

INDICE

1.- Introducción

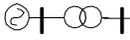
2.- Modelo de un Cortocircuito

3.- Conceptos sobre la Matriz Impedancia de Barra Z_B

4.- Cálculo Sistemático de Cortocircuitos Simétricos

5.- Cálculo Sistemático de Cortocircuitos Asimétricos

Bibliografía

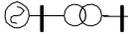


Abreviaturas

Ctocto: Cortocircuito

FC: Flujo de Carga

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia



El Cortocircuito en el Sistema Eléctrico de Potencia

1.- Introducción

En estado normal, el comportamiento de las variables eléctricas de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) puede ser analizado por medio de ecuaciones algebraicas no lineales (estudio de Flujo de Carga).

En estado de falla, tal como un cortocircuito (ctocto), el comportamiento de las variables eléctricas de un SEP puede ser analizado sistemáticamente por medio de ecuaciones algebraicas lineales escritas de manera matricial, que se estudiarán en este documento. Si el ctocto es de tipo simétrico, el análisis se realiza usando la malla de secuencia directa, si es asimétrico usando las mallas de secuencia directa, inversa y homopolar. Para estos estudios, es fundamental contar con la matriz de impedancia de barra de ctocto de cada una de las mallas, Z_{B+} , Z_{B-} y Z_{B0}

1.1.- ¿Qué es un cortocircuito?

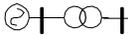
Dada una gran perturbación, se producen fluctuaciones dinámicas transitorias de gran escala. Según la velocidad de estos transitorios, estas perturbaciones pueden dividirse en:

- Descargas atmosféricas (orden de 1 ms)
- Cortocircuito (orden de 10-100 ms)
- Estabilidad Transitoria (orden de 1 s)

Un ctocto es un tipo de falla que se produce cuando dos o más elementos con tensiones diferentes y aislados entre sí, entran en contacto, llevando a un cambio brusco de la estructura del SEP y a la aparición de corrientes y tensiones diferentes a las que existían antes de la perturbación.

Las corrientes de ctocto estarán determinadas por las tensiones internas de las máquinas sincrónicas y por las impedancias del sistema entre el punto de tensión interna de las máquinas y el punto de falla. En el lugar de la falla y en sus proximidades, las corrientes se elevarán varias veces el valor de la corriente nominal y las tensiones caerán. La severidad del ctocto disminuirá a medida que se toma distancia del lugar de falla.

Las corrientes de ctocto reducirán la capacidad de transmisión y ocasionarán sobresolicitaciones eléctricas y/o mecánicas y/o térmicas sobre los diversos componentes, por lo que las partes falladas deberán removerse del servicio en el menor tiempo posible. Un equipo de protección de EHV (Extra High Voltage) actúa en el orden de 3 c/s, uno de menor tensión entre 5 y 20 c/s.



1.2- ¿Para qué se estudia el ctocto?

- Conocer la magnitud de las corrientes de ctocto con carga máxima y mínima
- Dimensionar el interruptor (cámara de extinción del arco eléctrico) en base a la potencia de ctocto
- Efectuar la coordinación de los relés
- Conocer el tiempo de actuación del relé para analizar las perturbaciones que se producen en el sistema (armónicas, oscilaciones, etc.)
- Conocer la tensión en todas las barras luego del ctocto, para determinar la potencia generada y así la estabilidad transitoria del sistema
- Dimensionar el transformador de corriente (nivel de saturación de su curva de magnetización definida por su clase de exactitud)
- Analizar las sobretensiones de frecuencia industrial debido al ctocto

1.3.- ¿Cuáles son las causas de fallas en los SEP?

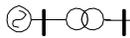
- Defectos del Aislante (diseño y material inadecuado, envejecimiento)
- Agentes Mecánicos (esfuerzos naturales como el viento, árboles, nieve)
- Agentes eléctricos (descargas atmosféricas, operación del sistema)
- Calentamiento (sobrecorrientes debido a sobrecargas y a sobretensiones)
- Mantenimiento (substitución inadecuada de elementos, personal no entrenado)
- Otros Factores (errores humanos, actos de vandalismos, quema de cultivos bajo líneas de transmisión; catástrofes naturales)

1.4.- ¿Cuál es el grado de ocurrencia de las fallas?

a) El promedio porcentual de fallas que se produce en los niveles de generación, estaciones transf. y líneas de transmisión de un SEP, se observa en tabla siguiente:

SECTOR DEL SISTEMA ELECTRICO	PORCENTAJE DE CTOCTO
Generación	6%
Subestación	5%
Líneas de Transmisión	89%

Se aprecia que el sector más vulnerable a las fallas, es el sistema de transmisión (recorre largas distancias, los elementos están en serie y casi siempre a la intemperie).



b) El promedio % de fallas por tipo de ctocto, se puede observar en tabla siguiente:

TIPOS DE CTOCTOS	PORCENTAJE DE CTOCTOS
Trifásico 3Φ	5%
Bifásico 2Φ	10%
Bifásico a tierra 2Φ tierra	10%
Monofásico 1Φ	75%

El ctocto 3Φ es el más raro, siendo el 1Φ con simple contacto a tierra el más común.

c) El promedio % de ctoctos 1Φ permanentes y temporarios se puede observar en tabla siguiente:

CTOCTO MONOFASICO	PORCENTAJES del CTOCTO.
Permanente	4%
Temporario	96%

Se justifica entonces el uso de interruptores con recierre. En sistemas importantes con recierre unipolar y en sistemas pequeños con recierre tripolar.

1.5. - ¿Cómo se pueden dividir a los ctocto?

- En Temporarios o Permanentes, según el ctocto desaparezca rápidamente o no cuando se lo desexcita.
- En 1Φ, 2Φ, 2Φ a tierra, 3Φ, doble contacto a tierra, según las formas que se establecen los contactos entre las fases y las fases y tierra. Estos tipos de ctoctos se pueden modelar asignando diferentes valores a las impedancias vistas en la Fig. 1:

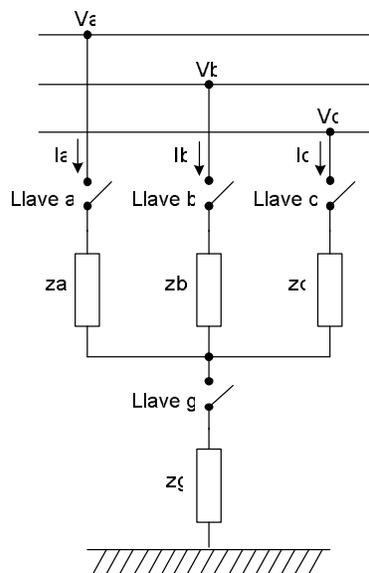
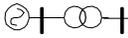


Fig. 1.- Forma de modelar los diferentes tipos de ctoctos

Por ejemplo: Llaves a y g cerradas, Llaves b y c abiertas → ctocto monofásico de la fase a → $Z_{falla} = Z_a + Z_g$



- c) En rígidos o no rígidos, según el contacto se establezca a través de una impedancia de falla de valor cero o distinto de cero. Del ejemplo anterior, si $Z_a = Z_g = 0 \rightarrow$ contacto rígido o sólido
- d) En simétricos (contacto 3 ϕ) o asimétricos (1 ϕ , 2 ϕ , etc.)

1.6- ¿Cómo se modelan los elementos de un SEP para un estudio de contacto?

En un estudio de contacto los generadores y las demandas se modelan de manera diferente que para un estudio de FC. El generador se representa como una fem detrás de su reactancia subtransitoria (o transitoria) y la carga se representa como una impedancia constante (Fig.2)

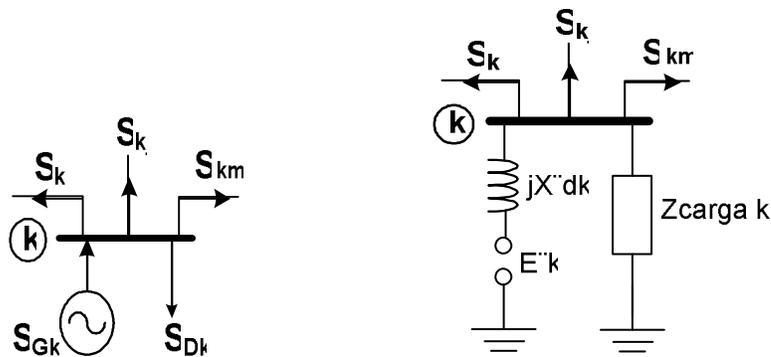
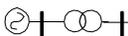


Fig. n° 2.- Diagrama Unifilar de un nodo con generador y carga y su modelo para estudio de Contacto

Los otros elementos (líneas, trafos) se modelan de la misma manera que para un estudio de FC.



2. - Modelo de un Cortocircuito

En un SEP de n barras que funciona normalmente y que está equilibrado, se considera una barra "q" cualquiera donde está conectada una carga Z_{carga} (Fig. 3a). Por esta carga circula una corriente I_{Dq} , de prefalla y por las LT las corrientes de prefalla I_{k-q} , I_{m-q} , I_{n-q} , I_{j-q} , que así como todas las tensiones son encontradas en un estudio de FC. En la barra "q" se encuentra una tensión pretalla de valor V_q^0 .

Si se produce un ctocto simétrico en la barra q, se lo puede modelar a través de la inserción de una impedancia Z_{falla} (Fig. 3b) conectada a la barra y a tierra de igual magnitud en las tres fases (analizar conceptualmente con Fig.1). Se puede observar que todas las tensiones y corrientes de falla son diferentes a las de prefalla y que ahora todas convergen a la barra "q" cortocircuitada, alimentando principalmente al corto y en una mínima cantidad (casi cero) a la carga ($Z_{falla} \ll Z_{carga}$).

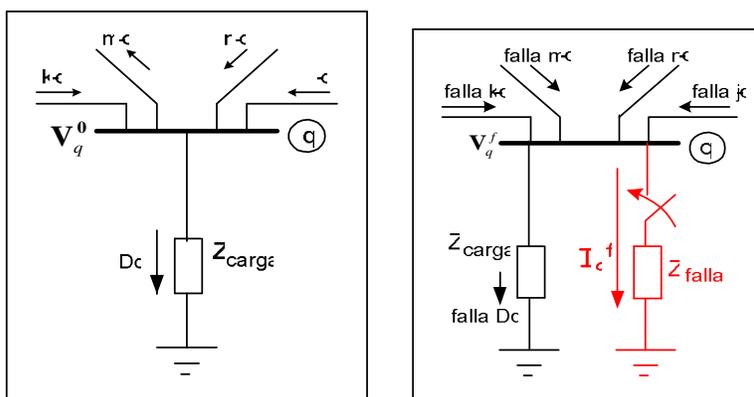


Fig. 3a y 3b. - Modelo de una barra q en estado pretalla y falla

Nota: Todos los elementos activos del SEP (generadores, motores) aportarán corriente al cortocircuito.

2.1. - El análisis del ctocto y el Teorema de Thevenin

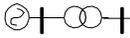
Un SEP de n barras se encuentra funcionando normalmente con valores de tensión y corriente (I^0, V^0) encontrados por medio de un estudio de flujo de carga. En un determinado momento se produce un ctocto en una barra q.

Se desea conocer los nuevos valores de tensiones y corrientes (I^f, V^f) en todo el SEP debido a este evento.

Para resolver esto, se aplica el teorema de superposición (herramienta matemática que permite descomponer un problema lineal en dos o más subproblemas más sencillos):

$$\text{Valor de Falla } (I^f, V^f) = \text{Valor pretalla } (I^0, V^0) + \text{Valor de Thevenin } (\Delta I, \Delta V)$$

Es decir se suman los valores pretalla (I^0, V^0) a los cambios de corrientes y tensiones de Thevenin ($\Delta I, \Delta V$).



A su vez los valores de Thevenin pueden ser encontrados aplicando el teorema que dice: *“Los cambios que toman lugar en las tensiones y corrientes de un SEP debido a la inserción de una impedancia entre dos nodos de la red, son idénticas a aquellas tensiones y corrientes generadas por una fem E_{Thq} ubicada en serie con dicha impedancia que tiene una magnitud y polaridad igual a la tensión de prefalla que existía en el nodo analizado, mientras todas las otras fuentes activas se encuentran ceradas.”*

Si se relaciona este teorema, con el modelo de ctocto que inserta una Z_{falla} en el punto de falla, entonces se pueden encontrar las variaciones de corriente y tensión que toman lugar en todo el SEP (ΔI , ΔV) cuando se produce una falla (Fig.4).

La tensión de Thevenin E_{Th-q} en la barra q , es la tensión que se tenía en la barra q antes del cortocircuito (tensión de pretalla V_q^0). La impedancia equivalente de Thevenin vista desde la barra q , Z_{Th-q} , se calcula luego de cortocircuitar todas las fuentes de tensión (cerar las fuentes de tensión) y su valor corresponde al valor que aparece en la matriz impedancia de barra Z_B en la posición qq . Este valor en general es de tipo inductivo $Z_{Th-q} \approx jX_{qq}$

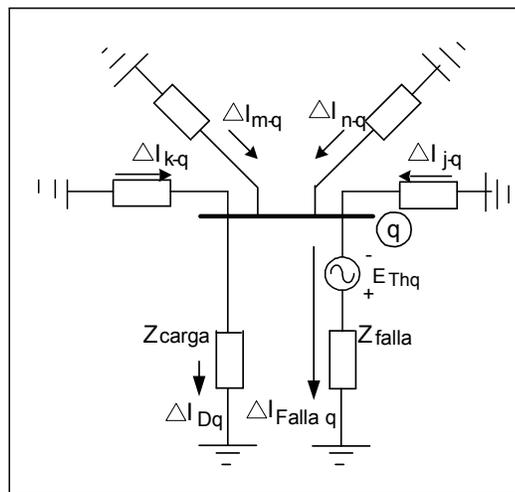
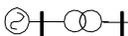


Fig. 4.- Variación de corrientes (valores de Thevenin) en un ctocto

2.2.- La demanda en el modelo de ctocto

Las corrientes de prefalla que circulan en el SEP están limitadas en la práctica por las impedancias de las cargas, por lo que resultan valores normales de corrientes y casi en fase con las tens. de fase (en general los factores de pot. de las cargas son $>$ a 0,9).

La impedancia de la carga por lo general, presenta dos grandes diferencias con la impedancia de cualquier elemento del SEP (transformadores, líneas); por un lado es de mucho mayor valor y por el otro, su característica eléctrica total es de tipo resistiva (a la carga inductiva se la compensa con bancos de capacitores).



Si se produce un ctocto en la barra q , la impedancia de la falla $Z_{Falla-q}$ queda en paralelo con la impedancia de carga $Z_{carga-q}$ y como $Z_{carga q} \gg Z_{Falla-q}$, las corrientes que llegan del sistema a la barra cortocircuitada q , circularán principalmente por la falla. De esta manera las corrientes de ctocto que circulan por el sistema y por la falla producida, son fuertemente inductivas.

El diagrama fasorial considerando las corrientes de falla, prefalla y Thevenin, puede observarse en la Fig. 5:

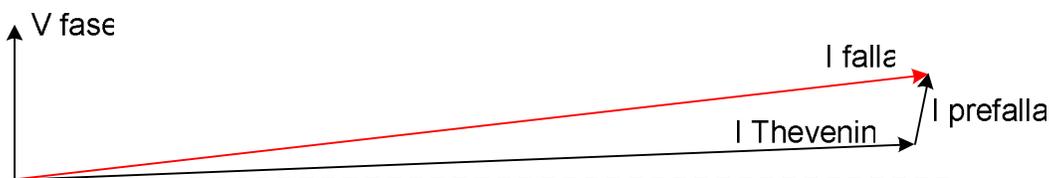


Fig.5.- Diagrama Fasorial de corrientes y tensión en la barra fallada

La corriente de falla I_{falla} es aproximadamente igual a la $I_{Thevenin}$ (variación de corriente ΔI), ya que se puede despreciar la contribución de la corriente de pretalla $I_{prefalla}$ (asociada a las consideraciones de la demanda ya efectuadas).

El cálculo por lo tanto se puede realizar bajo la hipótesis que el SEP se encuentra descargado y esto trae como consecuencia, que la tensión interna de secuencia positiva de todos los generadores, sea igual a la tensión prefalla V^0 en el punto de corto.

$$I_{falla} \approx \Delta I_{falla} = I_{Thevenin}$$

$$E_{Th} = V^0$$

Aplicando estos conceptos a la barra q , se puede observar en la Fig. 6, como queda conectada la Z_{Th-q} (impedancia equivalente vista desde la barra q , luego de cerrar todas las fuentes de tensión) y la $Z_{carga-q}$:

$$Z_{equivalente} = Z_{Th-q} // Z_{carga q} \approx Z_{Th-q} \quad (Z_{carga q} \gg Z_{Th-q})$$

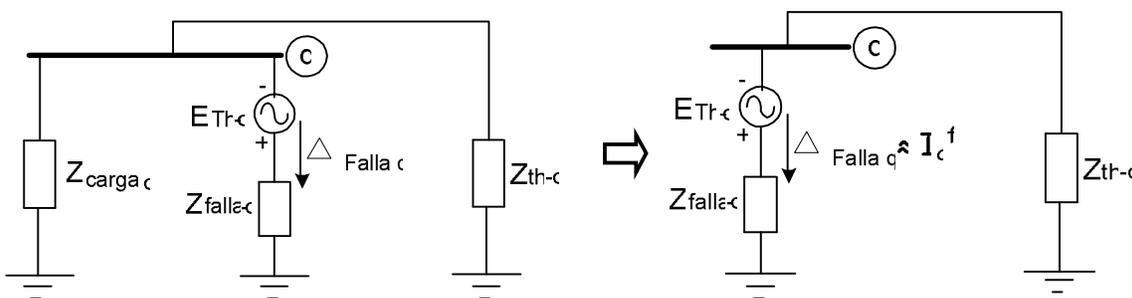
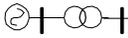


Fig. 6.- Modelo de ctocto en el nodo q , despreciando la carga



3.- Conceptos sobre la Matriz Impedancia de Barra Z_B

Así como la matriz admitancia de barra Y_B del sistema pasivo de un SEP se usa para el análisis de Flujo de Carga, la matriz impedancia de barra Z_B de un SEP se usa para el análisis sistemático de las corrientes de corto por medio de las ecuaciones generales de corto.

$$Z_{B_{n \times n}} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1q} & \dots & Z_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{q1} & \dots & Z_{qq} & \dots & Z_{qn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nq} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

Z_{ii} = impedancia de Thevenin vista de la barra i . Es la tensión en la barra i cuando se inyecta una corriente de 1 pu en i y el resto de inyecciones es nulo.

Z_{ij} = impedancia de transferencia entre el nodo i y el j . Es la tensión en la barra i cuando se inyecta una corriente de 1 pu en j y el resto de inyecciones es nulo.

Nota: Analizar el significado físico de estos elementos de la matriz, de la misma manera que se hizo con los elementos de Y_B .

3.1.- Formas de obtener la Z_B

. Esta Z_B se puede encontrar invirtiendo la matriz Y_B del sistema modelado para el estudio del cortocircuito:

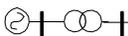
$$Z_{B \text{ corto}} = Y_B^{-1} \text{ corto}$$

Nota: Tener en cuenta que esta Y_B de corto, es distinta a la Y_B correspondiente al modelo del SEP para un estudio de flujo de carga (¿Por qué?).

El proceso de inversión de matrices esparsas de orden n elevado, como la $Y_B \text{ } n \times n$, no se realiza en forma directa sino a través de técnicas apropiadas (factorización triangular). La $Z_B \text{ } n \times n$ resultante es cuadrada de orden n ($n=n^\circ$ de nodos), simétrica, con todos sus elementos diferentes de cero.

Se debe notar que el modelo del generador G y demanda D , es diferente para el análisis de **Flujo de Carga** (inyecciones de potencia) que para el análisis de **Corto** (G modelado como una fem constante detrás de la reactancia subtransitoria o transitoria, de acuerdo a cuando se está considerando el estudio, y D modelada como una impedancia o directamente despreciada), por lo tanto:

$$Y_B \text{ flujo de carga} \neq Y_B \text{ corto}$$



Por cada modificación que tenga lugar en el sistema (entrada y salida de líneas, trafos, G , ctocto, etc.) se modifica la Y_B ctocto y se debe calcular nuevamente la inversa para obtener la nueva Z_B . Si n es grande, hay mucho esfuerzo computacional. Por esta razón, existen otros métodos que permiten la obtención directa de la Z_B de manera más simple, sin necesidad de tener la Y_B para luego invertirla. Esto se puede lograr a través de su construcción paso a paso, adicionando ramas y nodos hasta que el SEP esté representado en su totalidad:

- Una rama nueva que se agrega entre dos nodos ya construidos, resulta en una modificación de todos los valores de impedancias de la matriz Z_B (hay una nueva distribución de las corrientes).
- Un nodo nuevo que se agrega a través de la adición de una rama nueva, aumenta en un orden la dimensión de la matriz Z_B sin modificar los valores de las impedancias ya calculados anteriormente (no cambia la distribución de las corrientes).

Este proceso de construir la Z_B es más laborioso que el usado para encontrar la Y_B , pero la información obtenida es conceptualmente de mayor valor.

Nota: Si se desea realizar el estudio de un ctocto simétrico de un SEP, se debe construir la malla de secuencia directa del mismo y obtener su $Z_B(+)$. Si el ctocto es asimétrico, se deben construir además las mallas de secuencia inversa y homopolar y obtener su $Z_B(-)$ y $Z_B(o)$ respectivamente. Por lo tanto, para cada SEP analizado siempre existen tres mallas de secuencia (+, -, o) y sus correspondientes Z_B .

3.2.- Significado físico de los elementos de la matriz Z_B

Dado el diagrama unifilar de un SEP, se encuentra su correspondiente diagrama de impedancias (modelo de ctocto despreciando la carga), mostrado en Fig. 7:

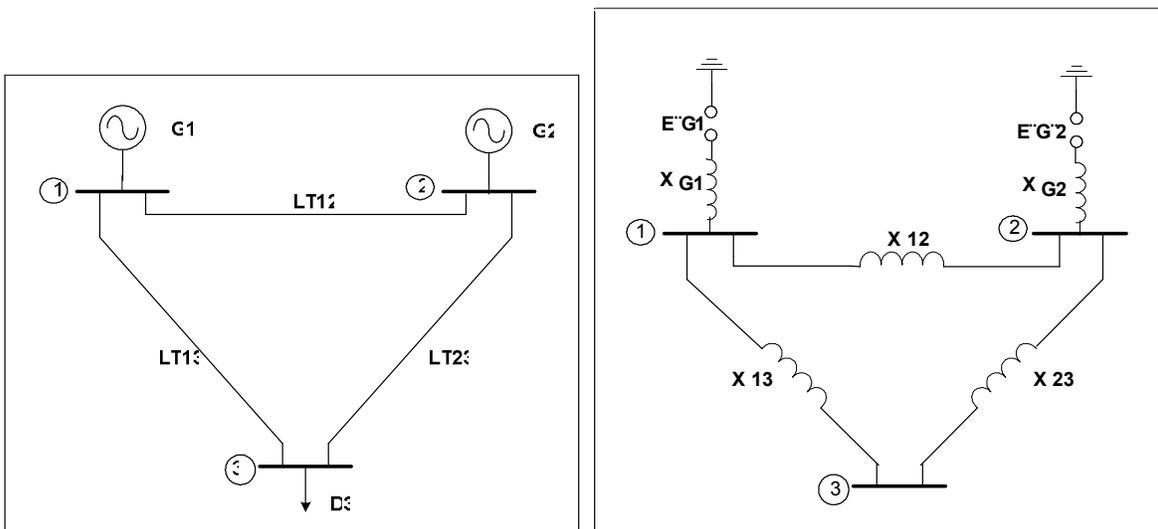
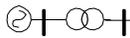


Fig. 7.- Circuito unifilar y circuito de secuencia directa



Aplicando Norton a los generadores (Fig.8), el diagrama resultante es:

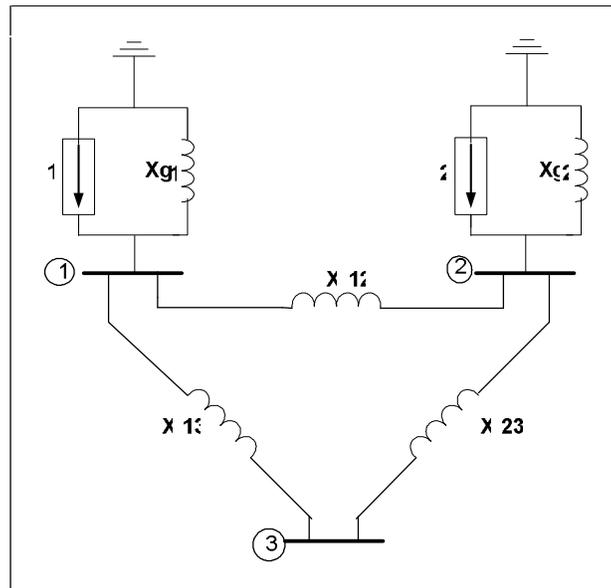


Fig. 8.- Circuito de secuencia directa Norton

La Z_B establece la relación entre la matriz de tensiones de barra, con la de corrientes inyectadas en las barras.

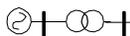
$$\mathbf{V}_B = \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_B$$

Este vector puede ser escrito en forma detallada como:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} V_1 &= z_{11} I_1 + z_{12} I_2 + z_{13} I_3 \\ V_2 &= z_{21} I_1 + z_{22} I_2 + z_{23} I_3 \\ V_3 &= z_{31} I_1 + z_{32} I_2 + z_{33} I_3 \end{aligned}$$

El valor de la primera columna de la Z_B , se encuentra inyectando una corriente I_1 de valor 1 pu en el G de corriente, mientras se hacen 0 todas las otras corrientes inyectadas, como se muestra en la Fig. 9 (en el nodo 3 la I_3 ya era cero, por haber considerado a la demanda igual a cero). La expresión para este caso es:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} V_1 &= z_{11} I_1 = z_{11} = Z \text{ Thevenin del nodo 1} \\ V_2 &= z_{21} I_1 = z_{21} = Z \text{ de transferencia 21} \\ V_3 &= z_{31} I_1 = z_{31} = Z \text{ de transferencia 31} \end{aligned}$$



El gráfico correspondiente para el análisis es:

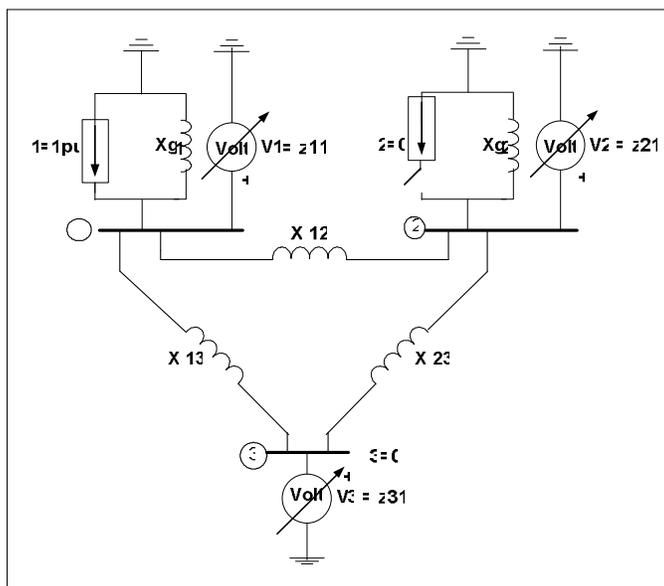


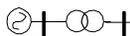
Fig. 9.- Ensayo realizado al circuito de secuencia directa Norton

Por lo tanto los elementos de la primera columna de la matriz Z_B , representan las tensiones en los bornes 1, 2 y 3 respectivamente, cuando se inyecta una corriente de 1 pu en el nodo 1, y las otras corrientes inyectadas son cero. Se usa el mismo procedimiento para encontrar las otras columnas de la Z_B .

Los elementos diagonales de la matriz Z_{barra} resultan ser las impedancias de Thevenin vistas desde el nodo considerado. Para un nodo genérico q:

$$Z_{qq} = Z_{Thq}$$

Nota: No existe relación recíproca entre la y_{qq} y la Z_{qq} , ni entre y_{jq} y la Z_{jq}



4.- Cálculo Sistemático de Cortocircuitos Simétricos

Para el análisis de un ctocto simétrico en un SEP de n barras como el de la Fig. 10, es necesario usar métodos matriciales. Se aplicará el concepto de superposición ya visto:

$$\text{Valor de Falla } (I^f, U^f) = \text{Valor pretalla } (I, U) + \text{Valor de Thevenin } (\Delta I, \Delta V)$$

En este SEP el ctocto se produce en una barra q cualquiera.

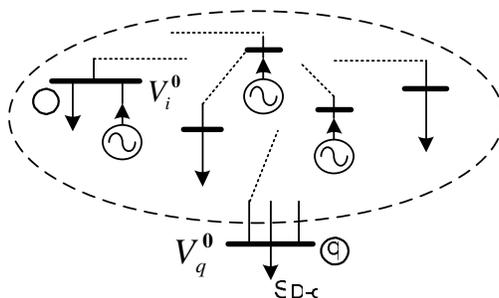


Fig. 10.- Diagrama unifilar de un SEP en estado normal, mostrando la barra q

Las tensiones pretalla en todas las barras se encuentran mediante un estudio de FC.

Tensiones prefalla
$$\mathbf{V}_B^0 = \begin{bmatrix} V_1^0 \\ \vdots \\ V_q^0 \\ \vdots \\ V_n^0 \end{bmatrix}$$

Se analiza un ctocto en la barra q. Para esto se modela dicho ctocto por medio de una impedancia de falla y se modela el SEP para el estudio de ctocto (Fig. 11):

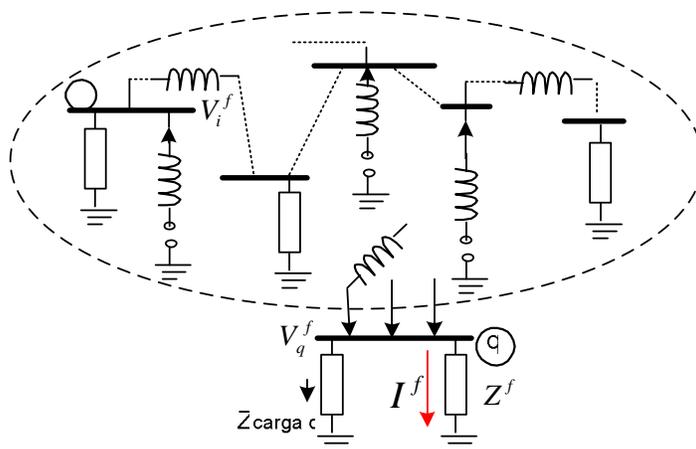
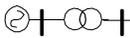


Fig.11.- SEP modelado para el estudio de ctocto, con la barra q en ctocto



Como se vio, la matriz impedancia de barra relaciona la matriz de tensiones de barra con la de corrientes de barra inyectadas:

$$\mathbf{V}_B = \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_B \tag{1}$$

Para encontrar los valores de Thevenin se ceran todas las fuentes activas (se cortocircuitan las fuentes de tensión) y se coloca la fuente $E_{Th} = V_q^0$ como se muestra en la Fig. 12:

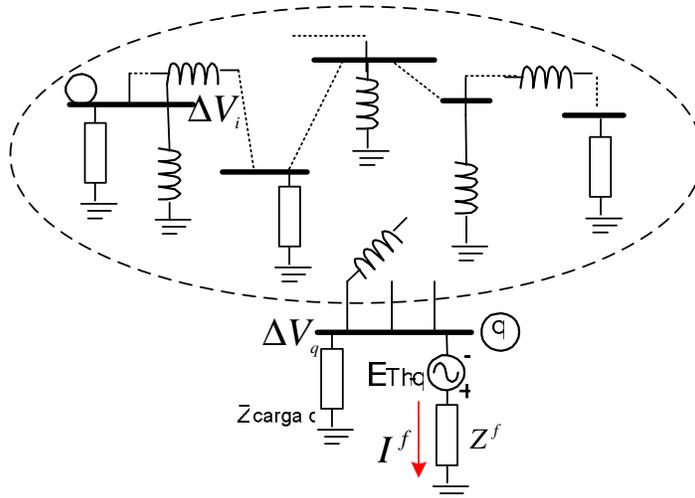


Fig. 12.- SEP modelado para encontrar los valores de Thevenin

Las tensiones encontradas en las barras representan las variaciones de tensión causadas por la falla:

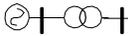
$$\text{Tensiones de Thevenin } \mathbf{V}_T = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_q \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

En el SEP de la Fig. 12 la única inyección de corriente es en la barra q:

$$\mathbf{I}^f = \mathbf{I}_B = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I^f \leftarrow \text{fila } q \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

La expresión (1) aplicada al circuito de la Fig.12, resulta en:

$$\mathbf{V}_T = \mathbf{Z}_B \mathbf{I}^f \tag{3}$$



Se encuentran las tensiones en las barras del SEP cuando hay un ctocto en una barra q , aplicando superposición:

$$\mathbf{V}_B^f = \mathbf{V}_B^0 + \mathbf{V}_T \quad \rightarrow \quad \mathbf{V}_B^f = \mathbf{V}_B^0 + \mathbf{Z}_B \mathbf{I}^f \quad (4)$$

La expresión matricial (4) se puede desarrollar y escribir como un sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_1^f &= V_1^0 - z_{1q} I^f \\ \dots\dots\dots \\ V_q^f &= V_q^0 - z_{qq} I^f \\ \dots\dots\dots \\ V_n^f &= V_n^0 - z_{nq} I^f \end{aligned} \quad (5)$$

Este sistema de ecuaciones está formado por n ecuaciones con $(n+1)$ incógnitas (las n tensiones de barra durante el ctocto + la corriente de falla).

En la Fig. 11 se puede observar que:

$$V_q^f = Z^f I^f \quad (6)$$

Se reemplaza V_q^f de la expresión (6) en la q ésima ecuación del sistema (5) y se despeja de allí I^f , resultando:

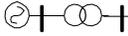
$$I^f = \frac{V_q^0}{Z^f + z_{qq}} \quad (7)$$

Se introduce esta ecuación (7) en cada una de las ecuaciones del sistema de ecuaciones (5), se generaliza y se encuentran las ecuaciones generales de ctocto simétrico:

$$\boxed{V_i^f = V_i^0 - \frac{z_{iq}}{Z^f + z_{qq}} V_q^0 \quad i \neq q} \quad (8) \quad \boxed{V_q^f = \frac{Z^f}{Z^f + z_{qq}} V_q^0 \quad i = q} \quad (9)$$

Si el ctocto es sólido ($Z^f = 0$), las ecuaciones (8) y (9) resultan:

$$I^f = \frac{V_q^0}{z_{qq}} \quad V_i^f = V_i^0 - \frac{z_{iq}}{z_{qq}} V_q^0 \quad \forall i \neq q \quad V_q^f = 0 \quad \forall i = q$$



5.- Cálculo Sistemático de Cortocircuitos Asimétricos

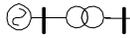
Si se produce un ctocto que hace que el sistema deje de estar simétrico, dicho ctocto se llama asimétrico (monofásico, bifásico, bifásico a tierra). Durante un ctocto asimétrico y suponiendo que las fem de un generador producen tensiones simétricas, la fem de cada fase "ve" diferentes impedancias por fase y por lo tanto diferentes corrientes. Esto ya no se puede solucionar con un análisis por fase como se venía haciendo, donde se encontraban los valores de I y de V para la fase a, sabiendo que los valores para la fase b y c resultaban los mismos en módulo, pero desfasados -120° y -240° respectivamente, sino que el análisis ahora se realiza por medio de llamadas componentes de secuencia, definidas en el Teorema de Fortescue: *"un sistema de n fasores asimétricos puede ser descompuesto en n sistemas de fasores simétricos, denominados componentes simétricas de los fasores originales"*.

Por lo tanto, un sistema trifásico presenta tres sistemas de secuencia: directa, inversa y homopolar.

Los valores de fase (I_a, I_b, I_c o V_a, V_b, V_c) y los de secuencia (I_d, I_i, I_o o V_d, V_i, V_o) se relacionan por medio de una matriz de transformación T:

$$[\text{Valor de fase}]_{3 \times 1} = [\mathbf{T}]_{3 \times 3} [\text{Valor de secuencia}]_{3 \times 1}$$

Si se aplican los sistemas de secuencia a cada elemento del SEP (trafos, generadores, líneas, demandas), se podrá encontrar una impedancia de secuencia Z_d , Z_i y Z_o de cada elemento (ver Anexo). Con estas impedancias se pueden formar tres circuitos independientes llamadas mallas de secuencia directa, inversa y homopolar. En un ctocto asimétrico estas mallas se conectan de diferentes maneras (dependiendo del tipo de ctocto) en los puntos de falla. En sistemas simétricos la única malla presente es la directa. Las corrientes que circulan por las mallas son corrientes de secuencia.



Las tensiones y las corrientes de barra se representan como (11):

$$\mathbf{V}_{S.B. \ 3 \times n-1} = \begin{bmatrix} V_{+1} \\ V_{-1} \\ V_{01} \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \\ V_{+i} \\ V_{-i} \\ V_{0i} \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \\ V_{+n} \\ V_{-n} \\ V_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ \vdots \\ V_{si} \\ \vdots \\ V_{sn} \end{bmatrix} \quad \mathbf{I}_{S.B. \ 3 \times n-1} = \begin{bmatrix} I_{+1} \\ I_{-1} \\ I_{01} \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \\ I_{+i} \\ I_{-i} \\ I_{0i} \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \\ I_{+n} \\ I_{-n} \\ I_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{s1} \\ \vdots \\ I_{si} \\ \vdots \\ I_{sn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

En forma compacta:

$$\mathbf{V}_{s.B} = \mathbf{Z}_{s.B} \mathbf{I}_{s.B} \quad (12)$$

Dado un defecto asimétrico en la barra q de la Fig. 10, se puede encontrar una expresión general que relaciona las tensiones y corrientes de falla de las fases y transformarla a una expresión que relaciona las tensiones y corrientes de secuencia.

Valores de Fase \rightarrow Matriz de Transformación \rightarrow *Valores de Secuencia*

$$\mathbf{V}_{p,q}^f = \mathbf{Z}_p^f \mathbf{I}_{p,q}^f \rightarrow \text{Matriz de Transformación} \rightarrow \mathbf{V}_{s,q}^f = \mathbf{Z}_s^f \mathbf{I}_{s,q}^f \quad (13)$$

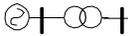
Nota: La impedancia de falla es una matriz que se puede obtener analizando la Fig.1:

$$\mathbf{Z}_p^f = \begin{bmatrix} Z_a + Z_g & Z_g & Z_g \\ Z_g & Z_b + Z_g & Z_g \\ Z_g & Z_g & Z_c + Z_g \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{Z}_s^f = T^{-1} \mathbf{Z}_p^f T$$

La matriz \mathbf{Z}_p^f es simétrica pero la \mathbf{Z}_s^f no lo es

Cuando algunas impedancias toman el valor infinito, ciertos valores de \mathbf{Z}_s^f pueden volverse indefinidos \rightarrow se debe trabajar con la matriz admitancia de falla:

$$\mathbf{I}_{s,q}^f = \mathbf{Y}_s^f \mathbf{V}_{s,q}^f \quad (14)$$



Suponer que un dado SEP se encuentra operando en estado estacionario simétrico, entonces todas las tensiones prefallas son tensiones de secuencia positiva:

$$\mathbf{V}_{S,B}^0 = \begin{bmatrix} V_1^0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ V_q^0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \\ V_n^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Se produce un ctocto asimétrico en la barra q de la Fig. 10 y se conoce la naturaleza de la falla o sea la \mathbf{Z}_p^f que la representa (ahora es una matriz).

Se aplica superposición para obtener las tensiones posfalla de secuencia:

$$\mathbf{V}_{S,B}^f = \mathbf{V}_{S,B}^0 + \mathbf{Z}_{S,B} \mathbf{I}_{S,B}^f \quad (16)$$

Como la falla se considera actuando solamente en la barra q :

$$\mathbf{I}_{S,B}^f = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ -\mathbf{I}_{sq}^f \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \leftarrow qth \text{ componente}$$

Se desarrolla la ecuación matricial (16) con sus n vectores componentes:

$$\mathbf{V}_{s1}^f = \mathbf{V}_{s1}^0 - \mathbf{Z}_{s1q} \mathbf{I}_{sq}^f$$

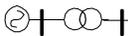
.....

$$\mathbf{V}_{sq}^f = \mathbf{V}_{sq}^0 - \mathbf{Z}_{sqq} \mathbf{I}_{sq}^f \rightarrow q^{esima} \text{ ecuación} \quad (17)$$

.....

$$\mathbf{V}_{sn}^f = \mathbf{V}_{sn}^0 - \mathbf{Z}_{snq} \mathbf{I}_{sq}^f$$

En las ecuaciones (17) no se conocen las tensiones de secuencia de barra cuando la barra q está en ctocto, ni se conocen las corrientes de secuencia de falla \mathbf{I}_{sq}^f .



Se reemplaza (13) en la quésima ecuación del sistema (17), resultando:

$$\mathbf{Z}_s^f \mathbf{I}_{sq}^f = \mathbf{V}_{sq}^0 - \mathbf{Z}_{sqq} \mathbf{I}_{sq}^f \quad (18)$$

De aquí se despeja el vector de dimensión 3x1 \mathbf{I}_{sq}^f :

$$\mathbf{I}_{sq}^f = (\mathbf{Z}_s^f + \mathbf{Z}_{sqq})^{-1} \mathbf{V}_{sq}^0 \quad (19)$$

y se reemplaza en las ecuaciones (17) para obtener las tensiones de secuencia de barra con el ctocto en la barra q:

$$\mathbf{V}_{si}^f = \mathbf{V}_{si}^0 - \mathbf{Z}_{siq} (\mathbf{Z}_s^f + \mathbf{Z}_{sqq})^{-1} \mathbf{V}_{sq}^0 \quad \text{para } i \neq q \quad (20)$$

Reemplazando (19) en (13):

$$\mathbf{V}_{sq}^f = \mathbf{Z}_s^f (\mathbf{Z}_s^f + \mathbf{Z}_{sqq})^{-1} \mathbf{V}_{sq}^0 \quad i = q \quad (21)$$

Conocidas las tensiones de falla de secuencia (20) y (21), se podrán encontrar a continuación los valores de tensiones de fase correspondientes, usando la matriz de transformación. Por ejemplo, se encuentran las tensiones de fase en la barra i, cuando se produce un ctocto en la barra q:

$$\begin{bmatrix} V_i^{fq} \\ V_i^{fq} \\ V_i^{fq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i^{fq} \\ V_i^{fq} \\ V_i^{fq} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Donde:

V_i^{fq} = Tensión en la fase "a" de la barra "i", cuando se produce un ctocto en la barra "q"

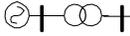
V_i^{fq} = Tensión de secuencia directa (+) en la barra "i", cuando se produce un ctocto en la barra "q"

$$a = e^{j120^\circ}$$

Usando estos valores de tensión, se pueden encontrar ahora los valores de corrientes que circulan por todas las líneas del sistema. Por ejemplo, el valor de la corriente que circula por la fase "a" de una línea cualquiera "ij" del SEP, cuando se produce un ctocto en una barra q, se calcula como:

$$I_{ij_a}^{fq} = \frac{V_i^{fq} - V_j^{fq}}{x_{linea\ ij}} \quad (23)$$

De la misma forma se encuentra la corriente por la fase "a" en un ctocto simétrico.

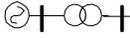


Comentarios:

- 1.- Las fórmulas encontradas son generales, ya que la barra q es una barra cualquiera del SEP y como la matriz de barra de secuencia ha sido calculada y puesta en la memoria del computador, se puede realizar cualquier análisis de ctoto sobre cualquier barra fallada y con cualquier tipo de ctoto asimétrico.
- 2.- Todas las fórmulas involucran vectores de 3×1 y matrices de 3×3 . Las matrices $Z_{s,ij}$ son diagonales, pero la matriz Z_s^f no lo es.
- 3.- Las tensiones de prefalla V_{si}^0 son dados por un flujo de carga o por una partida plana.
- 4.- Todas las ecuaciones fueron derivadas basadas en la existencia de una matriz de impedancia de falla Z_s^f . Si la misma no está definida se usa la matriz Y_s^f , desarrollando un nuevo grupo de ecuaciones.

Bibliografía

- 1.- Olle Elgered, *Electric Energy Systems Theory*, McGraw Hill, 1982.
- 2.- John Grainger, William Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*, Mc Graw Hill, 1996.
- 3.- Duncan Glover, *Power System Analysis and Design*, Second Edition, Mulukutla Sarma, PWS Publishers, 1994.



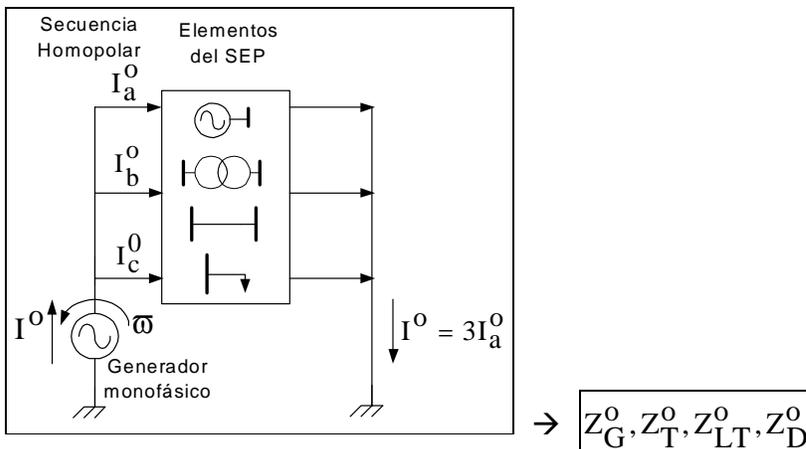
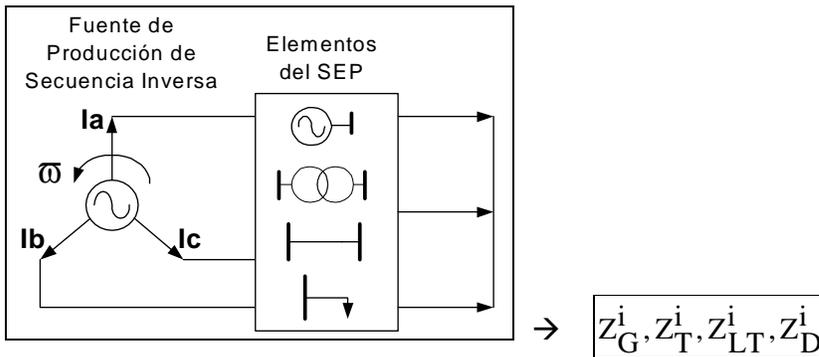
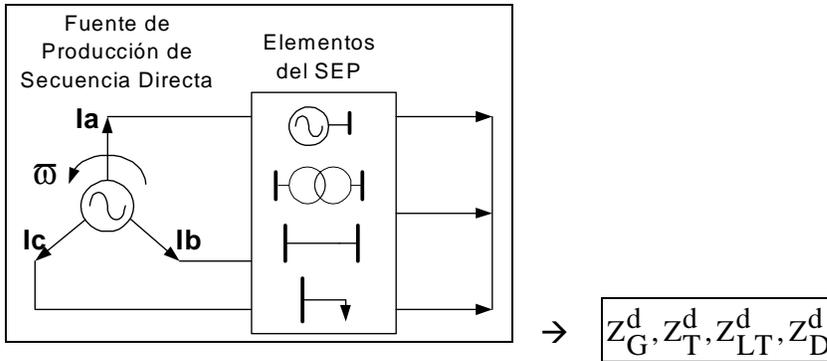
ANEXOS

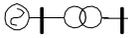


Impedancias de Secuencia

Cada elemento del SEP (G, Trafo, LT, carga, reactor) presenta respectivamente una impedancia llamada de secuencia directa, inversa y homopolar, por cada sistema fasorial de secuencia directa, inversa y homopolar que se le aplica.

Para saber cual es el valor de estas impedancias, se conecta cada elemento a una fuente que produce un sistema fasorial de secuencia:





En general se puede decir que:

- Las impedancias que resultan de aplicar un sistema de secuencia directa en elementos bilaterales (elementos lineales y pasivos), son las mismas que resultan de aplicar una secuencia inversa, pero distintas de las de una secuencia homopolar. Esto es así ya que la Z de este elemento es independiente de la secuencia de fases que lo recorre.

$$Z \text{ directa} = Z \text{ inversa} \neq Z \text{ homopolar}$$

- Las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar son diferentes en elementos activos (generadores, motores).

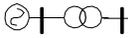
$$Z \text{ directa} \neq Z \text{ inversa} \neq Z \text{ homopolar}$$

Impedancias Inversas de generadores

La Z_G^i es la impedancia que presenta un G cuando se le aplica un sistema inverso de tensiones durante su marcha síncrona. Entonces el campo producido en el estator gira en sentido contrario al del rotor, resultando una frecuencia doble respecto del rotor (en un sistema directo esta frecuencia es cero, es decir se encuentra en reposo).

Relaciones entre las impedancias de secuencia

- G turborotor $\rightarrow Z_G^d \approx Z_G^i$
- G polos salientes con arrollamiento amortiguador $\rightarrow Z_G^i \approx 1,2 \times Z_G^d$
- G polos salientes sin arrollamiento amortiguador $\rightarrow Z_G^i \approx 1,5 \times Z_G^d$
- $G \rightarrow Z_G^0 \approx 1/3 - 1/6 Z_G^d$ (es infinito si el neutro está aislado o el estator está en Δ)
- Máquinas asincrónicas $\rightarrow Z_{\text{asi}}^i \approx Z_{\text{asi}}^d$
- Motor asincrónico $\rightarrow Z_{\text{asi}}^0 = \text{infinito}$ (su neutro está siempre aislado)
- Trafo $Y-\Delta \rightarrow Z_T^0 \approx 0,8 - 1 Z_T^d$
- Trafo $Y\text{-ZigZag} \rightarrow Z_T^0 \approx 0,1 Z_T^d$
- Trafo $Y-Y-\Delta$ (compensador) $\rightarrow Z_T^0 \approx 2,4 Z_T^d$
- Línea aérea $\rightarrow Z_{LT}^0 \approx 3 - 3,5 Z_{LT}^d$
- Cables $\rightarrow Z_{\text{Cable}}^0 \gg Z_{\text{Cable}}^d$ (debido a envoltura de plomo)



La variación de la corriente de corto en el tiempo, se asocia a tres reactancias diferentes del Generador (referidas al eje longitudinal o directo) en tres períodos diferentes. Las reactancias referidas al eje transversal no son importantes en el estudio del corto.

Período subtransitorio $\rightarrow jX_d''$ (reactancia subtransitoria: incluye reactancia de dispersión de los arrollamientos del estator y rotor, arrollamiento amortiguador, piezas macizas del rotor)

Período transitorio $\rightarrow jX_d'$ (reactancia transitoria: incluye reactancia de dispersión de los arrollamientos del estator y rotor)

Período permanente de corto $\rightarrow jX_d$ (reactancia síncrona: reactancia total del inducido, es decir reactancia de dispersión estática más la de reacción del inducido)

Relación entre las reactancias

$$X_d \gg X_d' > X_d''$$

En general:

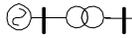
$$I_{\text{corto } 3\phi} > I_{\text{corto } 1\phi}$$

$$I_{\text{corto } 3\phi} > I_{\text{corto } 2\phi\text{-tierra}}$$

En determinadas combinaciones con puestas a tierra rígida o inductiva de poco valor, se puede dar:

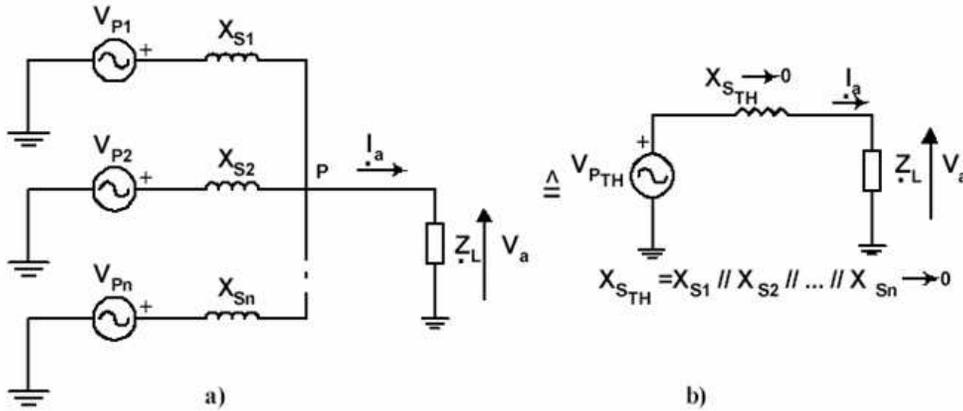
$$I_{\text{corto } 1\phi} > I_{\text{corto } 3\phi}$$

$$I_{\text{corto } 2\phi\text{-tierra}} > I_{\text{corto } 3\phi}$$



Barra Infinita

Es la realización práctica de la fuente ideal de tensión. Se puede obtener conectando generadores en paralelo, como se muestra en la figura siguiente.

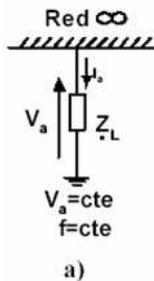


a) Generadores conectados en paralelo b) Equivalente Thevenin

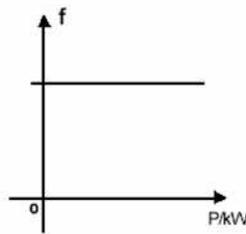
La barra infinita es una barra que presenta las siguientes características principales:

$f = \text{cte.}$ independiente de la Pcarga

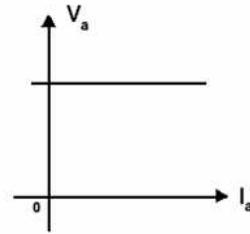
$V = \text{cte.}$ independiente de la Icarga



a)

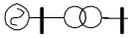


b)



c)

Barra infinita: a) Símbolo b) característica f-P c) característica V-I



Potencia de Ctocto

La potencia de ctocto trifásica en una barra i es por definición:

$$SCC_i [MVA] = \sqrt{3} |V_{línea\ prefalla\ i} [kV]| |I_{fi} [kA]|$$
$$\div$$
$$S_{base} [MVA] = \sqrt{3} |V_{base} [kV]| |I_{base} [kA]|$$

Se realiza el cociente y se considera que:

$$V_{línea\ prefalla\ i} = V_{base}$$

$$S_{cc_i} [pu] = \frac{S_{cc_i}}{S_{base}} = \frac{I_{fi}}{I_{base}} = I_{fi} [pu]$$

Para un ctocto sólido en la barra i , la corriente de ctocto en esa barra i es:

$$I_{fi} = \frac{V_{prefalla_i}}{Z_{th_i}}$$

Como:

$$V_{prefalla_i} \approx 1 pu$$

$$I_{fi} [pu] \approx \frac{1}{Z_{th_i}}$$

Por lo tanto:

$$S_{cc_i} [pu] = I_{fi} [pu] = \frac{1}{Z_{th_i}}$$

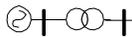
Este valor ayuda a elegir que interruptor se instalará en la barra i

Si $Z_{th} \rightarrow 0$ (barra infinita) $\rightarrow SCC \rightarrow \infty$ (no deseable \rightarrow interruptores muy caros)

$Z_{th} \rightarrow 0$ cuando aumenta la tensión del sistema y cuando se incorporan nuevos generadores y nuevas líneas.

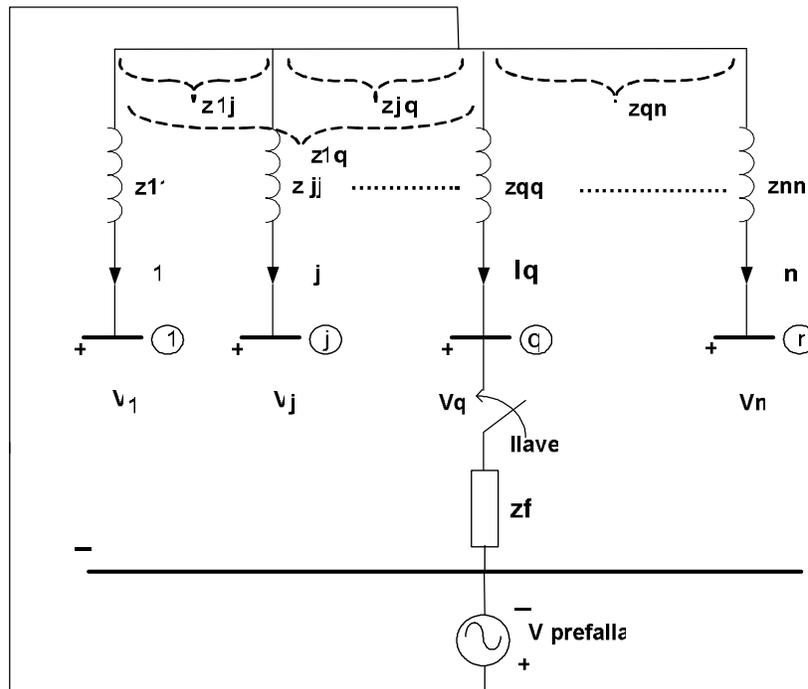
Para que la variación de tensión sea la menor posible:

$$\Delta V = I_f Z_{th} \rightarrow Z_{th} \text{ debe ser mínimo}$$



Circuito equivalente para interpretar los elementos de la Z_B

Se construye un circuito eléctrico como el mostrado en la Fig. 4, con las mismas impedancias de la Z_B , con el objetivo de obtener sus ecuaciones y luego compararlas con las ecuaciones generales de ctocto simétrico. Si las mismas resultan idénticas, el circuito planteado será validado.



Circuito planteado para ser validado

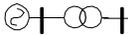
En este circuito planteado, las impedancias se pueden interpretar como:

z_{qq} → impedancia propia de la rama q (equivalente a la impedancia de Thevenin vista desde la barra q en el modelo original)

z_{jq} → impedancia mutua existente entre la rama j y la rama q ≡ impedancia de transferencia entre las barras i y q en el modelo original.

Z^f → impedancia ≡ impedancia de falla

Una rama q cualquiera tiene como extremo a un nodo q y el otro extremo a un nodo referencia común → n° de barras = n° de ramas



La expresión general de tensión alrededor de una malla que contenga a la Z_{qq} es:

$$V_{\text{prefalla}} - V_q = Z_{qq} I_q \quad (\text{I})$$

Generalizando para las n ramas:

$$\begin{bmatrix} V_{\text{prefalla}} - V_1 \\ \vdots \\ V_{\text{prefalla}} - V_q \\ \vdots \\ V_{\text{prefalla}} - V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1q} & \dots & Z_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{q1} & \dots & Z_{qq} & \dots & Z_{qn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nq} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_q \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

De acuerdo a la posición de la llave se tendrán dos condiciones:

1.- Con llave abierta

No hay circulación de corriente

$$I_q = 0 \quad \text{para todo } q = 1, \dots, n$$

Se reemplaza en (I):

$$V_q = V_{\text{prefalla}} = V_q^0 = \text{tensión inicial en } q \text{ con llave abierta}$$

2.- Con llave cerrada

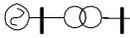
Si ahora se cierra la llave sobre el nodo q, circula por la rama q una corriente:

$$I_q = I_q^f \quad \text{donde la letra } f, \text{ es para asociarla a una corriente de falla}$$

$$I_j = 0 \quad \text{para todo } j = 1, \dots, n \quad \text{y } j \neq q$$

La tensión en la barra q resulta entonces:

$$V_q = V_q^f = Z_q^f I_q^f$$



Se reemplaza en (I)

$$V_{\text{prefalla}} - Z^f I_q^f = z_{qq} I_q^f$$

Como además:

$$V_{\text{prefalla}} = V_q^0$$

$$I_q^f = V_q^0 / (Z^f + z_{qq})$$

→ está de acuerdo con la expresión de la ecuación general de corto (7).

Cuando la corriente de falla I_q^f circula por la rama q , induce tensiones en las otras ramas j , debido a los acoplamientos mutuos entre ramas modelados por medio de las z_{jq} . Se supone que la tensión inducida tiene signo negativo:

$$\Delta V_j = - z_{jq} I_q^f = - z_{jq} [V_q^0 / (z_{qq} + Z^f)]$$

La tensión resultante en la barra j , resulta por lo tanto:

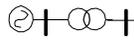
$$V_j^f = V_j^0 + \Delta V_j \quad \text{para todo } j = 1, \dots, n \quad \text{con } j \neq q$$

$$V_j^f = V_j^0 - \frac{z_{jq}}{z_{qq} + Z^f} V_q^0 \quad j \neq q$$

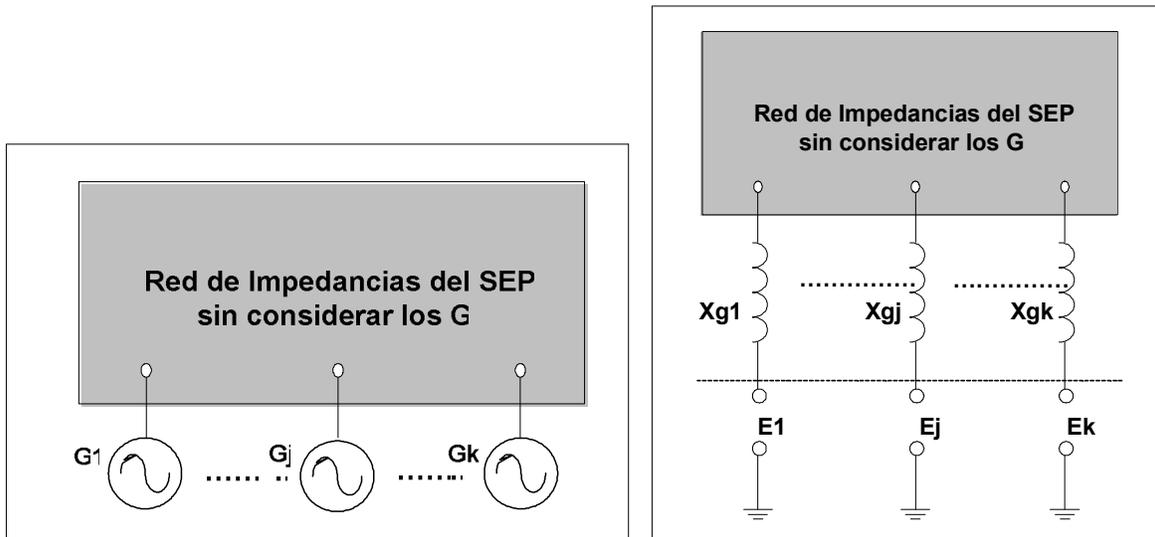
La tensión en la barra fallada q es:

$$V_q^f = Z^f I_q^f = \frac{Z^f}{Z^f + z_{qq}} V_q^0$$

Expresiones que se corresponden con las ya encontradas anteriormente → se valida de esta forma el circuito equivalente analizado.



Dado un SEP en el que k generadores se modelan con una fem detrás de su reactancia (transitoria o subtransitoria):



Si se considera que no hay carga \rightarrow las fem E_j de todos los G son iguales en magnitud y fase \rightarrow los generadores se pueden reemplazar por uno equivalente con tensión interna E , conectado según la figura siguiente:

