

## ESTUDIO TRANSITORIO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO

A continuación presentamos el modelo por fase a utilizarse en los estudios de cortos circuitos que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia.

**Corriente de corto circuito.-** Es el abundante flujo de electrones que fluye por un punto defectuoso mientras dura la falla.

**Modelo.-** Es la representación física de un sistema eléctrico para lo cual se utilizan elementos pasivos ( R, L y C ) y elementos activos ( fuentes AC ).

**Interruptor.-** Equipos diseñados para despejar, en forma rápida, las fallas de sobre corriente y corto circuito ocurridos en un sistema eléctrico.

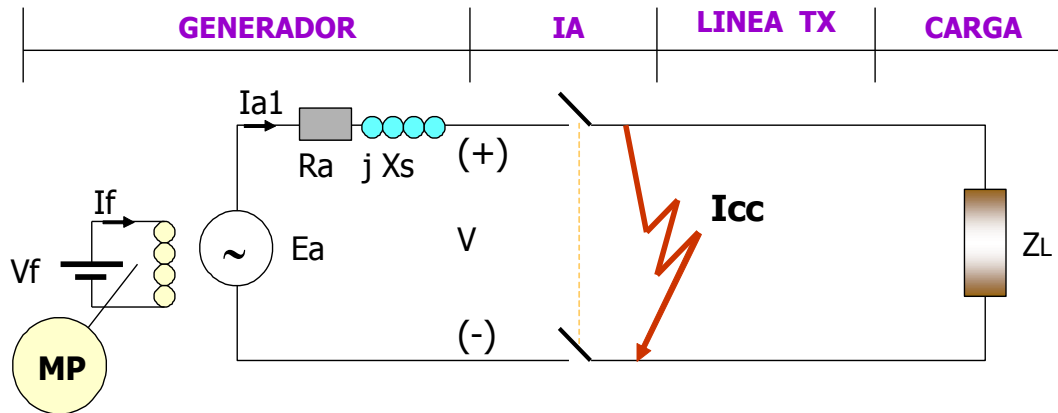


Figura N° 1.- Modelo monofásico del GS y de la corriente de corto circuito

Cuando se produce el corto circuito sucede :

El Generador ve que  $Z_{total}$  cae bruscamente.

En consecuencia el generador inyecta una alta corriente llamado  $I_{cc}$ .

El IA debe despejar la falla de inmediato.

En el momento que sucede el corto circuito los valores de la reactancia sincrónica son reemplazados por los valores de la reactancia subtransitoria  $X_d''$ .

El generador síncrono resulta siendo el elemento de más importancia dentro de todo el sistema eléctrico de potencia (SEP). El GS desarrolla y soporta todas las solicitudes de las cargas manteniendo los niveles de tensión dentro de una franja estrecha de tal manera que no afecte el normal funcionamiento de las cargas garantizando la continuidad y estabilidad del sistema.

En consecuencia el generador síncrono **es el único elemento activo** que proporcionará la corriente de corto circuito al sistema eléctrico de potencia.

## PRUEBAS DE CORTO CIRCUITO TRIFASICO DEL ALTERNADO

Se trata de construir un modelo general que me permita producir diversos cortos circuitos que deben ser analizados con equipos sumamente rápidos denominados oscilógrafos de alta sensibilidad que registrará la evolución de la corriente durante todo el periodo de la falla.

El ensayo es llevado a cabo como sigue:

Aplíquese el corto circuito trifásico a los terminales del generador que inicialmente se halla con tensión nominal y girando en vacío a  $\omega_m$  síncrona.

El oscilógrafo registrará las variaciones de la corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ).

Las  $I_{cc}$  están compuestas por una componente de continua y alterna.

Independientemente de cuando ocurra el levantamiento del corto circuito por el disyuntor todas las componentes de ésta corriente están contenidas en la envoltura. Por tanto para analizar la  $I_{cc}$  bastará analizar a la envoltura que representa a todas las corrientes ocurridas en el corto circuito.

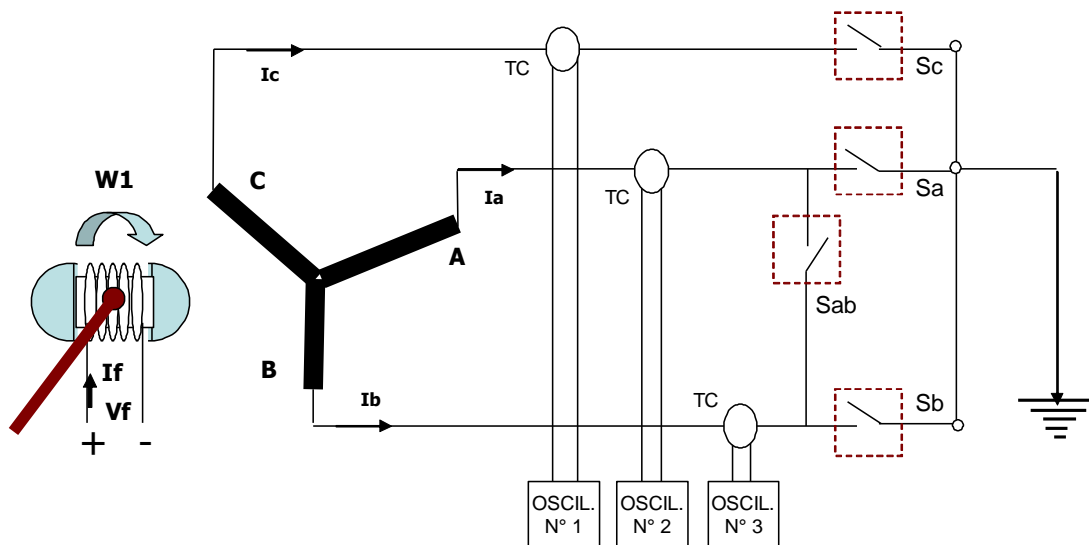


Figura N° 2.- Ensayo de corto circuito trifásico de un generador síncrono

Nótese que la forma de onda de  $I_{cc}$  no es fija. También se puede ver que la  $I_{cc}$  es simétrica, con respecto al eje de tiempo por éste motivo se le conoce como corriente simétrica de corto circuito.

Como el generador sufre la  $I_{cc}$  que inicialmente es muy grande y va decreciendo hasta su valor de régimen permanente, entonces podemos decir que el GS tiene una reactancia interna variable desde un valor pequeño hasta  $X_s$ . Esto es:

$$X_{inicial} < X_{generador} < X_s$$

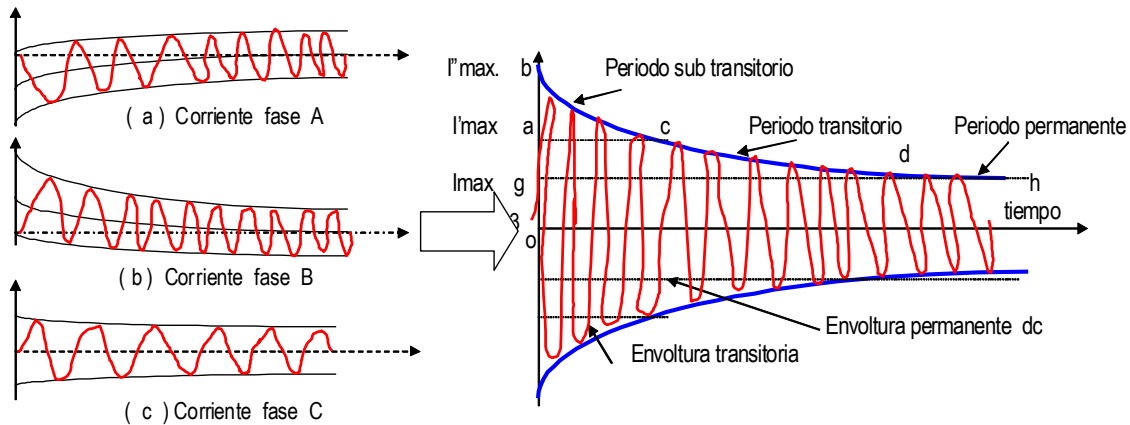


Figura N° 3.- Corrientes de corto circuito y sus componentes.

Como la resistencia interna de los arrollamientos de fase del generador es muy pequeña, en relación con la reactancia interna no se considera en el modelo de corto circuito.

Teniéndose mucha dificultad en el cálculo de la corriente de corto circuito es que la envolvente se divide en tres periodos:

- Periodo sub transitorio.
- Periodo transitorio.
- Periodo de régimen permanente.

Para su mayor entendimiento se estudiará cada periodo y es como sigue:

**Periodo sub transitorio de la corriente de corto circuito y reactancia sub transitoria (x d'')**

**(x d'')** .- El periodo sub transitorio es caracterizado por la región **bc** de la figura N° 3 y es el periodo inicial de la corriente de corto circuito. En este periodo contribuyen las bobinas del estator, bobinado del campo y el circuito de amortiguamiento ubicado en la parte móvil de la máquina (jaula ubicada en la cabeza del polo del rotor). Apenas exista deslizamiento en este bobinado comenzará una circulación de corriente por su jaula seccionada la misma que producirá un flujo adicional impidiendo mayores oscilaciones del rotor principal.

Por tanto el bobinado de amortiguamiento es importante para aumentar la estabilidad de los sistemas eléctricos. En ausencia del bobinado de amortiguamiento no existiría el periodo sub transitorio. Cuando la máquina trabaja en periodo permanente el bobinado de amortiguamiento es como si no existiera, no desarrolla ningún trabajo.

La reactancia sub transitoria ( $X''$ ) está definida como:  $X'' = E/I''$

Siendo :

$E$  = Voltios eficaz línea neutro del G.S antes del corto circuito.

$I'' = I'' \text{ max} / 1.4142$  Valor eficaz de la corriente de corto circuito.

**Periodo transitorio de la corriente de corto circuito y reactancia transitoria (xd')**

**(xd')**.- En ésta zona el decaimiento de la curva es más suave y el tiempo de duración es mucho más prolongado que el sub transitorio. El responsable de este periodo es del arrollamiento del campo principal del generador. Durante el corto circuito, el cambio brusco cambia el estado de la

topología de la red provocando oscilaciones. En éste momento el campo principal hace funcionar a la jaula del bobinado de amortiguamiento, creando una tensión inducida por reacción y por tanto una corriente circulante alterna, esto se produce por las barras del dicho circuito. El arrollamiento de campo es fortalecido por la corriente AC de corto circuito de la jaula del bobinado amortiguador. Finalmente el generador entra a la zona de régimen permanente.

La reactancia transitoria (X') está definida como:  $X' = E/I'$

Siendo:

E = Voltios eficaces fase neutro del G.S antes del corto circuito.

I' = I' max/1.4142 Valor eficaz de la corriente de corto circuito.

**Periodo permanente de la corriente de corto circuito y reactancia síncrona (Xs).**- Este periodo es caracterizado por la zona **dh** de la figura N° 3 nótese que la envoltura coincide con los picos de las ondas sinusoidales. Los corto circuitos deben ser eliminados por el sistema de protección en el periodo sub transitorio, si ésta falla persiste deberá accionar la protección temporizada (de respaldo) que actúa en el periodo transitorio. La reactancia síncrona (Xs) está definida como:  $X = E/I$

Siendo:

E = Voltios eficaz fase neutro del G.S antes del corto circuito.

I = I max /√ 2 Valor eficaz de la corriente de corto circuito.

**Ecuación de la envoltura de la corriente de corto circuito.**- La curva envoltura descrita en la figura N° 3 es representada por la siguiente ecuación.

Tabla N° 1 .- Constantes de tiempo (seg) de los generadores síncronos.					
TIPO DE MÁQUINA	TURBO GENERADORES	GS DE POLOS SALIENTES CON BOBINADO DE AMORTIGUAMIENTO		GS DE POLOS SALIENTES SIN BOBINADO DE AMORTIGUAMIENTO	
		VELOCIDAD DEL ROTOR DEL GENERADOR SINCRONO			
		ALTA 2P> 18	BAJA 2P< 18	ALTA 2P> 18	BAJA 2P< 18
Td " en seg.	0.03	0.03	0.03		
	0.02 -- 0.05	0.02 -- 0.05	0.02 -- 0.05		
Td' en seg.	1.3	1.6	1.6	1.6	1.6
	0.5 ---1.8	0.7 --- 2.5	0.7 -- 2.5	0.7 -- 2.5	0.7 -- 2.5
Tdo' en seg.	10	6	5	6	5
	5 -15	4 -- 10	3 ... 8	4 -- 10	3 -- 8
Tcc en seg.	0.15	0.18	0.22	0.3	0.35
	0.07 -- 0.40	0.10 -- 0.40	0.10 -- 0.40	0.15 -- 0.50	0.20 -- 0.50

$$I(t)_{\text{envoltura}} = (I''_{\text{max.}} - I'_{\text{max.}}) \cdot M + (I'_{\text{max.}} - I_{\text{max.}}) \cdot N + I_{\text{max}}$$

Siendo :

M = exp. (- t / T'') periodo sub transitorio.

N = exp. (- t / T') periodo transitorio.

I'' max. = Es la corriente máxima en el periodo subtransitorio.

- $I'_{max}$ . = Es la corriente máxima en el periodo transitorio.
- $I_{max}$ . = Es la corriente máxima en el periodo de régimen permanente.
- $T''$  y  $T'$  son las ctes. de tiempo de los periodos sub transitorio y transitorio dados en segundos.

A continuación presentamos la tabla N° 1 de los valores de las constantes de tiempo de los generadores síncronos, siendo éstas:

- $Td'$  Cte. de tiempo transitoria en seg.
- $Td''$  Cte. de tiempo sub transitoria en seg.
- $Tdo'$  Cte. de tiempo en vacío en seg.
- $Tcc$  Cte. de tiempo de la componente de CC.

### MODELOS DE LAS SECUENCIAS EN LOS GENERADORES SINCRONOS

Según el teorema del Dr. Charles Fortescue en 1918, un sistema eléctrico debe ser descompuesto en tres sub sistemas eléctricos denominados secuencias: positiva, negativa y cero. Esto lleva a la necesidad de obtener un modelo para cada una de éstas secuencias. Los tres modelos obtenidos son sistemas trifásicos equilibrados, siendo por tanto necesario efectuar el estudio a una sola fase.

**Secuencia positiva.-** Es la única secuencia que dispone de una fuente, y para obtener sus resultados se somete a este ensayo donde el circuito equivalente por fase del generador síncrono conectado en Y está dado por la siguiente expresión, tal como se puede ver en la figura N° 4.

$$E_{a1} = V_{a1} + j X_{d''} I_{a1}$$

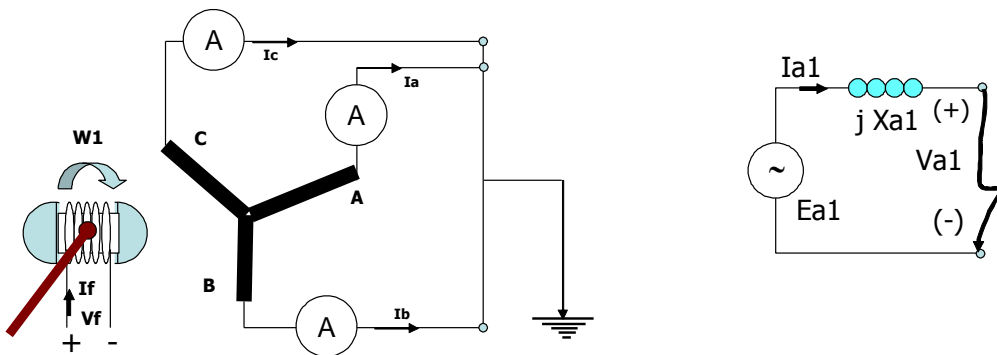


Figura N° 4.- Esquema del corto circuito trifásico y su respectivo modelo de secuencia positiva

Donde :

$E_{a1}$  = Tensión de fase en los terminales del generador girando en vacío.

$V_{a1}$  = Tensión de fase en relación con el neutro.

$I_{a1}$  = Corriente de secuencia positiva para la fase a.

A continuación presentamos la ecuación relacionada con el modelo:

Como el generador es un elemento activo, su representación es hecha por una fuente ideal  $E_{a1}$  atrás de la reactancia subtransitoria.

**Secuencia negativa.-** El defecto que provoca el desbalance es generar la componente de secuencia negativa. Por tanto se debe analizar al generador frente a estas componentes. Para realizar este ensayo se debe hacer la simulación de la figura N° 5

Las condiciones de este ensayo son las siguientes:

El circuito del campo N° 1 debe estar en cortocircuito girando a velocidad síncrona  $W1$ . El sentido de giro debe ser horario, el mismo de la secuencia positiva. Se le aplica otro generador externo que facilita la simulación de ésta secuencia que gira a velocidad síncrona  $W2 = W1$  pero en sentido antihorario (contrario a la secuencia positiva).

En el periodo sub transitorio y transitorio prácticamente no existen en ésta secuencia, por tanto la reactancia de esta secuencia por fase es:

$$X_2 = V_{a2} / I_{a2}$$

Donde:  $V_{a2}$  = Es la tensión leída en la figura N° 5.

$I_{a2}$  = Es la corriente leída en la figura N° 5.

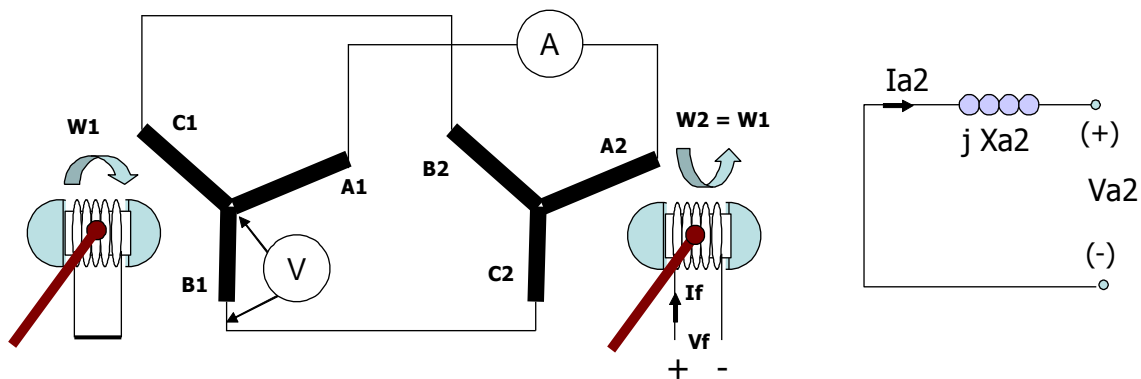


Figura N° 5.- Modelo del corto circuito trifásico y modelo de secuencia positiva

Como el generador es construido perfectamente equilibrado, el campo de su rotor solo podrá generar tensiones equilibradas en secuencia abc. Por tanto el modelo de secuencia negativa es un circuito pasivo sin fuente de tensión. La ecuación que relaciona esta secuencia es:

$$A. \quad V_{a2} = - j X_2 I_{a2}$$

Si los generadores síncronos son de polos salientes con bobinado de amortiguamiento la secuencia negativa es obtenida de la expresión:

$$X_2 = (X_d'' + X_q'') / 2$$

Donde:

$X_d''$  = Reactancia sub transitoria de eje directo del generador.

$X_q''$  = Reactancia sub transitoria de eje en cuadratura del generador.

**Secuencia cero rígidamente aterrado.**- Por el teorema de Fortescue la secuencia cero corresponde a tres fasores en fase. Por tanto para simular esta secuencia el generador debe ser sometido a tensiones iguales en sus arrollamientos, con el campo en corto circuito girando a la velocidad síncrona en el sentido de la secuencia positiva.

Los terminales del generador síncrono son corto circuitados y conectados a otro generador monofásico síncrono tal como se puede observar en la figura N° 6. La tensión aplicada a cada una de las fases es la misma.

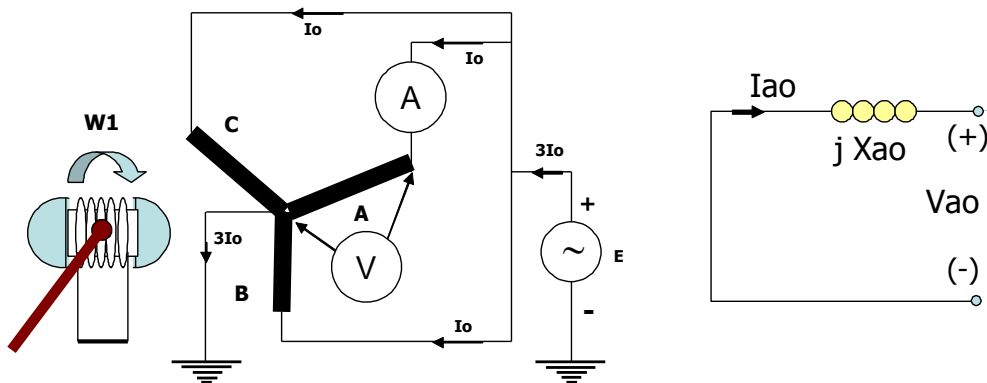


Figura N° 6.- G.S. sometido al ensayo de para obtener la secuencia cero rígidamente aterrado

La reactancia de secuencia cero ( $X_0$ ) está dado por la expresión siguiente.  **$X_0 = E/I_0$**

Donde:

$E$  = Es la tensión leída en la figura N° 6.

$I_0$  = Es la corriente leída en la figura N° 6.

Si los generadores síncronos en relación de la secuencia cero se comporta como un circuito pasivo por tanto la secuencia cero por fase está dado por:

$$V_{ao} = - j X_0 \cdot I_{ao}$$

Donde:

$V_{ao}$  = Tensión de secuencia cero por fase con relación del neutro.

$I_{ao}$  = Corriente de secuencia cero por fase del generador.

La ecuación relativa del circuito equivalente de la figura N° 6 es la reactancia de secuencia cero está ubicada dentro del siguiente intervalo.

$$0.1 X_d'' < X_0 < 0.7 X_d''$$

**Secuencia cero aterrado con una impedancia  $Z_n$ .**- Generalmente los generadores son aterrados a través de una impedancia  $Z_n$ , que es instalada para limitar la corriente de corto circuito monofásico y tierra de los terminales del generador.

A esta reactancia se le conoce con el nombre de reactancia de Peterson. Esta impedancia es conectada entre el punto neutro de la conexión Y y el sistema de aterramiento (malla de puesta a tierra ver figura N° 7). La corriente de secuencia cero pasa por cada fase del generador, en consecuencia la corriente que pasa por  $Z_n$  es  $3 I_o$ .

El potencial del punto  $N_o$  y tierra está dado por:

$$V_{no - tierra} = - Z_n \cdot 3 I_o = - 3 Z_n \cdot I_o$$

Como la corriente del modelo es  $I_{ao}$ , para simular la caída de tensión entre el neutro y tierra la impedancia aparece como  $3 \cdot Z_n$ , el circuito equivalente es visualizado en la figura N° 7. La relación entre la tensión de secuencia cero ( $V_{ao}$ ) y la corriente de secuencia cero ( $I_{ao}$ ) se presentan en el modelo de la figura N° 7.

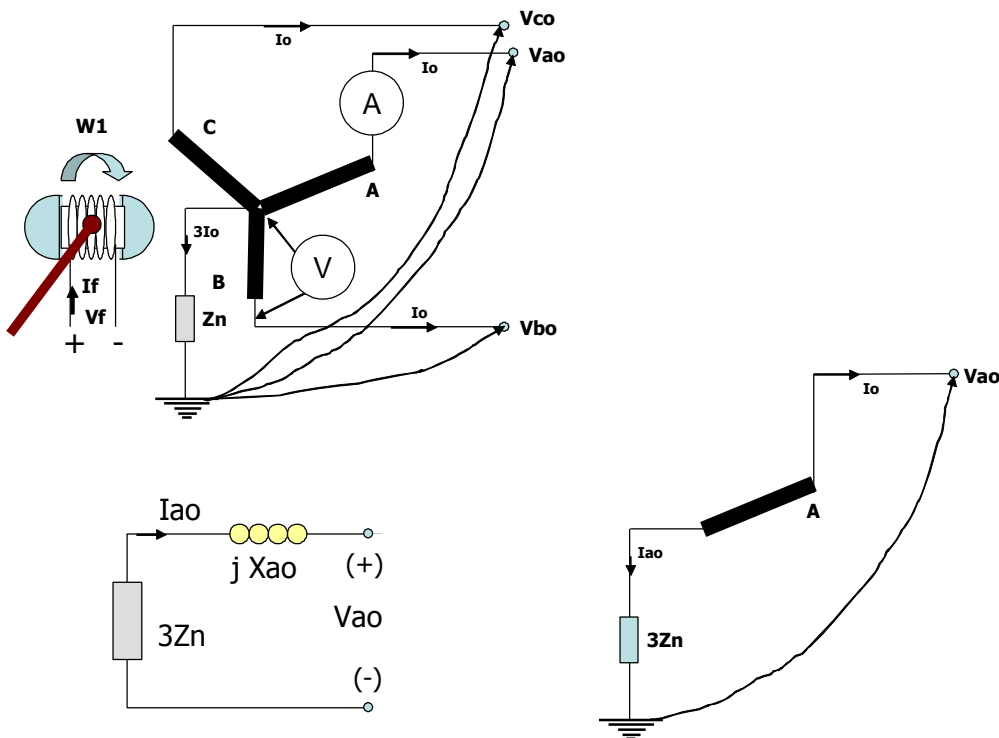


Figura N° 7.- G.S. sometido al ensayo para obtener la secuencia cero a través de impedancia.

Del circuito equivalente podemos afirmar que:  **$V_{ao} = - (jX_o + 3 \cdot Z_n) \cdot I_{ao}$**

La impedancia  $Z_n$  ubicada entre el neutro y tierra del generador no afecta a las componentes de secuencias positivas y negativas si son equilibradas.



**El generador y sus secuencias.-** El generador síncrono, según el teorema de Fontescue está compuesto por las secuencias positiva, negativa y cero.

**Valores típicos de las reactancias de las secuencias en el generador síncrono.-**

Teniendo en cuenta que la diversidad de tipos de generadores hace difícil presentar los valores de placa característicos. Por esta razón es que presentamos la tabla N° 2 con los valores en p.u..

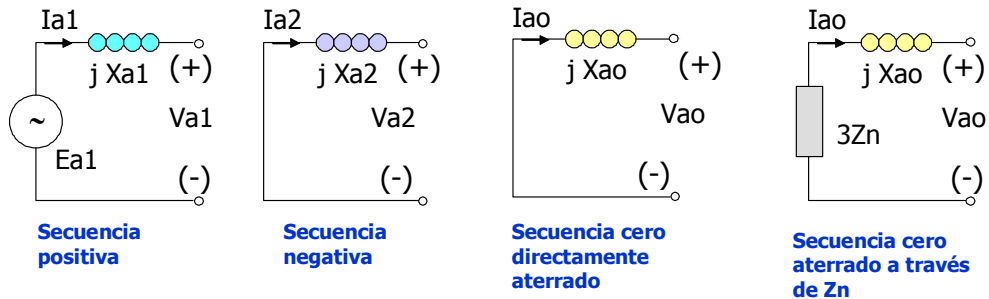


Figura N° 8.- Secuencias positiva, negativa y cero de un generador síncrono.

Tabla N° 2.- Valores típicos de los generadores síncronos.					
TIPO DE MAQUINA	TURBO GENERADORES	GS DE POLOS SALIENTES CON BOBINADO DE AMORTIGUAMIENTO		GS DE POLOS SALIENTES SIN BOBINADO DE AMORTIGUAMIENTO	
		VELOCIDAD DEL ROTOR DEL GENERADOR SINCRONO			
		ALTA 2P < 18	BAJA 2P > 18	ALTA 2P < 18	BAJA 2P > 18
Xd "en %. saturada	12	18	20	25	30
	9 -- 20	14 -- 23	15 -- 25	22 - 35	25 - 40
Xd' en % saturada	18	27	30	27	33
	14 -- 25	20 -- 32	22 -- 36	22 -- 35	25 -- 40
Xd en %. saturada	160	100	100	100	100
	120 -- 200	80 -- 140	75 - 120	40 -- 140	75 -- 125
Relación de corto circuito en vacío Ko	0.6	1	1	1	1
	0.5 -- 0.8	0.7 -- 1.6	0.8 -- 1.2	0.7 -- 1.6	0.8 -- 1.2
Reactancia negativa X2 en %	12	20	24	45	50
	9 -- 20	14 -- 25	15 -- 27	36 -- 63	35 -- 60
Reactancia Cero Xo en %	2 -- 10	3 -- 20	3 -- 22	4 -- 24	4 -- 30

### CORTOCIRCUITOS EN LOS GENERADORES SINCRONOS

Siendo el generador el único elemento activo de un sistema eléctrico, entonces éste será el más afectado en presencia de fuertes perturbaciones y/o corto circuitos. El análisis a realizarse tendrá en cuenta las siguientes consideraciones:

El campo del generador debe girar a la velocidad síncrona y excitado para producir la tensión nominal en sus terminales.  
El circuito deberá estar en vacío.

Los cortocircuitos que van a ser analizados son los siguientes:

Corto circuitos trifásicos ( $3\phi$ ) - Corto circuito equilibrado.

Corto circuitos bifásicos ( $2\phi$ ) - Corto circuito desequilibrado.

Corto circuitos bifásicos a tierra ( $2\phi - t$ ) - Corto circuito desequilibrado

Corto circuitos monofásicos a tierra ( $1\phi - t$ ) - Corto circuito desequilibrado

Para poder realizar los cortocircuitos antes indicados resulta necesario utilizar el siguiente esquema figura N° 9. Los arrollamiento de cada fase está representado por una bobina en serie con una fuente de tensión ideal cuyo valor es igual a la tensión fase - neutro del generador síncrono sin carga.

Aplicándose el teorema del Dr. Charles Fontescue en el cual se plantea que un sistema eléctrico puede ser descompuesto en tres subsistemas denominados secuencias positiva, negativa y cero. La combinación de estas secuencias con la secuencia cero dan origen a tres casos que se presentan a continuación.

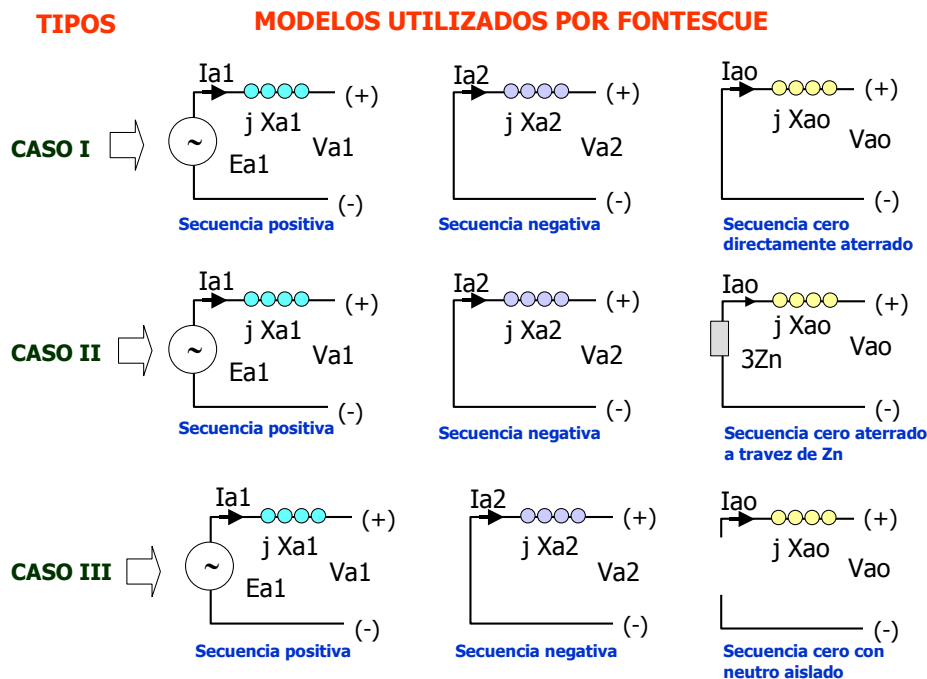


Figura N° 9.- Secuencias positiva, negativa y cero según el caso

Según el tipo de corto circuito ocurrido y teniendo en cuenta el tipo de aterramiento utilizado se pueden plantear los modelos de las secuencias presentadas en la figura N° 9.

Pero para realizar el desarrollo de los cortocircuitos utilizaremos el modelo planteado en el caso II (en el que el generador se halla aterrado mediante un impedancia  $Z_n$ ). Estos cortocircuitos son los siguientes:

**Corto circuitos trifásicos (3φ).**- Los arrollamientos del generador son idénticas y distribuidas convenientemente de modo que al realizar este ensayo nos encontramos con un circuito equilibrado. El sistema presenta:  $V_R = V_S = V_T = 0$  Voltios.

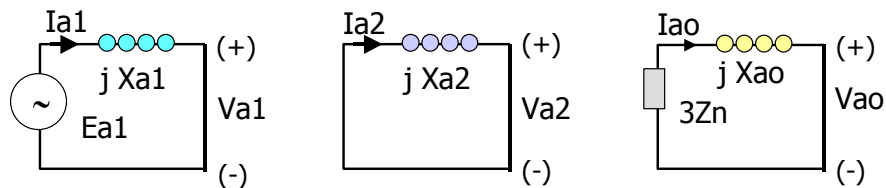
$$V_{a1} = E_{a1} - j.X1.I_{a1} = 0$$

$$V_{a2} = -j X2 I_{a2} = 0$$

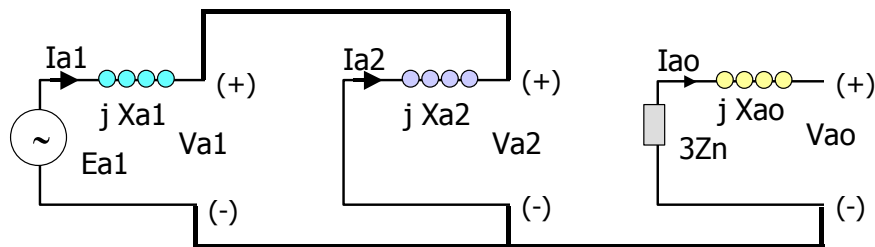
$$V_{ao} = - ( j X_o + 3 Z_n ) I_{ao} = 0$$

Entonces podemos concluir que en el cortocircuito trifásico solamente interviene la secuencia positiva y la corriente de cortocircuito  $I_{a1}$  se puede hallar usando la ecuación siguiente:

$$E_{a1} = j X1. I_{a1}$$



Modelo para hallar la corriente de cortocircuito trifásico



Modelo para hallar la corriente de cortocircuito bifásico aislado

Figura N° 10.- Modelos utilizados en los cálculos de las ICCs trifásico y bifásico aislado.

**Corto circuitos trifásicos (2φ).**- De da cuando el corto circuito se produ-ce entre las fases S y T. Esto impone las siguientes condiciones:  $I_R = 0$ ,  $V_S = V_T$  e  $I_S + I_T = 0$

De las ecuaciones de tensión y corriente  $V_{a1} = V_{a2}$  e  $I_{a1} = I_{a2}$  podemos deducir que los modelos de secuencia positiva y negativa pueden ser conectados en paralelo para el corto circuito bibásico.

Analizando la secuencia cero el cual se halla sin ninguna conexión, puede ser eliminado, la justificación se presenta a continuación:

$$V_{ao} = 1/3 (V_A + V_S + V_S) = 1/3 (V_R + 2 V_S)$$

Del circuito equivalente de secuencia cero se deduce:

$$V_{ao} = - ( j X_o + 3 Z_n ) I_{ao} = 0$$

Por tanto podemos concluir que:

$$0 = 1/3 (V_R + 2 V_S) \quad y \quad V_R = - 2 V_S$$

En este momento la tensión en la fase R es el doble que la fase b.

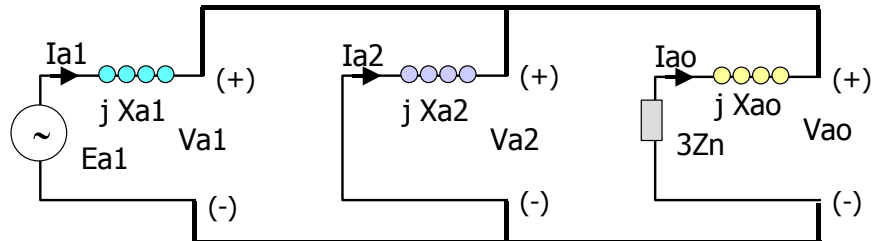
**Corto circuitos trifásicos (2φ-t).**- Las condiciones del defecto de corto circuito bifásico – tierra son:  $I_R = 0$  y  $V_S = V_T = 0$

$$V_{a0} = V_R / 3, \quad V_{a1} = V_R / 3, \quad V_{a2} = V_R / 3$$

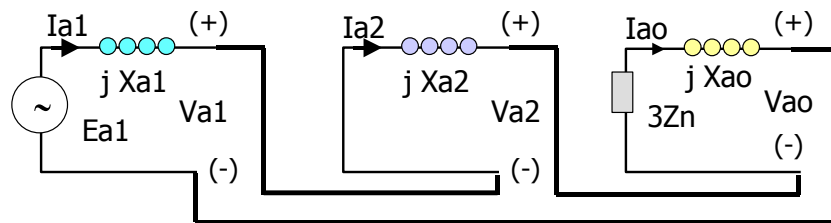
$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = V_R / 3$$

Por el teorema de Fortescue la corriente verdadera de la fase R es igual a la suma de las tres corrientes de las respectivas secuencias esto es:

$$I_R = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (\text{Por la condición del defecto la } I_R = 0)$$



Modelo para hallar la corriente de cortocircuito bifásico - tierra



Modelo para hallar la corriente de cortocircuito monofásico - tierra

Figura N° 11.- Modelos utilizados en los cálculos de las ICCs bifásico y monofásico tierra.

Para satisfacer las condiciones del cortocircuito analizadas de tensión y corriente por fases de las secuencias positiva, negativa y cero el modelo debe ser conectado en paralelo.

**Corto circuitos monofásicos a tierra (1φ - t).**- Si producimos el corto-circuito analizamos las ecuaciones de tensiones en las secuencia individuales encontramos las siguientes condiciones:

$$V_{a0} = - (j X_o + 3Z_n) I_{a0}, \quad V_{a1} = E_{a1} - j X_1 I_{a1}, \quad V_{a2} = - j X_2 I_{a2}$$

Sumando las tensiones de éstas secuencias tenemos

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = - (j X_o + 3Z_n) I_{a0} + E_{a1} - j X_1 I_{a1} - j X_2 I_{a2}$$

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = E_{a1} - (j X_o + 3Z_n + j X_1 I_{a1} + j X_2 I_{a2}) I_{a0}$$

Pero  $V_R = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$  entonces se puede expresar que

$$V_R = E_{a1} - (j X_o I_{a0} + 3Z_n I_{a0} + j X_1 I_{a1} + j X_2 I_{a2})$$

Si aplicamos la condición de defecto  $V_R = 0$  e  $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$

$$\mathbf{E_{a1} = (j X_o + 3Z_n + j X_1 + j X_2) I_{a1}} \quad (\#)$$

Para satisfacer las condiciones vistas en # es que el modelo necesariamente tiene que ser conectado en serie.

### **CAUSAS DE LOS CORTO CIRCUITOS EN LOS SEPs**

Para proyectar un sistema eléctrico es necesario contar con un LAY OUT optimizado, con materiales de comprobada calidad, bien diseñados tomando las previsiones necesarias para la instalación y puesta en servicio. Así mismo el sistema deberá ser expuesto a las mas diversas condiciones e imprevisiones, donde las fallas aparecerán en puntos aleatorios al sistema. En tal sentido, éstas fallas se dividen como sigue:

**Problemas de aislamiento.-** Las tensiones de los conductores del sistema son elevadas, en consecuencia, las fallas con respecto a tierra o entre líneas se debe a:

- . Trabajo inadecuado del aislamiento de los equipos ó estructuras.
- . Material utilizado de mala calidad.
- . Problemas de fabricación.
- . Envejecimiento de del propio material.

**Problemas mecánicos.-** Son provocados por los fenómenos naturales y se afectan a la parte mecánica del sistema eléctrico. Estos pueden ser:

- . Ocasionados por el viento.
- . Ocasionados por la nieve.
- . Contaminación, árboles, humedad, etc.

**Problemas eléctricos.-** Son los fenómenos producidos por los problemas intrínsecos de su naturaleza y son debidos a la operación del sistema, básicamente se pueden presentar:

- . Descargas atmosféricas en forma directa y/o indirecta.
- . Equipos de enclavamiento (maniobras del sistema).
- . Sobre tensión del sistema.

**Problemas de naturaleza térmica.-** Se da con la humedad presente en los conductores y quipos del sistema, disminuyendo la vida útil de los materiales y perjudicando el aislamiento. Se dividen en:

- . Sobre corrientes como consecuencia de las sobrecargas del sistema.
- . Sobre tensión dinámica del sistema.

**Problemas de mantenimiento.-** No respetar los estandares de ingeniería donde se desarrollaran los criterios y conceptos mínimos aceptables para optimizar el trabajo. Los mayores problemas se producen por:

- . Sustitución inadecuada de partes de los equipos.
- . Personal no entrenado y calificado.
- . Piezas de reposición no adecuados.
- . Falta de control de calidad en la compra de los materiales.
- . Inspección no adecuada de las redes.

**Problemas de otra naturaleza.-** Se refiere a diversas circunstancias que se presentan y no han sido previstas tales como:

- . Actos de vandalismo.
- . Incendios.
- . Inundaciones.
- . Accidentes de naturalezas varias.

Tablas N° 3.- Ocurrencia de diversos cortos circuitos en los SEPs			
Tabla 3.1.- Ocurrencia de los defectos en un sistema eléctrico		Tabla 3.3.- Ocurrencia de los corto circuitos permanentes y temporales.	
Sector del sistema eléctrico	Ocurrencias en %		
Generación	6	Corto circuito monofásico – t	Ocurrencias en %
Sub estaciones	5	Permanente	4
Líneas de transmisión	89	Temporales	96
Tabla 3.2.- Ocurrencia de los corto circuitos en %			
Tipo de corto circuito	Ocurrencias en %		
Trifásico	6		
Bifásico	15		
Bifásico – tierra	16		
Monofásico -- tierra	63		

### MOTOR SINCRONO

Una máquina síncrona puede operar como motor y/o generador síncrono las características de funcionamiento son dados por el sentido del flujo de la energía eléctrica (P y Q), de allí que sucede que:

- . Generador síncrono en operación correcta (entrega P y Q a la red).
- . Motor síncrono en operación correcta (entrega Q y recibe P de la red).

Cuando trabaja como motor su velocidad del rotor es mantenida por la energía eléctrica tomada de la red. La corriente eléctrica de la red entra a las bobinas de la armadura del motor **creando un campo girante** que se acopla y arrastra al campo magnético producido por la excitación del rotor.

Por tanto el acoplamiento de dos campos magnéticos hacen que el rotor gire a la velocidad síncrona. El motor síncrono es usado generalmente para cargas pesadas.

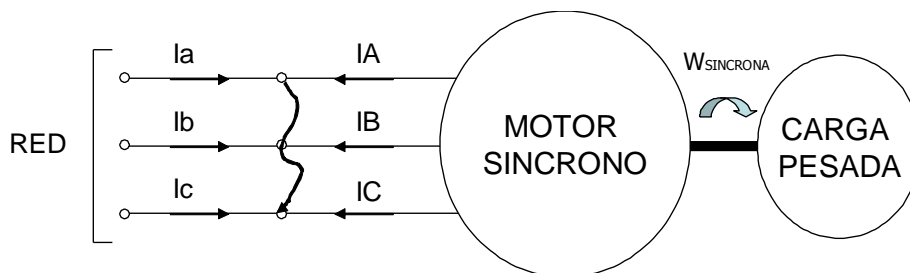


Figura N° 12.- Modelos utilizados en los cálculos de las ICCs bifásico y monofásico tierra.

El peso propio del rotor y la carga forman en conjunto, una masa muy grande, girando a la velocidad síncrona con una **alta inercia rotacional**.

**Motor síncrono frente a un corto circuito en la red eléctrica.-** Cuando esto ocurre la alta inercia de su rotación hace que su rotor continúe girando induciendo tensiones en su armadura que a su vez pasan a reemplazar el defecto con una corriente de cortocircuito proveniente del motor. Por tanto durante el corto circuito, el motor síncrono pasa a operar como generador. Este generador ya no es síncrono pues su velocidad va disminuyendo más y más hasta pararse.

Debido a la alta rapidez en el sistema de protección del motor síncrono, se considera solamente la corriente inicial del corto circuito proveniente del motor síncrono.

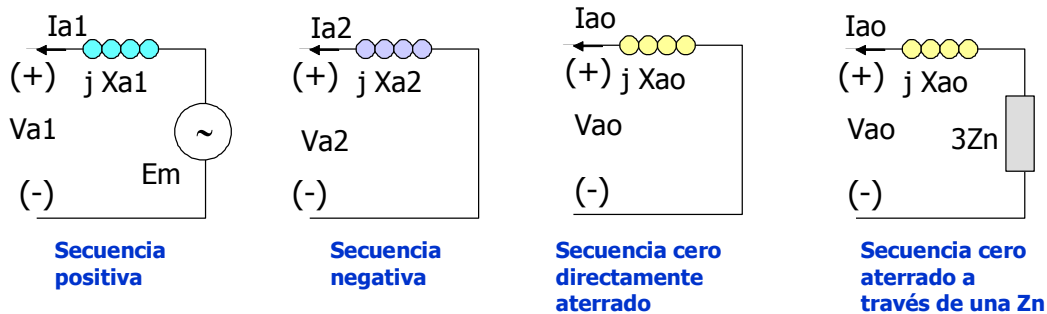


Figura N° 12.- Modelos utilizados en los cálculos de las ICCs bifásico y monofásico tierra.

Por tanto el modelamiento del circuito equivalente del motor síncrono por fase es la misma que el generador síncrono, considerando solamente la inversión de la corriente eléctrica.

A continuación presentamos los circuitos equivalentes por fase de las secuencias : Positiva, negativa y cero. Para realizar el análisis hacerlo trabajar como si fuese en generador síncrono trifásico con una fuente  $E_m$ . El motor se convierte, durante un tiempo muy pequeño, en un generador aportando energía a la red.

## MOTOR ASINCRONO

El motor asíncrono también se le llama motor de inducción. La velocidad de giro del rotor es menor que la velocidad síncrona (o de campo girante creado por los arrollamientos del estator). Esta diferencia de velocidad produce un deslizamiento del rotor induciendo corrientes en las barras de la jaula del rotor ( ó en las espiras de las bobinas del rotor cuando se trata de un rotor bobinado).

Estas corrientes de reacción del rotor crean un campo girante que acompaña, con un cierto desfaseamiento, respecto al campo girante del estator haciendo girar al rotor del motor de inducción.

En este motor el campo girante del rotor es originado por la excitación proveniente del estator, y éste a su vez toma la energía eléctrica de la red que alimenta al motor de inducción.

**Motor Asíncrono frente a un corto circuito en la red eléctrica.-** En un corto circuito próximo a los terminales del motor de inducción la tensión de las bobinas del motor deja de existir, consecuentemente dejando casi en forma instantánea, de existir la excitación del rotor.

- .  $E_m$  es la tensión en los terminales del motor antes del defecto.
- .  $X_1$  es la reactancia de dispersión de las bobinas del estator.
- .  $X_2'$  es la reactancia de dispersión de las bobinas del rotor referidas al estator.

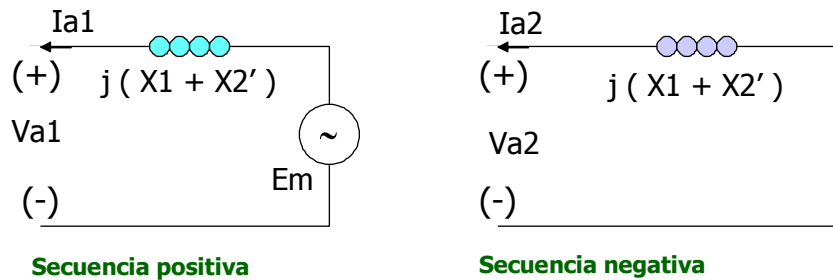


Figura N° 13.- Circuitos equivalentes por fase de las secuencia positiva y negativa del motor de inducción asíncrono polifásico.

El flujo magnético residual existente en el núcleo magnético del rotor se irá desapareciendo observándose un cambio brusco. Su valor va cayendo rápidamente de modo continuo y se extingue en **02 ciclos**. De este modo el motor de inducción de gran tamaño se comporta como un generador eléctrico y contribuye con corriente eléctrica de corto circuito hasta 02 ciclos. Esta contribución se da solo en el periodo sub transitorio, no existiendo los periodos transitorio y de régimen permanente. Si los dispositivos de protección actúan con un tiempo mayor de 02 ciclos el motor de inducción puede no considerarse en el análisis del sistema eléctrico de potencia.

Tabla N° 4.- Valores de $X_1 + X_2'$ de motores de inducción trifásicos	
POTENCIA (HP)	$X_1 + X_2'$
Hasta 5	0.10 - 0.14
may-25	0.12 - 0.16
Mayor de 25	0.15 - 0.17

El valor inicial de la corriente de corto circuito es importante para realizar el análisis de las fuerzas electromagnéticas que actúan en la estructura del motor. De ésta manera presentamos el circuito equivalente por fase de las secuencias del motor asíncrono.

El motor trifásico no tiene secuencia cero o sea su circuito equivalente es abierto. Los efectos resistivos de las bobinas del estator y rotor se desprecian por ser valores muy pequeños. Los valores de  $X_1 + X_2'$  en p.u. tienen como base las reactancias nominales del motor de inducción trifásico y son presentados a continuación.



## FENÓMENOS TRANSITORIOS EN LOS GENERADORES SINCRÓNICOS

Cuando el momento de torsión que se aplica al eje de un generador o su carga cambian repentinamente, siempre hay un estado transitorio, que dura un cierto periodo de tiempo antes de que el generador regrese a su estado estable. Por ejemplo, cuando un generador sincrónico se conecta en paralelo con un sistema de potencia en funcionamiento, inicialmente comienza a girar más rápido y tiene una frecuencia mayor que la del sistema. Una vez que se ha conectado en paralelo, hay un periodo transitorio antes de que el generador se estabilice y funcione con la frecuencia de la línea mientras entrega una pequeña cantidad de potencia a la carga.

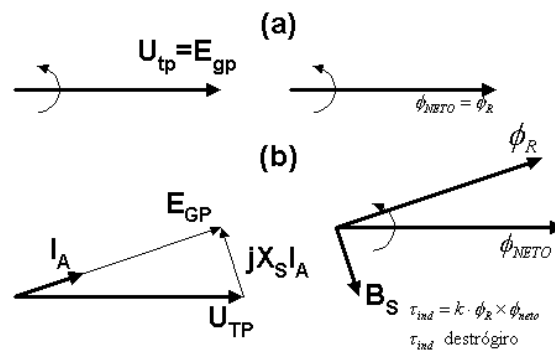


Figura N° 14.- a) Diagrama fasorial y campos magnéticos de un generador en el momento de conectarse en paralelo con un sistema de potencia grande. b) Diagramas fasoriales.

Aquí, el rotor se ha adelantado a los campos magnéticos netos, produciendo un momento de torsión destrógiro. Este desacelera el rotor hasta la velocidad sincrónica del sistema de potencia. Aquí, el generador entrante no proporciona ninguna carga, su corriente del estator es cero,  $E_{gp} = V_{tp}$  y  $\phi_R = \phi_{NETO}$ .

Exactamente a las  $t = 0$ , el interruptor que conecta el generador con el sistema de potencia se cierra, produciendo una circulación de la corriente del estator. Puesto que el rotor del generador todavía está girando más rápido que la velocidad del sistema, continúa adelantándose al voltaje del sistema  $V_{tp}$ . El momento de torsión inducido sobre el eje del generador se expresa por:

$$\tau_{ind} = K\phi_R \times \phi_{neto}$$

La dirección de este momento de torsión es contraria al sentido del movimiento y aumenta a medida que el ángulo de fase entre  $\phi_R$  y  $\phi_{neto}$  (o  $E_{gp}$  y  $V_{tp}$ ) se incrementa. Este momento de torsión, contrario a la dirección del movimiento, desacelera el generador hasta que finalmente este gira a velocidad sincrónica con el resto del sistema de potencia. De manera similar, si el generador hubiera estado girando a una velocidad menor que la velocidad sincrónica cuando se puso en paralelo con el sistema, entonces el rotor habría caído por detrás de los campos magnéticos netos y se habría producido un momento de torsión en el sentido del movimiento sobre el eje de la máquina. Este momento aceleraría el rotor hasta que nuevamente comenzara a girar a velocidad sincrónica.

## Fenómenos transitorios por cortocircuito en los generadores sincrónicos

La condición transitoria más severa que puede suceder en un generador sincrónico es la situación en que repentinamente los tres terminales son puestos en corto. En un sistema de potencia, dicho corto se denomina falla. Hay varios componentes de corriente presentes en un generador sincrónico en corto, que se describirán a continuación. Los mismos efectos se presentan para condiciones transitorias menos severas, como cambios de carga, pero ellos son mucho más obvios en el caso extremo de un cortocircuito.

Cuando ocurre una falla en un generador sincrónico, el flujo de corriente resultante en sus fases puede aparecer como se ve en la figura 15.

Con anterioridad a la falla, solamente voltajes y corrientes de AC estaban presentes dentro del generador, en tanto que después de la falla, se encuentran corrientes tanto de AC como de DC. ¿De dónde provienen las corrientes continuas? Recuerde que el generador sincrónico es básicamente inductivo - está constituido por un voltaje generado internamente, en serie con la reactancia sincrónica. Recordemos también, que una corriente no puede cambiar instantáneamente en un inductor. Cuando se presenta la falla, la componente de corriente alterna salta a un valor muy alto, pero toda la corriente no puede cambiar en ese instante. La componente de cc es suficientemente grande, como para que la suma de los componentes de AC y DC sea igual a la corriente alterna que circula inmediatamente antes de la falla. Como los valores instantáneos que tiene la corriente en el momento de la falla son diferentes en cada fase, la magnitud del componente de cc será diferente en cada una de ellas.

Estos componentes de cc decaen bastante rápido, pero inicialmente promedian entre un 50% y un 60% del flujo de AC, un instante después de producirse la falla. Por tanto, toda la corriente inicial es característicamente 1.5 ó 1.6 veces la componente de AC sola.

La componente simétrica de AC se ilustra en la figura 15 y puede dividirse aproximadamente en tres periodos: durante más o menos el primer ciclo, después de que se presenta la falla, la corriente AC es muy grande y disminuye rápidamente. Este periodo de tiempo se suele denominar periodo subtransitorio. Después que termina, la corriente continua disminuyendo a menor velocidad hasta que por fin alcanza un estado estacionario. Al periodo de tiempo durante el cual disminuye a menor velocidad se le denomina periodo transitorio y al tiempo después de que alcanza el estado estacionario se le conoce como periodo del estado estacionario.

Si la magnitud efectiva de la componente AC de corriente se grafica como una función de tiempo sobre una escala logarítmica, es posible observar los tres periodos que corresponden a la corriente de falla. Tal gráfica se puede ver en la figura donde es posible determinar las constantes de tiempo de la disminución de cada periodo. La corriente efectiva AC que circula por el generador durante el periodo subtransitorio se denomina corriente subtransitoria y se representa con el símbolo  $I''$ . Esta corriente se origina en las bobinas amortiguadoras de los generadores sincrónicos.

- Subtransitoria de cada reactancia.
- Reactancia transitoria.
- Reactancia de estado estable.
- Componente DC aperiódica.
- Contribución total de cada componente.

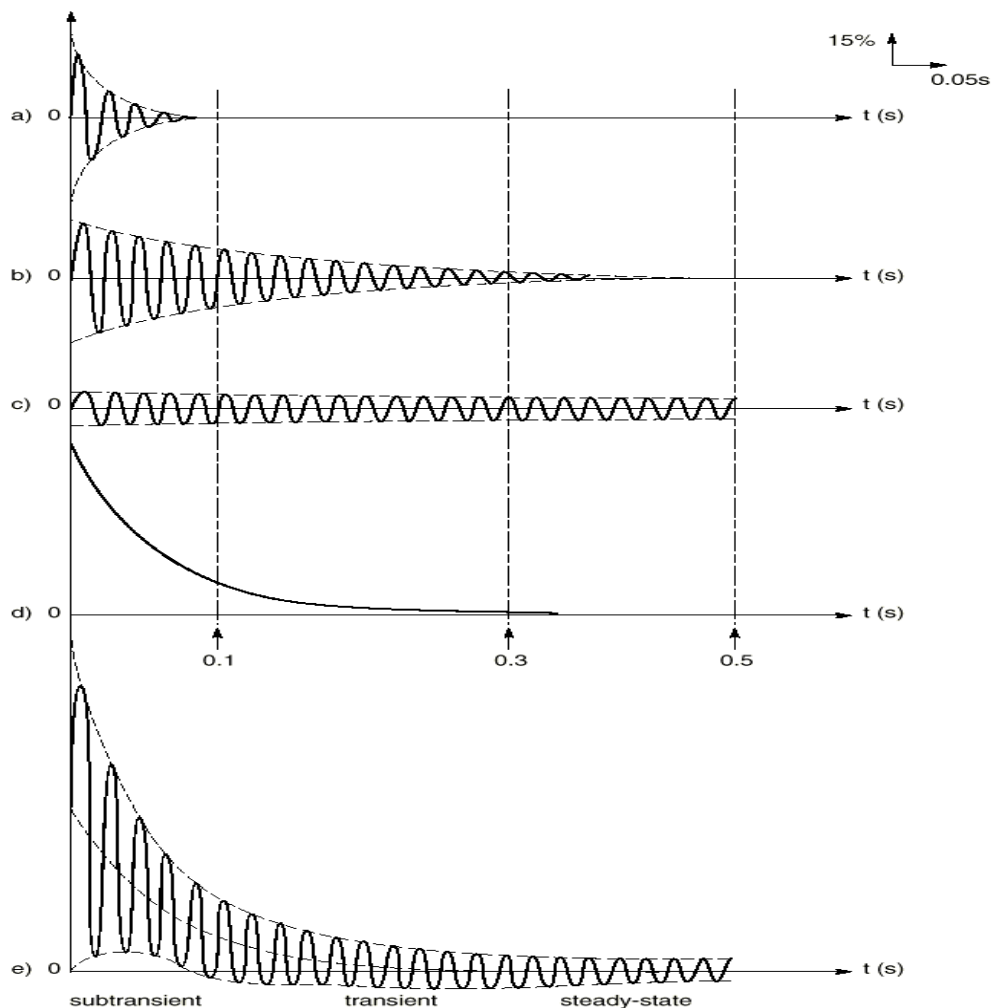


Figura N° 15.- Corrientes de falla totales como una función de tiempo, durante una falla trifásica en los bornes de un generador sincrónico.

La constante de tiempo de la corriente subtransitoria, se representa con el símbolo  $T''$  y puede determinar a partir de la pendiente de la corriente subtransitoria en la gráfica de la figura 15. Esta corriente, con frecuencia, puede ser hasta unas 10 veces el tamaño de la corriente de falla de estado estacionario. La corriente efectiva que circula por el generador durante el periodo transitorio se denomina corriente transitoria y se representa por medio del símbolo  $I'$ . Se origina en una componente de DC, de corriente inducida en el circuito de campo, en el momento del corto.

Esta corriente de campo aumenta el voltaje generado internamente y produce un incremento en la corriente de falla.

Puesto que la constante de tiempo del circuito de campo de DC es mucho más larga que la constante de tiempo de las bobinas amortiguadoras, el periodo transitorio dura mucho más que el periodo subtransitorio. Esta constante de tiempo se representa por el símbolo  $T'$ . La corriente efectiva promedio, durante el periodo transitorio, es frecuentemente como cinco veces la corriente de falla de estado estacionario. Después del periodo transitorio, la corriente de falla

alcanza la condición de estado estable; se representa por el símbolo  $I_{SS}$  y su magnitud aproximada se calcula dividiendo la componente de frecuencia fundamental del voltaje generado internamente por su reactancia sincrónica.

$$I_{CC} = \frac{E_{GP}}{X_s} \text{ estado estable}$$

La magnitud efectiva de la corriente de falla de AC en un generador sincrónico varía continuamente en función del tiempo. Si  $I''$  es la componente subtransitoria de corriente en el instante mismo de la falla e  $I'$  es la componente momentánea de corriente en el momento de la falla, e  $I_{CC}$  es la corriente de falla en estado estable, entonces la magnitud efectiva de la corriente en cualquier momento después de que sucede la falla en los terminales es

$$I(t) = (I'' - I')e^{-t/T''} + (I' - I_{CC})e^{-t/T'} + I_{CC}$$

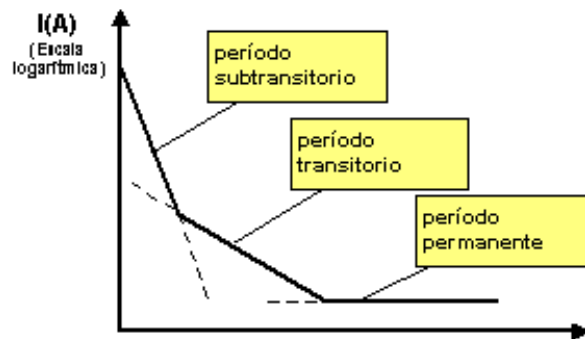


Figura N° 16.- Gráfica semilogarítmica de la magnitud de la componente de ca de la corriente de falla, como una función del tiempo. Las constantes de tiempo transitoria y subtransitoria del generador pueden determinarse a partir de dicha gráfica.

Se acostumbra definir las reactancias subtransitorias y transitorias de un generador sincrónico, para describir cómodamente las componentes subtransitorias y transitorias de la corriente de falla. La reactancia subtransitoria de un generador sincrónico se define como la relación entre la componente fundamental de la tensión generada internamente y la componente subtransitoria de la corriente al comienzo de la falla. Se expresa por

$$X'' = \frac{E_{gp}}{I''} \text{ subtransitoria}$$

En forma similar, la reactancia transitoria de un generador sincrónico se define como la relación de la componente fundamental de  $E_{gp}$  con la componente de la corriente  $I'$  al comienzo de la falla. Este valor de corriente se halla extrapolando la región subtransitoria de la figura 3.52, volviendo a la hora cero:

$$X' = \frac{E_{gp}}{I'} \text{ transitoria}$$

Para efectos de dimensionar equipo protector, frecuentemente se supone que la corriente subtransitoria es  $E_{gp}/X''$ , y que la corriente transitoria  $E_{gp}/X'$  puesto que estos son los valores máximos que las respectivas corrientes podrán alcanzar.

Obsérvese que en el estudio anterior, sobre fallas, se supuso que las tres fases estaban en corto simultáneamente. Si la falla no involucra las tres fases en la misma forma, entonces se necesitan métodos de análisis más complejos para lograr comprender esto. Estos métodos (conocidos como componentes simétricos) están por fuera de los alcances de este libro.

### Ejemplo

Un generador sincrónico trifásico de 60 - Hz, con conexión de estrella, de 100 MVA y 13.8 kV está funcionando con voltaje nominal en vacío cuando se produce una falla trifásica en sus terminales. Sus reactancias, en por unidad, en la propia base de la máquina son:  $X_s = 1.0$ ,  $X' = 0.25$ ,  $X'' = 0.12$ . Y sus constantes de tiempo  $T' = 0.04$  seg. y  $T'' = 1.10$  seg. La componente inicial de cc en esta máquina promedia el 50% de la componente inicial de AC.

- ¿Cuál es la componente de AC de corriente en este generador en el instante siguiente al momento de falla?
- ¿Cuál es la corriente total (AC más DC) que fluye por el generador, inmediatamente después de que se produce la falla?
- ¿Cuál será la componente de AC de la corriente, después de dos ciclos?
- ¿Cuál será la componente de AC de la corriente, después de cinco ciclos ?

### Solución

La corriente de base de este generador se expresa mediante la ecuación

$$I_{L \text{ base}} = S_{\text{base}} / 1.7321 \cdot V_{\text{base}} = 100 \text{ MVA} / 1.7321 \times 13.8 \text{ kV} = 4184 \text{ A.}$$

las corrientes subtransitorio, transitoria y de estado estable, en por unidad son

$$I''_{p.u.} = \frac{E_g}{X''} = \frac{1.0}{0.12} = 8.333 \text{ p.u.}$$

$$I'' = (8.333)(4,184 \text{ A}) = 34,900 \text{ A}$$

$$I'_{p.u.} = \frac{E_A}{X'} = \frac{1.0}{0.25} = 4.00 \text{ p.u.}$$

$$I' = (4.00)(4,184 \text{ A}) = 16,700 \text{ A}$$

$$I_{CC \text{ p.u.}} = \frac{E_A}{X} = \frac{1.0}{1.0} = 1.00 \text{ p.u.}$$

$$I_{CC} = (1.00)(4,184 \text{ A}) = 4,184 \text{ A}$$

La corriente de AC inicial de la corriente es  $I'' = 34,900 \text{ A}$ .

La corriente total (AC más DC) al comienzo de la falla es  $I_{\text{tot}} \approx 1.5 \times I'' = 52,350 \text{ A}$

La componente de AC de corriente como función del tiempo se expresa por medio de la ecuación

$$I(t) = (I'' - I')e^{-t/T''} + (I' - I_{CC})e^{-t/T'} + I_{CC}$$

$$= 18,200e^{-t/0.04s} + 12,516e^{-t/1.1s} + 4,184 A$$

En dos ciclos,  $t = \frac{1}{30} s$ , la corriente total es

$$I\left(\frac{1}{30}\right) = 7,910A + 12,142 + 4,184A = 24,236A$$

Después de dos ciclos, la componente transitoria de corriente claramente es la más grande y en esta oportunidad está en el periodo transitorio del cortocircuito. A los 5 ciclos, la corriente baja a

$$I(5) = 0 A + 133 A + 4,184 A = 4,317 A$$

Esto hace parte del periodo de estado estable del cortocircuito.

**Tarea domiciliaria:**

Utilizando los parámetros de los 08 generador sincrónicos de la tabla siguiente con conexión de estrella, están funcionando con voltaje nominal en vacío cuando se produce una falla trifásica en sus terminales. Sus reactancias, en por unidad, en la propia base de la máquina.

Utilizando el mismo procedimiento del problema anterior se le solicita hallar:

- ¿Cuál es la componente de AC de corriente en este generador en el instante siguiente al momento de falla?
- ¿Cuál es la corriente total (AC más DC) que fluye por el generador, inmediatamente después de que se produce la falla?
- ¿Cuál será la componente de AC de la corriente, después de dos ciclos?
- ¿Cuál será la componente de AC de la corriente, después de cinco ciclos ?

PARÁMETROS DE LAS MÁQUINAS SÍNCRONAS INSTALADAS EN EL SEIN VALORES REFERIDOS A LA BASE DE LA MAQUINA													
No	GRUPO	Tipo	No de Grupos	Tensión (kV)	S (MVA)	cosφ	(RPM)	GD^2 (Tn-m^2)	H(s)	Xd (p.u.)	X'd (p.u.)	X''d (p.u.)	Xq (p.u.)
01	MATUCANA	H	2	12.50	80.00	0.75	450		2.90	1.200	0.240	0.180	0.780
02	HUAMPANI	H	2	10.00	22.40	0.70	720		1.61	1.380	0.290	0.180	0.700
03	SANTA ROSA BBC_2_3	TG	2	10.00	18.40	0.80	3600	2.12					
04	SANTA ROSA BBC_4	TG	1	13.80	28.50	0.80	3600	2.85	1.77	2.160	0.228	0.152	2.090
05	HUINCO	H	4	12.50	85.00	0.76	514	588.00	2.20	1.350	0.320	0.200	0.810
06	MANTARO I	H	3	13.80	120.00	0.95	450	1811.13	4.19	1.036	0.345	0.203	0.702
07	MANTARO II	H	4	13.80	120.00	0.95	450	1811.13	4.19	1.036	0.345	0.203	0.7024
08	RESTITUCION	H	3	13.80	82.50	0.85	200	5000.00	3.32	1.017	0.296	0.208	0.568

ME III 11 FENOMENOS TRNASITORIOS DE MAQUINAS SINCRONAS

No	X'q (p.u.)	X''q (p.u.)	Xp (p.u.)	XL (p.u.)	T'do (s)	T'd (s)	T''do (s)	T'd (s)	T''qo (s)	T''q (s)	Ta (s)	R2 (p.u.)	X2 (p.u.)	Ro (p.u.)	Xo (p.u.)	Ra	Rn
01				0.110	5.330		0.053		0.070							0.399	4300.800
02				0.110	5.330		0.064		0.070							0.410	
03																	
04	0.380	0.152	0.155	0.120	9.600	1.010	0.045	0.030	0.460	0.033			0.152		0.082		
05				0.120	5.330		0.060		0.070							0.002	2692.800
06	0.690	0.221	0.190	0.160	7.297	2.430	0.117	0.075	0.070	0.055	0.140	0.021	0.212	0.003	0.120	0.101	2268.431
07	0.700	0.221	0.239	0.160	7.297	2.430	0.070	0.060	0.070	0.055	0.140	0.021	0.212	0.003	0.120	0.101	2268.431
08	0.650	0.238	0.185	0.130	5.500	1.600	0.075	0.053		0.054	0.169	0.031	0.224	0.006	0.130	0.002	1299.622