

# PROTECCIÓN FRENTE A SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFÉRICO EN SUBESTACIONES 45/15kV

**A. Elices, L. Rouco**

Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), E.T.S. de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas  
Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid

**A. Vázquez, D. Vindel**

Unión Fenosa Distribución  
Capitán Haya 53, 28020 Madrid

## Resumen

Este artículo estudia la protección frente a sobretensiones de origen atmosférico de una subestación 45 kV/15 kV. El esquema original de protección está formado por un juego de pararrayos en las barras de 45 kV. Se presentarán las limitaciones de este esquema y se propondrán mejoras de fácil implantación y bajo coste. Este estudio está basado en la simulación de dichas sobretensiones con el programa EMTP.

**Palabras clave:** Sobretensiones de origen atmosférico, subestaciones, pararrayos, EMTP.

## 1. Introducción

Las descargas atmosféricas o rayos que caen sobre las líneas de alta (AT) o media tensión (MT), producen sobretensiones que se propagan hasta las subestaciones pudiendo deteriorar los aislamientos hasta el punto de producir su perforación. Los aislamientos de la aparatenta se deterioran cuando la tensión excede el nivel de aislamiento del equipo, aunque sea durante un intervalo de tiempo muy corto (el orden de magnitud para sobretensiones atmosféricas es de microsegundos). Si a consecuencia de un progresivo deterioro del aislamiento, se llega a la perforación del mismo, se produce una falta o cortocircuito con unas aportaciones de corriente muy elevadas capaces de provocar efectos devastadores. Estas aportaciones de corriente, que provienen de la energía del propio sistema eléctrico, calientan los devanados de la aparatenta hasta fundirlos. También hacen entrar en ebullición el aceite de refrigeración de los transformadores, liberando gases capaces de abombar o hacer explotar la cuba del transformador. La energía del rayo es pequeña comparada con la necesaria para producir estos efectos devastadores. Sin embargo, es suficiente para perforar el aislamiento. Para evitar esto, los equipos eléctricos se protegen mediante la instalación de pararrayos o autoválvulas en sus bornes o en las proximidades. Estos equipos limitan la tensión evitando superar el nivel de aislamiento del equipo.

El caso de estudio es una subestación 45kV/15kV alimentada por dos líneas aéreas de 45 kV. Sólo se considera la incidencia de rayos en las líneas de 45 kV, puesto que las líneas de salida de 15 kV son subterráneas. La subestación tiene una malla subterránea de puesta a tierra donde se conectan todas las carcasas de los equipos y las cubas de los transformadores. La protección frente a sobretensiones de origen atmosférico está formada por un juego de pararrayos situados en las barras de 45 kV (la parte de 15 kV no está protegida). Los juegos de pararrayos se conectan entre cada una de las fases y la red de tierras de la subestación. Es importante resaltar que el progresivo deterioro y la eventual perforación del aislamiento se produce entre los elementos en tensión (las fases) y los elementos conectados a la malla de tierras con tensión cero (carcasas, núcleos magnéticos de transformadores). El método de estudio consiste en la simulación por medio de ordenador a través de la versión ATP del programa de simulación de transitorios electromagnéticos EMTP [1].

El problema de la protección frente a sobretensiones de origen atmosférico se encuadra dentro de la simulación de transitorios de evolución rápida. Un artículo de referencia sobre el modelado de este tipo de transitorios es [2] y un libro de referencia es [3]. Para el modelado de picas y de puestas a tierra de distinta geometría es interesante la referencia [5].

La sección 2 presenta los modelos y las hipótesis de modelado del sistema. Los resultados del estudio del caso base se presentan en la sección 3. Del análisis de estos resultados, se observan deficiencias para

casos desfavorables y se proponen esquemas alternativos de protección en la sección 4. La sección 5 expone las conclusiones de este estudio.

## 2. Modelado

La figura 1 (izquierda) presenta el esquema unifilar de AT (45 kV) de la subestación (todo el modelado realizado es trifásico). Aunque también se ha modelado en detalle el esquema de MT (15 kV), aquí no se presenta por simplicidad y porque no afecta significativamente a las conclusiones del estudio.

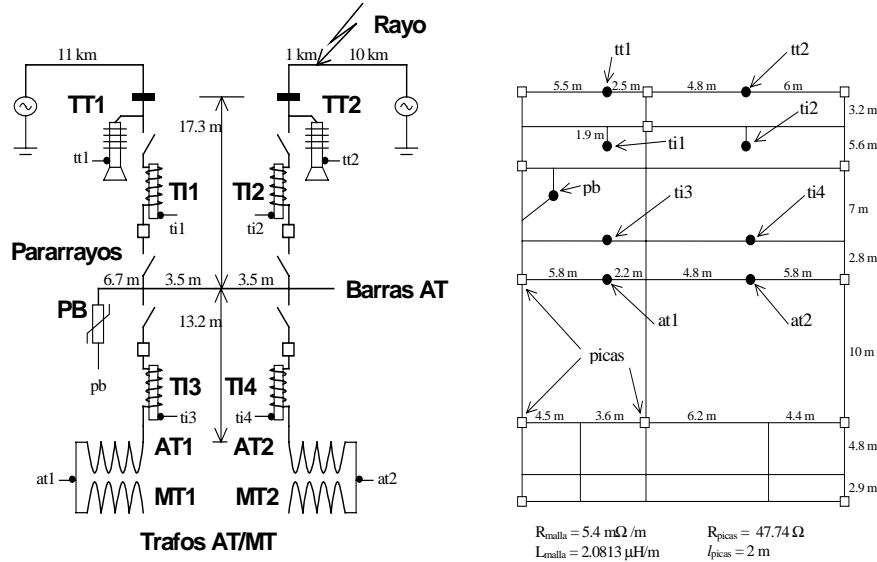


Figura 1: Esquema de la subestación (izquierda) y la red de puesta a tierra (derecha).

Se observan dos entradas de línea que se alimentan por medio de dos generadores. Los tramos de línea entre los generadores y la subestación son de 11 km de longitud. Esta longitud se ha elegido suficientemente grande para que las posibles reflexiones de la onda del rayo en los generadores, no interfieran en los tiempos considerados de simulación. Se considera que el rayo cae en la fase A, a 1 km de la subestación, en el tramo situado a la derecha en el esquema de la figura 1 (izquierda). A la entrada de cada línea se observan los siguientes elementos trifásicos: transformadores de tensión (TT1 y TT2), seccionadores, transformadores de intensidad (TI1 y TI2), interruptores hasta llegar a las barras de AT. En la parte izquierda de las barras se observa la ubicación de un juego de pararrayos (PB). Después de las barras de AT aparecen nuevamente seccionadores, interruptores y transformadores de intensidad (TI3 y TI4), hasta llegar a los transformadores de potencia de 50 MVA, 45 kV/15 kV, representados por sus devanados primario (AT1 y AT2) y secundario (MT1 y MT2). El grupo de conexión es YNyn-0.

La figura 1 (derecha) presenta la red de tierras enterrada a 0,5 m de profundidad por debajo de la subestación. Esta malla está formada por trozos de conductor horizontales (paralelos al suelo) y picas verticales (perpendiculares al suelo), representadas por cuadrados. La parte inferior de la maya corresponde a MT (15 kV). Es importante destacar que los transformadores de potencia, tensión e intensidad y los pararrayos tienen un terminal de “tierra”, que se conecta a la malla de tierra (la denominación de este terminal corresponde a la de cada elemento en minúsculas). En la malla de puesta a tierra se encuentran señalados los puntos donde se conectan cada uno de estos terminales. En el caso de los transformadores, este terminal está conectado a la carcasa y al núcleo magnético donde se arrollan los devanados. Los transformadores de potencia tienen también la estrella conectada al terminal de tierra. El envejecimiento y deterioro del aislamiento de cualquiera de estos equipos hasta una eventual perforación del mismo, se produce normalmente entre el devanado conectado a cada fase y el núcleo donde va arrollado. Por eso, los pararrayos están conectados entre cada fase y la malla de tierras.

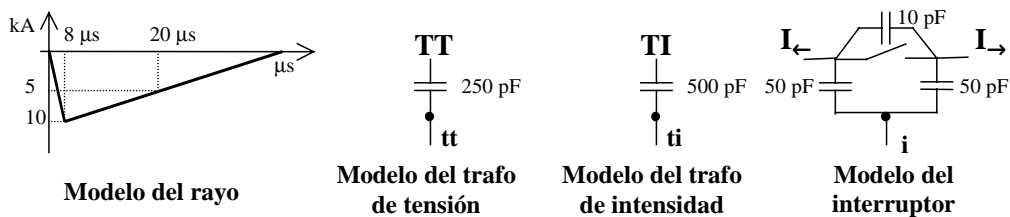


Figura 2: Forma de onda del rayo (izquierda), modelos del transformador de tensión (centro izquierda) e intensidad (centro derecha) y modelo de interruptor (derecha).

El modelo del rayo es una fuente de corriente negativa que se inyecta en el punto del sistema donde incide el rayo (ver figura 2). La forma de onda de la corriente inyectada está formada por dos tramos rectos. El primero es el frente de onda y el segundo es la cola. Por ejemplo, un rayo de 10 kA, 8/20  $\mu$ s es un rayo que en 8  $\mu$ s alcanza el valor de cresta de 10 kA y posteriormente tarda 20  $\mu$ s en alcanzar 5 kA (la mitad del valor de cresta).

Los modelos de los transformadores de tensión e intensidad se presentan en la figura 2. Se modela únicamente la capacidad entre los devanados y el núcleo conectado a tierra. El interruptor modela las capacidades entre los contactos y la carcasa y entre los contactos entre sí cuando están separados.

A pesar de que el modelado de los conductores de conexión dentro de la subestación se ha hecho en detalle, el efecto más significativo para el modelo son las distancias e autoinducciones. Valores de resistencia e inductancia de los tramos de conductor para cada fase (a 500 kHz) son del orden de 5 m $\Omega$ /m y 1  $\mu$ H/m en la parte de 45 kV y de 3 m $\Omega$ /m y 0,8  $\mu$ H/m en la parte de 15 kV. Las capacidades a tierra se han despreciado.

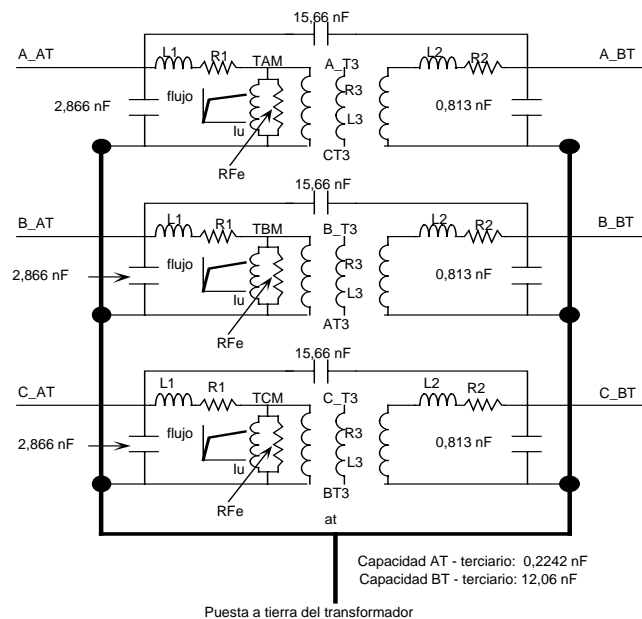


Figura 3: Modelo del transformador de potencia.

La figura 3 presenta el modelo utilizado para el transformador de potencia. Se utiliza el modelo de 50 Hz (con saturación del núcleo) para fijar el punto de trabajo y se introducen las capacidades de los devanados, para tener en cuenta los fenómenos de alta frecuencia. El devanado terciario se presenta en el gráfico sin conectar por simplicidad. Las características de los tres devanados del transformador de potencia son las siguientes: (1) Primario – secundario: 50 MVA, 45 kV/15 kV, grupo de conexión YNyn-0 y (2) Primario – terciario: 45 kV/11 kV, 17 MVA, grupo de conexión YNd-11. Los parámetros resultantes de los ensayos de cortocircuito son las resistencias óhmicas y las autoinducciones de dispersión de los devanados:  $R_1 = 63,3 \text{ m}\Omega$ ,  $R_2 = 8,9 \text{ m}\Omega$  y  $R_3 = 41,2 \text{ m}\Omega$ ,  $L_1 = 6,2 \text{ mH}$ ,  $L_2 = 0,693 \text{ mH}$ ,  $L_3 = 1,7 \text{ mH}$ . Los parámetros resultantes del ensayo de vacío se midieron desde el terciario y están referidos a este devanado. El primero es la resistencia de pérdidas en el hierro a tensión nominal  $R_{Fe} = 10819,67 \Omega$ . El segundo es la especificación de la saturación del núcleo magnético para 100% y 110% de la tensión nominal, tal y como se introduce en el EMTP en el modelo “SATURABLE TRANSFORMER COMPONENT” (en valores pico de flujo y corriente del terciario):  $\Phi_{100\%} = 49,549 \text{ Vs}$ ,  $I_{\mu 100\%} = 5,298 \text{ A}$  y  $\Phi_{110\%} = 54,52 \text{ Vs}$ ,  $I_{\mu 110\%} = 19,745 \text{ A}$ . Las capacidades a tierra de cada uno de los devanados (entre cada devanado y el núcleo), son  $C_1 = 2,866 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 0,813 \text{ nF}$ ,  $C_3 = 12,06 \text{ nF}$  (entre X\_T3 y at con X=A,B,C). Las capacidades entre devanados son:  $C_{12} = 15,66 \text{ nF}$ ,  $C_{13} = 0,2242 \text{ nF}$  (conectadas entre X\_AT y X\_T3 con X = A,B,C) y  $C_{23} = 10,3 \text{ nF}$  (conectadas entre X\_BT y X\_T3 con X = A,B,C).

El pararrayos utilizado en las barras de la subestación tiene una tensión asignada ( $U_r$ ) de 45 kV y otra de servicio continuo ( $U_c$ ) de 36,5 kV. Para ajustar el modelo se ha utilizado la subrutina ZNO FITTER del EMTP. La característica no lineal tensión-corriente introducida en esta subrutina es la siguiente: 94,9 kV (1,5 kA), 100 kV (3 kA), 104 kV (5 kA), 111 kV (10 kA), 122 kV (20 kA), 142 kV (40 kA). Los valores de corriente corresponden a los valores pico de impulsos tipo rayo 8/20  $\mu$ s.

Los conductores horizontales de la red de puesta a tierra se modelan calculando los parámetros por metro de un conductor enterrado. Estos parámetros se han tomado de [5] y se presentan en las ecuaciones (1),

$$R = \frac{\rho_c}{\pi(r_c^2 - (r_c - \delta)^2)}, L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{2h}{r_c}\right), C = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{2h}{r_c}\right)}, G = \frac{\pi}{\rho_T \ln\left(\frac{2h}{r_c}\right)} \quad (1)$$

donde  $\rho_c$  es la resistividad del conductor ( $1,7544 \times 10^{-8}$  para el cobre),  $\delta$  es la profundidad de penetración ( $\delta = (2\rho_c / (\mu_0\omega))^{1/2}$ ) calculada a 500 kHz,  $r_c$  es el radio del conductor enterrado (5,5 mm para una sección de 95 mm<sup>2</sup>),  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío ( $4\pi \times 10^{-7}$ ),  $h$  es la profundidad a la que está enterrado el conductor (0,5 m en este caso),  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del vacío ( $4\pi \times 9 \times 10^9$ )<sup>-1</sup>,  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica relativa del medio (típicamente 15) y  $\rho_T$  es la resistividad del terreno (típicamente en torno a 100  $\Omega$ m). Utilizando los valores indicados,  $R = 5,4$  m $\Omega$ /m,  $L = 2,0813$   $\mu$ H/m,  $C = 80,08$  pF/m y  $G = 0,006$  mho/m. Se desprecian C y G y se utilizan trozos de conductor modelados como resistencia en serie con inductancia.

Las picas se modelan por medio de una resistencia de acuerdo a la ecuación (2) tomada de [5],

$$R = \frac{\rho_T}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r_p} - 1 \right) \quad (2)$$

donde  $l$  y  $r_p$  son la longitud y el radio de la pica. Para  $l = 2$  m y  $r_c = 7,3$  mm, la resistencia de la pica es  $R = 47,74$   $\Omega$ . Este modelo no tiene en cuenta explícitamente que el transitorio es muy rápido (la resistencia no depende de la frecuencia). Sería necesario añadir una autoinducción en serie para considerarlo. Sin embargo, este modelo se ha considerado válido, porque el énfasis de este estudio es verificar las tensiones transferidas a los equipos eléctricos y no las tensiones alcanzadas por la puesta a tierra.

### 3. Resultados

Esta sección presenta los resultados de la simulación realizada con la versión ATP del programa EMTP del modelo descrito en la sección anterior. Este modelo corresponde al esquema de protección original de la subestación. Se define el nivel de aislamiento frente a impulsos tipo rayo o BIL, al valor máximo de sobretensión tipo rayo (8/20  $\mu$ s) al que se ensaya el equipo al salir de fábrica. La superación del BIL indica que el equipo está siendo sometido a sobretensiones para las que no ha sido ni diseñado, ni ensayado y por tanto, situaciones en las que no se puede garantizar la integridad de su aislamiento. Sin embargo, no se puede tampoco asegurar que el aislamiento se vaya a perforar, aunque semejantes sobretensiones contribuyan fuertemente a su deterioro y eventual perforación. El BIL se especifica para cada nivel de tensión. En este caso de estudio, el BIL para la parte de AT (45 kV) es 250 kV y para MT (15 kV) es de 95 kV.

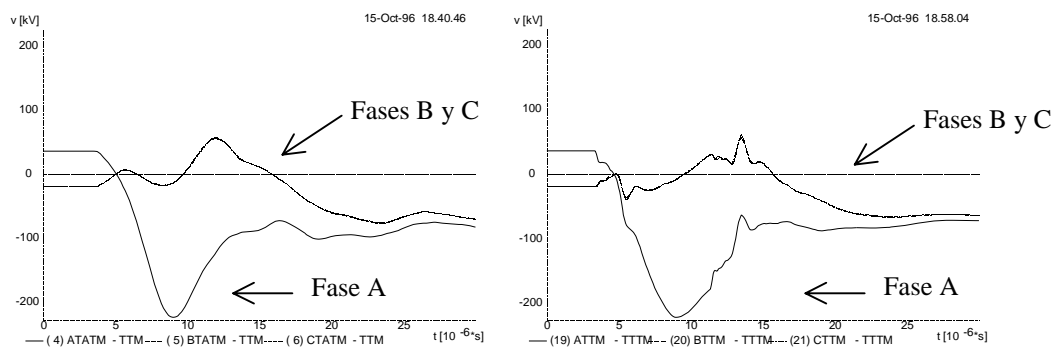


Figura 4: Tensiones en el transformador AT2 entre las fases A, B y C y el núcleo "at2" (izquierda) y tensiones en el transformador de tensión TT2 entre las fases A, B y C y el núcleo "tt2" (derecha), frente a un rayo de 10 kV, 8/20  $\mu$ s.

La figura 4 presenta las simulaciones correspondientes al transformador AT2 y el transformador de tensión TT2 frente a un rayo de 10 kV, 8/20  $\mu$ s (esta es la forma de onda normalizada que se utiliza en los ensayos de equipos al salir de fábrica). Estos puntos corresponden a los casos más desfavorables, puesto que están alejados del pararrayos. Se observa que la fase A, donde cae el rayo, es la que sufre la mayor sobretensión (la tensión es negativa, puesto que la intensidad del rayo también lo es). La tensión a la que limita el pararrayos (tensión residual) es aproximadamente 100 kV. Sin embargo, aunque no se supera el BIL, aparece en las simulaciones de la figura 4, más del doble de esta tensión (223 kV y 221 kV

respectivamente). Este hecho pone de manifiesto que alejar el equipo unos metros del pararrayos (30 m para AT2 y unos 35 m para TT2) puede significar un aumento considerable de la sobretensión.

La tabla I presenta las máximas sobretensiones (kV) fase – tierra experimentadas por cada uno de los elementos descritos en la figura 1 frente a distintos tipos de rayos. Al aumentar la intensidad del rayo, aumentan moderadamente las sobretensiones. Sin embargo, a medida que el frente de onda se hace más escarpado, las sobretensiones aumentan muy significativamente. Para un rayo de 10 kA, 1/20  $\mu$ s, se supera el BIL de prácticamente todos los equipos. En general, cuanto más alejados están los equipos del pararrayos, mayor es la sobretensión.

Tabla I: Sobretensiones en kV correspondientes a los puntos de la figura 1 (izquierda) con pararrayos en barras de AT.  $BIL_{AT}=250$  kV y  $BIL_{MT}=95$  kV.

Tipo de rayo	AT1	AT2	MT1	MT2	TT1	TT2	TI1	TI2	TI3	TI4
10 kA 8/20 $\mu$ s	-188.9	-223.1	-45.1	-50.1	-162.4	-221.6	-162.0	-216.2	-183.6	-217.3
10 kA 4/20 $\mu$ s	-215.8	-266.8	-63.8	-79.8	-186.5	-281.4	-186.3	-271.2	-209.2	-259.4
10 kA 1/20 $\mu$ s	-264.2	-330.6	-107.8	-138.5	-244.9	-504.2	-243.8	-483.8	-255.9	-316.5
15 kA 8/20 $\mu$ s	-208.9	-257.5	-52.4	-61.8	-181.4	-264.8	-180.8	-256.5	-203.2	-250.8
20 kA 8/20 $\mu$ s	-218.7	-279.5	-62.1	-74.5	-194.8	-300.8	-193.9	-289.7	-213.7	-272.1

Para expresar los valores de la tabla I con mayor claridad, se utiliza el margen de protección en lugar de los valores de sobretensión en kV. El margen de protección es la diferencia entre el BIL y la máxima sobretensión en valor absoluto, expresado en tanto por ciento del BIL (cuando las sobretensiones son superiores al BIL, aparecen márgenes de protección negativos):

$$MP(\%) = \frac{BIL - |V|_{max}}{BIL} 100 \quad (1)$$

Tabla II: Márgenes de protección correspondientes a los puntos de la figura 1 (izquierda), con pararrayos en barras de AT.

Tipo de rayo	AT1	AT2	MT1	MT2	TT1	TT2	TI1	TI2	TI3	TI4
10 kA 8/20 $\mu$ s	24.4	10.8	52.5	47.3	35.0	11.4	35.2	13.5	26.6	13.1
10 kA 4/20 $\mu$ s	13.7	-6.7	32.8	16.0	25.4	-12.6	25.5	-8.5	16.3	-3.8
10 kA 1/20 $\mu$ s	-5.7	-32.2	-13.5	-45.8	2.0	-101.7	2.5	-93.5	-2.4	-26.6
15 kA 8/20 $\mu$ s	16.4	-3.0	44.8	34.9	27.4	-5.9	27.7	-2.6	18.7	-0.3
20 kA 8/20 $\mu$ s	12.5	-11.8	34.6	21.6	22.1	-20.3	22.4	-15.9	14.5	-8.8

Las normas de pararrayos establecen que el margen de protección debe ser superior al 20%. La tabla II presenta los márgenes correspondientes a las sobretensiones de la tabla I. Se observa que para el tipo de rayo menos agresivo (10 kA, 8/20  $\mu$ s), hay elementos con márgenes inferiores al 20%. Para el resto de casos, los márgenes bajan o se hacen negativos. Este hecho pone de manifiesto que un esquema de protección basado sólo en pararrayos en barras de MT, puede resultar insuficiente frente a rayos de alta intensidad o frente de onda escarpado.

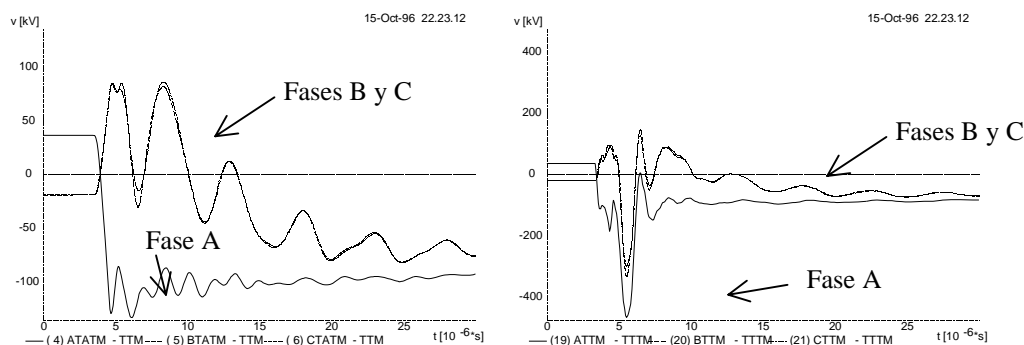


Figura 5: Tensiones en el transformador AT2 entre las fases A, B y C y el núcleo “at2” (izquierda) y tensiones en el transformador de tensión TT2 entre las fases A, B y C y el núcleo “tt2” (derecha), frente a un rayo de 10 kA, 1/20  $\mu$ s y con sendos pararrayos en bornes de los transformadores.

#### 4. Mejora de la protección

Esta sección presenta los resultados de dos esquemas alternativos para la mejora de la protección. Los equipos que interesa proteger más son los transformadores de potencia (son los más caros y los que producen mayor indisponibilidad de servicio). El primer esquema de protección mejorado consiste en

poner dos juegos de pararrayos lo más cerca posible de los transformadores de potencia, quitando el juego situado en las barras. Los pararrayos se montan a 2,4 m delante de cada transformador. La red de tierras subterránea también se prolonga 2,4 m y los pararrayos se conectan entre cada fase y la red de tierras. La figura 5 presenta la simulación correspondiente al rayo con el frente de onda más escarpado (10 kA, 1/20  $\mu$ s) en los puntos AT2 y TT2 de la figura 1. Como los pararrayos están situados muy cerca de AT2, la sobretensión de la fase A de AT2 (figura 5 izquierda) coincide aproximadamente con los 100 kV de tensión residual del pararrayos. Sin embargo, la severidad del rayo provoca una sobretensión desproporcionada (-467 kV) en el transformador de tensión TT2, tan sólo a unos 30 m del juego de pararrayos.

Conviene distinguir entre los equipos conectados aguas abajo del pararrayos y los conectados aguas arriba. En general, siempre estarán mejor protegidos los conectados aguas abajo, porque están sometidos a un impulso de tensión de onda casi cuadrada cuyo pico es la tensión residual del pararrayos. Los efectos de reflexión de las ondas de tensión y corriente pueden provocar que la tensión residual del pararrayos se doble, dependiendo de la distancia de separación entre el pararrayos y el equipo. Sin embargo, no es esperable que la tensión residual llegue a triplicarse. Los equipos conectados aguas arriba del pararrayos, sufren la suma de la onda incidente de tensión del rayo, más la reflejada por el pararrayos al imponer que la tensión del nodo donde está conectado, sea su tensión residual. Estas ondas viajan a la velocidad de la luz (300 m/ $\mu$ s). La onda reflejada de tensión es ligeramente menor a la incidente (hay que restar la tensión residual del pararrayos) pero de signo contrario. A pesar de que ambas ondas se cancelan, pueden producirse picos muy elevados (ver figura 5 a la derecha) al componer los frentes de onda de las ondas incidente y reflejada. Una vez que han pasado los frentes de onda, la tensión final es aproximadamente la tensión residual del pararrayos.

La tabla III presenta los márgenes de protección para el primer esquema mejorado de protección. Se observa que los devanados de AT de los transformadores de potencia están bien protegidos por los pararrayos conectados en sus bornes. Sin embargo, para rayos con frente de onda escarpado o elevada intensidad puede haber aparataje insuficientemente protegida e incluso los propios devanados de MT de los transformadores. Si se compara la tabla III con la tabla II, el primer esquema mejora considerablemente el esquema original de protección de la subestación.

Tabla III: Márgenes de protección correspondientes a los puntos de la figura 1 (izquierda), con pararrayos en bornes de AT1 y AT2.

Tipo de rayo	AT1	AT2	MT1	MT2	TT1	TT2	TI1	TI2	TI3	TI4
10 kA 8/20 $\mu$ s	57.6	56.4	61.6	68.0	50.1	35.1	50.2	37.4	57.8	56.9
10 kA 4/20 $\mu$ s	53.5	51.8	66.8	66.1	41.4	13.4	41.4	18.1	54.7	53.6
10 kA 1/20 $\mu$ s	47.6	46.9	9.7	14.0	-5.3	-86.8	-4.8	-78.6	50.2	49.5
15 kA 8/20 $\mu$ s	55.0	53.3	62.9	70.6	44.0	22.6	44.1	26.1	55.5	53.2
20 kA 8/20 $\mu$ s	53.3	49.8	66.8	69.1	39.6	9.7	39.9	14.4	53.3	50.0

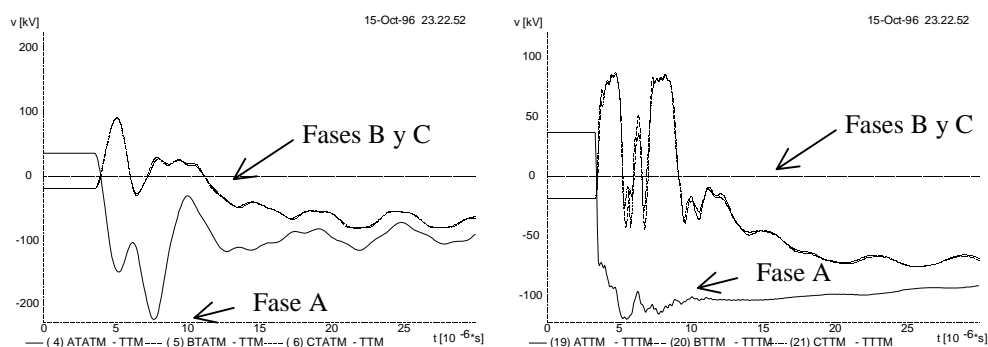


Figura 6: Tensiones en el transformador AT2 entre las fases A, B y C y el núcleo "at2" (izquierda) y tensiones en el transformador de tensión TT2 entre las fases A, B y C y el núcleo "tt2" (derecha), frente a un rayo de 10 kA, 1/20  $\mu$ s y con sendos pararrayos en las entradas de línea de 45 kV.

El segundo esquema mejorado de protección consiste en poner un juego de pararrayos en cada una de las entradas de línea de 45 kV (justo antes de los transformadores de tensión TT1 y TT2). Estos pararrayos se instalan entre cada una de las fases de entrada y la malla de tierras. La figura 6 presenta las sobretensiones en AT2 y TT2 frente al rayo más desfavorable (10 kA, 1/20  $\mu$ s). Se observa ahora, que la sobretensión que sufre el transformador de tensión (TT2) es aproximadamente la tensión residual del pararrayos (100 kV). Sin embargo, la sobretensión del transformador de potencia es algo superior al doble, por efecto

de la distancia de separación. Los pararrayos en las entradas de línea actúan como un escudo protector que impide que la onda incidente del rayo penetre dentro de la subestación.

La tabla IV presenta los márgenes de protección de este esquema de protección. En este caso, todos los márgenes de protección para todos los tipos de rayo son positivos. Sin embargo, para rayos de frente de onda muy escarpado los márgenes de protección pueden ser insuficientes. Especialmente en los transformadores de potencia tanto en AT como MT. El aumento de la pendiente del frente de onda determina un deterioro muy significativo de los márgenes de protección. Por ejemplo, si se comparan los márgenes de protección en los lados de AT y MT de los transformadores de potencia para distintos rayos, el de frente de onda más escarpado (10 kA 1/20  $\mu$ s) produce una caída drástica en los márgenes de protección.

Tabla IV: márgenes de protección correspondientes a los puntos de la figura 1 (izquierda), con pararrayos en las entradas de línea de 45 kV.

Tipo de rayo	AT1	AT2	MT1	MT2	TT1	TT2	TI1	TI2	TI3	TI4
10 kA 8/20 $\mu$ s	34.8	32.4	54.8	56.6	60.0	56.7	55.3	51.0	36.7	34.6
10 kA 4/20 $\mu$ s	27.7	24.3	56.7	54.6	59.0	54.6	51.7	42.2	29.8	26.5
10 kA 1/20 $\mu$ s	15.6	10.5	1.8	2.5	56.3	52.2	44.1	13.3	19.0	14.3
15 kA 8/20 $\mu$ s	29.0	25.0	55.7	55.8	59.0	54.6	53.0	46.8	31.1	27.6
20 kA 8/20 $\mu$ s	26.9	22.4	56.7	55.2	58.2	51.7	51.8	43.9	29.0	24.8

El esquema más seguro de protección sería poner juegos de pararrayos en bornes de cada transformador y en todas las entradas de línea de AT. Este esquema daría unos resultados óptimos. Este estudio no ha considerado que los rayos puedan caer en las líneas de MT (todas las salidas son cables subterráneos), pero también es necesario proteger en MT. Una regla del dedo gordo sería poner también pararrayos en bornes de MT de los transformadores y en las salidas de línea.

## 5. Conclusiones

La protección de una subestación frente a sobretensiones de origen atmosférico mediante la instalación de un juego de pararrayos en las barras de alta tensión puede resultar insuficiente frente a rayos con frente de onda escarpado o elevado valor de cresta. La instalación de pararrayos en bornes de los transformadores de potencia asegura una buena protección de los mismos. Sin embargo, en casos desfavorables, se pueden dañar otros elementos del aparellaje de la subestación, especialmente aquellos que están más alejados del pararrayos. La instalación de pararrayos en todas las entradas de línea de la subestación, protege tanto el aparellaje como los transformadores de potencia. Sin embargo, estos últimos pueden tener un margen de protección demasiado pequeño en casos desfavorables. La solución óptima consistiría en poner juegos de pararrayos tanto en todas las entradas de línea de la subestación, como en los bornes de todos los transformadores de potencia. La minimización de las distancias en una subestación (diseños compactos) constituye una solución alternativa.

## Agradecimientos

Los resultados presentados en el presente artículo fueron obtenidos en un proyecto de investigación patrocinado por Unión Fenosa sobre "Protección frente a sobretensiones de origen atmosférico".

## Referencias

- [1] "Alternative Transient Program (ATP) Rule Book", Canadian / American EMTP User Group, 1992.
- [2] A. F. Imece, D. W. Durbak, H. Elahi, S. Kolluri, A. Lux, D. Mader, T. E. McDermott, A. Morched, A. M. Mousa, R. Natarajan, L. Rugeles, and E. Tarasiewicz, "Modeling guidelines for fast front transients", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, No. 1, pp. 493-506, 1996.
- [3] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd edition ed: John Willey and Sons Inc, 1991.
- [4] M. Ramamoorthy, M. M. B. Narayanan, S. Parameswaran, and D. Mukhedkar, "Transient performance of grounding grids", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, No. 4, October, pp. 2053-2059, 1989.
- [5] A. Elices, L. Rouco, and J. Barquín, "Transient response of grounding system components", *Proceedings of the 32nd Universities Power Engineering Conference UPEC'97, Manchester, 10-12 September*, pp. 355-358, 1997.