

Estudio y desarrollo de un sistema que contribuya en la coordinación de aislamiento para líneas y subestaciones a 115kV

Study and development of a system that contributes for the insulation coordination of lines and substations to 115 kV

Dávila, Marisol y Torres Daniel

Facultad de Ingeniería. ULA

Mérida 5101, Venezuela

marisol@ula.ve

Recibido: 19-05-2009

Revisado: 25-03-2010

Resumen

En el presente artículo se realiza el análisis de una línea de transmisión polifásica considerando el efecto de dependencia frecuencial de sus parámetros eléctricos a través de la incorporación de la Transformada Numérica de Laplace (TNL). Se desarrolla un programa que permite conocer las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas en los diferentes puntos de la línea, modeladas a partir de la inyección de una fuente de corriente, lo que permite escoger la mejor selección de aislamiento de los dispositivos que componen dicho sistema eléctrico y además obtener una mejor selección en la implantación de descargadores de sobretensión, contribuyendo de esta manera a la coordinación de aislamiento. El método aquí propuesto es aplicado a varios ejemplos prácticos, uno de ellos es una línea trifásica proveniente de la subestación Buena Vista, la cual llega a la subestación Valera II.

Palabras clave: Líneas de transmisión, coordinación de aislamiento, transformada numérica de laplace.

Abstract

In this paper a multiconductor transmission lines analysis which accounts the frequency parameters are presented, this analysis was made through the incorporation of Numerical Laplace Transform (NLT). A program that allows to know the surges produced lightning stroke occurrences in the different points of the line was developed, modeled from the injection of a current source, which allows to choose the best selection of devices insulation and in addition to obtain one better selection of surge arresters implantation, contributing this way to the insulation coordination. The method proposed here is applied to several practical examples. One of them is a three-phase line of the substation Buena Vista, which arrives at the substation Valera II.

Key words: Transmission lines, insulation coordination, numerical laplace transform.

1 Introducción

Dentro de los estudios de planificación que se plantean actualmente en la empresa Compañía Anónima de Electricidad de la región Los Andes (CADELA), filial de la Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico (CADAPE), se encuentra el realizar el estudio de las descargas atmosféricas en la zona Trujillo. Esta zona se ubica dentro de la región andina y se considera como uno de los lugares con mayor incidencia de descargas atmosféricas en el país, este fenómeno natural ocasiona gran daño al siste-

ma eléctrico de potencia, ya que al impactar una descarga atmosférica en una de las líneas de transmisión o distribución, se genera una sobretensión que en ciertas ocasiones, sobrepasa los límites de aislamiento de equipos y demás elementos que componen el sistema eléctrico de potencia.

Como punto de partida para realizar los estudios propuestos por CADELA es analizar las sobretensiones, causadas por las descargas atmosféricas, que se generan en diferentes partes del sistema eléctrico de potencia, tomando en cuenta la configuración del sistema de potencia y los efectos inducidos que se generan en las fases adyacentes.

Los resultados de estos estudios permitirán coordinar de una manera adecuada el aislamiento de los equipos existentes dentro de una subestación, en este caso Valera II y líneas de transmisión asociadas a ésta, obteniéndose así un sistema más confiable y selectivo con el que se logre un mejoramiento en la calidad del servicio de energía eléctrica (CADAPE, 1984).

Las sobretensiones por descargas atmosféricas constituyen un fenómeno transitorio del tipo electromagnético, por tanto para realizar el análisis del mismo es necesario modelar cada uno de los elementos que componen el sistema, principalmente las líneas de transmisión, que son las mayormente expuestas a la incidencia de estas descargas

Normalmente para el análisis de transitorios electromagnéticos en las líneas de transmisión suele suponerse que estas son uniformes, es decir que sus parámetros no varían ni con la distancia, ni con la frecuencia. En los sistemas reales no sucede esto ya que la frecuencia y la longitud forman parte fundamental de la descripción real en el modelado de la línea de transmisión. En este trabajo se ha propuesto un modelo para analizar líneas de transmisión polifásicas incorporando el efecto de la dependencia frecuencial de sus parámetros eléctricos.

Para el modelado de línea, en primer lugar se aplica las ecuaciones de Carson para el cálculo de la impedancia geométrica de la línea, tomando en cuenta el efecto del terreno, luego se utiliza el circuito π equivalente para obtener una representación circuital de ésta, una vez representada la línea, se aplica el análisis modal, este análisis permite representar la función de propagación de la línea como una matriz en coordenadas de fase en términos de los modos de propagación naturales de la línea (Briceño, 1995).

Por último se aplicó la técnica de la Transformada Numérica de Laplace (TNL), esta Técnica presenta la gran ventaja de permitir determinar su nivel de error (Naredo, y col., 1998; Narváez, 2000; Uribe, 2005; Dávila, 2002).

También permite incorporar la dependencia frecuencial de los parámetros de línea de manera directa. El método aquí propuesto es aplicado a varios ejemplos prácticos. Uno de ellos es una línea trifásica proveniente de la subestación Buena Vista, la cual llega a la subestación Valera II, soportada por estructura simple terna con fases en disposición triangular, suponiendo que ocurre una descarga en uno de los puntos más altos de la línea, ubicada tres tramos antes de la llegada a la subestación Valera II, cuya descarga se modela como una fuente de corriente, con forma de onda estandarizada de $1,2/50\mu\text{seg}$.

2 Análisis de transitorios electromagnéticos en la línea de transmisión

Para el modelado de transitorios electromagnéticos de un sistema de potencia, se han elaborado numerosos algoritmos que permiten representar de manera bastante aproximada los diferentes elementos que conforman dicho sistema. Comercialmente se cuenta con una herramienta

bastante poderosa como es el Electromagnetic Transient Program /Alternative Transient Program (EMTP/ATP) el cual es uno de los programas más completos para el análisis de transitorios electromagnéticos.

En este trabajo, basados en la teoría de líneas de transmisión utilizadas por los programas comerciales, se diseña un programa para el modelado de líneas de transmisión polifásicas considerando la dependencia frecuencial de sus parámetros, y con el cual se pueden obtener los valores de voltaje a lo largo de toda la línea y de esa manera observar el comportamiento de una línea cuando es impactada por una descarga atmosférica (Dávila, 2002).

2.1 Análisis en el dominio de la frecuencia

Algunos fenómenos transitorios como las descargas atmosféricas, maniobras de conexión y desconexión o fallas, no pueden analizarse mediante circuitos equivalentes que consideren la línea de transmisión como parámetros concentrados. Ya que debido a la corta duración de dichos fenómenos ($1-100\mu\text{seg}$) y los campos eléctricos y magnéticos que los mismos implican, producen variaciones en los valores de la inductancia y la capacitancia, al recorrer una onda eléctrica de gran cresta a la línea de transmisión. Es por ello que es mejor considerar la línea de transmisión como un elemento con parámetros distribuidos (Dávila, 2002).

Una de las ecuaciones diferenciales que definen las condiciones eléctricas para cualquier punto de la línea de transmisión son las conocidas ecuaciones del telegrafista:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial v}{\partial x} &= \int r(\tau)i(t-\tau)d\tau + \frac{\partial \int L(\tau)i(t-\tau)d\tau}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= \int g(\tau)v(t-\tau)d\tau + \frac{\partial \int c(\tau)v(t-\tau)d\tau}{\partial t} \end{aligned} \quad (1 \text{ a,b})$$

El problema es el que al ser ecuaciones diferenciales parciales con respecto al tiempo, t , y a la distancia x , se complica la solución de estas cuando se trabaja en el dominio del tiempo. Debido a lo anterior, se hace uso de trabajar en el dominio de la frecuencia donde la manipulación de las complicadas ecuaciones diferenciales parciales pasa a resolverse de manera más fácil.

El análisis en el dominio de la frecuencia permite la resolución de redes eléctricas considerando los parámetros dependientes de la frecuencia de una manera más sencilla que en el dominio del tiempo. Una de las técnicas más utilizadas es la transformada numérica de Laplace, la cual gracias a la incorporación de algoritmos computacionales, basada en la transformada inversa rápida de Fourier, permite modelar un sistema de una manera rápida y confiable.

Considerando las relaciones existentes entre las transformadas de Fourier y Laplace, se pueden trasladar una función del dominio tiempo al dominio de la fre-

cuencia y viceversa de manera muy sencilla, partiendo de las siguientes ecuaciones (Uribe, 2005):

$$F(j\omega) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2 \text{ a, b})$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} F(s)e^{st} ds \quad (3 \text{ a, b})$$

donde $s = c + j\omega$; c se define como una constante de amortiguamiento y ω es la frecuencia angular.

Para el tratamiento numérico de la transformada de Fourier es necesario fijar los límites de integración finitos, por tanto el rango de t es truncado en un intervalo $[0 \ T]$. Con el fin de poder anexarlas a un programa computacional, las ecuaciones anteriores se discretizan. Obteniéndose las siguientes fórmulas respectivamente (Naredo y col., 1998; Uribe, 2005):

$$F(jn\Delta\omega) \cong \Delta t \sum_{m=0}^{M-1} f(m\Delta t) e^{-jmn\Delta\omega} \quad (4 \text{ a, b})$$

$$F(m\Delta t) \cong \frac{\Delta\omega}{2\pi} \sum_{n=-N}^{N-1} F(jn\Delta\omega) e^{jmn\Delta\omega}$$

donde el tiempo se discretiza mediante $m\Delta$, con $m=0, 1, 2, \dots, M$, la frecuencia angular ω se representa por $n\Delta\omega$, con $n=0, 1, 2, \dots, N$.

La transformada numérica de Laplace es un algoritmo basado en la transformada rápida de Fourier (FFT). Este algoritmo aplicado al análisis de transitorios tiene un error numérico aproximado de 0,1% dentro del 90% del rango de tiempo.

El tratamiento numérico de la transformada de Laplace y el proceso de discretización se generan algunos errores como son, el error por truncamiento que genera el fenómeno de Gibbs y el error por la discretización que produce el efecto de aliasing. El efecto de Gibbs se disminuye evitando truncamientos abruptos, y para ello se puede multiplicar la ecuación (4 b) por una ventana que permita un truncamiento suavizado, por ejemplo, las ventanas de Hamming, Hanning, Lanczos, etc. Para disminuir el error por la discretización conviene amortiguar artificialmente la función multiplicándola por una exponencial decreciente del tipo e^{-ct} esto convierte a las ecuaciones en la transformadas numéricas de Laplace.

$$F(c + jn\Delta\omega) = \Delta t \sum_{m=0}^{M-1} f(m\Delta t) e^{-cm\Delta t} e^{-j2\pi mn/M}$$

$$f(m\Delta t) = \frac{e^{cm\Delta t}}{\Delta t} \left[\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} F(jn\Delta\omega) \sigma_{\omega} e^{j2\pi mn/M} \right] \quad (5 \text{ a, b})$$

donde:
 σ_{ω} = ventana discretizada (de Lanczos, Hamming, Black-

man, entre otros):

$$t = m\Delta t \quad (m = 0, 1, 2, \dots, M)$$

$$\omega = n\Delta\omega \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N)$$

$$\omega = 2\pi.$$

$M = 2N$ (se deben dar un número par de muestras, ya que ayuda al buen desempeño de IFFT, se dan muestras de potencias de dos, 2^K)

$$M\Delta t = 2\pi / \Delta\omega \quad (6)$$

El rango de la frecuencia es seleccionado siguiendo el criterio de Nyquist (Proakis, y Manolakis, 1998), $-\Omega \leq \omega \leq \Omega$, donde el periodo en la frecuencia es $\Omega = \pi / \Delta t$, la constante de amortiguamiento se asume como $c = -\frac{\text{Ln}(\text{error})}{T}$, donde T es el periodo de observación en el tiempo definido como:

$$T = 2\pi / \Delta\omega = 1 / \nu f = 1 / f \quad (7)$$

3 Consideraciones en el diseño del algoritmo para transitorios electromagnéticos

Aplicando la técnica de la Transformada Numérica de Laplace al análisis de transitorios electromagnéticos en una línea de transmisión se puede determinar los voltajes y corrientes en la línea en el dominio del tiempo a partir de las funciones en el dominio de la frecuencia.

Como primer paso, se calculan los parámetros de la línea de transmisión dependiente de la frecuencia (Briceño, Hildemaro; 1995; Dávila, 2002):

$$l_{G_{ii}} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{2h_i - r_i}{r_i} \right] \quad (8 \text{ a})$$

$$l_{G_{ik}} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right] \quad (8 \text{ b})$$

$$l_{\text{tierra } ii} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{p}{h_i} \right] \quad (9 \text{ a})$$

$$l_{\text{tierra } ik} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{D_{ik}}{D_{ik}} \right] \quad (9 \text{ b})$$

$$Z_{COND} \cong \sqrt{R_{CD}^2 + Z_{CAF}^2}$$

impedancia total del conductor

$$R_{DC} = \frac{\rho}{\pi r_i^2}, \quad Z_{CAF} = \frac{\rho \gamma}{2\pi r_i} = \frac{\rho}{2\pi r_i p_c} \quad (10 \text{ b, c})$$

donde:

h_i es la altura de los conductores de cada fase.
 r_i es radio del conductor,

D_{ik} es la distancia entre los conductores de fase y sus imágenes

d_{ik} es la distancia entre los conductores de fase

L_G es la inductancia geométrica del conductor

L_T la inductancia de tierra,

R_{DC} es la resistencia del conductor de corriente continua,

Z_{CAF} es la impedancia del conductor para altas frecuencias,

$Z_G = j\omega L_G = \text{impedancia total geométrica}$

$Z_{TIERRA} = j\omega L_{TIERRA} = \text{impedancia total de tierra}$

Siendo la impedancia total del conductor la siguiente:

$$Z = Z_{COND} + Z_G + Z_{TIERRA}$$

$$P_{ii} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{2h_i - r_i}{r_i} \right] \quad (11a)$$

$$P_{ik} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right] \quad (11b)$$

$C = P^{-1}$; Capacitancia Total

$Y = j\omega C$; Admitancia Total

Una vez determinados los valores de Z y Y se obtienen los parámetros A y B del circuito π equivalente de la siguiente forma:

$$A = Y_c \coth(\gamma l) \quad (12)$$

$$B = Y_c \operatorname{cosech}(\gamma l) \quad (13)$$

donde $Y_c = \sqrt{\frac{Y}{Z}}$ es definida como la admitancia característica de la línea y $\gamma = \sqrt{ZY}$ como la constante de propagación de la línea.

Tal como se aquí se observa tanto la impedancia de la Línea como la admitancia son función directa de la frecuencia, lo cual produce una notable distorsión en los frentes de onda especialmente cuando se análisis de fenómenos transitorios.

Una vez obtenidos los parámetros del circuito π equivalente para un cierto número de tramos de la línea de transmisión, se construye la matriz Y_{bus} de la línea de transmisión completa, resultando una matriz tridiagonal como se muestra a continuación:

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} A_1 + G & -B_1 & 0 & 0 & 0 \\ -B_1 & A_1 + A_2 & -B_2 & 0 & 0 \\ 0 & -B_2 & A_1 + A_2 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & -B_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & -B_{N-1} & A_{N-1} + Y_L \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde:

A, B = Parámetros del circuito π equivalente, para cada vano de línea.

G = Conductancia interna de la fuente de alimentación.

Y_c = Admitancia de carga.

N = número de nodos presentes en el sistema.

La figura 1 representa la configuración de una red equivalente con N número de nodos.

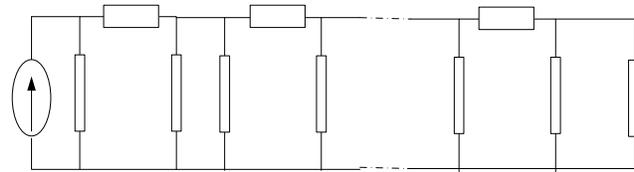


Fig. 1. Red equivalente de un sistema de potencia eléctrico

Conocido la matriz Y_{bus} y la fuente de corriente inyectada en el extremo emisor, y asumiendo que las corrientes inyectadas en cada nodo son cero se determina el voltaje en los diferentes puntos de la línea para diferentes condiciones de carga, aplicando la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = [Y_{BUS}]^{-1} \begin{bmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde: V = Tensión en cada nodo, I_0 = Fuente de alimentación por nodo (impulso de rayo) y Y_{bus} = Matriz tridiagonal.

Para simular el transitorio que se observa desde el extremo receptor y en varios puntos a lo largo de la línea cuando son estimulados con una fuente de corriente, con forma de onda de $1,2/50\mu\text{seg}$ que se define como el impulso de rayo estandarizado, en la cual es de gran utilidad para la coordinación de aislamiento tanto en la subestación como en la línea de transmisión.

Para el desarrollo del programa se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones: La distancia de fase a tierra de las líneas contienen una altura uniforme, la resistividad del terreno se considera un valor único correspondiente al valor del primer estrato, la frecuencia del rayo es igual a 10 Khz (para centenas de metros), la línea se considera no transpuesta, se realiza el análisis modal para observar el comportamiento trifásico, las estructuras metálicas que sostienen las líneas son simple terna, con fases en disposición triangular (puede extenderse a doble terna), la señal obtenida es solamente la sobretensión transitoria, es decir no contiene la señal del normal del sistema a 60 Hz, solo se evalúa la alta frecuencia producida por el rayo.

4 Coordinación de aislamiento

La optimización de la selección del nivel de aislamiento, se logra utilizando la metodología establecida en las normas del Comité Internacional de Electrotecnia (IEC) [IEC 60060-1 Ed. 2.0 b:1989, IEC EN 60071-1, 1993, IEC EN 60071-2, 1996], sin embargo la aplicación del método re-

quiere una serie de parámetros a considerar como son: conocimiento del sistema en cuanto a las sobretensiones que se pueden generar, ubicación de la instalación referente a la altitud, actividad atmosférica en la zona, índice de comportamiento permitido, es decir índice de fallas del equipo e índice de salida de la línea que estarán conectadas a la subestación.

Para el estudio de la coordinación de aislamiento de la Sub-Estación Valera II, considerando los niveles de tensión de 115 kV, es necesario conocer todos los parámetros de la línea a modelar los cuales se muestran a continuación:

a) Características de la línea

Para el estudio de programa se utilizó el tramo de la línea Buena vista – Valera II, la cual alimenta a la subestación Valera II, con tres conductores de fase R, S, T con las características descritas en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los conductores de la línea

	Conductor de la Fase	Cable de guarda.
Tipo:	6201 – T 81 – ACAR . (hilos de aluminio interpuestos con hilos de aleación)	Conductor de acero de alta resistencia mecánica (HS) clase A.
Calibre:	350 MCM	3 / 8"
Formación:	Capa 1 de 7 hilos de aleación. Capa 2 de 12 hilos de aluminio	1 Capa, 7 hilos de acero galvanizado
Sección:	177mm ²	37 mm ²
Diámetro:	17,25mm	9,14mm
Peso unitario:	0,489 Kg./m.	0,306 Kg./m.
Carga de rotura:	3815 Kg	3636 Kg
Modulo de elasticidad:	6350 Kg./mm ²	19000 Kg./mm ²
Coefficiente de dilatación lineal		11,5.10 ⁻⁶ °C
Resistencia eléctrica AC 75°C:	0,2017 .10 ⁻³ Ω/m	4,5121 .10 ⁻³ Ω/m

En base a estos datos se determinaron los parámetros de la línea en función de la frecuencia, en este caso para un rango de frecuencia de 1 hasta los 10.000 hertz, para un tiempo de observación de 10 e⁻⁵ segundos.

b) Estructuras que sostiene las líneas

La estructura que sostiene a la línea a modelar tiene las siguientes características:

- Denominación: simple terna
- Tipo de estructura: torre B1
- Disposición de los conductores: triangular
- Utilidad: amarre y suspensión
- Material: metal

La Fig. 2. muestra las características geométricas de la estructura.

El estudio de la línea se va a realizar para las cuatro úl-

timas torres de llegada a la subestación, lo cual contiene tres vanos, que se componen de la siguiente manera:

La subestación se ubica a 660 metros sobre el nivel del mar, las líneas se encuentran rodeadas por vegetación, especialmente constituida por pastos, bosques bajos y bosques altos, a lo largo de toda su ruta. Para un mejor entendimiento se muestran en la figura 2 y en la tabla 2 los tramos de llegada de la línea Buena vista Valera II.

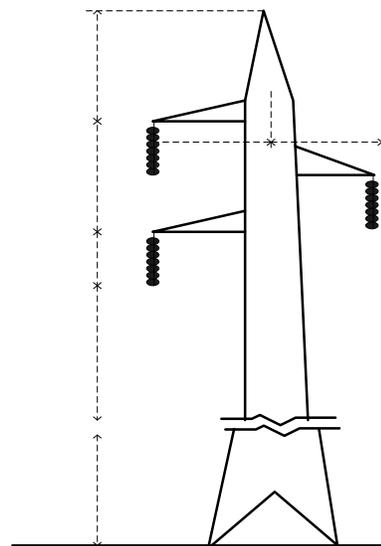


Fig. 2. Características de la torre simple terna

Tabla 2. Distancias de los tramos de la línea buena vista-Valera II

Tramos de la línea	Longitud(m)
Tramo 1	433
Tramo 2	247
Tramo 3	157

Las características del perfil de la línea son aproximadamente las siguientes: Plano 5 %, Ondulado 80 %, Accidentado 15 %.

Para una mejor ilustración en la figura 4 se muestra un plano de perfil de la montaña donde se ubica parte de los tramos de la línea de llegada de Buena vista - Valera II.

Para obtener el valor de la resistividad del terreno se aplicó el método Geoeléctrico de WENNER (Briceño, e Hildemaro, 2005). Con la información obtenida a partir de las medidas de resistencia se obtiene la resistividad aparente del terreno en función de la separación de los electrodos, la cual permite realizar un modelado del terreno por estratos horizontales y obtener una estimación de las resistividades de todas las capas del modelo del terreno y de sus respectivos espesores. En la tabla 3 se muestran los valores obtenidos de las medidas aplicando el método Wenner y los valores de resistividad aparente de campo y de modelo en función de la separación de los electrodos obtenidos utili-

zando el programa PT&SD facilitado por la empresa CA-DELA.

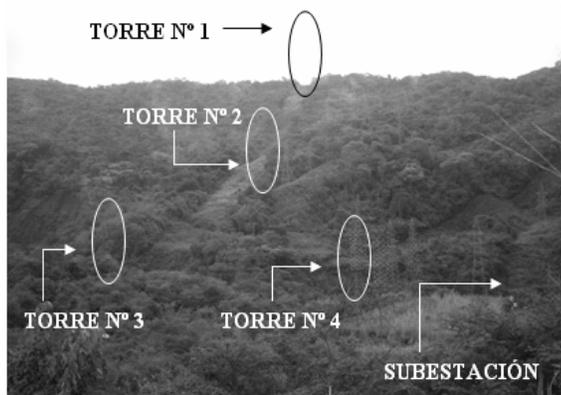


Fig. 3. Vista de frente del tramo de línea Buena vista - Valera II

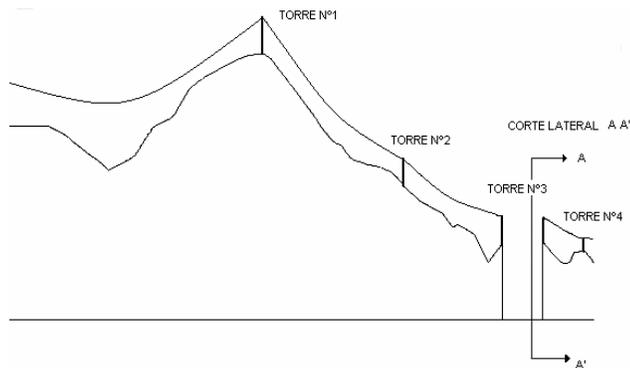


Fig. 4. Plano de perfil de la línea Buena vista-Valera II

La tabla 4 muestra los resultados de resistividad obtenidos con el PT&SD para los diferentes estratos.

Para efectos del ejemplo estudiado, usando el programa de transitorios electromagnéticos diseñado aquí, se consideró solamente el primer estrato con una resistividad de 332 Ω -m, tomando en cuenta que es el valor más elevado y representaría el caso más desfavorable.

Tabla 3. Valores de la resistencia medida por el Megger y Resistividades aparente de campo y del modelo

Valores de separación de los electrodos (a)	Resistencia Medida en el Campo (Ohms)	Resistividad de Campo (Ohms-m)	Resistividad Modelo (Ohms-m)
1	38,50	241,90	254,11
2	11,74	147,53	124,36
3	3,01	56,74	60,97
4	1,34	33,68	34,14
5	0,69	21,68	22,33
6	0,46	17,34	16,76
7	0,35	15,39	13,94
8	0,24	12,06	12,40
9	0,22	12,44	11,52
10	0,16	10,05	10,98

Tabla 4. Resultados del programa PT&SD para cálculo de resistividad

Estratos	Resistividad (Ω -m)	Grosor (m)
1	332,79	1,01
2	52,31	1,66
3	9,54	-

c) Niveles de sobretensión (debido a los impulsos del rayo), en la subestación y los tramos de línea cercanos a esta

Con todos los datos mencionados anteriormente se precede a utilizar el programa de transitorios electromagnéticos diseñado, para obtener los niveles de sobretensión trifásico que se generan a lo largo de la línea y a la entrada de la subestación, considerando que una descarga atmosférica incide directamente en una de las fases de la línea, y gran parte de la magnitud se desplaza a lo largo de la línea hacia la subestación.

A manera demostrativa se explica como se analiza la tensión a la entrada de la subestación Valera II de una línea simple terna proveniente de la subestación Buena Vista, dicha línea se ubica en una región montañosa a la cual se le aplica el impulso de un rayo a una de sus fases (fase a). El impulso es aplicado en uno de los puntos más altos del trayecto de la línea, ubicado 4 torres antes de la entrada a la subestación (Torre N° 1). Mediante el programa diseñado se puede observar el comportamiento del impulso aplicado a lo largo de la línea y la inducción que se genera en las otras dos fases (fase b y fase c), además observar el tiempo de retardo, magnitud de la forma de onda transitoria y velocidad de propagación. Los valores obtenidos son los necesarios para el estudio de coordinación de aislamiento.

Para el estudio se consideran las posibles variaciones que podrían presentarse como:

- 1) Magnitud de impulso de rayo: tomando en cuenta la forma de onda estandarizada para impulsos de rayo igual a 1,2/50 μ seg las magnitudes que se considerarán son las siguientes: 10 kA, 20 kA, 40 kA y 100 kA.
- 2) Resistividad del terreno: para este caso como se mencionó previamente se toma solamente la resistividad de 332 Ω -m.
- 3) Diferentes condiciones de carga: las condiciones de carga que se tomaran en cuenta son las condiciones de la línea en vacío y con una carga (ZL) = (2 + j10.23) Ω , que corresponde a la impedancia equivalente del sistema conectado a la línea de Transmisión. Para efectos del programa se debe introducir el parámetro en función de admitancia (YL) = 0.0184-j0.0942 Mho.

Se realizó el análisis para las diferentes condiciones mencionadas anteriormente, aquí solo se muestran los resultados obtenidos para impulsos con una magnitud de 20 kA, para las diferentes condiciones de carga.

La Fig. 5 muestra el impulso del rayo aplicado en la línea, las Figs. 6, 7, 8 y 9 muestran las tensiones obtenidas con el programa en los diferentes puntos de la línea en la

torre de entrada y en los tramos 1, 2 y 3 respectivamente. Los resultados son obtenidos para la condición de vacío que se presenta cuando se encuentra abierto un disyuntor y el rayo cae en cualquier punto de la línea, para este caso particular en la torre 1.

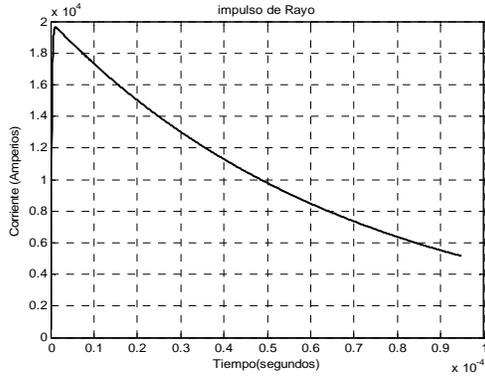


Fig. 5. Forma de onda del Impulso de rayo de 20KA

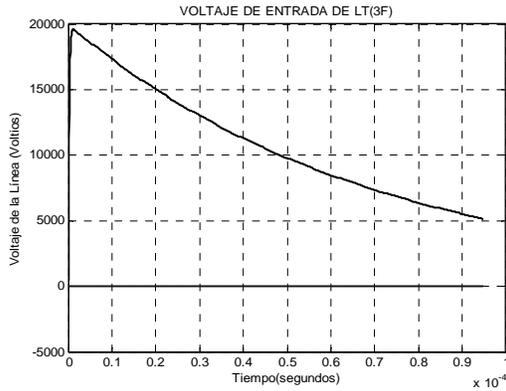


Fig. 6. Tensión de entrada de la torre donde incide el rayo.

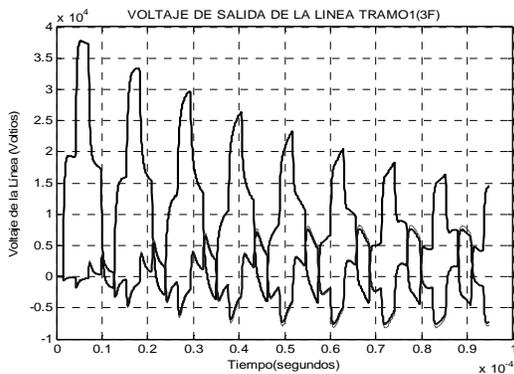


Fig. 7. Sobretensión de la torre siguiente a la torre donde impactó el rayo (Tramo 1)

Con las gráficas antes mostradas se puede construir una tabla donde se registren los valores de sobretensión que se generaron con sus respectivos tiempos, el retardo de respuesta de los niveles de tensión una vez impactado el rayo, la tensión inducida en las fases b y c asumiendo que el impacto fue en la fase a, con sus respectivos tiempos, teniendo

en cuenta que se debe agregar el valor de la tensión pico del sistema por fase ya que el programa refleja solamente la sobretensión que se produce debido al impacto del rayo.

En la tabla 5 se muestran las sobretensiones que se producen a lo largo de la línea con sus respectivos tiempos de retardo para un impulso de corriente de 20 kA de amplitud.

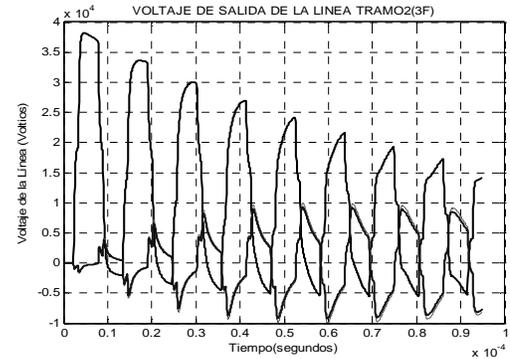


Fig. 8. Sobretensión de la segunda torre siguiente a la torre donde impactó el rayo (Tramo 2)

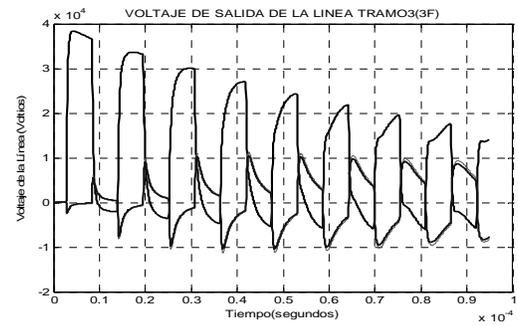


Fig. 9. Sobretensión de la tercera torre siguiente a la torre donde impactó el rayo (Tramo 3). Torre ubicada en pórtico de entrada a la subestación

Si siguiendo el mismo procedimiento realizado para una fuente de 20 kA, se hace la evaluación para las amplitudes de 40 kA y 100 kA. Aquí solo se muestran los resultados obtenidos para unos impulsos de corriente de 100 kA de amplitud, este caso representa la condición más severa que pudiera presentarse en un sistema, la tabla 5 muestra estos resultados. En la tabla 6 se muestran los niveles de aislamiento de los equipos presentes en la subestación los cuales son necesarios para determinar la adecuada coordinación del aislamiento.

Tabla 5. Sobretensiones transitorias para impulso 20KA (vacío)

Fase	Sobretensiones (kV)			Tiempo (useg)			Tensión pico del sistema (KV)	Sobretensiones totales (KV)		
	a	b	c	a	b	c		A	b	c
Torre Nº 1	19,57	0,023	0,022	1.2	45	45	94	113,57	94,02	94,02
Torre Nº 2	37,76	8,3	7,7	5,6	77	77	94	131,76	102,3	101,7
Torre Nº 3	38,22	10	9,34	4,7	54	54	94	132,22	104	103,34
Torre Nº 4	38,35	11,3	10,5	4,4	42,5	42,6	94	132,35	105,3	104,5

Tabla 6. Sobretensiones transitorias para impulso 100KA (vacío)

Fase	Sobretensiones (kV)			Tiempo (useg)			Tensión pico del sistema (KV)	Sobretensiones totales (KV)		
	a	b	c	a	b	c		a	b	c
Torre Nº 1	98	0,116	0,112	1.2	46	46	94	192	94,116	94,112
Torre Nº 2	189	41,5	38,5	5,6	77	77	94	283	135,5	132,5
Torre Nº 3	191	50	47	4,6	55	55	94	285	144	141
Torre Nº 4	192	57	53	4,4	42,6	42,6	94	286	151	147

5 Análisis de resultados

En las tablas 5 y 6 se observa que para las magnitudes de corrientes señaladas en cada caso el nivel de corriente de magnitud menor a 40KA no produce ningún daño ni a la cadena de aisladores de línea, ni a los equipos que se encuentran ubicados dentro de la subestación para las dos condiciones de carga. Obteniéndose un margen de coordinación de treinta y dos por ciento, valor que está por encima del recomendado en la norma IEC EN 60071-1 [IEC EN 60071-1, 1993], el cual considera un margen de seguridad de veinticinco por ciento (25%) por encima de la máxima sobretensión por impulso de rayo. Este margen de seguridad considera el deterioro del aislamiento producido por descargas anteriores, envejecimiento del material, entre otros. Mientras que las sobretensiones producidas por el impulso de rayo de magnitud 100 KA se puede deducir que produce serios daños tanto a los equipos de la subestación como a la cadena de aisladores de amarre y de suspensión que se ubican en las torres.

Los daños son producidos en la fase impactada ya que en la fase inducida la máxima sobretensión que se genera, tiene un margen de seguridad cuarenta por ciento (40%) por debajo del mínimo aislamiento que posee el equipo. En el caso de la fase impactada se observa que no cumple con el margen requerido de seguridad para coordinación de aislamiento, según IEC EN 60071-2 (IEC EN 60071-2, 1996), puesto que en las tres primeras torres del circuito, tanto para las condiciones con carga como en vacío, se sobrepasa el aislamiento mínimo de las cadenas de aisladores y del transformador de corriente, lo que pudiera causar una ruptura del material dieléctrico del equipo, por la formación de un arco eléctrico que además traería como consecuencia una explosión, flameo y daños humanos entre otros.

Tabla 7. Niveles de aislamiento (IEC EN 60071-1, 1993)

EQUIPOS	NBA (kV)
Cadenas de aisladores de suspensión	225
Cadenas de aisladores de amarre	275
Transformador de corriente	230
Transformador de tensión capacitivo	550
Transformador de tensión inductivo	550
Seccionador	550
Disyuntor	550
Pararrayos	250

6 Conclusiones

Un sistema de potencia esta conformado por numerosos equipos los cuales requieren tener unos niveles de aislamiento adecuados para que exista una buena coordinación.

En este trabajo se desarrolló un algoritmo para el modelado de una línea de transmisión polifásica, considerando la dependencia frecuencial de sus parámetros eléctricos e incorporando el método de Análisis Modal y la técnica de análisis a través de la transformada Numérica de Laplace, tomando como punto de partida algunas metodologías aplicadas en trabajos para el análisis de transitorios electromagnéticos ya existentes (Naredo y col., 1998; Narváez, 2000; Dávila, 2002). Uno de los aspectos importantes del modelo desarrollado es que al trabajar con un sistema polifásico se puede observar el comportamiento de todas fases del sistema aún cuando la descarga solo haya impactado en una de las fases.

Otro de los aspectos importantes al realizar el modelado es el comportamiento que tiene la línea modelada ante diferentes condiciones de carga, comprobando aquí que una de las condiciones más críticas para el sistema es cuando el sistema está en vacío por el efecto de duplicación de la señal en el extremo receptor.

Al evaluar los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo desarrollado en un sistema, se observa que las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas que mayores daños puede producir al sistema en estudio son aquellas cuyos impulsos de corriente sean superiores a los 100 kA, y a pesar de que estas condiciones tienen muy poca probabilidad de ocurrencia, se deben tomar las previsiones correspondientes, en este caso seleccionar equipos con mayores niveles de aislamiento especialmente en aquellos ubicados en las torres 2, 3 y 4 del caso en estudio.

Referencias

- Briceño J, 1995, "Teoría de Líneas Aéreas Transmisoras de Potencia Eléctrica", Mérida, Venezuela, Universidad de Los Andes.
- Briceño J, Hildemaro. 2005, "Instrumento de Aprendizaje de Sistemas de Conexión a Tierra". Disponible en <http://www.cecalc.ula.ve/sct/>.
- CADAFE, 1984, "Proyecto de Líneas de transmisión de 115KV Buena vista -Valera II", Caracas.
- Dávila M, 2002, "Análisis de Transitorios Electromagnéticos en Líneas de Transmisión Considerando Dependencia Frecuencial y no Uniformidades", Tesis de maestría, Guadalupe.
- Naredo JL, Moreno L, Guardado J y Gutiérrez, 1998, "La Transformada Numérica de Laplace como una Herramienta de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica", Proceedings of International Congress in Electrical and Electronics Engineering, Aguascalientes, México.
- Narváez C, 2000, "Programa de transitorios electromagné-

ticos con Transformada Numérica de Laplace”. Tesis de maestría. Guadalajara.

IEC 60060-1 Ed. 2.0 b. (1989), “High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements”.

IEC EN 60071-1. 1993, “Insulation Co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules”.

IEC EN 60071-2. 1996. “Insulation Co-ordination - Part 2: Application guide”.

Proakis J, Manolakis D, 1998, “Tratamiento digital de señales”, Prentice Hall.

Uribe F, 2005, “Coordinación de Aislamiento Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia” Maracaibo.

