

# Efectos de la falla a tierra monofásica interna en un generador síncrono trifásico con aterrizamiento de alta impedancia

Eduardo Humberto Guerrero-Flores

*Fecha de recepción: 15 enero 2013 – Fecha de aprobación: 14 agosto 2013*

## RESUMEN

Esta investigación expone, inteligiblemente, el efecto eléctrico en la tensión trifásica fundamental de corriente alterna cuando sucede sólo una falla a tierra monofásica en alguna de las barras (espiras) del devanado de armadura de un generador síncrono de potencia con neutro conectado a tierra a través de un limitador de corriente de falla de alta impedancia. Se estudia un caso práctico artificial aplicando únicamente los modelos matemáticos teóricos en estado estable de la máquina síncrona operando en vacío en el dominio de la frecuencia, porque este método simplificado, comprueba la innecesaria elaboración de un análisis de falla por redes de secuencia y componentes simétricas.

**Palabras Clave:** Aterrizamiento, detección de falla eléctrica, estator, generador, generación de energía, limitador de corriente de falla.

## Effects by internal single ground fault on a three-phase power synchronous generator with high impedance grounded

### ABSTRACT

This research exposes, intelligibly, the electrical effect on the alternating current fundamental three-phase voltage when only one single ground fault happens in any bars (loops) of armature winding of a synchronous generator power with neutral grounded via a high impedance fault current limiter. It studies an artificial scenario applying mathematical theoretical models of synchronous machine at no-load steady state on frequency-domain, because this simplified method, check the unnecessary elaboration of the failure analysis by sequence networks or symmetrical components.

**Keywords:** Electrical fault detection, fault current limiter, generator, grounding, power generation, stator.

---

Candidato a Doctor en Ciencias Naturales y Biopsicosociales, Maestro en Administración Empresarial e Ingeniero Electricista. Jefe de Departamento de Mantenimiento Eléctrico en la Central Hidroeléctrica Aguamilpa-Solidaridad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Correo: [eduardo.guerrero@cfe.gob.mx](mailto:eduardo.guerrero@cfe.gob.mx). Tel: (01-311) 215-4510, Río Ingenio # 10, Fracc. Lomas de la Cruz, Tepic, Nayarit, México C.P. 63037.

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de marzo de 2014. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 17, No. 2, 2013, ISSN 1665-529-X.

## INTRODUCCIÓN

El generador síncrono trifásico (en adelante llamado sólo como “generador”) es la máquina eléctrica rotatoria empleada actualmente para producir energía eléctrica a gran escala por las compañías que prestan el servicio de suministro de energía demandada por la región.

Este generador es de un tamaño proporcional a la potencia de diseño, sin embargo, su dimensión se le debe principalmente al nivel de tensión eléctrica de generación, porque este parámetro determinará el volumen necesario de aislamiento dieléctrico primario del devanado de armadura (inducido) que satisfará la seguridad en el entorno.

Los efectos que causan las fallas eléctricas en los sistemas de potencia frecuentemente las estudian sólo especialistas, diseñadores o investigadores, porque los fenómenos electromagnéticos que se concatenan son complejos y los resultados obtenidos son de inutilidad cotidiana; no obstante, cuando se experimentan fallas eléctricas internas de generadores la perspectiva es distinta, porque los resultados tienen relevancia en la vida operativa de la máquina.

La más común de las fallas internas de un generador es la pérdida puntual de aislamiento primario en algún punto de una bobina del devanado de armadura, lo que probablemente provocará el aterrizado del componente energizado. A este evento se denomina como “falla a tierra monofásica del devanado de armadura”.

La prevención ante la posibilidad de una falla eléctrica en estos generadores, que potencialmente desenlazarán en siniestros y pérdidas dentro de la industria, será insertar un limitador de corriente de falla de alta impedancia eléctrica (en adelante llamado sólo como ‘alta impedancia’) en el aterrizamiento del neutro del devanado de armadura trifásico.

Sin embargo, con el empleo de la alta impedancia en el aterrizamiento del generador, debe identificarse al menos el efecto básico que sucederá en la tensión trifásica durante el acontecimiento de la falla a tierra monofásica interna, y así, convivirlo con la detección y protección oportuna.

Entonces, el propósito de esta investigación, es la caracterización de la consecuencia de una falla a tierra monofásica interna reconocida desde el aspecto de la parametrización de la tensión trifásica.

## Construcción del devanado de armadura del generador

La construcción del devanado de armadura del generador es fundamental para determinar la tensión trifásica inicial e identificar los elementos que participan en el fenómeno.

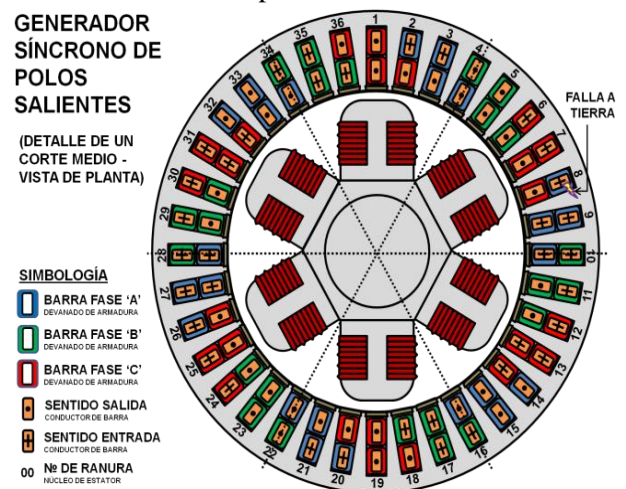
**Distribución del devanado de armadura.** El devanado de armadura de grandes máquinas síncronas se diseña con varias ramas o ramales en paralelo para dividir la capacidad (potencia) de trabajo, reducir pérdidas por calentamiento (Efecto Joule) y mejorar la eficiencia eléctrica (Fitzgerald, et al., 2005; Pyrhönen, et al., 2008).

De acuerdo a lo citado en el párrafo anterior:

- Por funcionalidad, el gran cuerpo del devanado debe ser estático, entonces, debe alojarse en las ranuras del núcleo del estator, y,
- Por manufactura, el devanado se conforma de espiras preformadas bipartidas, en otras palabras, de pares de barras preformadas.

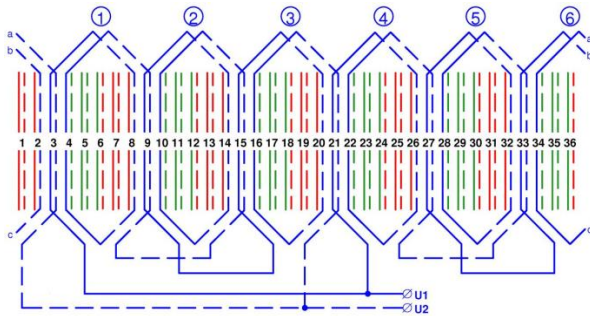
En este análisis se ejemplifica un devanado de armadura trifásico imbricado fraccionario (paso de bobina recortado en 1 ranura) a doble capa de 6 polos con 2 grupos polares por fase de 4 bobinas cada uno (Rodríguez-Pozueta, 2010), alojado en ranuras del núcleo del estator de un generador de 1 MVA @ 2.4 kV.

En la Figura 1 se muestra la distribución física del devanado constituido por barras.



**Figura 1.** Corte medio de devanados de armadura y de campo de la vista de planta del generador de polos salientes.

En la Figura 1 (Rodríguez-Pozueta, 2010) se ejemplifica la representación gráfica de la distribución del mismo devanado de armadura.



**Figura 1.** Diagrama trifilar con fase “A” desarrollada del devanado de armadura.

Esta distribución puede describirse en la siguiente tabla 1.

**Tabla 1.** Distribución del devanado de armadura en ranuras del núcleo.

		Fase					
		A		B		C	
Ramal		1A	2A	3B	4B	5C	6C
Terminal fase		U1		V1		W1	
Nº barra	Posición en la ranura	Nº ranura					
1	Boca	3	21	11	29	7	25
2	Fondo	8	26	16	34	12	30
3	Boca	4	22	12	30	8	26
4	Fondo	9	27	17	35	13	31
5	Fondo	15	33	23	5	19	1
6	Boca	10	28	18	36	14	32
7	Fondo	14	32	22	4	18	36
8	Boca	9	27	17	35	13	31
9	Boca	15	33	23	5	19	1
10	Fondo	20	2	28	10	24	6
11	Boca	16	34	24	6	20	2
12	Fondo	21	3	29	11	25	7
Terminal neutro		U2		V2		W2	

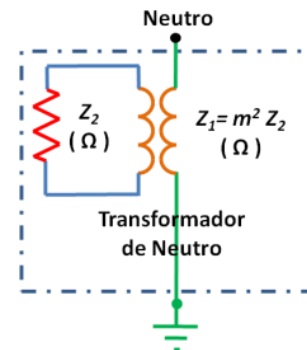
Como este es un devanado de armadura de doble capa, para denotar el montaje dentro de la ranura, en la Tabla 1 se denomina la posición “Boca” cuando en la Figura 1 la barra se representa por una línea sólida y la posición “Fondo” cuando es una línea punteada. Note que los ramales son simétricos, eso significa que el devanado posee trayectorias paralelas por fase con tensión y potencia eléctricas similares.

**Aterrizamiento de alta impedancia para el devanado de armadura de generador.** Las máquinas síncronas están expuestas al acontecimiento de fallas que involucran corrientes eléctricas extremadamente altas que pueden causar daños capitales o siniestros, así que para protegerlas, se les instala un limitador de corriente de alta impedancia.

Estos limitadores son dispositivos resistivos que se insertan directa o indirectamente en el aterrizamiento del neutro del devanado de armadura trifásico para limitar la corriente de falla circulante por tierra a un valor teórico máximo de 10 A.

En máquinas de capacidades menores se instalan resistencias de potencia directamente en el neutro, porque este tipo de dispositivo es de un tamaño constructivo proporcional al valor de resistencia necesario.

En máquinas de capacidades grandes se instalan transformadores de distribución conectando su devanado primario directamente en el neutro y el devanado secundario a resistencias de potencia de tamaño reducido (Figura 3).



**Figura 2.** Diagrama del limitador de corriente de alta impedancia conectado indirectamente al neutro del generador.

Este efecto eléctrico de alta impedancia se explica a continuación (Guerrero-Flores, 2009).

Se aplican las Leyes de Faraday-Lenz y Ampere (Fraile-Mora, 2008), para un transformador ideal:

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

Aplicando la Ley de Ohm a los elementos de la Ecuación 1, la impedancia del primario es:

$$Z_1 = \frac{E_1}{I_1} = \frac{m \times E_2}{\frac{I_2}{m}} = m^2 \frac{E_2}{I_2} = m^2 Z_2 \quad (2)$$

La Ecuación 2 define que la impedancia en el devanado secundario de un transformador se verá reflejada en el devanado primario como el producto de su valor original con un factor igual al cuadrado de la Relación de Transformación.

**Tensión inducida en vacío en el devanado de armadura del Generador en estado estable**

**Tensión distribuida en un ramal del devanado de armadura.** Para calcular los valores de FEM inducida en el devanado de la Figura 2, en el dominio de la frecuencia, se usará una parte del Método  $E_{GF}$  (Guerrero-Flores, 2012).

Se calcula la tensión inducida media por barra  $E_{barra}$  (véase Apéndice B).

- $k_d = \frac{1}{2 q \text{sen} \left( \frac{\pi}{6q} \right)} = \frac{1}{2 \times 2 \times \text{sen} \left( \frac{\pi}{6 \times 2} \right)} = \mathbf{0.9659}$

- $k_p = \text{sin} \left( \frac{\pi}{2} \frac{y_1}{y_p} \right) = \text{sin} \left( \frac{\pi}{2} \frac{5}{6} \right) = \mathbf{0.9659}$

- $E_{barra} = \frac{E_{devanado}}{N_{barras} k_d k_p} = \frac{\frac{2400}{\sqrt{3}}}{12 \times 0.9659 \times 0.9659} = \frac{1385.64}{11.1956} = \mathbf{123.767 V}$

Se calcula la posición angular eléctrica por barra de cada ramal (Par de polos= $2\pi=360^\circ$ e).

**Tabla 2.** Posición angular eléctrica por barra de cada ramal del devanado de armadura en ranuras del núcleo.

Nº barra	Desplazamiento en ranuras $x$	Ángulo eléctrico $\rho_p = \pi \frac{x}{y_p}$	
		rad	°e
1	0	0	0
2	5	$\frac{5\pi}{6}$	150
3	1	$\frac{\pi}{6}$	30
4	6	$\pi$	180
5	12	$2\pi$	0
6	7	$\frac{7\pi}{6}$	210
7	11	$\frac{11\pi}{6}$	330
8	6	$\pi$	180
9	12	$2\pi$	0
10	5	$\frac{5\pi}{6}$	150
11	1	$\frac{\pi}{6}$	30
12	6	$\pi$	180

Se calcula la tabla de valores acumulados de FEMs inducidas por barra (Pérez-Espinoza, 2007).

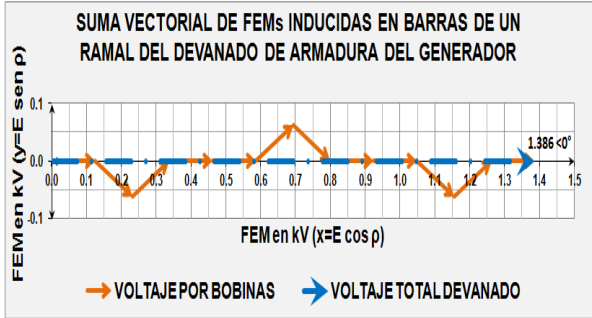
**Tabla 2.** FEMs Acumuladas por Barra y Ramal de Fase del Devanado de Armadura del Generador en Estado Estable

Nº	Ubicación		Desplazamiento barra			FEM inducida	
	Montaje	Polaridad	En ranuras	En ángulo (° eléct)	Ángulo corregido (° eléct)	Magnitud (V)	Ángulo (° eléct)
1	Boca	+	0	0	0	123.77	0
2	Fondo	-	5	150	330	239.10	345
3	Boca	+	1	30	30	338.14	0
4	Fondo	-	6	180	0	461.90	0
5	Fondo	+	12	0	0	585.67	0
6	Boca	-	7	210	30	695.62	5.10
7	Fondo	+	11	330	330	800.04	0
8	Boca	-	6	180	0	923.81	0
9	Boca	+	12	0	0	1047.58	0
10	Fondo	-	5	150	330	1156.42	356.93
11	Boca	+	1	30	30	1261.95	0
12	Fondo	-	6	180	0	1385.71	0

El valor final obtenido es la FEM inducida en el devanado por fase  $E_{devanado}$  es correspondiente a su valor nominal.

El diagrama de la suma vectorial reflejada en las 2 últimas columnas de la

Tabla 2 está representado en la Figura 3.



**Figura 3.** Diagrama fasorial de FEMs inducidas en barras de un ramal del devanado de armadura del Generador.

Es importante considerar que este procedimiento acumuló la FEM inducida  $E_{devanado}$  de la terminal de fase a la terminal de neutro.

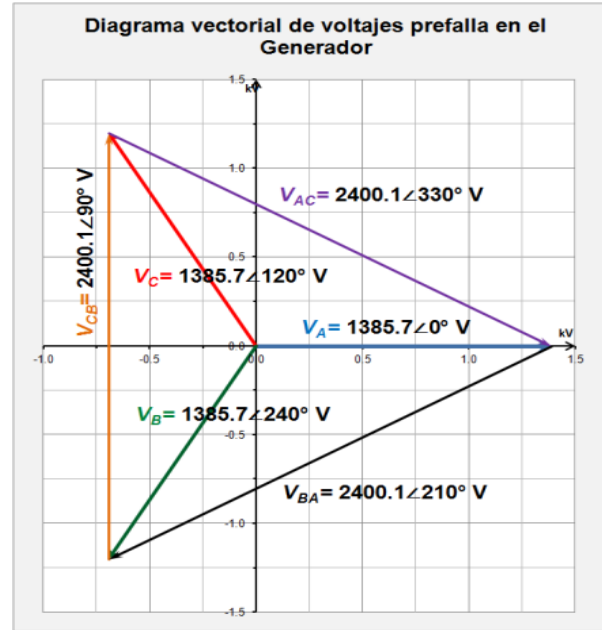
**Tensión de línea equivalente en el devanado de armadura.** Se comprobó que todos los ramales del devanado de armadura son simétricos, por lo tanto, con el valor calculado de FEM inducida  $E_{devanado}$  se representa vectorialmente la tensión trifásica balanceada en estado estable.

La Figura 5 representa la tensión equivalente trifásica balanceada con la referencia de fase A en  $0^\circ$  eléctricos.

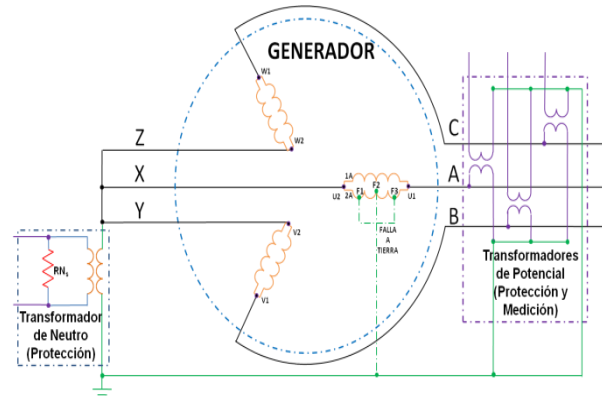
**Ocurrencia de la falla a tierra monofásica interna en el devanado de armadura del Generador.** A la ocurrencia de una falla a tierra monofásica en un punto del devanado de armadura las condiciones de la tensión trifásica de operación en vacío en estado estable del generador se modifican sustancialmente. Se analizan los efectos en la tensión de este tipo de falla en sólo tres casos no simultáneos marcados en el diagrama de la Figura 6.

**Análisis de la tensión de falla a tierra monofásica interna en el ramal 2A de la fase A.** Por el origen de las cifras calculadas en sentido fase a neutro en la Tabla 3, en adelante, por convencionalidad son empleadas como cantidades complejas conjugadas e identificadas por un asterisco en superíndice (\*), y

por facilidad, se considera incluido el efecto de la impedancia propia del generador.



**Figura 4.** Diagrama fasorial de tensión trifásica balanceada del devanado de armadura del Generador.



**Figura 5.** Diagrama esquemático de un generador trifásico de doble ramal por fase con aterrizamiento de alta impedancia por transformador de neutro con falla a tierra monofásica interna en el ramal 2A de la fase A (en 'F1' al 83.3%, o en 'F2' al 50%, o en 'F3' al 25%).

**Primer caso de falla a tierra monofásica interna al 83.3% del ramal 2A de la fase A.** Para la falla a tierra monofásica interna al 83.3% (final de la barra 10) del ramal 2A de la fase A, punto F1 en la Figura 5, se desarrollan los cálculos de los valores de fase (línea a tierra).

El voltaje de fase en prefalla de la terminal U2 a la terminal U1 es:

$$\begin{aligned} V_A^* &= 1385.71 \angle 0^\circ \text{ V} \therefore V_A = (V_A^*)^* \\ &= (1385.71 \angle 0^\circ)^* \\ &= 1385.71 \angle 0^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

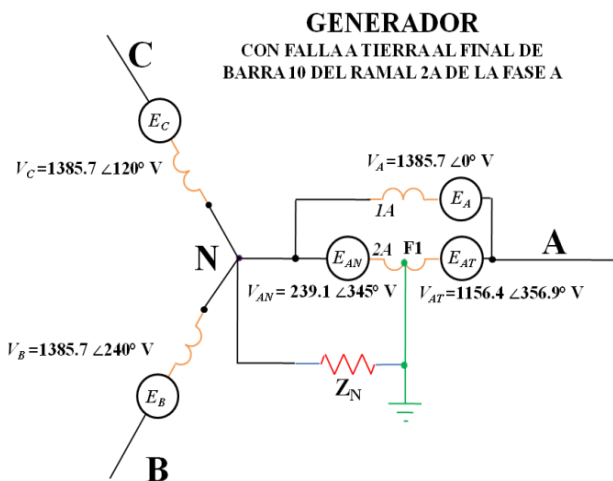
El voltaje de fase en prefalla de la barra 10 del ramal (punto F1) a la terminal U1 es:

$$\begin{aligned} |V_{AT}| &= |1156.42| \cup \angle V_{AT} = \angle V_{Barra\ 10} - \\ &\quad \angle V_{Devanado} = 356.93^\circ - 0^\circ = 356.93^\circ \\ V_{AT}^* &= 1156.42 \angle 356.93^\circ \\ &= 1156.42 \angle -3.07^\circ \text{ V} \\ \therefore V_{AT} &= (V_{AT}^*)^* = (1156.42 \angle -3.07^\circ)^* \\ &= 1156.42 \angle 3.07^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

El voltaje de fase en prefalla de la terminal U2 a la barra 10 del ramal (punto F1) es:

$$\begin{aligned} V_{AN}^* &= V_A^* - V_{AT}^* \\ &= 1385.71 \angle 0^\circ \\ &\quad - 1156.42 \angle 356.93^\circ \\ &= 239.11 \angle 15.01^\circ \text{ V} \\ \therefore V_{AN} &= (V_{AN}^*)^* = (239.11 \angle 15.01^\circ)^* \\ &= 239.11 \angle -15.01^\circ \\ &= 239.11 \angle 344.99^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Con las tensiones en prefalla calculadas, se elabora el circuito simplificado del generador en falla, mostrado en la Figura 6.



**Figura 6.** Diagrama simplificado de la falla a tierra ubicada al final de la barra 10 del ramal 2A (señalada como F1) de la fase A del devanado de armadura.

El voltaje de fase en postfalla para la fase A, considerando que el ramal 1A está sano, es:

$$\begin{aligned} V_A' &= V_{AT} = V_A - V_{AN} \\ &= 1385.71 \angle 0^\circ - 239.11 \angle 344.99^\circ \\ &= 1156.42 \angle 3.07^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

El voltaje de fase en postfalla para la fase B es:

$$\begin{aligned} V_B' &= V_B - V_{AN} \\ &= 1385.71 \angle 240^\circ \\ &\quad - 239.11 \angle 344.99^\circ \\ &= 1465.87 \angle -129.07^\circ \\ &= 1465.87 \angle 230.93^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

El voltaje de fase en postfalla para la fase C es:

$$\begin{aligned} V_C' &= V_C - V_{AN} = 1385.71 \angle 120^\circ \\ &\quad - 239.11 \angle 344.99^\circ \\ &= 1563.98 \angle 126.21^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

El voltaje de fase en postfalla para el neutro es:

$$\begin{aligned} V_N' &= -V_{AN} = 239.11 \angle (344.99 - 180)^\circ \\ &= 239.11 \angle 164.99^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

El voltaje de línea (línea a línea) en postfalla para las fases AC es:

$$\begin{aligned} V_{AC}' &= V_A - V_C = 1156.42 \angle 3.07^\circ \\ &\quad - 1563.98 \angle 126.21^\circ \\ &= 2400.17 \angle -30^\circ \\ &= 2400.17 \angle 330^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

El voltaje de línea en postfalla para las fases BA es:

$$\begin{aligned} V_{BA}' &= V_B - V_A \\ &= 1465.87 \angle 230.93^\circ \\ &\quad - 1156.42 \angle 3.07^\circ \\ &= 2400.17 \angle -150^\circ \\ &= 2400.17 \angle 210^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

El voltaje de línea en postfalla para las fases CB es:

$$\begin{aligned} V_{CB}' &= V_C - V_B = 1563.98 \angle 126.21^\circ \\ &\quad - 1465.87 \angle 230.93^\circ \\ &= 2399.98 \angle 90^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

Con las tensiones postfalla calculadas, se elabora el diagrama vectorial de las tensiones por la falla a tierra, representado en la Figura 8.



Segundo caso de falla a tierra monofásica interna al 50% del ramal 2A de la fase A. Para la falla a tierra monofásica interna al 50% (al final de la barra 6), es decir, a la mitad del ramal 2A de la fase A, punto F2 en la Figura 5, solo se presentan los resultados.

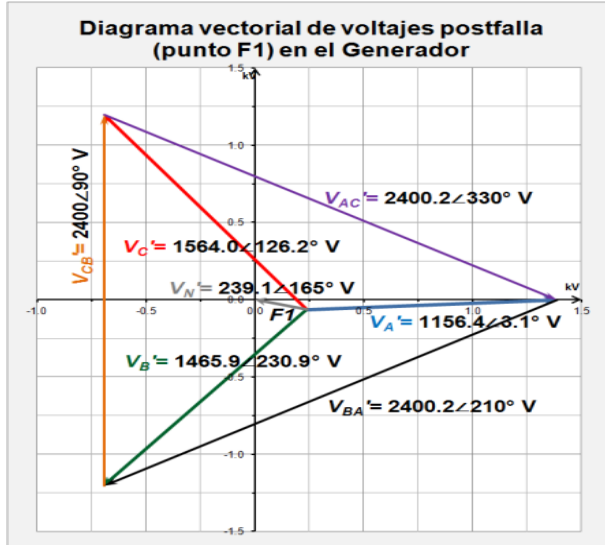


Figura 7. Representación de la tensión trifásica de la falla a tierra ubicada al final de la barra 10 del ramal 2A (señalada como F1) de la fase A del devanado de armadura.

Con las tensiones prefalla determinadas, se elabora el circuito simplificado del generador en falla, mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

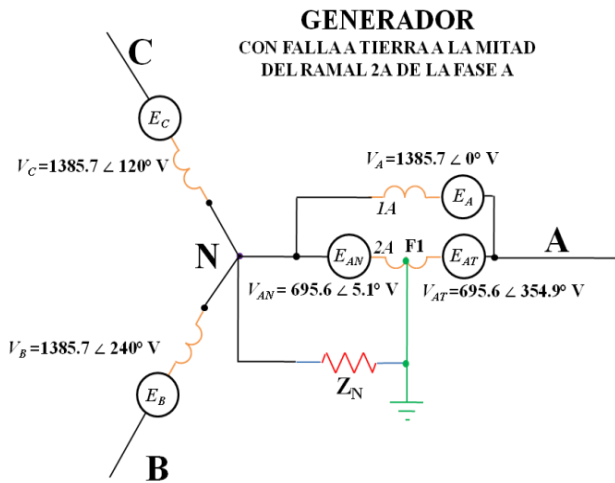


Figura 8. Diagrama simplificado de la falla a tierra ubicada a la mitad del ramal 2A (al final de la barra 6 en la ranura 28 y señalada como F1) de la fase A

del devanado de armadura.

Con las tensiones postfalla determinadas, se elabora el diagrama vectorial de las tensiones por la falla a tierra, representado en la Figura 10.

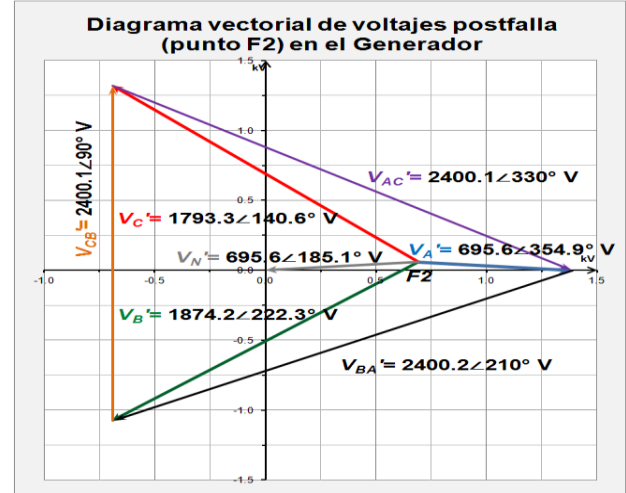


Figura 10. Representación de la tensión trifásica de la falla a tierra ubicada a la mitad del ramal 2A (al final de la barra 6 en la ranura 28 y señalada como F1) de la fase A del devanado de armadura.

Tercer caso de falla a tierra monofásica interna al 25% del ramal 2A de la fase A. Para la falla a tierra monofásica interna al 25% (al final de la barra 3) del ramal 2A de la fase A, punto F3 en la Figura 5, solo se presentan los resultados.

Con las tensiones prefalla determinadas, se elabora el circuito simplificado del generador en falla, mostrado en la Figura 11.

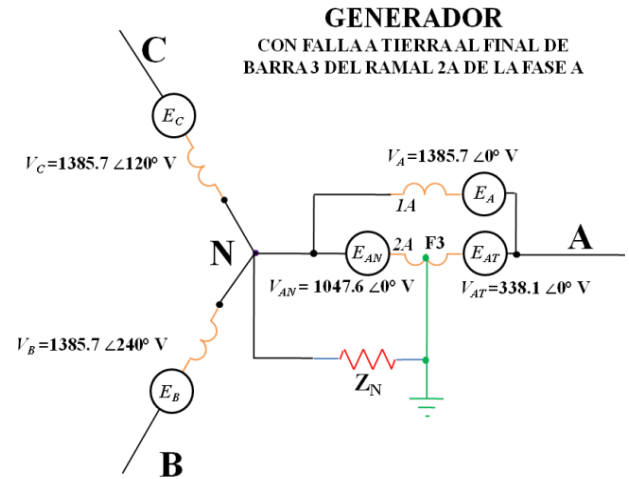
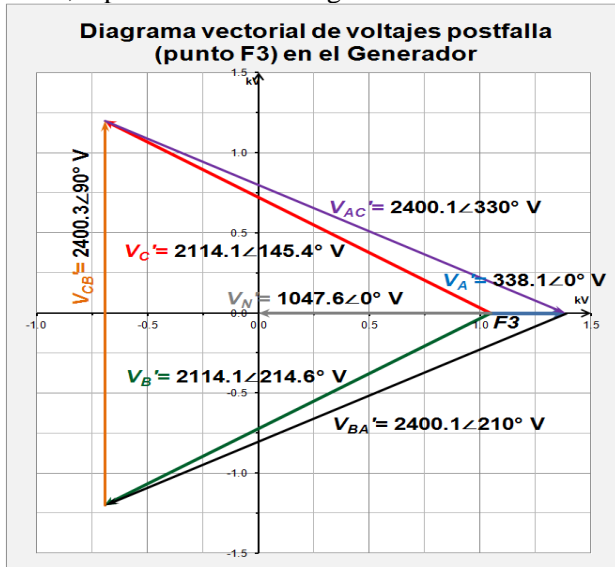


Figura 11. Diagrama simplificado de la falla a tierra ubicada al final de la barra 3 del ramal 2A (señalada como F3) de la fase A del devanado de armadura.

Con las tensiones postfalla determinadas, se elabora el diagrama vectorial de las tensiones por la falla a tierra, representado en la Figura 12.



**Figura 12.** Representación de la tensión trifásica de la falla a tierra ubicada al final de la barra 3 del ramal 2A (señalada como F3) de la fase A del devanado de armadura.

**Resumen de resultados de los casos de falla a tierra monofásica interna en el ramal 2A de la fase A.** Para los tres casos marcados con los puntos F1, F2 y F3 en la Figura 6, se presenta el resumen correspondiente.

Con referencia a los circuitos eléctricos simplificados y diagramas vectoriales mostrados de la Figura 6 a la Figura 1, así como las cifras tabuladas en la Tabla 3, de los casos en que sucede una falla a tierra monofásica interna en el devanado de armadura del Generador, se discute el análisis elaborado y se reconocen los efectos sufridos por la tensión.

**Discusión del análisis de los efectos en la tensión por la falla a tierra monofásica.** Para validar la conformidad del análisis se deben disertar los aspectos sobresalientes, así que, la muestra discutida a continuación se ocupa en el momento en que ocurre un punto aterrizado interno del devanado de armadura.

1. Existe un aterrizamiento de alta impedancia en el neutro, esto es esencial, porque la corriente de

falla limitada no impacta los efectos de la tensión.

2. Maneja modelos matemáticos con tensión de fase (valores de línea a tierra) en el dominio de la frecuencia, esto fortalece la construcción de un patrón claro de los efectos de la tensión.
3. Representa gráficos congruentes en origen y forma, esto auxilia la percepción de los efectos de la tensión.

**Tabla 3.** Resumen de los casos de falla a tierra monofásica en el ramal 2A de la fase A del devanado de armadura.

Tensión	Falla a tierra al final de barra N°:		
	10, punto F1	6, punto F2	3, punto F3
$V_A$	1385.71∠0°	1385.71∠0°	1385.71∠0°
$V_{AT}$	1156.42∠3.07°	695.62∠356.93°	338.14∠0°
$V_{AN}$	239.11∠344.99°	695.62∠5.10°	1047.57∠0°
$V'_A$	1156.42∠3.07°	695.62∠354.9°	338.14∠0°
$V'_B$	1465.87∠230.93°	1874.19∠222.32°	2114.05∠214.59°
$V'_C$	1563.98∠126.21°	1793.26∠140.60°	2114.05∠145.41°
$V'_N$	239.11∠164.99°	695.62∠185.10°	1047.57∠180°
$V'_{AC}$	2400.17∠330°	2400.14∠330°	2400.11∠330°
$V'_{BA}$	2400.17∠210°	2400.15∠210°	2400.11∠210°
$V'_{CB}$	2399.98∠90°	2400.07∠90°	2400.29∠90°

**Discusión de los efectos en la tensión por la falla a tierra monofásica del devanado de armadura del Generador**

Entonces, es evidente que las bases del estudio tienen un soporte adecuado y auténtico.

**Reconocimiento de los efectos en la tensión por la falla a tierra monofásica.** Se determina el siguiente patrón de efectos en la tensión ante una falla monofásica a tierra.



1. La tensión de fase medida en terminal de la fase en falla:
  - a) Es una fracción de la tensión inducida en el devanado completo.
  - b) Aumenta conforme el punto aterrizado se aleje de la terminal de fase.
2. La tensión de fase medida en la terminal de neutro del devanado:
  - a) Es la fracción complementaria de la tensión inducida en el devanado de la fase en falla.
  - b) Disminuye conforme el punto aterrizado se acerque a la terminal de neutro.
3. La tensión de fase medida en terminal de las otras dos fases sanas:
  - a) Aumenta en razón directa al aumento de la tensión que aparece en el neutro del devanado.
  - b) Es mayor que la medición de tensión de fase en la terminal de la fase en falla.
4. La referencia de tierra se recorre del punto neutro hasta el punto aterrizado del devanado de la fase en falla.
5. La tensión de línea entre fases no experimenta cambio significativo con el aterrizado monofásico de una de las fases.

Los efectos anteriores prevalecen aunque existan varios ramales por fase.

**Conclusión de los efectos en la tensión por la falla a tierra monofásica del devanado de armadura del Generador**

En suma, las conclusiones de este estudio de los efectos en la tensión por la falla a tierra monofásica del devanado de armadura, otorgan certidumbre en las siguientes aportaciones:

- La inserción de limitadores de corriente de alta impedancia en el neutro, también minimizan el impacto de un aterrizado interno espontáneo extendiendo la supervivencia del devanado de armadura.
- La medición de la tensión de fase en terminales del devanado de estator a tres elementos conectados en estrella con neutro aterrizado, no es opcional sino obligatoria para el diagnóstico de un aterrizado interno.
- La tensión de fase medida en la terminal de la fase en falla admite, con el uso de estos modelos, detectar el punto aterrizado del devanado de armadura, como lo determina en el Método  $E_{GF}$  (Guerrero-Flores, 2012).

**APÉNDICES**

**A. Nomenclatura.** Los conceptos, términos técnicos, magnitudes, símbolos y unidades técnicas empleados en este artículo son los siguientes (Fitzgerald, et al., 2005; Pyrhönen, et al., 2008; Fraile-Mora, 2008; Real Academia Española, 2012).

**Conceptos**

**Tabla 4.** Conceptos y Términos Técnicos

Denominación	Significado
Aterrizado(a)	Ponerse accidentalmente o intencionalmente, en contacto o conectarse (eléctricamente), con un metal conectado sólidamente a tierra o con un aterrizamiento.
Aterrizamiento	Conexión sólida a tierra de un elemento eléctrico para descargar o mantener su voltaje nulo o neutro.
Barra	Es la mitad (o segmento lateral) de una bobina montada en una sola ranura del núcleo del estator.
Bobina	Es un grupo de espiras en un mazo conjuntamente aislado montado en dos ranuras del núcleo del estator.
Devanado	Es el conjunto de bobinas conectadas en serie que externan de la máquina sus terminales extremas.
Estado estable	Es el período normal en el que la máquina síncrona opera inalterablemente.
Falla monofásica a tierra	Es una conexión eléctrica repentina e indeseable de un conductor energizado con un voltaje a un elemento firmemente aterrizado.

Denominación	Significado
Factor de devanado	Simbolizado por $k_w$ con subíndice “w” por el término en inglés <i>winding</i> =devanado, (vea Apéndice B).
Factor de distribución del devanado	Simbolizado por $k_d$ con subíndice “d”, o, $k_b$ con subíndice “b” por el término en inglés <i>breadth</i> =amplitud, (vea Apéndice B).
Factor de paso del devanado	Simbolizado por $k_p$ con subíndice “p”, concordando con la inicial del término en inglés <i>pitch</i> =montaje, (vea Apéndice B).
Factor de sesgo del devanado	Simbolizado por $k_s$ con subíndice “s”, o, $k_{sq}$ con subíndice “sq”, aunque el término en inglés es <i>skewing</i> =sesgo, (vea Apéndice B).
FEM	Acrónimo del término <u>F</u> uerza <u>E</u> lectromotriz. Es el voltaje inducido por un campo magnético dinámico.
FMM	Acrónimo del término <u>F</u> uerza <u>M</u> agnetomotriz. Es la fuerza del campo magnético dinámico.
Generador Síncrono	Máquina donde su rotor gira a velocidad constante (rpm) y proporcional a la frecuencia (Hz) del Sistema Eléctrico al que se conecta operando como generador.
Limitador de corriente en el aterrizamiento del neutro	Es un dispositivo o grupo de elementos eléctricos de alta impedancia interconectados entre el aterrizamiento y el neutro del generador, con el propósito de limitar la corriente de falla a tierra.
Neutro del generador	Interconexión eléctrica de los devanados de las tres fases del generador con voltaje prácticamente nulo.
Paso de barra	Es la cantidad de ranuras que abarcan los lados de la bobina, simbolizado por $y_l$ .
Paso polar	Es la cantidad de ranuras que abarcan un polo, simbolizado por $y_p$ .

**Simbología**

**Tabla 5.** Magnitudes e Unidades Técnicas

Magnitud	Símbolo	Unidades (mks)
Ángulo eléctrico entre ranuras por polos adyacentes	$\gamma$	Radián (rad)
Ángulo eléctrico por expansión de barra	$\rho$	Radián (rad)
Ángulo eléctrico por posición de barra	$\rho_p$	Radián (rad)
Cantidad de barras por rama y por fase	$N_{barras}$	---
Cantidad de polos	$P$	---
Cantidad de ranuras por polo por fase	$q$	---
Cantidad de ranuras totales del núcleo del devanado de armadura	$Q$	---
Conexión eléctrica en delta	$\Delta$	---
Cantidad de vueltas en un transformador	$N$	---
Conexión eléctrica en estrella	$Y$	---
Corriente eléctrica	$I$	Amper (A)
Densidad de flujo magnético máximo	$B_{max}$	Tesla (Te)
Factor de devanado	$k_w$	---
Factor de distribución	$k_d$	---
Factor de forma del flujo inductor	$k_f$	---
Factor de paso	$k_p$	---
Factor de sesgo	$k_s$	---
FEM inducida media por barra	$E_{barra_m}$	Volt (V)
FEM inducida en el devanado por fase	$E_{devanado}$	Volt (V)
Flujo magnético polar	$\Phi_{polar}$	Weber (Wb)
Frecuencia	$f$	Hertz (Hz)

Magnitud	Símbolo	Unidades (mks)
Impedancia eléctrica	$Z$	Ohm ( $\Omega$ )
Paso de la barra	$y_l$	---
Paso polar	$y_p$	---
Relación de Transformación	$m$	---
Voltaje o Tensión Eléctrica	$E$	Volt (V)

### B. FEM inducida en un devanado de la Máquina Síncrona

Aplicando la Ley de Faraday - Lenz, se calcula la FEM inducida media por barra ( $E_{barra_m}$ ) de un devanado (Fraile-Mora, 2008), con la siguiente ecuación:

$$E_{barra_m} = 4 k_f f \Phi_{polar} \quad (3)$$

Si en la Ecuación 3, se considera que la onda de flujo magnético se reparte en forma sinusoidal por el entrehierro, el factor de forma es igual a:

$$k_f = \frac{\text{valor eficaz}}{\text{valor medio}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} B_{max}}{\frac{2}{\pi} B_{max}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cong 1.11 \quad (4)$$

De las Ecuaciones 3 y 4 se calcula la FEM inducida eficaz por barra en un devanado, con la siguiente ecuación:

$$E_{barra} = \sqrt{2} \pi f \Phi_{polar} \cong 4.44 f \Phi_{polar} \quad (5)$$

Ahora, para calcular la FEM inducida eficaz en un devanado distribuido de paso fraccionario, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$E_{devanado} = 4.44 f \Phi_{polar} N k_w = E_{barra} N k_w \quad (6)$$

El factor de devanado es un coeficiente de reducción de la FEM inducida debido a la construcción de la máquina, y se describe con la ecuación:

$$k_w = k_d k_p k_s \cong k_d k_p \quad \forall k_s = 1 \quad (7)$$

### REFERENCIAS

Fitzgerald A. E., Kingsley C. J., Umans S. D. (2005). "Electric Machinery". Sexta edición. Editorial McGraw Hill. New York, U. S. A.

Fraile-Mora J. (2008). "Máquinas Eléctricas". Sexta Edición (J. L. García-Jurado, Ed.). Editorial: McGraw Hill / Interamericana de España. Madrid, España.

En la Ecuación 6 se considera un devanado alojado en ranuras periféricas del núcleo, por lo tanto, las FEM inducidas en cada barra del devanado estarán desfasadas y la sumatoria de ellas será vectorial. Así, el factor de distribución será igual a (Pyrhönen, et al., 2008):

$$k_d = \frac{\text{suma geométrica } E_{barras}}{\text{suma valores absolutos } E_{barras}} = \frac{\text{sen}\left(\frac{q\gamma}{2}\right)}{q \text{sen}\left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{1}{2q \text{sen}\left(\frac{\pi}{6q}\right)} \quad (8)$$

En la Ecuación 6 se considera un paso fraccionario (acortado) para tratar de eliminar los armónicos, por lo tanto, la FEM inducida en los lados de una bobina estarán desfasadas y la sumatoria de ellas será vectorial. Así el factor de paso será:

$$k_p = \frac{\text{suma geométrica } E_{barra}}{\text{suma valores absolutos } E_{barra}} = \text{sin}\left(\frac{\rho}{2}\right) = \text{sin}\left(\frac{\pi}{2} \frac{y_l}{y_p}\right) \quad (9)$$

Reconstruimos la ecuación para calcular la FEM inducida eficaz por barra, con la tensión del devanado conocido:

$$E_{barra} = \frac{E_{devanado}}{N_{barras} k_d k_p} \quad (10)$$

Este valor obtenido de la Ecuación 10 se empleará para calcular la tabla de valores acumulados de FEMs inducidas por barra en la operación de estado estable.

Guerrero-Flores E. H. (2009). Análisis de Falla a Tierra en Generador Eléctrico de 375 MW, 17 kV, con enfriamiento en aire. En “IEEE XXII Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales (RVP-AI)” págs. 1-6. Acapulco, Guerrero, México: IEEE-Sección-México.

Guerrero-Flores E. H. (2012). Método EGF: Diagnóstico de ubicación de la falla a tierra en un devanado de estator de generador síncrono. En “IEEE-Sección-México, Memorias de Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales 2012” (Primera edición ed., Vol. Electrónico, págs. 1-6). Acapulco de Juárez, Guerrero, México: IEEE-Sección-México.

IEEE. (2009). “IEEE Taxonomy”. IEEE Thesaurus Terms , 1-52.

Pérez-Espinoza A. A. (2007). “Generador de Potencia”. México, D. F., México: Sin Editorial.

Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcová V. (2008). “Design of Rotating Electrical Machines”. Primera Edición (H. Niemelä, Trans.) Editorial: John Wiley & Sons. Chichester, England, U. K.

Real Academia Española. (2012). “Diccionario de la Lengua Española”, 22a. Edición. Recuperado el Mayo de 2012, de Sitio WEB de Real Academia Española: <http://buscon.rae.es/draeI/html/cabecera.htm>

Rodríguez-Pozueta M.Á. (2010). “Constitución de las Máquinas Eléctricas”. (Universidad de Cantabria) Recuperado el 31 de 05 de 2012, de Sitio WEB Universidad de Cantabria > Publicaciones > Máquinas Eléctricas: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm#Generales>

---

Este documento debe citarse como: Guerrero-Flores E. H. (2013). **Efectos de la falla a tierra monofásica interna en un generador síncrono trifásico con aterrizamiento de alta impedancias**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 17-2, pp 153-164, ISSN 1665-529-X.