

## Fallas Asimétricas

### 7.1 Introducción

Una gran proporción de las fallas en los sistemas eléctricos de potencia son asimétricas, fallas asimétricas a través de impedancias (cortocircuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos a tierra) o de conductores abiertos (una y dos fases abiertas); por lo que resulta de especial interés su estudio dentro de los sistemas de potencia.

La presente sección, persigue establecer los fundamentos teóricos, del cálculo de fallos asimétricos, ya sea por cortocircuitos, fallos asimétricos a través de impedancias (fallas shunt) o conductores abiertos (fallas serie). El motivo esencial del estudio de las condiciones asimétricas de falla, consiste en los tremendos desbalances que se pueden presentar en las tensiones y corrientes del sistema de potencia, que pueden ser de especial daño a los elementos del sistema de potencia.

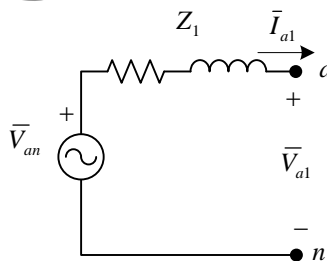
Debido a que la falla asimétrica da lugar a la circulación de corrientes desequilibradas, resulta sumamente ventajoso que sea atacado este problema por medio de la teoría de componentes simétricas para analizar las condiciones del sistema.

### 7.2 Modelo de Secuencia de un Generador

El estudio de las fallas asimétricas, resultan especialmente sencillo con el uso de la Teoría de Componentes Simétricas; en donde se plantea que ante condiciones asimétricas impuestas en el sistema, este queda confinado al estudio de componentes de secuencia positiva, negativa y cero.

Para poder potenciar el estudio de las fallas simétricas, supóngase un generador sincrónico, el cual se considera impulsado a velocidad nominal, y excitado de forma tal que en operación en vacío, la tensión en terminales del mismo, es la tensión nominal de la máquina. Por ahora se supondrá por simplicidad que se trata de una máquina de rotor liso, la cual se encuentra operando en condiciones no saturada. La máquina se encuentra en conexión estrella con el neutro conectado a tierra a través de una impedancia  $Z_n$ . Por la teoría de componentes simétricas, se conoce que en secuencia positiva, el modelo por fase del generador, queda simplemente confinado a la impedancia de secuencia positiva de la máquina y el voltaje interno inducido.

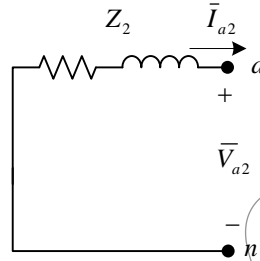
**Figura 1. Modelo Equivalente de un Generador por Fase en Secuencia Positiva**



$$V_{a1} = V_{an} - Z_1 I_{a1} \quad (1)$$

La red de secuencia negativa para el generador sin carga, no posee F.E.M. y esta formada solo por las impedancias del generador que presenta a las corrientes de secuencia negativa. En secuencia negativa, la barra de referencia de la red también es el neutro del generador.

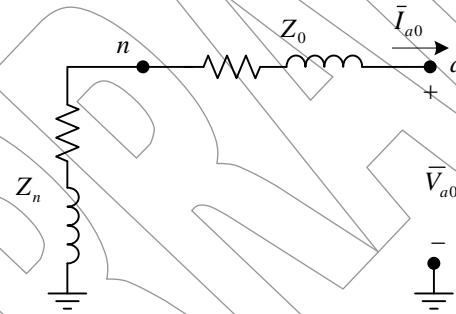
**Figura 2. Modelo Equivalente por Fase del Generador Sincrónico para Secuencia Negativa**



$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (2)$$

El modelo de la red equivalente para el generador sin carga en secuencia negativa, no contiene F.E.M y esta constituido por las impedancias de secuencia cero del generador y la impedancia de puesta a tierra. La barra de referencia de esta red de secuencia en este caso es tierra.

**Figura 3. Modelo Equivalente por fase de un generador en Secuencia Cero**



$$V_{a0} = -(3Z_n + Z_0) I_{a0} \quad (3)$$

Ahora bien, las ecuaciones (1), (2) y (3) son obtenidas para describir el comportamiento del generador ante cualquier condición asimétrica de operación. Por tanto, si se considera a las fallas asimétricas, una condición de desbalance terminal la aplicación de esta ecuaciones de componentes simétricas es completamente valedero.

En forma matricial estas ecuaciones pueden ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{an} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para cada tipo de falla, se puede emplear la ecuación (4), debido a que esta modela completamente el comportamiento del generador en sus componentes simétricas ante condiciones desbalanceadas.

### 7.3 Fallas Asimétricas Simples

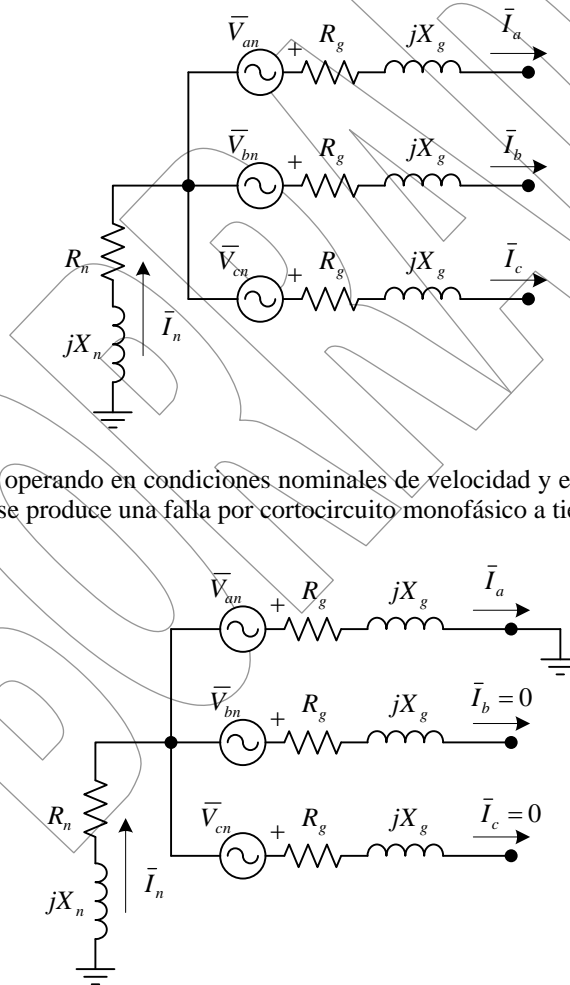
Las fallas asimétricas, consisten en condiciones desbalanceadas que ponen en riesgo la operatividad del sistema de potencia, que en función de su naturaleza pueden ser clasificadas en fallas series y shunt. Pero una especial diferenciación debe ser hecha, entre las fallas simples, con respecto a las evolutivas y las simultaneas, cuyo tratamiento amerita técnicas diferentes a las simples. En la presente sección, se realizará el desarrollo teórico para el tratamiento y solución de fallas asimétricas simples, donde se supone una ocurrencia individual y aislada de las fallas. Las fallas tratadas serán:

- Fallas Shunt:
  - Cortocircuito Monofásico
  - Cortocircuito Bifásico
  - Cortocircuito Bifásico a Tierra
- Fallas Series:
  - Una Fase en Abierto
  - Dos Fases en Abierto

### 7.4 Falla Línea a Tierra Simple en un Generador en Vacío

Supóngase que se tiene un generador sincrónico de rotor liso, en conexión estrella con neutro puesto a tierra a través de una impedancia  $Z_n$ .

Figura 4. Esquema de un Generador Sincrónico



El generador se encuentra operando en condiciones nominales de velocidad y excitación en vacío ( $I_a = I_b = I_c = 0$ ); cuando súbitamente se produce una falla por cortocircuito monofásico a tierra en la fase  $a$ .

Las condiciones terminales impuestas por esta falla en el terminal de la fase  $a$ , provoca que por ella circule la corriente de cortocircuito monofásica, mientras que en las otras fases, se preserva la condición de vacío.

$$\begin{aligned} I_a &= I_{cc1\phi} \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A})$$

Por otra parte, si la falla se considera por contacto directo, es decir sin la existencia de impedancia de arco ( $Z_f = 0$ ), la tensión de la fase  $a$ , esta al mismo valor de tierra ( $V_g = 0$ ); mientras que las otras fases adquirirán valores diferentes.

$$V_a = 0 \quad (\text{A})$$

Una vez definidas las condiciones terminales impuestas por la falla, es evidente el desbalance en los parámetros de voltaje y corriente. Para analizar las condiciones desbalanceadas durante la falla, se hace uso de la teoría de componentes simétricas.

En el caso de las corrientes ( $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ ), estas pueden ser descompuestas en sus componentes simétricas ( $I_{a0}$ ,  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ ) mediante la relación (5).

$$\mathbf{I}_{\text{sim}} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{I}_{\text{asim}} \quad (5)$$

donde:

$$\mathbf{I}_{\text{asim}} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_{\text{sim}} = \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

expandiendo la notación matricial resulta:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

Si se introducen en (6) las condiciones terminales de corriente impuestas por la falla monofásica a tierra en la fase  $a$ .

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Si la expresión (7) se resuelve, se obtiene la descomposición en componentes simétricas de las corrientes asimétricas.

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \quad (8)$$

De lo antes expuesto, se evidencia que la falla monofásica las componentes simétricas poseen el mismo valor, siendo un tercio de la corriente de la fase fallada.

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} \quad (9)$$

Ahora bien, si la condición impuesta para las componentes simétricas de la corriente (9) se introduce en la ecuación (4).

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_{an} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \\ I_{a1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Realizando las respectivas multiplicación y substracción de las matrices indicadas, se llega a la igualdad de dos matrices columnas. Remultiplicando ambas matrices de columna por la matriz fila unitaria.

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = -Z_0 I_{a1} + V_{an} - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a1} \quad (10)$$

El término derecho de la expresión (10), por teoría de componentes simétricas de tensión se conoce:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \\ V_c &= V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \end{aligned} \quad (11)$$

donde la primera ecuación de (11), por las condiciones terminales impuestas por la falla es cero ( $V_a = 0$ ).

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0 \quad (12)$$

de modo que la expresión (10) resulta

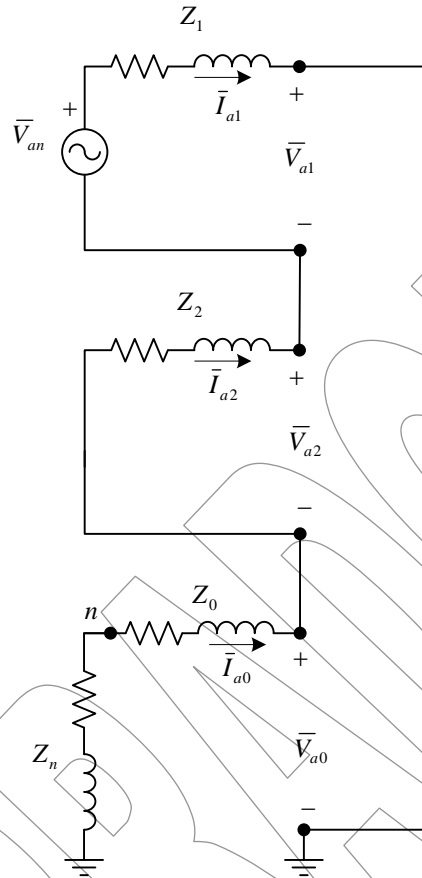
$$0 = -Z_0 I_{a1} + V_{an} - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a1} \quad (13)$$

donde fácilmente se puede espejar la componente de secuencia positiva de la corriente de la fase a ( $I_{a1}$ ).

$$I_{a1} = \frac{V_{an}}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (15)$$

Las ecuaciones (9) y (15), son las ecuaciones fundamentales para el calculo de la corriente de falla monofásica, ya que permiten realizar el calculo de las componentes simétricas para determinar la tensiones y corrientes en la falla.

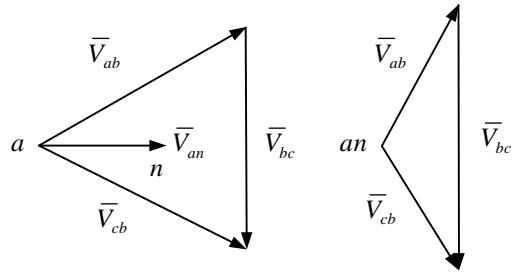
Ahora bien, si las redes de secuencia del generador se conectan en serie, cumple con el principio establecido en la ecuación (9), de que las tres corrientes de secuencia sean iguales, al tiempo que se satisface la aditividad de las caídas de tensiones.



Si las tres redes de secuencia se conectan en serie, se puede demostrar con la simple aplicación de la Teoría de Circuitos Eléctricos que se satisfacen las condiciones de tensión y corrientes antes establecidas para la secuencia en una falla monofásica. Bajo esta conexión serie, la tensión en terminales de cada uno de los modelos de secuencia es la componente simétrica de la tensión  $V_a$  ( $V_{a1}$ ,  $V_{a2}$ ,  $V_{a0}$ ). La interconexión de los modelos de secuencia en serie, es un mecanismo muy sencillo, para la deducción las ecuaciones necesarias para la resolución de la falla simple a tierra; ya que todas las ecuaciones pueden ser fácilmente derivadas por la aplicación de la Teoría de Circuitos a la conexión de las redes de secuencia.

Por otra parte, las implicaciones de la ecuación (15) son maravillosas. Si el neutro del generador no esta puesto a tierra, se puede interpretar como una conexión entre el neutro y tierra de impedancia infinita; por tal motivo el modelo de secuencia cero esta en abierto y  $Z_0$  es infinito. De tal forma, que de (15) se desprende que bajo la condición antes impuesta, no puede haber la circulación de componentes simétricas de corrientes ( $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = 0$ ). Por tanto, no circula corriente por la fase a, ya que la corriente en esa fase ( $I_a$ ) es la suma de sus componentes simétricas ( $I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$ ) y todas son nulas.

$$I_{cc1\phi} = \frac{3V_{an}}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (16)$$



BORRADOR