

ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AL DISEÑO ÓPTIMO DE MALLAS DE TIERRA DE SUBESTACIONES.

RESUMEN

En este artículo se presenta un algoritmo genético aplicado al diseño óptimo de la malla de puesta a tierra de una subestación, cumpliendo normativas de seguridad y buscando minimizar los costos de inversión.

PALABRAS CLAVES

Algoritmo genético, sistema de puesta a tierra.

ABSTRACT

This paper presents a genetic algorithm used to the optimal design of substation ground grid, with security normative and cost minimum.

KEYWORDS

Genetic algorithm, substation ground grid.

1. INTRODUCCIÓN

La malla de puesta a tierra en una subestación debe, ante todo, proporcionar seguridad a todo el personal que labore en ella contra descargas eléctricas.



CARLOS A. RESTREPO P.
Estudiante IX Semestre.
Facultad de Ingeniería Eléctrica.
Universidad Tecnológica de
Pereira
cr@utp.edu.co
www.utp.edu.co/~cr

MAURICIO GRANADA
Ingeniero Electricista, Ms. C
Docente F.I.E.
Universidad Tecnológica de
Pereira
magra@utp.edu.co

*Grupo de Investigación en
Planeamiento de Sistemas
Eléctricos*

Para ello se debe garantizar en todo punto de la subestación un camino de descarga de baja impedancia. Adicionalmente, la malla facilita la operación de los dispositivos de protección contra sobrecargas. Esta debe ser de baja impedancia para que todo el sistema se considere solidamente puesto a tierra y no debe tener variaciones ante cambios ambientales para evitar que la corriente de falla a tierra produzca el disparo inadecuado de protecciones. Adicionalmente debe estar en capacidad de conducir la corriente de falla sin que se provoquen calentamientos excesivos o gradientes de potencial peligrosos durante el tiempo de falla.

En la actualidad se hacen mallas de tierra para subestaciones de acuerdo a normativas internacionales de seguridad [1], pero los algoritmos usados en estos diseños rara vez consideran una metodología de optimización que involucre una combinación adecuada de seguridad y costos.

En este trabajo se presenta una solución del problema de diseño óptimo de malla de tierra usando algoritmos genéticos. El objetivo fundamental es encontrar un diseño que combine adecuadamente parámetros de seguridad y costos de construcción.

2. DISEÑO DE UNA MALLA DE PUESTA A TIERRA

Para realizar un diseño seguro de una malla de puesta a tierra se seguirá la metodología planteada en [1]. El primer paso consiste en determinar el área a proteger, es decir, las dimensiones del terreno y la resistividad del terreno mediante mediciones. El segundo paso es seleccionar el conductor a utilizar en la malla, para ello se debe hallar la corriente de fallo de secuencia cero, como se muestra a continuación:

$$I_0 = \frac{E}{3 \cdot R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(x_1 + x_2 + x_0)} \quad (1)$$

en donde E es la tensión fase neutro y R_f la impedancia de falla. R_1 , R_2 y R_0 son las impedancias equivalentes de la secuencia positiva, negativa y cero, respectivamente. X_1 , X_2 y X_0 son las reactancias equivalentes de las respectivas secuencias. Posteriormente se determina el área del conductor en $kcmil$, como sigue:

$$A = I \times \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \times \alpha_r \times \rho_r}\right) \times \ln\left(\frac{K_0 + T_r}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2)$$

Siendo: I la corriente de fallo *rms* en KA , $TCAP$ es un factor de capacidad térmica en $J/cm^3/^\circ C$, t_c es el tiempo que circula la corriente, T_r es la temperatura de referencia para los materiales en $^\circ C$, T_a es la temperatura ambiente en $^\circ C$, α_r es un coeficiente térmico de la resistividad y ρ_r es la resistividad del conductor (ambos a una temperatura T_r), α_0 es un coeficiente térmico de la resistividad a T_0 y K_0 es $1/\alpha_0$. Cada uno de los factores anteriormente señalados se pueden encontrar en tablas de constantes de materiales. Con el área del conductor y usando tablas de conductores, se determina el calibre más próximo y el diámetro del mismo.

El tercer paso es hallar las tensiones de paso y de contacto, para ello se supone que los trabajadores de la subestación tienen como mínimo un peso de $70 Kg$, las respectivas tensiones para este peso se calculan como:

$$E_{paso} = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \times (1000 + 6 \times C_s \times \rho_s) \quad (3)$$

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

Siendo t_s el tiempo de duración de la falla, ρ_s la resistividad de la superficie y C_s un factor de aislamiento asociado a las características de la superficie de la subestación. Generalmente se asume una capa de roca fina partida sobre la superficie de la subestación. Dicho factor de aislamiento se obtiene como:

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

h_s corresponde al espesor en cm de la capa de aislamiento de la subestación.

El cuarto paso es realizar un diseño inicial de la malla de la subestación escogiendo un número inicial de conductores longitudinales y transversales.

El quinto paso consiste en calcular la resistencia de la malla, esto se logra con la ecuación de Sverak [1]:

$$R_g = \rho \times \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \times \left(1 + \frac{1}{1 + h \times \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (6)$$

siendo L_T la longitud total de conductor en la malla (conductores y varillas enterradas), A el área de la malla y h la profundidad de enterramiento.

El sexto paso consiste en hallar la máxima corriente que podrá circular por la malla. Ésta se obtiene corrigiendo la corriente de fallo de secuencia cero como se muestra:

$$I_G = D_f \times S_f \times 3 \times I_o \quad (7)$$

donde D_f es el factor de decremento el cual depende de la magnitud de la relación entre inductancia y resistencia y el tiempo de duración de la falla, este factor se encuentra en tablas [1]. S_f es un factor que relaciona la corriente de falla con la corriente de falla que circulara por la malla I_o .

En el séptimo paso se compara la tensión de falla GPR con la tensión de toque. Si la tensión GPR es menor que la de toque el diseño se considera seguro. De lo contrario se debe seguir al octavo paso. La tensión de falla esta dada por:

$$GPR = I_G \times R_g \quad (8)$$

El octavo paso consiste en determinar la tensión de paso real y la tensión de malla. La tensión de malla esta definida como:

$$E_m = \frac{\rho \times I_G \times K_m \times K_i}{L_T} \quad (9)$$

donde K_m y K_i son, respectivamente:

$$K_m = \frac{1}{2 \times \pi} \left[\text{Ln} \times \left[\frac{D^2}{16 \times h \times d} + \frac{(D+2+h)^2}{8 \times D \times h} - \frac{h}{4 \times d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \times \text{Ln} \left[\frac{8}{\pi \times (2 \times n - 1)} \right] \right] \quad (10)$$

n corresponde al número de conductores largos, D es la separación de estos en metros y d es el diámetro de los conductores de la malla. K_{ii} y K_h se definen como:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad (11)$$

siendo h_o la profundidad de referencia de la malla y generalmente se asume igual a un metro.

Si la malla tiene varillas en su perímetro K_{ii} vale uno, de lo contrario:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{\frac{2}{n}}} \quad (12)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \times n' \quad (13)$$

el factor geométrico está definida como:

$$n' = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (14)$$

$$n_a = \frac{2 \times L_T}{L_p} \quad (15)$$

Si la malla es cuadrada n_b y n_c valen uno, en caso contrario:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}} \quad (16)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{L_x \times L_y} \quad (17)$$

siendo L_p la longitud del perímetro de la malla, L_x y L_y son las dimensiones de la malla de puesta a tierra.

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (18)$$

D_m corresponde a la separación máxima entre conductores de la malla.

Si la tensión de malla es menor a la de toque se continúa calculando la tensión de paso real, de lo contrario se debe de rediseñar la malla nuevamente.

La tensión de paso real se expresa como:

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_G}{L_s} \quad (19)$$

K_s y L_s se calculan como:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \times \left[\frac{1}{2 \cdot n} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \times (1 - 0.5^{(n-2)}) \right] \quad (20)$$

$$L_s = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R \quad (21)$$

En donde L_C y L_R son la longitud de los conductores de la malla y de las varillas respectivamente.

Por último se compara la tensión de paso real (19) con la hallada en (3) y si es menor, el diseño se considera seguro, en caso contrario se debe de rediseñar la malla y volver al cuarto paso.

3. FORMULACION DEL PROBLEMA

La reducción de los costos en el diseño de una malla de tierra en una subestación es proporcional a la cantidad total de conductor que se emplea para ella, de esta forma para tener un diseño óptimo se deberá minimizar la cantidad de conductor utilizada cumpliendo con restricciones de seguridad adecuadas. Así, el modelo matemático asume la siguiente forma:

$$\max \left(\frac{1}{L_T(n, m, L_X, L_Y)} \right) = \max \frac{1}{n \times L_X + m \times L_Y} \quad (22)$$

s.a

$$E_m < E_{contacto} \quad (23)$$

$$E_S < E_{paso} \quad (24)$$

Donde cada uno de los parámetros del modelo han sido definidos en la sección 2.

A través de (22) el problema es tratada como uno de maximización, dado que los algoritmos genéticos muestran un mejor desempeño en este tipo de problemas [3].

Las expresiones (23) y (24) corresponden a las restricciones de seguridad de la red definidas en la sección 2. De la ecuación (2) se obtiene el área del conductor de la malla y de tablas [1] el diámetro d de éste. Así, se podría determinar, inicialmente, el número máximo de conductores transversales y longitudinales de la malla como se presenta a continuación:

$$n_{max} \approx \frac{L_X}{d} \quad (25)$$

$$m_{max} \approx \frac{L_Y}{d} \quad (26)$$

Basándose en estos resultados se podría determinar el número de soluciones candidatas S_c como:

$$S_c \approx (n_{max} + 1) \times (m_{max} + 1) \quad (27)$$

Se observa que el esfuerzo computacional crece de manera exponencial con el tamaño del problema por lo que este es de alta explosión combinatorial. Adicionalmente, las restricciones son no lineales, por lo que es un problema combinatorial del tipo NP completo que requiere para su solución un algoritmo heurístico.

4. ALGORITMO GENÉTICO

A continuación se presenta cada una de las características del algoritmo para el diseño óptimo de la malla de puesta a tierra de una subestación.

4.1 CODIFICACIÓN

La codificación que mejor se adapta a este problema es la decimal, con la cual se representa la cantidad de conductores longitudinales y transversales de la malla. Esta codificación tiene como ventaja el uso de un vector conformado solamente por dos componentes, lo cual se refleja en una mayor velocidad de procesamiento.

Cada una de las posibles configuraciones está formada por un vector C_i de dos componentes como se muestra en (28). El primer elemento (n_i) representa el número de conductores largos de la malla y el segundo (m_i) representa el número de conductores transversales.

$$C = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & \dots & n_i & \dots & n_{p-1} & n_p \\ m_1 & m_2 & \dots & m_i & \dots & m_{p-1} & m_p \end{bmatrix}^{-T} \quad (28)$$

La alternativa de solución C_i representa un diseño de malla como el que se ilustra en la figura 1.

4.2 POBLACIÓN INICIAL

Se determinara el tamaño de la población inicial n_p teniendo como criterio el tamaño del área a diseñar. La forma como se genera la población inicial es aleatoria controlada.

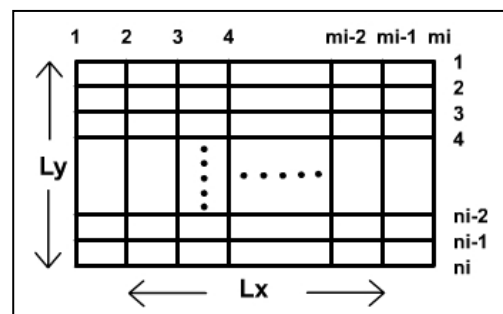


Figura 1. Malla de puesta a tierra.

Para generar la población inicial se debe de tener en cuenta que, por norma, no pueden haber conductores que terminen en punta. Por lo tanto, toda la malla debe tener cuatro conductores en su perímetro. Considerando lo anterior para la población inicial se genera un número aleatorio entre 2 y el número máximo de conductores que se podrían colocar tanto transversal como longitudinalmente, de acuerdo a las ecuaciones (23) y (24). Enseguida se determina si la configuración cumple con un diseño seguro, en caso de no ser así, se agregan conductores hasta que la configuración sea segura.

4.3 CÁLCULO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

Para cada una de las configuraciones del vector de soluciones se determina la longitud del conductor empleado. La configuración con menor longitud será el diseño que podrá tener más probabilidad de tener más descendientes en la próxima generación. Las longitudes correspondientes a cada configuración son calculadas de la siguiente manera:

$$L = \begin{bmatrix} n_1 \cdot L_x + m_1 \cdot L_y \\ n_2 \cdot L_x + m_2 \cdot L_y \\ \bullet \\ \bullet \\ n_p \cdot L_x + m_p \cdot L_y \end{bmatrix} \quad (29)$$

La función de adaptación que se emplea en este algoritmo es igual a la función objetivo (f.o) de cada configuración menos un factor k, el cual se define como:

$$K = 0.9 \cdot f.o_{min} \quad (30)$$

de esta forma se tiene la función de adaptación:

$$FA = \begin{bmatrix} n_1 \cdot L_x + m_1 \cdot L_y \\ n_2 \cdot L_x + m_2 \cdot L_y \\ \bullet \\ \bullet \\ n_p \cdot L_x + m_p \cdot L_y \end{bmatrix} - K \quad (31)$$

4.4 SELECCIÓN

Este operador genético permite seleccionar las configuraciones de la población actual que deban participar en la generación de las configuraciones de la nueva población. Se emplea un esquema de selección proporcional, es decir, el número de descendientes a que tiene derecho cada configuración es proporcional al valor de su función de adaptación. Para determinar el número de

descendientes de cada configuración se hace una relación entre la función de adaptación y la media de la función objetivo. El inconveniente radica en que los descendientes en su mayoría pueden ser números no enteros. Para tener un número de descendientes enteros se emplea el esquema de la ruleta.

4.5 RECOMBINACIÓN

El operador de recombinación consiste en escoger dos configuraciones en forma aleatoria entre las que tienen derecho a descendencia y generar a partir de ellas dos nuevas configuraciones. La recombinación usada es de punto simple. La tasa de recombinación empleada es del 90%. La forma de recombinar es generar un número aleatorio entre [0,1] y si éste es menor a 0.9 se realiza la recombinación. De lo contrario, las dos configuraciones pasan a la próxima generación sin recombinación.

4.6 MUTACIÓN

La mutación se aplica a cada componente de las configuraciones de la población inicial usando una tasa de mutación del 5%. Si se activa la mutación (aleatorio $\leq 5\%$), el proceso consiste en incrementar o decrementar en una unidad cada uno de los dos componentes (n_i y m_i) de cada una de las alternativas de la población inicial (C_i). Para definir si se incrementa o decremента se utiliza un número aleatorio.

Si las configuraciones de la nueva generación son inseguras, es necesario aumentar la longitud de la malla hasta que se garantice seguridad, esto se hace escogiendo aleatoriamente una de sus dos componentes y sumando una unidad.

4.6 CRITERIO DE PARADA

El algoritmo finalizara una vez se halla realizado un numero especifico de generaciones.

5. EJEMPLO

El algoritmo propuesto se aplicó al siguiente diseño de subestación:

Dimensiones del patio:	63m x 84m
Duración de la falla:	0.5s

Impedancia de secuencia positiva: 4+10j Ω
 Impedancia de secuencia cero: 10+40j Ω
 Factor de la relación de corrientes: 0.6
 Nivel de tensión: 115 kV
 Resistividad del terreno: 400 Ω.m
 Resistividad de la superficie: 2500 Ω.m
 Altura de roca picada: 0.102m
 Profundidad de enterramiento: 0.5m

profundidad de la malla, espesor de la capa aislante, tipo de soldadura, entre otros.

El problema de diseño óptimo de mallas de tierra de subestaciones es de tipo combinatorial np-completo, por lo cual es susceptible a ser resuelto por otras metodologías tales como: colonia de hormigas, búsqueda Tabú, Simulated Annealing, partículas Swarm, entre otras.

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para diferentes poblaciones iniciales y generaciones. Se observa que con seis conductores longitudinales y cinco transversales se obtiene un diseño óptimo del sistema de puesta a tierra de la subestación.

N	G	tiempo (s)	n	m	L (m)	Iteración
20	100	8.35	126	1252	89460	88
30	100	11.65	158	14	14154	98
40	100	12.53	69	110	12726	95
50	100	14.83	41	79	8421	100
60	100	22.87	12	72	5544	98
70	100	20.16	107	24	10500	96
60	200	36.52	162	167	24129	191
60	300	45.8	31	81	7707	294
60	400	65.48	10	2	966	393
60	500	81.62	90	2	7686	490
60	400	65.69	6	5	819	69
60	400	64.26	34	2	2982	396
60	400	63.05	2	59	3885	385
60	400	61.96	11	2	1050	399
60	400	66.07	6	6	882	196
60	400	64.64	2	52	3444	397
60	400	63.27	3	31	2205	345
60	400	65.69	6	5	819	186
60	400	64.37	3	31	2205	156
60	400	64.21	2	45	3003	390
60	400	63.27	14	2	1302	395
60	400	66.35	7	4	840	223
60	400	63.39	3	28	2016	399
60	400	71.07	6	5	819	321

Tabla 1. Resultados del diseño óptimo.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE guide for safety in AC substation grounding, IEEE Std80-2000, Pages:i- 192
- [2] GALLEGO R. Ramón A., ROMERO L. Rubén y ESCOBAR Z. Antonio. Algoritmos genéticos, Texto Maestría en ingeniería eléctrica U.T.P.
- [3] GLOVER F. And KOCHENBERGER G. A. Handbook of metaheuristics. Kluwer Academic Publishers. Norwell. M.A. 2003.

8. AUTORES



CARLOS A. RESTREPO P.

Estudiante IX Semestre.
 Facultad de Ingeniería Eléctrica.
 Universidad Tecnológica de Pereira
 cr@utp.edu.co
 www.utp.edu.co/~cr



MAURICIO GRANADA

Ingeniero Electricista, Ms. C
 Docente Facultad de Ingeniería Eléctrica
 Universidad Tecnológica de Pereira
 magra@utp.edu.co

6. CONCLUSIONES

El algoritmo presentado encuentra soluciones que garantizan seguridad y adicionalmente minimiza los costos de inversión.

La codificación usada en el algoritmo permite manejar poblaciones con un gran número de individuos lo cual se refleja en mayor diversidad y velocidad de procesamiento. Es factible que una codificación más compleja mejore los resultados obtenidos si se tiene en cuenta factores como: