

Selección y Espaciamiento de Apartarrayos en Líneas de Distribución de 23 kV de la Zona Centro

Selection and Spacing of Surge Arrester on Distribution Lines of 23 kV of the Central Zone

L. Cisneros-Villalobos¹, F. Aquino-Roblero¹, M. Tecpoyotl-Torres¹, J. Chilopa-Linares¹ y D. Martínez-Martínez²

¹Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

² Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México

México

Luis Cisneros Villalobos. E-mail: luis.cisneros@uaem.mx

Resumen

En este artículo se analiza una red de distribución urbana de 23 kV típica de la zona central de México. El objetivo es determinar la distancia máxima de separación entre apartarrayos de línea que permita reducir las salidas de los circuitos de distribución por descargas atmosféricas directas e indirectas. Con base en las características eléctricas, ambientales, ceráunicas y geográficas de la zona, niveles de cortocircuito y las sobretensiones provocadas por maniobras rutinarias, se selecciona el apartarrayos siempre con el principal objetivo de determinar su espaciamiento adecuado sobre la línea para que éste funcione apropiadamente. La investigación se lleva a cabo con la ayuda del software llamado Alternative Transients Program (ATP) donde se realiza el cálculo de los parámetros de la línea utilizando el modelo de K.C. Lee, las sobretensiones transitorias por onda viajera y por conexión de capacitores también son simuladas. La motivación de este trabajo consiste principalmente en contar con un mayor sustento teórico y técnico (actualmente escueto) para determinar el espaciamiento entre apartarrayos de la red de distribución considerada y así aumentar la calidad del suministro eléctrico de la zona.

Palabras clave: apartarrayos, descarga atmosférica, ATP, espaciamiento, sistema de distribución.

Recepción: 26-09-2014

Aceptación: 17-04-2015

Abstract

In this article is analyzed an urban distribution network of 23 kV typical of the central zone of Mexico. The objective is to determine the maximum spacing of surge arresters on the line that allows reducing the outages of the distribution circuit due to direct and indirect lightning. Based on the electrical, geographical, environmental and ceraunic characteristics of the zone, short circuit magnitude and surges caused by routine switching, the arrester is always selected with the

primary target of determining its spacing on the line to work it properly. The research was carried out with the help of the software called Alternative Transients Program (ATP) where the calculation of line parameters is performed using the model of KC Lee, traveling wave and capacitor switching surges are also simulated. The motivation for this work is mainly to have a theoretical and technical support (currently limited) to determine the spacing of surge arrester in the considered distribution network and thus increase the quality of electricity supply of the zone.

Keywords: surge arrester, lightning, ATP, spacing, distribution system.

Introducción

La red de distribución tiene una problemática muy especial, matizada de cuestiones económicas, políticas, sociales, técnicas y ambientales. Con relación a esta última, se sabe que cada área geográfica tiene condiciones atmosféricas muy particulares. Por ejemplo, podemos mencionar algunos de los aspectos ambientales que impactan en la calidad del servicio y que en gran medida están fuera del control humano: huracanes en las regiones costeras, terremotos en zonas con fallas geológicas y tormentas eléctricas con alta densidad de rayos.

En frecuentes ocasiones el personal que diseña, planea y construye la red, trata por todos sus medios de ubicar de manera eficiente las protecciones contra descargas atmosféricas en las líneas de media tensión. Considera la localización física de la línea y procura aprovechar de la zona la existencia de apartarrayos de transformadores, servicios en media tensión, transiciones de líneas aéreas a cable y árboles o estructuras altas.

La salida de un circuito de distribución por descarga atmosférica frecuentemente se restablece en tiempos menores a un minuto, provoca una interrupción o parpadeo en el suministro de energía eléctrica que es suficiente para perder por tiempos mayores cargas sensibles. En el momento que se presenta la interrupción, se perderá carga, se dejará de facturar energía, se iniciará con la recepción de quejas y posiblemente se ejecutarán maniobras de seccionamiento y/o pruebas de conexión o desconexión de interruptores para aislar la falla. Cabe señalar que durante una tormenta eléctrica típica del área central, alrededor del 80% del total de las salidas por falla son causadas por descargas atmosféricas (LyFC 2008).

Para poder reducir las interrupciones por descargas atmosféricas en toda red eléctrica es indispensable que tanto la selección como la ubicación del apartarrayos sean eficientes. Cuando se habla de elementos eléctricos tales como transformadores, transiciones etc., la ubicación idónea del apartarrayos es lo más cercana posible al equipo por proteger. Sin embargo, hablando específicamente de líneas aéreas que tienen una longitud física, las principales preguntas son: ¿En qué punto debe ser instalado el apartarrayos?, ¿Cuál debe ser el máximo espaciamiento entre apartarrayos?, ¿Cuál debe ser la tensión nominal del apartarrayos seleccionado?

La selección del apartarrayos es la pregunta que normalmente resultan ser la más sencilla de responder por que existen gran cantidad de tratados, procedimientos y normativas para poder hacerlo. Sin embargo, para seleccionar el punto de ubicación y el espaciamiento de los apartarrayos en las líneas de distribución se utiliza principalmente la experiencia y el conocimiento de la red por parte de los ingenieros o linieros, esto frecuentemente suele observarse en los trayectos de los circuitos de distribución tanto urbanos como rurales, en donde el espaciamiento de los apartarrayos no es uniforme si es que éstos existen. El objetivo es reducir las salidas de la línea debido a descarga atmosférica y sobre todo si se trata de circuitos que alimentan cargas tales como hospitales, edificios gubernamentales, escuelas, industrias, zonas residenciales, etc.

La literatura sobre el tema principal aquí tratado es muy extensa cuando se habla de líneas de transmisión o subtransmisión (EPRI 1982) pero es escasa y generalizada cuando involucra las redes de distribución. La atención normalmente se concentra en la selección del apartarrayos pero no se profundiza en su espaciamiento. Este es un tema históricamente desatendido por diversas razones: las áreas de distribución por separado cuentan con menores recursos técnicos, humanos, materiales y económicos (tienen menor importancia desde el punto de vista de seguridad global de un sistema eléctrico de potencia), pero principalmente se debe a la situación jerárquica de los sistemas de alta tensión sobre los de media tensión. Pero es importante señalar que en México la longitud de las líneas de media tensión es 4 veces mayor que la longitud del sistema de alta tensión (SENER 2013). Con el desarrollo de esta investigación se estimulan y generan mejores prácticas para la competitividad del sector eléctrico. El diseño original de esta red de distribución no incluye los apartarrayos de línea solo son considerados los apartarrayos para proteger transformadores tipo poste y transiciones de línea aérea-cable. Sin embargo la necesidad actual de contar con un servicio de mayor calidad requiere incluir apartarrayos en conjunto con programas de instalación de conductor semiaislado, cambio de aisladores, programas de mantenimiento y poda de árboles, cambios de ruta (modificación de la topología de la red) y reemplazo de postes en mal estado. Los estudios de factibilidad para la instalación de apartarrayos los realiza la propia empresa eléctrica y son históricamente uno de los programas más económicos, la verdadera preocupación es el conocimiento de donde colocarlos para que estos tengan un desempeño óptimo.

El tratamiento del espaciamiento de apartarrayos sobre una línea aérea de distribución en (IEEE 2010) es escueto y de aplicación general y, resulta no ser de gran utilidad para nuestra red en particular. En la norma se incluye información que asume claros interpostales de 75 m que son típicos de sistemas estadounidenses y con una configuración no tan similares a la red tratada en este trabajo. En este estudio se toman en cuenta las características específicas de nuestra red para obtener el espaciamiento entre apartarrayos y no adoptar las consideraciones generales hechas en la norma antes mencionada. Se modela un sistema trifásico con sus acoplamientos mutuos que nos permiten observar efectos de inducción electromagnética en nuestra red eléctrica.

La estructura sustancial del presente trabajo es la siguiente: se inicia con el cálculo y la recopilación de información de los parámetros de la red, en seguida se calcula la magnitud de la sobretensión temporal, posteriormente se estudia el efecto de las sobretensiones por maniobra, después se obtiene la sobretensión por descargas directas a conductores de fase y por último se analiza el efecto de las descargas indirectas incluyendo el blindaje de la línea.

Descripción general de la red eléctrica

La red eléctrica utilizada en este trabajo de investigación se ubica en el Municipio de Cuernavaca que pertenece al estado de Morelos y que forma parte del Sistema Interconectado Nacional Mexicano (SIN). Esta red de 23 kV suministra energía eléctrica a toda la Capital del Estado.

Se trata un sistema eléctrico de distribución urbano en media tensión de 23 kV a 60 Hz y es típica del Área Central del SIN. La red troncal está constituida por conductores tipo AAC (All-Aluminum Conductor) que tienen un calibre 336 kCM y se encuentra sostenida en una cruceta de fierro sobre postes de concreto a una altura aproximada de 10.2 m sobre el nivel de suelo (poste de 12 metros de longitud enterrado aproximadamente 1.80 metros). En la figura 1 se muestra la configuración plana de los conductores de las fases y también se incluye un conductor adicional para blindar la línea, dicho conductor no existe de manera física en la red solo se incluye en las simulaciones para observar el efecto de las tensiones inducidas por descargas atmosféricas indirectas.

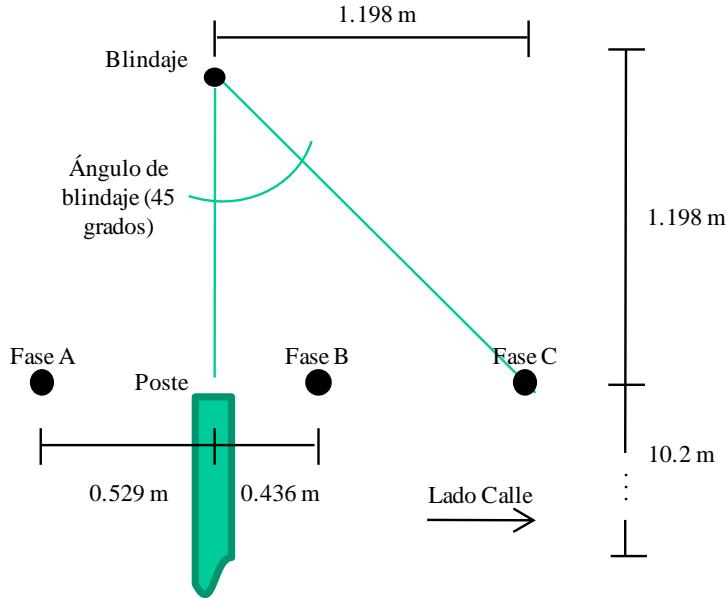


Figura 1. Configuración típica de la línea de media tensión de 23 kV de la zona centro.

La separación entre el centro del poste y el centro del aislador del lado de la banqueta es igual a 0.529 m, la separación entre el centro del poste y el primer aislador del lado calle es de 0.436 m y, la separación entre el centro del poste y el segundo aislador lado calle es de 1.198 m.

En condiciones normales de operación, estos circuitos trifásicos pueden manejar potencias cercanas a los 12 MVA con factor de potencia próximo a la unidad. La fuente de potencia para este sistema de distribución radial incluye red de 230 kV en estrella o 85 kV en delta con transformadores de potencia de 60 o 30 MVA, respectivamente.

Es importante mencionar que la configuración mostrada en la Figura 1 corresponde a una red actualmente en operación y su forma asimétrica es típica de las redes de distribución de la zona. Los postes están normalmente plantados sobre la banqueta, de un lado está la calle y del otro comúnmente existen construcciones o árboles. Desde el punto de vista mecánico el lugar óptimo para soportar el hilo de guarda es sobre el centro de la punta del poste y, así para tener el ángulo de blindaje adecuado la altura del conductor de guarda debiera ser al menos 1.198 metros arriba de la punta del poste tal y como se recomienda en (IEEE 2010). Ubicar el blindaje en otra posición fuera del centro del poste requiere una mayor inversión económica para la adecuación de la red. El diseño original de estos circuitos no incluye hilo de guarda, bayonetas o electrodos

adicionales, instalarlos requiere reforzar los postes o incluso reducir los claros interpostales también se requiere de un estudio técnico-económico profundo para justificar la adición de estos elementos el cual queda fuera del alcance del presente trabajo.

Las impedancias del circuito

Con base en la configuración de la red se calculan las impedancias del circuito utilizando el ATP. Se ha considerado como caso crítico una resistividad del terreno de 100 ohms por metro (CFE 2013; IEC 2006), y un conductor de 1/0 AWG de aluminio con refuerzo (ACAR) a una altura de 1.198 m sobre el arreglo las fases para que se tenga un ángulo de blindaje de 45 grados.

Los valores de las impedancias de secuencias positiva ($Z_{1(60)}$), negativa ($Z_{2(60)}$) y cero ($Z_{0(60)}$) a 60 Hz son:

$$Z_{1(60)} = Z_{2(60)} = 0.1696 + 0.3846j \text{ ohms/km},$$

$$Z_{0(60)} = 0.1696 + 1.0491j \text{ ohms/km},$$

estos valores no son usados en el proceso de simulación y solo se muestran para tener una idea del decremento del nivel de cortocircuito a lo largo de la red troncal. Las reactancia de secuencia cero y positiva del equivalente de la fuente de potencia se utilizan para determinar la máxima sobretensión temporal, el valor de esta relación de reactancias a 60 Hz es 1.4.

Las impedancias utilizadas para la simulación deben ser coherentes con el modelo y fenómeno tratado, por lo que el uso de una frecuencia de 500 kHz para el estudio de descargas atmosféricas se define a partir de conceptos normalizados de frente de onda rápido. Los valores obtenidos en ATP de las impedancias de secuencia positiva ($Z_{1(500)}$), negativa ($Z_{2(500)}$) y cero ($Z_{0(500)}$) a esta frecuencia son:

$$Z_{1(500k)} = Z_{2(500k)} = 5.1948 + 3053.4j \text{ ohms/km},$$

$$Z_{0(500k)} = 5.1948 + 8590.8j \text{ ohms/km}$$

La sobretensión temporal

Debido a que la duración máxima de las sobretensiones temporales es de una hora, los apartarrayos solo deben limitar las sobretensiones de frente lento (en algunos casos) y de frente rápido con duraciones del orden de los microsegundos (IEC 71-1 1996).

Una parte importante en el proceso de selección de apartarrayos es determinar las magnitudes de las sobretensiones temporales debido a fallas desbalanceadas. Para esto se requiere conocer los valores de las impedancias de secuencia del equivalente de thévenin de la red en el punto de la falla. Utilizando el método de las componentes simétricas, despreciando los valores de resistencia y analizando una falla monofásica se utiliza la ecuación (1) con el rango de validez definido en (IEC 71-1 1996),

$$\frac{V}{E} = a - \left[\frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_1} + 2} \right], \quad (1)$$

donde,

V = es el fasor de tensión en el punto de la falla,

E = tensión de la fuente,

X_0 = reactancia de secuencia cero,

X_1 = reactancia de secuencia positiva,

$a = 1\angle 120^0$.

En la fuente de 23 kV de nuestro sistema, la relación X_0 / X_1 tiene un valor máximo de 1.4 y la expresión (1) es válida para este valor. Así, la magnitud de la relación V / E es 1.06.

Si se tiene en cuenta que la tolerancia máxima permitida para la tensión en estado estable a nivel nacional es de 10% arriba del valor nominal (NOM-001-SEDE 2012), la sobretensión temporal tendría entonces un valor de $(1.06)(1.1) = 1.17$ pu, con duraciones típicas de entre 5 y 15 ciclos. La magnitud 1.17 pu propone que el apartarrayos no actúe cuando la sobretensión temporal de fase a tierra sea menor a $(1.17)(23 \text{ kV})/\sqrt{3} = 15.5 \text{ kV}$, es decir el MCOV (máximo continuous operating voltage) del apartarrayos debe ser mayor a 15.5 kV.

La tabla 1 muestra parte del catálogo de un fabricante de apartarrayos donde se sugiere que el valor nominal (rating) del apartarrayos sea determinado por el MCOV, el cuál para nuestro caso resulta ser de 18 kV, aunque esta selección queda muy justa para la sobretensión calculada. El caso crítico basado en (IEC-71-1 1996) propone que la relación X_0/X_1 sea igual a 3.0 y entonces la sobretensión es de $(1.2488)(1.1)=1.37$ pu. Una sobretensión temporal de 1.37 pu (18.2 kV) sugiere la utilización de un apartarrayos con una tensión de nominal de 21 o 24 kV con MCOV de 17 kV o 19.5 kV respectivamente, según la tabla 1. Valores similares a los anteriores se obtienen si solo se utilizan las impedancias (a 60 Hz) de secuencia positiva y cero del circuito de distribución y se excluye la impedancia del equivalente thévenin de la red de potencia. Sin embargo, la longitud de la red troncal que se considera en este trabajo no es mayor a 1000 m, donde normalmente se encuentran instalados los principales equipos de seccionamiento automático del sistema y aquí las impedancias que más impactan se deben principalmente al equivalente de la red de distribución.

Tabla 1. Carta de operación de tres clases de apartarrayos Tranquell de General Electric sin gaps (G.E. 2013).

Tensión nominal (kVrms)	MCOV (kVrms)	Tensión máxima de descarga (kV pico)						
		1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	15 kA	20 kA	40 kA
18	15.3	40.4	42.3	44.1	47.1	50.3	52.8	60.6
21	17	44.8	46.9	48.9	50.3	52.8	58.7	67.2
24	19.5	51.4	53.8	56.1	60.0	64.1	67.3	77.1

En este trabajo no se consideran las sobretensiones temporales que pueden ser el resultado de un rechazo de carga o ferroresonancia y que dependen fuertemente de las políticas operativas y de la configuración eléctrica de la red (Cisneros 2004; Cisneros 2007).

La capacidad de energía de los apartarrayos se define con base en (IEEE 2010) y (IEEE 2012). Los fabricantes cumplen con esta normatividad, sus catálogos de apartarrayos para una gran

variedad de tensiones normalmente tienen un rango de entre 6 y 13 kJ/kV de MCOV (para la clasificación de servicio pesado) y su carta de operación está definida hasta para 40 kAp.

La sobretensión por maniobra

Las sobretensiones de frente lento ocurren principalmente por que se realizan maniobras de control manual o automático en la red eléctrica. Una sobretensión transitoria por maniobra puede ser el resultado de la conexión o desconexión de un banco de capacitores y provocar una sobretensión típica de 2.0 pu (EPRI 1982), su tiempo de duración y frecuencia de oscilación estarán definidos por los parámetros de inductancia, capacitancia, resistencias y cargas, para redes eléctricas de distribución comúnmente con oscilaciones típicas de 200 a 2000 Hz (Cisneros 2002). En las zonas urbanas del área central del país es frecuente la conexión de capacitores de 23 kV cuando la demanda de potencia se incrementa durante las primeras horas de la mañana. En la figura 2 se presenta la simulación en ATP del transitorio de energización de los bancos de capacitores en 23 kV de dos subestaciones que funcionan como fuente de potencia para la red de distribución estudiada, se observa que la máxima sobretensión alcanzada es de 1.85 pu o 34.7 kVp. Es importante señalar que en condiciones normales de operación el apartarrayo no debe limitar la sobretensión transitoria debido a la conexión de capacitores. En este caso se sugiere la utilización de apartarrayos con una tensión de nominal de 21 o 24 kV con un MCOV de 17 kV o 19.5 kV respectivamente.

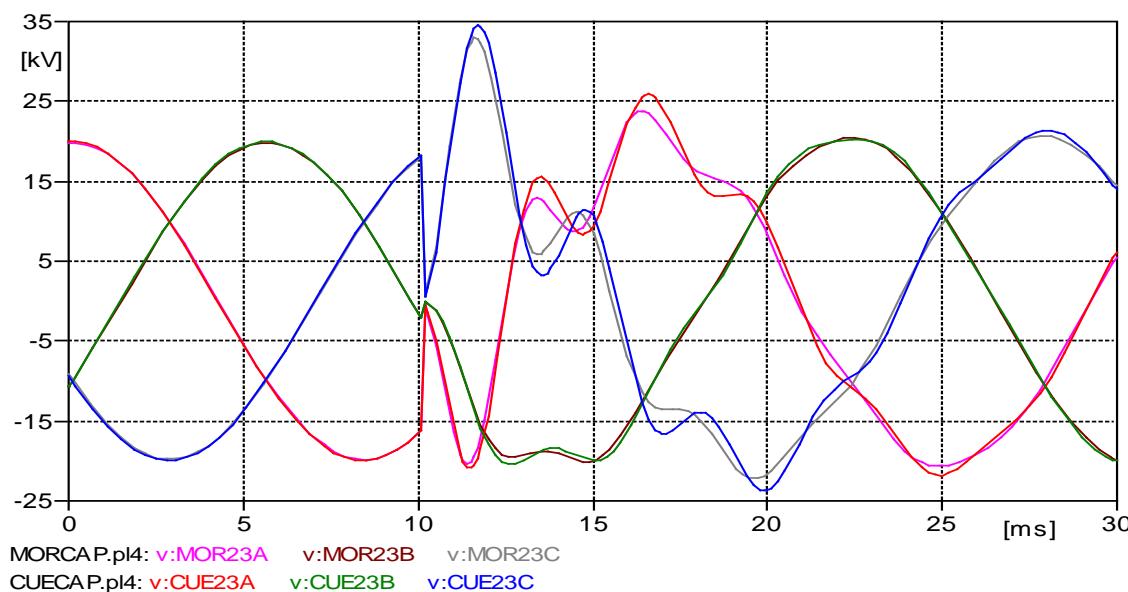


Figura 2. Señales de tensión durante la conexión de los capacitores de 23 kV de las subestaciones Morelos (MOR23) y Cuernavaca (CUE23), ambas subestaciones suministran potencia a sistemas de distribución urbanos.

La descarga atmosférica

La descarga atmosférica es una columna de plasma, es la unión violenta de cargas debido a un campo eléctrico intenso que se ha creado entre una nube y la tierra, entre nubes, entre nube y el aire o dentro de una nube. Los rayos de nube a tierra son los que más afectan a las redes eléctricas y pueden tener polaridad positiva o negativa siendo los más comunes estos últimos (EPRI 1982).

En promedio una nube de tormenta puede contener unos 140 MWh de energía con tensiones de hasta 100 MV con una carga intranube en movimiento de unos 40 coulombs. Esta energía es la que se disipa mediante las descargas atmosféricas con corrientes pico que van desde unos cuantos kiloamperes hasta 200 kA (EPRI 1982).

En la región central de la República Mexicana inciden de 6 a 8.5 descargas atmosféricas a tierra por kilómetro cuadrado por año, uno de los rangos más elevados a nivel nacional según datos de los sistemas satelitales de la NASA (Ramírez 2004).

En la tabla 2 y 3 se muestra la información de las probabilidades de la presencia de las descargas atmosféricas en función de sus magnitudes de corriente según el CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques) y según el IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers), respectivamente.

Tabla 2. Probabilidad de descargas atmosféricas según CIGRÉ, (CIGRÉ 1990).

I_k (kA)	3	4	5	10	30	40	50	100	200
Probabilidad (%)	99	98	96	85	40	30	20	6	1

Tabla 3. Probabilidad de descargas atmosféricas según IEEE, (IEEE 1991).

I_k (kA)	2	7	10	11	20	24	50	100
Probabilidad (%)	99.8	90	74	70	40	20	7	1

Simulación de las sobretensiones de frente rápido

Una vez que se cuenta con las opciones de los apartarrayos que pueden ser instalados en este sistema (tabla 1), se procede a la simulación de la incidencia directa de una descarga atmosférica sobre la línea de distribución típica de la zona. Para llevar a cabo la simulación se utiliza el software ATP (Alternative Transients Program). A través de su graficador pueden observarse las sobretensiones de frente rápido provocadas por una descarga atmosférica directa sobre una de las fases del circuito. También, posteriormente se estudia el caso de la incidencia del rayo en el hilo de guarda ficticio.

La figura 3 muestra un modelo monofásico de la línea que incluye el blindaje supuesto para el arreglo típico en 23 kV. La red de distribución no suele tener transposiciones a menos que sean severos los desbalances debido a sus propias impedancias. Por lo que en la representación digital del circuito se utiliza el modelo de la línea no transpuesta (modelo de K. C. Lee) del ATP. La línea se ha dividido en tramos de 100 metros. Se indican también los nombres de algunos puntos o nodos de interés de la red y se muestra el punto en donde se hace incidir la señal de corriente de frente rápido normalizado que simula la descarga atmosférica. En la figura 3 se observa que el apartarrayo está ubicado en el nodo T1-PH.

En su mayor parte la red tiene aisladores poliméricos tipo poste 33 PD PG 1 con una tensión crítica de flameo al impulso positivo por rayo de 200 kV o aisladores tipo alfiler A56-3 que tienen una tensión critica de flameo al impulso positivo por rayo de 200 kV y 265 kV para el impulso negativo (CFE 2013).

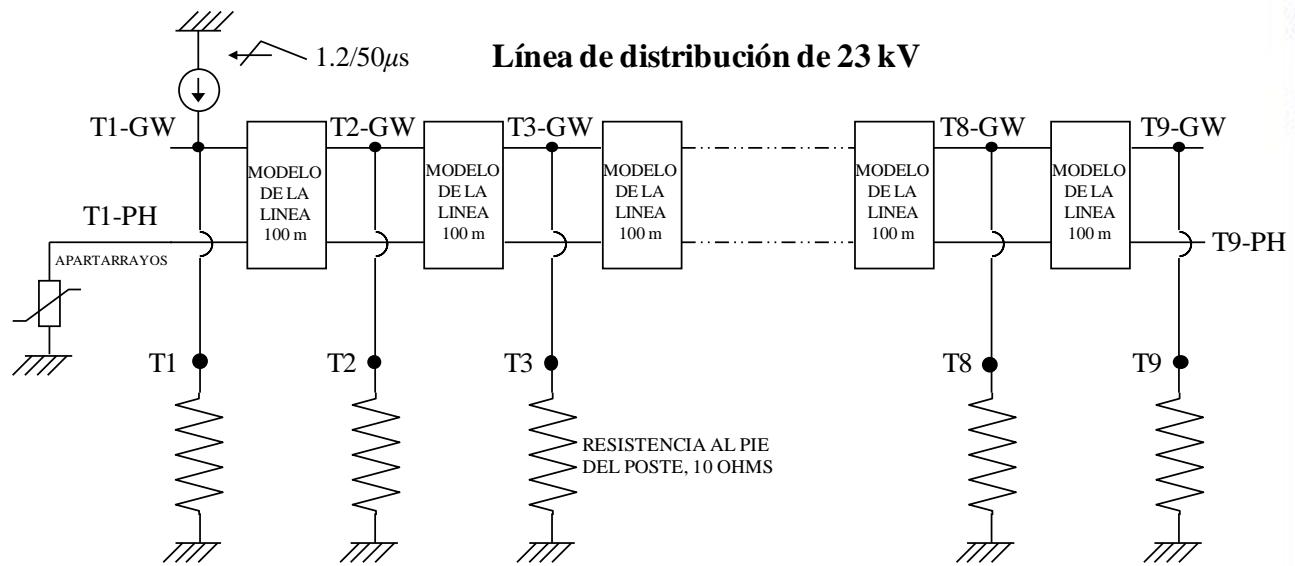


Figura 3. Diagrama ilustrativo para la simulación en ATP de la onda viajera sobre la troncal del circuito de distribución.

A partir de la tabla 1 el programa ATP ajusta una función con los puntos de la carta de operación del apartarrayo utilizando su módulo ZnO Fitter. En la figura 4 se muestran las curvas correspondientes para los apartarrayos con tensiones nominales de 18, 21 y 24 kV las cuales se han obtenido a partir del ZnO Fitter.

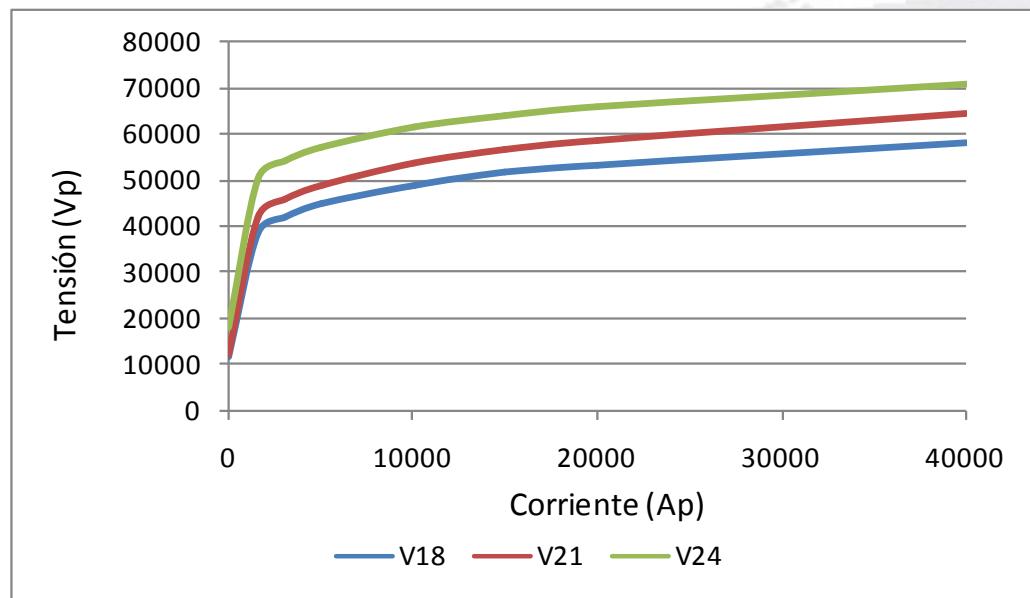


Figura 4. Curvas de operación ajustadas con el ZnO Fitter del ATP para apartarrayos con ratings de 18, 21 y 24 kV.

Las funciones ajustadas con el ATP que representan las curvas de operación de los apartarrayos con tensiones nominales de 18, 21 y 24 kV se muestran en las expresiones (2), (3) y (4), respectivamente. Donde T es la tensión pico en volts e I es la corriente pico en amperes referidas a la carta de operación de cada apartarrayo.

$$T = 36000 \left[\frac{I}{874.89} \right]^{\frac{1}{7.93}}, \quad (2)$$

$$T = 42000 \left[\frac{I}{1538.91} \right]^{\frac{1}{7.65}}, \quad (3)$$

$$T = 48000 \left[\frac{I}{982.12} \right]^{\frac{1}{9.45}}. \quad (4)$$

Las ecuaciones (1), (2) y (3) se introducen en el archivo utilizado para la simulación en ATP.

Descargas atmosféricas directas

Durante una tormenta las causas más comunes de salidas de la línea por falla se deben principalmente a objetos sobre la línea tales como árboles, ramas, lonas, postes chocados y también a descargas atmosféricas directas. El rayo puede incidir en uno o varios conductores de fase y proveer un camino para provocar una falla a 60 Hz. También, los fusibles de paso conectados en la línea pueden abrirse debido a una descarga atmosférica directa, dejar sin potencial eléctrico una parte del sistema e iniciar un proceso de recepción de quejas (LyFC 2008).

El operador podrá atender con mayor calidad y rapidez las actividades rutinarias y de emergencia de la red si durante una tormenta se reduce el número de disturbios reduciéndose así el impacto negativo sobre la satisfacción de los clientes. Desde el punto de vista de operación y continuidad del servicio, durante una tormenta el fenómeno del rayo no debiera incrementar considerablemente el número de fallas. Las líneas de media tensión urbanas y principalmente sus tramos troncales deben tener bajos índices de salida por descargas atmosféricas directas, esto

dependerá de las características de la red y de la manera en cómo funcionan los sistemas de coordinación de aislamiento y coordinación protecciones eléctricas.

Una vez que se tiene modelado e implementado el sistema de distribución en el ATP se procede a la simulación aún sin incluir el efecto del apartarrayos. En el punto T1-PH de la figura 3 se inyecta una onda normalizada de -100 kAp con un frente de onda de 1.2/50 microsegundos la cual tiene una probabilidad de presencia del 1%, como se indica en la tabla 3. Las sobretensiones en el punto T1 correspondientes a este evento se observan en la figura 5. La descarga atmosférica directa provoca prácticamente la misma magnitud de sobretensión incidiendo en cualquiera de las fases. Al no estar conectado ningún apartarrayo en las fases en el punto T1, se observa que la magnitud pico de la sobretensión antes de la primera reflexión es de -39 MVp. Por lo tanto, la tensión critica de flameo al impulso de los aisladores (-265 kV) será superada fácilmente y evolucionará en un cortocircuito a frecuencia nominal del sistema.

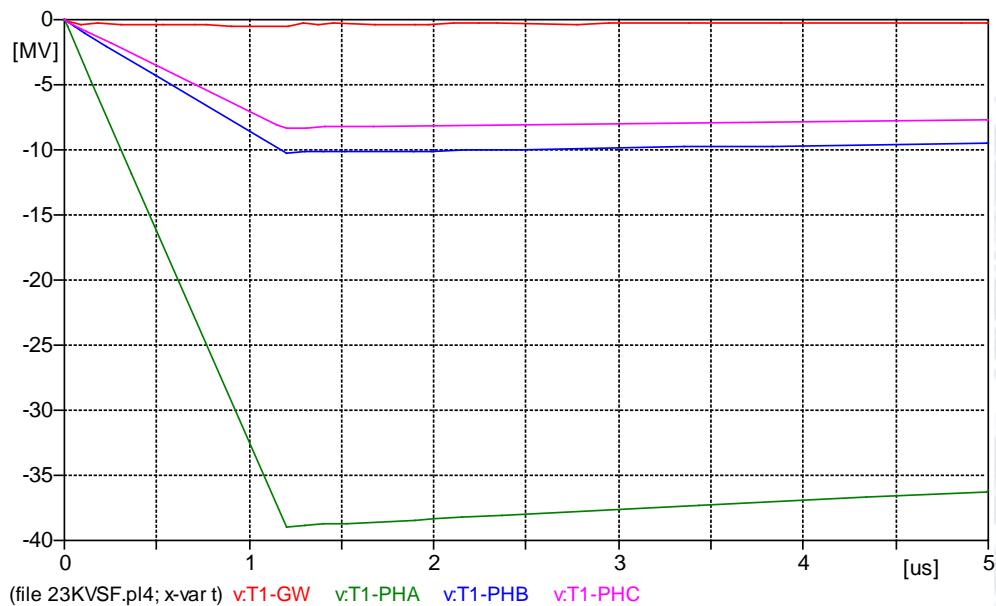


Figura 5. Tensión en los conductores de fase en el punto T1 para una descarga directa en la fase A de -100 kA de 1.2/50 microsegundos, no se incluye la actuación de apartarrayos.

Según la tabla 3, un rayo con una magnitud de 2 kAp tiene una probabilidad de presencia del 99.8% . La corriente que incide en el conductor de fase se divide en dos partes iguales, una que viaja en la dirección de la fuente y la otra en dirección de la carga. La descarga tiene mayor

probabilidad de incidir sobre el conductor que esta soportado por un aislador en el poste y como se supone que no hay ningún apartarrayos , entonces no hay división de corriente hacia la tierra, lo mismo ocurrirá si la descarga cae en el conductor de fase en algún punto sobre el claro de la línea. Para este caso en la figura 6 se muestra que la magnitud pico de la sobretensión tiene un valor de -390 kVp. Por lo tanto, el flameo de los aisladores estará presente.

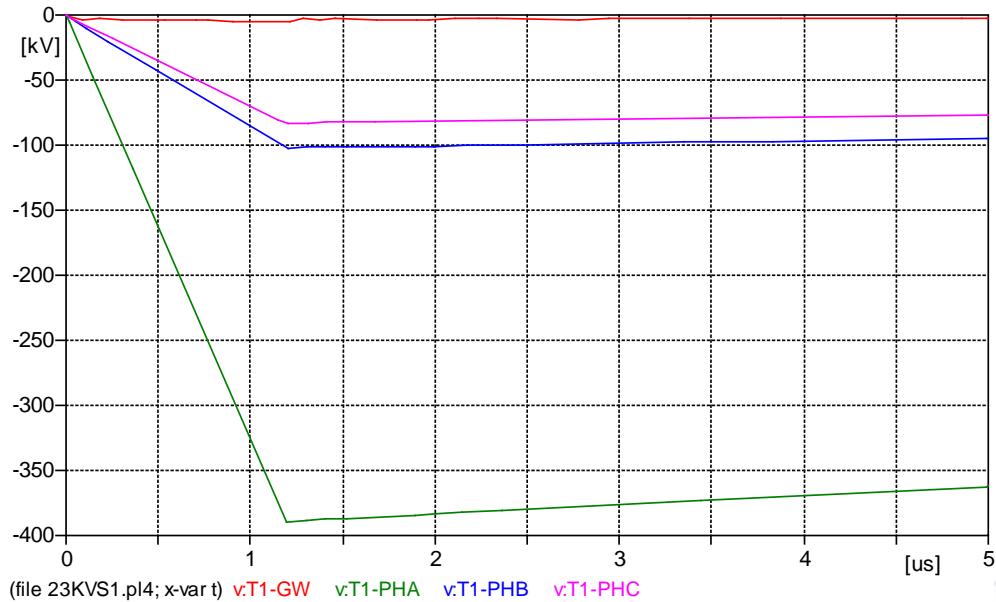


Figura 6. Tensión en los conductores de fase en el punto T1 para una descarga directa en la fase A de -2 kA de 1.2/50 microsegundos sin la actuación de apartarrayos.

Los sistemas de distribución urbanos normalmente son radiales, su red troncal tiene varios ramales sin embargo, antes de que alguna reflexión de la señal pueda provocar problemas de sobretensión, el aislamiento localizado cerca del punto de incidencia de la descarga ya ha sido esforzado debido a las cortas distancias. Esta misma situación es tratada de manera diferente para los sistemas de transmisión o subtransmisión con mayores longitudes y niveles de tensión.

La velocidad de propagación de la señal es de 299500 km/h y se calcula a partir de los datos de parámetros modales utilizando el ATP. Además, la corriente no puede provocar una sobretensión instantánea, de tal manera que la tensión alcanzará su valor pico en 1.2 microsegundos a una distancia d sobre la línea partiendo del punto de incidencia:

$$d = (299500 \text{ km/s}) (1.2 \mu\text{s}) = 360 \text{ m}, \quad (5)$$

por lo tanto, -680 Ap (según la figura 6) provocará una sobretensión de -265 kVp que aparecerá en un tiempo de:

$$1.2 \mu\text{s} \left(\frac{680 \text{ A}}{1 \text{ kA}} \right) = 0.816 \mu\text{s}, \quad (6)$$

y dicha sobretensión se localizará a una distancia D a partir del punto de incidencia:

$$D = 360 \text{ m} \left(\frac{0.816 \mu\text{s}}{1.2 \mu\text{s}} \right) = 245 \text{ m}. \quad (7)$$

Es decir, durante la incidencia de un rayo con una de magnitud -2 kAp se tendrá una sobretensión de -265 kVp a una distancia de aproximadamente seis claros interpostales después del punto de incidencia, considerando separaciones interpostales urbanas de 40 metros que soportan conductor semiaislado o 50 m soportando conductor desnudo. También se muestra la tensión inducida en T1 de las fases B y C debido a su cercanía con la fase A sin considerar la acción de apartarrayos, ésta alcanza un valor de -100kVp, véase la figura 6.

La simulación complementaria al caso anterior (figura 6) consiste en hacer incidir en una fase del punto T1 la onda de corriente de -1 kA (la mitad de la corriente de un rayo de -2 kA), pero ahora se incluye el efecto del apartarrayo. La tabla 1 muestra que las opciones para la selección de los apartarrayos de nuestra red tienen tensiones nominales de 18, 21 y 24 kV. En la figura 7 se observa la sobretensión de la fase C (PHC) en el punto T1, cuando en T1 se conecta un tipo de apartarrayos a la vez con las tensiones nominales mencionadas y se inyecta una corriente en la fase C de -1 kAp con un frente de onda normalizado de 1.2/50 microsegundos. La menor protección ocurre cuando se selecciona un apartarrayo de tensión nominal de 24 kV, en este caso la sobretensión ligeramente superan los -40 kVp.

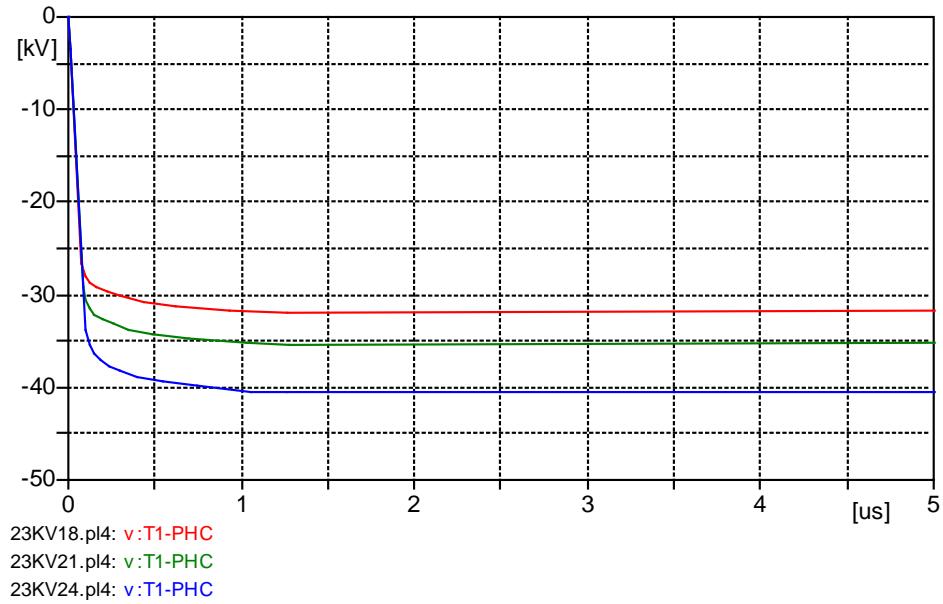


Figura 7. Sobretenión en el punto T1 considerando un apartarrayo conectado a la vez (18, 21 y 24) en el nodo T1. Inyección de corriente de -1 kAp en T1.

Cuando incide un rayo en el punto T1 sobre un conductor de fase, ese es el lugar ideal para ubicar un apartarrayos y proteger la red. En el archivo de simulación fácilmente puede cambiarse el punto de conexión del apartarrayos y observar su efecto ante la descarga atmosférica. Ahora el apartarrayos se coloca en el punto T2 cuando una onda de -1 kAp incide en T1. Se miden las tensiones en los puntos T2 y T3 considerando la actuación separada de los apartarrayos con valores nominales de 18, 21 y 24 kV. En la figura 8 se observa el comportamiento de las sobreteniones para este caso: en aproximadamente 0.3 y 0.7 microsegundos las señales alcanzan los puntos T2 y T3 respectivamente. En el punto T1 se obtienen -260 kV en un tiempo de 0.75 microsegundos.

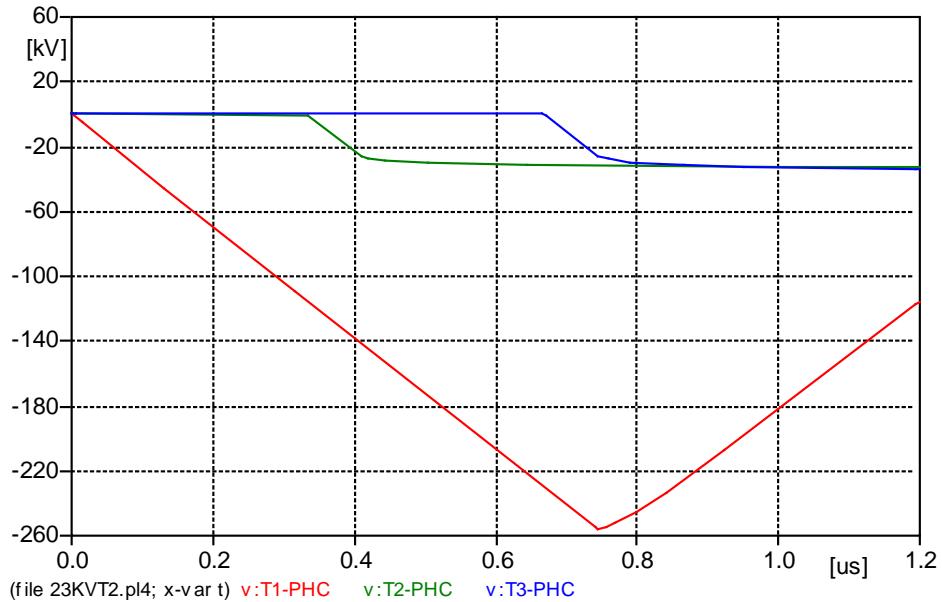


Figura 8. Señales de tensión debido a la incidencia de un rayo de -1 kA en el punto T1 considerando la conexión de un apartarrayos en los puntos T2 y T3. Se utiliza un apartarrayos de 18 kV.

La figura 8 complementa el cálculo realizado al inicio de esta sección con las expresiones (5), (6) y (7). En ella se observa que se presentará una sobretensión de aproximadamente -260 kVp en un tiempo de 0.75 microsegundos.

Probar con diferentes valores de resistencia al pie del poste (entre 5 y 25 ohms) no tiene un impacto considerable en el cálculo de la sobretensión por descarga directa a un conductor de fase. Sin embargo, afectará fuertemente cuando la descarga es directamente sobre el blindaje, dicha situación se estudia en la siguiente sección.

Inducción por descargas atmosféricas indirectas

El diseño típico de una línea de distribución no incluye blindaje aéreo pero en nuestro caso de simulación se considera la utilización de un conductor de guarda de calibre 1/0 AWG de aluminio con refuerzo, el cual es soportado por un poste de concreto mediante una bayoneta a 1.198 metros sobre la punta del poste (véase la figura 1). Este blindaje permite que las descargas atmosféricas directas al circuito de distribución se reduzcan severamente y en la simulación permite observar el efecto del blindaje sobre las sobretensiones de los conductores de fase.

La simulación se realiza considerando la incidencia de la descarga en el punto T5. En este punto intermedio de la línea se tiene la posibilidad de observar las sobretensiones debido a la división de la corriente en ambas direcciones de la línea y también por el conductor hacia la resistencia al pie del poste.

La figura 9 muestra al sobretensión obtenida debido a una descarga directa en el blindaje en el punto T5 con una magnitud de -200 kAp, este evento provocará una falla de aislamiento si no existen apartarrayos en ese punto, ya que la tensión inducida en las fases A y B alcanza un valor de -265 kVp. Nótese que la menor sobretensión inducida se presenta en la fase C (PHC), esto se debe a la asimetría de la configuración de la línea (la fase C es la más lejana al conductor de guarda). Una vez que la sobretensión alcanza el punto T6 o el punto T4 (a 100 m del punto de incidencia) se atenúa para tener un valor de -70 kVp en cualquiera de las fases y no representa ningún problema para el sistema de aislamiento de la red.

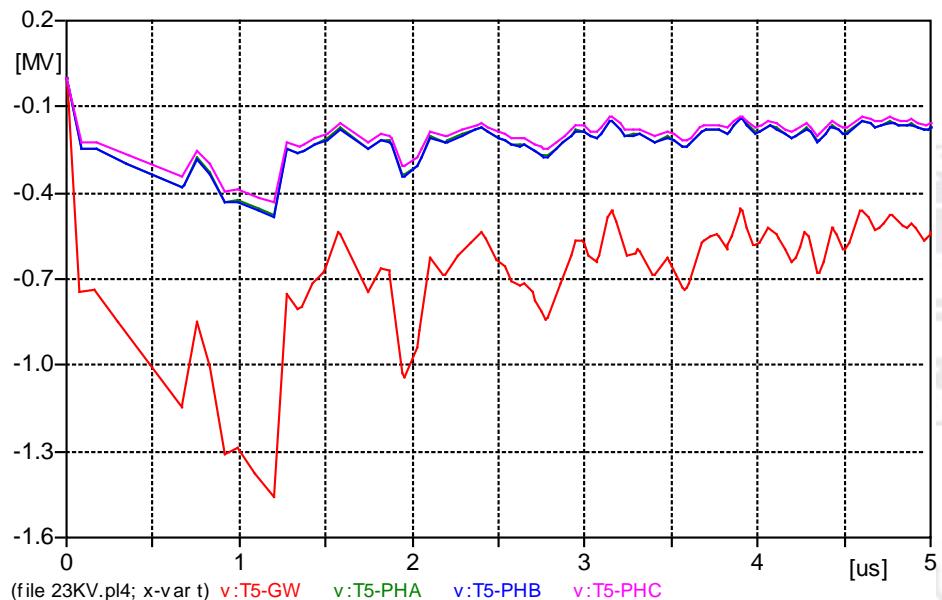


Figura 9. Tensión en los conductores de fase en el punto T5 para una descarga directa sobre el blindaje, con una magnitud de -200 kA con un frente de onda de 1.2/50 microsegundos. No se incluye la actuación de apartarrayos.

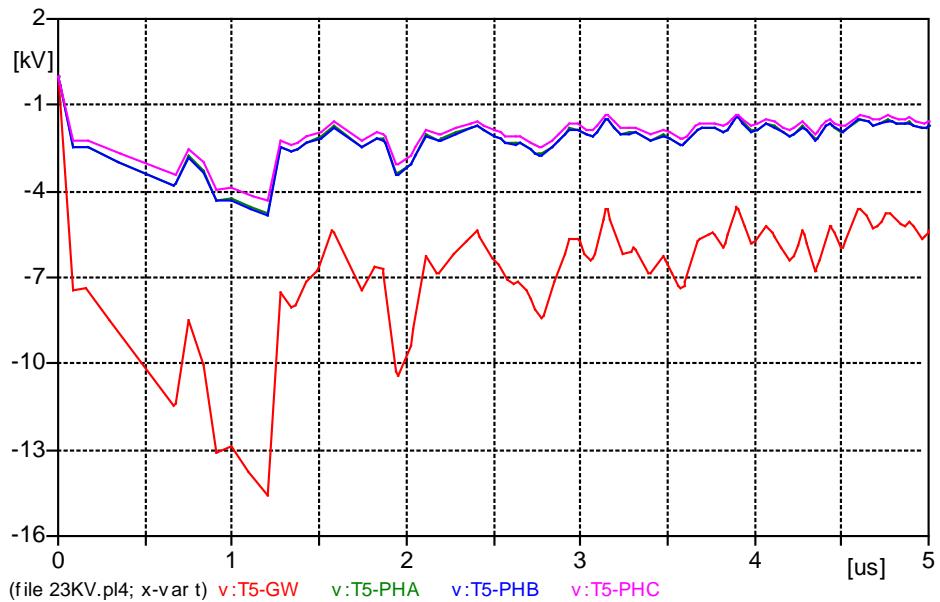


Figura 10. Tensión en los conductores de fase en el punto T5 para una descarga directa sobre el blindaje, con una magnitud de -2 kA con un frente de onda de 1.2/50 microsegundos. No se incluye la actuación de apartarrayos. Resistencia al pie del poste de 10 ohms.

La figura 10 muestra los valores de tensión en T5 cuando incide una descarga de -2 kAp en el hilo de guarda en T5. La tensión inducida no provoca problemas en los conductores de fase, las fases A y B más cercanas al blindaje son las más afectadas. Incluir los apartarrayos en esta simulación no provoca un cambio aparente en las magnitudes de las sobretensiones de las fases.

Aunque el objetivo del blindaje es proteger el circuito contra descargas atmosféricas directas también puede provocar que se tengan problemas de flameo inverso si la resistencia al pie del poste no tiene valores bajos.

En la figura 11 puede observarse la diferencia de potencial entre el blindaje y los conductores de fase en los puntos T4 y T5. Si la resistencia de aterrizamiento es de 25 ohms y la magnitud de la descarga en T5 es de -2 kAp, la tensión máxima entre la guarda y la fase A será de -33 kVp, dicho valor está muy cerca del umbral de operación del apartarrayos con tensión nominal de 18 kV. A partir de la simulación se obtiene que una descarga atmosférica de -26 kAp y un aterrizamiento de 10 ohms provocará una sobretensión de -265 kVp entre el hilo de guarda y la fase A, hará que el aislamiento falle por descarga inversa. Y solo se requieren -16 kAp para

obtener -265 kVp con una resistencia al pie del poste de 25 ohms. Estos eventos tienen una menor probabilidad de acuerdo a las tablas 2 y 3. Una vez que la sobretensión inducida ha recorrido 100 metros y llega al punto T4 ya no representa riesgo para los aisladores que soportan el conductor pero existe la posibilidad de hacer operar un apartarrayos instalado sobre la línea.

El valor de la sobretensión en el conductor de guarda es altamente dependiente del valor de la resistencia de aterrizamiento y de la magnitud de la descarga atmosférica. Un caso crítico muestra que pueden alcanzarse tensiones de hasta -3.3 MVp entre un conductor de fase y el hilo de guarda en T5, si la descarga que incide en T5 tienen una magnitud de -200 kAp y la resistencia al pie del poste es de 25 ohms.

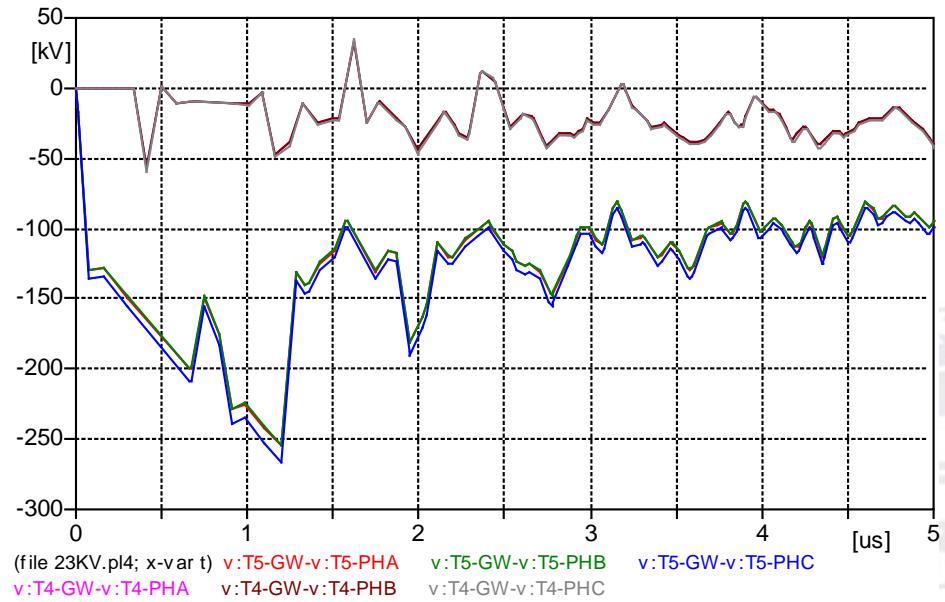


Figura 11. Diferencia de potencial entre conductores de fase y conductor de guarda. Flameo inverso. 10 ohms de Resistencia y descarga atmosférica de -26 kAp (-265kVp) en T5.

En la tabla 4 se han resumido los casos representativos de espaciamientos de los apartarrayos para descargas atmosféricas directas e indirectas en función de la magnitud del rayo y de la resistencia al pie del poste. Adoptando la recomendación de 10 ohms como resistencia al pie del poste y un hilo de guarda como se sugiere en el presente trabajo se observa que las descargas indirectas con magnitudes de -50 kAp son controladas eficientemente con la instalación de apartarrayos cada 198 metros mientras que las descargas indirectas con magnitudes de -2 kAp no

provocan problemas de aislamiento. También, se requiere de un espaciamiento de 244 m para descargas directas a conductores de fase cuando la resistencia al pie del poste es de 10 ohms y la magnitud de las descarga es de -2 kAp.

Tabla 4. Espaciamiento de apartarrayos sobre la línea de distribución en función de la magnitud de descarga y de la resistencia al pie del poste. NR significa no se requiere.

Magnitud del rayo en kAp	Probabilidad (%)	espaciamiento (m) por descarga directa a fase, 10 ohms de resistencia	Espaciamiento (m) por descarga directa al hilo de guarda			
			5 ohms de resistencia al pie del poste	10 ohms de resistencia al pie del poste	25 ohms de resistencia al pie del poste	50 ohms de resistencia al pie del poste
-2	99.8	244	NR	NR	NR	NR
-10	74	46	NR	NR	NR	353
-20	40	23	NR	NR	274	180
-50	7	9	254	198	109	70
-100	1	4.6	127	93	55	35

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Comisión Federal de Electricidad por el apoyo técnico recibido para la realización de esta investigación.

Conclusiones

Debido a que la magnitud de la sobretensión temporal de fase a tierra tiene un valor de 15.5 kV es conveniente la utilización de apartarrayos con una tensión nominal de 21 kV, la utilización de uno con tensión nominal de 18 kV tiene alta probabilidad de envejecer prematuramente o funcionar incorrectamente dentro de la red estudiada mientras que uno de 24 kV se tiene un menor nivel de protección.

Las sobretensiones por maniobra más severas en la red se deben principalmente a conexiones de bancos de capacitores dentro de las subestaciones de potencia. Estos valores pueden alcanzar hasta 35 kVp de fase a tierra, por lo que teniendo solo la restricción de las sobretensiones por maniobra pueden ser utilizados apartarrayos con tensiones nominales de 18, 21 o 24 kV.

El uso de apartarrayos con tensiones nominales de 18, 21 o 24 kV cumplen con el objetivo de limitar las sobretensiones de hasta 39 MVp generadas por descargas atmosféricas directas a conductores de fase, reduciéndolas a valores del orden de 39 kVp. Para que la protección sea efectiva el espaciamiento entre apartarrayos sobre la línea no debe ser mayor a 244 m, considerando la incidencia de un rayo con una magnitud de -2 kAp con una probabilidad de presencia del 99.8%.

Las descargas atmosféricas directas sobre el hilo de guarda con magnitudes menores a 26 kAp sugieren no instalar apartarrayos en la línea si la resistencia de aterrizamiento es menor a 10 ohms ya que las magnitudes de las sobretensiones son menores a 265 kVp. El flameo inverso no representa problema una vez que la onda ha recorrido 100 m sobre la línea. La selección del apartarrayos con tensión nominal de 21 kV es el adecuado para limitar las sobretensiones debidas a descargas indirectas en redes urbanas de 23 kV.

Referencias

- CFE. (2013). Comisión Federal de Electricidad. Normas de distribución y construcción de instalaciones aéreas en media y baja tensión.
- CIGRÉ. (1991). Working Group 33.01, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRÉ Technical Brochure no. 63, October 1991.
- Cisneros-Villalobos L., Gámez-Palacios M. (2002). Medición y simulación en ATP del transitorio de energización de quinta armónica del banco de capacitores de 85 kV de la subestación Remedios, RVP IEEE.
- Cisneros-Villalobos L., Hernández-Grimaldo J. L. (2007). Ferroresonancia en la red de 400 kV de la Subestación San Bernabé, medición y simulación en ATP, RVP IEEE.
- Cisneros-Villalobos L., Nakagawa-Ortíz J. F. (2004). Sobretensiones transitorias, temporales y por ferroresonancia en la S.E. Valle de México, medición y simulación en ATP, RVP IEEE.
- EPRI. (1982). Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book, 345 kV and above.
- G.E. (2013). Tranquell Surge Arrester, Product Selection And Application Guide.

- IEC 71-1. (1996). International Electrotechnical Commission. Insulation Co-ordination.
- IEEE. (1990). Working Group Report, Calculating the Lightning Performance of Distribution Lines, IEEE Transactions on Power Delivery vol. 5, no. 3, pp. 1408–1417, July 1990.
- IEEE. (2010). IEEE STD 1410-2010 Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines.
- IEEE. (2012). IEEE STD C62.11-2012 Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV).
- INEGI. (2013). <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=17> (11 de septiembre de 2013)
- LyFC. (2008). Luz y Fuerza del Centro. Reporte Anual de Operación de la Región Toluca-Cuernavaca.
- NOM-001-SEDE-2012. (2012). Norma Oficial Mexicana de Instalaciones Eléctricas.
- Ramírez Vázquez I., Hernández-Corona R., G. Montoya T., Romualdo-Torres C. (2004). Analysis of the mexican lightning activity monitored by nasa satellites, ELSEVIER, vol. 7, pp. 187-193.
- SENER. (2013). Secretaría de Energía. Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027.