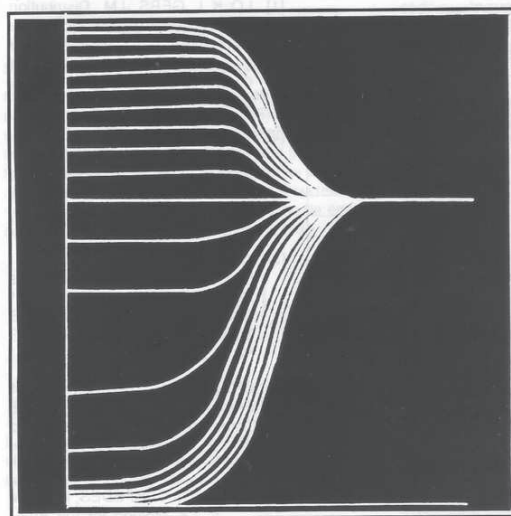


Medición de la resistencia de electrodos de tierra



RESUMEN

En este artículo se suministra información sobre los siguientes aspectos:

Resistencia de electrodos de tierra en terrenos de dos capas estratificadas horizontalmente, mediante el método de caída de potencial. La resistencia en mención, se hallará gracias a la región de inclinación cero en la curva V vs espaciamiento entre electrodos de potencial y tierra I , o averiguando la posición requerida de la sonda de potencial para que el cociente V/I suministre la resistencia verdadera del electrodo de tierra.

ABSTRACT

A resistance measurement of grounded electrodes in soils of two horizontally stratified layers is presented.

The measurement is based on the potential drop method.

The electrode resistance is found either from the plateau region in the potential V vs Current I curve (the current is function of the electrode-earth spacing) or by finding out the electrode position so as to give the known grounded electrode resistance from the V/I quotient.

1. INTRODUCCION

Las puestas a tierra de sistemas de potencia, industriales, de computa-

□ Jairo Palomino de la Cruz,
Ingeniero Electricista
Profesor Asociado
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

□ Alvaro Enrique Mondragón
Estudiante de Ingeniería
Eléctrica
Universidad del Valle

□ Andrés Rueda
Estudiante de Ingeniería
Eléctrica
Universidad del Valle

□ Jesús Alberto González
Profesor Asistente
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

ción, de comunicación y residenciales, requieren de una baja resistencia de tierra para cumplir con una doble misión:

- Estática. Fijar a un potencial determinado los aparatos y masas conductoras.
- Dinámica. Dirigir a tierra corrientes de defecto.

De la impedancia del circuito de tierra, la resistencia del suelo es la más importante y debe ser pequeña, para evitar que las corrientes provenientes de fallas o descargas atmosféricas produzcan en el sistema grandes caídas de voltaje en los dispositivos, dando origen a daños considerables.

En el caso de sistemas de transmisión, una baja resistencia del suelo y el hilo de guarda suministran una protección adecuada contra las descargas atmosféricas que puedan alcanzar las fases. Además, cuando la resistencia de tierra tiende a cero, en el caso que llegue una onda incidente a una torre de transmisión se refleja totalmente y la sobretensión se anularía en la torre.

Los dispositivos de protección para descargas atmosféricas, generalmente pararrayos, dan origen a un camino fácil entre las líneas y tierra, por eso se hace necesario una buena malla de tierra (baja resistencia) para que ésta absorba la mayor parte de la corriente de peligro y evite daños en los dispositivos.

En el campo de la computación es indispensable realizar una buena puesta a tierra (con resistencia del suelo baja) ya que la mayor parte de las fallas, en estos sistemas, se deben a malas puestas a tierra.

2. MEDICION DE LA RESISTENCIA DE LOS ELECTRODOS DE TIERRA.

Las mediciones de las resistencias de electrodos de tierra se hacen generalmente por el método de caída de potencial. El objetivo principal es encontrar la posición adecuada del electrodo de potencial, para que el cociente V/I represente la resistencia del electrodo de tierra considerado. Se asume un terreno de dos capas estratificado horizontalmente.

Símbolos:

- ρ_1 : resistividad de la primera capa ($\Omega\cdot m$)
- ρ_2 : resistividad de la segunda capa ($\Omega\cdot m$)
- h : profundidad de la primera capa (m)
- a : distancia entre el electrodo de corriente y el electrodo de tierra (m)
- k : factor de reflexión, $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$
- x : espacio entre los electrodos de tierra y potencial
- x_0 : posición requerida de la sonda de potencial, medida desde el electrodo de tierra y expresada como una fracción de d .
- r : radio equivalente de un electrodo de tierra (m)
- L_2 : longitud del cable del electrodo de tierra (m)

- L_2 : longitud de la varilla-electrodo de tierra (m)
- R_{aa} : resistencia verdadera del electrodo a (Ω)
- R_{bb} : resistencia verdadera del electrodo b (Ω)
- m : número de elementos lineales
- δ_i : factor de corriente no uniforme para el elemento i
- C_i : profundidad de entierro del elemento i (m)
- d_i : distancia entre el elemento i y el electrodo de corriente (m)
- X_i : espacio entre el elemento i y el electrodo de potencial (m)
- n : función de los parámetros que describen la configuración del electrodo

γ : función de los parámetros que describe la división proveniente del electrodo en elementos lineales.

La figura 1a presenta la distribución de los electrodos en el método clásico de caída de potencial. El electrodo de potencial está ubicado entre los electrodos de tierra y corriente.

La figura 1b representa gráficamente, la relación entre el cociente V/I y la distancia del electrodo de potencial al electrodo de tierra.

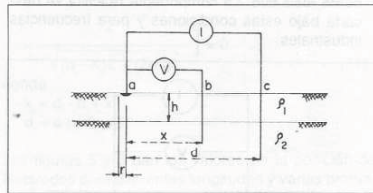


Figura 1 a.- Método clásico de caída de potencial
a = Electrodo de tierra
b = Sonda de potencial

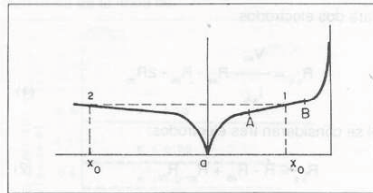


Figura 1 b.- Posición requerida de la sonda de potencial

Cuando el terreno no es uniforme es recomendable que la resistencia verdadera del electrodo de tierra esté dada por la región de inclinación cero en la curva de caída de potencial (región AB).

2.1 Estudio teórico.

Se presentan dos casos. En el primero no se considera la influencia de la geometría del electrodo y en el otro sí.

2.1.1. Pequeño electrodo de tierra.

Suposiciones:

- No se considera la resistividad metálica del electrodo.
- Electrodo es equivalente a un hemisferio de radio r .
- La distancia d entre el electrodo de corriente y el electrodo de tierra es grande, comparado con las dimensiones del electrodo en estudio. Un valor razonable es:
 $r/d < 1/20$
- El radio r es pequeño comparado con el espesor de la primera capa h . Se sugiere un valor:
 $r/h < 1/5$
- El electrodo de tierra es enterrado en la primera capa únicamente.
- Se asume densidad uniforme de corriente en el electrodo.
- Todas las impedancias tienen únicamente componente resistiva. La componente reactiva se descarta bajo estas condiciones y para frecuencias industriales.

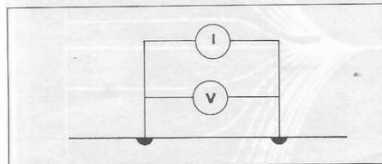


Figura 2.- Medición de la resistencia total

Para dos electrodos:

$$R_{a-b} = \frac{V_{ab}}{I_{a-b}} = R_{aa} - R_{bb} - 2R_{ab} \quad (1)$$

Si se consideran tres electrodos:

$$R_{a-b} = R - R_{ab} + R_{ac} - R_{bc} \quad (2)$$

con

$$R = \frac{V}{I} = \frac{V_{ab}}{I_{a-b}} \quad (3)$$

La resistencia del electrodo da la ecuación (2) si se hace:

$$R_{ab} + R_{ac} - R_{bc} = 0 \quad (4)$$

La ecuación (4) suministra la posición requerida del electrodo de potencial, X_0 .

La resistencia mutua R_{ij} entre dos electrodos i y j , depende de la estructura de las capas de tierra y de la forma del electrodo.

$$R_{ij} = \frac{\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{X} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{X^2 + (2nh)^2}} \right) \quad (5)$$

Haciendo:

$$X = x/d \quad (6)$$

$$H = h/d \quad (7)$$

Sustituyendo la ec. (5) en la ec. (4) se obtiene:

$$\frac{1}{X} - \frac{1}{1-X} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{(1-X)^2 + (2nH)^2}} - \frac{1}{\sqrt{X^2 + (2nH)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1+(2nH)^2}} \right] = 0 \quad (8)$$

La ec. (8) se puede escribir simbólicamente así:

$$F(X, H, K) = 0 \quad (9)$$

En consecuencia, la posición adecuada del electrodo de potencial será:

$$X_0 = \phi(H, K) \quad (10)$$

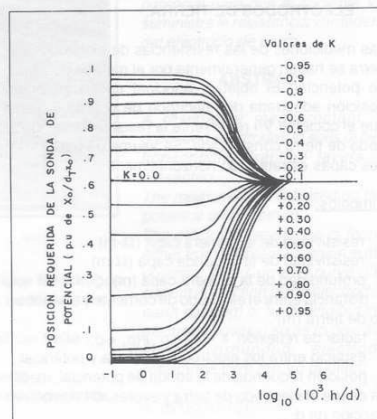


Figura 3.- Posición exacta del electrodo de potencial en el método clásico de caída de potencial.

Resultados

La posición de la sonda de potencial (X_0) depende de los siguientes parámetros:

- K: coeficiente de reflexión
 - Cociente H: $H = h/d$
 - Posición física del electrodo b con respecto a a y c.
- Después de este estudio teórico se concluye lo siguiente:

- Cuando $K = 0$ (terreno uniforme) $X_0 = 0,618$
- Cuando K es positivo y se incrementa hasta +1, el electrodo de potencial puede ser colocado cercano al electrodo de corriente.
- En el caso de valores negativos de K, el electrodo de potencial debe ser colocado más lejano del electrodo de corriente.
- La desviación de 0,618 se incrementa con el valor absoluto de K. Para valores de H entre 0,05 y 5 las desviaciones son muy rápidas.
- Para valores positivos de K la desviación es más grande que para valores negativos. Esto confirma que una gran resistividad de la segunda capa puede traer efectos adversos sobre la medición, si su presencia es ignorada.
- Si H es mayor que 5 (capa muy gruesa de resistividad ρ_1), X_0 se aproxima a 0,618, conclusión lógica ya que la tierra es aproximadamente uniforme. Para valores pequeños de H (0,01 y menores) X_0 tiende a 0,618 (tierra uniforme con resistividad ρ_2).

2.1.2. Efecto de la geometría del electrodo.

En el caso de terrenos de dos capas el efecto de la configuración del electrodo es una función compleja de d, k, γ .

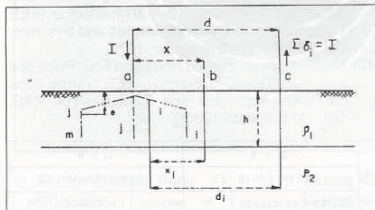


Figura 4. Electrodo grande en un terreno de dos capas.

Se considera un electrodo de tierra complejo enterrado en la primera capa de un terreno de dos capas, como está mostrado en la figura 4. El potencial debido a la corriente I que fluye desde el electrodo a cualquier punto de la tierra es la suma de los potenciales debido a cada parte lineal del electrodo que porta una fracción de la corriente I.

El electrodo se divide en pequeños elementos lineales, cuya longitud es pequeña respecto a h y d. El factor δ_i es escogido de manera que:

- El elemento lineal más cercano al electrodo de corriente tiene el más grande δ_i .
- δ_i también dependerá de la configuración del electrodo.

La expresión final para la ec. (4) es:

$$\sum_{i=1}^m \delta_i \left[\frac{2}{\sqrt{X_i^2 + e^2}} + \frac{2}{d_i^2 + e_i^2} - \frac{2}{d_i \cdot X_i} \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{X_i^2 + (2nh - e)^2}} + \frac{1}{\sqrt{d_i^2 + (2nh - e)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(d_i - X_i)^2 + (2nh)^2}} \right) = 0 \quad (11)$$

donde

$$X_i = d_i - d + x$$

$$d_i = \phi(x, d, \eta, \gamma)$$

Las figuras 5 y 6 dan los valores de la posición de electrodos para diferentes longitudes y varias profundidades.

El electrodo de tierra es localizado en la misma dirección física de la línea bc.

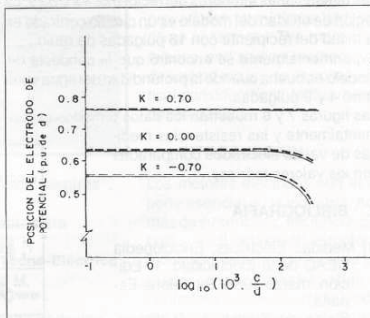


Figura 5 Electrodos grandes (Efecto de las diferentes profundidades de enterramiento de los electrodos)

— corriente uniforme
— corriente no uniforme

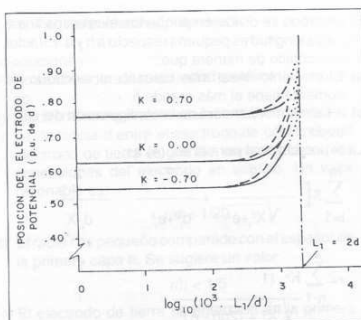


Figura 6. Electrodo grande (Efecto de las longitudes de los electrodos)

—: corriente uniforme
- - - : corriente no uniforme

2.2. Mediciones experimentales.

Se desarrolló un modelo de laboratorio que simula una estructura de tierra de dos capas estratificadas horizontalmente.

El modelo de dos capas está constituido por un líquido en un recipiente de concreto y por el fondo mismo del recipiente. Mediante este arreglo se puede variar la profundidad de la capa superior, cambiando de esta manera ρ_1 y el coeficiente de reflexión. En la capa inferior se utilizan 30 pulgadas de baldosa de concreto y se encuentra satisfactoria la profundidad de 1 a 10 pulgadas para la capa superior.

Las dimensiones interiores del recipiente 4 x 6 pies. La región de utilidad del modelo es un círculo centrado en la mitad del recipiente con 18 pulgadas de radio.

Experimentalmente se encontró que la conducta del modelo es buena cuando la profundidad del agua varía entre 4 y 9 pulgadas.

Las figuras 7 y 8 muestran los datos tomados experimentalmente y las resistencias medidas de varios electrodos comparadas con los valores teóricos.

3. BIBLIOGRAFIA

- [1] Medidas Eléctricas, Enciclopedia CEAC de la Electricidad, 1ª Edición, marzo 1984, Barcelona-España.
- [2] Física de Suelos, L. D. Bayer, Walter H. Gardner, Wilfrad R. Gardner, Editorial U.T.E.H.A.
- [3] Enciclopedia Ilustrada Cumbre, Editorial Cumbre, Tomos I, VI, VII,

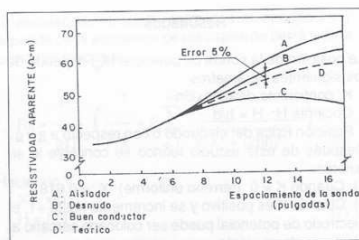


Figura 7.- Curvas de resistividad aparente

XI, XII, XIII.

- [4] Diccionario de la Lengua Española, Real Academia Española, Editorial Espasa-Calpe S.A.
- [5] Modelling of a Grounding Electrode, D. Mukhedkar, Y. Gervais, J. P. DeJean, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Enero 1973.
- [6] Ground Electrode Resistance Measurements in Non-Uniform Soils, Farid Dawalibi, Dinkar Mukhedkar, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 93 No 1, Enero 1974.
- [7] Prospección Geo-eléctrica en Corriente Continua, Ernesto Orellana, Editorial Paraninfo, Madrid, 1972.
- [8] Teoría Electromagnética, William H. Hayt Jr., Editorial McGraw-Hill, 1980.
- [9] Cálculo con Geometría Analítica, Louis Leithold, Editorial Harla S.A, segunda edición, 1973.
- [10] Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No 2, abril 1990.
- [11] Resistance Measurement of Large Grounding Systems, Farid Dawalibi, Dinkar Mukhedkar, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 98, No 6 Nov./Dic. 1979.
- [12] Study of Driven Ground Rods and Four Point Soil Resistivity Test, C. J. Blattner, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS. 101, No 8 Agosto 1982.

ELECTRODOS	$\pi = 5$			$\pi = 9$		
	RESISTENCIA Ω			RESISTENCIA Ω		
	MEDIDO	CALCULADO	% ERROR	MEDIDO	CALCULADO	% ERROR
	795	820	3.05	776	795	2.4
	260	285	8.77	240	265	9.45
	406	441	7.95	397	434	8.55
	142	149	4.7	—	—	—