

## Análisis de Sobretensiones Transitorias Debidas a la Energización de Líneas de Transmisión Multiconductoras

C. Tejada Martínez<sup>1</sup>, P. Gómez Zamorano<sup>1</sup>, G. Basilio Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME, IPN, México D.F.

<sup>2</sup>ESIME-ZAC., IPN, México D.F.

Teléfono (55) 57296000 ext. 54852 E-mail: ctejadam303@ipn.mx

**Resumen** — En este artículo se presenta un análisis de transitorios electromagnéticos en el dominio del tiempo. Se considera la importancia del estudio de las sobretensiones por maniobra en líneas de transmisión. Además, se examina el método de integración utilizado en el programa EMTP/ATP, y se muestran algunos ejemplos de aplicación a casos prácticos en circuitos de 230 kV y 400 kV.

**Palabras Clave** – ATP, Transitorios Electromagnéticos, Sobretensiones por maniobra.

**Abstract**— In this paper, a time domain transient analysis is presented. The importance of studying the switching overvoltages in transmission lines is considered. Besides, the integration method used by program EMTP/ATP is examined, and several application examples to practical cases in 230 kV and 400 kV circuits are shown.

**Keywords** — ATP, Electromagnetic Transients, Switching overvoltages.

### I. INTRODUCCIÓN

Un transitorio electromagnético es la manifestación de un cambio súbito en las condiciones de un circuito. Los periodos transitorios son sumamente importantes ya que los componentes del sistema se someten a excesivas intensidades de corrientes o voltajes. En casos extremos se presentan daños muy severos; dependiendo de los elementos involucrados, se puede desactivar una máquina, causar anomalías en una planta, incluso dejar a ciudades completas sin suministro de energía eléctrica [1].

Las sobretensiones por maniobra son originadas comúnmente por la energización o recierre de líneas, así como por la ocurrencia y liberación de fallas [5]. Debido a las características de estas sobretensiones, es necesario su conocimiento profundo para el diseño y coordinación de los dispositivos de protección del sistema de potencia.

Para sistemas mayores a 230 kV, los transitorios por maniobra son en general más importantes aún que aquellos debidos a descargas atmosféricas, dado que están en función directa del voltaje nominal, como se describirá en la siguiente sección.

En este trabajo se analizan sobretensiones debidas al cierre secuencial de interruptores en líneas de alta tensión

(230 kV y 400 kV), así como sobretensiones inducidas en circuitos cercanos por efecto de maniobras. Para ello se presentan simulaciones empleando el programa ATP-EMTP, del cual se describe también la forma en que opera.

### II. TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Las líneas de transmisión constituyen una de las partes más importantes de un sistema eléctrico de potencia, ya que en sus distintos niveles de tensión transmiten y distribuyen la energía eléctrica, pero también interconectan las distintas partes del sistema [3].

Una de las sobretensiones más simples ocurre cuando se energiza una línea en vacío, como se ilustra en la Fig. 1. Considerando que el interruptor se cierra en el instante en que el voltaje de fuente senoidal tiene un valor máximo de  $\sqrt{2}V$  y suponiendo una impedancia de fuente cero, se presenta una onda de voltaje que viaja hacia adelante de magnitud  $\sqrt{2}V$ . Cuando esta onda llega al extremo receptor del circuito abierto, donde el coeficiente de reflexión es  $\Gamma_R=+1$ , la onda reflejada de voltaje superpuesta en la onda hacia adelante produce un voltaje máximo de  $2\sqrt{2}V=2.83V$ . Ocurren voltajes incluso más altos cuando una línea se vuelve a cerrar después de una interrupción momentánea [7].

Cuando una línea con constantes distribuidas (resistencia  $R$ , inductancia  $L$ , conductancia  $G$  y capacitancia  $C$ ) se somete a una perturbación como un rayo o una operación de maniobra, surgen ondas de voltaje y corriente que viajan a lo largo de la línea a una velocidad cercana a la de la luz. Cuando estas ondas llegan a las terminales de la línea, surgen ondas reflejadas de voltaje y corriente que viajan de regreso por la línea, superpuestas a las ondas iniciales.

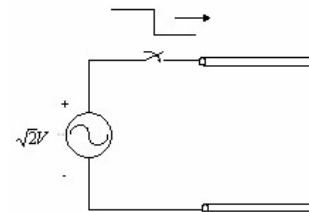


Fig. 1. Energización de una línea a circuito abierto.

Debido a las pérdidas en la línea, las ondas que viajan son atenuadas y desaparecen después de algunas reflexiones. Sin embargo, debido a la acción de refuerzo de varias ondas reflejadas, es posible que el voltaje crezca a tal nivel que se forma un arco en el aislamiento de la línea que pueda dañarlo [7].

Los apartarrayos se utilizan para proteger el aislamiento del equipo contra sobretensiones transitorias. Estos dispositivos limitan el voltaje y absorben la energía de rayos y variaciones de maniobra [7].

#### A. Análisis transitorio: Ondas viajeras.

Se mide la distancia  $x$  a lo largo de la línea desde el extremo generador hasta el elemento diferencial de longitud  $\Delta x$  mostrado en la Fig. 2. El voltaje  $v$  y la corriente  $i$  son funciones de  $x$  y  $t$ , así que se requiere aplicar derivadas parciales [2].

Calculando el voltaje  $v$ , la corriente  $i$  y considerando que  $\Delta x \rightarrow 0$ , se obtienen las ecuaciones del telegrafista las cuales se pueden expresar en forma matricial de la siguiente manera:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & L \\ C & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & R \\ G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ i \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $v$  e  $i$  son los voltajes y corrientes a lo largo de la línea y  $L$ ,  $C$ ,  $R$  y  $G$  son los parámetros eléctricos de ésta [4]. Considerando el caso de una línea sin pérdidas, es decir, se desprecian tanto la resistencia como la conductancia ( $R = 0$ ,  $G = 0$ ), a partir de (1) se obtienen las ecuaciones de onda para voltajes (2) y para corrientes (3).

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3)$$

D'Alembert mostró que las ecuaciones de onda se satisfacen por la solución general [6]:

$$i(x, t) = f_1(x - ct) + f_2(x + ct) \quad (4)$$

$$v(x, t) = Z_c [f_1(x - ct) + f_2(x + ct)] \quad (5)$$

donde:

$c$ : propagación de la velocidad,  $c = 1/\sqrt{LC}$

$Z_c$ : impedancia característica,  $Z_c = \sqrt{L/C}$

Cuando  $t=t_1$ , y  $x=x_1$ ,  $f_1(x - ct)$  tendrá un valor llamado  $F_1$ . En cualquier momento subsiguiente  $t_2 > t_1$ , tendrá el mismo valor  $F_1$ , si el argumento  $(x - ct)$  permanece inalterado, es decir:

$$x_1 - ct_1 = x_2 - ct_2 \Rightarrow x_2 = x_1 + c(t_2 - t_1) \quad (6)$$

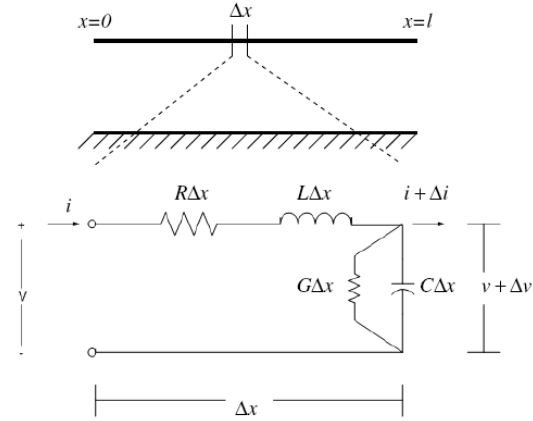


Fig. 2. Diagrama esquemático de una sección elemental de una línea de transmisión.

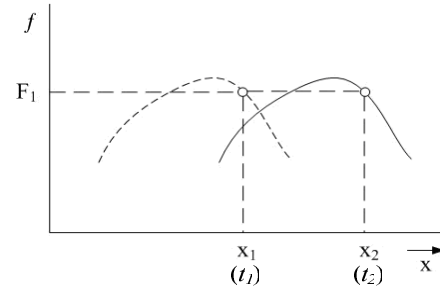


Fig. 3. Onda viajera  $f_1(x - ct)$  hacia adelante.

La ecuación (6) quiere decir que  $F_1$  se ha movido una distancia en la dirección positiva de  $x$  con una velocidad  $c$ , como se ilustra en la Fig. 3. Similarmente, la función  $f_2(x + ct)$  representa una onda viajera moviéndose en dirección opuesta a  $x$  con una velocidad  $c$  [6].

#### B. Análisis Transitorio: Reflexiones.

En base a las ecuaciones (4) y (5) pueden definirse  $v$  e  $i$  a partir de ondas hacia delante y hacia atrás:

$$v_R = v_R^+ + v_R^- \quad (7)$$

$$i_R = i_R^+ + i_R^- \quad (8)$$

donde  $v_R^-$  e  $i_R^-$  son las ondas reflejadas medidas en el extremo receptor. Analizando el nodo R de la Fig. 4 se tiene:

$$\frac{v_R^+ + v_R^-}{i_R^+ + i_R^-} = Z_L \quad (9)$$

Considerando,  $i_R^+ = v_R^+ / Z_c$ ,  $i_R^- = -v_R^- / Z_c$  y resolviendo para  $v_R^-$  se obtiene:

$$V_R^- = \left( \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c} \right) V_R^+ \quad (10)$$

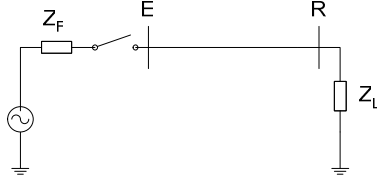


Fig. 4. Representación de una línea de transmisión para el análisis de reflexiones.

De esta manera se define un coeficiente de reflexión para voltajes:

$$\Gamma_v = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (11)$$

Realizando el mismo análisis para las corrientes se encuentra el coeficiente de reflexión para corrientes:

$$\Gamma_i = \frac{Z_C - Z_L}{Z_C + Z_L} \quad (12)$$

Los coeficientes de reflexión son utilizados para el análisis gráfico de transitorios utilizando el diagrama de Lattice.

### III. ANÁLISIS NUMÉRICO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

En general los problemas de transitorios electromagnéticos no pueden resolverse analíticamente, excepto en circuitos muy simples que contienen un número pequeño de elementos. Las herramientas computacionales son esenciales al estudiar las perturbaciones de transitorios.

#### A. Integración numérica usando regla trapezoidal.

El comportamiento de una red eléctrica en estado transitorio puede ser expresado a través de un número de ecuaciones diferenciales, describiendo las relaciones entre los voltajes y corrientes. Estas ecuaciones deben resolverse mediante iteraciones usando los métodos de integración numérica, el método de integración utilizado en el programa comercial ATP-EMTP es la regla trapezoidal [6].

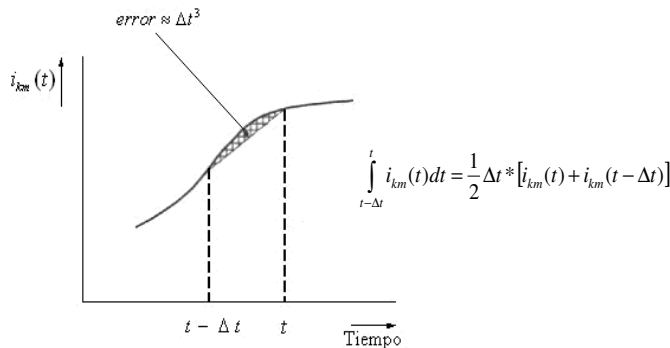


Fig. 5. Integración para un paso de tiempo usando la regla trapezoidal.

#### B. Resistencia

Una resistencia simplemente se representa mediante la ley de ohm usando las definiciones de voltaje de nodo y corriente de rama. Para una resistencia conectada entre los nodos  $k$  y  $m$  se tiene:

$$i_{km} = \frac{1}{R} [v_k(t) - v_m(t)] \quad (13)$$

#### C. Capacitancia

Una capacitancia conectada entre los nodos  $k$  y  $m$  se define como

$$i_{km}(t) = C \frac{d[v_k(t) - v_m(t)]}{dt} \quad (14)$$

Se asume que  $i_{km}(t-\Delta t)$ ,  $v_k(t-\Delta t)$  y  $v_m(t-\Delta t)$  son conocidos del paso de tiempo precedente. La ecuación (14) se integrará para un paso de tiempo  $\Delta t$ :

$$v_k(t) - v_m(t) = v_k(t-\Delta t) - v_m(t-\Delta t) + \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_{km}(t) dt \quad (15)$$

La integración de  $i_{km}(t)$  se realiza utilizando la regla trapezoidal, como se mostró en la Fig. 5. La ecuación (16) puede ser obtenida cuando los valores conocidos del paso de tiempo precedente se almacenan en  $I_{km(C)}(t-\Delta t)$ :

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} [v_k(t) - v_m(t)] + I_{km(C)}(t-\Delta t) \quad (16)$$

donde

$$I_{km(C)}(t-\Delta t) = -i_{km}(t-\Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} [v_k(t-\Delta t) - v_m(t-\Delta t)] \quad (17)$$

El circuito equivalente dado por la ecuación (16) se muestra en la Fig. 6.

#### D. Inductancia

La inductancia,  $L$ , de una rama  $k, m$  es tratada de manera similar. En este caso

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t) - v_m(t)] + I_{km(L)}(t-\Delta t) \quad (18)$$

donde

$$I_{km(L)}(t-\Delta t) = i_{km}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t-\Delta t) - v_m(t-\Delta t)] \quad (19)$$

$I_{km(L)}(t-\Delta t)$  es conocido del valor anterior. El circuito equivalente para una inductancia,  $L$ , se muestra en Fig. 7.

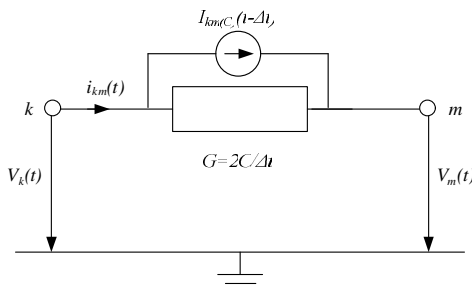


Fig. 6. Circuito equivalente de una capacitancia.

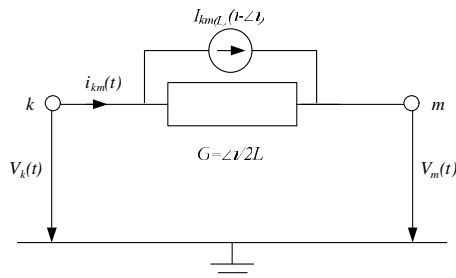


Fig. 7. Circuito Equivalente de una inductancia.

#### V. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.

A continuación se presentan algunos ejemplos de aplicación en líneas de transmisión de 230 kV y 400 kV. Se analizan las sobretensiones que se presentan en un circuito debido al cierre de sus interruptores, y también las tensiones inducidas en circuitos cercanos.

##### A. Inducción en circuitos de 230 kV

Se considera un caso en el cual se analizan dos líneas de transmisión de 230 kV con una longitud de 100 km cada una (Fig. 8); para esto se utilizan las dimensiones de la torre que se muestra en la Fig. 9. En la misma torre se soportan ambos circuitos trifásicos. El conductor utilizado para este caso es el 900 KCM, ACSR (Canary). Los datos correspondientes a este conductor se pueden observar en [7].

En un inicio ambos circuitos están desenergizados. Posteriormente se cierra el interruptor 1 correspondiente al circuito 1, mientras que el interruptor 2 permanece abierto. Se considerara un cierre secuencial en el interruptor 1, es decir, los interruptores de cada fase no cerraran simultáneamente, sino en 0, 0.005555 y 0.01111 segundos para las fases A, B y C respectivamente. Los tiempos anteriores corresponden a los tiempos de cresta de la fuente de excitación y fueron calculados para obtener las sobretensiones más críticas que se pudiesen presentar en ambos circuitos.

Se analizan mediante simulación en el ATP las sobretensiones presentadas en el circuito 1 y las formas de onda de las tensiones inducidas en el circuito 2 el cual está desenergizado.

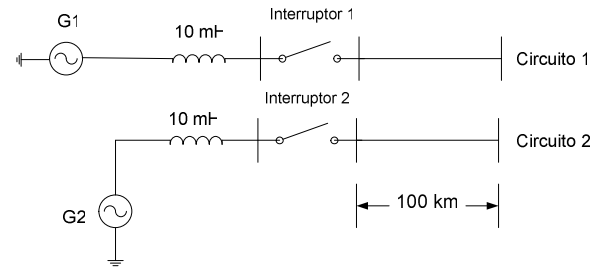


Fig. 8. Circuito doble trifásico de 230 kV.

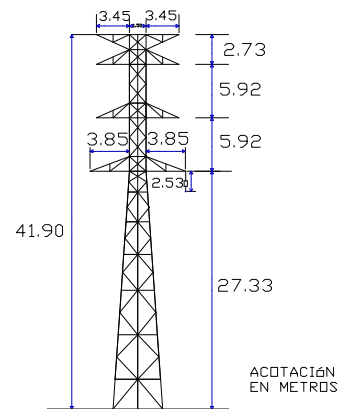


Fig. 9. Arreglo de conductores en un circuito doble trifásico de 230 kV.

En la Fig. 10 se observa que la sobretensión en cada una de las fases fue mayor a 2 pu, haciendo la consideración de que  $V_{pico} = V_n \sqrt{2} = (230 \text{ kV}) \sqrt{2} = 325.26 \text{ kV} = 1.0 \text{ pu}$ , se tiene que las sobretensiones presentadas en el circuito 1 fueron mayores a 650 kV.

En la Fig. 11 se observan las sobretensiones inducidas en el circuito 2, las cuales fueron de 0.55 pu, 0.53 pu y 0.41 pu para las fases A, B y C del circuito 2. La mayor sobretensión inducida fue de 178.9 kV en la fase A.

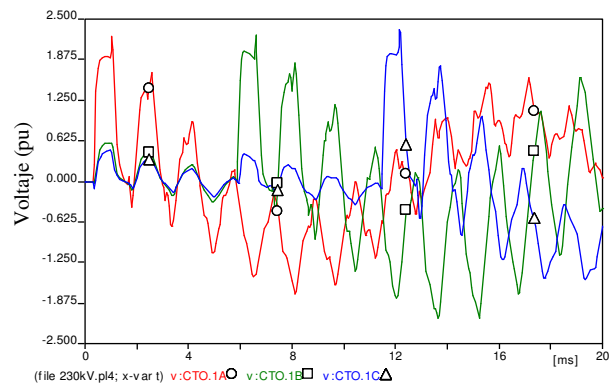


Fig. 10. Sobretensiones presentadas en el circuito 1 con cierre secuencial.

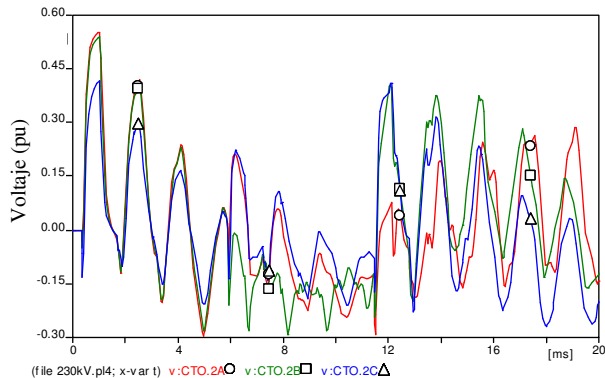


Fig. 11. Sobretensiones inducidas en el circuito 2 con cierre secuencial.

### B. Inducción en circuitos de 400 kV

En este segundo ejemplo se analizan dos circuitos trifásicos de 400 kV (Fig. 12). Cada circuito está soportado en una torre como la de la Fig. 13. La distancia entre centros de torres es de 58.94 m y la longitud de ambas líneas es de 230 km. El conductor utilizado para este caso es el 1113 KCM, ACSR (Blue Jay). Los datos correspondientes a este conductor se pueden observar en [2].

En este caso ambos circuitos están energizados, pero al ocurrir una falla en el circuito 1, el interruptor 1 se abre para liberar dicha falla. Una vez que el disturbio ha desaparecido, el interruptor 1 se cierra. Se realiza la simulación en el ATP para analizar las sobretensiones presentadas en el circuito 1 debido al recierre del interruptor 1, así como las sobretensiones inducidas en el circuito 2 el cual ya se encontraba energizado.

En la Fig. 14 se observan las sobretensiones que se presentan al cerrar el interruptor del circuito 1, en la fase A se presentó una sobretensión de 2.33 pu a los 17.97 ms, en las fases B y C, 2.19 pu a los 7.89 y 12.85 ms respectivamente. Al convertir los valores en pu a valores en kV, se tiene que en la fase A se presentó una sobretensión de 1318.04 kV y en las fases B y C una sobretensión de 1238.85 kV.

En la Fig. 15 se observan las sobretensiones inducidas en el circuito 2, el cual ya se encontraba energizado. Las tensiones inducidas fueron en la fase A, 1.38 pu en 7.89 ms; en la fase B, 1.43 pu en 6.34 ms; en la fase C, 1.51 pu en 19 ms.

Convirtiendo los valores en pu a kV, se tiene que en las fases del circuito 2, se presentó una sobretensión de 780.64 kV, 809.83 kV y 855.25 kV, para las fases A, B y C respectivamente.

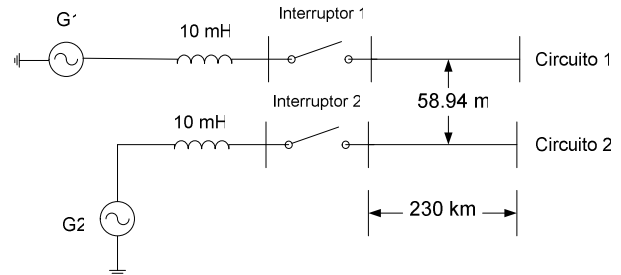


Fig. 12. Dos circuitos trifásicos de 400 kV.

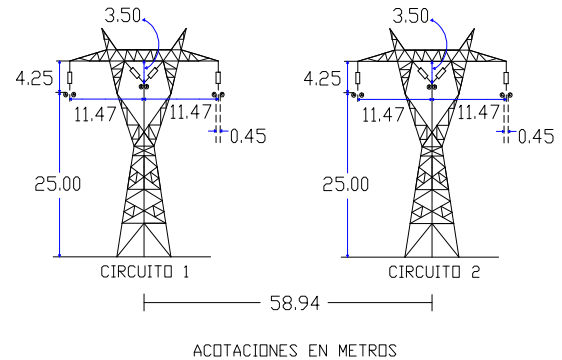


Fig. 13. Arreglo de conductores de dos circuitos trifásicos de 400 kV.

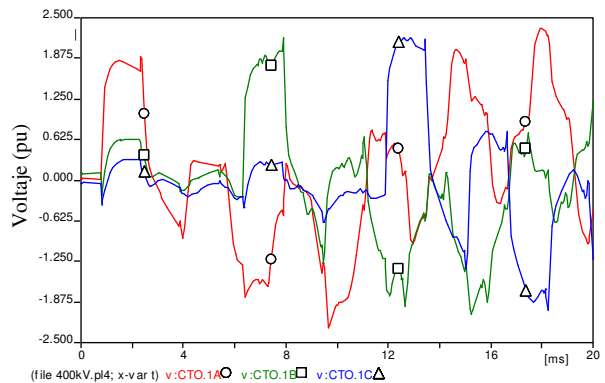


Fig. 14. Sobretensiones presentadas en el circuito 1.

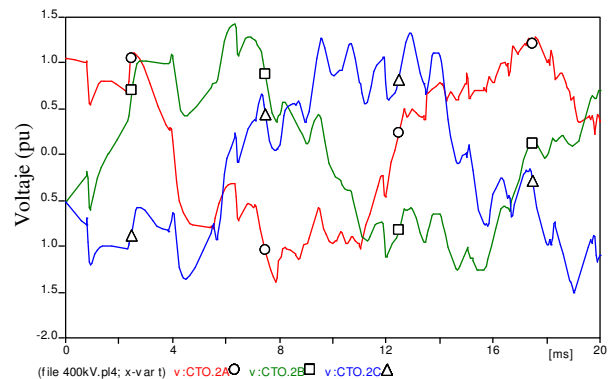


Fig. 15. Sobretensiones inducidas en el circuito 2.

### C. Variación de la distancia entre circuitos de 400 kV para análisis de voltajes inducidos

En este último ejemplo se analizan los voltajes inducidos en circuitos cercanos de 400 kV, variando la distancia entre ellos.

A partir del ejemplo B, se realizaron 21 simulaciones en ATP variando la distancia entre centros de torres de 50 a 500 m y registrando los sobrevoltajes máximos inducidos en cada fase del circuito 2 al realizar la energización del circuito 1.

En la Fig. 16 se presenta la curva obtenida (distancia entre centros de torres vs voltaje inducido). Como se puede apreciar, el voltaje disminuye conforme aumenta la distancia entre circuitos. Sin embargo, para valores de distancia de 200 m, el sobrevoltaje inducido es aún importante (0.25 p.u.). Aproximadamente a los 400 m entre centros de torres el voltaje inducido ha disminuido a 0.1 pu.

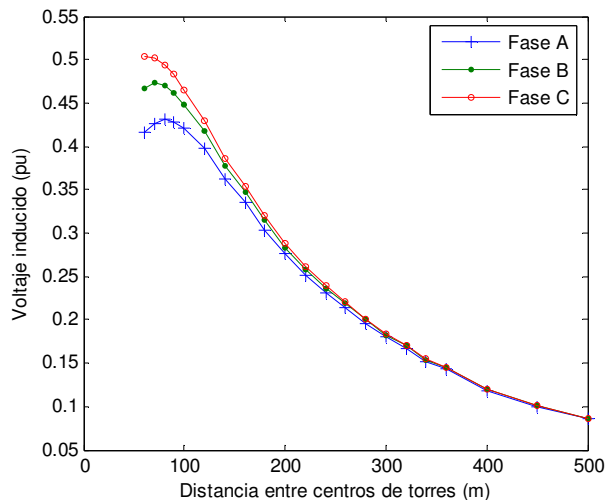


Fig. 16. Curva voltaje – distancia.

### V. CONCLUSIONES

Analizando los resultados de las simulaciones realizadas en el ATP, se nota la importancia de considerar además de la tensión nominal, las sobretensiones transitorias para la correcta selección de los niveles de aislamiento del equipo y de los dispositivos de protección contra aumentos repentinos de voltaje como por ejemplo los apartarrayos. Es significativo considerar que los interruptores cierran de manera secuencial.

Con respecto a la simulación realizada con circuitos de 400 kV, se observó que es necesario considerar en los proyectos de planeación no solo las sobretensiones que se presentan en el propio circuito, sino también las tensiones inducidas en circuitos cercanos.

Además de analizar el Sistema Eléctrico de Potencia en estado estacionario, es importante considerar los fenómenos

transitorios, ya que repercuten significativamente en la operación de éste. Las simulaciones analógicas y digitales son una gran herramienta para predecir los diferentes escenarios que pudieran presentarse en el sistema, y con esto realizar una correcta planeación y diseño de equipos.

### REFERENCIAS

- [1] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2a. ed., Wiley Interscience, New York, 1991. pp. 1 – 10, 37 – 51.
- [2] John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr. *Análisis de Sistemas de Potencia*. 1996, Editorial McGRAW – HILL. Páginas 207 – 217, 707.
- [3] G. Enríquez, *Fundamentos de Sistemas de Energía Eléctrica*. Editorial Limusa, Méx. 1985. Páginas 221 – 243.
- [4] M. Dávila, *Análisis de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión considerando dependencia frecuencial y no uniformidades*. Tesis de Maestría, CINVESTAV-IPN, Unidad Guadalajara, Agosto 2002, páginas 5 – 9.
- [5] P. Gómez, P. Moreno, J. L. Naredo, “Modelado de Condiciones No-Lineales en Redes de Transmisión Utilizando la Transformada Numérica de Laplace”, *Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales RVP-AI/2002*, Acapulco, Gro, México, Julio del 2002.
- [6] M. Kizilcay. *Power System Transient and Their Computation*, University of Applied Sciences of Osnabrück, Germany, Chapter 2, pp. 1 – 10, Chapter 3, pp. 2 – 11.
- [7] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma. *Análisis y Diseño de Sistemas de Potencia*, Tercera edición, Editorial Thomson Learning. México 2004. Páginas 547 – 550, 570 – 575, 589 – 595, 646 – 647.

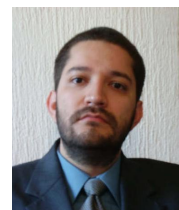
### BIOGRAFÍAS

#### Ing. Carlos Tejada Martínez

Ingeniero Eléctricista con especialidad en Potencia, por la ESIME – ZAC. del Instituto Politécnico Nacional, 2005. Actualmente es alumno de posgrado en el programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la SEPI – ESIME - IPN Áreas de interés: Transitorios Electromagnéticos en Sistemas de Potencia.



**Dr. Pablo Gómez Zamorano.** Ingeniero Mecánico Electricista por la Universidad Autónoma de Coahuila. Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Cinvestav Unidad Guadalajara, 2002 y 2005, respectivamente. Actualmente es Profesor Investigador en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco, IPN. Áreas de interés principal: modelado y simulación para análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia.



#### Ing. Guillermo Basilio Rodríguez.

Ingeniero Electricista con especialidad en Diseño y Manufactura por la ESIME-IPN. Actualmente es Profesor Titular en la ESIME-ZAC-IPN. Sus áreas de interés en la investigación son el cálculo de los campos electromagnéticos, el diseño de transformadores y las matemáticas aplicadas a la Ingeniería Eléctrica.