

ATERRIZAJE DEL NEUTRO PARA SISTEMAS ELECTRICOS

RESUMEN

Este artículo presenta consideraciones básicas para la selección de parámetros de aterrizaje del neutro que permitan el control de sobretensión y la corriente de falla a tierra sobre todas las partes de un sistema eléctrico trifásico.

PALABRAS CLAVES: Aterrizaje del neutro, sobretensión, falla a tierra, clase de aterrizaje, coeficiente de aterrizaje (COG), factor de falla a tierra, camino de retorno a tierra, efectivamente aterrizado, solidamente aterrizado.

ABSTRACT

This paper presents basic considerations for the selection of neutral grounding parameters that will provide for the control of overvoltage and ground-fault current on all parts of three-phase electrical utility systems.

KEYWORDS: neutral grounding, overvoltage, ground-fault, class of grounding, coefficient of grounding (COG), earth-fault factor (EFF), earth-return path, effectively grounded, grounded solidly.

JORGE HUMBERTO SANZ

Profesor Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
Programa Tecnología Eléctrica
jsanz@utp.edu.co

LUCAS PAÚL PÉREZ

Profesor Catedrático
Universidad Tecnológica de Pereira
Facultad de Ingeniería Eléctrica
lucaspaulp@gmail.com

FABIO ANTONIO OCAMPO

Profesor Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
Programa Tecnología Eléctrica
faom@utp.edu.co

Grupo de Sistemas de Puesta a Tierra

1. INTRODUCCIÓN

No es posible dar una simple respuesta al problema del aterrizaje de un sistema eléctrico para propósitos generales debido a que para cada posible solución que se realice, se presentan unas características especiales, las cuales tienen compromisos que pueden ser igualmente importantes. Por lo tanto seleccionar la clase de sistema a utilizar y los medios para lograr el tipo de aterrizaje, establece una solución que compromete en algo las soluciones que están en conflicto. [8]

2. ANTECEDENTES

En ingeniería de potencia, es común hablar del aterrizaje del neutro del sistema, ya sea que este se haga directamente o a través de una impedancia. Actualmente el punto neutro del sistema es una referencia conveniente, no un punto físico conectado a tierra. Por lo tanto el aterrizaje del neutro de una parte específica de un aparato del sistema de potencia tal como un transformador y un generador, determinan el aterrizaje del neutro del sistema.

El término usado en este documento para el aterrizaje del neutro de una parte específica de un aparato se denominará *medio de aterrizaje*. Por ejemplo la resistencia de aterrizaje se refiere a un medio de aterrizaje del neutro de una parte de un aparato por medio de una resistencia. El término *clase de aterrizaje* se refiere a categoría de aterrizaje del sistema en función de sus características de desempeño.

En un sistema de potencia sencillo por ejemplo un sistema típico de distribución o un sistema auxiliar de potencia, un simple transformador sirve a ambas fuentes y el punto de aterrizaje del neutro de todo el sistema se

hace a través del neutro del transformador, definiendo la clase de aterrizaje del sistema. Por ejemplo un sistema servido por un simple transformador cuyo neutro se aterriza a través de una resistencia se puede clasificar típicamente como un sistema aterrizado a través de una resistencia.

En sistemas complejos tales como sistemas de transmisión de alta y extra alta tensión, existen muchas piezas de aparatos que deben tener su neutro aterrizado (transformadores, banco de capacitores, reactores etc.). En estos sistemas múltiplemente aterrizados, la clase de aterrizaje es determinado por los efectos acumulativos de todos los puntos de aterrizaje. Si en la mayoría de los transformadores el neutro está aterrizado por medio similares el sistema puede ser vagamente descrito en términos de una sola clase, por ejemplo un sistema aterrizado a través de una inductancia. En forma general, en los sistemas donde existan múltiples puntos de aterrizaje para los aparatos con diferentes medios para el aterrizaje de neutro, la clase de aterrizaje puede ser determinada solamente por los cocientes de las componentes simétricas de secuencia cero y secuencia positiva.

Los objetivos básicos en la selección de un esquema de aterrizaje para cualquier sistema en general son los siguientes:

- Establecer la relación de tensiones y el grado de protección de la fuente de tensión permitida por los pararrayos
- Limitar los transitorios de sobretensión línea-tierra.
- Establecer la sensibilidad y selectividad de los relés de falla a tierra.

- Limitar la magnitud de corriente de falla a tierra.
- Seguridad.

3. MEDIOS DE ATERRIZAJE

3.1 Solidamente aterrizado.

Se define como la conexión directa a tierra a través de una adecuada conexión de aterrizaje en la cual, no se inserta intencionalmente una impedancia.

El término solidamente aterrizado, aunque es de uso general, puede ser algo engañoso, es el caso de un transformador que tiene su neutro solidamente aterrizado, sin embargo la impedancia resultante de secuencia cero puede ser alta, debido a las características del transformador o del sistema, generando sobretensiones durante la ocurrencia de las condiciones de falla a tierra.

3.2 Aterrizaje por medio de inductancia.

Este término define el aterrizaje a través de una impedancia, en la cual el elemento principal es una inductancia. Esta clase de aterrizaje es vagamente referida como un aterrizaje a través de una reactancia. Esta clase es además subdividida en categorías de baja y alta inductancia.

La inductancia puede ser inserta directamente en la conexión a tierra del neutro u obtenida indirectamente por el incremento de la reactancia de retorno del circuito de retorno a tierra. Esto último se puede hacer incrementando la reactancia de secuencia cero del aparato conectado a tierra o por la omisión de posibles conexiones del neutro del aparato aterrizado.

3.3 Aterrizaje por medio de resistencia.

Se define como el aterrizaje a través de una impedancia, donde el principal elemento es la resistencia. Esta clase de aterrizaje es frecuentemente subdividido en dos categorías de alta y baja resistencia.

La resistencia puede ser insertada directa o indirectamente en la conexión a tierra, tal como lo describe el siguiente ejemplo:

- En el secundario de un transformador, en el cual el primario es conectado entre neutro y tierra.
- En una esquina del secundario conectado en delta abierta de un transformador conexión Y- Δ aterrizado.

3.4 Aterrizaje por medio de bobinas supresoras.

El aterrizaje por medio de inductancias cuyos valores de reactancia, se hacen presentes cuando ocurre una falla entre un conductor y tierra, establece una confrontación entre la corriente inductiva, que aparece entre los conductores fallados y tierra, y la corriente capacitiva que fluye a través de los conductores no fallados y tierra,

cuyo resultado es la anulación de estas corrientes durante la falla. Este tipo de inductancia conectada a tierra se conoce comúnmente como neutralizador de falla a tierra, bobina de supresión de arco o bobina de Peterson [1], [2].

3.5 Aterrizaje por medio de capacitancias.

Se define como el aterrizaje por medio de impedancias, donde el principal elemento es la capacitancia.

La capacitancia es raramente insertada en una conexión a tierra, para propósitos de aterrizar el sistema. Sin embargo, las capacitancias se pueden conectar a tierra con el fin de contrarrestar frentes de onda escarpados.

También los neutros de los bancos de capacitarios en paralelo son conectados solidamente a tierra en sistemas que no son aterrizados.

3.6 No aterrizado (neutro aislado).

Se define como un sistema, circuito, o aparato sin una conexión intencional a tierra, excepto a través de medidores de tensión u otros dispositivos de muy alta impedancia [3].

Un sistema no aterrizado es acoplado a tierra a través de las capacitancias distribuidas en los conductores de sus fases y en los bobinados de las maquinas.

Por lo tanto las aplicaciones se deben analizar cuidadosamente para sobretensiones que ocurren durante una falla [4], [5].

4. CLASES DE ATERRIZAJE

4.1 Sistema aterrizado.

Un sistema que es una combinación de líneas, cables o conductores con aparatos puede ser ampliamente clasificado en dos grandes grupos: aterrizado o no aterrizado.

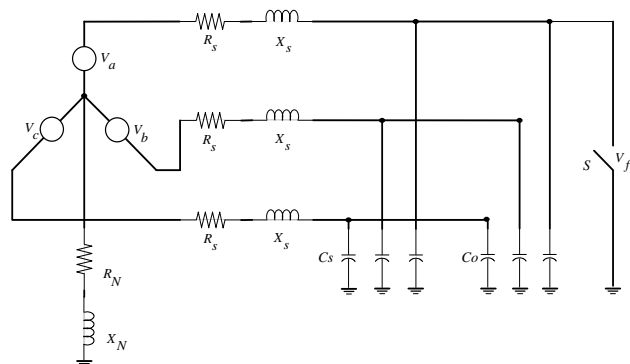
Un sistema aterrizado es un sistema donde al menos un conductor (usualmente el punto de neutro de un transformador o bobinado de un generador) es intencionalmente conectado a tierra de manera directa o indirecta a través de una impedancia. Un sistema aterrizado a través de una impedancia es conocido comúnmente como un sistema aterrizado a través de una impedancia.

4.2 Determinación cuantitativa de la clase de aterrizaje.

Varias clases de aterrizaje se permiten en el diseño de un sistema, cada uno de los cuales tiene sus propios atributos. La respuesta de las características de las distintas clases de aterrizaje se puede definir o clasificar en términos de la relación de los parámetros de las componentes simétricas, tales como la reactancia y resistencia de secuencia positiva X_1 , R_1 , La reactancia y

resistencia de secuencia negativa X_2, R_2 , la reactancia y resistencia de secuencia cero X_0, R_0 [5], [2], [6].

Para facilitar la comprensión de esta aproximación, se hace la simplificación de un circuito trifásico ideal (Ver figura 1), y su diagrama equivalente de secuencia, para una falla simple línea-tierra, tal como se muestra en la figura 2. Los subíndices 1, 2 y 0, indican los parámetros de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente. Note que esta representación convencional no incluye todas las impedancias en la trayectoria de corriente a tierra y puede no entregar resultados prácticos en todos los casos.



$$C_1 = C_s + C_0 \quad C_g = 3C_0 \quad \omega = 2\pi f$$

$$X_{C_s} = \frac{1}{\omega C_s} \quad \frac{X_{C_g}}{3} = \frac{1}{\omega \frac{C_g}{3}} \quad X_{C_g} = \frac{1}{\omega C_g}$$

Figura 1. Diagrama de un circuito trifásico

Donde:

C_g : Es la capacitancia total del sistema a tierra, y se obtiene por la conexión de las tres fases midiendo luego la capacitancia en la rama del aterrizaje del neutro en circuito abierto.

$C_g/3$: Es capacitancia parcial de la conexión en Y aterrizada, ó secuencia cero de la capacitancia del sistema.

C_s : Es la capacitancia parcial entre fases del equivalente en Y no aterrizado del sistema, que se puede obtener sustrayendo la capacitancia de secuencia cero $C_g/3$ de la capacitancia de secuencia positiva C_1

f : Es la frecuencia en hertz.

V_f : Es la tensión de pretalla línea-tierra en el punto de falla

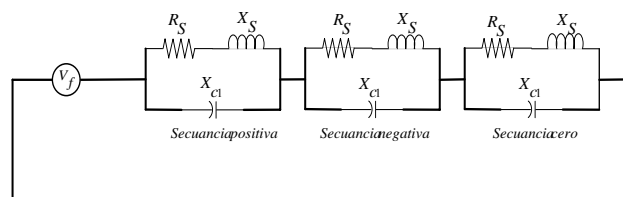


Figura 1. Equivalente de secuencia para una falla línea-tierra

Así el EFF se relaciona con el COG por medio de $\sqrt{3}$, tal como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$EFF = \sqrt{3} \cdot COG \tag{1}$$

Donde: EFF es el factor de falla a tierra

COG es el coeficiente de aterrizaje expresado como un porcentaje.

4.3 Factor de falla a tierra (EFF).

El término de factor de falla a tierra (EFF), es conocido en un grado limitado como COG. En un lugar seleccionado del sistema trifásico, y para una configuración dada, el EFF es la relación del mayor valor rms de la tensión entre línea y tierra a la frecuencia del sistema de una fase no fallada durante una falla a tierra (afectando una o más fases de cualquier punto del sistema), y el valor rms de la tensión a la frecuencia del sistema, que se puede obtener en el punto donde se ubicó la falla.

5. CARACTERISTICAS DE LAS CLASES DE ATERRIJAJE

Las relaciones de los parámetros de las componentes simétricas se usan para caracterizar las clases de aterrizaje. Estas características, y sus únicos atributos definen las distintas clases de aterrizaje, estas se pueden ver en la tabla 1, los cuales serán discutidos más adelante.

Clases y medios de aterrizaje	Relaciones entre los parámetros de las componentes simétricas			% de la corriente de falla	Tensión transitoria en p.u.
	X_0/X_1	R_0/X_1	R_0/X_0		
A. Efectivamente					
1. Efectivo	0-3	0-1	-	> 60	≤ 2
2. Muy efectivo	0-1	0-0.1	-	> 95	< 1.5
B. No efectivo					
1. Inductancia					
Baja inductancia	3-10	0-1	-	> 25	< 2.3
Alta inductancia	> 10		< 2	< 25	≤ 2.73
2. resistencia					
Baja resistencia	0-10		≥ 2	< 25	< 2.5
Alta resistencia		> 100	≤ (-1)	< 1	≤ 2.73
3. Inductancia y resist	> 10	-	> 2	< 10	≤ 2.73
4. Bob. Neutralizadora		-	-	< 1	≤ 2.73
5. Cap no aterrizada					
Rango A	-∞ a -40	-	-	< 8	≤ 3
Rango B	-40 a 0	-	-	> 8	> 3

Tabla 1 Características de aterrizaje

5.1 Efectivamente aterrizado.

Se define como el aterrizaje a través de una impedancia suficientemente pequeña (inherente, adicionada o ambos casos), para la cual el COG no excede el 80% de su valor nominal.

Este valor es obtenido de manera aproximada cuando para todas las condiciones del sistema, la relación entre la reactancia de secuencia cero y la reactancia de secuencia positiva (X_0/X_1), es positiva ≤ 3, y la relación entre la resistencia de secuencia cero y la reactancia de secuencia cero (R_0/X_1), es positiva y < 1.

5.2 No efectivamente aterrizado.

Se define cuando un sistema esta aterrizado en su mayoría por medio de resistencias.

En este tipo de aterrizaje, debido a las impedancias en líneas y cables, ciertos puntos o lugares del sistemas efectivamente aterrizados pueden estar efectivamente no aterrizados, aun cuando la mayoría de estos sistemas se encuentren efectivamente aterrizados. A continuación serán descritos los diferentes sistemas puestos a tierra a través de una impedancia que tienen un aterrizaje no efectivo.

5.3 Aterrizaje por medio de resistencia.

Se define como un sistema el cual esta aterrizado en su mayoría por medio de resistencias.

Cuando un sistema se encuentra aterrizado por medio de resistencias, la reactancia de secuencia cero vista desde la falla puede ser inductiva o capacitiva, dependiendo del tamaño, numero, y localización de las resistencias del neutro puestas a tierra, y de la capacitancia a tierra del sistema resultante.

Con una resistencia de tierra baja X_0 puede ser negativo, la tensión fase-tierra de frecuencia fundamental, no sobrepasará a la tensión línea-línea, y la tensión neutro-tierra no sobrepasará la tensión línea-neutro.

Si un sistema es aterrizado a través de una resistencia de bajo valor ohmico, las tensiones a la frecuencia natural se reducen significativamente al comienzo de una falla a tierra. Las tensiones de fase son esencialmente tensiones a frecuencia natural. Las tensiones a frecuencia fundamental con aterrizaje por medio de resistencias de bajo valor ohmico, son generalmente mayores a las tensiones a frecuencia natural obtenidas con valores similares de reactancia inductiva cuando se aterriza el neutro por medio de reactancias inductivas.

Se puede dar el caso de que con aterrizajes un alto valor ohmico, X_0 sea negativo. En este caso, los voltajes fase tierra pueden ser mayores que los voltajes normales (sin falla) línea a línea, y los voltajes neutro a tierra pueden ser mayores que los voltajes línea a neutro.

5.4 Aterrizaje por medio de inductancias.

Se define como un sistema que se encuentra aterrizado a través de inductancias en el neutro, transformadores a tierra u omitiendo conexiones a tierra en algunos de los transformadores de un sistema con múltiples tierras.

Cuando un sistema es aterrizado a través de inductancias (de valores menores a las de un neutralizador de fallas a tierra), la reactancia de secuencia cero vista desde la falla es de naturaleza inductiva más que capacitiva, y la resistencia de secuencia cero es relativamente pequeña. Por consiguiente, las tensiones fase-tierra a frecuencia natural, no excederán las tensiones línea-línea durante la

falla y las tensiones neutro-tierra no excederán a las tensiones línea-neutro.

En sistemas simples con neutros aterrizados a través de inductancias, experimentaran tensiones transitorias máximas a tierra no mayores a 2.73 veces su valor nominal, en las fases no falladas después de que una falla haya iniciado. La tensión a tierra en el neutro no sobrepasará 1.67 veces la tensión nominal línea-neutro.

5.5 Aterrizaje por medio de bobinas neutralizadoras.

Se define como un sistema que se encuentra aterrizado a través de uno o varios neutralizadores de falla a tierra. Cuando un sistema es aterrizado través de neutralizadores de falla a tierra, la inductancia de neutro aportada por el neutralizador es ajustada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$3X_{Cg} = 3X_n + X_s \quad (2)$$

Donde: X_{Cg} : es la reactancia capacitiva a tierra del sistema

C_g : es la capacitancia a tierra total del sistema

X_n : es la reactancia de neutro

(Ver la figura 1 y 2 para otras definiciones)

Para este tipo de aterrizaje R_s y X_{Cg} , pueden ser despreciados debido a su pequeño valor en comparación con X_n y X_{Cg} . Y para efectos de resonancia $X_n = X_{Cg}$.

$R_0 + jX_0$ es la representación serie equivalente de la red inductiva-capacitiva paralelo mostrada en la figura 3. Despreciando R_s , el valor de X_0 será infinito, desde que la red de secuencia cero sea un circuito resonante paralelo. Con la resistencia incluida, R_0 es muy grande con respecto a X_0 . Basándose en otros hechos la red de secuencia positiva presenta una alta impedancia para el flujo de corriente a 60 Hz a través de una falla a tierra. Las tensiones a frecuencia fundamental en las fases no falladas, durante una falla línea-tierra, son básicamente tensiones línea-línea. Ellas no se incrementan por la presencia de fallas a tierra. Las máximas tensiones transitorias a tierra de las fases no falladas son menores a 2.73 veces la tensión nominal y las tensiones neutro-tierra 1.67 veces las tensiones línea-neutro.

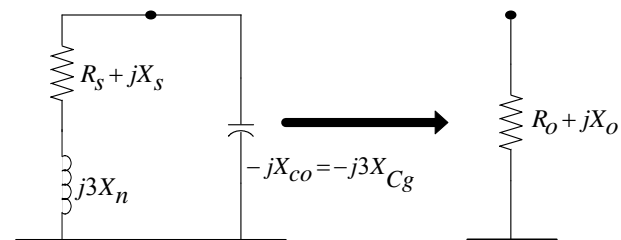


Figura 3. Red Resonante de secuencia cero

5.6 Sistemas no aterrizados.

Un sistema no aterrizado es aquel sin conexiones intencionales a tierra excepto por de los medidores de

tensión o aparatos de protección. En un sistema no aterrizado, X_0 tiene un valor negativo al igual que la magnitud de la reactancia de secuencia cero, mientras que R_0 / X_0 es relativamente pequeño. Bajo condiciones de falla, las tensiones a frecuencia natural fase-tierra podrían exceder las tensiones línea-línea, y en algunos casos, particularmente cuando el sistema es muy largo extensión, estas tenciones podrían considerarse mayores.

Existen factores económicos y practicas operativas liderando la decisión entre sistemas aterrizados y no aterrizados. Sistemas no aterrizados podrían requerir mayores niveles de aislamiento como resultado de posibles sobretensiones transitorias. Esfuerzos anormales del aislamiento se pueden reducir cuando X_0 / X_1 oscila entre $-\infty$ y 40.

Cuando X_0 / X_1 se encuentra en el rango de -40 a 0, sobretensiones severas de resonancia serie pueden ocurrir si la respuesta del circuito es lineal. Sin embargo en circuitos ferro-no-lineales como los transformadores de núcleo saturable, las oscilaciones menos severas pueden generarse sobre un amplio rango de valores negativos de la relación X_0 / X_1 [4], [7].

6. CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE ATERRIZAJE

El término coeficiente de aterrizaje (COG), se define como la relación de $\frac{E_{LG}}{E_{LL}}$, expresada en porcentaje, de el

mayor valor rms de tensión línea-tierra a frecuencia natural (E_{LG}) sobre una fase libre de falla, en el sitio de la ubicación de la falla, durante una falla a tierra afectando la tensión línea-línea de a una o mas fases de a la frecuencia natural (E_{LL}) que se puede obtener en el sitio de la falla cuando ésta se a removido. El coeficiente de aterrizaje se puede calcular desde las impedancias conocidas del sistema y la falla. Para éste propósito es conveniente expresar las impedancias del sistema en términos de las componentes simétricas de las impedancias $Z_1, Z_2,$ y Z_0 . [6], [8].

El coeficiente de aterrizaje para un sitio de falla específico puede variar según el tipo de falla, y del valor de la impedancia de falla.

Con el propósito de construir la figura 4, se deben realizar las siguientes consideraciones:

- El coeficiente de aterrizaje es determinado para el mismo sitio de la localización de la falla.
- El tipo de falla (simple o doble fase a tierra) es el que produce un alto coeficiente de aterrizaje
- La impedancia de falla, si existe, es puramente resistiva, se produce un alto valor del coeficiente de aterrizaje.

- La impedancia de secuencia negativa del sistema en el sitio de falla, es igual a la impedancia de secuencia positiva ($Z_2 = Z_1$).

Para un sistema con un valor positivo de X_0 , los coeficientes de aterrizaje en sitios diferentes al de la falla son generalmente los mismos o menores para los sitios de falla. En circunstancias especiales, los coeficientes pueden ser ligeramente altos para sitios donde se puede apreciar un flujo de corriente capacitiva de secuencia cero a través de líneas de alta inductancia para llegar hasta el sitio de la falla.

En sistemas con valor negativo de X_0 , el coeficiente de tierra es generalmente pequeño para el sito de la falla y alto para sitios distantes al de la falla. Por esta razón la utilización de este coeficiente, esta limitado a sistemas los cuales las impedancias de línea son muy pequeñas.

De acuerdo a las consideraciones y definiciones anteriores, los valores que se deben calcular para determinar el coeficiente de aterrizaje son:

- La tensión de la fase **a**, V_{aLLG} , para una falla a tierra.
- La tensión de las fases **b** y **c**, V_{bLG} y V_{cLG} , para una falla línea-tierra.
- La tensión de la fase **a** para una falla línea-tierra.

Los anteriores valores y sus equivalentes de secuencia en componentes simétricas, se muestran en la figura 4.

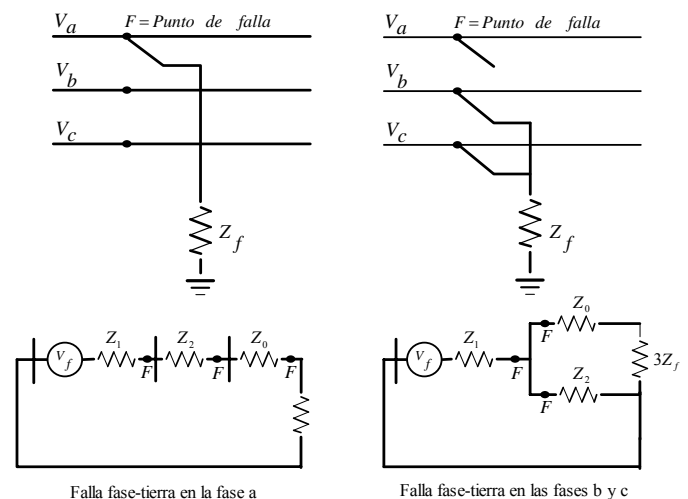


Figura 4.Red equivalente de componentes simétricas, que se usa para el cálculo en dos diferentes tipos de falla.

Las ecuaciones de tensión para el tipo de fallas descritas en la figura 4 se muestran a continuación:

$$V_{aLLG} = V_f \frac{3Z_2 (Z_0 + 2Z_F)}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_F)} \tag{3}$$

$$V_{bLG} = V_f \frac{3a^2 Z_F - j\sqrt{3}(Z_2 + aZ_0)}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} \quad (4)$$

$$V_{cLG} = V_f \frac{3aZ_F + j\sqrt{3}(Z_2 + a^2 Z_0)}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_F} \quad (5)$$

$$\text{Donde } a = -0.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Haciendo $Z_2 = Z_1$, $Z_F = R_F$ las ecuaciones (3), (4), (5) toman la siguiente forma:

$$V_{aLLG} = V_f \frac{3Z_0 + 6R_F}{Z_1 + 2Z_0 + 6R_F} \quad (6)$$

$$V_{bLG} = V_f \left(a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_F} \right) \quad (7)$$

$$V_{cLG} = V_f \left(a - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_F} \right) \quad (8)$$

Usando en las ecuaciones (6), (7), (8), la definición de coeficiente de aterrizaje, se tiene:

$$CFG_a = \sqrt{3} \left(\frac{Z_0 + 2R_F}{Z_1 + 2Z_0 + 3R_F} \right) \quad (9)$$

$$CFG_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a^2 - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_F} \right) \quad (10)$$

$$CFG_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_F} \right) \quad (11)$$

Definiendo las relaciones ($R'_1 = R_1 / X_1$, $R'_0 = R_0 / X_1$, $X'_0 = X_0 / X_1$ y $R'_F = R_F / X_1$), las ecuaciones (8), (10), (11), toman la siguiente forma:

$$CFG_a = \sqrt{3} \left(- \frac{(R'_0 + 2R'_F) + jX'_0}{R'_1 + 2R'_0 + 6R'_F + j(1 + 2X'_0)} \right) \quad (12)$$

$$CFG_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a^2 - \frac{(R'_0 - R'_1) + j(X'_0 - 1)}{(2R'_1 + R'_0 + 3R'_F) + j(X'_0)} \right) \quad (13)$$

$$CFG_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(a - \frac{(R'_0 - R'_1) + j(X'_0 - 1)}{(2R'_1 + R'_0 + 3R'_F) + j(X'_0)} \right) \quad (14)$$

Finalmente con el fin de lograr un aterrizaje efectivo a tierra con un bajo valor ohmico y disminuir el gradiente de potencial que se sucede en el momento de una falla,

en el sitio de ubicación del transformador, se recomienda realizar el aterrizaje que ilustra la figura 5.

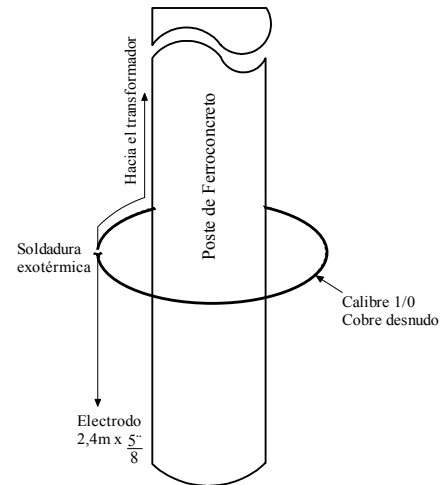


Figura 5. Aterrizaje del transformador

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Application Guide on Methods of Neutral Grounding of Transmission Systems," AIEE Transactions, Aug. 1953, pp. 663–668.
- [2] Willheim, R., and Waters, M., Neutral Grounding in High-Voltage Transmission. New York: Elsevier Co. (D. Van Nostrand Co.), 1956.
- [3] IEEE Tutorial Course, 79EH0144-6 PWR, Surge Protection in Power Systems.
- [4] "Guide for the Application of Ground Fault Neutralizers," AIEE Transactions, Apr. 1953, pp. 183–190.
- [5] Peterson, H. A., Transients in Power Systems, Chapter 1. New York: Dover Publications Inc., 1966.
- [6] Clarke, E., *Circuit Analysis of AC Power Systems, Vol. 1*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1943.
- [7] Wagner, C. F., and Evans, R. D., Symmetrical Components as Applied to the Analysis of Unbalanced Electrical Circuits. New York: McGraw-Hill, 1933.
- [8] Clarke, E., Crary, S. B., and Peterson, H. A., "Overvoltages During Power System Faults," AIEE Transactions, vol. 58, Aug. 1939, pp. 377–385.
- [9] IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems. IEEE Std C62.92.1-2000