

EVALUACION DEL ERROR CAUSADO POR LA PRESENCIA DEL OPERADOR EN LA MEDICION DEL CAMPO ELECTRICO EN INSTALACIONES DE ALTA TENSION A NIVEL DEL SUELO EN 50 HZ

Luis Ortiz N.
Ingeniero Civil Electricista
Depto. de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Santiago de Chile
Casilla 10233 - Santiago - Chile

RESUMEN

El error causado por la presencia del operador en la medición del campo eléctrico en las instalaciones de alta tensión, a nivel del suelo y en 50 o 60 Hz es evaluado a través de dos métodos: de Simulación de Carga y Analítico Aproximado. Estos métodos son comparados aplicándolos a un caso real. Finalmente son dadas recomendaciones para efecto de controlar este importante error en las mediciones de campo eléctrico.

ABSTRACT

The error caused at the measurements on the electric field induced by high voltage plant at ground level to 50 ou 60 Hz is calculated with: Charge Simulation Method and Approximate Analytical Method. These methods are applied to specific real case and comparisons. For the error reduction several recomendations are presented.

1. INTRODUCCION

La precisión de las mediciones de campo eléctrico en instalaciones de alta tensión está limitada por los siguientes factores: distorsión del campo eléctrico por el cuerpo de la persona que sostiene el mango del instrumento, conductividad del mango particularmente en presencia de humedad, error de lectura, dificultad del posicionamiento del centro del instrumento y posicionamiento en relación al eje de medición. Estos errores pueden llegar a ser del orden de 10 % [1]. El error producido por la presencia del operador es el mas importante, pudiendo llegar facilmente al 5 % [2].

Para efecto del campo eléctrico cuasi-estacionario a frecuencia de 50 o 60 Hz, el cuerpo de una persona es un buen conductor, y, por lo tanto, distorsiona el campo eléctrico en sus cercanías. La distorsión es función de la distancia de la persona al punto de medición.

El cálculo del error introducido por el operador en la medición del campo eléctrico a nivel del suelo se realizará mediante dos métodos. En forma precisa, evaluando el campo eléctrico con y sin la presencia del operador a través del método de simulación de carga y en forma analítica aproximada [2].

2. CALCULO DEL ERROR POR EL METODO DE SIMULACION DE CARGA

El error introducido por el operador en la medición del campo eléctrico a nivel del suelo en instalaciones de alta tensión será determinado por la siguiente relación:

$$\text{Error} = \frac{E_o - E}{E_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

donde E_o es el campo eléctrico a nivel del suelo en la instalación sin la presencia del operador y E el campo con la presencia del operador.

Para calcular el campo eléctrico a nivel del suelo en una instalación de alta tensión tales como una línea de transmisión o subestación, considerando la presencia del operador que mide el campo, es necesario hacerlo a través del método de simulación de carga, modelando la instalación y el operador en tres dimensiones.

En la modelación de la instalación de alta tensión por el método de simulación de carga, en este trabajo, la carga real distribuida en las superficies de los conductores, barras y equipos es sustituida por carga distribuida uniformemente en superficies de esferas equivalentes [3].

El cuerpo del operador es modelado por cargas puntuales localizadas en el interior de este, y los puntos de contorno son escogidos sobre la superficie del cuerpo simulado.

El radio de las esferas, que define los puntos de contorno necesarios para la determinación de estas cargas es calculado a través de equivalencia de capacidad [3].

La equivalencia de capacidad es hecha sustituyendo cada uno de los segmentos de cilindro en que es seccionado el conductor de la Fig.1, y las esferas equivalentes de la Fig.2 que lo sustituyen.

Cuando los conductores de las fases de la línea o barra son haces conductores, estos previamente son transformados en conductes equivalentes [1].

La capacidad de un cilindro horizontal de longitud L y radio r ($L \gg r$) paralelo a la superficie del suelo y admitiendo una carga distribuida uniformemente a lo largo de el, Fig.1, es [4]:

$$C_c = \frac{4\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2 \left[\left(\frac{L^2}{4} + r^2 \right)^{1/2} + L \right] \left[\left(\frac{L^2}{4} + r^2 \right)^{1/2} - L \right]}{2 \left[\left(\frac{L^2}{4} + r^2 \right)^{1/2} - L \right] \left[\left(\frac{L^2}{4} + r^2 \right)^{1/2} + L \right]} \quad (2)$$

Para la capacidad de una esfera de radio R colocada a una altura h del suelo ($h \gg R$), Fig.2, se tiene:

$$C_e = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{R} - \frac{1}{2 \cdot h}} \quad (3)$$

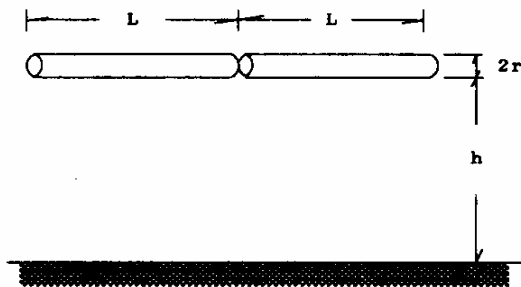


Fig.1. Conductor dividido en secciones cilíndricas de longitud L

Igualando las capacidades dadas por las ecuaciones anteriores, se obtiene el radio de la esfera R:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{L} \ln \frac{2 \left[\left(\frac{L^2}{4} + r^2 \right)^{1/2} + L \right] \left[\left(\frac{L^2}{4} + r^2 \right)^{1/2} - L \right]}{2 \left[\left(\frac{L^2}{4} + r^2 \right)^{1/2} - L \right] \left[\left(\frac{L^2}{4} + r^2 \right)^{1/2} + L \right]} + \frac{1}{2 \cdot h}} \quad (4)$$

En el cálculo del campo eléctrico a nivel del suelo, una separación de las esferas equivalentes inferior a la altura de los conductores garantiza un error del método inferior al 1%. Al tratarse de una línea de transmisión, la influencia de las estructuras en el cálculo del campo eléctrico alcanza a aproximadamente hasta una distancia de 1,5 veces su altura. Por lo tanto, si el operador es localizado en el centro del vano no es necesario simular las estructuras [5].

El valor de las cargas de las cargas elementales ficticias (en este caso de esferas y puntuales) son determinadas mediante un sistema de ecuaciones de la siguiente forma:

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (5)$$

donde [Q] es un vector complejo de orden n que representa el valor de las cargas elementales de modelación, [P] matriz real de los coeficientes de potencial de orden $n \times n$ y [V] vector complejo de orden n de los potenciales de los puntos de contorno.

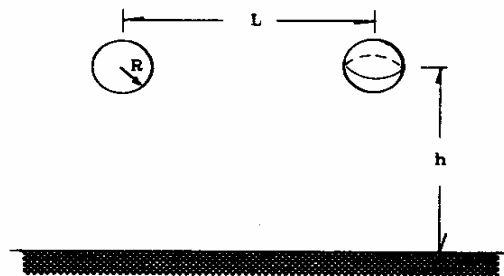


Fig.2. Esferas equivalentes en capacidad del sistema de conductores de la Fig.1

Los puntos de contorno para las cargas de esferas están localizados en la superficie de estas y corresponde a la tensión fase-neutro de las respectivas fases que representan. Las cargas que representan superficies aterradas tales como estructuras, superficies externas de transformadores, interruptores, fundaciones, etc., tienen sus puntos de contorno localizados en la superficie de los mismos y su potencial es cero. Como el cuerpo de la persona está en contacto con el suelo, los puntos de contorno para cargas que representan a éste persona tienen potencial cero.

Los coeficientes de potencial, para las cargas elementales propuestas en la modelación, puntuales y de esferas, Fig.3, incluyendo el efecto de la superficie de la tierra, están dados por las siguientes expresiones:

$$P_{ii} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{R_{ii}} - \frac{1}{2 \cdot h_{ii}} \right] \quad i=1, n \quad (6)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{d_{ij}} - \frac{1}{d'_{ij}} \right] \quad \begin{matrix} i=1, n \\ j=1, n \\ \text{con } i \neq j \end{matrix} \quad (7)$$

donde r_{ii} es el radio de las esferas de carga o la distancia de la carga al punto de contorno en el caso de cargas puntuales, h_{ii} altura de la carga a la superficie del suelo, d_{ij} distancia de la carga i al carga j y d'_{ij} distancia de la carga i a la imagen de la carga j .

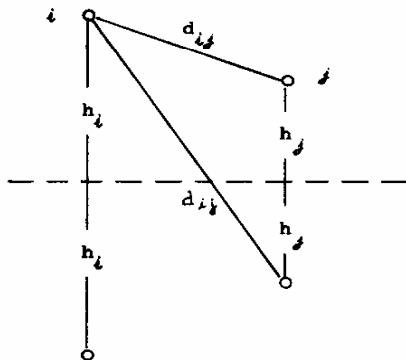


Fig.3. Esquema de cargas elementales para definir los coeficientes de potencial

3. METODO ANALITICO APROXIMADO PARA EL CALCULO DEL ERROR

La condición a representar para la evaluación de la modificación del campo eléctrico a nivel del suelo debido a la presencia del operador es mostrada en la Fig.4.

En la ausencia de la persona el campo eléctrico es ortogonal a la superficie del suelo. Para efectos de evaluar la modificación del campo eléctrico por la persona, se asumirá que el campo es uniforme en el espacio, de valor E_0 .

La persona será simulada por un semi-esferoide de semi-eje mayor a y semi-eje menor b .

En la ausencia de la persona, la relación entre el campo eléctrico E_0 y el potencial V_0 en el espacio, es:

$$V_0 = E_0 \cdot x \quad (8)$$

donde x es la coordenada que define la altura.

La relación entre el potencial V_0 sin la presencia de la persona y el potencial V modificado por la presencia de la persona, en en coordenadas elipsoidales, definidas en la Fig.5, [6] es:

$$V = V_0 \frac{\int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{(\zeta+a^2)^{3/2}(\zeta+b^2)}}{\int_0^{\infty} \frac{d\zeta}{(\zeta+a^2)^{3/2}(\zeta+b^2)}} \quad (9)$$

donde ζ es la coordenada elipsoidal.

Ademas debe cumplirse:

$$\frac{x^2}{a^2+\zeta} + \frac{R^2}{b^2+\zeta} = 1 \quad (\zeta > -b^2) \quad (10)$$

La Ec.(9) se puede escribir como:

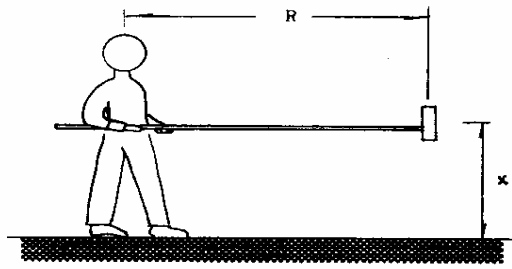


Fig. 4. Operador midiendo el campo eléctrico

$$V = V_0 \frac{I(0) - I(\xi)}{I(0)} \quad (11)$$

donde:

$$I(\xi) = \frac{2}{(a^2 - b^2) \cdot (\xi + a^2)^{1/2}} + \frac{1}{(a^2 - b^2)^{3/2}}$$

$$\ln \frac{(\xi + a^2)^{1/2} - (a^2 - b^2)^{1/2}}{(\xi + a^2)^{1/2} + (a^2 - b^2)^{1/2}} \quad (12)$$

$$I(0) = \frac{2}{a(a^2 - b^2)} + \frac{1}{(a^2 - b^2)^{3/2}} \cdot \ln \frac{a - (a^2 - b^2)^{1/2}}{a^2 + (a^2 - b^2)^{1/2}} \quad (13)$$

En particular la componente vertical del campo eléctrico resultante, E_x es definida por:

$$E_x = - \left[\frac{\partial V}{\partial x} \right]_{R=cte} \quad (14)$$

y dada por:

$$\frac{E_x}{E_0} = 1 - \frac{I(\xi)}{I(0)} - \frac{F(x)}{I(0)} \quad (15)$$

donde:

$$\xi = - \frac{1}{2} (a^2 + b^2 - R^2 - x^2) + \left[\frac{1}{4} (a^2 + b^2 - R^2 - x^2)^2 - a^2 b^2 + a^2 R^2 + b^2 x^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

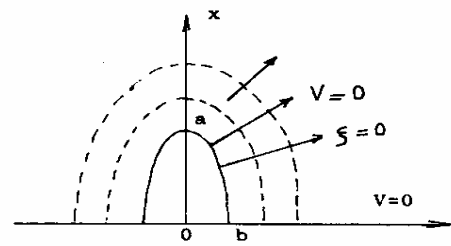


Fig. 5. Simulación del cuerpo del operador por un semi-elipsoide

$$F(x) = \frac{1}{(\xi + a^2)^{3/2} (\xi + b^2)}$$

$$\left[1 - \frac{a^2 - b^2 - R^2 - x^2}{2 \left[\frac{1}{4} (a^2 + b^2 - R^2 - x^2)^2 - a^2 b^2 + a^2 R^2 + b^2 x^2 \right]^{1/2}} \right] x^2 \quad (17)$$

Para $a=1,8$ m; $b=0,2$ m; $R=1$ m y $x=1$ m; se tiene $E_x/E_0=0,877$. Esto significa que, la presencia del operador en la medición del campo eléctrico en el punto $R=1$ m, implica una reducción de 12,3% de la componente vertical del campo (y componentes horizontales no nulas).

4. APLICACION DE LOS METODOS DE EVALUACION DEL ERROR

Los dos métodos para evaluar el error causado por el operador en la medición del campo eléctrico en instalaciones de alta tensión, Método de Simulación de Carga y Método Analítico Aproximado, presentados en las secciones anteriores, son comparados a través de un caso real.

El Método de Simulación de Carga es aplicado a una línea de transmisión de 500 kV, circuito simple, configuración horizontal, 2 conductores por fase de 3,195 cm de diámetro, separación entre las fases 10,8 m, altura mínima de los conductores 13,0 m (en el medio del vano), altura máxima de los conductores 29,5 m (en la estructura) [7].

El error causado por el operador en la medición del campo eléctrico se calculó por la Ec.(1). Evaluando previamente el campo sin la presencia del operador (E_0) y con la presencia de él (E) en el eje de la línea y

en el centro del vano. Durante el estudio se verificó que este error es prácticamente independiente del punto de medición en la línea. La influencia de la distancia del operador al punto de medición es mostrada en la Tabla 1 y Fig.6.

En la simulación de la línea se utilizaron 123 esferas de carga, 41 por fase, separadas entre sí por 10 m. El operador fue modelado por 9 cargas puntuales, localizadas: una en la cabeza, dos en el tronco, una para cada brazo y dos para cada pierna. La orientación del operador-instrumento debe ser tal que el mango del instrumento esté paralelo a la línea [2].

La aplicación del método analítico aproximado no necesita hacerse con una instalación específica. En este método se supone un campo eléctrico uniforme y el error causado por la presencia del operador es calculado como la razón E/E_0 de acuerdo a la expresión (15). La comparación entre el Método de Simulación de Carga y el Método Analítico Aproximado es mostrado en la Tabla 1 y en la Fig.6.

Tabla 1. Comparación del Error de Reducción del Campo Eléctrico, calculados por los Métodos de Simulación de Carga y Método Analítico Aproximado.

Distancia al punto de medición R [m]	Error de Reducción del Campo Eléctrico en [%]	
	Método de Simulación de Carga	Método Analítico Aproximado
0,4	101,30	37,30
0,6	36,90	23,70
0,8	20,80	16,50
1,0	14,00	12,30
1,2	10,30	9,57
1,4	8,04	7,68
1,6	6,45	6,29
1,8	5,29	5,22
2,0	4,40	4,39
2,2	3,70	3,72
2,4	3,13	3,17
2,6	2,67	2,73
2,8	2,30	2,35
3,0	1,99	2,04

Error de reducción [%]

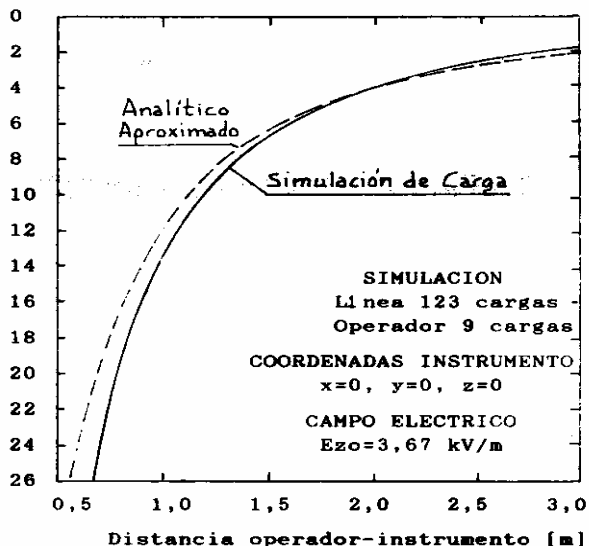


Fig.6 Error de reducción en la medición del campo eléctrico causado por la presencia del operador.

5. CONCLUSIONES

De los resultados mostrados se concluye que el error causado por la presencia del operador en la medición del campo eléctrico a nivel del suelo en 50 o 60 Hz, en instalaciones de alta tensión es de suma importancia, ya que si no se toman las precauciones de controlar la distancia del operador al instrumento la medición puede resultar totalmente distorsionada.

Las mediciones deben realizarse con una distancia del operador al instrumento de 2 m como mínimo, con esto se asegura un error máximo de 4,4 %, por efecto de la presencia del operador.

El Método Analítico Aproximado Para las distancias recomendadas en las mediciones presenta prácticamente el mismo error que el Método de Simulación de Carga, el cual es de una precisión y confiabilidad mucho mayor, cualquiera que sea la instalación de que se trate.

REFERENCIAS

- [1] EPRI Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book 345 KV and Above", Palo Alto, California, Capítulo 8, 1982.
- [2] C.M.Portela, L.Ortiz, "Determinação do Erro de Medição e Erro de Cálculo do Campo Elétrico nas Linhas Elétricas a Frecuencia Industrial", I Seminario Internacional de Distribución de Energía Eléctrica", Belo Horizonte, Nov. 1990.
- [3] C.M.Portela, N.H.Santiago, L.Ortiz, "Substation Electric Field-Error Estimation of Charge Simulated Method", 7th ISH International Symposium in High Voltage Engineering, Dresden, Alemania, Agosto 1991.
- [4] B.D.Popovic, "Introduction Engineering Electromagnetics", Adison Wesley Publishing Company, USA, Capítulo I, 1971.
- [5] L.Ortiz, C.M.Portela, A.R.Pinto, "Three-dimensional Model Transmission Line for Calculation of Electric Field and Comparison with Measurement Values", 7th ISH International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, Alemania, Agosto 1991.
- [6] J.A.Stratton, "Electromagnetic Theory", Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1946.
- [7] L.Ortiz, M.Arias, V.Urrea, F.García, "Determinación del Error de Medición del Campo Eléctrico a Frecuencia Industrial en Líneas de Transmisión", IX Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, U. de Tarapacá, Arica 1991.

BIOGRAFIA



Luis Ortiz N. Ingeniero Civil Electricista Universidad de Santiago de Chile 1970. Master y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Federal de Rio de Janeiro 1982, 1991. Profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Santiago de Chile. Especialista en las Áreas de Alta Tensión, Líneas de Transmisión y Subestaciones, Campos Eléctricos y Magnéticos y sus efectos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al apoyo económico proporcionado por FONDECYT de la República de Chile, a través del proyecto 92-0500.