

Modelación de puestas a tierra para simulación de sobretensiones transitorias en transmisión de energía eléctrica

Germán Moreno O. , Jaime A. Valencia V.* , Fernando Villada**

(Recibido el 1º. de marzo de 2002)

Resumen

La puesta a tierra desempeña un papel reconocidamente importante en las salidas de operación de líneas de transmisión por descargas atmosféricas y por tanto en los índices de calidad de la transmisión de energía. Se presentan los fundamentos de una adecuada modelación de las puestas a tierra para estudios de fenómenos transitorios, incluyendo el comportamiento frente a descargas atmosféricas. Así mismo, se presenta un método de tener en cuenta la propagación electromagnética guiada por los electrodos de aterramiento, para obtener la impedancia del aterramiento y poder simular su efecto en las sobretensiones en líneas de transmisión de energía eléctrica ante descargas atmosféricas. Se analiza el comportamiento de la impedancia para diversas configuraciones y se presentan resultados de simulación para una línea real de 220 kV que ilustran la potencialidad del método y del programa computacional desarrollado.

----- *Palabras clave:* líneas de transmisión, puestas a tierra, sobretensiones.

Grounding Modelling for transient overvoltage simulation in electric power transmission

Abstract

Grounding plays an important role in transmission line outages and consequently on electric energy transmission quality indexes. Fundamentals of an accurate modeling for transient behavior analysis, particularly for the response of transmission lines to lightning, are presented. Also, a method to take into account the electromagnetic propagation guided by the grounding electrodes and finally to assess the grounding impedance in order to simulate the transmission line behavior under lightning, is presented. Analysis of impedance behavior for diverse configurations and simulation results of overvoltages on a real 220 kV line are presented to illustrate the capabilities of the method and of the computational program developed.

----- *Key words:* transmission lines, grounding, overvoltages.

* Integrantes del Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica. GIMEL. Universidad de Antioquia. gmoreno@udea.edu.co.

Introducción

La nueva regulación del servicio de energía eléctrica, derivada de la ley eléctrica [1] impone a las empresas de transmisión de energía una elevación de la calidad de su servicio, uno de cuyos principales indicadores es el número de salidas de operación de líneas de transmisión (LT) por cada 100 km y por año. La causa principal de estas salidas es el impacto de las descargas atmosféricas (DA), lo que plantea una situación particularmente difícil por los altos niveles cerámicos presentes en Colombia y la severidad de las descargas [2]. Tal impacto se manifiesta como sobretensiones que solicitan notablemente el aislamiento eléctrico, pueden llegar a causar cortocircuitos y finalmente provocan la operación de protecciones y la salida de la línea. A su vez, la severidad de las sobretensiones obedece a las características, por una parte, de los rayos y, por otra, de la línea de transmisión. Entre estas últimas, una de reconocida incidencia es la puesta a tierra.

Interesa entonces manejar algunas variables de la puesta a tierra, como su geometría e impedancia. Para la evaluación de la última en comportamiento estacionario, se dispone de métodos confiables y conocidos [3, 4], aunque curiosamente su aplicación en el medio no es suficientemente difundida; sin embargo, para el análisis de la respuesta transitoria de las puestas a tierra, las últimas décadas se han caracterizado por una diversidad de propuestas de métodos para su evaluación. El interés en el asunto es muy comprensible pues un método confiable de cálculo puede permitir optimizar el aterramiento en la dirección de una disminución importante de las salidas de la LT por descargas atmosféricas. Aunque muchas propuestas de cálculo buscan una modelación mediante circuitos eléctricos que representen el fenómeno de difusión de corrientes impulsivas en el suelo, dada la familiaridad de la ingeniería con este tipo de modelo, es un camino más seguro la modelación con base electromagnética, por el cual se inclina este artículo. Este tipo de modelación ha sido desarrollado en la década anterior por Visacro y Portela [5-7] y

más recientemente por Greev [8-10]. Adoptando esa línea de trabajo, se presentan en este artículo los fundamentos de ese modelo, su implementación en un programa computacional y la aplicación de sus resultados para evaluación de sobretensiones en líneas de transmisión.

Una modelación con base electromagnética

Para una modelación adecuada del fenómeno, deben considerarse dos aspectos fundamentales:

- Los parámetros eléctricos del medio, esto es su conductividad (σ) o su inverso, la resistividad (ρ), y su permitividad (ϵ), teniendo en consideración su variación con la frecuencia [5] además de sus reconocidas variaciones con la humedad, contenido de sales, temperatura, etc. [11].
- La propagación electromagnética en el suelo, orientada por los electrodos de aterramiento, que va a determinar la impedancia sentida por la onda de corriente de la descarga.

La manera más adecuada para tener en consideración lo anterior, es un análisis en el dominio de la frecuencia que finalmente puede ser completado recurriendo a la integral de Fourier para llevarlo al dominio del tiempo.

Variación de los parámetros con la frecuencia

Tanto ρ como ϵ en un suelo presentan variaciones importantes con la frecuencia, por lo cual los métodos de cálculo que utilicen para estudios de transitorios los valores normalmente medidos en campo, particularmente de ρ , mediciones que típicamente se hacen en el orden de las decenas o centenas de Hz, introducen un error considerable que viene a añadirse a los ya reconocidos errores involucrados en las mediciones y cálculos de las puestas a tierra. Conviene entonces levantar en laboratorio curvas de variación con la frecuencia de los parámetros eléctricos de los suelos de interés [5, 12], para incluirla en los cálculos; las

figuras 1 y 2, de un trabajo en la Universidad de Antioquia (UdeA), ilustran el resultado del levantamiento de tales curvas.

El método de segmentación con consideración de la propagación electromagnética

Como se anotó atrás, para el cálculo de las puestas a tierra en condiciones estacionarias existen métodos confiables. Uno de ellos es el de la segmentación de los electrodos combinado con la teoría de las imágenes y la aproximación de potencial constante en todo el electrodo (que supone

ignorar la impedancia longitudinal) [3, 4]. Es posible mantener este mismo método solamente para transitorios relativamente lentos, que no involucren sino componentes bajas de frecuencia (del orden de centenas o pocos miles de Hz), en la medida en que los efectos inductivos y de propagación (atenuación) son aún poco notorios.

Para transitorios rápidos, como es el caso de las descargas atmosféricas, estos efectos ya no sólo no son despreciables sino que pueden ser dominantes. Es necesario entonces considerar la impedancia longitudinal y el efecto de propagación. Estos tres componentes del fenómeno se pueden tener en cuenta bajo la forma de impedancias (y

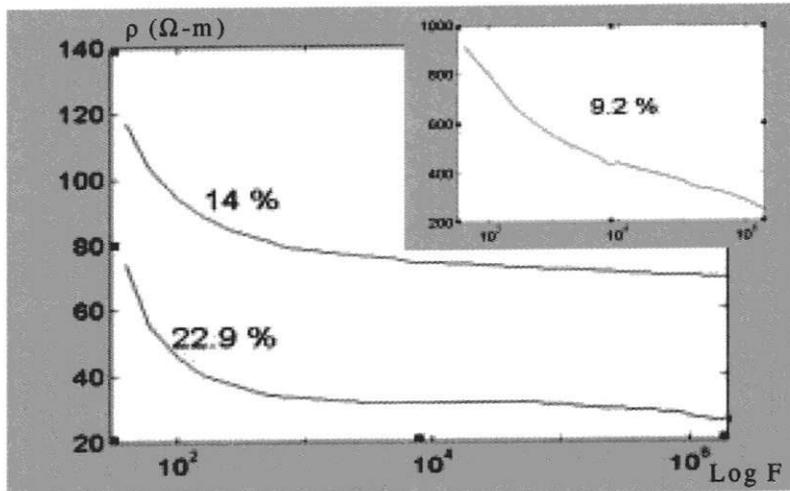


Figura 1 Variación de la resistividad de un suelo específico con la frecuencia, para diversos porcentajes de humedad

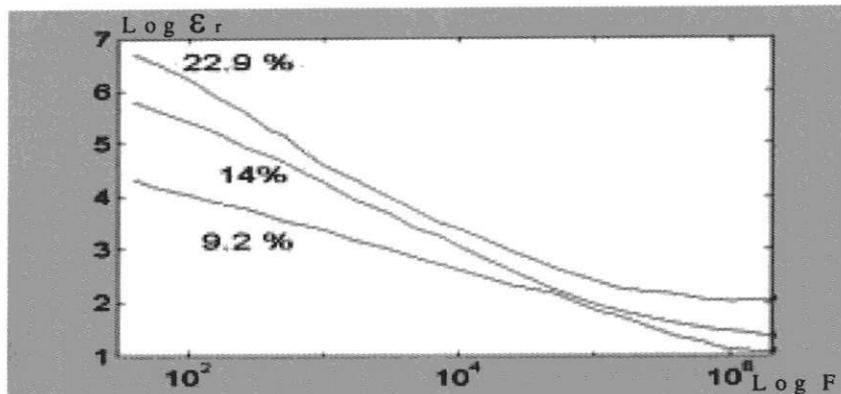


Figura 2 Variación de la permitividad de un suelo específico con la frecuencia, para diversos porcentajes de humedad

corrientes) transversales, impedancias (y corrientes) longitudinales y el efecto de propagación asociados a cada uno de los segmentos y enlazados por superposición, siendo por tanto válida esta formulación mientras no se presente ionización del suelo, la que ofrece un comportamiento fuertemente no lineal. Sin embargo, es posible considerar esta última condición con el recurso de un radio equivalente de los electrodos [5] o mediante expresiones derivadas de curvas experimentales de relaciones tensión-corriente en condiciones de disrupción del suelo, aspecto que no será tratado en este artículo.

La aproximación por segmentos se describe a continuación. Los electrodos de puesta a tierra son segmentados en elementos de pequeña longitud y cada segmento actúa como una fuente lineal enterrada, de la cual diverge una corriente I_T y es recorrido por una corriente longitudinal I_L . Ambas, la corriente longitudinal y la densidad de corriente divergente (o corriente transversal), son consideradas vectores constantes a lo largo de la longitud de cada segmento, pero sus valores pueden variar de uno a otro. Así, el aterramiento puede ser representado por un conjunto de ecuaciones que matricialmente toman la siguiente forma:

$$V = Z_T * I_T$$

$$\Delta V = Z_L * I_L$$

Los vectores V y ΔV expresan respectivamente el potencial medio y la caída de tensión en cada segmento. Los dos vectores I_T e I_L se refieren respectivamente a la corriente transversal y a la corriente longitudinal del segmento.

La modelación se basa en la derivación de los términos de las matrices de impedancia, a partir de los potenciales escalar (V) y vectorial (A) en un punto P , generados por fuentes de corriente de índice "j" colocadas en el medio (suelo), que corresponden a las siguientes expresiones, según la figura 3 [5, 13].

$$V = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} * \int_{L_j} \frac{I_{Tj}}{L_j} * \frac{e^{-kr}}{r} dl_j \quad (1)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} * \int_{L_j} \vec{I}_{Lj} \cdot \frac{e^{-kr}}{r} * dl_j \quad (2)$$

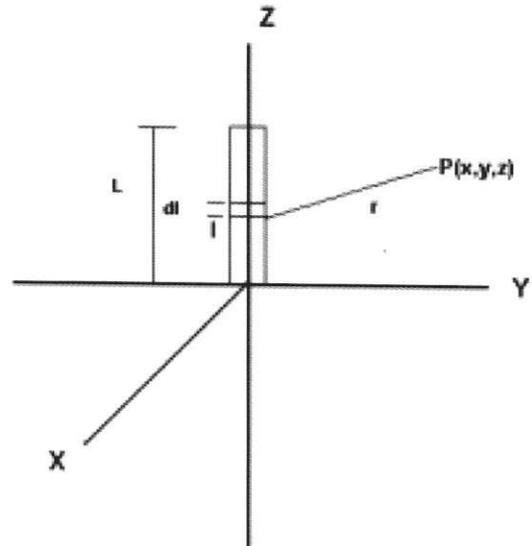


Figura 3 Geometría de las expresiones de potencial

k : Constante de propagación en el suelo

$$(k^2 = -\omega^2\mu\epsilon + j\omega\mu\sigma)$$

r : Distancia a la fuente puntual de corriente.

ω : Frecuencia angular de la onda.

ϵ : Permitividad del suelo.

μ : Permeabilidad del suelo.

σ : Conductividad del suelo.

L : Longitud del segmento.

dl : Diferencial de longitud del segmento.

De la ecuación (1) el potencial de cada segmento conductor i puede ser determinado calculándose el potencial medio de todos sus puntos producido por cada fuente de corriente j (y de su imagen), esto es:

$$V_{ij} = \frac{I_{Tj}}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \cdot \frac{1}{L_i L_j} \cdot \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-kr}}{r} dl_j dl_i$$

El correspondiente término de Z_T es obtenido inmediatamente.

$$Z_{Tij} = \frac{V_{ij}}{I_{Tj}}$$

La caída de tensión a lo largo de un conductor i debido a una fuente filamentar de corriente en el segmento j , debida al campo externo, puede ser determinada en forma similar al caso anterior, a partir de (2):

$$\Delta V_{ij} = -j \cdot \frac{\omega \mu}{4\pi} \cdot \int_{L_i} \left(\int_{L_j} \frac{I_{Lj} \cdot e^{-kr}}{r} \cdot dl_j \right) \cdot dl_i$$

y los términos correspondientes de Z_L son obtenidos:

$$Z_{Lij} = \frac{\Delta V_{ij}}{I_{Lj}}$$

Para los elementos propios de esta matriz es necesario adicionar un término por la componente de impedancia asociada al campo interno del conductor.

Es interesante anotar que el efecto de la propagación está representado por el término e^{-kr} el cual en algunos cálculos es ignorado (haciendo $e^{-kr} = 1$), por ejemplo para facilitar la evaluación de la integral sobre L_j .

Ahora, con las relaciones anteriores y con apoyo de las condiciones de contorno entre segmentos (leyes de Kirchhoff), específicas para cada configuración geométrica, se puede obtener un conjunto de ecuaciones del tipo $AV = I_e$ donde I_e es el vector de corrientes impuestas, que frecuentemente es un vector con un único elemento no nulo, correspondiente al segmento en que es aplicada la corriente. Resolviendo el sistema, esto es calculando el vector V y siendo el segmento de aplicación de la corriente el correspondiente al índice i , se tendrá entonces que:

$$Z_g = V_i / I_{ei}$$

Siendo I_{ei} la corriente aplicada al electrodo en el segmento i y Z_g la impedancia del aterramiento para la frecuencia considerada.

Evaluación de sobretensiones por DA en LT con el ATP

El interés de este artículo es ilustrar tendencias de comportamiento y la potencialidad del método presentado. Se procederá entonces a presentar algunos resultados de cálculo de impedancias de diversas configuraciones básicas en las aplicaciones de líneas de transmisión mostrando su comportamiento con la frecuencia y, similarmente al tratamiento encontrado en algunas publicaciones [14], se considerará una frecuencia representativa en relación con el impulso de corriente de la DA, específicamente 500 kHz que lo es para descargas de frente de onda bastante escarpado; para tal frecuencia serán evaluados tanto los parámetros de la LT, utilizando la rutina "line constants" del ATP [15], como la impedancia de aterramiento y bajo esas condiciones se examinarán tendencias de respuesta de la línea ante descargas atmosféricas.

Resultados de simulaciones y análisis

Impedancias de configuraciones básicas

En la figura 4 se presentan las magnitudes y ángulos de impedancia de un conductor horizontal de longitud 20 m, radio de 1 cm, enterrado a 0,5 m de profundidad en un suelo cuyos parámetros son $\rho = 100 [\Omega m]$, $\epsilon = 100$ (relativa) calculados para diferentes frecuencias. Se muestran resultados para aproximaciones de potencial constante, incluyendo efectos inductivos pero sin propagación y, por último, incluyendo también la propagación.

Es evidente que el error cometido al realizar cálculos usando el valor de la impedancia del aterramiento en baja frecuencia (esto es, sin considerar la variación con la frecuencia), generalmente calculado con la aproximación de potencial constante, es bastante alto y llega a ser inadmisibles cuando se trata de cálculos para comportamiento ante DA, en que las frecuencias involucradas generalmente están en el rango

entre 10^4 y 10^6 Hz. En cuanto al error de no considerar la propagación, es relativamente modesto y está en el lado conservativo.

La variación del ángulo, por otra parte, muestra cómo rápidamente el efecto inductivo se hace presente llegando a ser sumamente marcado en frecuencias del orden de 10^5 y mostrando una tendencia a suavizarse posteriormente.

En la figura 5, se observa el efecto sobre la impedancia de la variación de la resistividad y la permitividad con la frecuencia.

La curva C corresponde a valores de ρ y ϵ calculados para cada frecuencia [5] a saber:

$$\rho \cong \rho_{100\text{Hz}} \cdot \left(\frac{100}{f} \right)^{0.072}$$

$$\epsilon_r \cong 2,34 \cdot 10^6 \cdot (\rho_{100\text{Hz}})^{-0.535} \cdot f^{-0.597}$$

La curva B corresponde a mediciones de ρ y ϵ para un suelo específico con 14% de humedad.

En la figura 6 se observa el efecto de la longitud sobre la impedancia de electrodos horizontales, tanto en la magnitud como en el ángulo.

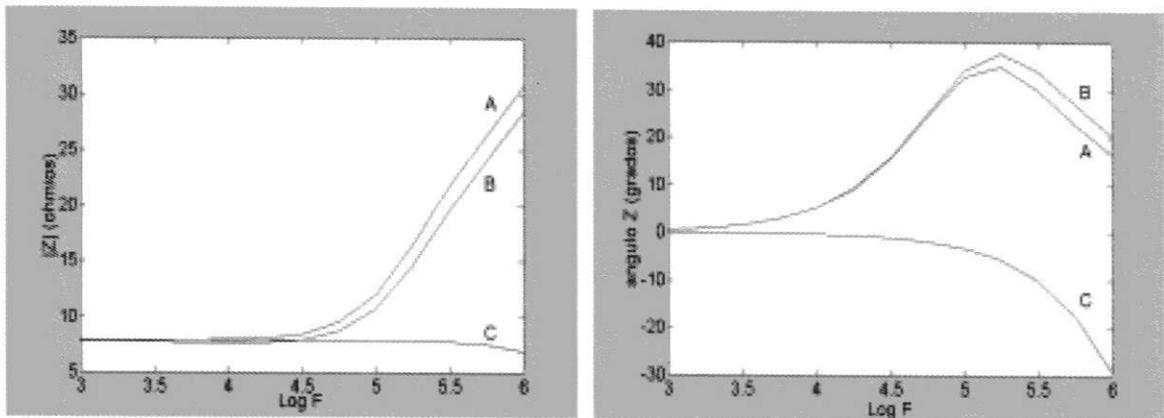


Figura 4 Magnitud y ángulo de la impedancia en función de la frecuencia. A: sin propagación, B: con propagación, C: potencial constante

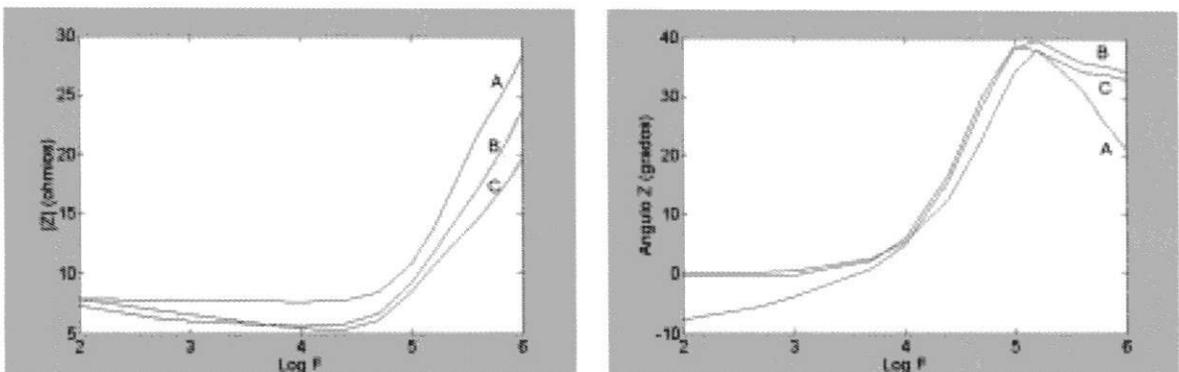


Figura 5 Magnitud y ángulo de la impedancia en función de la frecuencia. A: $\rho = 100\Omega\text{-m}$; $\epsilon_r = 100$, B: ρ , ϵ_r según mediciones, C: formulación [5]

En la figura 7 se presenta el efecto de la longitud sobre electrodos verticales.

Los resultados permiten ver claramente que algunas afirmaciones que se manejan con base en el comportamiento de las puestas a tierra en baja frecuencia, simplemente dejan de ser válidas en frecuencias mayores o deben manejarse con suma cautela. En particular, el aumento en la longitud de electrodo no garantiza en alta frecuencia que la impedancia a tierra disminuya, ya que es necesario considerar la acumulación de efectos inductivos.

En la figura 8 se muestra el efecto de la longitud del lado para electrodos en cuadrado.

Al igual que en los casos anteriores, en las frecuencias altas cualquier intento de mejorar la

respuesta del aterramiento debe ser definida con un análisis particular pues el simple aumento de longitud puede ser incluso contraproducente dado el aumento de impedancia que puede causar.

En la figura 9 se puede observar la eficacia de la geometría en el valor de la impedancia.

Es evidente la mejor respuesta del arreglo en cuadrado con relación al conductor horizontal o vertical.

Evaluación de sobretensiones por DA sobre una LT de 220 kV [16]

Apenas como ilustración de tendencias, se presenta la evaluación de las sobretensiones en una

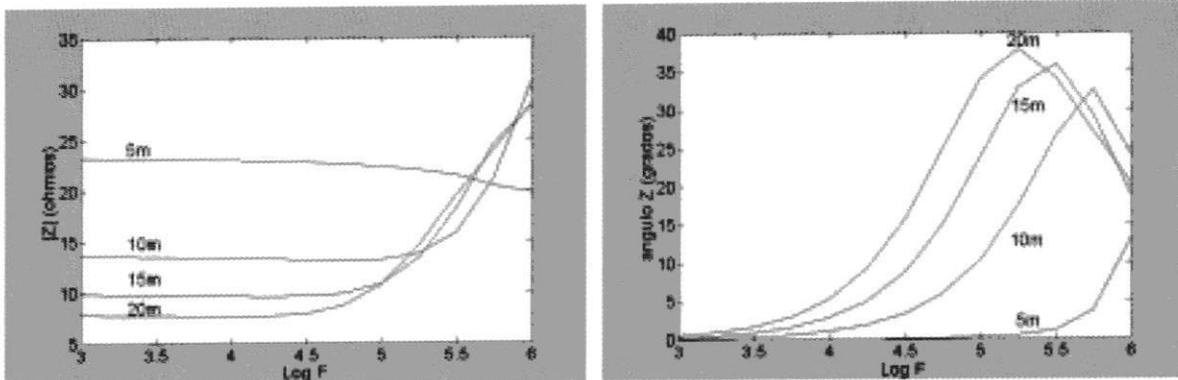


Figura 6 Variación de magnitud y ángulo de impedancia con la longitud. Electrodo horizontal

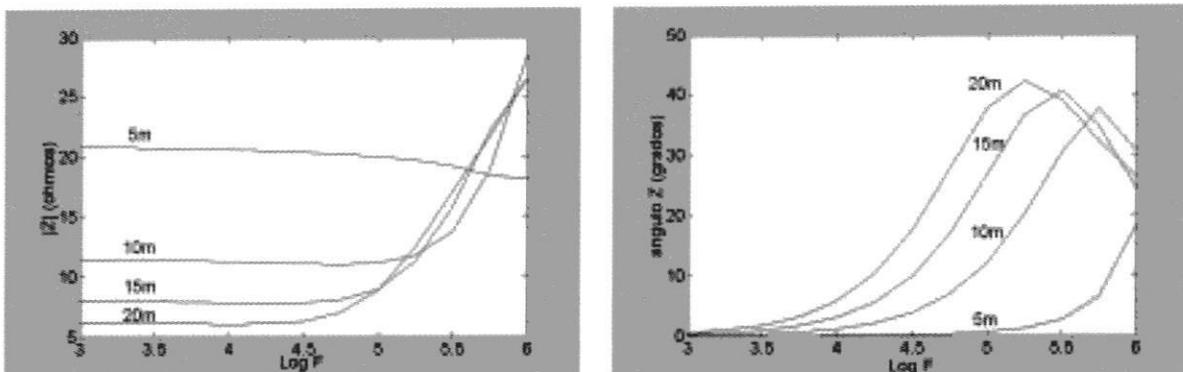


Figura 7 Variación de magnitud y ángulo de impedancia con la longitud. Electrodo vertical

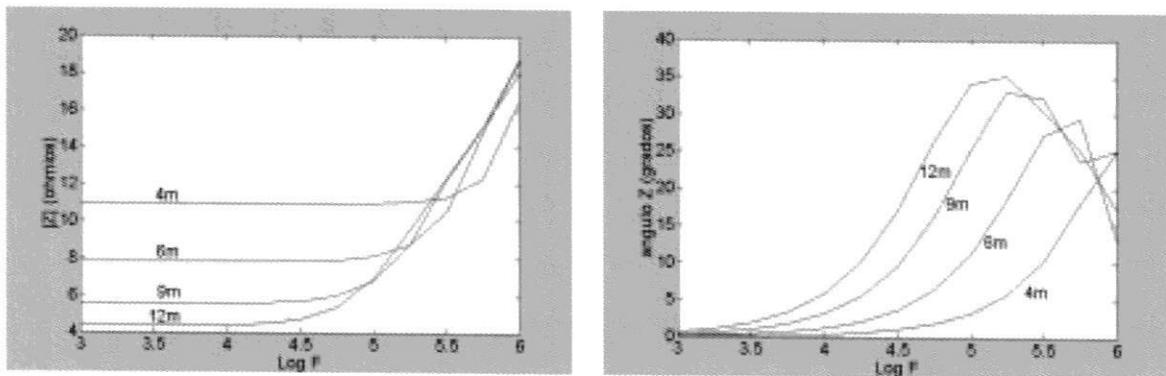


Figura 8 Variación de magnitud y ángulo de impedancia con la longitud del lado. Electrodo en cuadrado

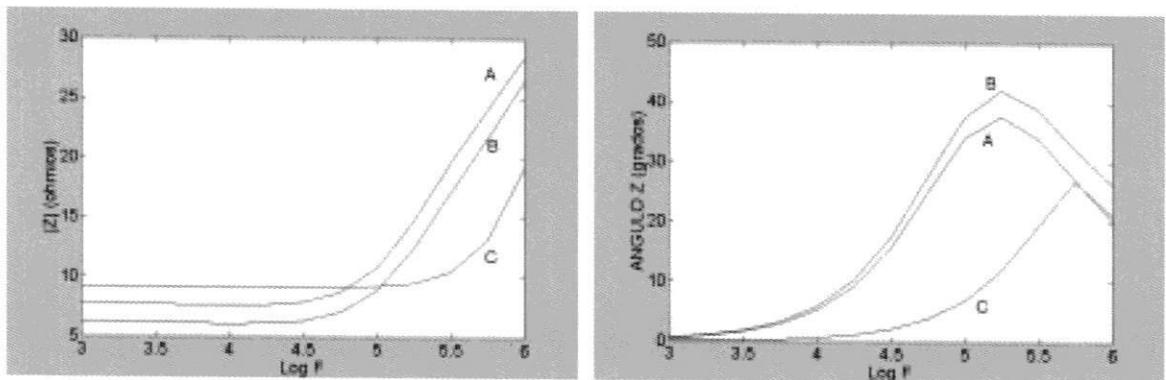


Figura 9 Diferentes distribuciones geométricas de una longitud de conductor de 20 m. A: horizontal, B: vertical, C: cuadrada

línea de 230 kV, cuyos parámetros han sido tomados de una línea real. En la figura 10 se presentan las sobretensiones en el cable de guarda y en las tres fases de la línea bajo una descarga de 40 kA sobre el cable de guarda. El rayo ha sido simulado como una fuente de corriente tipo 13 disponible en el ATP, esto es una función doble rampa, 1/80 μ s.

En la figura 11 se presentan los esfuerzos (diferencia de potencial) sobre la cadena de aisladores más exigida, para la misma situación anterior pero con tres diferentes aterramientos, los mismos analizados en la figura 9. Nuevamente la configuración en cuadrado muestra, ahora por el efecto en la sobretensión, un mejor comportamiento traducido en mayor amortiguamiento de la sobretensión.

Conclusiones

Se ha destacado el papel de las puestas a tierra en la transmisión de energía eléctrica, dado su efecto en las sobretensiones por descargas atmosféricas, con el consecuente impacto sobre el número de salidas de las líneas de transmisión y por tanto sobre los índices de calidad del servicio. En relación con esto, se resalta la importancia de disponer de herramientas adecuadas de evaluación del efecto del aterramiento en las sobretensiones y se han comentado algunos errores frecuentemente encontrados en tal evaluación.

Se ha ilustrado la importante variación de los parámetros eléctricos del suelo con la frecuencia

Se ha presentado una metodología correcta de evaluación de la impedancia de aterramiento que

lleva en consideración la variación con la frecuencia tanto de los parámetros del suelo como de los efectos inductivos y la propagación electromagnética.

El análisis del comportamiento de la impedancia a tierra con la frecuencia ha mostrado que afirmaciones aceptadas sobre aterramiento en baja

frecuencia, por ejemplo para fallas a tierra, pierden validez ante fenómenos rápidos como las descargas atmosféricas, que comprometen frecuencias en el orden de las decenas de kHz hasta algunos MHz. Esto realza la importancia de disponer de herramientas de evaluación de comportamiento de puestas a tierra en un rango amplio de frecuencias para permitir evaluaciones correctas.

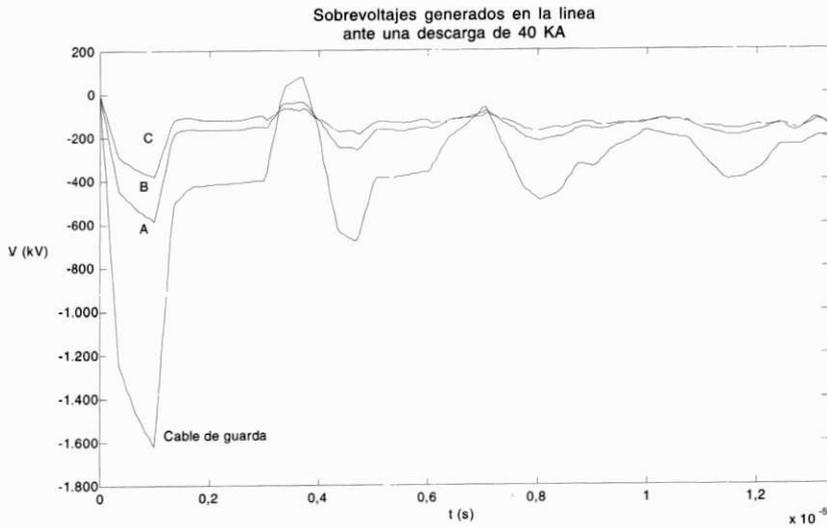


Figura 10 Sobretensiones por descarga sobre el cable de guarda y sobre las fases A, B, C

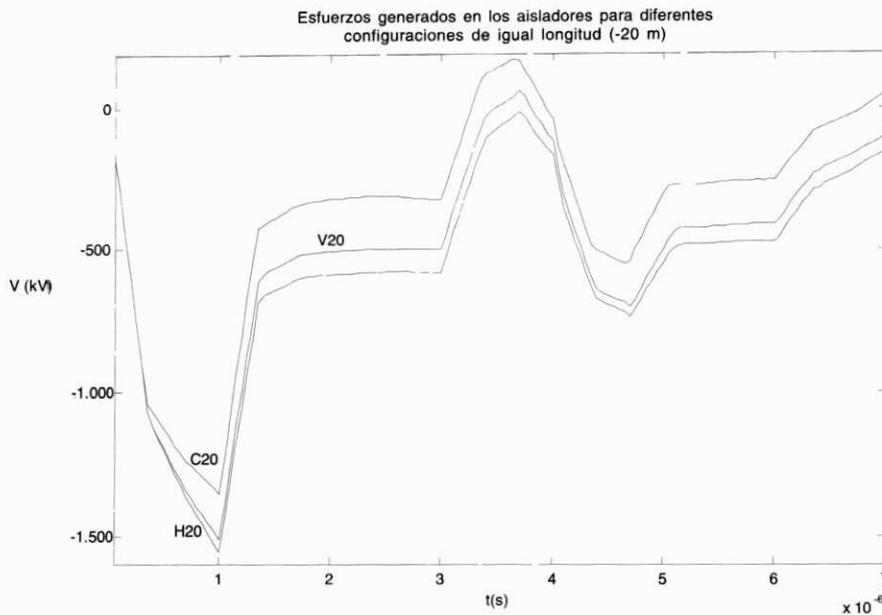


Figura 11 Esfuerzos sobre la cadena de aisladores ante descarga sobre el cable de guarda. Puesta a tierra horizontal (H20), vertical (V20) y en cuadro (C20), todos con 20 m de conductor

El análisis de sobretensiones en una línea de transmisión ilustra la eficiencia mayor de unas geometrías sobre otras, lo que reclama un conocimiento mayor de este aspecto para el diseño de aterramientos con miras a disminuir el impacto de las DA en las salidas de LT, con su consecuente efecto negativo en los índices de calidad del servicio de energía eléctrica.

Los efectos considerados en este trabajo son también los determinantes en diversos fenómenos del campo de la compatibilidad electromagnética, por ejemplo en las interacciones entre bajantes de pararrayos e instalaciones de baja tensión, lo que da una amplia potencialidad de aplicación a la metodología presentada y convoca un trabajo en esa dirección.

Reconocimientos

Este trabajo fue desarrollado con financiación parcial del Comité de Desarrollo de la Investigación (CODI), de la UdeA, y a él aportaron los ingenieros J. Andrés Correa y Eduin García, egresados de la UdeA, y los estudiantes Luis A. Hernández, Fredy Franco, Cristina Ortiz y Mónica Narváez (hoy ingenieros), Esteban Velilla y H. David Gómez.

Referencias

1. Congreso de Colombia "Ley No. 143 1º. de julio de 1994, Ley Eléctrica. Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética".
2. Arteaga G. *et al.* *Estudios analíticos y estadísticos del comportamiento ante descargas atmosféricas de líneas de transmisión a 220 kV en Colombia*. Proyecto de grado. Universidad Nacional. Bogotá, 1982.
3. Moreno, G. "Projeto de Aterramento de Subestações Combinando Métodos Simplificado e de duas Camadas", I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica, I SIDEE, Belo Horizonte, 1990.
4. Moreno, G. "Aspectos que Influencian el Diseño de Mallas de Tierra de Subestaciones", I Conferencia Nacional de Subestaciones y Sistemas de Protección, Medellín, 1989.
5. Visacro S. *Modelagem de Aterramentos Elétricos*. Tesis de Doctorado. Universidad Federal de Rio de Janeiro, Julio, 1992.
6. Visacro S. y Portela C. "Investigation of Earthing Systems Behavior on the Incidence of Atmospheric Discharges at Electrical Systems". 20th International Conference on Lightning Protection. 20th ICLP, Interlaken, September, 1990.
7. Visacro S. y Portela C. "Modelling of Earthing Systems for Lightning Protection Applications, Including Propagation Effects", 21th ICLP, Berlin, 1992.
8. Grcev Leonid D. "Computer Analysis of Transients Voltages in Large Grounding Systems". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April, 1996.
9. Grcev Leonid D. y Heimbach M. "Frequency Dependent and Transient Characteristic of Substation Grounding Systems". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January, 1996.
10. Grcev Leonid D. y Heimbach M. "Grounding Systems Analysis in Transients Programs Applying Electromagnetic Field Approach". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12. No 1. January, 1996.
11. ANSI/IEEE Std. 80. "IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding", January, 2000.
12. Henao, J.A.; Ramírez, H.A. "Variación de resistividad y permitividad de suelos con la frecuencia". Proyecto de grado, Universidad de Antioquia. Medellín, 1990.
13. Hernández L., Franco J. y Ortiz C. "Modelo de Puestas a Tierra para la Evaluación de Líneas de Transmisión Bajo Descargas Atmosféricas". Proyecto de grado. Universidad de Antioquia. Medellín, 2001.
14. EPRI Electromagnetic Transients Program (EMTP) Primer, EPRI EL-4202, Project 2149-1. Final Report. September, 1985.
15. Alternative Transient Program-Rule Book. CANAM, 1990.
16. García, E., Narváez, M. "Evaluación de las sobretensiones producidas en una línea de transmisión ante una descarga atmosférica en el cable de guarda mediante simulación en el EMTP/ATP". Proyecto de grado. Universidad de Antioquia. Medellín, 2001.