

Método computacional para calcular la resistencia del sistema de tierra para subestaciones al aire libre

TORRES-JIMÉNEZ, Jacinto*†, GUARDADO-ZAVALA, José Leonardo'', TAPIA-TINOCO, Guillermo' y JURADO-PÉREZ, Fernando''

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Carretera Irapuato - Silao Km. 12.5, C.P. 36821 Irapuato, Gto.

'Instituto Tecnológico de Morelia. Av. Tecnológico 1500, Col. Lomas de Santiaguito, C.P. 58297, Morelia, Mich.

Recibido 8 de Julio, 2015; Aceptado 10 de Septiembre, 2015

Resumen

En el presente artículo se describe la forma para calcular la resistencia de tierra (R_g) para subestaciones eléctricas al aire libre utilizando el método computacional matricial e integral (MAT-INT). El método MAT-INT utiliza la ecuación de Laplace para obtener los Factores de Distribución de Voltaje (FDV) en un punto. Donde cada electrodo de la malla de puesta a tierra se divide en pequeñas secciones de segmentos con la suposición de que una corriente eléctrica total fluye de la superficie de un segmento y fluye hacia el interior del suelo. La resistencia del sistema de puesta a tierra se opone a la corriente que fluye a disiparse al interior del suelo. En este sentido, es importante analizar como varía el valor de R_g cuando se modifican algunos parámetros de diseños de la red de tierra.

En este trabajo se propone realizar un estudio de sensibilidad de parámetros. El método computacional es utilizado para calcular la resistencia de tierra para mallas cuadrículadas de diferentes dimensiones. Los resultados son comparados con valores de R_g obtenidos utilizando diferentes métodos presentados en literatura.

Resistencia total del sistema (R_g), sistema de tierra, Métodos computacionales, sensibilidad de parámetros

Abstract

This article describes how to calculate the resistance of grounding systems (R_g) for electrical substations outdoors using matrix and comprehensive computational method (MAT-INT). The MAT-INT method uses the Laplace equation for the Voltage Distribution Factors (VDF) at one point. Each electrode of the ground network is divided into different small sections of segments, with the assumption that a total electrical current emanating from the surface of a segment and flows into the soil. Resistance grounding system opposes to the current that is dissipated into the soil. It is important to analyze how varies the value of R_g when some design parameters of the ground network are changed.

In this paper a study parameter sensitivity is presented. The computational method is used to calculate the resistance of soil to squared grids of different sizes. The results are compared with R_g values obtained using different methods presented in literature.

Total system resistance (R_g), ground system, Computational methods, parameter sensitivity

Citación: TORRES-JIMÉNEZ, Jacinto, GUARDADO-ZAVALA, José Leonardo, TAPIA-TINOCO, Guillermo y JURADO-PÉREZ, Fernando. Método computacional para calcular la resistencia del sistema de tierra para subestaciones al aire libre. Revista de Análisis Cuantitativo y Estadístico 2015, 2-4: 295-306

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jacinto.torres@itesi.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La creciente demanda de energía eléctrica ha originado la expansión y crecimiento de la red eléctrica. Este constante crecimiento del sistema eléctrico ha originado la necesidad de planificar y construir nuevas subestaciones eléctricas para niveles de voltaje de transmisión, sub-transmisión y distribución, con la finalidad de mantener la calidad de los parámetros eléctricos.

Sin embargo, es conveniente que el diseño básico de la red de tierra se optimice, a fin, de minimizar los costos de construcción y mejorar su eficiencia, seguridad y confiabilidad.

Cabe mencionar que en las últimas décadas diversos autores han realizado y presentado estudios que tratan de solucionar el problema de optimizar el diseño de los sistemas de tierra utilizando diversas técnicas de optimización. De las técnicas más significativas se pueden mencionar: computación evolutiva (Otero et al., 2002), estrategia evolutiva (Elrefaie, et al., 2012), algoritmos genéticos, (Yi-min, et al., 2009; He, et al., 2007; y Covitti, et al., 2005), algoritmo evolutivo (Ghoneim, et al., 2007 y Neri, et al., 2005) programación lineal entera mixta (Khodr, et al., 2006 y Khodr, et al., 2009) y elemento de contorno (Colominas, et al., 1999). Sin embargo, los trabajos de investigación presentados están orientados a optimizar la red de puesta a tierra utilizando un criterio mono-objetivo, donde la función objetivo es minimizar los costos de construcción con la restricción de cumplir con los límites de seguridad.

Por otra parte cuando se plantea diseñar, proyectar y construir una subestación eléctrica, uno de los tópicos más relevantes que se deben satisfacer son estándares de seguridad (IEEE Std. 80-2000).

En este sentido el diseño de los sistemas de puesta a tierra constituye uno de los elementos de seguridad más significativos de las subestaciones, ya que su función principal es drenar al interior del suelo las corrientes excesivas que se originan al ocurrir alguna perturbación en los parámetros de la red eléctrica en condiciones normales de operación y/o de falla. Esta función primordial de los sistemas de puesta a tierra permite salvaguardar a las personas que se encuentran dentro y alrededor de la subestación de posibles descargas eléctricas, evitando que las altas corrientes pongan en peligro su integridad física. Asimismo, ayudan a proteger a los dispositivos y equipos de las descargas eléctricas evitando que se dañen e interrumpa la continuidad del servicio eléctrico.

En general el criterio de seguridad consiste en calcular los valores de voltaje de contacto y de paso a frecuencias de 50 y 60 Hz, que una persona puede soportar sin sufrir desfibrilación ventricular al estar en contacto con superficies que presenten alto diferencial de potencial. Para determinar las magnitudes de los voltajes de paso y de contacto se utilizan principalmente las variables físicas y de diseño de la malla de tierra como son: la dimensión de la malla, el número total de electrodos, la profundidad a la que se ubicará la red de tierra, el radio de los electrodos, la resistencia total de la rejilla de tierra, así como, la resistividad del suelo.

Uno de los parámetros eléctricos más significativos que impactan en la seguridad del diseño de la red de tierra, es la resistencia total de la malla y se puede definir como la oposición que presenta a la corriente eléctrica que fluye a disiparse al interior del suelo. El valor de R_g dependerá principalmente de las características físicas del conductor que compone la red de tierra como son: el diámetro, el material y la longitud total del conductor.

Un valor bajo de R_g permitirá reducir el gradiente de potencial en la rejilla de puesta a tierra.

Para calcular el valor de R_g se han propuesto en literatura diferentes modelos empíricos y computacionales (Sarker et al., 2002 y Zitzler et al., 2001). Los resultados publicados muestran que los métodos computacionales son más exactos que los métodos empíricos.

Además cada vez que se propone un diseño de sistema de tierra es conveniente que se realice un estudio de sensibilidad de parámetros, que consista en variar los parámetros de diseño más significativos como son la separación de los electrodos, diámetro del conductor y el área de la malla de tierra, con la finalidad de evaluar como impactan al valor de R_g . En este sentido en el presente artículo se presenta un estudio de sensibilidad en un sistema de puesta a tierra de prueba utilizando el método MAT-INT.

Resumen de la Guía de la IEEE stand. 80 2000 para la seguridad de sistemas de puesta a tierra de subestaciones de corriente alterna.

La guía IEEE Stand 80-2000 proporciona un conjunto de recomendaciones para diseñar de forma segura sistemas de tierras en subestaciones de corriente alterna. Los objetivos principales de la guía son: 1) Establecer los límites de seguridad de los voltajes que una persona puede estar expuesta en condiciones de falla, 2) Desarrollar un criterio para un diseño seguro, 3) Proporcionar un procedimiento práctico para el diseño de sistemas de puesta a tierra, 4) Desarrollar métodos analíticos como apoyo para comprender y solucionar problemas de gradientes.

En resumen el objetivo de la IEEE Stand 80-2000 es proporcionar procedimientos y técnicas para evaluar sistemas de tierra en términos de criterios de seguridad (IEEE Std. 80-2000).

Criterio de seguridad en sistemas de tierra

En general la función principal de un sistema de tierra es drenar las corrientes excesivas a tierra y evitar que las personas que se encuentran dentro y alrededor de la subestación sufran sobrecargas que ponga en peligro su vida. No obstante, un diseño seguro de sistema de tierra debe cumplir los dos objetivos siguientes:

1) Proporcionar un medio adecuado para drenar las corrientes eléctricas a tierra, en condiciones normales como de falla, para evitar que se excedan los límites de operación de los equipos que puedan afectar de forma negativa a la continuidad del servicio eléctrico. Cabe mencionar, que durante condiciones de falla el flujo de corriente que fluye al interior del suelo producirá gradientes de potencial dentro y alrededor de una subestación de magnitudes considerables.

2) Asegurar que una persona en las proximidades de las instalaciones de puesta a tierra no esté expuesto de sufrir una descarga eléctrica crítica que ponga en peligro su vida. Los efectos de una corriente eléctrica que pasa a través de las partes vitales de un cuerpo humano dependen especialmente de la duración, la magnitud y frecuencia de dichas corrientes. La consecuencia más peligrosa de tal exposición es una condición cardiaca conocida como fibrilación ventricular, que resulta en el paro inmediato de la circulación sanguínea.

Generalmente los accidentes por descargas eléctricas se originan por las causas siguientes:

1) Corrientes de falla a tierra excesivamente alta con relación al área del sistema de puesta a tierra.

2) Que la resistividad y la distribución de las corrientes a tierras permitan producir altos gradientes de potencial en puntos de la superficie del suelo.

3) Que el cuerpo de un individuo cierre dos puntos con alto diferencial de potencial.

4) Ausencia de la resistencia de contacto suficiente u otra resistencia en serie que pueda limitar la corriente a través del cuerpo a un valor seguro y

5) Duración de la falla y el contacto con el cuerpo, que permita que el flujo de corriente a través de un cuerpo humano durante un tiempo suficiente pueda causar daño debido a la intensidad de corriente (IEEE Std. 80-2000).

Límite de corriente eléctrica que puede tolerar el cuerpo humano:

De acuerdo a la referencia (IEEE Std. 80-2000) la magnitud y duración de la corriente que puede circular a través de un cuerpo humano a 50Hz o 60Hz debe ser menor que el valor de corriente necesaria para que pueda causar al corazón fibrilación ventricular. El límite del voltaje de contacto y paso permisible por el cuerpo humano para personas de 50 y 70 kg se presentan en las ecuaciones (1) - (5):

$$E_{paso50} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (1)$$

$$E_{paso70} = (1000 + 6C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2)$$

$$E_{contacto50} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

$$E_{contacto70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (5)$$

Dónde

C_s Factor de reducción de la capa de la superficie

ρ_s Resistividad del material de la superficie ($\Omega.m$)

ρ Resistividad del material de bajo de la superficie ($\Omega.m$)

h_s Espesor del material superficial en (m)

t_s Tiempo de duración de la descarga eléctrica (s)

Evaluación de la resistencia del sistema de tierra (R_g)

La resistencia que presenta el mallado de la red de tierra (R_g) es uno de los parámetros determinante en el diseño de los sistemas de tierra, debido a que su magnitud es un factor determinante para poder establecer la dimensión del área y la disposición de la misma. Por otra parte, R_g se puede definir como la oposición que presenta la rejilla de tierra al paso de la corriente para poder dispersarse al interior del suelo. En este sentido la filosofía del diseño de redes de tierra está orientada a reducir los valores de R_g con la finalidad de mantener la magnitud de los voltajes de paso, de contacto y superficiales a niveles aceptables de seguridad. Un diseño de sistema de tierra adecuado debe proveer un valor apropiado de R_g en orden de minimizar el incremento de potencial de tierra GPR por sus siglas en inglés (Ground Potential Rise).

Por ejemplo, para subestaciones de transmisión y otras subestaciones grandes dimensiones la resistencia de tierra está alrededor de 1 Ohm o menos.

Sin embargo, para subestaciones pequeñas (subestaciones de distribución) la resistencia de tierra está en el orden de 1 a 5 Ohms dependiendo de las condiciones locales. Debido a la importancia de R_g en el diseño de subestaciones de C.A. en literatura se han propuestos diferentes métodos empíricos y computacionales para calcular su magnitud. A continuación presentan los trabajos más representativos para calcular la resistencia total del sistema de tierra (R_g).

Método de Laurent y Sverak

Sverak, (1984) propone la ecuación (6) formulación para calcular la resistencia total del sistema de tierra:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (6)$$

Dónde:

ρ .- resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)

A .- Área que abarca la malla de tierra (m^2)

L_T .- Longitud total de los conductores de la malla (m)

Severak modificó la expresión propuesta por Lauren para incluir la profundidad de la malla de tierra:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right] \right] \quad (7)$$

Donde:

h .- profundidad de la malla de tierra (m)

Método de Schwarz

Schwarz (1954) propone una formulación para determinar la resistencia de tierra considerando suelos homogéneos y la inclusión de varillas verticales.

$$R_g = \frac{(R_1)(R_2) - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (8)$$

Dónde:

R_1 .- Valor de la resistencia a tierra de los conductores de la rejilla (Ω)

R_2 .- Valor de la resistencia a tierra de las varillas de la rejilla (Ω)

R_m .- Valor mutuo de la resistencia a tierra entre el grupo de los conductores de la malla y de las varillas de tierra. (Ω)

Resistencia de la rejilla:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (9)$$

Donde.

L_c .- Valor de la longitud total de todos los conductores de la malla de tierra (m)

a' .- es $\sqrt{a \cdot 2h}$ para todos los conductores que se entierran a una profundidad de h metros.

$a' = a$ para un conductor en la superficie terrestre (m)

$2a$.- Diámetro del conductor (m)

K_1 y K_2 .- Coeficientes.

Resistencia de las varillas:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi(n_R)(L_r)} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{(2K_1)(L_r)}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (10)$$

Dónde:

L_r .- valor de la longitud de cada varilla (m)

2_b .- diámetro de la varilla (m)

n_R .- número de varillas que se colocan en el área A .

Resistencia mutua entre la rejilla y las varillas:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi(L_c)} \left[\ln\left(\frac{2L_c}{L_r}\right) + \frac{(K_1)(L_c)}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (11)$$

Métodos computacionales

Se ha demostrado que los métodos computacionales tienen la ventaja de calcular la magnitud de R_g de una forma más exacta que los métodos empíricos. En este trabajo se utilizará el método matricial combinado con el método de integración (MA-INT) para determinar R_g por las razones siguientes: 1) permite obtener valores aceptables de R_g para mallas cuadradas y rectangulares con electrodos paralelos espaciados a distancias uniformes y no uniformes, 2) Se pueden incluir varillas de tierra en el eje z y 3) El método es más exacto que los métodos (Sakis-Meliopoulos, 1988).

El método computacional MA-INT parte de la ecuación de Laplace, a fin, de obtener los Factores de Distribución de Voltaje (VDF) en un punto. Los elementos de la matriz VDF se denominan factores de distribución de voltaje debido a que proporcionan el voltaje en un punto originado por el flujo de una fuente de corriente específica y tienen dimensiones de resistencia (Ohms). En literatura la matriz VDF se le conoce frecuentemente como resistencia de transferencia, resistencias mutuas y propias, sin embargo, su significado físico no tiene relación alguna con el concepto de resistencia.

Para determinar el VDF el método MA-INT divide los electrodos de tierra en n segmentos pequeños y considera que una corriente eléctrica total I_i que emana de la superficie de un segmento fluye hacia el interior del suelo como se presenta en la Figura 1. Además, se asume que la distribución de corriente a lo largo del segmento es uniforme. Dependiendo de la dirección de los segmentos, se puede calcular la matriz VDF para los escenarios siguientes: 1) la tensión en un punto en el suelo, ocasionado por el flujo de una corriente eléctrica del conductor 1, 2) Calcular la tensión transferida al segmento de conductor 2 debido al flujo de corriente eléctrica del conductor 1 y 3) Calcular la tensión del segmento del conductor 1 ocasionado por el flujo de su propia corriente eléctrica (Sakis-Meliopoulos, 1988).

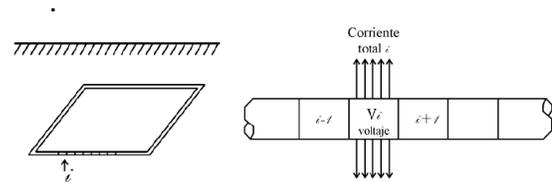


Figura 1 Sistema de tierra dividida en electrodos pequeños

Construcción de las Matrices de Factor de Distribución de Voltaje (FDV)

La construcción de la matriz de FDV ocupa un lugar importante en la metodología propuesta. Para ilustrar la manera en que se obtuvo esta matriz considérese la Figura 2, la cual consiste de una malla con un cuadro (1x1), cuyas dimensiones son de 10 m. de ancho por 10 m. de largo, la cual se encuentra enterrada a una profundidad de 0.5 m de la superficie de la tierra.

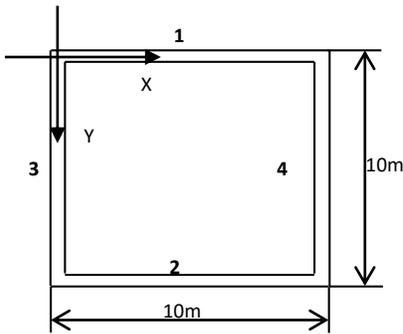


Figura 2 Malla de tierra de un cuadro (1x1)

Para facilitar los cálculos, el origen se situará en una de las esquinas de la red. Asimismo, cada segmento será considerado como una línea de transmisión individual. Bajo estas observaciones se tendría un sistema orientado en “x” y “y” como se muestra en la Figura 3.

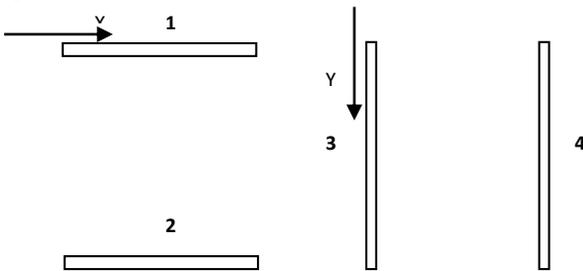


Figura 3 Sistema de tierra malla 1x1

Determinando las coordenadas del centro de cada segmento de acuerdo a la Figura 2, se obtienen los datos presentados en la Tabla 1. Con este tipo de arreglo es posible determinar el FDV únicamente para los segmentos 1,2 y 3,4 en la dirección “x” y “y”, respectivamente.

Coordenadas al centro de los segmentos del conductor					
Segmento	x	y	z	Longitud de los segmentos del conductor (m)	Diámetro (m)
1	5	0	-0.5	10.0	0.007
2	5	10	-0.5	10.0	0.007
3	0	5	-0.5	10.0	0.007
4	10	5	-0.5	10.0	0.007

Nota: Los electrodos están orientados en la dirección de “x” y “y”.

Tabla 1 Parámetros de los segmentos del sistema de tierra de la Figura 5.2

Utilizando las fórmulas de la referencia de (Sakis-Meliopoulos, 1988) se tiene:

$$FDV_{direccion_x} = \begin{vmatrix} 149.1289 & 14.8374 \\ 14.8374 & 149.1289 \end{vmatrix} \quad (12)$$

$$FDV_{direccion_y} = \begin{vmatrix} 149.1289 & 11.3934 \\ 11.3934 & 149.1289 \end{vmatrix} \quad (13)$$

Las matrices (12) y (13) corresponden al FDV de los segmentos 1,2 y 3,4 respectivamente. Para la construcción de la matriz FDV del sistema de tierras completo, se colocarán las submatrices individuales de FDV en la diagonal principal como se presenta en la ecuación (14). Con este tipo de arreglo no se consideran acoplamientos entre segmentos orientados en un ángulo de 90°.

$$FDV_{direccion_x_y} = \begin{vmatrix} FDV_{direccion_x} & 0 \\ 0 & FDV_{direccion_y} \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$FDV_{direccion_y_x} = \begin{vmatrix} 149.1289 & 14.8374 & 0 & 0 \\ 14.8374 & 149.1289 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 149.1289 & 11.3934 \\ 0 & 0 & 11.3934 & 149.1289 \end{vmatrix} \quad (15)$$

Cálculo de la Matriz de Conductancia (G)

Una vez que se obtienen las matrices de FDV, es posible calcular el parámetro de la conductancia de la red de tierra. Si recordamos que $G=[FDV]^{-1}$ al invertir (12), (13) se tiene:

$$G_{-x} = \begin{vmatrix} 0.0068 & -0.0007 \\ -0.0007 & 0.0068 \end{vmatrix} \quad (16)$$

$$G_{-y} = \begin{vmatrix} 0.0067 & -0.0005 \\ -0.0005 & 0.0067 \end{vmatrix} \quad (17)$$

Donde las matrices de conductancia (16), (17) corresponden a los conductores 1,2 y 3,4 respectivamente sin considerar los acoplamientos a 90°. Para la construcción de conductancia total del sistema, existen dos maneras de obtenerla:

a) Tomar las matrices de conductancias en sus respectivas direcciones y situarlas en la diagonal principal como se observa en la ecuación (18):

$$G_{-x-y} = \begin{bmatrix} G_{-x} & 0 \\ 0 & G_{-y} \end{bmatrix} \quad (18)$$

b) Directamente, es posible invertir la ecuación (15) para obtener la conductancia de todo el sistema.

$$G_{-x-y} = \begin{vmatrix} 0.0068 & -0.0007 & 0 & 0 \\ -0.0007 & 0.0068 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0067 & -0.0005 \\ 0 & 0 & -0.0005 & 0.0067 \end{vmatrix} \quad (19)$$

De la matriz de conductancia del sistema, la resistencia, la inductancia y la capacitancia se obtienen utilizando las ecuaciones presentadas en la referencia de (Meliopoulos, y Moharam, 1983).

Comparación de resultados

En esta sección se propone comparar el método MA-INT con otros métodos presentados en literatura para calcular Rg, con la finalidad de demostrar que el método MA-INT es una herramienta idónea que se puede utilizar para optimizar el diseño de redes de tierra. El estudio comparativo consiste en calcular la magnitud de Rg para rejillas de tierra de topologías y dimensiones diferentes.

El sistema de prueba está compuesto por una malla cuadrada con un número total de cuadrículas (N=4), cada cuadrícula tiene una dimensión de (PC=10mX10m) y el área total de la malla es de (PM=20mX20m), la estructura se encuentra enterrada a 0.5m de las superficie de la tierra en un suelo homogéneo de resistividad de 100 Ω.m, el diámetro de los electrodos es de 10 mm, se considera no conectar varillas en el eje z, ver Figura 4. La dimensión del sistema de tierra queda completamente representada por la nomenclatura siguiente:

4-20X20-10X10.

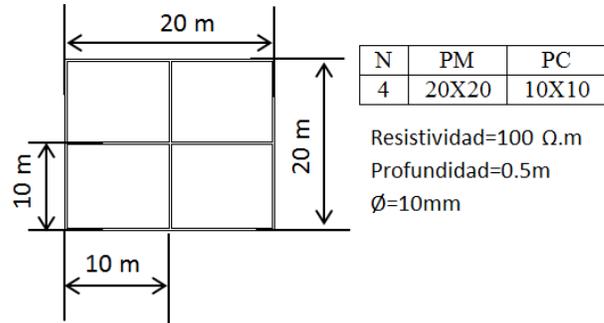


Figura 4 Sistema de prueba: 4-20X20-10X10

En la Tabla 2 se presentan los valores de Rg calculados con diferentes métodos para diversos sistemas de prueba. Se puede observar que para el sistema 4-20X20-10X10, el valor de Rg calculado con el método MA-INT es de 2.68 Ω mientras que el valor máximo y mínimo obtenidos con los métodos de Güemes y Schwarz es de 2.74 Ω y 2.56 Ω respectivamente. Es evidente que el valor de Rg determinado con el método MA-INT está por abajo del valor máximo en un 3.25 % y por arriba del valor mínimo en un 4.33 %. En la Figura 4 es posible apreciar de forma gráfica los valores de Rg calculados utilizando los diferentes métodos. Además, se puede observar que el método MA-INT es idóneo para calcular Rg con buenos resultados.

Dimensión de la Malla N-PM-PC	Métodos para calcular la resistencia de la malla (Rg)					
	Güemes, (2004)	Thapar (1991)	Sverak (1984)	Schwarz (1954)	Thapar (1991)	Matricial-Integral
4-20X20-10X10	2.74	2.77	2.96	2.56	2.63	2.68
16-20X20-5X5	2.58	2.46	2.62	2.49	2.37	2.39
9-24X24-8X8	2.26	2.16	2.31	2.12	2.06	2.12
4-40X40-20X20	1.42	1.41	1.51	1.35	1.41	1.44
16-40X40-10X10	1.27	1.25	1.34	1.29	1.25	1.26
64-40X40-5X5	1.16	1.15	1.23	1.22	1.15	1.16

Resistividad de 100Ω.m, diámetro del conductor 10mm, Profundidad 0.5m, N.- Numero de cuadrículas, PM.- Perímetro de la malla (m), PC.- Dimensión de la cuadrícula (m).

Tabla 2 Métodos para calcular la resistencia de la malla

Por otra parte, es evidente observar que para rejillas con áreas iguales pero con diferentes números de electrodos cómo se muestra en los sistemas de tierra de los incisos A) y B) de la Figura 5, el valor de Rg varía.

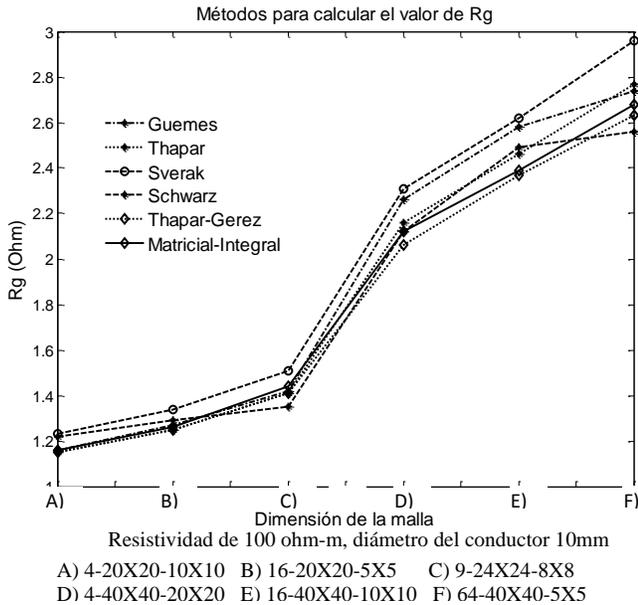


Figura 5 Métodos para calcular la Resistencia de Malla para redes de diferentes dimensiones

Estudio de sensibilidad de parámetros

El estudio consiste en utilizar los datos del sistema de prueba presentado en la Figura 4, pero con la posibilidad de poder incrementar: 1) el número de electrodos, 2) el diámetro del conductor y 3) el área de la malla de tierra con las siguientes restricciones: 1) los electrodos paralelos en la dirección “x”, y “y” estarán espaciados de forma uniforme. 2) La malla debe ser simétrica, es decir el número total de electrodos que se coloquen en el eje x deben ser igual al número de electrodos en el eje y 3) No se considera conectar varillas de tierra en el eje Z.

Separación de electrodos

En orden de evaluar cómo influye al valor de Rg el número de electrodos en la rejilla de tierra y por consiguiente la distancia de separación que existe entre ellos, se propone incrementar el número de electrodos con las siguientes restricciones:

1) El número mínimo de electrodos que se pueden instalar en la dirección “x”, “y” es de 2 electrodos, 2) el número máximo de electrodos que se pueden instalar en la dirección “x”, “y” es de 300 electrodos, 3) La dimensión del área de la rejilla será constante de 400 m². El resultado de este estudio se presenta en la Figura 6. Se puede observar que conforme se incrementa el número de electrodos en la red de tierra el valor de Rg presenta un comportamiento exponencial; no obstante después de incrementar un número determinado de electrodos la diferencia del valor de Rg es insignificante. A manera de ejemplo, cuando se instalan 86 electrodos por cada lado, el sistema queda totalmente representado por la siguiente nomenclatura: 7225-20X20-0.24X0.24. La magnitud de Rg para este sistema es de 2.131 Ω, cuando se instalan 300 electrodos por lado el valor de Rg que se obtiene es de 2.121 Ω decreciendo únicamente en un 0.046%, pero el número electrodos que se adicionaron es aproximadamente de 348.83%. Estos resultados demuestran que minimizar el valor de Rg es válido pero no es suficiente para resolver por completo el problema de optimizar el diseño del sistema de tierra.

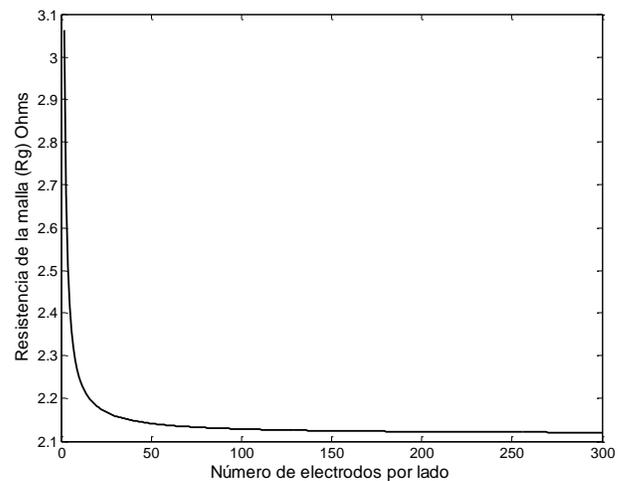


Figura 6 Resistencia de Malla (Rg) para diferentes topologías de redes de tierra

Incremento del diámetro del conductor

Ahora el estudio de sensibilidad que se propone es incrementar el diámetro del conductor satisfaciendo las siguientes restricciones: 1) El diámetro mínimo del electrodo será de 8 mm que corresponde al calibre de 1/0, 2) El diámetro máximo del electrodo será de 24 mm, 3) La dimensión del área de la rejilla será constante de 400 m² y 4) El número de cuadrículas en la dirección “x”, “y” será constante de 50. Los resultados se presentan en la Figura 7. Es evidente observar que conforme se incrementa el diámetro del conductor de la malla, disminuye el valor de R_g.

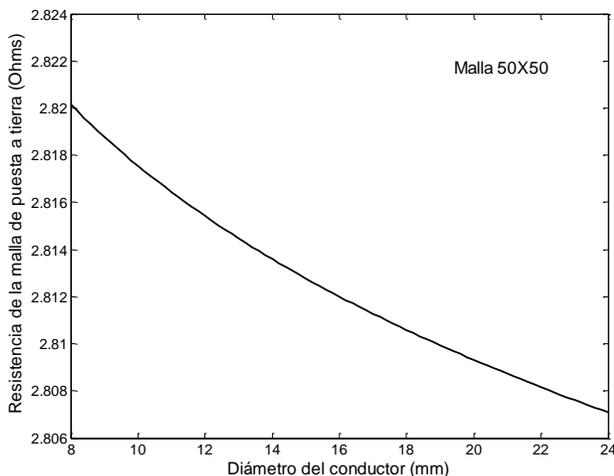


Figura 7 R_g para malla de 50X50 utilizando conductores de diferentes diámetros.

Los resultados muestran que cuando el diámetro del conductor es de 8mm el valor de la resistencia de la malla es de 2.82Ω, mientras que para un conductor con diámetro de 24mm el valor de R_g es de 2.807Ω, decreciendo aproximadamente en 0.5% con relación al conductor de menor diámetro. Es importante mencionar que en el diseño de redes de puesta a tierra elegir un conductor con diámetro grande implicaría incrementar los costos de construcción.

Incremento del área de la malla de puesta a tierra

En este caso se incrementará el área del sistema de tierra satisfaciendo las siguientes consideraciones: 1) El área mínimo de la malla de puesta a tierra será de 400 m², 2) El área máxima de la malla de puesta a tierra será de 10000 m², 3) El número de electrodos en la dirección “x”, “y” será constante de 51 electrodos, 4) el diámetro del conductor será de 10mm. En la Figura 8 se puede observar que el valor de R_g para mallas de 50X50 cuadrículas con área de 20 y 100 m² es de 2.809 y 0.58 Ω respectivamente, decreciendo en un 79% aproximadamente. Es importante observar que la R_g decrece exponencialmente conforme se incrementa el área del sistema de tierra.

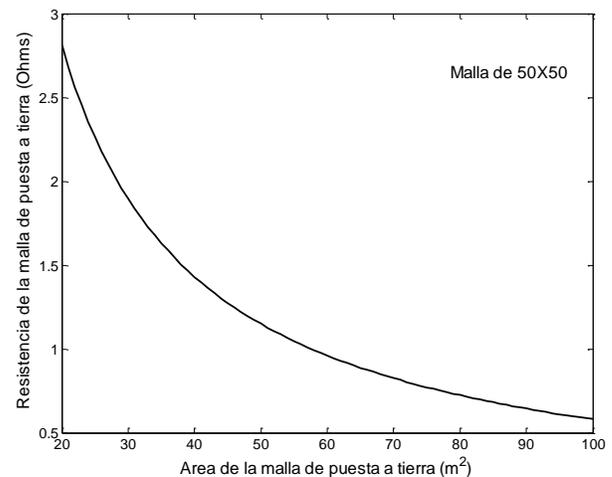


Figura 8 R_g utilizando diferentes áreas para una Malla de 50X50

Conclusiones

En este trabajo se presenta un método computacional especializado para calcular el valor de la resistencia remota de tierra. Los valores de R_g fueron comparados con resultados publicados por otros autores utilizando diferentes métodos.

En este sentido es conveniente utilizar métodos adecuados para calcular el valor de R_g , porque es uno de los parámetros eléctricos más relevantes en el diseño de sistemas de tierra para subestaciones al aire, porque está estrechamente ligado al criterio de seguridad, ya que la resistencia de tierra se opone al paso de la corriente que fluye a disiparse al interior del suelo. Valores bajo de R_g permite reducir el gradiente de potencial en la rejilla de tierra.

Por otra parte realizó un estudio de sensibilidad de parámetros de diseño de redes de tierra para evaluar cómo impacta en el valor de R_g . Los parámetros que se analizaron fueron: el diámetro y la separación de los conductores de la rejilla de puesta a tierra, así como, el área de la superficie que cubre la malla de tierra. Los resultados muestran que es importante elegir apropiadamente cada uno de los parámetros de diseño porque permiten reducir el valor de R_g , pero por otra parte se debe tener cuidado de no incrementar el costo de construcción.

Reconocimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México-DGEST, al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato (CONCYTEG) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apreciable apoyo financiero en la realización de este proyecto de investigación.

Referencias

Colominas, I., Navarrina, F., & Casteleiro, M. (1999). A boundary element formulation for the substation grounding design, 30(9-11), 693-700
Covitti, A., Delvecchio, G., Fusco, A., Lerario, F., & Neri, F. (2005). Two Cascade Genetic Algorithms to Optimize Unequally Spaced Grounding Grids with Rods, *IEEE EUROCON*, Serbia and Monte negro, 22-24.

Elrefaie, E.M., Ghoneim, S., Kamal, M., & Ghaly, R. (2012) Evolutionary Strategy Technique to Optimize the Grounding Grids Design, Power and Energy Society General Meeting, 1-6

Güemes, J.A. & Hernando, F.E. (2004). Method for Calculating the Ground Resistance of Grounding Grids Using FEM, *IEEE Transactions On Power Delivery*, 9(2). 595-600.

Ghoneim, S., Hirsch, H., Elmorshedy A., & Amer, R. (2007). Optimum grounding grid design by using an evolutionary algorithm, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-7.

He, Z., Wen, X., & Wang, J. (2007) Optimization Design of Substation Grounding Grid Based on Genetic Algorithm”, *IEEE Third International Conference on Natural Computation*, (ICNC 2007), 140-144.

IEEE Std. 80-2000, (2000). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, *IEEE: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc.*, New York.

Khodr, H. M., Salloum, G. A., & Miranda, V. (2006). Grounding System Design in Electrical Substation: An Optimization Approach, *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 1-5.

Khodr, H. M., Salloum, G. A., Saraiva, J. T., & Matos, M. A. (2009). Design of grounding systems in substations using a mixed-integer linear programming formulation, 79(1), 126-133

Meliopoulos, A.P., & Moharam. M.G (1983). Transient Analysis of Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 102(2), 389-399

Neri, F., Cascella, G.L., Salvatore N., Acciani, G., & Gassi, D.A., (2005). A Hierarchical Evolutionary-Deterministic Algorithm in Topological Optimization of Electrical Grounding Grids, *2005 WSEAS Int. Conf. on DYNAMICAL SYSTEMS and CONTROL*, Venice, Italy, 570-575

Otero, A. F., Cidrás, J., & Garrido, C., (2002). Grounding Grid Design Using Evolutionary Computation-Based Methods, *Electric Power Components and Systems*, 30(2), 151-165

Sakis-Meliopoulos, A. P. (1988) *Power System Grounding and Transients: an Introduction*, Marcel Dekker, New York, 1988

Sarker, R., Mohammadian, M., & Yao, X. (2002) *Evolutionary Optimization*, Klumer Academic Publishers, New York.

Sverak, J.G. (1984) "Simplified analysis of electrical gradients above a ground the present IEEE method?," *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, vol. PAS-103, pp., 7-25, Jan. 1984

Schwarz, S.J. (1954) "Analytical expression for resistance of grounding systems," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. 73, no. 13, part III-B, pp. 1011-1016, Aug. 1954.

Thapar, B., Gerez, V., Balakrishnan, A. & Blank, D.A. (1991) Evaluation of a grounding grid of any shape, *IEEE Transaction. Power Delivery*, 6(1), 640-647.

Yi-min, Y., Min-fang, P., Hai-tao, H., & Yue-hua, Y. (2009) Optimal Design of Grounding Grids Based on Genetic Algorithm, *IEEE Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, (WGEC '09), 129-132

Zitzler, E., Laumanns, M. & Thiele, L. (2001) SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. *Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland.*