



Modelación de sistemas de puesta a tierra para evaluación de sobretensiones transitorias

Modelling large grounding systems to evaluate transient voltages

Yandi A. – Gallego Landera
Ángel C. –Valcárcel Rojas

Alberto A. –Limonte Ruiz
Adis P. – Mariño Rivero

Recibido: septiembre de 2013

Aprobado: febrero de 2014

Resumen/ Abstract

En plantas generadoras y en subestaciones se requieren sistemas de puesta a tierra (SPT) espaciosos, con configuraciones complejas como parte del sistema de protección contra rayos. Las corrientes provocadas por una descarga atmosférica pueden causar altas tensiones en los cables de señales ubicados cerca de los SPT. Estas tensiones transitorias pueden causar falsas señales, las cuales provocan un mal funcionamiento de la instrumentación electrónica. Determinar medidas de protección contra rayos requiere del conocimiento de la máxima elevación de la tensión entre el SPT y la tierra remota. El presente trabajo propone una metodología para analizar el comportamiento transitorio de redes de tierra. La técnica se basa en considerar los diferentes segmentos de la malla de tierra como elementos de líneas de transmisión. Para desarrollar esta metodología se utilizó el *software* MATLAB-Simulink. Los resultados se validan por comparación con modelos basados en la teoría del campo electromagnético publicados en la literatura.

Palabras clave: comportamiento transitorio, línea de transmisión, protección contra rayos, sistemas de puesta a tierra.

In generating plants and substations spacious grounding systems with complex configuration as part of the protection system against lightning, are required. The current caused by an atmospheric discharge can cause high voltages in the signal cables located near the grounding systems. These transient voltages may be the reason for the occurrence of false signals, which can cause malfunctioning and of electronic instruments. The knowledge of maximum elevation of voltage between the grounding systems and the remote ground is required to determine protection against lightning. This paper proposes a methodology to analyze the transient behavior of grounding grid. The technique is based on considering the different segments of the ground grid as elements of transmission lines. For modeling the grounding systems behavior in its transient state faster, the MATLAB-Simulink software was used. The results were validated by comparing them with models based on the electromagnetic field theory published in the literature.

Key Words: transient behavior, transmission lines, protection against lightning, grounding systems.

INTRODUCCION

Las redes de tierra protegen los equipos conectados al sistema eléctrico de potencia cuando ocurre algún fenómeno transitorio como pueden ser operaciones de maniobra, fallas y descargas atmosféricas. Durante estos fenómenos se originan corrientes y tensiones elevadas que pueden

ocasionar daños al sistema y a los equipos conectados al mismo; así como poner en peligro la integridad del personal. Como una medida de seguridad y con el fin de evitar el menor daño posible es conveniente que los equipos del sistema eléctrico se encuentren conectados a tierra. La función de un sistema de tierra es la de proporcionar un camino de baja impedancia a la corriente eléctrica para que esta se disipe al interior del suelo. El otro objetivo de la red de tierra es proporcionar una referencia común de tensión para los equipos eléctricos y/o electrónicos conectados a la misma en condiciones normales de operación [1-2].

El estudio del comportamiento de redes de tierra a baja frecuencia (60 Hz) es un tópico bastante desarrollado [3]. Sin embargo, existen pocos modelos y estudios orientados a analizar el comportamiento de las redes de tierra durante fenómenos transitorios con un elevado contenido en frecuencia. Esta situación es más preocupante por el incremento en la cantidad de equipos conectados al sistema eléctrico los cuales originan fenómenos transitorios de alta frecuencia. La presencia de fenómenos transitorios ultra-rápidos en el sistema eléctrico, requiere de un conocimiento preciso del comportamiento de la red de tierra durante este tipo de fenómeno [4]. Esto permitirá tomar medidas para reducir los índices de falla tanto de los equipos eléctricos conectados al sistema como de los equipos electrónicos sensibles asociados a los mismos (sensores, medidores, indicadores, etc.). En este artículo se presenta un modelo computacional para analizar el comportamiento transitorio de redes de tierra durante fenómenos transitorios ultra-rápidos. El modelo se basa en considerar cada segmento de la red de tierra como un elemento de líneas de transmisión. El modelo permite obtener la distribución temporal y espacial de las tensiones a lo largo de toda la red de tierra así como calcular la tensión transitoria en cualquier punto de la red cuando se aplican pulsos de corriente de alta frecuencia en cualquier punto de la red. Esto permite calcular las sobretensiones a los que se someten los equipos eléctricos conectados a la red durante la presencia de fenómenos transitorios ultra-rápidos.

DESARROLLO

A. Metodología del modelo

El primer paso para analizar el comportamiento transitorio de una red de tierra, es definir el método a emplear para su simulación, así como, calcular sus parámetros eléctricos. El modelo a utilizar fue el enfoque de la línea de transmisión, en este modelo el conductor enterrado se divide en segmentos aplicando la técnica de los elementos finitos, cada uno de estos segmentos se considera como una línea de transmisión. Para analizar el comportamiento transitorio puede emplearse con éxito el modelo de línea de parámetros distribuidos de MATALAB-Simulink [5].

B. Cálculo de los parámetros eléctricos

Resistencia por unidad de longitud de los segmentos enterrados

La resistencia por unidad de longitud de los segmentos enterrados puede ser calculada como se muestra en la ecuación (1).

$$R = \frac{\rho_s}{r_0^2 \pi} \quad (1)$$

Donde:

ρ_s – resistividad del segmento [Ωm].

r_0 – radio del segmento de conductor.

Capacitancia por unidad de longitud

La capacitancia de los segmentos puede ser calculada por el método del potencial promedio y depende de la posición del segmento con respecto a la superficie de la tierra, ver ecuación (2).

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\iint_{\Gamma' \Gamma} \frac{dl' \cdot dl}{r} + \iint_{\Gamma_s \Gamma} \frac{dl_s \cdot dl}{r}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{I_{self} + I_{mut}} \quad (2)$$

Donde:

$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ [As/Vm] – constante dieléctrica del vacío.

I_{self}, I_{mut} – dobles integrales, corriente propia y mutua respectivamente.

l – longitud del segmento [m].

ϵ_r – Constante dieléctrica relativa de la tierra.

r – radio del segmento de conductor.

La primera integral en la expresión para el cálculo de la capacitancia representa la capacitancia propia del segmento de conductor mientras que la segunda integral representa la capacitancia mutua entre el segmento y su imagen.

El valor de la segunda integral (del denominador de la ecuación (2), depende de la posición del segmento relativa a la superficie de la tierra, como se explicará más adelante.

Todas estas integrales pueden ser calculadas analíticamente, este hecho contribuye a la estabilidad numérica del método.

Inductancia por unidad de longitud

Para el cálculo de la inductancia por unidad de longitud del segmento enterrado se hace necesario calcular primero la impedancia de impulso la cual está definida por la siguiente ecuación (3).

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}{C} \quad (3)$$

Donde:

L – Inductancia por unidad de longitud del segmento [H/m].

C – Capacitancia por unidad de longitud del segmento [F/m].

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Vs/Am] – permeabilidad del vacío.

$\mu_r = 1$ – permeabilidad relativa de la tierra.

Longitud del segmento

Cada segmento de la red de tierra debe satisfacer la siguiente relación para su longitud máxima (en metros). Ver la ecuación (4).

$$l_{max} = \frac{3160}{6} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f_{max}}} \quad (4)$$

Donde:

ρ – resistividad de la tierra [Ωm].

f_{max} – máxima frecuencia encontrada en la descarga atmosférica [Hz].

Resistencia de dispersión de los segmentos enterrados

La conductancia de dispersión de los segmentos se modela como un parámetro concentrado adicional, la cual se representará en MATLAB/Simulink como una resistencia a cada lado de los segmentos. Se considera un doble valor de esta resistencia ($2 \cdot R_L$) a cada lado del segmento con el objetivo de obtener el valor de R_L después de la conexión en paralelo. Ver ecuación (5).

$$R_L = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \left(\iint_{\Gamma \Gamma} \frac{dl' \cdot dl}{r} + \iint_{\Gamma_S \Gamma} \frac{dl_s \cdot dl}{r} \right) = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot (I_{self} + I_{mut}) = R_{self} + R_{mut} \quad (5)$$

Donde:

R_{self} – Resistencia propia del segmento en un medio homogéneo y sin frontera (tierra).

R_{mut} – Resistencia mutua entre el segmento y su imagen en relación con la superficie de la tierra.

Velocidad de propagación de la corriente de la descarga atmosférica en la tierra

La velocidad de propagación de la corriente de la descarga atmosférica en la tierra puede ser calculada por la siguiente ecuación (6):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

Donde c representa la velocidad de la luz en el aire y ϵ_r la constante dieléctrica relativa de la tierra.

Solución analítica a la doble integral I_{self}

Las expresiones de los parámetros concentrados y distribuidos incluyen dos dobles integrales. La solución a la primera de estas integrales se muestra en la ecuación (7):

$$I_{self} = \iint_{\Gamma' \Gamma} \frac{dl' \cdot dl}{r} = 2 \cdot \left(l \cdot \ln \frac{\sqrt{l^2 + r_0^2} + l}{r_0} - \sqrt{l^2 + r_0^2} + r_0 \right) \quad (7)$$

La doble integración es realizada a lo largo del eje del segmento (curva Γ' en la figura 1, y a lo largo de la curva de la superficie del segmento, la cual es paralela al eje del segmento (curva Γ en la figura 1).

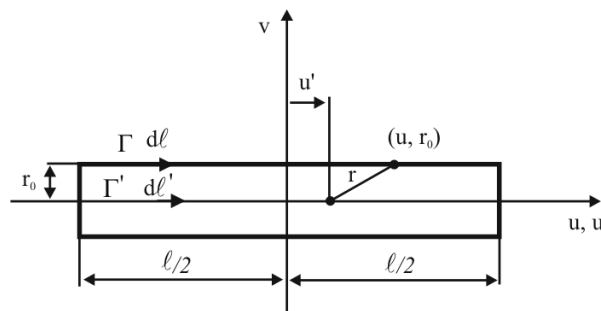


Fig.1. Segmento de conductor en posición horizontal.

Solución analítica a la doble integral I_{mut}

La segunda integral doble que se incluye en el cálculo de los parámetros concentrados y distribuidos del segmento se observa a continuación en la ecuación (8).

$$I_{mut} = \iint_{\Gamma_s \Gamma} \frac{dl_s \cdot dl}{r} \quad (8)$$

La solución analítica de I_{mut} depende de la posición relativa del segmento con respecto a la superficie de la tierra, para este estudio se consideró tres posiciones:

- 1) Segmento paralelo a la superficie de la tierra.
- 2) Segmento perpendicular a la superficie de la tierra.
- 3) Segmento en posición arbitraria a la superficie de la tierra.

Segmento paralelo a la superficie de la tierra

Si el segmento es enterrado a una profundidad h paralelo a la superficie de la tierra la solución de la integral se muestra en la ecuación (9).

$$I_{mut} = 2 \cdot \left(l \cdot \ln \frac{\sqrt{l^2 + 4 \cdot h^2 + l}}{2 \cdot h} - \sqrt{l^2 + 4 \cdot h^2 + 2 \cdot h} \right) \quad (9)$$

Segmento perpendicular a la superficie de la tierra

Si el segmento es perpendicular a la superficie de la tierra, la primera integración es realizada a lo largo del eje del segmento imagen (curva Γ_s en la figura 2), mientras que la segunda integración es realizada a lo largo de la curva de la superficie del segmento imagen, la cual también es paralela al eje de dicho segmento (curva Γ en la figura 2).

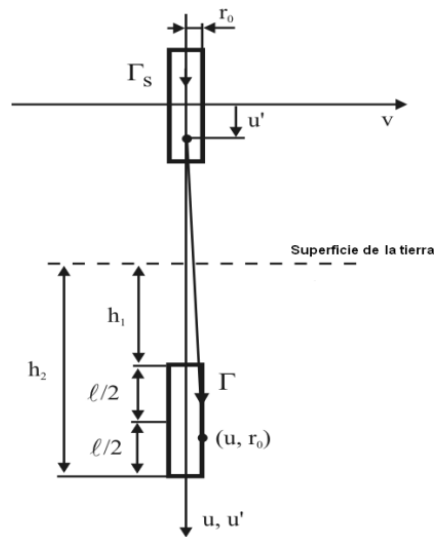


Fig.2. Segmento enterrado en posición vertical con su imagen.

Para el segmento enterrado perpendicular a la superficie de la tierra, la primera integración es la mostrada en la ecuación (10):

$$I_{mut} = u_1 \cdot arsh \frac{u_1}{r_0} - \sqrt{u_1^2 + r_0^2} + u_2 \cdot arsh \frac{u_2}{r_0} - \sqrt{u_2^2 + r_0^2} - 2 \cdot u_3 \cdot arsh \frac{u_3}{r_0} + \sqrt{u_3^2 + r_0^2} \quad (10)$$

Donde los valores de u_1 , u_2 y u_3 se calculan como se muestra en las ecuaciones (11),(12) y (13).

$$u_1 = h_1 + h_2 + l \quad (11)$$

$$u_2 = h_1 + h_2 - l \quad (12)$$

$$u_3 = h_1 + h_2 \quad (13)$$

Segmento en posición arbitraria a la superficie de la tierra

Si el segmento es colocado en una posición arbitraria a la superficie de la tierra, los parámetros señalados en la figura 3, pueden ser calculados mediante las ecuaciones (14),(15),(16) y (17), que seguidamente se muestran.

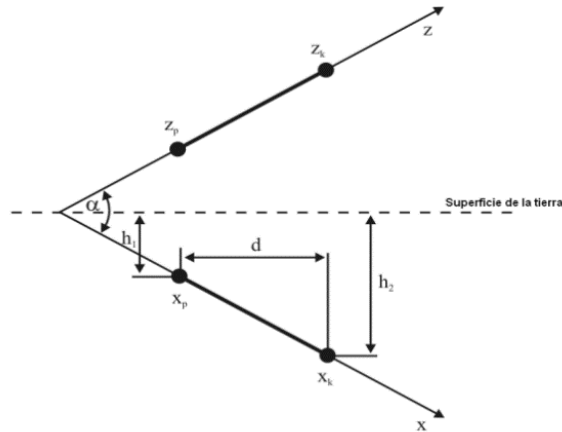


Fig. 3. Segmento enterrado en posición arbitraria con respecto a la superficie del terreno con su imagen.

$$l = \sqrt{d^2 + (h_2 - h_1)^2} \tag{14}$$

Donde d representa la proyección ortogonal del segmento sobre la superficie de la tierra.

$$X_p = Z_p = \frac{\min\{h_1, h_2\}}{|h_2 - h_1|} \cdot l \tag{15}$$

$$X_k = Z_k = \frac{\max\{h_1, h_2\}}{|h_2 - h_1|} \cdot l \tag{16}$$

$$\cos \alpha = \frac{2d^2}{l^2} - 1 \tag{17}$$

Para esta posición arbitraria del segmento con respecto a la superficie de la tierra la solución a la integral quedaría como se muestra en la ecuación (18):

$$I_{mut} = 2 \cdot [B(x_p, z_p) + B(x_k, z_k) - B(x_p, z_k) - B(x_k, z_p)] \tag{18}$$

Donde para $r_0 \ll l$ el valor de $B(x, z)$ se determina como a continuación se muestra en la ecuación (19).

$$B(x, z) = x \cdot \ln \left(z - x \cdot \cos \alpha + \sqrt{x^2 + z^2 + r_0^2 - 2 \cdot x \cdot z \cdot \cos \alpha} \right) \tag{19}$$

C. Modelo de la descarga atmosférica

El modelo de la descarga atmosférica se realizó mediante la expresión de Heidler, tal como se muestra en la ecuación (20):

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \tag{20}$$

Donde:

η – Factor de corrección de amplitud dado por la ecuación (21), que seguidamente se muestra:

$$\eta = e^{\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(n \frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{1/n} \right]} \quad (21)$$

I_0 – Valor pico de la corriente de la descarga atmosférica.

n – Factor que influye en la proporción del levantamiento de la función ($2 \leq n \leq 10$).

ζ_1 – Duración del frente de la descarga atmosférica.

ζ_2 – Intervalo entre $t = 0$ y el punto en la cola donde la amplitud de la función ha caído al 50% de su valor máximo.

VALIDACIÓN DEL MODELO

A. Ejemplo numérico

A continuación se muestra el reticulado de tierra implementado en MATLAB-Simulink y ATP-EMTP para el ejemplo numérico. Ver figura 4.

La malla está construida con conductores de cobre de 1.4 cm de diámetro, enterrada 0.5 m de profundidad. El suelo es homogéneo con resistividad 100 Ωm y permisividad relativa 36 de acuerdo con [6-7].

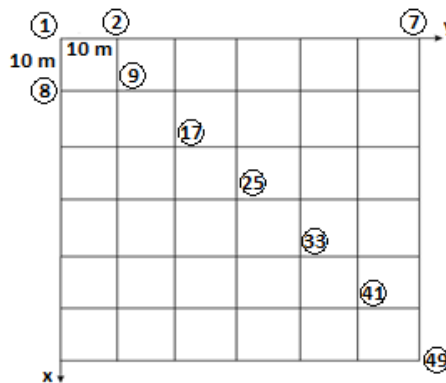


Fig.4. Red de tierra que se simuló en MATLAB-Simulink.

Los parámetros de la corriente de la descarga atmosférica son 1.0167 A de amplitud y forma 1/20 μs

Se considera la inyección de corriente de la descarga atmosférica en dos escenarios de acuerdo con [6]

- 1) Inyección de corriente en la esquina de la malla (punto 1)
- 2) Inyección de corriente en el centro de la malla (punto 25)

B. Resultados del ejemplo numérico

Los resultados del modelo de cálculo presentados son comparados con modelos de otros autores [6-7], las figuras 5 y 6, muestran la respuesta de tensiones transitorias con respecto a una tierra remota de la red ilustrada en la figura 4. Las figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14, muestran la distribución temporal y espacial de las tensiones de los conductores de la red. La distribución espacial se presenta gráficas compactas en tres dimensiones (3D) donde las variaciones temporales se muestran en instantáneas individuales de las animaciones realizadas. Tal

animación permite una visión global de la distribución de las tensiones en la red durante el periodo transitorio.

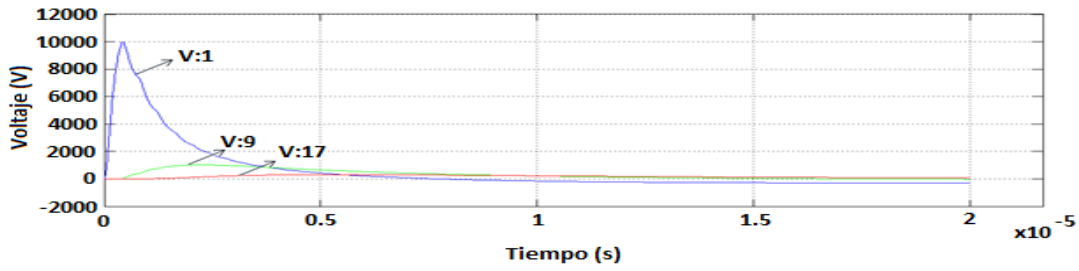


Fig. 5. Tensión en el puntos 1,9 y 17 de la malla de tierra, obtenidos por el software MATLAB-Simulink para las condiciones del escenario 1.

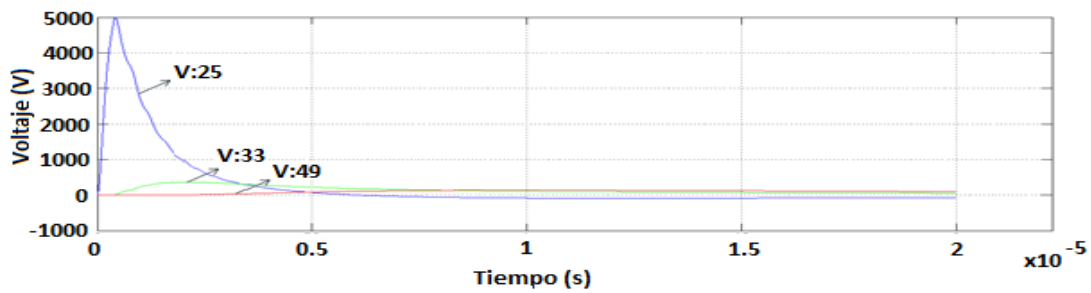


Fig. 6. Tensión en el puntos 25,33 y 49 de la malla de tierra, obtenidos por el software MATLAB-Simulink para las condiciones del escenario 2.

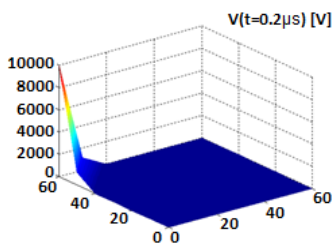


Fig. 7. Tensiones transitorias en los conductores de la malla para un tiempo de 0.2 µs con la inyección de corriente en la esquina.

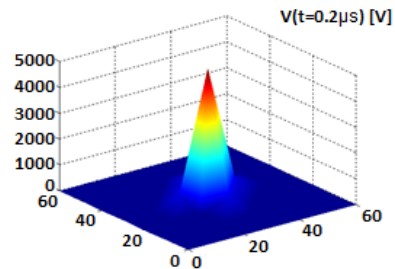


Fig. 8. Tensiones transitorias en los conductores de la malla para un tiempo de 0.2 µs con la inyección de corriente en el centro.

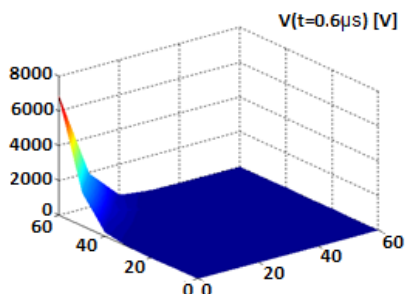


Fig. 9. Tensiones transitorias en los conductores de la malla para un tiempo de 0.6 µs con la inyección de corriente en la esquina.

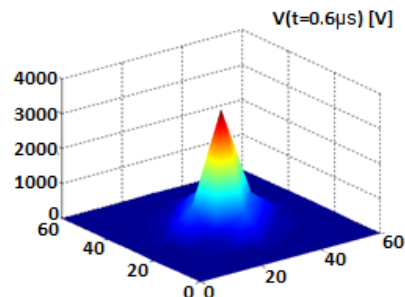


Fig.10. Tensiones transitorias en los conductores de la malla para un tiempo de 0.6 µs con la inyección de corriente en el centro.

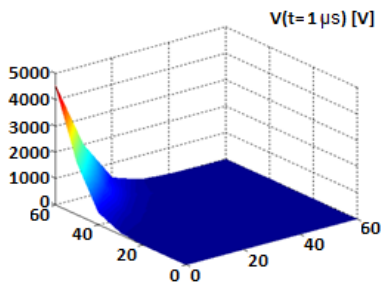


Fig.11. Tensiones transitorias en los conductores de la malla para un tiempo de 1 μ s con la inyección de corriente en la esquina.

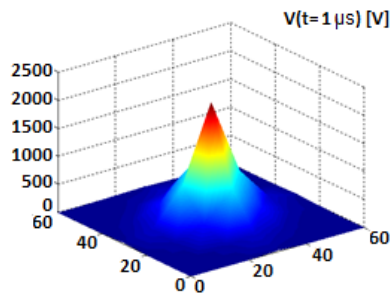


Fig.12. Tensiones transitorias en los conductores de la malla para un tiempo de 1 μ s con la inyección de corriente en el centro.

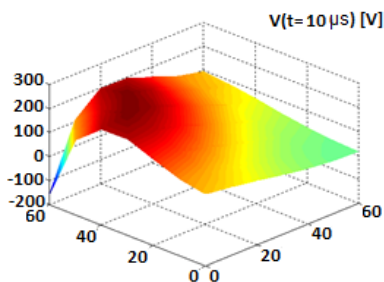


Fig.13. Tensiones transitorias en los conductores de la malla para un tiempo de 10 μ s con la inyección de corriente en la esquina.

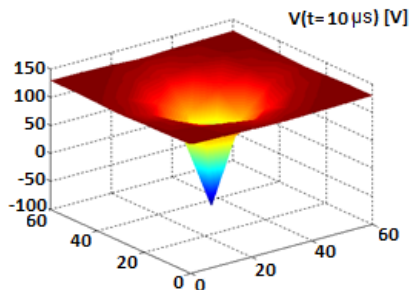


Fig.14. Tensiones transitorias en los conductores de la malla para un tiempo de 10 μ s con la inyección de corriente en el centro.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología basada en el enfoque de la línea de transmisión que permite obtener las tensiones transitorias en cualquier punto de una red de tierra compleja, constituyendo esto una información muy valiosa para los diseñadores de redes de tierra. El modelo presentado exhibe buena exactitud con los resultados obtenidos con otro modelo más exacto (Teoría del campo electromagnético) presentado en [7] y aunque el efecto de ionización no se tuvo en cuenta en este trabajo es muy fácil de incluir. El modelo está limitado a un medio homogéneo

REFERENCIAS

- [1]. PAPAEXOPOULOS, A.D.; MELIOPOULOS, A.P., "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1987, n.4, p.1073-1081, ISSN 0885-8977.
- [2]. LIU, Y.; THEETHAYI, N.; THOTTAPPILLIL, R. "Investigating the validity of existing definitions and empirical equations of effective length/area of grounding wire/grid for transient studies". *Journal of Electrostatics*, 2007, vol. 65, p. 329–335, ISSN 0304-3886.
- [3]. GALLEGO, Y.; VALCARCEL, A.; LIMONTE, A., "Análisis de Sistemas de Puesta a Tierra en la región Central". Memorias de la XIV Convención de Ingeniería Eléctrica, CIE, Villa Clara, Cuba, 2011.
- [4]. GRCEV, L., "Impulse Efficiency of Ground Electrodes". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, vol. 24, n. 1, p. 441-451, ISSN 0885-8977.
- [5]. Matlab: The language of technical computing, R2011b [Consultado: Mayo de 2012], Disponible en:<http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/powersys/ref/distributedparameterline.html>.

- [6]. VUJEVIĆ, S.; SARAJČEV, P.; PETROVIĆ, J., "TLM Model for the Lightning Transient Analysis of the GSM Base Station". University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Croatia 2005, p.1- 30,[Consultado: Mayo de 2012], Disponible en http://www.emc.york.ac.uk/cost286/Technical%20reports/SplitDec2005/Presentation_Vujevic.pps.
- [7]. GRCEV, L., "Computer analysis of transient voltage in large grounding systems". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol.11, n.2 , p.815-823, ISSN 0885-8977.

AUTORES

Yandi Anibal Gallego Landera

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

e-mail: gallego@uclv.cu

Ángel Cecilio Valcárcel Rojas

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE), Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba

e-mail: valca@uclv.edu.cu

Alberto Andrés Limonte Ruiz

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Profesor Auxiliar de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

e-mail: limonte@uclv.edu.cu

Adis Perla Mariño Rivero

Licenciada en Ciencia de la computación, Profesora de la Facultad de Matemática, Física y Computación de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

e-mail: amarino@uclv.edu.cu