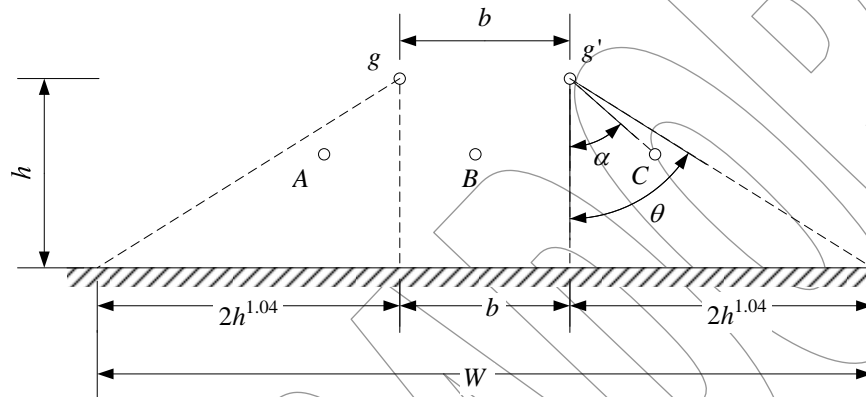


# Sobretensiones Atmosféricas

## Ejercicio #1

Supóngase que en una determinada localización cercana a un sistema de transmisión el nivel ceraúnico es de  $T = 30$  días de tormenta/año. Se trata de una línea de transmisión típica de 230 kV que posee los siguientes parámetros geométricos de configuración:



$\theta$ : ángulo de la sombra (*shadow angle*)  
 $\alpha$ : ángulo entre el conductor de guarda y el de fase.  
 $W$ : ancho de la sombra de la línea sobre la superficie del terreno  
 $g$  y  $g'$ : localización de los cables de guarda  
 $A$ ,  $B$  y  $C$ : Conductores de fase

Altura de los cables de guarda  $h = 26$  m, y separación de los cables de guarda  $b = 6.7$  m.

Un método simplificado para estimar el desempeño ante descargas atmosféricas de las líneas de transmisión ha sido desarrollado por un *IEEE Working Group* [2], basado en el trabajo de [3]. La figura anterior toma en cuenta este reporte. Conocido el nivel ceraúnico es posible determinar el número de descargas a cualquier línea por medio de la relación:

$$N_L = 0.004T^{1.35}(b + 4h^{1.04})$$

Siendo  $N_L$  el número de *flashes* por descarga atmosférica a una línea por cien kilómetros al año,  $T$  es el nivel ceraúnico en la vecindad de la línea (numero de días de tormenta al año),  $h$  es la altura promedio de los conductores de guarda en metros,  $b$  es el espaciado entre los cables de guarda en metros. La altura promedio del conductor de guarda es tomado como la altura máxima menos dos tercios de la flecha.

Sustituyendo los respectivos valores se tiene:

$$N_L = 0.004(30)^{1.35}(6.7 + 4(26)^{1.04}) = 57.67$$

Esto puede ser interpretado como algo entre 40 y 70.

## Ejercicio #2: Cálculo de un evento específico de rayo

En este ejercicio se muestra una serie de cálculos para ilustrar algunos puntos que se han discutido sobre el evento de las descargas atmosféricas en los sistemas de transmisión. Para este propósito se ha de considerar una línea de transmisión con las siguientes características:

Alto de la torre,  $h = 35\text{m}$ .

Impedancia de sobretensión de la torre,  $Z_T = 140\ \Omega$ .

Un simple cable de guarda con una impedancia de onda de  $Z_{gw} = 640$

El espaciamiento o vanos de la línea es de 300 m.

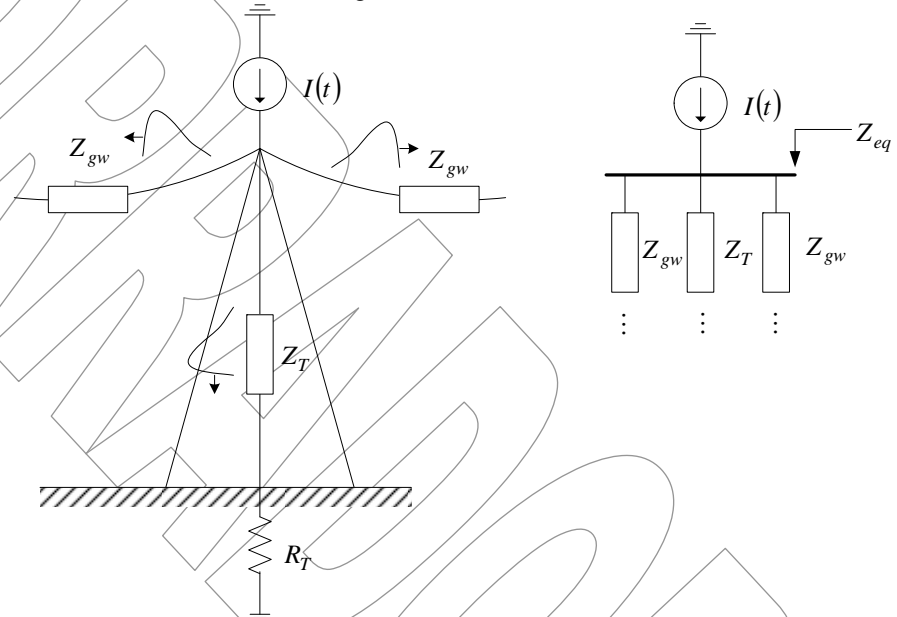
Resistencia de la toma de tierra es  $R_T = 25\ \Omega$ .

El brazo de la torres esta ubicado donde experimenta el 72% del voltaje del tope de la torre.

Factor de acoplamiento entre los conductores de guarda y el conductor de fase de interés = 0.25.

Se ha asume que una torre es impactada y que la corriente de la descarga atmosférica puede ser aproximada por una onda que crece linealmente a  $60\ \text{kA}$  en  $2\ \mu\text{s}$  y que disminuye linealmente a la mitad de su valor en  $40\ \mu\text{s}$ . La tarea es determinar el voltaje impuesto a través de una cadena de aisladores en suspensión para los conductores de fase de la línea.

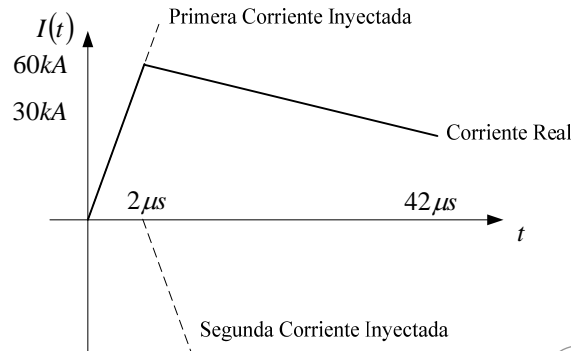
La impedancia que es encontrada por la descarga atmosférica al impactar es el paralelo de la impedancia de onda de la torre y la impedancia característica de los cables de guarda.



De tal modo que sustituyendo valores se tiene:

$$Z_{eq} = \frac{Z_T Z_{gw}}{2Z_T + Z_{gw}} = \frac{640 \times 140}{2 \cdot 140 + 640} = 97.4\ \Omega$$

El efecto de la descarga atmosférica puede ser simulado inyectando en esta impedancia ( $Z_{eq}$ ) una rampa de corriente que se eleva a  $60/2 = 30\ \text{kA}/\mu\text{s}$ , y entonces luego de  $2\ \mu\text{s}$ , inyectando una segunda rampa de  $-30.75\ \text{kA}/\mu\text{s}$ , como se ilustra en la siguiente figura.

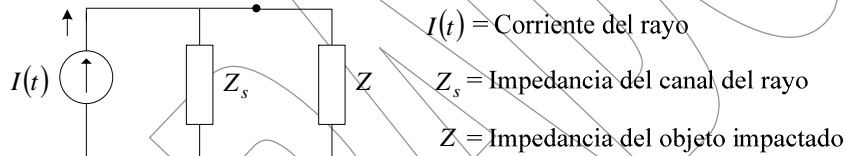


La segunda rampa neutraliza la primera permitiendo que disminuya la corriente en la onda. En la ausencia de cualquier reflexión, el voltaje del tope o parte mas alta de la torre puede ser calculado por la multiplicación de estas rampas por la impedancia equivalente  $Z_{eq} = 97.4 \Omega$ , dentro de la cual estas son inyectadas. De tal modo:

$$V(t) = 30 \times 10^6 \times 97.4t \text{ kV, para } 0 < t < 2\mu s$$

$$V(t) = 10^6 [30t - 30.75(t - 2 \times 10^{-6})] 97.4 \text{ kV, para } 2\mu s < t < 80\mu s$$

Esto indique que *sin ninguna reflexión*, la parte más alta de la torre y los cables de guarda pueden alcanzar un pico de 5844 kV. La impedancia del canal plasmático de la descarga atmosférica,  $Z_v$  en la Figura siguiente, ha sido ignorada en esta calculo, haciendo los mismos mas conservadores.



Las reflexiones hacen en realidad que se modifique significativamente el potencial en el tope de la torre. Aceptando una velocidad del 80% de la velocidad de la luz para la onda que baja por la torre, es aparente que la onda inicial será reflejada desde la base de la torre luego de un tiempo ( $t_v$ ):

$$t_v = \frac{h}{0.85v} = \frac{35m}{300m/\mu s \times 0.85} = 0.137\mu s$$

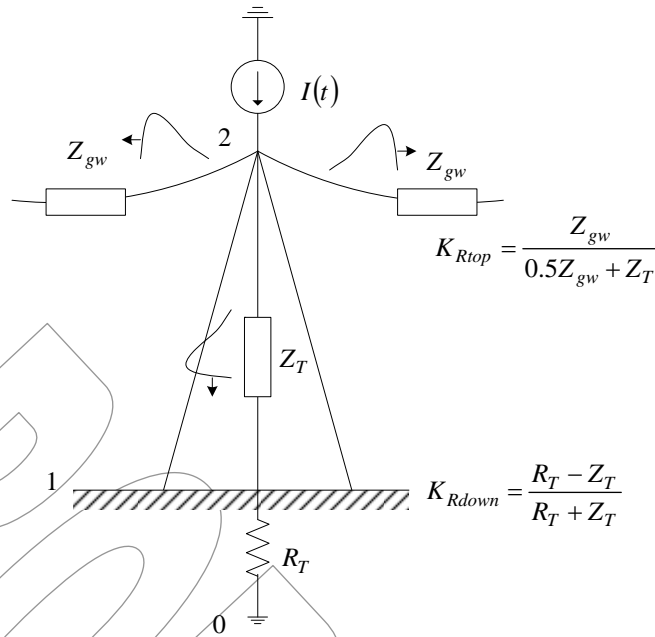
Y esta onda reflejada arriba al tope o la parte más alta de la torre luego de  $2t_v = 0.27 \mu s$ . El coeficiente de reflexión de tierra es de:

$$K_{Rdown} = \frac{R_T - Z_T}{R_T + Z_T} = \frac{25 - 140}{25 + 140} = -0.697$$

El coeficiente de reflexión experimentado por la onda reflejada que llega al tope o parte mas alta de la torre es de:

$$K_{Rtop} = \frac{Z_{gw}}{0.5Z_{gw} + Z_T} = \frac{640}{320 + 140} = 1.39$$

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento sin autorización del autor.  
 Derechos Reservados de Autor. Copyright © 2007



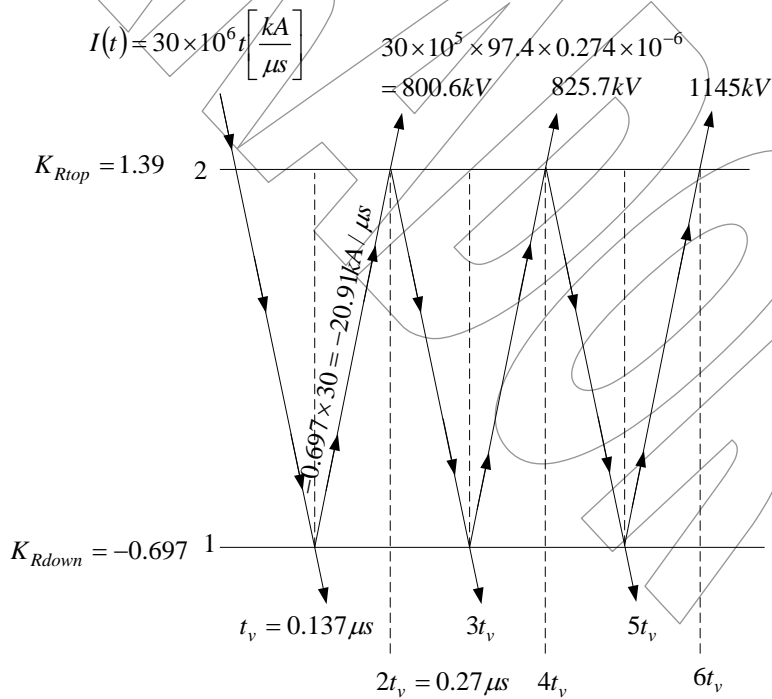
Entonces, luego de  $2t_v = 0.274 \mu s$ , esto se trata como si una rampa de corriente:

$$-0.697 \times 1.39 \times 30 = -29.06 kA / \mu s$$

Esta rampa de corriente es inyectada en la parte alta o tope de la torre. Estos efectivamente colocan un fin al rápido crecimiento del voltaje en el tope de la torre. Para este instante, el voltaje en el tope de la torre ha alcanzado:

$$30 \times 10^5 \times 97.4 \times 0.274 \times 10^{-6} = 800.6 kV$$

Lo cual es muchísimo menos que el valor de 6 MV calculado anteriormente, al no considerar las reflexiones.



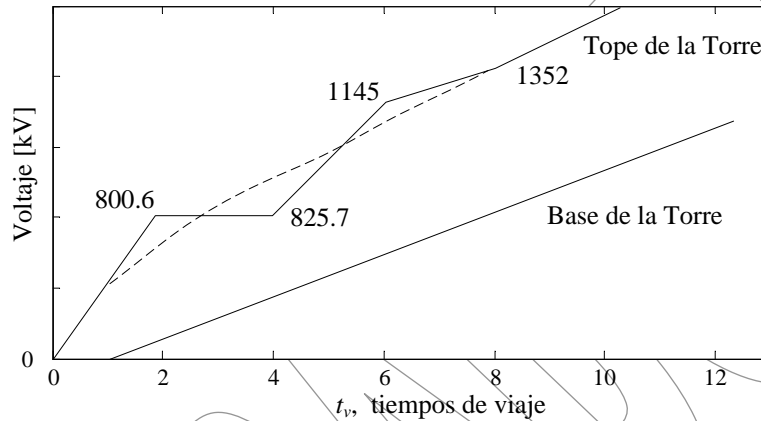
Las ondas continuaran viajando de arriba hacia abajo en la torre. La próxima modificación vendrá luego de cuatro viajes de la onda, es decir un tiempo  $4t_v = 0.548 \mu s$ . El coeficiente de reflexión de las ondas que regresan al tope de la torre queda dado por:

$$K_{Rtop} = \frac{0.5Z_{gw} - Z_T}{0.5Z_{gw} + Z_T} = \frac{320 - 140}{320 + 140} = 0.391$$

De tal modo, que la segunda modificación del potencial en el tope de la torre, viene dado por:

$$0.391 \times (-0.697) \times 1.39 = 0.379 \text{ veces la primera.}$$

La tercera modificación resulta ser luego de  $0.822 \mu s$ , y será 0.379 veces la segunda. Estas son equivalentes a la inyección de rampas de  $11.01 \text{ kA}/\mu s$  y  $4.17 \text{ kA}/\mu s$  respectivamente. Subsecuentes ondas continuaran disminuyendo y alternando el signo. Un trazado del voltaje en el tope o parte alta de la torre, mostrando el efecto de varias reflexiones en la parte alta y baja de la torre es mostrada en la siguiente figura.



El amortiguamiento y el efecto corona ayudan a suavizar los pasos discretos que se muestra en la curva sólida, del trazado del sobrevoltaje en el tope de la torre, resultando en una curva mas suave, como la que se muestra en forma de trazado a puntos.

El pico de voltaje luego de  $2 \mu s$  es aproximadamente  $2200 \text{ kV}$ . Las ondas están viajando a lo largo de la torre, siendo esta una distancia corta, además de que posee una baja resistencia de la toma,  $25 \Omega$ . Por ello, luego de algunas pocas reflexiones, la resistencia de la toma de tierra es como si estuviese directamente conectado a los cables de guarda.

Es ilustrativo mostrar el trazado del voltaje en la parte baja o la base de la torre. El coeficiente de reflexión de la corriente que pasa hacia debajo de la torre es dado por:

$$K_{Rdown} = \frac{2R_T}{Z_T + R} = \frac{50}{140 + 50} = 0.263$$

De tal modo que la fracción de corriente de la descarga atmosférica que pasa a través de la torre es dados por:

$$\frac{0.5Z_{gw}Z_T}{Z_T(0.5Z_{gw} + Z_T)} = \frac{320}{460} = 0.696$$

Entonces, luego de un tiempo de viaje ( $t_v$ ), la elevación inicial de la elevación de voltaje en la base de la torre es:

$$0.696 \times 30 \times 140 \times 0.263 = 769 \frac{\text{kV}}{\mu s}$$

(comparado con  $2.922 \text{ kV}/\mu s$  para el tope de la torre). Dos tiempos de viaje después, cuando la primera reflexión regresa, desde el tope de la torre, éste es reducido por un valor de:

$$769 \times (0.697) \times 0.391 = 209.5 \frac{\text{kV}}{\mu s}$$

Luego, después de dos viajes esto se incrementa a:

$$-209.5 \times (-0.697) \times 0.391 = 57 \frac{kV}{\mu s}$$

Esto es aproximado en la Figura siguiente de arriba. Como es mencionado arriba, el potencial del tope de la torre supera el potencial de la base de la torre varias veces. Por otra parte, la figura anterior refuerza la importancia de una baja resistencia en la toma de tierra. Si, por ejemplo,  $R_T = Z_T$ , no será reducido la reflexión desde la tierra, el voltaje en el tope de la torre continuara aumentando hasta su valor inicial. Incluso en el peor de los casos, si  $R_T > Z_T$ , las ondas reflejadas desde la base de la torre serán agregadas y se incrementara el potencial en el tope de la torre.

No se ha efectuado mención al hecho de las reflexiones mas allá de las torres adyacentes, sin embargo estos ocurrirán como ondas generadas por el aumento en el potencial del tope de la torre propagadas en ambas direcciones a lo largo de los cables de guarda. La impedancia encontrada por tales ondas en las torres adyacentes será:

$$Z_{eqT} = \frac{Z_T Z_{gw}}{Z_T + Z_{gw}} = \frac{140 \times 640}{140 + 640} = 114.9 \Omega$$

El coeficiente de reflexión en la torre adyacente es de tal modo:

$$K_{RT} = \frac{Z_{eqT} - Z_{gw}}{Z_{eqT} + Z_{gw}} = \frac{114.9 - 640}{114.9 + 640} = -0.696$$

El coeficiente de refracción o transmisión donde la onda reflejada retorne a la torre impactada es:

$$K_{TT} = \frac{2Z_{eqT}}{Z_{eqT} + Z_{gw}} = \frac{2 \times 114.90}{114.9 + 640} = 0.304$$

Las ondas arribaran simultáneamente desde ambas direcciones. Ambas son equivalente a la inyección de una rampa de corriente de:

$$-0.696 \times 0.304 \times 30 = -6.35 \frac{A}{\mu s}$$

Sin embargo, estos eventos no ocurrirán hasta  $2\mu s$  luego del instante del impacto inicial (las torres están a 300m), por lo cual el efecto más dramático del tiempo de las reflexiones de la tierra en la bases ya ha caído. Una descarga de retroceso (*back flashover*) en el aislamiento ha ocurrido para entonces.

Ahora se presta atención a los esfuerzos que tienen lugar a lo largo de la cadena de aisladores por el potencial en el brazo de la torre y por el otro lado debido al potencial del conductor. Es común asumir que el potencia que adquiere el brazo de la torre es el mismo que posee el tope de la torre, sin embargo también es común asumirlo que es proporcional a este valor, un *factor de proporcionalidad* de 0.72 es usado en este caso. En la realidad puede haber una diferencia de la fase entre el tope de la torre y en el brazo de las ondas que viajan de arriba hacia debajo de la torre. Si se desprecia esto, se puede esperar que el brazo de la torre se eleve aproximadamente un voltaje de:

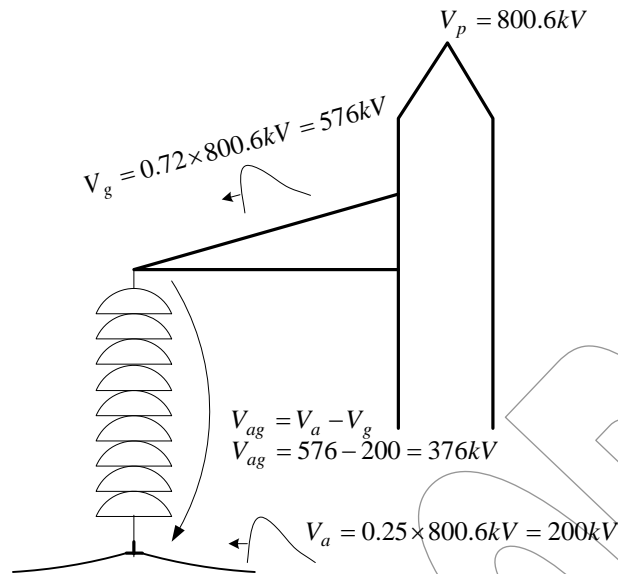
$$V_g = 0.72 \times 800.6 = 576 kV$$

Luego de  $0.274\mu s$  y subsecuentemente a voltajes mas altos (como se muestra en la Figura 1). En el transcurrir del tiempo, el conductor de fase se elevara su potencia, como este voltaje está acoplado con este y la onda en el cable de guarda. En el mismo instante de tiempo, la elevación del voltaje será:

$$V_a = 0.25 \times 800.6 kV = 200 kV$$

De tal modo que el diferencial será:

$$V_{ag} = 576 - 200 = 376 kV$$



Esto se incrementará con el tiempo, hasta que el pico del transitorio de corriente será aproximadamente de 830 kV. Esto se debe agregar al voltaje instantáneo del sistema a fin de obtener el voltaje a través de la cadena de aisladores. Esto puede agregar más que el pico del voltaje de línea a neutro, si la descarga atmosférica posee polaridad opuesta al voltaje del sistema.

*Causará esto un back flashover o descarga de retroceso a través de la cadena de aisladores?* La respuesta depende del esfuerzo instantáneo de la cadena de aisladores. Esto es un tópico de coordinación de aislamiento, lo cual será tratado en otro documento.

Especial mención debe ser hecha respecto a las líneas de doble circuito. Cuando una descarga atmosférica causa el flashover en un circuito, la elevación de voltaje resultante en la estructura, frecuentemente lleva a un flashover en el otro circuito. Entre el 40 al 60% de los flashover en doble circuitos desencadenan en un flashover simultáneo en el segundo circuito. El *Electric Power Research Institute* (EPRI) ha desarrollado un programa interactivo de computación, MULTIFLASH, que predice la probabilidad de flashover en estructura multicircuito de hasta 12 fases, ac o dc o combinación de ellas [29-31]. Este es una mejora al método descrito en este documento para estructuras simples [21]. MULTIFLASH predice tanto el número de fallas del apantallamiento y el número de descargas retroactivas en las estructuras de transmisión.

El problema de flashover simultáneos en líneas de transmisión doble circuitos ha sido llevado a cabo en algunos diseños de torres y aislamiento, basados en el trabajo de Hawai [32] por el arreglo intencional de un circuito dielectricamente menos fuerte que el otro. La idea es el “sacrificio de un circuito” el cual sufrirá el flashover primero que el segundo circuito.

## Referencias Documentales

- [1] Allan Greenwood. *Electrical Transient in power Systems*. Willey-Intercience. Canada. 1971.
- [2] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines. "A Simple Method for Estimating Lightning Performance of Transmission lines", *Trans. IEEE*. Vol. PAS-104(1985). pp. 919-932.
- [3] J. G. Anderson, "Lightning Performance of Transmission Lines". Chapter 12 of *Transmission Line Reference Book -345 kV and Above*, 2nd edition, EPRI (1982).
- [4] EPRI Report E-3608 "Single phase, multiphase, and multiple circuit lightning flashovers of transmission lines, Vol. 1, Engineering Analysis" (1984).
- [5] EPRI Report EL-4540 CCM Vol. 5, "MULTIFLASH Manual, version 1.0" (1986).
- [6] EPRI Report EL-4540 CCM Vol. 5, "MULTIFLASH Manual, version 2.0" (1989).
- [7] M. Kiwai, "Studies of the Surge Response on a Transmission Line Tower", *Trans. IEEE*, Vol. PAS-83 (1964), pp. 30-34.