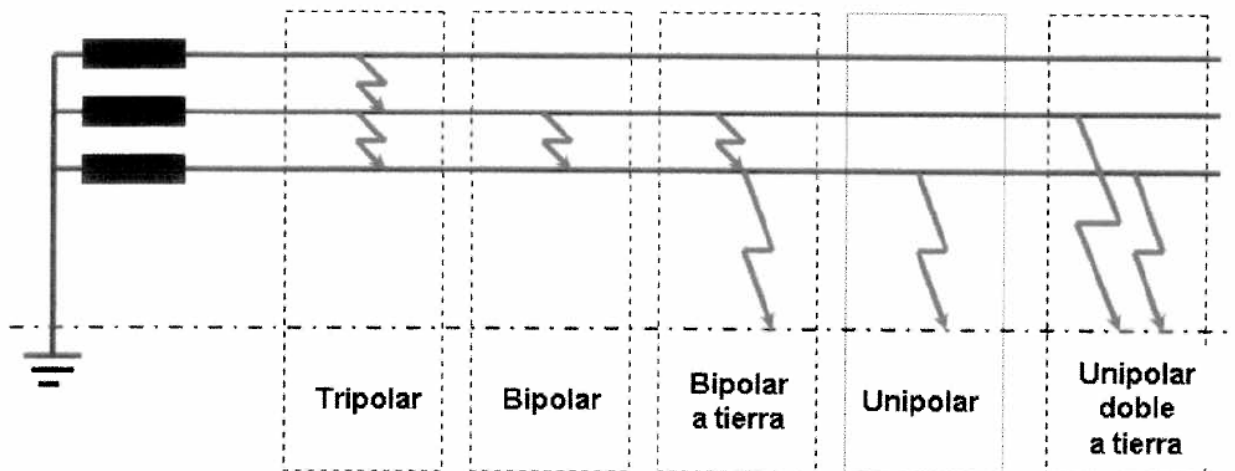
$$I_{\max} = 1,8 \frac{\sqrt{2} V_n}{Z_{CC}}$$

Consecuencias de los Cortocircuito



Clases de Cortocircuito

- a) **cortocircuito trifásico.** Se pone en contacto las tres fase en un mismo punto del sistema. Es el cortocircuito más severo en la mayoría de los casos
- b) **Cortocircuito monfásico.** Al ponerse en contacto una fase cualquiera con la tierra del sistema.



Cortocircuito

Es necesario conocer dos valores de corriente de cortocircuito

1. La corriente máxima de cortocircuito (al principio de la línea), cortocircuito trifásico, que determinará
 - El poder de corte de los interruptores automáticos
 - La sollicitación electrodinámica de conductores y equipos
2. La corriente mínima de cortocircuito (al final de la línea), cortocircuito fase neutro, para elegir curva de coordinación de fusibles y interruptores

Estos cálculos nos servirán posteriormente para dimensionar los interruptores automáticos en cada una de las secciones:

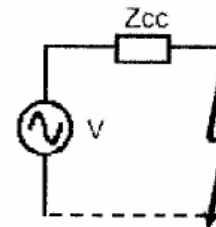
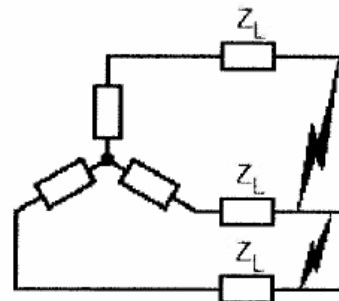
I permanente de cortocircuito I_{cc} → Poder de corte

I Máxima de cortocircuito I_{max} → Poder de cierre

En todos los casos, cualquiera que sea la corriente de cortocircuito (de mínimo a máximo), la protección debe despejar la falla en un tiempo (t_c) compatible con la sollicitación térmica que puede soportar el equipo a proteger

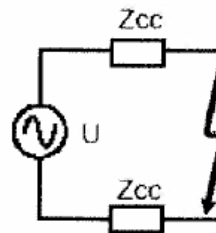
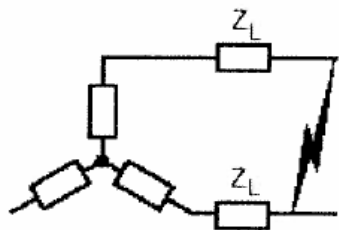
Cortocircuito

Defecto trifásico



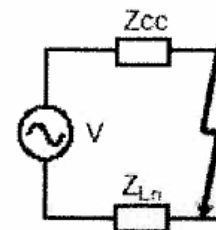
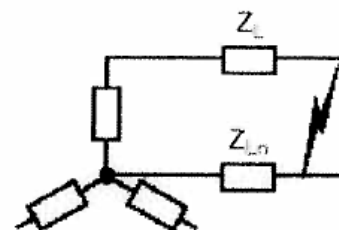
$$I_{cc_3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}}$$

Defecto bifásico



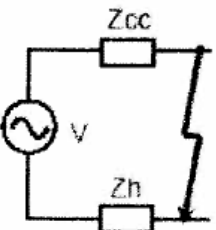
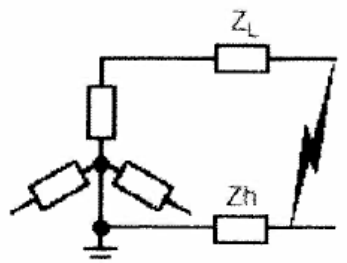
$$I_{cc_2} = \frac{U}{2 \cdot Z_{cc}}$$

Defecto monofásico



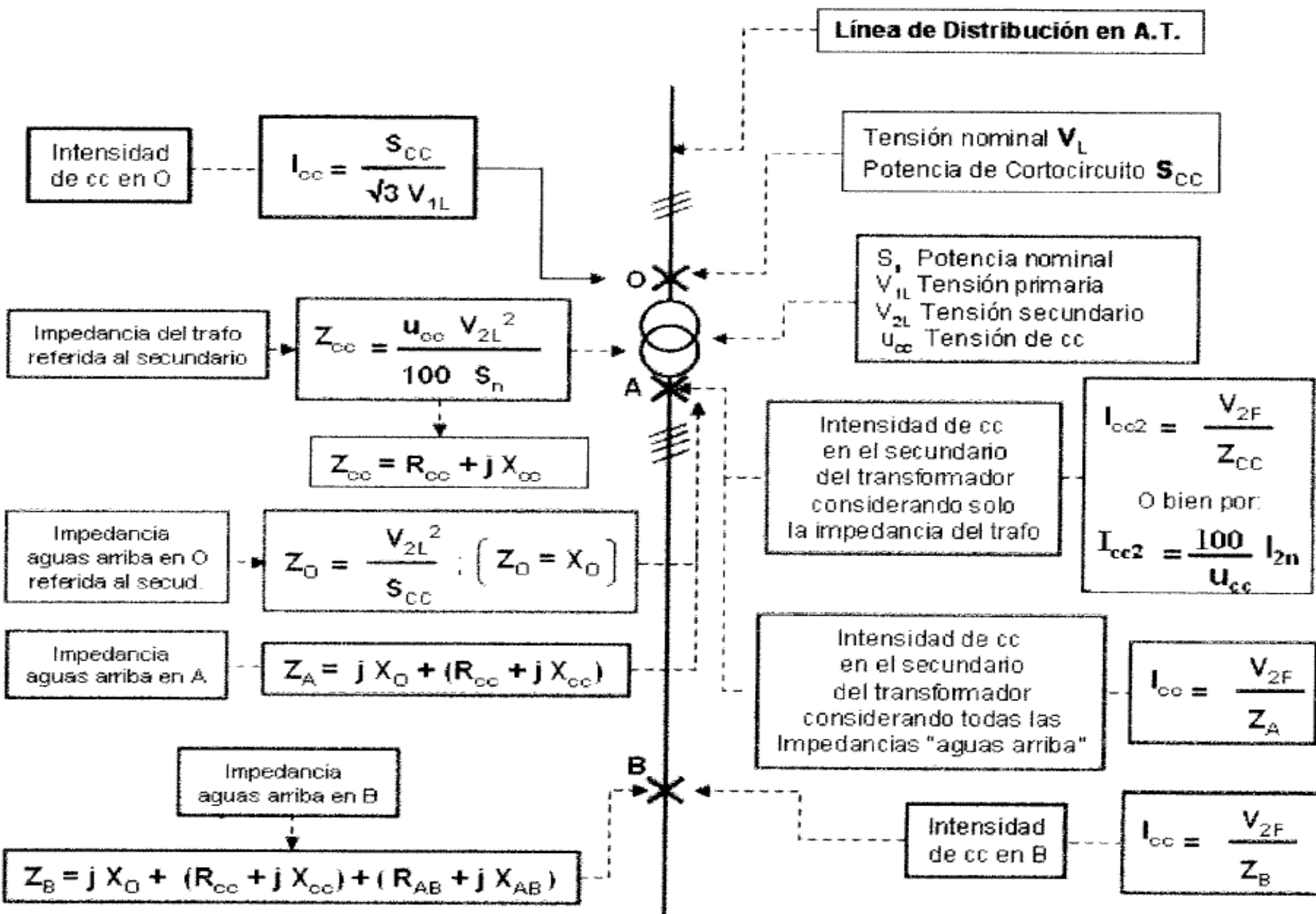
$$I_{cc_1} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_{Ln}}$$

Defecto a tierra



$$I_{cc_0} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc} + Z_h}$$

Etapas del cálculo de Cortocircuito



Etapas del cálculo de Cortocircuito

Para cada caso se ha de obtener además:

Corriente de choque

$$I_{\max} = 1,8 \sqrt{2} I_{cc}$$

Impedancia aguas arriba

$$Z_A = \frac{V_L^2}{S_{cc}} ; \left(Z_A = X_A \right)$$

Impedancia del transformador

$$Z_{CC} = \frac{U_{cc} V_{2L}^2}{100 S_n}$$

Cortocircuito

Impedancia del transformador referida al secundario

$$\left. \begin{array}{l} \text{Cortocircuito accidental} \\ \text{en el secundario} \end{array} \right\} I_{cc2} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100$$
$$\left. \begin{array}{l} \text{Potencia nominal} \end{array} \right\} S_n = \sqrt{3} U_{2L} I_{2n}$$
$$\left. \begin{array}{l} \text{Diagrama de Kapp con } (V_2 = 0) \end{array} \right\} V_{1F}/m = I_{cc2} Z_{cc}$$
$$\Rightarrow Z_{cc} = \frac{u_{cc} V_{2L}^2}{100 S_n}$$

Cortocircuito

Impedancia de la línea aguas arriba

$$I_{cc} = \frac{V_F}{Z_{cc}}$$

$$S_{cc} = \sqrt{3} V_L I_{cc}$$

$$Z_{cc} = \frac{V_L^2}{S_{cc}}$$

S_{cc} = Potencia de cortocircuito suministrada por la compañía suministradora

En AT

$$\frac{R}{X} = \begin{cases} 0,3 \text{ en } 6 \text{ kV} \\ 0,2 \text{ en } 20 \text{ kV} \\ 0,1 \text{ en } 150 \text{ kV} \end{cases}$$

$$Z_{cc} = R + jX$$

$$Z_{cc} \approx X$$

Calculo de Cortocircuito

Ejemplo

Se trata de calcular las corrientes de cortocircuito permanente que se producirán en los puntos señalados con una **X**, lo que posteriormente nos permitirá dimensionar los interruptores que se han de poner en A y B.

Datos

Z aguas arriba trafo

$$R_A = 0$$

$$X_A = 0,7 \text{ m}\Omega$$

Trafo

$$S_n = 400 \text{ KVA}$$

$$V_{L1} = 15 \text{ KV}$$

$$V_{L2} = 410/237$$

$$u_{cc} = 4\%$$

$$P_{cu} = 4600 \text{ W}$$

Línea

$$\text{Longitud: } L = 25 \text{ m}$$

$$\text{Sección: } s = 240 \text{ mm}^2$$

$$\text{Resistividad: } r = 22,5 \text{ m}\Omega/\text{mm}^2 \text{ m-1}$$

$$\text{Reactancia lineal: } 0,13 \text{ m}\Omega/\text{m-1}$$

Solución

Intensidad nominal:

$$S = \sqrt{3} U_{20} I_N = 400 \text{ kVA} \Rightarrow I_N = \frac{400\,000}{\sqrt{3} \times 410} = 563 \text{ A}$$

Pérdida en el Cu y R del Transformador

$$P_{cu} = 3 \times R_{TR} \times I_N^2 = 4600 \text{ W} \Rightarrow R_{TR} = \frac{4600}{3 \times 563^2} = 4,84 \text{ m}\Omega$$

Z del Transformador

$$Z_{TR} = \frac{U_{CC}}{\sqrt{3} \times I_N} = \frac{4}{100 \sqrt{3} \times I_N} = \frac{4 \times 410}{100 \times \sqrt{3} \times 563} = 16,82 \text{ m}\Omega$$

X del Transformador

$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2} = \sqrt{16,82^2 - 4,84^2} = 16,11 \text{ m}\Omega$$

Impedancia aguas arriba de A

$$Z_1 = \sqrt{R_{TR}^2 + (X_A + X_{TR})^2} =$$

$$= \sqrt{4,84^2 + (0,7 + 16,11)^2} = 17,49 \text{ m}\Omega$$

Intensidad de cortocircuito en A

$$I_{CC1} = \frac{U_{20}}{Z_1 \times \sqrt{3}} = \frac{410}{17,49 \times \sqrt{3}} = 13,5 \text{ kA}$$

R y X del conductor AB

$$R_C = \rho \cdot \frac{L}{s} = 22,5 \cdot \frac{25}{240} = 2,34 \text{ m}\Omega$$

$$X_C = 0,13 \times 25 = 3,25 \text{ m}\Omega$$

Impedancia aguas arriba de B

$$Z_2 = \sqrt{(R_{TR} + R_C)^2 + (X_A + X_{TR} + X_C)^2} =$$

$$= \sqrt{(4,84 + 2,34)^2 + (0,7 + 16,11 + 3,25)^2} = 21,3 \text{ m}\Omega$$

Intensidad de cortocircuito en B

$$I_{CC2} = \frac{U_{20}}{Z_2 \times \sqrt{3}} = \frac{410}{21,3 \times \sqrt{3}} = 11,1 \text{ kA}$$

Cortocircuitos trifásicos simétricos en un SEP

Método tradicional

Como en el caso de un cortocircuito trifásico simétrico, el SEP queda balanceado, es posible trabajar utilizando el circuito equivalente por fase, con las aproximaciones usuales, aplicando Thevenin en el punto de falla. El método es cómodo para resolver problemas con pocos nudos; sin embargo, cuando se trata de sistemas de mayor tamaño, resulta poco práctico. Por otra parte, para calcular un cortocircuito en otra barra es necesario hacer de nuevo todos los cálculos. Adicionalmente, la determinación de los voltajes en las otras barras y el cálculo de las corrientes en las líneas significa resolver la red completa del SEP.

Cortocircuitos trifásicos simétricos en un SEP

Cálculo sistemático de Cortocircuitos trifásicos (Método general)

Cuando se trata de sistemas de gran magnitud, los cálculos manuales resultan demasiado engorrosos y se debe recurrir al uso de los computadores digitales. El procedimiento que se sigue, en vez de calcular las corrientes en el punto de falla, para luego repartirlas en todo el sistema; consiste en calcular directamente las tensiones en los distintos nudos, con ayuda de un modelo nodal de impedancias. Conocidas las tensiones durante la falla, pueden calcularse a continuación las corrientes por las diversas ramas. Debido a la rapidez del cálculo digital, la matriz de impedancia puede por ejemplo, incluir las admitancias paralelo tales como las asociadas a las cargas.

Cortocircuitos trifásicos simétricos en un SEP

Las tensiones, post-falla se pueden obtener como la superposición de la situación prefalla (obtenida normalmente de un cálculo de flujo de potencia) con la situación durante la falla solamente, es decir :

$$[V_B(f)] = [V_B(0)] + [V_B(cc)]$$

donde :

$[V_B(f)]$	: Vector de tensiones post falla
$[V_B(0)]$	: Vector de tensiones prefalla
$[V_B(cc)]$	: Vector de tensiones debido sólo a la falla:

$$[V_B(f)] = [\dot{V}_{1f} \quad \dot{V}_{2f} \quad \dots \quad \dot{V}_{pf} \quad \dots \quad \dot{V}_{nf}]^t$$

$$[V_B(0)] = [\dot{V}_{10} \quad \dot{V}_{20} \quad \dots \quad \dot{V}_{p0} \quad \dots \quad \dot{V}_{n0}]^t$$

$$[V_B(cc)] = [\dot{V}_{1cc} \quad \dot{V}_{2cc} \quad \dots \quad \dot{V}_{pcc} \quad \dots \quad \dot{V}_{ncc}]^t$$

Cortocircuitos trifásicos simétricos en un SEP

Aplicando el método de resolución nodal a la red del SEP, después de falla se tiene:

$$[I_F] = [Y_B][V_B(cc)] \Rightarrow [V_B(cc)] = [Z_B][I_F]$$

En que $[I_F]$ es el vector de corrientes (de falla) inyectadas en las distintas barras y $[Z_B]$ es la matriz de Impedancia de barras que corresponde a la inversa de la matriz de admitancia de barras $[Y_B]$; definidas como:

$$[I_F] = [\dot{I}_{lf} \cdots \dot{I}_{pf} \cdots \dot{I}_{qf} \cdots \dot{I}_{nf}]^t$$

$$[Z_B] = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1p} & \cdots & Z_{1q} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{p1} & \cdots & Z_{pp} & \cdots & Z_{pq} & \cdots & Z_{pn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{q1} & \cdots & Z_{qp} & \cdots & Z_{qq} & \cdots & Z_{qn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{np} & \cdots & Z_{nq} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

Si existe una impedancia de falla Z_F entre la barra fallada p y tierra se tiene:

$$\dot{V}_{pf} = Z_F \dot{I}_{pf}$$

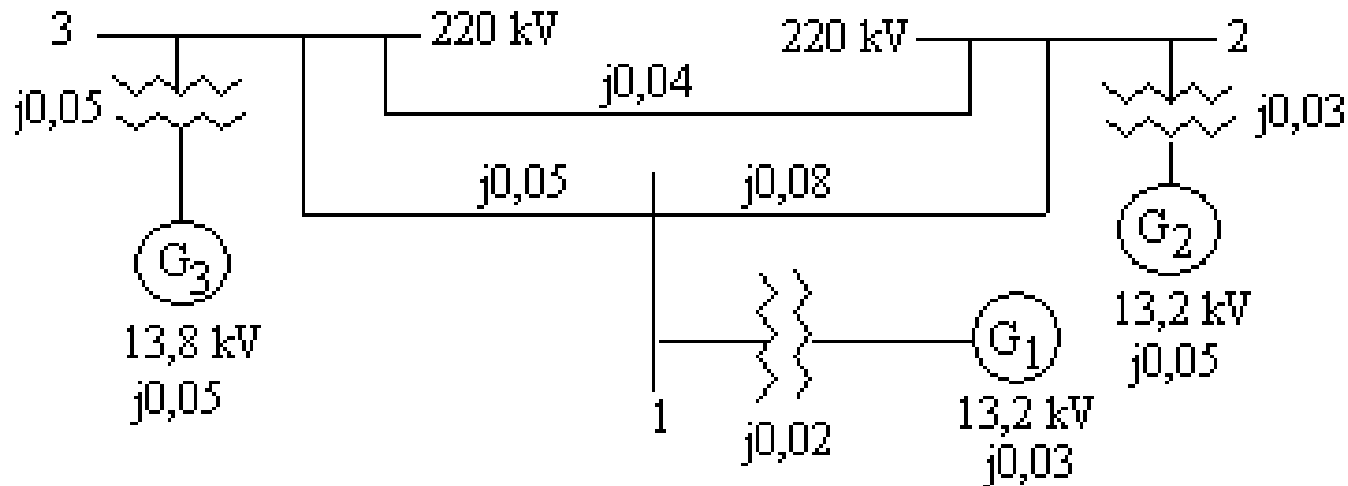
$$\dot{I}_{pf} = \frac{\dot{V}_{p0}}{Z_F + Z_{pp}}$$

expresión que permite calcular la corriente en la barra fallada. Así mismo, el voltaje en esta barra es:

$$\dot{V}_{pf} = \left(1 - \frac{Z_{pp}}{Z_F + Z_{pp}} \right) \dot{V}_{p0}$$

Ejemplo . En el sistema de la Figura , todos los datos en por unidad, están en base común. Determinar las corrientes en cada una de las líneas y en los generadores, cuando ocurre un cortocircuito trifásico simétrico en la barra 2, estando el sistema en vacío y utilizando:

a. El método tradicional



Solución:

a) Método tradicional: El circuito equivalente se muestra en la Figura 1. Para encontrar la impedancia de Thevenin en la barra 2 es necesario reducirlo. La Figura 2 muestra el circuito anterior donde se ha realizado una transformación de Delta a Estrella entre los nudos 1, 2 y 3. Los valores de la estrella equivalente son:

$$X_1 = \frac{0,05 * 0,08}{0,05 + 0,08 + 0,04} = 0,02353; \quad X_2 = \frac{0,04 * 0,08}{0,05 + 0,08 + 0,04} = 0,01882; \quad X_3 = \frac{0,05 * 0,04}{0,05 + 0,08 + 0,04} = 0,01176$$

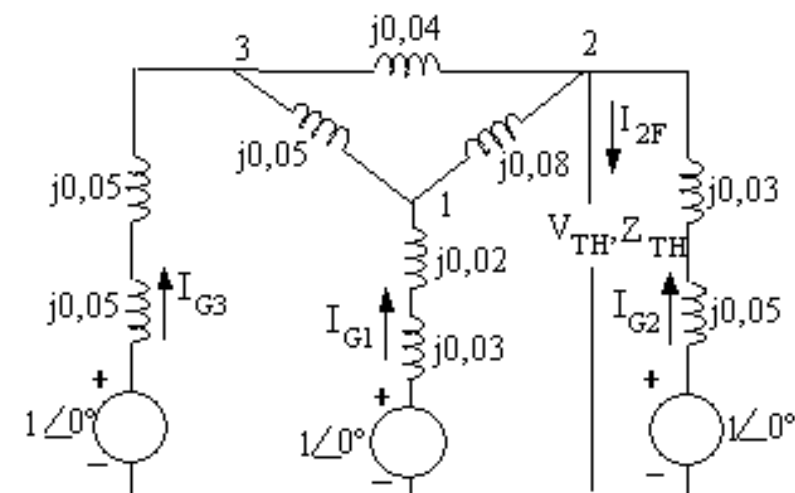


Figura 1

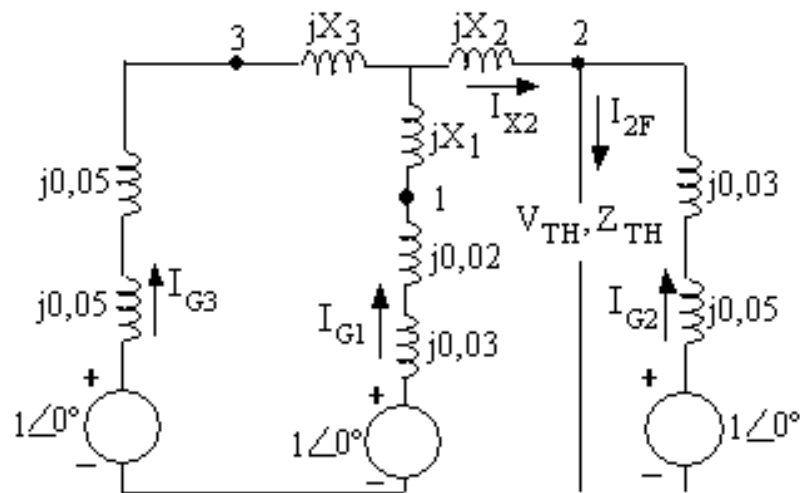


Figura 2

A partir del circuito de la Figura 2, la impedancia equivalente de Thevenin en la barra 2 queda:

$$X_{TH} = \frac{\left[\frac{(0,05 + 0,05 + 0,01176) * (0,03 + 0,02 + 0,02353)}{(0,05 + 0,05 + 0,01176) + (0,03 + 0,02 + 0,02353)} + 0,01882 \right] * [0,03 + 0,05]}{\left[\frac{(0,05 + 0,05 + 0,01176) * (0,03 + 0,02 + 0,02353)}{(0,05 + 0,05 + 0,01176) + (0,03 + 0,02 + 0,02353)} + 0,01882 \right] + [0,03 + 0,05]} = 0,0353$$

El circuito equivalente de Thevenin queda tal como se muestra en la Figura 3,

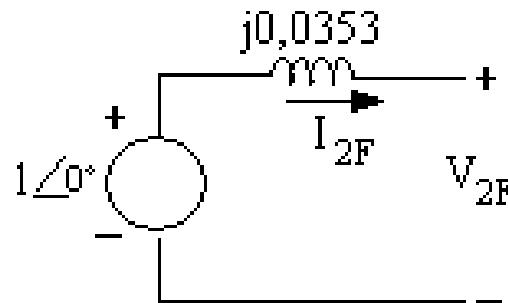


Figura 3

donde, debido a que el cortocircuito es directo, se tiene que $V_{2F}=0$ y, por lo tanto:

$$\dot{I}_{2F} = \frac{1\angle 0^\circ}{j0,0353} = 28,3286 \angle -90^\circ \text{ (pu)}$$

Cortocircuitos Asimétricos

Componentes simétricas

El cálculo de cortocircuitos asimétricos en un SEP, se realiza normalmente empleando el método de las componentes simétricas,

Se basa en el teorema de Fortescue. Se trata de un método particular de transformación lineal que consiste básicamente en descomponer un conjunto de fasores desbalanceados en otro conjunto de fasores de características tales que permitan un análisis más sencillo del problema original. En el caso particular de tensiones y corrientes trifásicas desequilibradas, este método los transforma en tres sistemas de fasores balanceados. Los conjuntos balanceados de componentes son:

- **Componentes de secuencia positiva:** formado por tres fasores de igual magnitud, desfasados 120° entre si y con la misma secuencia de fase que el sistema original.
- **Componentes de secuencia negativa:** formado por tres fasores de igual módulo, con desfase de 120° uno de otro y con la secuencia de fases opuesta a la de los fasores originales.
- **Componentes de secuencia cero:** formada por tres fasores de igual módulo y con desfase nulo.

Cortocircuitos Asimétricos

Relación entre voltajes (corrientes) de secuencia y de fase

La Figura 1.- muestra los tres sistemas equilibrados de vectores (considerándolos como tensiones) y la suma gráfica de los componentes para obtener los fasores desbalanceados.

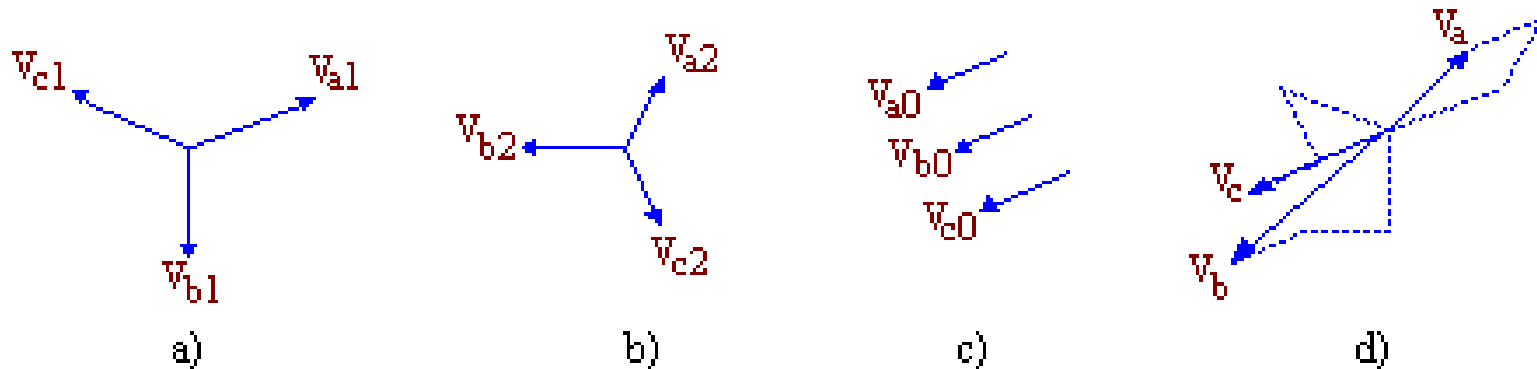


Figura 1.- Componentes de secuencia: a) positiva, b) negativa, c) cero. d) Suma gráfica de ellas

Cortocircuitos Asimétricos

Como cada uno de los vectores desequilibrados originales es igual a la suma de sus componentes, se puede escribir:

$$\begin{aligned}\dot{V}_a &= \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_{b0} + \dot{V}_{b1} + \dot{V}_{b2} \\ \dot{V}_c &= \dot{V}_{c0} + \dot{V}_{c1} + \dot{V}_{c2}\end{aligned}\quad (1)$$

Si se consideran como referencia los fasores V_{a1} , V_{a2} y V_{a0} , respectivamente se tiene:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{a1} &= V_{a1} \angle 0^\circ & \dot{V}_{a2} &= V_{a2} \angle 0^\circ & \dot{V}_{a0} &= V_{a0} \angle 0^\circ \\ \dot{V}_{b1} &= V_{a1} \angle 240^\circ & \dot{V}_{b2} &= V_{a2} \angle 120^\circ & \dot{V}_{b0} &= V_{a0} \angle 0^\circ \\ \dot{V}_{c1} &= V_{a1} \angle 120^\circ & \dot{V}_{c2} &= V_{a2} \angle 240^\circ & \dot{V}_{c0} &= V_{a0} \angle 0^\circ\end{aligned}\quad (2)$$

Cortocircuitos Asimétricos

como "a", al operador que origina un desplazamiento de 120° , es decir:

$$\dot{a} = 1 \angle 120^\circ = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3)$$

e introduciendo las expresiones (2) y (3) en (1), esta última se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_{a0} + a^2 \dot{V}_{a1} + a \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_c &= \dot{V}_{a0} + a \dot{V}_{a1} + a^2 \dot{V}_{a2} \end{aligned} \quad (4)$$

Cortocircuitos Asimétricos

La ecuación (4) se puede escribir en forma matricial, tal como se muestra en la expresión (5) siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad [T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Cortocircuitos Asimétricos

y la ecuación (5) queda

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

ecuaciones (5) y (6) son válidas también para las corrientes, es decir:

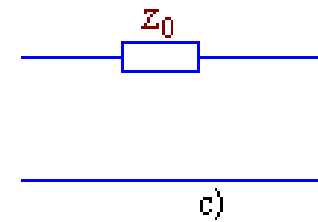
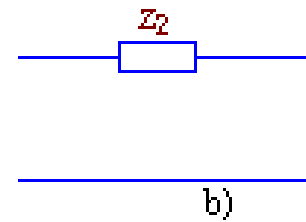
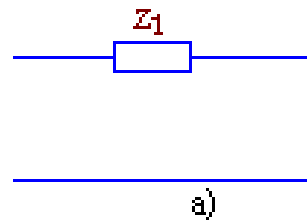
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

De la segunda ecuación se puede concluir que si en un sistema trifásico no existen conductor neutro o conexiones a tierra, o si el sistema está balanceado, la corriente de secuencia cero es nula.

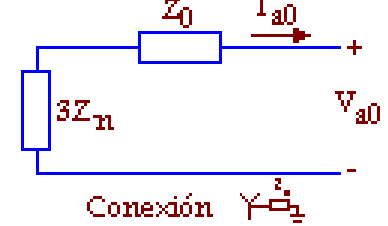
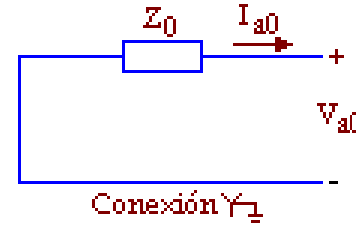
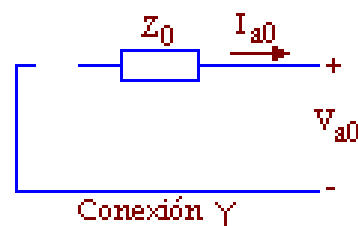
Cortocircuitos Asimétricos

Circuitos equivalentes de secuencia de los elementos componentes de un SEP

Líneas



Generadores

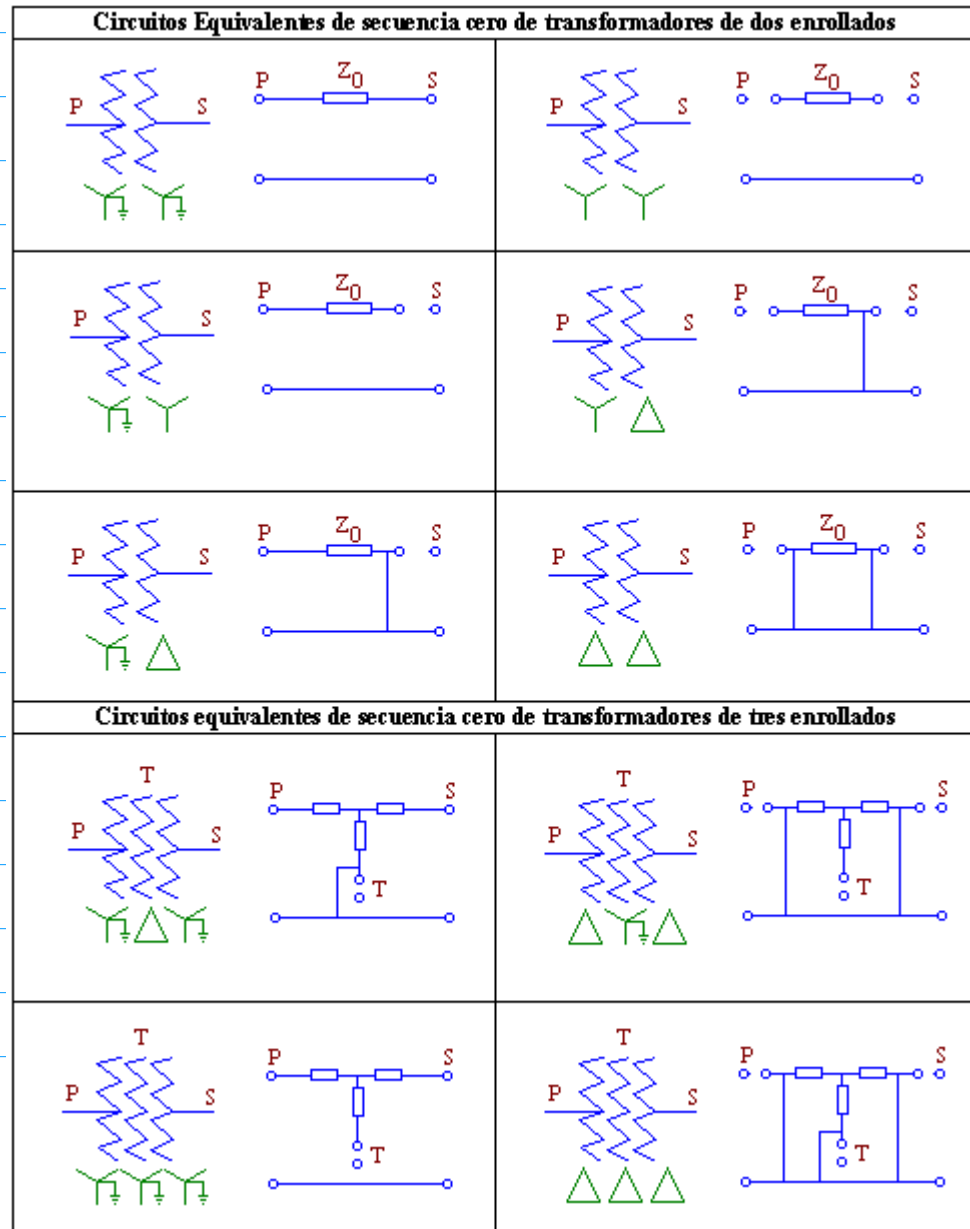


Circuitos equivalentes de secuencia: a) Positiva; b) Negativa y c) cero de líneas de transmisión y Generador síncrono

Cortocircuitos Asimétricos

Circuitos equivalentes de secuencia de los elementos componentes de un SEP

Transformador



Cortocircuitos Asimétricos

Redes de secuencia en un SEP

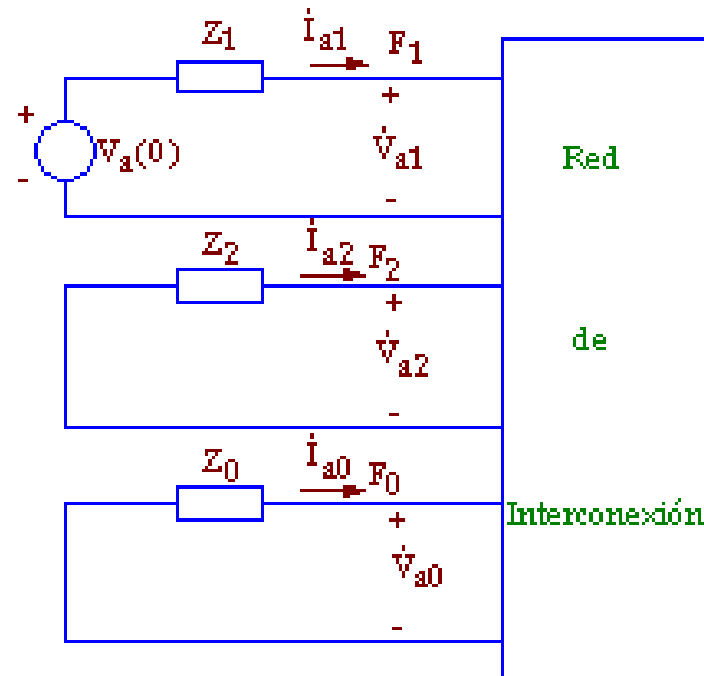
Un SEP balanceado se puede representar por tres redes de secuencia independientes entre si (sin acoplamientos); una red de secuencia positiva, una red de secuencia negativa y una red de secuencia cero. Cada red de secuencia representa una fase del SEP y todas las impedancias corresponden a una determinada secuencia.

La red de secuencia positiva es la única que normalmente contendrá fuentes de fem, según lo expuesto. Por otra parte, teniendo presente las aproximaciones usuales que se realizan en los cálculos de cortocircuito; es decir, que las fem de todos los generadores se consideran iguales en módulo y ángulo de fase y que se desprecian las corrientes de prefalla, se concluye que en ausencia de cortocircuitos en el sistema no existirán corrientes en ninguna de las redes de secuencia. Por lo tanto las redes de secuencia negativa y cero, son totalmente pasivas antes de falla.

Cortocircuitos Asimétricos

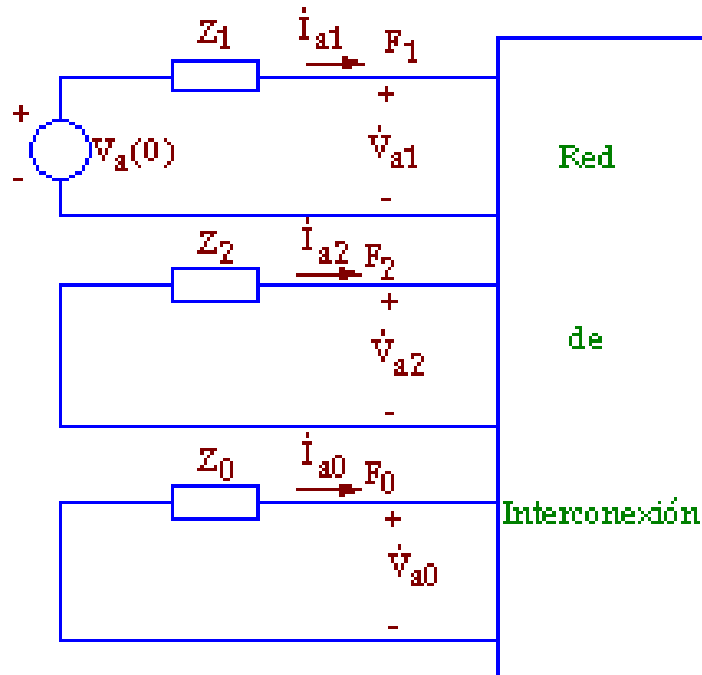
Redes de secuencia en un SEP

Para los efectos del cálculo de cortocircuitos asimétricos es necesario establecer para cada red de secuencia, su circuito equivalente de Thévenin mirado desde el punto de falla. Supongamos que se produce una falla en el punto F de un sistema y que los circuitos equivalentes de Thévenin corresponden a los indicados en la Figura, donde la tensión prefalla en F es $V_a(0)$



Cortocircuitos Asimétricos

Directamente de esta figura se puede escribir:



$$\dot{V}_{a0} = 0 - Z_0 \dot{I}_{a0}$$

$$\dot{V}_{a1} = \dot{V}_a(0) - Z_1 \dot{I}_{a1}$$

$$\dot{V}_{a2} = 0 - Z_2 \dot{I}_{a2}$$

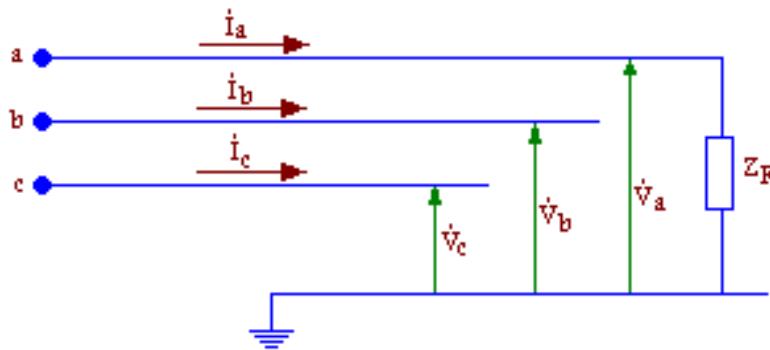
o Bien

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{V}_a(0) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix}$$

Cortocircuitos Asimétricos

Análisis de algunos tipos de cortocircuito

1.- Cortocircuito monofásico a tierra a través de una impedancia de falla Z_F



Las condiciones impuestas por la falla son:

$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$$

$$\dot{V}_a = Z_F \dot{I}_a$$

Las componentes simétricas de las corrientes se pueden escribir:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

de donde se obtiene: $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} \dot{I}_a$

Cortocircuitos Asimétricos

Análisis de algunos tipos de cortocircuito

Para las componentes simétricas de los voltajes se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

y por lo tanto:

$$\dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} = \dot{V}_a = Z_F \dot{I}_a \quad (1)$$

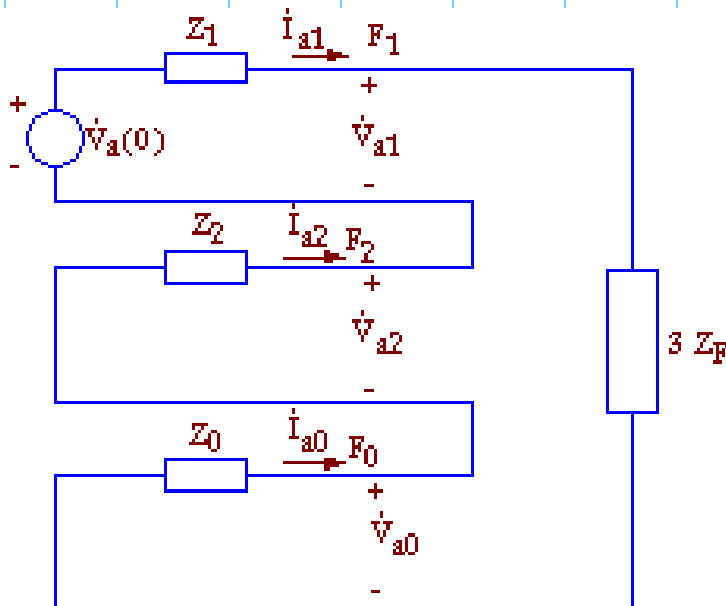
o bien

$$\dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} = 3\dot{I}_{a0}Z_F = 3\dot{I}_{a1}Z_F = 3\dot{I}_{a2}Z_F \quad (2)$$

Cortocircuitos Asimétricos

Análisis de algunos tipos de cortocircuito

A partir de (1) y (2), se deduce que las mallas de secuencia quedan conectadas en serie, tal como se muestra en la Figura siguiente:



$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{\dot{V}_a(0)}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F}$$

$$\dot{I}_a = \frac{3\dot{V}_a(0)}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$$

Cortocircuitos Asimétricos

Análisis de algunos tipos de cortocircuito

Para los voltajes de secuencia se puede escribir:

$$\dot{V}_{a0} = -Z_0 \dot{I}_{a0}$$

$$\dot{V}_{a1} = \dot{V}_a(0) - Z_1 \dot{I}_{a1}$$

$$\dot{V}_{a2} = -Z_2 \dot{I}_{a2}$$

y por lo tanto los voltajes de las fases quedan:

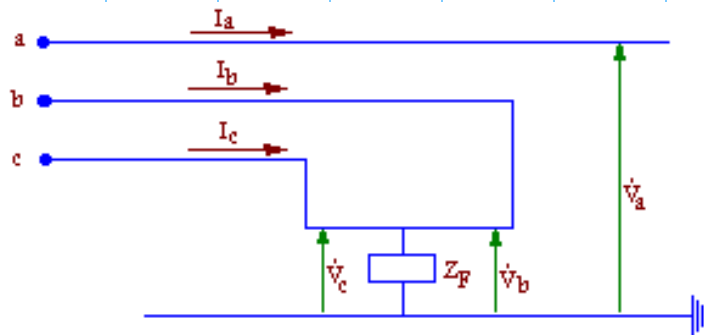
$$\dot{V}_a = \frac{3 Z_F \dot{V}_a(0)}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \quad \dot{V}_b = \frac{Z_0(a^2 - 1) + Z_2(a^2 - a) + 3a^2 Z_F}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \dot{V}_a(0)$$

$$\dot{V}_c = \frac{Z_0(a - 1) + Z_2(a - a^2) + 3a Z_F}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \dot{V}_a(0)$$

Cortocircuitos Asimétricos

Análisis de algunos tipos de cortocircuito

2.- Cortocircuito bifásico a tierra a través de una impedancia de falla Z_F



Las condiciones impuestas por la falla son:

$$\dot{I}_a = 0$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c = Z_F (\dot{I}_b + \dot{I}_c)$$

Las componentes simétricas de las corrientes se pueden escribir:

$$\dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0$$

$$\dot{V}_{a0} = 3 Z_F \dot{I}_{a0} + \dot{V}_{a1}$$

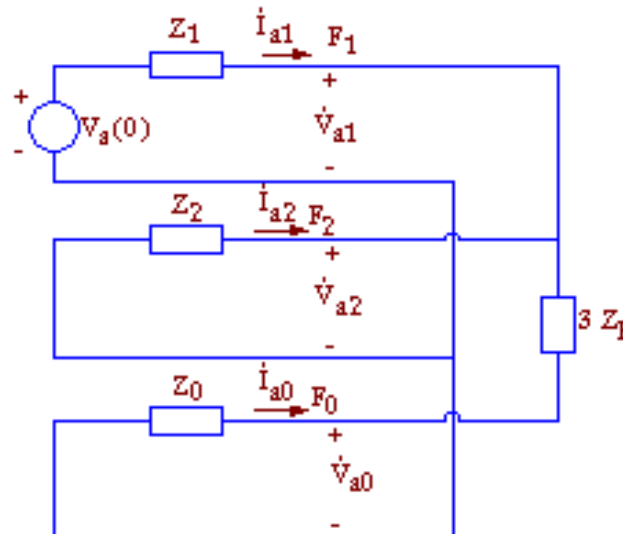
Cortocircuitos Asimétricos

Análisis de algunos tipos de cortocircuito

Conexión de las mallas

A partir de las ecuaciones, las mallas de secuencia quedan conectadas en paralelo

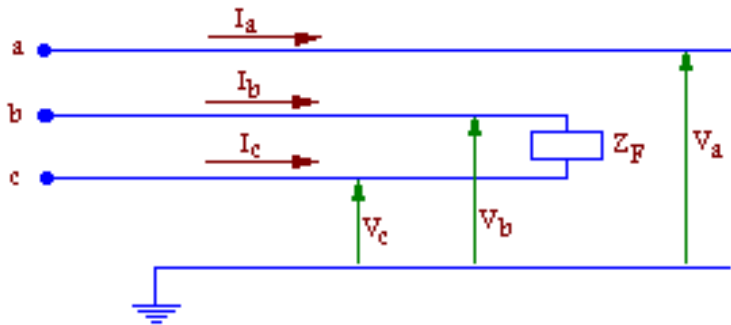
Haciendo $Z_F = 0$ y $Z_F = \infty$ (infinito), en el circuito de la Figura, es posible modelar el cortocircuito bifásico a tierra directo y el cortocircuito bifásico aislado, respectivamente.



Cortocircuitos Asimétricos

Análisis de algunos tipos de cortocircuito

3.- Cortocircuito entre dos fases a través de una impedancia de falla



Las condiciones impuestas por la falla son:

$$\dot{I}_a = 0 \quad \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c + Z_F \dot{I}_b$$

Las componentes simétricas de las corrientes se pueden escribir:

$$\dot{I}_{a0} = 0$$

$$\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0$$

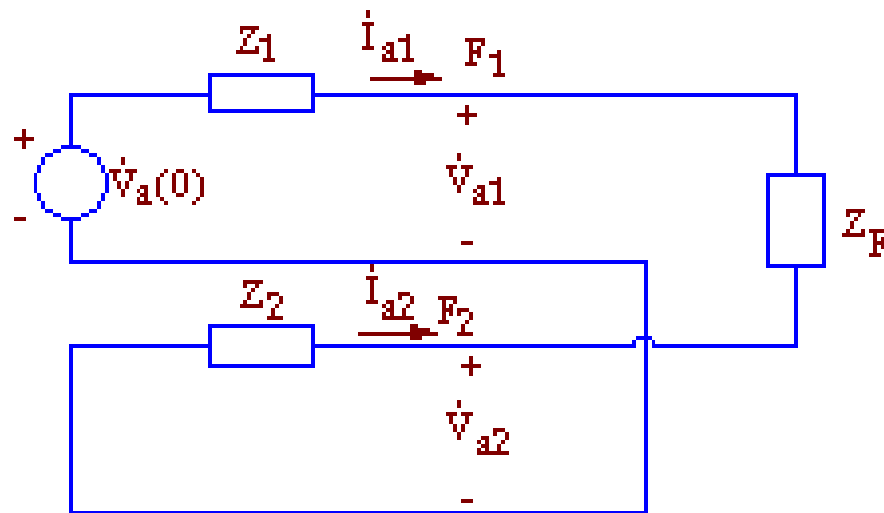
$$\dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} + Z_F \dot{I}_{a1}$$

Cortocircuitos Asimétricos

Análisis de algunos tipos de cortocircuito

Conexión de las mallas

A partir de las ecuaciones, las mallas de secuencia quedan conectadas en paralelo



Cortocircuitos Asimétricos

Observaciones finales respecto a los cortocircuitos asimétricos

- ✓ Las corrientes y tensiones de secuencia calculadas corresponden sólo al punto de falla, no a otro. Si se quiere calcular las corrientes y tensiones en otros puntos distintos, se debe resolver los respectivos circuitos.
- ✓ Los cortocircuitos asimétricos pueden producir sobre tensiones en las fases no falladas, los que dependen de la relación entre X_0 y X_1 y de la existencia o no de impedancia de falla.
- ✓ Para limitar los valores de corriente de cortocircuito de las fallas a tierra se utilizan impedancias entre el neutro y tierra, las que pueden ser de tipo resistiva pura o reactiva pura.
- ✓ En aquellas partes del sistema que estén separadas del punto de falla por transformadores Y- Δ o viceversa, se deben considerar los desfases de las componentes simétricas de las corrientes y de los voltajes introducidos por la conexión del transformador.

FIN