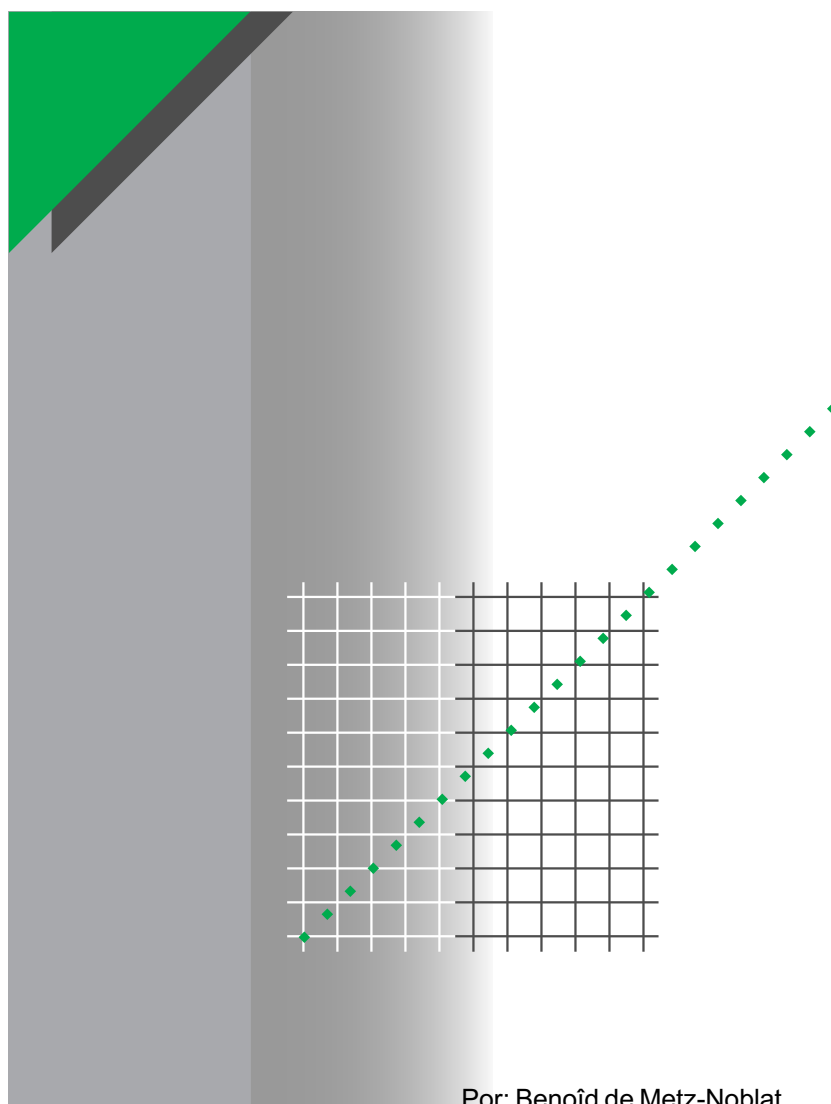


Cuaderno Técnico nº 168

El rayo y las instalaciones eléctricas en AT



Por: Benoît de Metz-Noblat

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» del **Schneider Electric**.

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 168 de Schneider Electric».



Benoît de Metz-Noblat

Ingeniero ESE, trabajó en el Grupo Saint-Gobain como ingeniero de investigación. Después pasó a mantenimiento y a puestos de producción.

Entró en Merlin Gerin en 1986. Actualmente pertenece al Servicio de Estudios de Redes en el que es responsable de un grupo de estudio de las sobretensiones, armónicos y estabilidad dinámica de redes.

cuaderno técnico nº 168

El rayo y las instalaciones eléctricas en AT

Por: Benoît de Metz-Noblat

Trad: E. Milá

Edición francesa: julio 1993

Versión española: octubre 1998

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

Terminología

BIL

(Basic Impulse Level): nivel de aislamiento a tensión de choque de un aparato.

CBEM

Centro Bajo Envolvente Metálica, también denominado centro blindado en MTB y aparamenta bajo envolvente metálica en aislante gaseoso, según el vocabulario internacional (VEI 441-12-05) corrientemente denominado **GIS** (Gas Insulated Switchgear) o aparamenta de mando, protección y seccionamiento, colocado en una envolvente metálica estanca unida a tierra y aislada en una atmósfera gaseosa (en general de SF₆).

No debe confundirse con la aparamenta blindada (Metal-clad Switchgear) donde los materiales están situados dentro de distintos compartimientos, con envolventes metálicos (CEI 298).

MCOV

(Maximum Continuous Operating Voltage): tensión máxima permanente que ha de soportar un pararrayos.

Tensión de paso

Tensión susceptible de aparecer entre los dos pies de un peatón.

Atención: Los valores de tensión, especialmente de las tensiones alternas superiores a 1 000 V, han sido objeto de diferentes clasificaciones según las normas, reglamentos, leyes y otras especificaciones particulares, como las de ciertos distribuidores de energía.

■ La publicación CEI 71 precisa las gamas de tensión más elevadas para el material:

gama A: $1 \text{ kV} < U < 52 \text{ kV}$,

gama B: $52 \text{ kV} \leq U < 300 \text{ kV}$,

gama C: $U \geq 300 \text{ kV}$.

Se prevé una revisión que presenta solamente dos gamas:

gama I: $1 \text{ kV} < U \leq 245 \text{ kV}$,

gama II: $U > 245 \text{ kV}$.

■ El CENELEC (Comisión Europea de Normalización Electrotécnica) en su circular del 27 julio 1992 precisa:

MT: $1 \text{ kV} < U \leq 35 \text{ kV}$,

HT: $U > 35 \text{ kV}$.

■ Un Decreto francés de 14-11-88 define dos dominios de tensión:

MTA: $1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$,

MTB: $U > 50 \text{ kV}$.

Nota: Las denominaciones MAT (muy alta tensión) y UAT (ultra alta tensión) no están definidas en ninguna norma. En este Cuaderno Técnico, MAT se emplea para las tensiones superiores a 300 kV.

El rayo y las instalaciones eléctricas en AT

Índice

1 Introducción		p. 6
2 El fenómeno «rayo»	Generalidades	p. 7
	Características principales	p. 7
	Predicción de rayo	p. 8
	Mecanismo de impacto y modelo electrogeométrico	p. 9
3 El rayo y las instalaciones eléctricas	El rayo sobre una línea	p. 10
	Propagación de la onda	p. 11
	Efectos debidos al rayo	p. 12
4 Medios de protección	Principios generales	p. 13
	Protección primer nivel	p. 13
	Protección segundo nivel	p. 14
	Protección tercer nivel	p. 15
	Distancia de protección	p. 15
	Explotación de las redes e indisponibilidad	p. 16
	Normas	p. 19
5 Ejemplo de estudio de rayo	Generalidades	p. 22
	Método de cálculo	p. 22
	Modelización del parque	p. 22
	Simulaciones deterministas	p. 23
	Cálculo estadístico de la frecuencia de rayo y del riesgo asociado	p. 24
	Interpretación de estos cálculos	p. 24
6 Conclusión		p. 26
Bibliografía		p. 27

Este Cuaderno Técnico tiene varios objetivos:

- presentar una síntesis global sobre el fenómeno «rayo» y sobre sus efectos en las instalaciones eléctricas,
- indicar los medios operacionales actuales de protección con objeto de limitar sus efectos nefastos,
- evocar los problemas de continuidad del servicio,
- mostrar los puntos principales del desarrollo de los estudios del rayo a partir de un ejemplo sobre una instalación MAT, desarrollado por el Servicio de Estudios de Redes de Merlin Gerin.

Se ha orientado particularmente al transporte y distribución de electricidad, más concretamente, a redes de MTA y MTB, para las que el rayo debe tenerse en cuenta en la coordinación del aislamiento al proyectar las instalaciones. El aspecto de la BT es también considerado, aunque más brevemente.

Este documento se completa con una corta bibliografía.

1 Introducción

El rayo es un fenómeno perturbador importante del funcionamiento de todas las instalaciones eléctricas, por varios motivos:

- afecta a toda la gama de potencias y todos los niveles de tensión: desde el transporte de energía a MAT hasta los circuitos integrados, pasando por las alimentaciones en baja tensión y las transmisiones de datos,

- puede ser el origen de perturbaciones momentáneas en la continuidad del servicio, por la degradación de la calidad de las alimentaciones,

- puede causar la destrucción de materiales y, como consecuencia, largas interrupciones del servicio de las instalaciones,

- constituye un peligro para las personas (tensión de paso, elevación del potencial de las masas y del circuito de tierra).

El rayo es siempre una causa de perturbaciones en la utilización de la electricidad.

Es de considerar la exigencia reciente y cada vez más creciente, de la calidad de los sistemas eléctricos (fiabilidad, disponibilidad, continuidad de servicio) así como la presión permanente de minimizar los costes de producción y utilización de la electricidad. Todo lo anterior conduce a considerar al rayo como un «punto fuerte» en la mejora de todos los factores de calidad mencionados anteriormente. Es por ello que esta mejora forma parte de las preocupaciones prioritarias tanto de los distribuidores de la energía eléctrica como de los fabricantes de aparataje, oficinas de proyectos e ingeniería o instaladores.

Un estudio de los efectos del rayo se desarrolla en dos etapas pero precisa, previamente, de un buen conocimiento del fenómeno.

Por todo ello, se han emprendido internacionalmente trabajos importantes, en particular por compañías distribuidoras de electricidad a partir de los años 70, que permiten un conocimiento suficiente de estos mecanismos.

Estas dos etapas tienen como objetivo:

- prever lo que puede pasar sobre una instalación determinada y preconizar soluciones de mejora. Ello es posible por la utilización de programas lógicos especializados que simulan el comportamiento de las instalaciones, validados por la experiencia,

- seguidamente realizar un estudio técnico-económico de coordinación del aislamiento teniendo en cuenta el coste de las instalaciones, del mantenimiento y de las interrupciones de servicio.

En resumen: la coordinación del aislamiento consiste en definir, a partir de los niveles de tensión y sobretensión susceptibles de estar presentes en una instalación, uno o varios niveles de protección contra las sobretensiones para seguidamente poder elegir los materiales de la instalación y los dispositivos de protección. Este tema se trata en el Cuaderno Técnico nº 151.

2 El fenómeno «rayo»

En este capítulo, a continuación de algunas generalidades sobre los fenómenos eléctricos atmosféricos, se presentan:

- las características principales del rayo desde el punto de vista del ingeniero,
- los datos y detalles de predicción,
- finalmente, el mecanismo del impacto por el modelo electrogeométrico.

Generalidades

La tierra y la electrosfera, zona conductora de la atmósfera (con una altura del orden de 50 a 100 km), constituyen un condensador esférico natural que se carga por ionización, originando un campo eléctrico dirigido hacia el suelo, del orden de varios centenares de voltios/metro.

Como el aire es débilmente conductor, existe una corriente de conducción permanente asociada, del orden de 1500 A para todo el globo terráqueo. El equilibrio eléctrico a esta corriente queda establecido con descargas por puntas, por las lluvias, y descargas de rayos.

La formación de las nubes, masas de agua en forma de vapor, se acompaña de fenómenos electrostáticos de separación de cargas: las partículas ligeras, cargadas positivamente, son arrastradas por las corrientes de aire ascendentes y las partículas pesadas, cargadas negativamente, caen por la acción de su propio peso. También se ha llegado a la conclusión de que en la base de las nubes se encuentran unos núcleos de cargas positivas concentrados en las zonas donde se producen lluvias intensas.

Globalmente, a escala macroscópica, se crea un dipolo. Cuando el gradiente límite de rigidez dieléctrica se supera, se produce una descarga en el seno de la nube, entre nubes o entre las nubes y el suelo.

En el último de los casos, hablamos de la producción de un rayo.

El campo eléctrico nube-suelo puede alcanzar -15 a -20 kV/metro sobre un suelo plano. Pero la presencia de obstáculos, deforma y aumenta localmente este campo con factores de 10 a 100 y hasta 1 000 según la configuración de las irregularidades (fenómeno denominado «efecto de punta»). El gradiente de ionización del aire atmosférico es entonces de alrededor de 30 kV/m y se producen descargas por efecto corona. Sobre objetos de grandes dimensiones (torres, chimeneas, columnas) pueden originarse descargas de rayo o producirse la aireación de los mismos.

Clasificación de las descargas de rayo

Una descarga de rayo -DdR- entre nubes y tierra, se descompone en dos fases: el desarrollo de una predescarga o trazadora (leader en inglés), canal ionizado, que provoca la descarga del rayo propiamente dicho, descarga de arco visible de corriente intensa.

Los DdR se distinguen o clasifican según dos criterios principales, que son sus sentidos de desplazamiento y su polaridad.

■ DdR descendentes: desarrollo del trazador de las nubes al suelo (caso de terrenos planos),

■ DdR ascendentes: desarrollo del trazador del suelo hacia las nubes. (caso de terrenos montañosos),

■ DdR negativas: cuando la parte negativa de la nube se descarga (80% de los casos, en países templados).

■ DdR positivas: cuando se producen por eliminación de la parte positiva.

Características principales

Forma de onda

El fenómeno físico del rayo corresponde a una fuente de corriente de impulsos, que pueda generar una serie de descargas de una cantidad de electricidad determinada en un intervalo de tiempo corto.

La forma de onda real observada es muy variable: consiste en un frente de elevada pendiente hasta la amplitud máxima (de algunos microsegundos hasta unos 20 microsegundos) seguido de una cola de valores decrecientes con una duración de algunas decenas de microsegundos (**figura 1**).

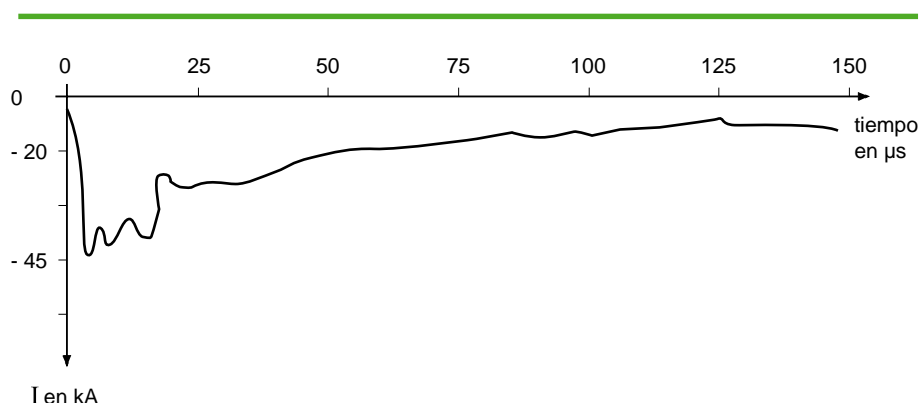


Fig. 1: Oscilograma de una corriente de rayo.

La banda espectral asociada se extiende desde unos 10 kHz a varios MHz.

Amplitud de las descargas de rayo

La distribución estadística experimental de las descargas de rayo, en amplitud, corresponde a una ley normal, según la **figura 2**.

Pendiente del frente

La distribución, según la pendiente del frente, de las descargas del rayo corresponde a la **figura 3**.

Para los estudios de rayo se han elegido, en general, los siguientes valores:

- amplitudes de 100 kA o 200 kA a las que les han asociado respectivamente una probabilidad de producirse de 5% y 1% respectivamente,

- forma de onda triangular: tiempo de crecimiento 2 μ s y tiempo de decrecimiento un valor mitad de 50 μ s con un frente de 50 a 100 kA/ μ s.

Nota: este tiempo de frente es diferente del de la onda normalizada (1,2 μ s) definida para los ensayos de laboratorio (CEI 60).

Carga de las descargas de rayo

Como valor medio, esta carga es de algunas decenas de culombios, llegando a rebasar 300 C.

Predicción de rayo

La implantación en Francia de una red de localización de las descargas por tormentas data de 1986 con la creación de una organización llamada Météorage.

Météorage funciona con una red de estaciones de detección repartidas estratégicamente sobre el territorio nacional francés, unidas a los ordenadores de un centro operacional sito en París.

Estas estaciones, distantes de 200 a 300 km miden las ondas electromagnéticas creadas por las descargas de las tormentas a partir de las informaciones siguientes:

- localización,
- temporización (fecha y fijación al milisegundo),
- polaridad de la onda (> 0, < 0),

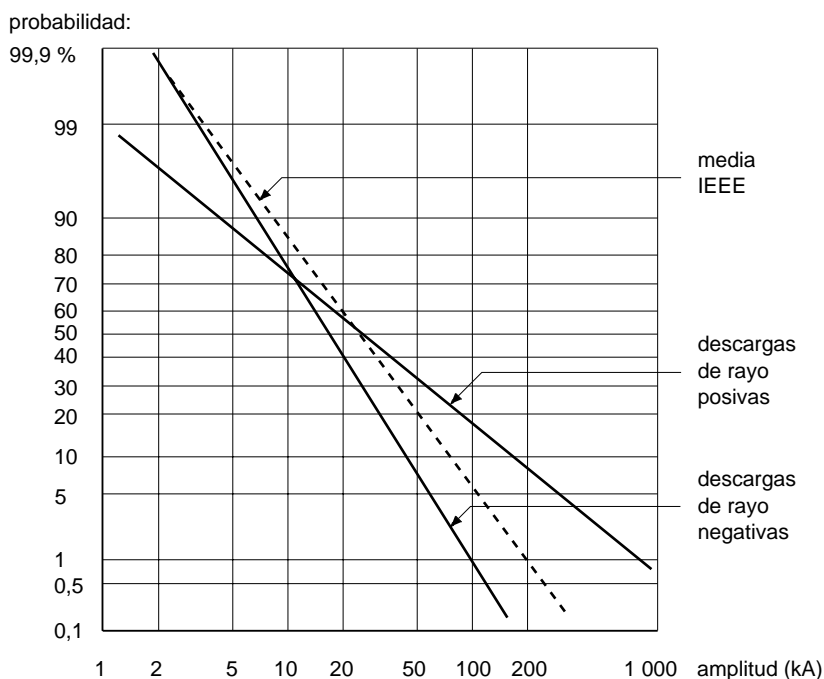


Fig. 2: Distribución estadística experimental, en amplitud, de las descargas de rayo positivas y negativas, según IEEE.

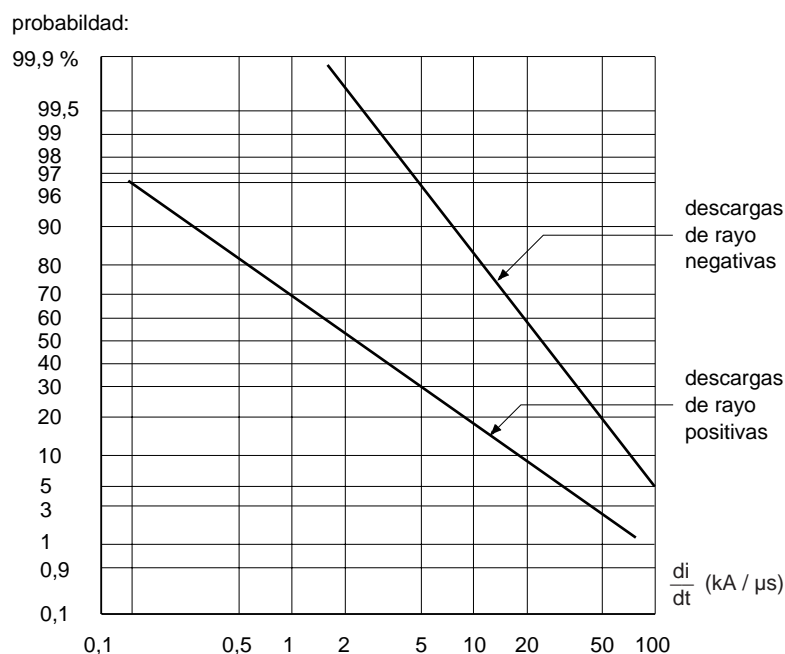


Fig. 3: Distribución estadística experimental, en frente de onda, de las corrientes de rayo, positivas y negativas, según IEEE.

■ amplitud de la onda (0 a varios centenares de kA),

■ número de arcos.

Météorage ofrece diferentes servicios interesantes para diversas aplicaciones, en particular el transporte y la distribución de la energía eléctrica.

Ejemplos de prestaciones: alerta, señalización, observación, vigilancia, formación o acumulación de experiencia, calificación, consultas, interrogaciones, estadísticas.

En los estudios del «fenómeno rayo» se utilizan, sobre todo, las dos características de predicción siguientes:

Nivel cerámico Nk

Es el número de días al año que una tormenta ha afectado una zona definida. Se trata de una información aparentemente muy aproximada pero realmente útil.

En Francia, el nivel Nk medio es de 20 con una desviación de amplitud que cubre desde 10, en regiones costeras de la Mancha hasta 30 ó más en las regiones montañosas.

En el resto del mundo, Nk puede ser mucho más elevado, por ejemplo, más de 180 en África tropical o Indonesia.

Densidad de rayos N

Es la densidad anual de caídas de rayo al suelo, expresada en $\text{CdR} / \text{km}^2 / \text{año}$.

En Francia, la densidad N está comprendida, según las regiones, entre 2 y 6 $\text{CdR} / \text{km}^2 / \text{año}$.

Una relación práctica puede establecerse entre los dos parámetros considerados: Nk y N:
 $N = Nk / 7$.

Mecanismo de impacto y modelo electrogeométrico

El mecanismo de impacto del rayo se desarrolla de la siguiente forma:

■ un trazador, salido de una nube, se dirige hacia el suelo a baja velocidad; cuando el campo eléctrico es suficiente se establece una

conducción brutal, dando lugar al fenómeno rayo,

■ un supuesto práctico experimental ha permitido establecer la relación que condiciona los valores de la distancia entre puntos de descarga e interrupción, de un canal de rayo con intensidad I del golpe del rayo.

$$d = 9,4 I^{2/3} \quad \text{ó} \quad d = 6,7 \times I^{0,8}$$

según opinión de diferentes autores o investigadores con:

d = distancia de perforación, en m (striking distance),

I = corriente de rayo en kA.

■ el modelo electrogeométrico se desarrolla según la aplicación realizada con un asta vertical en el ejemplo de la **figura 4**.

Sea un asta vertical de altura h y punto culminante H, las zonas que define en el espacio son:

□ zona I, entre el suelo y la parábola p, lugar geométrico de los puntos equidistantes de H y del suelo: en el

instante de cebado, cualquier trazador que se inicie dentro de esta zona se dirigirá al suelo por estar más cerca de él que de H,

□ zona II, por encima de la parábola, en el instante de cebado, cualquier trazador que se inicie dentro de esta zona será captado por H, ya que la distancia a H es inferior a la distancia de cebado d.

Para una corriente de intensidad determinada I, a una distancia de cebado definida, la distancia al asta x, llamada rayo de captura, vale:

$$\text{si } d > h \quad x = \sqrt{2 \cdot d \cdot h - h^2}$$

$$\text{si } d < h \quad x = d$$

El radio de captura del asta es tanto mayor cuanto mayor es la intensidad de la descarga del rayo.

Para intensidades muy débiles, el radio de captura es inferior a la longitud del asta, que puede ser captador en toda su longitud, lo que puede verificarse experimentalmente.

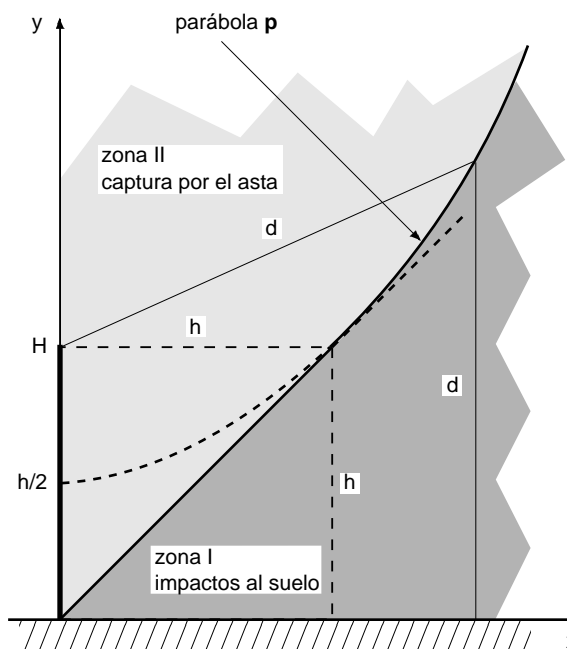


Fig. 4: Representación de las diferentes zonas de protección ofrecidas por un asta vertical.

3 El rayo y las instalaciones eléctricas

Este capítulo aborda el análisis del efecto del rayo sobre una línea, las generalidades sobre los efectos del rayo y aporta algunas informaciones sobre la propagación de las ondas.

El rayo sobre una línea

A partir del modelo electrogeométrico, la frecuencia de rayos se calcula teniendo en cuenta la superficie de captura del elemento considerado.

La **figura 5** da, para una densidad de $N = 4 \text{ CdR} / \text{km}^2 / \text{año}$ (siendo el nivel cerámico de alrededor de 30), la frecuencia de rayo (número de CdR por año) de un asta vertical de altura h y de un conductor horizontal de longitud 100 km a una altura h .

La fórmula empírica general que indica la frecuencia de rayo (número total de CdR por año) de una línea (torres, cables de fases y de guarda) es la siguiente:

$$N_L = Nk \left(\frac{N1}{30} + \frac{l}{70} \right) \cdot \alpha \cdot \frac{L}{100}$$

con:

Nk = nivel cerámico,

N_L = frecuencia de rayos en la línea,

$N1$ = frecuencia de rayos en el conductor horizontal más elevado (**figura 5**),

L = longitud de la línea en km,

l = anchura de la línea en m (entre los conductores exteriores),

α = factor de influencia de las torres y los cables de guarda (**figura 6**).

Esta expresión tiene en cuenta:

- la frecuencia de rayo de un conductor ($N1$),
 - la presencia de los conductores exteriores (l),
 - la distribución entre torre y línea, función de la estructura de la línea (α)
 - la longitud de la línea (L):
- para un cálculo de coordinación de aislamiento, generalmente se elige

$L \approx 1.5 \text{ km}$, pues para valores mayores, el efecto del rayo es despreciable,

□ para un cálculo de continuidad de servicio, la longitud que se tiene en cuenta es la total de la línea sobre la que los cebados son posibles.

Caídas de rayo directas (sobre conductores de fase)

Cuando un rayo cae sobre un conductor de fase en una línea, la corriente $i(t)$ se reparte la mitad hacia

cada uno de los dos lados del punto de impacto y se propaga a lo largo de los conductores que presentan una impedancia de onda Z de valor comprendido entre 300 y 500 Ω (**figura 7**).

De ello se produce una onda de tensión asociada:

$$u(t) = Z \cdot \frac{i(t)}{2}$$

Al nivel de las torres, la tensión crece y se propaga:

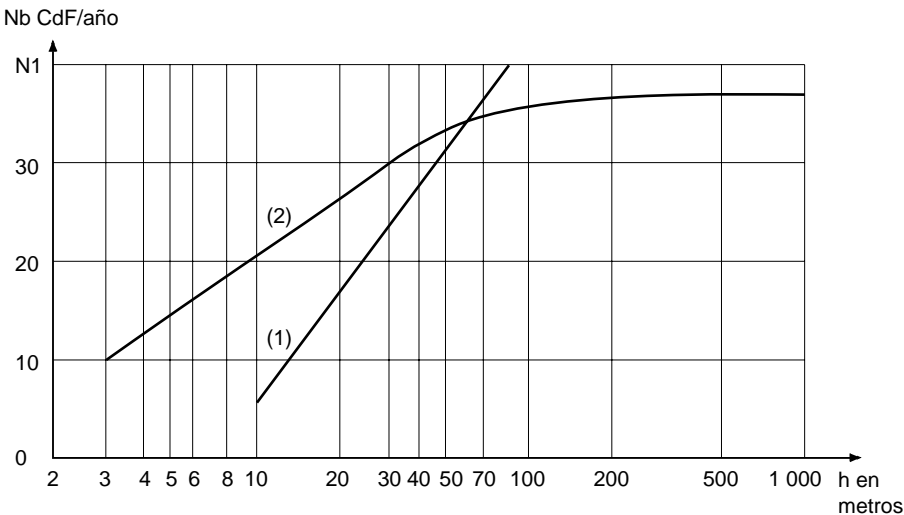


Fig. 5: Frecuencia de rayo para una densidad $N = 4 \text{ Ddr} / \text{km}^2 / \text{año}$:
■ curva 1: de un asta vertical de altura h (con $N1 \times 10^{-3}$),
■ curva 2: de un conductor horizontal de longitud 100 km a una altura h (con $N1$).

número de cables de guarda		0	1	2	3
caída de rayo	sobre torres (%)	55	35	20	10
	sobre conductores (%)	45	65	80	90
	(cable de guarda y de fases)				
factor de influencia	α	1,65	1,40	1,20	1,05

Fig. 6: Distribución de las caídas de rayo en una línea entre las torres y los conductores.

■ con onda plena, alcanzando su valor máximo

$$U_{\text{máx}} = Z \cdot \frac{I_{\text{máx}}}{2} \quad \text{cuando}$$

$$Z \cdot \frac{I_{\text{máx}}}{2} < U_a$$

siendo U_a = tensión de cebado de la onda de choque de la cadena de aisladores o los eventuales descargadores de protección; es sensiblemente proporcional a la longitud de la distancia en el aire ($\approx 550 \text{ kV/m}$) aire y debe de tener en cuenta el retardo al cebado para los frentes muy bruscos,

■ con onda recortada a la tensión de cebado cuando

$$Z \cdot \frac{I_{\text{máx}}}{2} \geq U_a$$

El valor límite de la corriente de rayo, por encima de la se que produce cebado y por tanto interrupción de servicio, se llama corriente I_c
 $I_c = 2 \cdot U_a / Z$

Como orden de magnitud de I_c podemos considerar 5,5 kA para líneas de 225 kV; 8,5 kA para 400 kV y 19 kA para 750 kV. Las correspondientes frecuencias son: 95%, 90% y 60% (figura 2). A tener en cuenta que para 20 kV su valor es casi nulo por los cebados sistemáticos.

Caidas de rayo indirectas (sobre conductores de guarda o torres) (figura 8)

En este caso, la circulación de la corriente del rayo hacia tierra provoca una elevación del potencial de las estructuras metálicas.

La punta de la torre alcanza un potencial que depende de su inductancia propia L y de la resistencia de tierra R al choque:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

La tensión puede alcanzar el límite de contorno a la onda de choque de la cadena de aisladores. Se trata del «cebado de retorno» o «blackflashover».

Una parte de la corriente se propaga sobre la o las fases sobre las que se produjo el cebado hacia los utilizadores; en general, esta corriente es superior a la de una CdR directa.

En muy alta tensión, el cebado de retorno es poco probable (nivel de aislamiento de los aisladores), es por ello interesante la instalación de cables de guarda (limitado número de interrupciones de servicio). Pero, por debajo de los 90 kV, el cebado de retorno se produce tanto por valores bajos de resistencia de tierra ($< 15 \Omega$), como por un limitado interés (interrupciones de servicio más frecuentes).

Propagación de la onda

La propagación de la onda de rayo es un concepto sobre el que el electrotécnico poco puede hacer en sus labores cotidianas.

¿Cuál es la realidad?

Cualquier modificación del estado eléctrico de un conductor en uno de sus puntos se propaga a gran velocidad, de 150 000 a 300 000 km/s, según el dieléctrico que envuelva el conductor; a la frecuencia industrial de 50 Hz, se recorre a una distancia de 3000 a 6000 km en un periodo.

En el campo industrial, esta distancia es, salvo casos particulares, de un

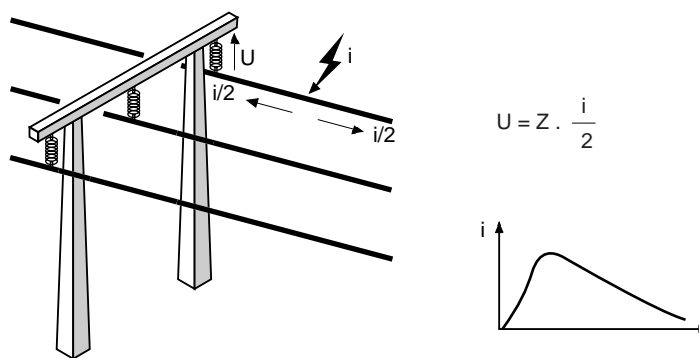


Fig. 7: Descarga de un rayo sobre un conductor de fase.

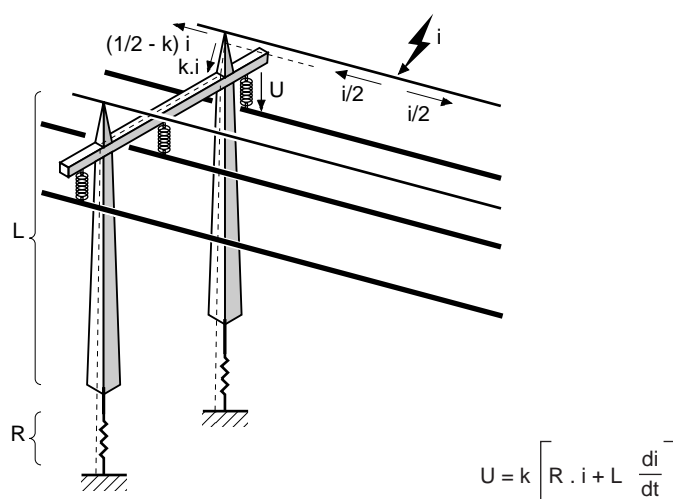


Fig. 8: Descarga de un rayo sobre un conductor de guarda.

orden de magnitud diferente a la normal en los conductores empleados. Es aceptable, lógicamente, simplificar y considerar que la transmisión de ondas es instantánea sobre cualquier punto de la instalación.

En el caso del rayo, se trata de fenómenos «a alta frecuencia», de algunas decenas de kHz a varios MHz, en comparación con la baja frecuencia industrial de 50 Hz o 60 Hz.

Particularidades de los fenómenos en «alta frecuencia»

En este dominio de frecuencias, las leyes de la electricidad utilizadas habitualmente no son suficientes:

- de una parte, la hipótesis de casi estacionariedad, que supone que la tensión se transmite instantáneamente a todos los puntos de la red, resulta falsa: el tiempo de transmisión no es despreciable ante el período de los fenómenos estudiados (ejemplo: a 1MHz, el período es de 1 μ s ó 300 m),
- de otra parte, las capacidades parásitas de los elementos, el efecto pelicular, el acoplamiento electro-magnético... se tornan importantes, cuando no preponderantes.

... y consecuencias prácticas en cuanto a los estudios

Para tratar cuantitativamente los efectos del rayo, debemos (ejemplo del capítulo 5):

- primeramente, considerar las leyes de propagación de las ondas, conocidas con el nombre de «ecuaciones del telegrafista». Tener en cuenta que con las distancias recorridas (algunos metros o algunos kilómetros), el régimen de las ondas, no se establece instantáneamente, ni en el espacio ni en el tiempo,
- seguidamente, tener en cuenta las leyes de la reflexión, refracción en los puntos de discontinuidad y de superposición de las ondas en cada instante y en cada zona,

- finalmente, adaptar el modelo que describe las ecuaciones físicas de funcionamiento de los elementos para tener en cuenta los fenómenos preponderantes en alta frecuencia.

Ejemplo: un transformador sometido a un transitorio no se comporta, a esta frecuencia, como una inductancia en serie con una relación de transformación, sino como un divisor capacitivo (capacidades AT / tierra, BT / tierra y AT / BT). En este caso la relación de transformación AT / BT puede ser totalmente diferente de su valor a frecuencia industrial.

Atenuación de la propagación debido al efecto corona

Las sobretensiones atmosféricas que se propagan a lo largo de los conductores se deforman a causa del efecto corona (pérdidas por ionización del aire que envuelve el conductor, importante para $U > 1$ MV). Ello se traduce en una atenuación de la amplitud y la pendiente de su frente. Se estima que después de 1,5 km las sobretensiones atmosféricas no presentan peligro para los centros de transformación.

Efectos debidos al rayo

En este párrafo consideraremos los principales efectos, directos e indirectos, consecuencia de la propagación del rayo. Hay que indicar que si esta corriente entra por la parte de alta tensión, puede afectar a todos los circuitos (perturbaciones por conducción y radiación). Estos efectos, que comprenden todos los niveles de tensión, son:

- térmicos (fusión de elementos, incendios, explosiones),
- mecánicos, debidos a los esfuerzos electrodinámicos entre conductores paralelos próximos,
- de choque eléctrico, como consecuencia de los incrementos de potencial al propagarse la onda a través de las impedancias que presentan los conductores,

- de pérdida de aislamiento, por contorno de un aislador o cadena de aisladores de una fase, provocando una «corriente de fuga» a tierra a frecuencia industrial,

■ elevación del potencial de tierra: es frecuente alcanzar potenciales de varios centenares de kV en tomas de tierra de los equipos de alta tensión afectados. La ley de variación, función de la distancia a la toma de tierra, es aproximadamente hiperbólica y provoca la aparición de potenciales y sus gradientes asociados con valores muy elevados, en las proximidades de las tomas de tierra, incluso a distancias de decenas de metros,

- electromagnéticos de alta frecuencia (espectro muy largo), radiaciones parásitas, inducción y acoplamiento de circuitos,
- también electroquímicas, acústicas y fisiológicas.

Todos estos fenómenos son causa de:

- degradación del material, de forma brutal, como las perforaciones dieléctricas por sobretensión o por envejecimiento prematuro a causa de las sollicitaciones no destructivas inmediatamente pero sí por repetición,
- disfuncionamiento de las instalaciones, particularmente a través de los circuitos de corrientes débiles como: perturbaciones parásitas en los equipos de mando y control de comunicaciones,
- reducción de la continuidad de servicio por las interrupciones largas (caso de destrucción de material) o cortas (disfuncionamiento de los automatismos de las redes),
- peligro para los seres humanos y los animales, sobre todo por la aparición de tensiones de paso que pueden provocar una electrización causante de electrocución.

4 Medios de protección

Después de algunos principios generales de protección se desarrollan, más en detalle, los medios de protección primaria (por descarga directa) y secundaria (por limitación de la transmisión de perturbaciones).

Principios generales

La protección en general, y de las personas en particular, es tanto mejor cuanto mayor es la garantía de paso de las perturbaciones a tierra, lo más cerca posible de las fuentes de perturbación.

La condición de una protección eficaz es asegurar unos valores mínimos de impedancias a tierra, creando mallas e interconexiones de tomas de tierra, tantas como sea posible. En la práctica, en muy alta tensión, en los centros y subestaciones se exige habitualmente una impedancia a tierra de $1\ \Omega$ a frecuencia industrial y para las torres de transporte se pretende que no se rebasen los 10 a $15\ \Omega$.

Contra las corrientes de rayo y las elevaciones de potencial que provocan o inducen, se distinguen varios niveles de protección (criterio de energía):

- primer nivel: derivación a tierra de la parte esencial del impacto y primer descrestado. Este nivel interesa principalmente las estructuras susceptibles de recibir los impactos de rayo (líneas y postes).

- segundo nivel: limitación de la tensión residual por descrestado complementario. Está destinado a proteger, contra las sobretensiones transmitidas, los equipos de los centros y las instalaciones. Para conseguir la disipación de la energía asociada al descrestado pueden ser necesarios varios dispositivos de protección distribuidos por la instalación.

- tercer nivel: en BT, en el caso de equipos sensibles (informática, automatismos, telecomunicaciones,

redes BT) y como complemento de los niveles anteriores, pueden usarse dispositivos suplementarios como filtros serie y limitadores de sobretensiones.

Nota: es recomendable que todos los medios de protección se prevean durante el diseño de las instalaciones o de los sistemas. Se pretende evitar modificaciones posteriores, normalmente difíciles de realizar y con un elevado coste.

Protección primer nivel

Su objetivo es limitar los impactos directos sobre las estructuras eléctricas derivando el rayo hacia lugares de paso privilegiados.

Eliminar el rayo de forma controlada hacia puntos precisos se puede conseguir por medio de:

- pararrayos basados sobre el principio de la distancia de cebado: están constituídos por barras de

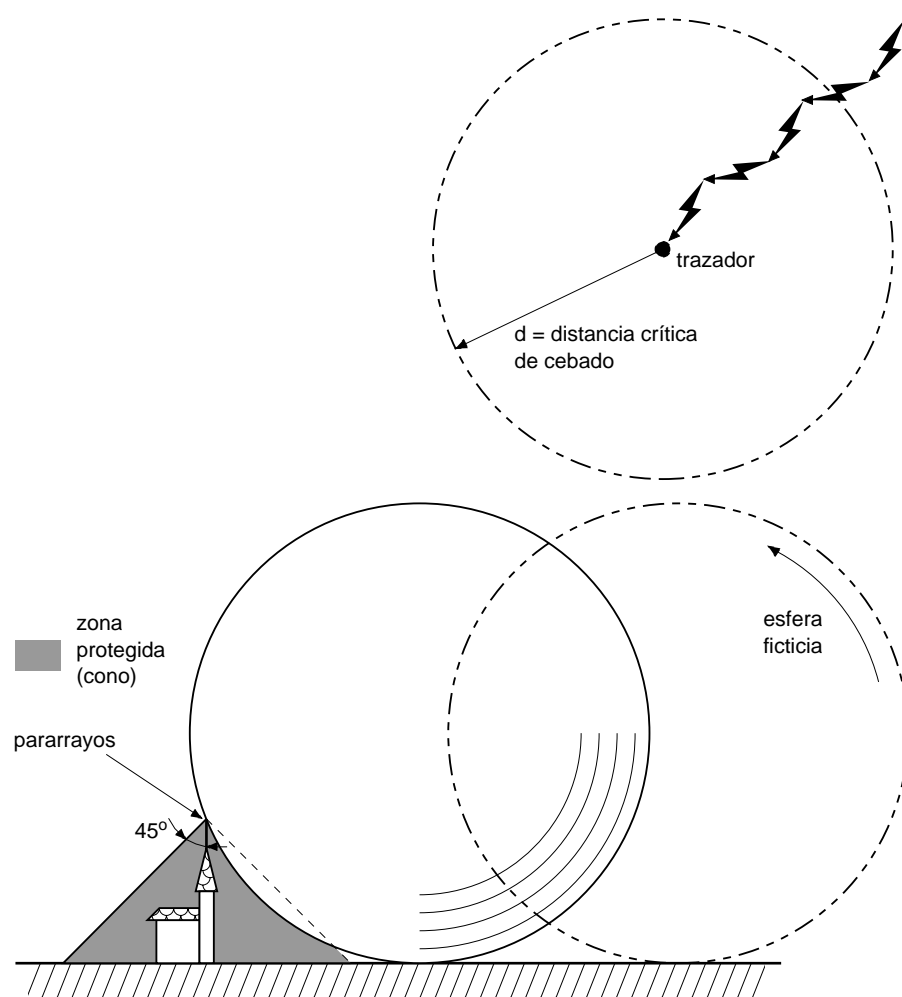


Fig. 9: Determinación de una zona de protección, por el método de la «esfera ficticia».

punta afilada colocadas en lo alto de las estructuras a proteger unidas a tierra por el camino más directo. (conductores de bajada contorneando la fachada del edificio a proteger e interconectados a la red de tierra).

Las observaciones muestran que la protección es buena, contra descargas de rayo directas, para el volumen comprendido dentro de un cono con el vértice coincidente con la punta del pararrayos y una generatriz que forme, con el eje vertical, un ángulo de 45° .

■ jaulas de Faraday o malladas que consisten en la realización de un entramado metálico de conductores horizontales y verticales unidos a una red de tierra. La anchura de malla es inferior a 15 metros y las barras verticales se sitúan coincidentes con los nudos de las mallas de la parte superior. La cobertura de la zona a proteger es equivalente a una multiplicidad de pararrayos.

En estos dos casos (pararrayos y jaulas malladas), el modelo electrogeométrico permite determinar la zona protegida por el método de la «esfera ficticia»: el punto de impacto del rayo queda determinado por el objeto del suelo más próximo de la distancia de cebado d del trazador. El fenómeno se desarrolla como si el trazador estuviera rodeado por una esfera ficticia de radio d en movimiento, desplazándose hacia él. Para obtener una buena protección debe conseguirse que la esfera ficticia, rodando sobre el suelo, contacte con un dispositivo de protección antes que con los objetos a proteger (figura 9).

Así, para protección contra una corriente de rayo muy débil, a 2 kA aproximadamente (probabilidad acumulada $\approx 100\%$), la distancia crítica de cebado es de 15 m. Si aceptamos una probabilidad del 97%, la corriente de rayo correspondiente es de 5 kA y la distancia crítica de 27 m.

■ creación de pantallas

Los cables de guarda entran en esta categoría. Son los conductores paralelos a los cables de fase, situados encima de ellos y unidos a tierra por medio de las torres de

sustentación. Constituyen una protección eficaz contra las descargas del rayo sobre las líneas aéreas: su misión es captar las descargas de rayo cuya intensidad es superior a la corriente crítica I_c .

Las nociones desarrolladas en el capítulo anterior permiten determinar la posición óptima de los cables de guarda.

Sobre el esquema de la figura 10, se presentan las diferentes zonas de cebado de una línea aérea:

- Zona I: cebado al suelo,
- Zona II: cebado de la fase sin contorno de aislador ($I < I_c$),
- Zona III: cebado sobre cable de guarda.

La protección de las fases por el cable de guarda se determina por el ángulo óptimo de protección θ_{opt} .

Cuando $\theta \neq \theta_{opt}$, pueden producirse «defectos de pantalla»: caídas de rayo, de amplitud superior a la corriente crítica, pueden alcanzar los conductores de fase y provocar defectos. El número de defectos de pantalla es función de θ .

Protección 2º nivel

Esta protección se aplica en alta tensión.

Su objetivo es garantizar que el nivel de aislamiento al choque o BIL (Basic Impulse Level) de los diversos elementos del centro de transformación o distribución no sea rebasado (coordinación de los aislamientos).

Su principio es crear un circuito de derivación a tierra, permitiendo así la

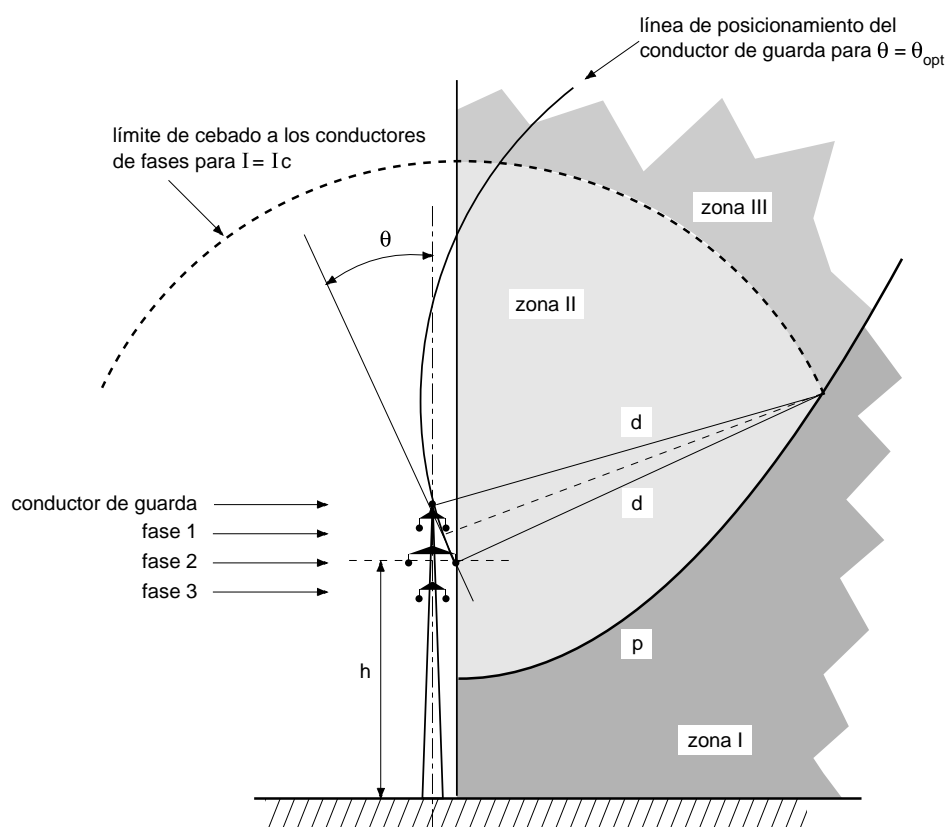


Fig. 10: Los diferentes casos de cebado de una línea aérea; obsérvese aquí que el ángulo de protección $\theta = \theta_{opt}$

descarga de la corriente del rayo, por cebado o conducción. Para limitar la tensión se utilizan dos tipos de aparatos: el descargador, más antiguo, y el pararrayos que tiende a sustituirlo en numerosas aplicaciones.

■ el descargador, que funciona por cebado, presenta dos importantes inconvenientes:

□ una dispersión muy grande en la tensión de cebado (hasta un 40%),
 □ un retardo en el cebado, función de la sobretensión,

□ un cebado sensible a las influencias externas, condiciones atmosféricas, por ejemplo,

□ genera un frente de onda cortado muy escarpado que puede destruir los arrollamientos de máquinas situadas en la proximidad,

□ crea una corriente de fuga a 50 Hz que es «vista» por el aparato de protección contra defectos a tierra que ordena la apertura, aguas arriba, de la línea afectada,

■ el pararrayos es un semiconductor de resistencia no lineal (de varios $M\Omega$ a algunos Ω), en general de óxido de zinc (ZnO), cuyas características son bien conocidas.

Se conecta entre fase y tierra

□ su funcionamiento es similar al del descargador, pero controla mejor la tensión:

– poca dispersión de su tensión residual característica $U = f(I)$, llamada «residual voltage»,

– el retardo a la conducción es prácticamente nulo,

– retorno natural al estado inicial (aislante) sin provocar el establecimiento de una corriente de fuga.

□ principales criterios de dimensionamiento de un pararrayos:

– su tensión máxima permanente, o «Maximum Continuous Operating Voltage» –MCOV– debe ser superior a la tensión máxima de explotación de la red, con un margen de seguridad de 5%,

– su tensión nominal, o «rated voltage» fijada en $1,25 \times \text{MCOV}$,

– su nivel de protección,

– su capacidad energética para soportar sobretensiones temporales, dada por una curva amplitud-duración.

■ la utilización de un pararrayos o un descargador sólo es eficaz bajo ciertas condiciones de implantación y en particular según las distancias que le separan del material a proteger y de la tierra; de aquí la importancia de la noción de «distancia de protección» del pararrayos, objeto de un párrafo específico.

Protección tercer nivel

Aplicada en BT y para los equipos sensibles, esta protección contra el rayo y sus efectos no se desarrolla en este Cuaderno Técnico, es objeto de obras que se citan en la bibliografía del final del Cuaderno.

A título indicativo, esta protección se realiza con los métodos y elementos siguientes:

■ estudio de la compatibilidad electromagnética (CEM),

■ concepción de las redes de tierra (interconexiones, dimensionamiento...),

■ coordinación de los limitadores de sobretensiones con las protecciones de sobrecarga y de cortocircuito, y los dispositivos diferenciales,

■ protección paralela, limitando las tensiones de choque por medio de: descargadores de gas, varistancias (SiC, ZnO), diodos de avalancha, filtros RC,

■ protección serie, limitando la potencia transmitida con la ayuda de absorbentes de ondas o filtros de alta frecuencia, transformadores de aislamiento con pantalla, acondicionadores de red, o alimentaciones estáticas sin interrupción.

Distancia de protección

La noción de «distancia de protección» se pone en evidencia en el siguiente ejemplo, voluntariamente simplista.

Ejemplo:

Una onda de sobretensión se propaga sobre una línea y llega al nivel de un centro constituido por un transformador protegido por un pararrayos (figura 11).

Definimos los diferentes elementos:

■ línea:

□ impedancia característica: Z_c ,

□ velocidad de propagación de onda: v ,

□ distancia pararrayos-transformador: D ,

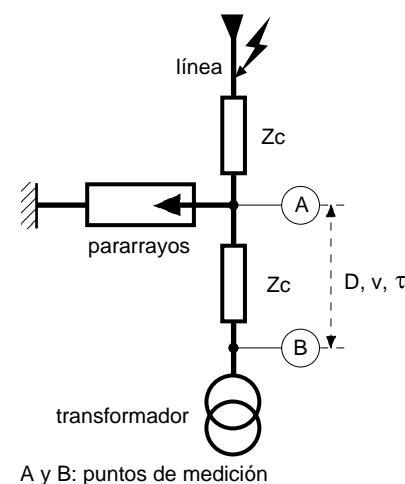
□ tiempo de propagación entre A y B: $\tau = D / v$,

■ pararrayos de característica perfecta: para cualquier tensión aplicada superior a V_p , su conducción es instantánea y su limitación rigurosa a V_p ,

■ la toma de tierra presenta una impedancia nula,

■ las conexiones material-pararrayos y pararrayos-tierra son de longitud despreciable,

■ transformador: a las frecuencias consideradas, su impedancia de entrada es muy superior a Z_c , con lo que una onda de tensión que llega al



A y B: puntos de medición

Fig. 11: Esquema de un circuito (línea y centro de transformación) para el estudio de la propagación de una onda de sobretensión de rayo.

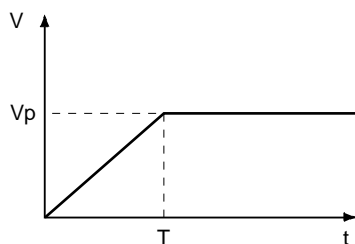


Fig. 12: Representación de una onda de sobretensión.

transformador es casi totalmente reflejada (doblado de la tensión en el punto de reflexión),

■ onda de sobretensión incidente: presenta un frente de pendiente constante $r = dV / dt$ y una tensión constante por la cola con $T = V_p / r$, tiempo de crecimiento del frente de onda hasta el valor V_p (figura 12).

Se pueden presentar tres casos, resumidos en la tabla de la figura 13. Los diagramas de las figuras 14, 15 y 16 describen respectivamente los fenómenos de los casos 1 y 2 (páginas 14, 15 y 16).

Ejemplo: si la tensión de choque máxima admisible por el transformador está fijada en $1,3 V_p$, resulta:

$$1,3 \cdot V_p \geq V_p \cdot 2 \frac{r \cdot D}{v}$$

con lo que la distancia pararrayos-transformador no puede exceder de:

$$D \leq 0,15 \cdot \frac{V_p \cdot v}{r} = 0,15 \cdot T \cdot v$$

que, aplicado a un caso concreto cuyos datos, son:

$V_p = 1200 \text{ kV}$,

$v = 300 \text{ m} / \mu\text{s}$,

$r = 2000 \text{ kV} / \mu\text{s}$,

$\Rightarrow D \leq 27 \text{ m}$,

Nota:

en la realidad debe de tenerse en cuenta:

■ las conexiones de los pararrayos a los materiales y a la tierra,

■ las características reales de los pararrayos,

■ la configuración de la red con las rupturas de impedancias y las diferentes velocidades de propagación,

■ los elementos capacitivos que representan los transformadores.

Explotación de las redes e indisponibilidad

En las redes de distribución pública, el rayo es una de las causas (50%) de las bajadas de tensión y de las interrupciones breves.

Estas interrupciones de la alimentación, realizadas por los aparatos de protección, son necesarias para la eliminación del defecto (fin del cebado de un descargador o interrupción del contorno de un aislador).

Para mejorar la continuidad del servicio se reducen los tiempos (cortes breves) con reenganches

automáticos de los aparatos de protección (interruptores automáticos).

Se prevén diferentes ciclos de reconexión según los niveles de tensión:

■ en MAT: reconexión rápida en monofásico ($< 0,5 \text{ s}$) o lenta en trifásico ($1,5 \text{ s}$ a 5 s),

■ en AT-B: reconexión trifásica y empleo de interruptor automático shunt en monofásica ($0,15 \text{ s}$),

■ en AT-A: reconexión rápida y lenta en trifásica ($0,35 \text{ s}$, 15 s).

Para el utilizador, estas interrupciones representan inconvenientes que es posible eliminar o atenuar con:

■ la utilización de fuentes auxiliares del tipo de alimentación estática sin interrupción (llamadas también onduladores), para las alimentaciones de mando y control, de informática, etc.,

caso	criterio	sobretensión máxima sobre el transformador	comentarios
1	$D > \frac{v \cdot V_p}{2 \cdot r}$ siendo: $T < 2 \cdot \tau$	$2 \cdot V_p$	frente r rápido, distancia D importante. Sin efecto de distancia del pararrayos sobre la tensión máxima del trafo., el pararrayos limita esta tensión a $2 \cdot V_p$
2	$D < \frac{v \cdot V_p}{2 \cdot r}$ siendo: $T > 2 \cdot \tau$	$V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$ rebasamiento = $= 2 \frac{r \cdot D}{v}$ $= V_p \cdot \frac{2 \tau}{T}$ $\Rightarrow V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v} = V_p \left(1 + \frac{2 \tau}{T} \right)$	frente r lento, distancia D pequeña. La presencia del pararrayos limita, por efecto de distancia la tensión máxima del trafo.: el rebasamiento del umbral V_p es proporcional a D y a r , de ahí la noción de «distancia de protección».
3	$D = \frac{v \cdot V_p}{2 \cdot r}$ siendo: $T = 2 \cdot \tau$	$V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$	caso límite entre 1 y 2

Fig. 13: Sobretensiones máximas sobre el transformador y ejemplo práctico.

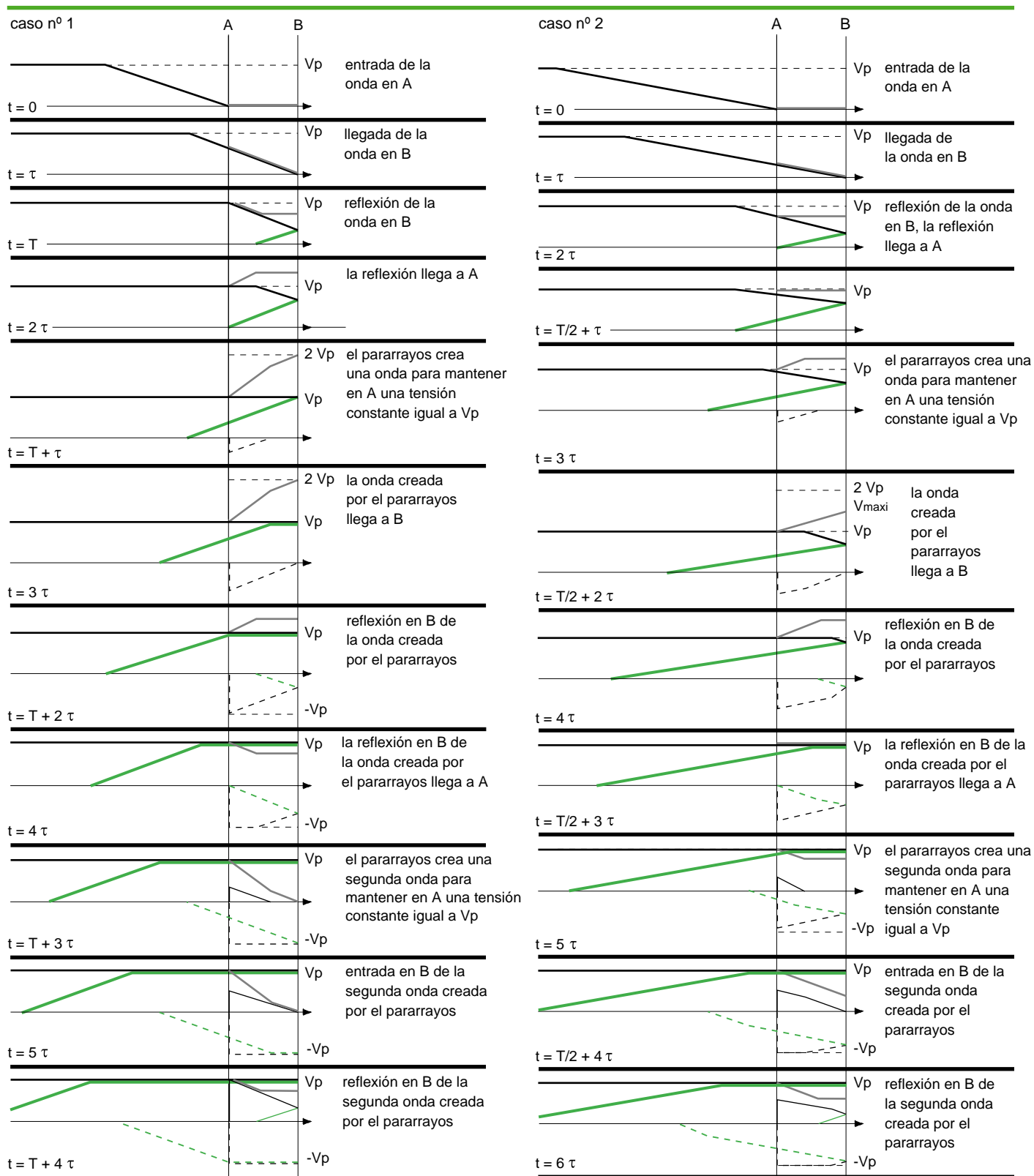


Fig. 14: Diagramas de la propagación de una onda de tensión de rayo: caso 1 (frente rápido) y caso 2 (frente lento); posiciones A y B indicadas en la figura 11.

- | | |
|---|---|
| — onda incidente (T) | — onda incidente (T) reflejada |
| - - - primera onda creada por el pararrayos | - - - primera onda creada por el pararrayos y reflejada |
| — segunda onda creada por el pararrayos | — segunda onda creada por el pararrayos y reflejada |
| — nivel de tensión | |

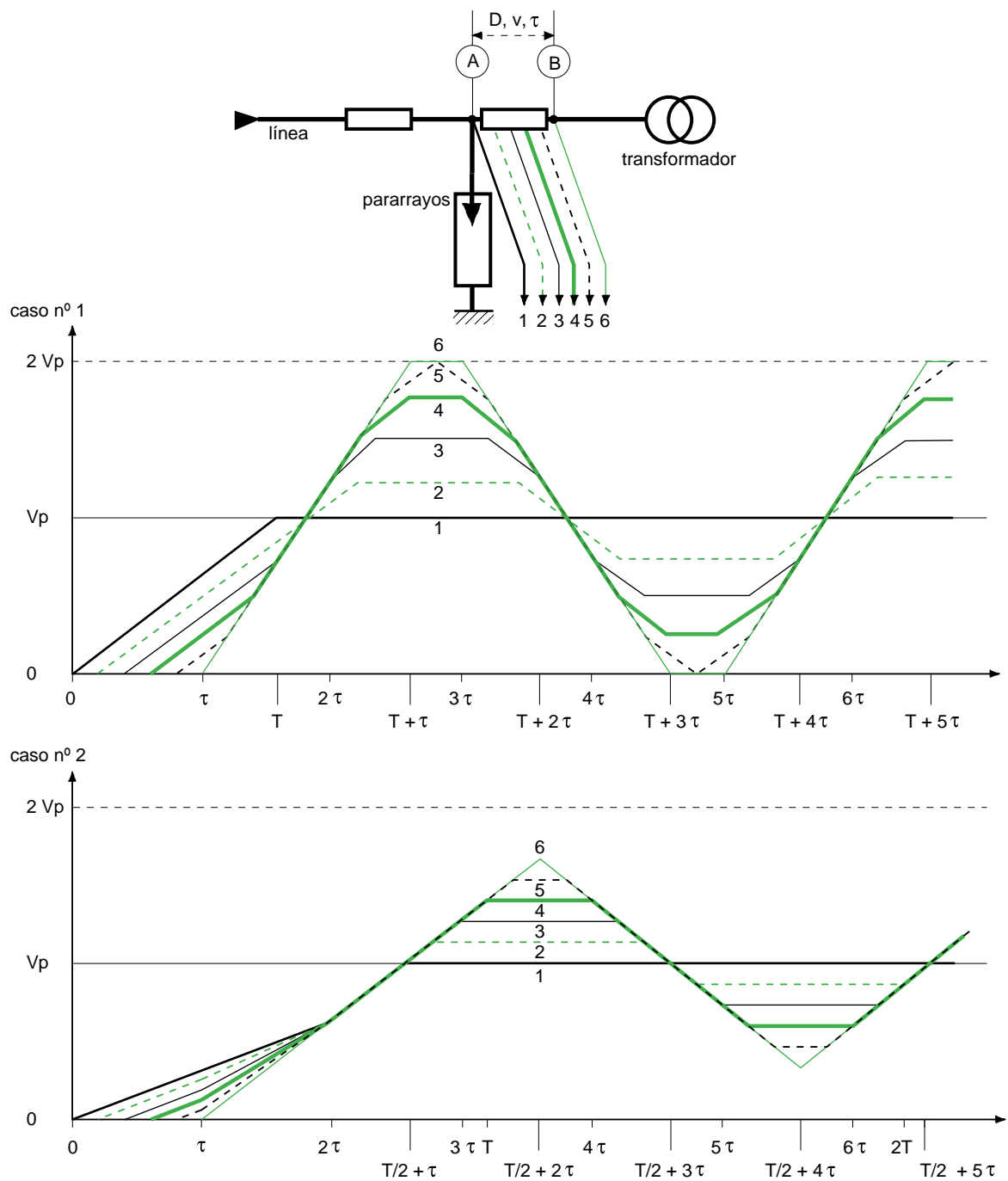


Fig. 15: Distribución temporal de las tensiones en la derivación protegida por el pararrayos; caso 1 (frente rápido) y 2 (frente lento) de la tabla de la **figura 13**.

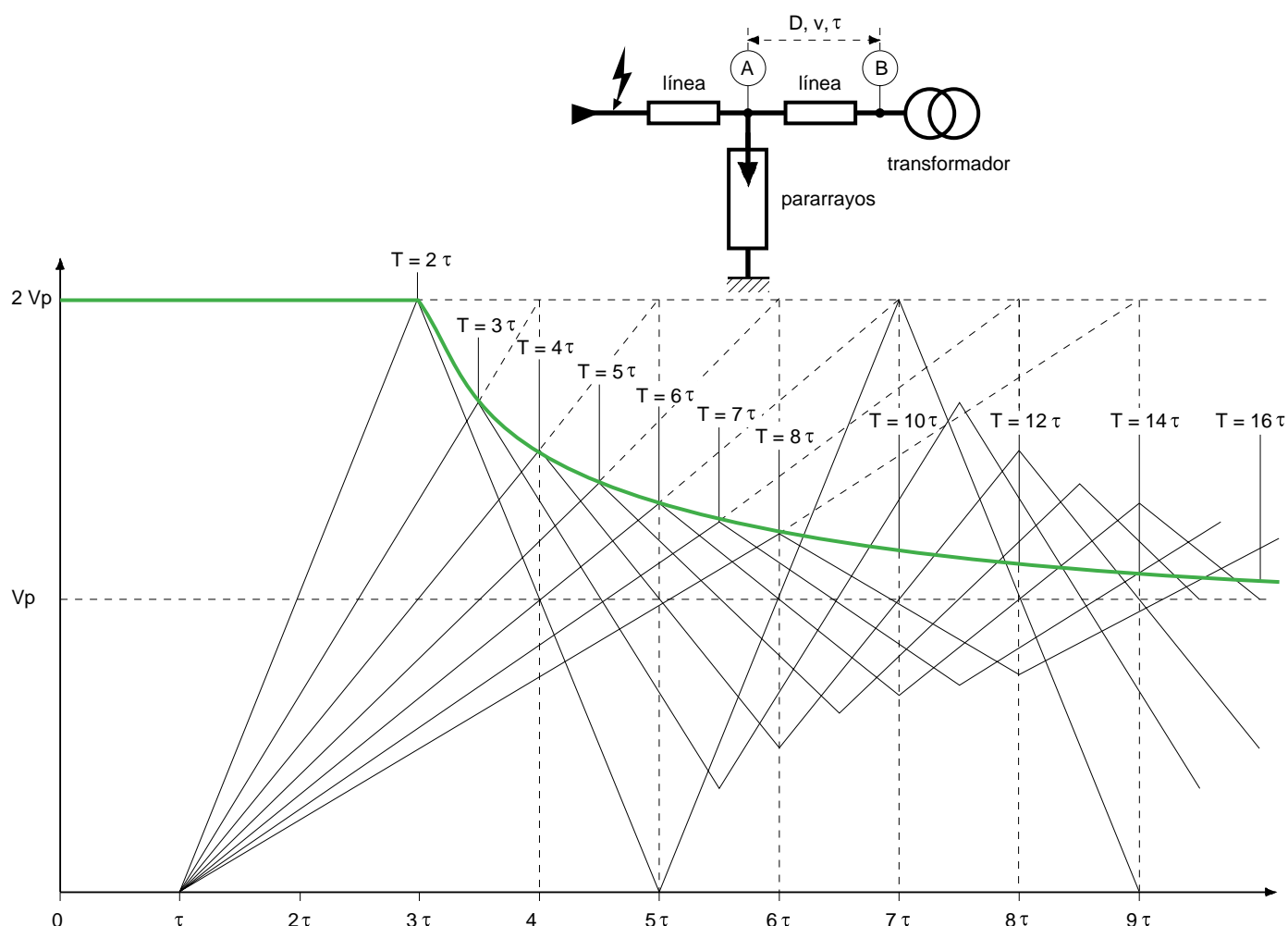


Fig. 16: Diagrama de la tensión máxima sobre el transformador (punto B del esquema) en función de T para τ dado (caso 2 de la tabla de la figura 13).

- la definición y puesta en servicio de una buena selectividad de las protecciones propias de la red del utilizador para la eliminación rápida de los defectos que tengan como origen el rayo,
- el aislamiento preventivo, en periodos de tormenta, de los consumos prioritarios, sobre una red autónoma: las cargas «sensibles» se alimentan entonces con una producción interna del establecimiento, las otras cargas siguen alimentadas por la red pública de energía.

Normas

El interés de las normas es guiar al que concibe o proyecta una instalación en:

- los casos de sobretensión a considerar para los cálculos de sollicitaciones eléctricas representativas,
- elección de los niveles de aislamiento de los materiales (BIL),
- elección de las características de los dispositivos de protección.

Se relacionan seguidamente las diferentes normas referentes al tema

del cuaderno y se indican, para cada norma, los puntos particulares de cada uno.

CEI 60-1: Técnicas de ensayos en alta tensión - 1ª parte -

- sección 6: ensayos de choque de rayo. Se definen diferentes formas de onda (choque a rayo pleno, choque de rayo cortado en el frente o en la cola), y, para cada una, se asocian tiempos característicos.

La figura 17 da un ejemplo de descarga de rayo (DdR) normalizada.

■ sección 8: ensayos a los choques de corriente. Para los ensayos se utilizan cuatro choques de corriente normalizados, de tipo doble exponencial, función del tiempo de frente y del tiempo de valor mitad por la cola:

- choque 1 μs / 20 μs ,
- choque 4 μs / 10 μs ,
- choque 8 μs / 20 μs ,
- choque 30 μs / 80 μs .

CEI 694: Condiciones comunes para las normas de la aparata de alta tensión (UNE 21 139)

Esta norma precisa que los niveles de aislamiento asignados deben elegirse entre los valores indicados en las tablas, de las que se incluye un extracto en la **figura 18**.

Se indica que los ensayos a tensión de choque tipo rayo deben efectuarse utilizando la onda normalizada 1,2 / 50 μs .

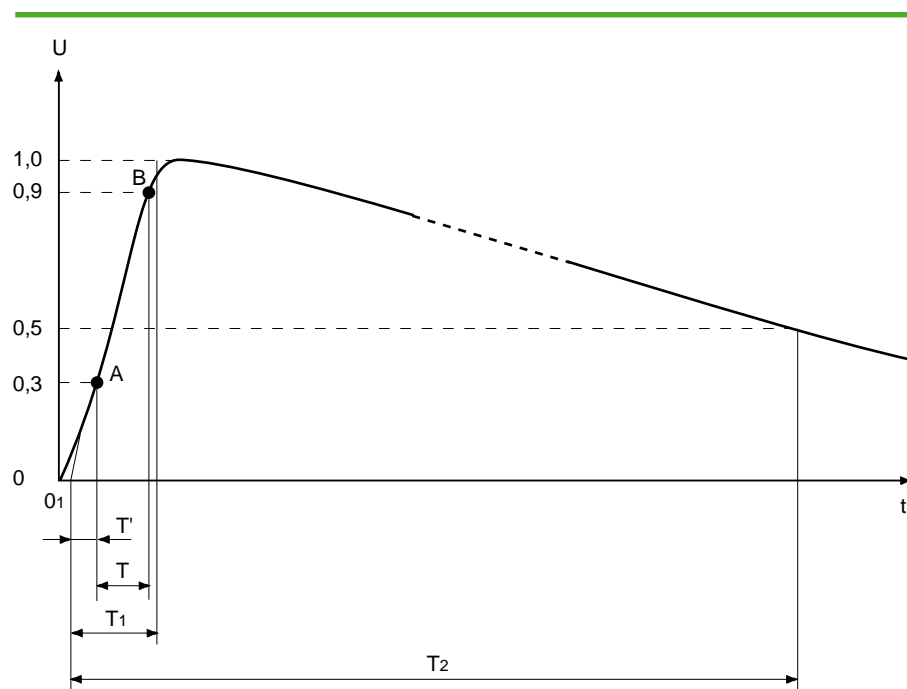
CEI 99-1: Pararrayos - 1ª parte - (Norma UNE 21 087; norma NF C 65 100)

Sección 6: ensayos de tipo. Esta sección describe los ensayos de tipo a efectuar según la norma.

- rigidez de aislamiento externo,
- verificación de la tensión residual a los choques producidos por la corriente del rayo para una onda de 8 / 20 μs ,
- resistencia a las corrientes de choque de larga duración,
- ensayos de funcionamiento, envejecimiento acelerado, capacidad de disipación de calor, estabilidad térmica, sobretensión de rayo y de maniobra, ...

CEI 71-1: Coordinación del aislamiento -1ª y 2ª partes-

La rigidez dieléctrica del material ante las solicitaciones del rayo debe elegirse según las sobretensiones previstas para satisfacer las exigencias de la coordinación del aislamiento. Para las sobretensiones del rayo, los principios de coordinación pueden basarse en un método convencional o estadístico.



$$T_1 = 1,67 T$$

$$T' = 0,3 T_1 = 0,5 T$$

Fig. 17: Ejemplo de onda de rayo normalizada según CEI 60, $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$, $T_2 = 50 \mu\text{s}$.

tensión asignada (kV eficaces)	7,2	24	72,5	245	420	525
--------------------------------	-----	----	------	-----	-----	-----

niveles aislamiento asignados	40	95	325	850	1 300	1 425
a los choques del rayo (kV)	60	125		950	1 425	1 550
		145		1 050		

Fig. 18: Ejemplos de valores de tensión (según CEI 694) para los que deben tomarse los niveles de aislamiento asignados

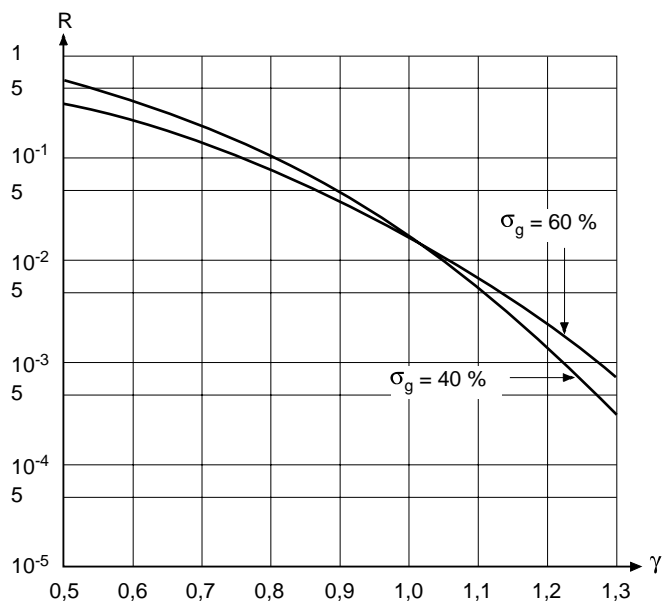


Fig. 19: Correlación entre el riesgo de defecto (R) y el coeficiente de seguridad estadística (γ) para diversas distribuciones de sobretensiones de rayo (σ_g = nivel tipo), según CEI 71.

■ aplicando un método convencional, el criterio de la coordinación está en el margen comprendido entre el valor máximo previsible y la tensión de aislamiento deducida de un ensayo de choque. Este margen determina un coeficiente de seguridad que no deberá ser inferior a un valor experimental del orden de 1,25,

■ con la aplicación del método estadístico, que admite que se produzcan defectos de aislamiento, tratamos de cuantificar el riesgo de defecto.

El criterio de la coordinación consiste en elegir un margen, caracterizado por un factor de seguridad estadístico, entre la tensión de aislamiento estadística a los choques (probabilidad de aislamiento del 90%) y la sobretensión estadística (probabilidad de rebasar del 2%).

La **figura 19** muestra, a título de ejemplo, la correlación entre el riesgo de defecto y el coeficiente de seguridad estadística. Hay que resaltar que en la actualidad, el empleo del método estadístico se limita al caso del aislamiento autorregenerante (defecto que no provoca la degradación del material).

5 Ejemplo de estudio de rayo

Este capítulo tiene por objeto el informar globalmente, en su desarrollo, del método empleado y las conclusiones prácticas. Se presentan sucesivamente, el método de cálculo, la modelización del centro, con las hipótesis de cálculo, las simulaciones deterministas, el aspecto estadístico y las conclusiones.

Generalidades

El estudio presentado afecta a la coordinación de aislamiento de un CBEM –Centro Bajo Envolvente metálica– de muy alta tensión para el que hay que asegurar una buena rigidez dieléctrica de los elementos de la cadena del sistema eléctrico. Estos elementos presentan unos niveles diferentes de BIL y concretamente se presenta la cuestión de la necesidad de colocación de pararrayos y de su definición (emplazamiento, dimensiones).

Este tipo de estudio tiende a generalizarse, en el marco de realización de centros importantes; los usuarios piden a los instaladores y suministradores de material «llaves en mano» la justificación cuantitativa y fundamentada del dimensionamiento de sus instalaciones.

La realización de estos estudios requiere el trabajo de equipos de ingenieros especializados, competentes, experimentados, que dispongan de medios informáticos adaptados.

Nota: el ejemplo presentado en este capítulo se ha establecido a partir de un estudio real para la realización de un parque de 500 kV, encargado al Servicio de Estudios de Redes (dependiente de la Dirección Técnica) por el Departamento de Realización de Conjuntos de Merlin Gerin, responsable del proyecto.

Método de cálculo

Se utilizan diversos tratamientos sucesivos y complementarios:

- primeramente, unos cálculos deterministas permiten evaluar las solicitudes, en tensión, en la instalación para diferentes parámetros influyentes como: tipo de descarga del rayo, intensidad y punto de impacto del rayo, presencia y emplazamiento de pararrayos, impedancia de tierra...
- en segundo lugar, a partir de los datos estadísticos del rayo, un cálculo de frecuencia de rayo y del riesgo asociado,
- finalmente, un resultado sobre el aislamiento del centro o parque, en cuanto a probabilidad.

Desarrollo de los cálculos deterministas

- modelización del parque.

El funcionamiento de cada uno de los elementos de la red y su configuración topológica (su interconexión física real), se describen por las ecuaciones establecidas a partir de las leyes eléctricas que rigen su funcionamiento y configuración.

Esta modelización necesita previamente de un análisis de la red para no incluir elementos que no son representativos del problema.

La resolución de las ecuaciones se efectúa con un ordenador con la ayuda de un programa especializado, por ejemplo «EMTP» (Electromagnetic Transient Program).

- simulación de las ondas de corriente de rayo y de las tensiones asociadas para cada solución considerada.

La resolución paso a paso de las ecuaciones permite la expresión, de forma casi continua, del proceso evolutivo de las variables corriente / tensión en función del tiempo y en cada punto de la red.

Esta simulación reproduce analógicamente lo que sucede en la realidad. El rayo se representa por una fuente de corriente, generadora de una onda triangular o biexponencial, en la que los tiempos de frente, cola y tensión de cresta son ajustables.

Modelización del parque

Esta modelización, como ya se ha indicado, se limita aquí a las descripciones generales suficientes para una comprensión global, omitiendo detalles útiles sólo a los especialistas.

Hipótesis generales

- caída de rayo sobre el cable de guarda con contorno (en retorno) de un aislador del segundo poste de la línea (caso más desfavorable),
- onda de rayo sobre el cable de guarda,
- valor de cresta: 200 kA,
- forma triangular: $2 / 50 \mu s$.
- longitud considerada de la línea afectada, limitada a $L = 1,5$ km del parque (**capítulo 2**).
- fase contorneada:
- la más alejada del cable de guarda que ha recibido el impacto,
- a tensión industrial despreciable.
- configuración estudiada: esquema de explotación del CBEM con la longitud del juego de barras en servicio al valor máximo (caso desfavorable),
- frecuencia de modelización de los elementos: 1 MHz.

Datos técnicos principales

- línea 500 kV:
- 4 cables por fase, 2 cables de guarda,
- matriz de impedancia:

$$\begin{pmatrix} Z_{\text{directa}} \approx 300 \Omega \\ Z_{\text{homopolar}} \approx 500 \Omega \end{pmatrix}$$

- postes:
- impedancia característica: 120 Ω ,
- altura: 43 m,
- resistencia de tierra: 25 Ω .
- aisladores:
- cadena de 29 elementos, con campana y soporte,
- tensión de contorno: 2 600 kV,
- retardo al cebado: el instante del cebado depende de la forma y de la amplitud de la sobretensión, según una curva típica tensión-tiempo.

- CBEM:
- impedancia característica: 70 Ω ,
- impedancia de toma de tierra de la estación o parque: < 1 Ω .
- capacidad:
- transformadores de potencia: 7 nF,
- transformadores de medida: 4 nF.
- pararrayos: característica $U = f(I)$, que expresa la no-linealidad de estos elementos,
- todas las conexiones (sin líneas): 1 $\mu\text{H}/\text{m}_{\text{lineal}}$.

Esquema estudiado (fig. 20)

Simulaciones deterministas

Las simulaciones se efectúan para diferentes variantes: presencia o no de pararrayos aguas abajo del CBEM y en los bornes del transformador, características propias de los pararrayos.

Para cada una de ellas se observan particularmente las sobretensiones máximas desarrolladas al nivel de los transformadores de medida, del CBEM y del transformador de potencia. Estas sobretensiones se comparan con los BIL posibles.

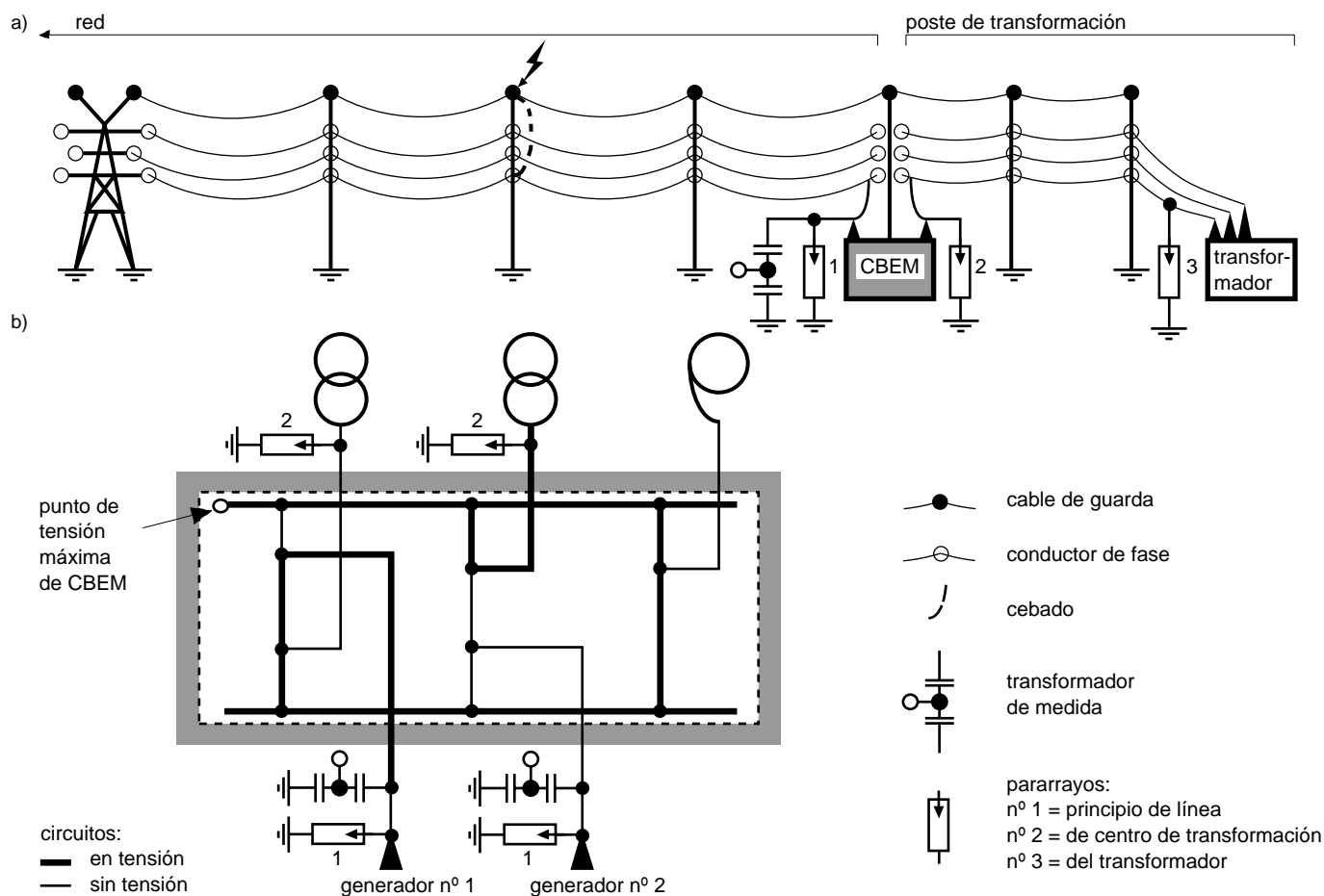


Fig. 20: Esquema general y configuración de un CBEM.

emplazamiento de los pararrayos			sobretensiones (kV) y coeficiente de seguridad (%) = $\frac{BIL - U_{\max}}{U_{\max}}$				
próximos al transformador de medida de U	aguas abajo del centro blindado	aguas arriba del transformador de potencia	transformador de medida		CBEM	transformador de potencia	
			BIL 1 550 kV	BIL 1800 kV	BIL 1550 kV	BIL 1550 kV	BIL 1800 kV
sí	sí	sí	1096 kV		1103 kV	1004 kV	
			41,4%	64,2%	40,5%	54,2%	79,3%
sí	no	sí	1263 kV		1235 kV	1044 kV	
			22,7%	42,5%	25,5%	48,5%	72,4%
sí	sí	no	1096 kV		1103 kV	1560 kV	
			41,4%	64,2%	40,5%	-0,6%	15,4%

Fig. 21: tabla presentando el coeficiente de seguridad de cada uno de los elementos del equipo estudiado. El valor a retener para el conjunto es de 40,5%.

Los resultados muestran (**figura 21**), para un valor de BIL 1 550 kV, la necesidad de instalar, al menos, dos pararrayos (transformador de medida, transformador de potencia).

La tabla de la **figura 21** y las curvas principales de la **figura 22** corresponden al caso de mayor seguridad con la puesta en servicio de tres pararrayos idénticos (nº 1, 2 y 3).

Es interesante observar la distribución de las DdR de 200 kA: las líneas de postes derivan la parte esencial de la corriente y solamente menos de 14 kA llegan al centro, donde del orden de la mitad es absorbida por los pararrayos. Es pues una pequeña parte de los DdR (< 5%) que provoca elevaciones de tensión de valor próximo a la rigidez dieléctrica de los materiales.

Nota:

Se ha verificado que las DdR directas sobre una fase son menos críticas que las DdR en retorno. En efecto, la función de pantalla del cable de guarda limita la corriente de las DdR directas, calculadas según el modelo electrogeométrico alrededor de los 12 kA.

Este nivel es inferior a la corriente crítica y no hay cebado o contorno de la cadena de aisladores. En estas condiciones, las solicitaciones de impacto directo calculadas para el centro son inferiores a las de impacto de retorno.

Cálculo estadístico de la frecuencia de rayo y del riesgo asociado

La frecuencia media de caída de rayo de la línea se calcula aplicando la fórmula presentada en el **capítulo 3**:

$$N_L = N_k \left(\frac{N1}{30} + \frac{I}{70} \right) \cdot \alpha \cdot \frac{L}{100}$$

de donde: $N_L = 1,03$ DdR / año.

La frecuencia de aparición de defectos provocados por las $DdR \geq 200$ kA se determina con ayuda de la curva de la **figura 2**: $P = 1\%$.

La frecuencia de aparición de tales defectos es, en este caso:

$$F_d = N_L \times P = 0,01 \text{ defectos / año.}$$

El tiempo de retorno T_r , es decir, el tiempo medio entre dos defectos es

$$T_r = 1 / F_d \approx 100 \text{ años.}$$

Una forma práctica de interpretar estas magnitudes es expresar el riesgo R correspondiente; este parámetro nos da la probabilidad de aparición del fenómeno durante la vida t del centro.

$$R = 1 - e^{-\frac{t}{T_r}}$$

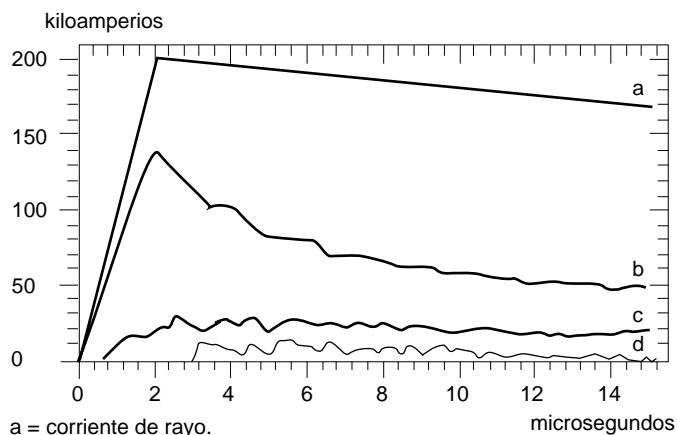
Si estimamos una vida de 30 años:

$$R \approx 26\%.$$

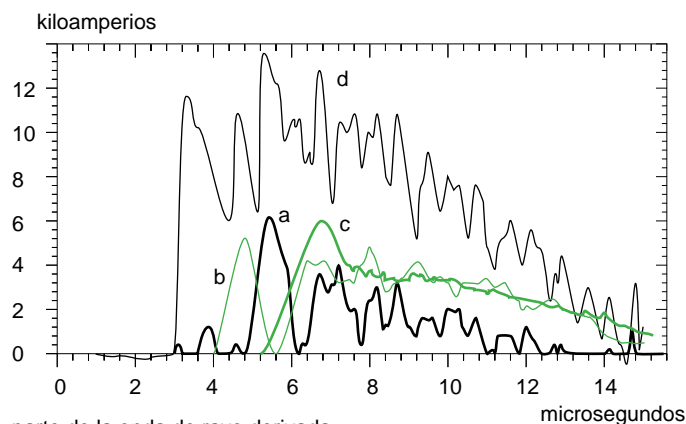
Interpretación de estos cálculos

La conclusión de este estudio en forma sintética podemos resumirla en una frase: hay una probabilidad contra cuatro (26%) para que durante la vida del centro (30 años), una sobretensión causada por un rayo alcance o rebase 1 103 kV que corresponde al 71% del BIL definido (1 550 kV), con un coeficiente de seguridad calculado del 40%.

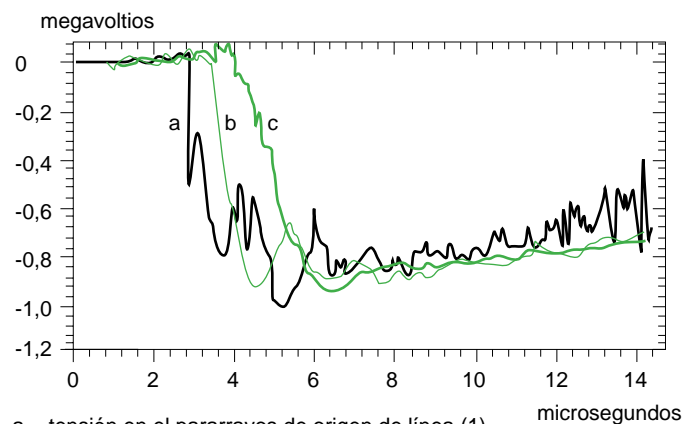
Este resultado ayuda a definir los niveles de protección de los materiales, interpretando las normas, el estado del proyecto, los condicionamientos económicos...



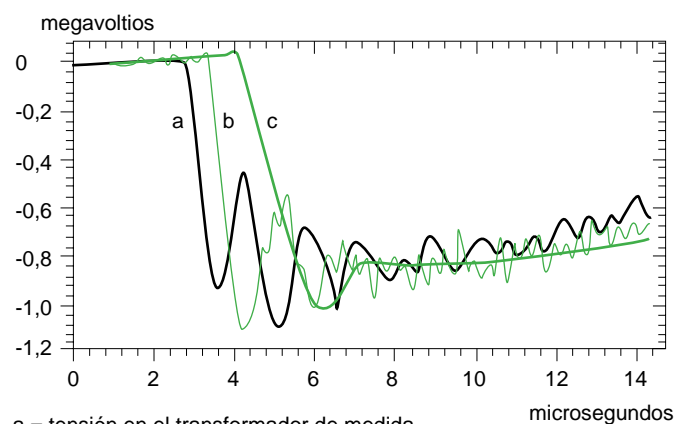
a = corriente de rayo.
 Parte de corriente derivada:
 b = hacia tierra por la torre del pararrayos,
 c = hacia tierra por la última torre de línea E anterior al CBEM,
 d = hacia el CBEM por la fase derivada,



parte de la onda de rayo derivada:
 a = hacia tierra por el pararrayos de origen de línea (1)
 b = hacia tierra por el pararrayos del CBEM (2)
 c = hacia tierra por el pararrayos del transformador (3)
 d = hacia el CBEM por la fase derivada



a = tensión en el pararrayos de origen de línea (1)
 b = tensión sobre el pararrayos del CBEM (2)
 c = tensión en el pararrayos del transformador (3)



a = tensión en el transformador de medida
 b = tensión máxima en el CBEM (fig. 20)
 c = tensión en el transformador de potencia

Fig. 22: Curvas obtenidas por simulación de sobretensiones de rayo.

A considerar que todos estos cálculos resultan de la elección de unos valores de los parámetros influyentes. Por ello:

- algunos son determinantes (por ejemplo: impedancias de tierra de las torres y de los centros, amplitudes de las DdR),
- y/o un campo de dispersión muy amplio (por ejemplo: tensión de perforación y retardo al contorno de los aisladores),

- y/o son mal conocidos (por ejemplo: estadísticas de configuración de la red, correlación entre amplitudes y frentes de onda de rayo),
- y/o son despreciables (por ejemplo: procesos de envejecimiento y efecto corona).

La elección de estos valores puede inclinar a suponer que los resultados serán imprecisos. De hecho la acumulación de experiencias, principalmente analizadas por los distribuidores de energía, confirman estas elecciones a posteriori: así, la metodología del ejemplo de este capítulo es igual a la practicada por EDF.

6 Conclusión

Este documento trata una corta síntesis sobre los efectos del rayo en las instalaciones eléctricas y constituye una iniciación elemental sobre este tema, en general mal conocido y a la vez de gran importancia.

Se aplica principalmente a las instalaciones de alta y media tensión: el rayo constituye de hecho un factor importante en las solicitudes a los materiales y es determinante en el dominio de la coordinación del aislamiento.

En baja tensión, el rayo constituye solamente un caso entre la multitud de perturbaciones eléctricas existentes. (Ver bibliografía).

En este Cuaderno Técnico se han abordado los principales aspectos técnicos procurando facilitar el máximo de informaciones desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo: conocimiento del rayo, sus efectos sobre las instalaciones eléctricas, los medios operacionales de protección actuales, las normas.

Pero, del conjunto del documento, es importante retener dos desarrollos:

- la noción de distancia de protección del pararrayos unida al fenómeno de la propagación de ondas a frecuencias muy elevadas (MHz),
- un ejemplo, presentado a partir de un estudio realizado por Merlin Gerin

sobre una instalación de muy alta tensión. Este ejemplo, que descompone el procedimiento de un estudio de rayo, muestra cómo es posible cuantificar el riesgo de destrucción de un material por el rayo.

El mundo de la electrotecnia comienza a estar sensibilizado sobre el problema del rayo, y los estudios que se realizan tienden a sistematizar el cuadro de los grandes proyectos internacionales.

La tendencia actual es de considerar el fenómeno del rayo en la concepción de las instalaciones con carácter creciente, hecho que contribuirá a una mejora de la calidad de la energía eléctrica.

Bibliografía

Normas

- CEI 56: Interruptores automáticos de corriente alterna de alta tensión.
- CEI 60-1: Técnicas de los ensayos en alta tensión - 1ª parte.
- CEI 71: Coordinación del aislamiento.
- CEI 76-1: Transformadores de potencia - 1ª parte: Niveles de aislamiento y ensayos dieléctricos.
- CEI 99-1: Pararrayos - 1ª parte.
- CEI 289: Bobinas de inductancia.
- CEI 298: Aparamento bajo envoltura metálica para redes de corriente alterna de tensiones asignadas comprendidas entre 1 y 52 kV.
- CEI 694: Cláusulas comunes para las normas de la aparatura de alta tensión.
- NF C 17100: Protección contra el rayo - Instalación de pararrayos: reglas.

Especificaciones EDF

- Serie HN 65:
- protección contra las sobretensiones en alta tensión,
 - descargadores en alta tensión,
 - pararrayos en alta tensión.
- HN 112: Coordinación del aislamiento en redes de 400 kV.
- HN 115: Principios de diseño y construcción de puestas a tierra.
- HN 119: Coordinación del aislamiento en redes de 225 kV.

Publicaciones diversas

- Las propiedades dieléctricas del aire y las tensiones muy altas. Colección EDF.
- «El rayo: comprenderlo para protegerse». Nathan editor.
- Tratado de electricidad. Volumen 22: Alta tensión. Escuela Politécnica de Lausana -EPL
- Las perturbaciones eléctricas y electromagnéticas. CIGRE, Revista Electra.
- Ediciones de las técnicas del ingeniero.
- Alta tensión y aislamiento Coordinación. CIGRE, Comité 33.

Cuadernos Técnicos Merlin Gerin

- La protección de los cableados de BT contra las perturbaciones electromagnéticas en los centros de alta tensión y muy alta tensión. Cuaderno Técnico nº 137 B. CAVALADE.
- Las perturbaciones eléctricas en BT. CT nº 141. R. CALVAS
- La CEM: la compatibilidad electromagnética. CT nº 149. F. VAILLANT.
- Sobretensiones y coordinación del aislamiento. CT nº 151. D. FULCHIRON.
- Cálculo de las corrientes de cortocircuito. CT nº 158 B. DE METZ NOBLAT Y G. THOMASSET.