

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA TRANSITORIA DE CABLES ELÉCTRICOS SUBTERRÁNEOS DE ALTA TENSIÓN PARA DIFERENTES PARÁMETROS FÍSICOS Y ELÉCTRICOS

Sosa Torres Miguel Angel¹, Torres Jiménez Jacinto², Saavedra Martínez José Emmanuel¹, Juárez Castro Alberto¹, Guillermo Tapia Tinoco²

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

¹Departamento de Ingeniería Electrónica

²Departamento de Ingeniería Electromecánica, Maestría en Ingeniería Eléctrica

Km. 12.5 Carretera Irapuato-Silao, Irapuato, Gto. 36821, México

Tel. (462) 6067900, Fax: Ext. 101, correo electrónico: misosa@itesi.edu.mx,

jacinto.torres@itesi.edu.mx, josaavedra@itesi.edu.mx, aljuarez@itesi.edu.mx, gutapia@itesi.edu.mx

RESUMEN.

Este artículo presenta un análisis para encontrar la respuesta transitoria que presentan las líneas subterráneas de transmisión de energía eléctrica debido a cambios en su distribución geométrica y el tipo de suelo. El estudio se enfoca en la distribución geométrica, la profundidad de los cables y el tipo de suelo. Se aplica una metodología basada en redes dos puertos, transformada rápida de Fourier y análisis modal [1]. Los resultados presentados son en gráficas comparativas de la respuesta transitoria de las líneas de transmisión. Los sistemas subterráneos de transmisión de energía eléctrica presentan sobrevoltajes y altas corrientes debido a perturbaciones en los parámetros eléctricos del sistema. Este tipo de señales son llamadas señales transitorias y su duración son de muy corto tiempo, pero los niveles de voltajes que originan pueden causar daños severos a aislamiento del cable o el sistema eléctrico.

Palabras Clave: cable subterráneo, señal transitoria, integral de Pollaczek, impedancia Serie

ABSTRACT.

This paper present to analysis to find the transitory response that present the underground lines of electrical transmission energy due change in his geometric distribution and types of soil. The study focuses on the geometric distribution, depth of the cables and soil type. A methodology based in two-networks is, Fast Fourier Transform and modal analysis is applied [1]. The presented results are in comparative graphs of the transitory response of the lines of transmission for different cases of change parameters. The underground systems of electrical transmission energy present overvoltages and high currents due to perturbations in the electrical parameters of the system. This type of signals names them transitory signals and his duration is of very short time, but the levels of currents and voltages that originate can cause severe damages to the isolation of the cable or the electrical system.

Keywords: Underground cable, Transient signal, Pollaczek integral, Series impedance

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas subterráneos de transmisión de energía eléctrica presentan sobretensiones y corrientes elevadas debido a perturbaciones en los parámetros eléctricos del sistema. Este tipo de señales se les denomina señales transitorias y su duración es de tiempo muy corto, pero los niveles de corrientes y tensión que se originan pueden provocar daños severos al aislamiento del cable o el sistema eléctrico. Estas señales se generan por: 1) errores humanos al manipular los interruptores en las maniobras, 2) por grandes cargas que se activan o desactivan en los extremos de las líneas de transmisión y 3) por fallas en el aislamiento.

Se han presentado diversos modelos para caracterizar transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión aéreas como subterráneas para suelos homogéneos y no homogéneos [2], [3] pero no realizan estudios de sensibilidad de parámetros físicos y de diseño.

Por otra parte, en el modelado dinámico de cables subterráneos existen varios parámetros que afectan la propagación de la onda transitoria. De los parámetros eléctricos y de diseño más significativos se pueden mencionar: la impedancia serie, la admitancia paralelo, los materiales utilizados en el conductor central y en las diferentes capas de cable, así como, la conductividad, la permeabilidad y permitividad del medio que rodea al sistema. También existen parámetros físicos que influyen en la respuesta transitoria como son: la longitud de la línea subterránea, el diámetro del conductor, la distancia entre los cables, la profundidad del sistema y la distribución geométrica de los cables.

Estudiar y analizar cómo se comporta la respuesta transitoria en las líneas subterráneas de transmisión al variar sus parámetros eléctricos y físicos es importante porque permite diseñar e implementar esquemas de coordinación de protecciones adecuados para respaldar el sistema cuando se

presentan fenómenos transitorios en el mismo.

2. FORMULACION DEL PROBLEMA

2.1. Sistema subterráneo de energía eléctrica.

De manera general un sistema trifásico subterráneo está constituido por tres cables coaxiales enterrados a determinada profundidad de la superficie como se muestra en la Figura 1. Se considera que el suelo que rodea el sistema es homogéneo y tiene la misma resistividad en cualquier dirección.

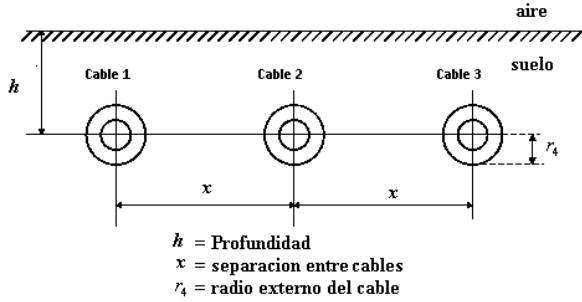


Figura 1. Sistema trifásico de transmisión subterránea

Los cables coaxiales tienen las mismas características eléctricas como se presenta en la Figura 2 y son paralelos entre ellos.

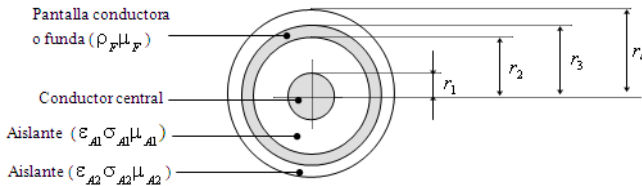


Figura 2. Sección transversal de un cable coaxial de alta tensión

A partir de los parámetros físicos y eléctricos de los conductores y los aislantes en el cable coaxial, se determina la impedancia serie (Z) y la admitancia paralelo (Y), tomando en cuenta las siguientes consideraciones: 1) Las pérdidas en los dieléctricos son despreciables, 2) la permeabilidad en los conductores es constante y 3) los cables son longitudinalmente paralelos entre sí y a la superficie.

2.2. Impedancia serie.

La impedancia serie (Z_{serie}) del sistema de la Figura 1, está compuesta de siete impedancias particulares del sistema que se enuncian a continuación:

- z_1 : Impedancia interna del conductor central ($\Omega\text{-m}$)
- z_2 : Impedancia debida al flujo en el aislamiento interior debido a la variación del campo magnético con el tiempo ($\Omega\text{-m}$)
- z_3 : Impedancia interna de la funda interior ($\Omega\text{-m}$)

- z_4 : Impedancia mutua de la pantalla conductora ($\Omega\text{-m}$)
- z_5 : Impedancia interna de la funda exterior ($\Omega\text{-m}$)
- z_6 : Impedancia del aislamiento exterior debida a la variación del flujo magnético con el tiempo ($\Omega\text{-m}$)
- z_7 : Impedancia debida al retorno por tierra ($\Omega\text{-m}$)

Estas resultan de la interacción eléctrica y magnética entre el conductor y la malla conductora del cable [4].

2.3. Formulas clásicas de las impedancias.

- z_1 a bajas frecuencias es igual a la resistencia del conductor central. A altas frecuencias, z_1 se puede calcular mediante la fórmula (1), que toma en cuenta el efecto piel.

$$z_1 = \frac{\rho_N m_1}{2\pi r_1} \frac{I_0(m_1 r_1)}{I_1(m_1 r_1)} \Omega - m \quad (1)$$

donde

$$m_1 = \sqrt{j\omega \frac{1}{\rho_N} \mu_{\text{Aisl1}}} = \text{constante de propagación del material}$$

ρ_N es la resistividad del núcleo conductor

r_1 es el radio del conductor central

ω es la frecuencia angular

μ_{Aisl1} es la permeabilidad del aislante 1

I_0 es la función de Bessel modificada de primera clase de orden cero

I_1 es la función de Bessel modificada de primera clase de primer orden

Existen aproximaciones para calcular z_1 , las cuales no involucran funciones de Bessel. Las ecuaciones (2) y (3) son modelos bastante aproximados de la ecuación (1) para la impedancia interna. La ecuación (2) corresponde al modelo de Wedepohl [5] y la ecuación (3) al modelo de Gary,[6].

$$z_1 = \frac{\rho_N m}{2\pi r_1} \coth(0.777 m r_1) + 0.356 \frac{\rho_N}{\pi r_1^2} \Omega/m \quad (2)$$

$$z_1 = \sqrt{\left(\frac{\rho_N}{\pi r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{\rho_N m_1}{2\pi r_1}\right)^2} \quad (3)$$

- z_2 y z_6 se calculan mediante las formulas

$$z_2 = \frac{j\omega \mu_1}{2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \Omega - m \quad (4)$$

$$z_6 = \frac{j\omega \mu_2}{2} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \Omega - m \quad (5)$$

donde

μ_1 es la permeabilidad magnética del aislante interno

μ_2 es la permeabilidad magnética del aislante externo

r_1 es el radio del conductor central
 r_2 es el radio del aislante 1
 r_3 es el radio de la pantalla conductora
 r_4 es el radio del aislante 2

$$H = h_1 + h_2,$$

$$u = \sqrt{\lambda^2 + k^2},$$

$$k = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma} = \frac{1+j}{\delta}$$

- Para la impedancia de la pantalla conductora z_3 , z_4 y z_5 se utilizan las formulas clásicas siguientes:

$$z_3 = \frac{\frac{\rho_f m_2}{2\pi r_2} \{I_0(m_2 r_2) K_1(m_2 r_3) + K_0(m_2 r_2) I_1(m_2 r_3)\}}{I_1(m_2 r_3) K_1(m_2 r_2) - I_1(m_2 r_2) K_1(m_2 r_3)} \Omega - m \quad (6)$$

donde $m_2 = \sqrt{j\omega \frac{1}{\rho_f} \mu_{Aisl2}}$

ρ_f es la resistividad del núcleo de la pantalla
 μ_{Aisl2} es la permeabilidad del aislante 2
 K_0 es la función modificada de Bessel segunda clase y orden cero
 K_1 es la función modificada de Bessel segunda clase y primer orden

$$z_4 = \frac{\left(\frac{\rho_f}{2\pi r_2 r_3}\right)}{I_1(m_2 r_3) K_1(m_2 r_2) - I_1(m_2 r_2) K_1(m_2 r_3)} \Omega - m \quad (7)$$

$$z_5 = \frac{\frac{\rho_f m_2}{2\pi r_3} \{I_0(m_2 r_3) K_1(m_2 r_2) + K_0(m_2 r_3) I_1(m_2 r_2)\}}{I_1(m_2 r_3) K_1(m_2 r_2) - I_1(m_2 r_2) K_1(m_2 r_3)} \quad (8)$$

- La impedancia de retorno por tierra (z_7) se origina por las corrientes circulantes en el plano de tierra. El cálculo de esta es importante para el modelado de líneas de transmisión en el estudio de transitorios en sistemas de potencia o en los casos de compatibilidad electromagnética. El planteamiento de la ecuación para el cálculo de la impedancia de retorno por tierra fue planteado por Carson [7] para cables aéreos y por Pollaczek [8] para cables subterráneos.

Para evaluar éstas corrientes, Pollaczek desarrolló una integral que lleva su nombre, la cual está dada por la ecuación (9).

$$Z(j\omega) = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} [K_0(kr) - K_0(kR) + 2J_{\text{Pollaczek}}] \quad (9)$$

donde

$$J_{\text{Pollaczek}} = \int_0^\infty \frac{\exp[-Hu]}{\lambda + u} \cos(\lambda x) d\lambda \quad (10)$$

con

$$r = \sqrt{x^2 + (h_1 - h_2)^2},$$

$$R = \sqrt{x^2 + H^2},$$

Donde δ se usa para la profundidad de la superficie a una frecuencia particular y K_0 indica la función de Bessel modificada de orden 0. Cuando x es el radio del conductor y $h_1 = h_2$, La ecuación (9) da la impedancia propia del conductor. La versión más exacta de la ecuación (9) involucra una modificación que incluye la permitividad de la tierra. Entonces la constante de propagación completa del suelo es

$$k = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma + \omega^2\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}.$$

Sin embargo, esta integral no acepta una solución analítica cerrada. Theodoros [9] propone tres soluciones para resolver la integral de Pollaczek utilizando operaciones recursivas y funciones de Bessel. Dichas aproximaciones están dadas por las ecuaciones (11) a (14).

$$J_{\text{Pollaczek}} = \left(\frac{H}{R}\right)^2 K_0(kR) + \frac{1}{kR} \left[2 \left(\frac{H}{R}\right)^2 - 1\right] K_1(kR) - \frac{1}{k^2} I_{\text{Pollaczek}} \quad (11)$$

Donde el término $I_{\text{Pollaczek}}$ en la ecuación (11) se puede escribir de las siguientes tres maneras:

$$I_{\text{Pollaczek}} = \frac{2}{xR} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1)^2 [Z I_{n+3/2}(z) K_{n+1/2}(z) + Z I_{n+1/2}(z) K_{n+3/2}(z)] \quad (12)$$

$$I_{\text{Pollaczek}} = -k^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} kH \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n n! (2n-1)} \quad (13)$$

$$\times \frac{(kx)^{2n}}{(kR)^{n+3/2}} K_{n+3/2}(kR)$$

$$I_{\text{Pollaczek}} = \frac{H^2 - x^2}{R^4} \exp(-kH) (1 + kH) \quad (14)$$

$$+ 2\sqrt{2} \frac{kxH}{R^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n-3)!!}{2^{2n} n!} (1 - H/R)^{n+1/2}$$

$$\times \left\{ {}_1F_1[1, n+3/2, -k(R-H)] \times \left[1 - \frac{kR}{2} \frac{2n-1}{2n+1}\right] - 1 \right\}$$

Donde $z=k(R-H)/2$, $Z=k(R+H)/2$, $I_v(y)$, $K_v(y)$ son funciones modificadas de orden ν y ${}_1F_1(1, n+3/2; y)$ es la función hipergeométrica confluyente.

Existen otras formulaciones para el cálculo de la impedancia de retorno por tierra como los presentados en [5],[10]-[16]. Sin embargo, en este trabajo se considerará utilizar la fórmula (14) para el cálculo de la impedancia de retorno por tierra z_7 .

3. PROGRAMACION DEL MODELO

Para realizar el modelado del comportamiento de la propagación señal en las líneas de transmisión, se implementará la metodología utilizada en [1] que se basa en la teoría de funcionamiento de las redes de dos puertos, la FFT y el análisis modal. El análisis transitorio se realiza en el dominio de la frecuencia. Para obtener la respuesta en el dominio del tiempo se utiliza la transformada IFFT. De forma esquemática el proceso de solución se ilustra en el diagrama de bloques de la Figura 4.

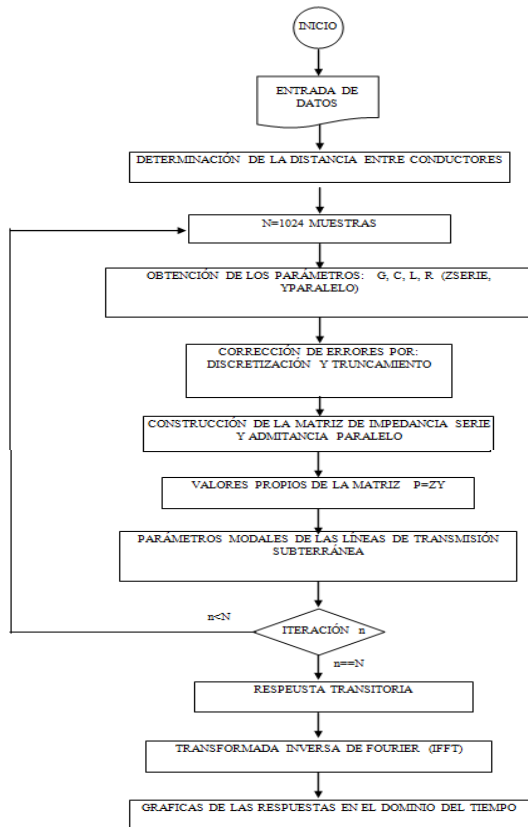


Figura 4. Algoritmo para modelar líneas de transmisión aéreas en estado transitorio.

La rutina computacional que modela el cable en estado dinámico se ejecuta utilizando la formulación exacta de la impedancia interna z_1 (1) y las ecuaciones (4) al (8), así como las ecuaciones (11) y (14) presentada por Theodoros.

4. CASOS DE ESTUDIO

Para analizar parámetros físicos de los cables subterráneos en la respuesta transitoria se presentan cuatro casos de estudio. El sistema de prueba está compuesto de una línea monofásica sin carga de longitud de 10 km, abierta en su extremo receptor a una profundidad dependiente del caso de la superficie del suelo como se muestra en la Figura 5.

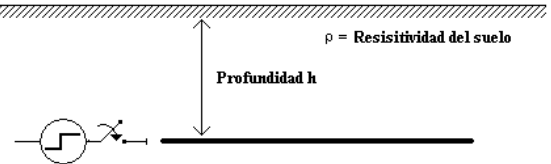


Figura 5 Línea monofásica.

El medio (suelo) que rodea al cable subterráneo tiene una resistividad variante dependiendo del tipo de suelo y permitividad relativa de 3.3. La característica de la sección transversal mostrado en la figura 2 del cable subterráneo fabricado por NEXANS [17] son las siguientes: Cobre, Aluminio como material en el conductor central y en la pantalla conductora Cobre, Aluminio o Plomo. Los Aislantes utilizados por este fabricante son PRC (Polietileno Reticulado o XLPE) para el aislante 1 y PVC (Policloruro de Vinilo) o PE (Polietileno) en el aislante 2. Los características eléctricas de los conductores son las siguientes, $\rho_{Cu} = 1.72 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$, $\rho_{Al} = 2.82 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$, $\rho_{Pb} = 2.1 \times 10^{-7} \Omega\text{-m}$, $\epsilon_{rPRC} = 2.4$, $\epsilon_{rPVC} = 3.5$, $\mu_{rPRC} = 1.0$, $\mu_{rPVC} = 1.0$.

El cable NEXANS 185R 36/63 A 40/64 (72.5kV) con conductor central de Cobre y pantalla conductora de Plomo, tiene los siguientes radios en su sección transversal: $r_1 = 0.00795\text{m}$, $r_2 = 0.01995\text{m}$, $r_3 = 0.02645\text{m}$, $r_4 = 0.0315\text{m}$.

El cable NEXANS 1600S 36/63 A 40/64 (72.5kV) con conductor central de Aluminio y pantalla conductora de Aluminio, tiene los siguientes radios en su sección transversal: $r_1 = 0.02445\text{m}$, $r_2 = 0.03735\text{m}$, $r_3 = 0.03935\text{m}$, $r_4 = 0.046\text{m}$.

El cable NEXANS 290 500 (550 kV) con conductor central de Aluminio y pantalla conductora de Plomo, tiene los siguientes radios en su sección transversal: $r_1 = 0.035$, $r_2 = 0.0669\text{m}$, $r_3 = 0.07204\text{m}$, $r_4 = 0.0805\text{m}$.

4.1. Caso de estudio 1

En este caso de estudio se analizará variación que representa la respuesta transitoria para cables con características reales en la propagación de la onda electromagnética. Se simulan para los tres diferentes tipos de cables NEXANS 185R, 1600S, 3000S

en la configuración mostrada por la figura 1 a una profundidad de 0.5 m y separados horizontalmente 0.3m. Se consideran los datos del sistema ya descrito. El medio que rodea al sistema es tierra vegetal la cual tiene una resistividad de $20 \Omega\text{-m}$.

En la Figura 6 se muestra la respuesta transitoria de los tres diferentes tipos de cable para un tiempo propagación de 10 ms.

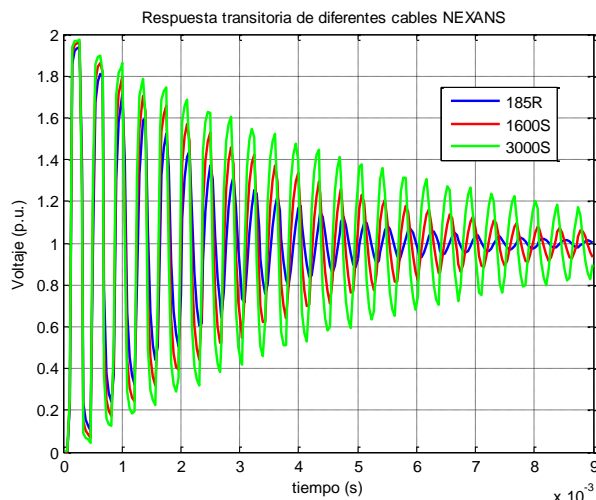


Figura 6. Comparación de la respuesta transitoria de tres diferentes cables con longitud de 10 km

Los resultados de las simulaciones muestran que la configuración del cable si afecta la respuesta transitoria. Esto es debido a la variación en los parámetros eléctricos de cada cable como es el material utilizado en los conductores tanto interno como en la pantalla conductora. También los diámetros tanto de los conductores como de los aislantes contribuyen a esta variación. El cable NEXANS 185R que es un cable de menor capacidad de corriente y en consecuencia de diámetros más pequeños, tiene una estabilización más rápida que los otros dos cables. Y sucede todo lo contrario con el cable 3000S que tiene un mayor frente de onda y mayor tiempo de estabilización.

4.2. Caso de estudio 2

En este último caso se modelaran el sistema de cables de transmisión subterráneos mostrado en la figura 1 con las características del cable NEXANS 185R pero con diferentes longitudes de la línea. 5, 20 y 50 km, a fin, de evaluar cómo influye la este parámetro en el sistema. Se utilizará como medio alrededor del sistema la tierra vegetal con una resistividad de $20 \Omega\text{-m}$, a una profundidad de 0.5 m. En la Figura 7 se muestra la respuesta transitoria para estas tres profundidades.

Es evidente que la variación de la longitud del cable es un parámetro que impacta en la propagación de la respuesta transitoria, ya que a mayor longitud, el valor del frente de

onda disminuye de manera significativa. Se puede observar en la Figura 11 que el valor del frente de onda para una línea de 20 km tiene un valor de 1.799 y decrece aproximadamente un 20% con respecto a la magnitud del voltaje transitorio de la línea con longitud de 5 km que tiene un valor de 1.963. Por otra parte, el tiempo de estabilización es aproximadamente de 6 ms en la línea de 5 km, sin embargo, se puede apreciar que el transitorio de la línea de 5 km presenta mayor cantidad de oscilaciones.

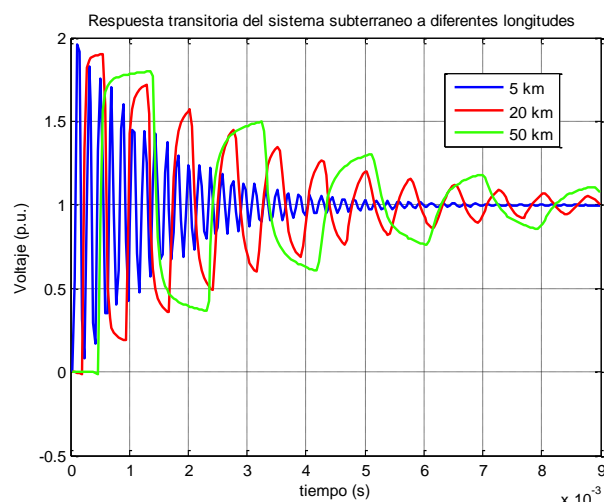


Figura 7. Respuesta transitoria del sistema cuando la longitud del cable parámetro variable.

5. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio para evaluar cómo influyen los parámetros físicos y eléctricos del sistema de cables subterráneos, como propiedades eléctricas de los componentes del cable y la longitud de estos mismos en el comportamiento de la respuesta transitoria de un sistema monofásico de transmisión subterránea.

Se utilizó una metodología especializada para simular la propagación de transitorios electromagnéticos en cables subterráneos.

Los resultados de las simulaciones muestran que la variación en los parámetros eléctricos y físicos influye en la respuesta transitoria de los cables subterráneos.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI) y a la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) por el apoyo para realizar esta investigación.

Proyecto realizado con financiamiento de la Secretaría de

Educación Pública-Subsecretaría de Educación Superior-
 Dirección General de Educación Superior Universitaria,
 mediante el convenio No.: 2014-11-012-057 con el Número
 de proyecto: 2014-01-11-012-094.

7. REFERENCIAS

- [1] J. Torres, "Análisis transitorio de redes de tierra en el dominio de la frecuencia", Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacan, México, 2004.
- [2] A.P. Sakis Meliopoulos, "Modeling and analysis of URD cable systems", *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol 5, No 2, April 1990.
- [3] A. Ametani "A simple and Efficient method for including frequency depend effects in transmission-line transient analysis", *Electrical Power and Energy systems*, vol 19, No. 4, pp 255-261, 1997.
- [4] L.M. Wedepohl and D.J. Wilcox, "Transient and Harmonic Induction in Underground Cables Systems". *Proc. 1973 IEE, Vol 120*, pp. 253-260.
- [5] L.M.Wedepohl and D.J Wilcox "Transient analysis of underground power transmission systems: System-model and wave propagation characteristics", *IEE Proceeeding on Generation, Transmission and Distribution*, vol 20, No. 2, pp. 253-260, 1973.
- [6] Gary C., "Approache complete de la propagation multifilaire en haute frequence par utilization des matrices complexes", *EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Reserches*, No. 3/4, pp 5-20, 1976
- [7] J.R. Carson, "Wave propagation in overhead wires ground return," *Bell Syst. Tech. J.*, vol 5, pág. 539-554, 1926
- [8] F. Pollaczek, "Über das feld einer unendlichen langen wechselstromdurch-flossenen einfachleitung," *Elect. Nachr.Tech.*, vol 3, no. 9 pág. 339-360, 1926
- [9] T. Theodoros, "Exact solution of Pollaczek's integral for evaluation of earth-return impedance for underground conductors," *IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility*, vol. 54, No. 4, August 2012
- [10] O. Saad, G. Gaba, M. Giroux, "A Closed-Form Approximation for Ground Return Impedance of Underground Cables", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11 No. 3, pag 1536-1545, July 1996.
- [11] Per Pettersson, "Image Representation of Wave Propagation on Wires Above on and Under Ground", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.9, No.2, pp 1049-1055, November 1994.
- [12] Felipe Alejandro Uribe Campos, "Evaluación Algorítmica de la Integral de Pollaczek y sus Aplicaciones en el Análisis de Transitorios Electromagnéticos en Sistemas de Transmisión Subterránea" Tesis de Doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Guadalajara, Jal., México, Noviembre 2002
- [13] G.K. Papagiannis, "Earth Return Path Impedances of underground Cables for multi-layer case – A Finite Element Approach", IEEE, Bologna Power Tech Conference, June 23-26, Bologna, France, 2003.
- [14] Dimitrios A. Tsiamitros, "Earth Return Impedances of Conductor Arrangements in Multilayer Soils – Part I: Theoretical Model", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 23, No 4, October 2008.
- [15] Jun Zou, "Fast and Highly Accurate Algorithm for Calculating the Earth-Return Impedance of Underground Conductors", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 53, No.1, February 2011.
- [16] A. Ametani, "A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PASS-99, No. 3, May/June 1980
- [17] Enlaces Subterráneos 60-500 kV, Cables Sintéticos, NEXAN