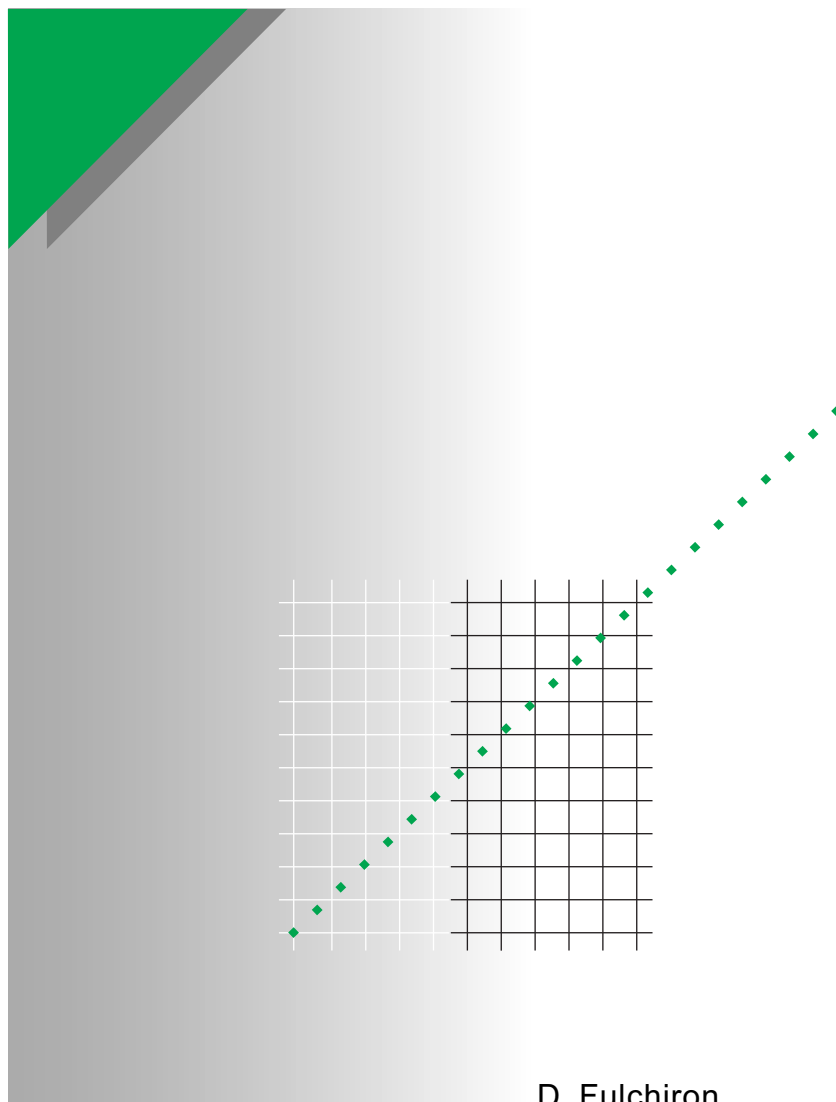


Cuaderno Técnico nº 151

Sobretensiones y coordinación de aislamiento



D. Fulchiron

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

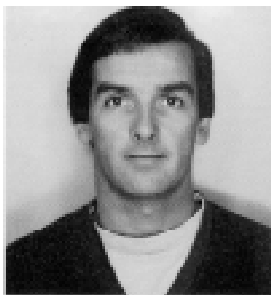
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

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

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 151 de Schneider Electric».



D. Fulchiron

Ingeniero de la E.S. d'Electricité en 1 980, ingresó en Merlin Gerin en 1 981, trabajando en la Estación de Ensayos de Gran Potencia (Volta) hasta 1 987. Seguidamente se integró al Servicio Técnico de la División Media Tensión, de la cual actualmente es el Jefe de Proyectos.

Al haber estudiado los materiales de distribución secundaria, pasó a profundizar en el dominio de la coordinación del aislamiento.

El autor agradece a:

Florencio Bouchet

Estudiante de la Escuela Supelec, su participación, en periodo de prácticas, en la realización de este documento.

Jean Pasteau

Miembro de la Dirección Técnica que ha aportado sus conocimientos de experto, participando en la revisión de la norma CEI 71.

cuaderno técnico nº 151

Sobretensiones y coordinación del aislamiento

Por: D. Fulchiron

Trad.: Dr. M. Cortes Cherta

Edición francesa: diciembre 1992


Versión española: febrero 1994

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

Sobretensiones y coordinación del aislamiento

Índice

1 Sobretensiones	Sobretensiones a frecuencia industrial	p. 5
	Sobretensiones de maniobra	p. 7
	Sobretensiones atmosféricas	p. 10
2 La coordinación del aislamiento	Definición	p. 13
	Distancia de aislamiento y tensión soportada	p. 13
	Tensión soportada	p. 14
	Principio de la coordinación del aislamiento	p. 15
3 Los dispositivos de protección contra las sobreintensidades	Los explosores	p. 16
	Los pararrayos	p. 17
4 Disposiciones normativas y coordinación del aislamiento	La coordinación del aislamiento en AT según CEI 71	p. 20
5 Coordinación aplicada al diseño de instalaciones eléctricas	Consecuencias de un cebado de arco	p. 24
	Reducción de los riesgos y de los niveles de sobretensión	p. 24
	Sobretensión debida a la ferorrresonancia	p. 24
6 Conclusión		p. 25
Anexo 1: Propagación de las sobretensiones		p. 26
Anexo 2: Instalación de pararrayos	Distancia máxima de protección	p. 27
	Cableado de los pararrayos	p. 28
Anexo 3: Las normas eléctricas		p. 28
Anexo 4: Bibliografía		p. 29

La coordinación del aislamiento es una disciplina que permite realizar el mejor compromiso técnico-económico en la protección de las personas y del material contra las sobretensiones que pueden aparecer en las instalaciones eléctricas, sobretensiones que pueden tener por origen la red o el rayo.

Tiene un especial interés en la consecución de una mayor disponibilidad de la energía eléctrica, siendo tanto más importante cuanto más elevada es la tensión de la red.

Para dominar la coordinación del aislamiento es necesario:

- conocer el nivel de sobretensiones que pueden existir en la red,
- utilizar las mejores protecciones cuando sea necesario,
- escoger el nivel de soporte a las sobretensiones, de los diversos componentes de la red, entre las tensiones de aislamiento que permiten satisfacer las exigencias que se han determinado.

Este Cuaderno Técnico tiene por objeto permitir conocer mejor las perturbaciones de la tensión y los medios para limitarlas, así como las disposiciones normativas para permitir una distribución segura y optimizada de la energía eléctrica, gracias a la coordinación del aislamiento.

Trata esencialmente de las redes de MT y AT.

1 Sobretensiones

Se definen como tales las perturbaciones que se superponen a la tensión nominal de un circuito.

Pueden aparecer:

- entre fases o entre circuitos distintos, y son llamadas de modo diferencial,
- entre los conductores activos y una masa, o la tierra, y son llamados de modo común.

Su carácter variado y aleatorio las hace difícil de caracterizar y sólo autoriza una aproximación estadística en lo que concierne a su duración, sus amplitudes y sus efectos. La tabla de la **figura 1** presenta las principales características de estas perturbaciones.

En realidad los riesgos se sitúan esencialmente al nivel de los disfuncionamientos, de la destrucción del material y, como consecuencia en la no continuidad del servicio. Sus efectos pueden presentarse en las instalaciones de los usuarios.

Las perturbaciones pueden conducir a:

- interrupciones cortas (reenganche automático en las instalaciones de distribución pública MT por líneas aéreas),
- interrupciones largas (intervención para el cambio de los aislantes destruidos; ver reemplazo del material).

Los aparatos de protección permiten limitar los riesgos. Su puesta en servicio necesita la elaboración reflexiva de los niveles coherentes de aislamiento y protección. Para ello, es indispensable una comprensión previa de los diferentes tipos de sobretensión, que es el objetivo de este capítulo.

Sobretensiones a frecuencia industrial

Bajo esta denominación de frecuencia industrial se reagrupan las sobretensiones de frecuencias inferiores a 500 Hz.

Se recuerda que las frecuencias industriales más frecuentes son: 50, 60 y 400 Hz.

Sobretensiones provocadas por un defecto de aislamiento (**figura 2**)

Una sobretensión debida a un defecto de aislamiento se manifiesta en una red trifásica, cuando el neutro está aislado, o es impedante.

En efecto, después de un defecto de aislamiento entre una fase y la masa o la tierra (daño en un cable subterráneo, puesta a tierra de un

tipo de sobretensión (causa)	coeficiente sobretensión MT-AT	duración	pendiente del frente frecuencia	amortiguamiento
a frecuencia industrial (defecto aislamiento)	$\leq \sqrt{3}$	larga > 1 s	frecuencia industrial	débil
de maniobra (interrupción de cortocircuito)	2 a 4	corta 1 ms	media 1 a 200 kHz	medio
atmosférica (caída directa del rayo)	> 4	muy corta 1 a 10 μ s	muy elevada 1000 kV/ μ s	fuerte

Fig. 1: Características de los diferentes tipos de sobretensiones.

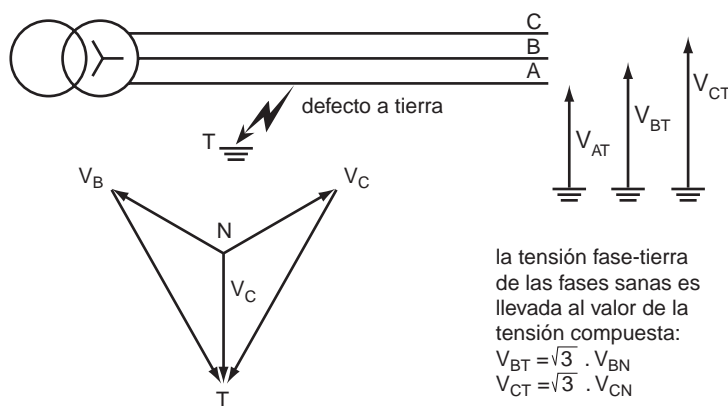


Fig. 2: Sobretensión temporal en una red a neutro aislado de la red, al presentarse un defecto de aislamiento.

conductor aéreo por una rama, defectos en el equipamiento, ...) la fase afectada se pone al potencial de tierra y las otras dos fases quedan entonces, con respecto a tierra sometidas a la tensión compuesta

$$U = V \cdot \sqrt{3}.$$

De forma más exacta, después de un defecto de aislamiento en la fase A, se define como factor Sd de defecto a tierra la relación de la tensión de fases B y C con relación a tierra, a la tensión simple de la red.

La siguiente ecuación permite calcular este factor Sd:

$$S_d = \frac{\sqrt{3(k^2 + k + 1)}}{k + 2}$$

$$\text{con } k = \frac{X_0}{X_d}$$

siendo X_0 la reactancia homopolar y X_d la reactancia directa de la red vista desde el defecto.

A señalar que

- si el neutro está perfectamente aislado (o sea, $X_0 = \infty$): $S_d = 3^{1/2} = \sqrt{3}$.
- si la puesta a tierra del neutro es perfecta (o sea, $X_0 = X_d$): $S_d = 1$.
- si, como se tiene en general, $X_0 \leq 3 X_d$: $S_d \leq 1,25$.

Sobretensiones en una línea larga en vacío (efecto Ferranti)

Se puede producir una sobretensión cuando una línea de gran longitud es alimentada por una de sus extremidades y sin carga en la otra. Ello se debe a un fenómeno de resonancia que se manifiesta por una onda de tensión de crecimiento lineal a lo largo de la línea.

En efecto, con

- L y C designando respectivamente la inductancia y la capacidad total de la línea;
- U_s y U_e las tensiones en la extremidad abierta y en la entrada de la línea, el factor de sobretensión es igual a:

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - \frac{1 \cdot L \cdot C \cdot \omega^2}{2}}$$

Este factor de sobretensión es del orden de 1,05 para una línea de 300 km y de 1,16 para una línea de 500 km. Estos valores son sensiblemente los mismos para las líneas de AT y MAT.

Este fenómeno se produce, en particular, cuando una línea larga es descargada bruscamente.

Sobretensiones por ferorresonancia

La sobretensión es entonces el resultado de una resonancia particular que se produce cuando un circuito comporta a la vez un condensador (voluntario o parásito) y una autoinducción con circuito magnético saturable (por ejemplo, un transformador). Esta resonancia puede aparecer, sobre todo, cuando una maniobra (apertura o cierre de un circuito) se realiza en la red con un

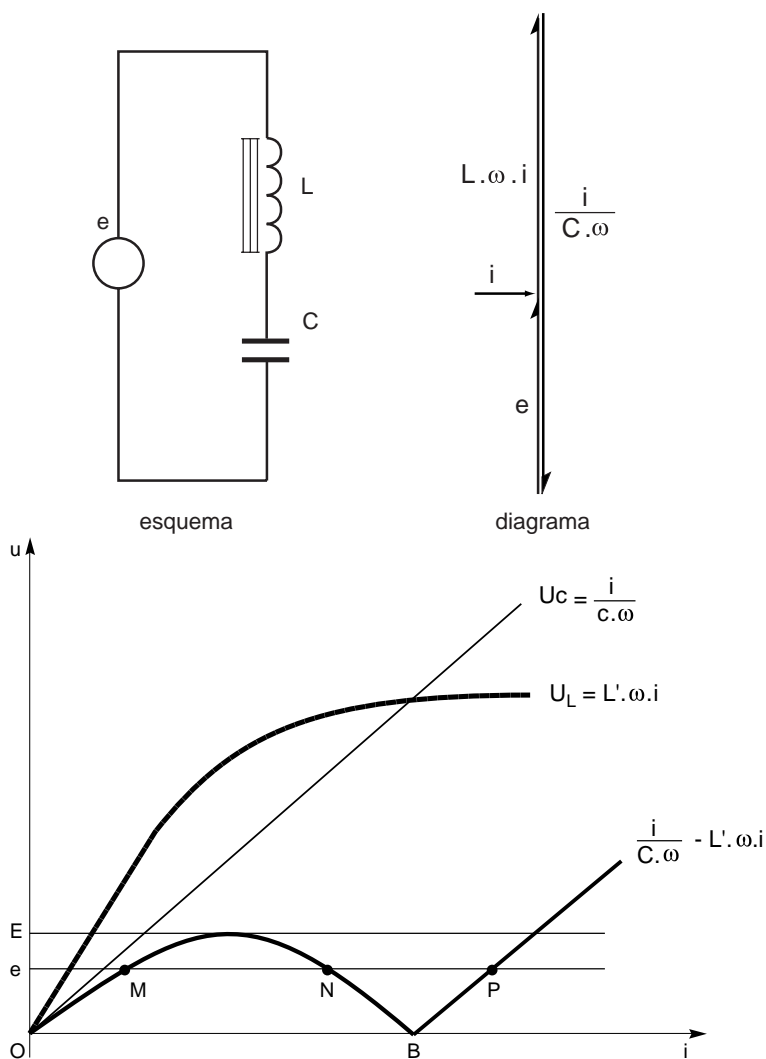


Fig. 3: Principio de la ferorresonancia.

aparato de polos separados, o de funcionamiento no simultáneo.

El circuito representado por el esquema de la **figura 3**, con una inductancia saturable L y una capacidad C en serie, facilita la comprensión del fenómeno. Es ahora posible dibujar las tres curvas:

$$U_c = f(i), U_L = f(i) \text{ y } (U_L - 1/C \cdot \omega \cdot i) = f(i);$$

- la primera es una recta de pendiente $1/C \cdot \omega$,
- la segunda, una curva que presenta un codo de saturación,
- y la tercera permite visualizar dos puntos de funcionamiento (O y B) para los cuales la tensión en los bornes del conjunto LC es nula, y otros dos M y P de funcionamiento estable; N es un punto de funcionamiento inestable.

Las tensiones en los bornes de L y de C (punto P) son elevadas. El paso del punto M al punto P puede ser debido a un transitorio que aumenta momentáneamente la tensión a un valor superior a E .

Estas sobretensiones (**figura 3**) hacen aparecer un riesgo de perforación dieléctrica así como un peligro para los eventuales receptores en paralelo con C . Pero generalmente las potencias puestas en juego son bastante reducidas ($1/2 C \cdot V^2$, siendo C pequeña) y no son susceptibles de dañar más que a los materiales frágiles. Es el fabricante del material el que puede evaluar y limitar este riesgo.

Notas:

La ferorresonancia, al depender de la variabilidad de L , puede producirse en una banda ancha de frecuencia.

Una demostración análoga puede tenerse en el caso de resonancia paralelo.

Una carga conectada al circuito juega el papel de una resistencia de amortiguamiento e impide el mantenimiento de las condiciones de resonancia.

Sobretensiones de maniobra

La modificación brusca de la estructura de una red eléctrica provoca la manifestación de fenómenos transitorios. Éstos se traducen, a menudo, por la aparición de una onda de sobretensión o de un tren de ondas de alta frecuencia de tipo aperiódico, u oscilatorio, de amortiguamiento rápido.

Sobretensiones de conmutación en carga normal

Una carga «normal» es esencialmente resistiva, es decir, que su factor de potencia es superior a 0,7.

En este caso el corte o el establecimiento de las corrientes de carga no plantea un problema mayor. El coeficiente de sobretensión (relación de las amplitudes de la tensión transitoria y de la tensión de servicio) varía entre 1,2 y 1,5.

Sobretensiones provocadas por el establecimiento o la interrupción de pequeñas corrientes inductivas

Este tipo de sobretensión tiene tres fenómenos generadores: la supresión brusca de la corriente, el recebado y el precebado.

El esquema de la **figura 4** representa una red que alimenta una carga a

través de un interruptor automático y comporta:

- una fuente de tensión senoidal, de inducción L_1 y de capacidad C_1 ,
 - un interruptor automático D , no disociable de sus elementos parásitos L_{p1} y C_{p1} ,
 - una carga inductiva L_2 de la que no puede ignorarse su capacidad repartida simbolizada por el condensador C_2 ,
 - por último una inductancia de línea L_0 , generalmente despreciable.
- supresión brusca de una corriente

En la ruptura de corrientes de reducido valor, notablemente inferiores a la corriente nominal del interruptor automático, el arco que aparece ocupa un pequeño volumen. Sin embargo está sometido a un enfriamiento importante, ligado a la capacidad del interruptor automático para cortar corrientes muy superiores.

De este hecho, el arco se hace inestable y su tensión puede presentar variaciones relativas importantes, en tanto que su valor absoluto se mantiene muy por debajo de la tensión de la red (caso del SF_6 o del vacío).

Estas variaciones de fuerza electromotriz pueden generar en las capacidades vecinas, parásitas o

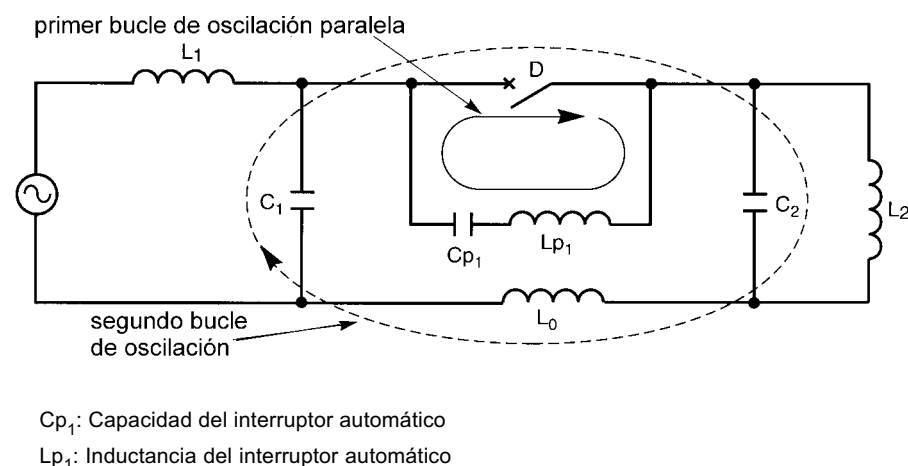


Fig. 4: Circuito equivalente para el estudio de las sobretensiones provocadas por la interrupción de corrientes inductivas.

voluntarias, corrientes oscilatorias (figura 4) de elevada frecuencia: la amplitud de estas corrientes puede llegar a ser no despreciables frente a la corriente 50 Hz y alcanzar el 10% del valor de ésta.

La superposición de la corriente 50 Hz y de esta corriente de alta frecuencia en el interruptor automático va a motivar la existencia de muchos pasos por cero de la corriente en las proximidades del cero de la onda fundamental de 50 Hz (figura 5).

El interruptor automático poco solicitado por estas corrientes de reducidos valores es a menudo capaz de cortar al primer paso por cero que se presenta. En ese instante las corrientes en los circuitos del generador y de la carga no son nulas. El valor instantáneo y de la onda de 50 Hz al extinguirse el arco es denominada «corriente de supresión brusca», o corriente «arrancada», como dicen los franceses. Esta supresión brusca determina sobretensiones que son función de la naturaleza de las impedancias puestas en juego, resistivas o inductivas, esencialmente de la energía almacenada en el circuito.

En el caso de pequeñas corrientes inductivas (figura 4), tenemos una carga que presenta una elevada inductancia, que en el instante de la extinción del arco, tendrá una energía almacenada dada por:

$$\frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot I_s^2$$

siendo I_s la corriente de supresión brusca.

El circuito $L_2 C_2$ queda en régimen de oscilaciones libres, poco amortiguadas, y la tensión de cresta que aparecerá en los bornes de C_2 vendrá dada, según la hipótesis de conservación de energía, por:

$$\frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot I_s^2 = \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot V^2$$

Si C_2 sólo está constituida por las capacidades parásitas respecto a masa, el valor de V puede tomar valores peligrosos para los aislantes

presentes en los materiales (interruptor automático, o la carga).

El circuito del generador tiene un comportamiento equivalente, pero su autoinducción L_1 , es generalmente muy inferior y las tensiones que aparecen en los bornes de C_1 son, pues, más reducidas.

■ el recebado

Se produce cuando el fenómeno de supresión antes explicado ha hecho aparecer entre los bornes del interruptor automático una sobretensión diferencial que éste no puede soportar: entonces se produce un arco. Esta explicación elemental y básica se complica por la presencia de los elementos parásitos precedentemente citados.

En efecto, después de la ruptura de la corriente y del recebado del arco, sobrevienen simultáneamente tres fenómenos oscilatorios a las frecuencias respectivas:

□ en el bucle D - Lp_1 - Cp_1 :

$$F_{p1} = \frac{1}{2\pi \sqrt{Lp_1 - Cp_1}} \text{ es del orden}$$

de algunos MHz;

□ en el bucle D - C_1 - L_0 - C_2 :

$$F_{p2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_0 \cdot C_1 \cdot C_2}} \text{ es del}$$

orden de 100 a 500 kHz,

□ en el conjunto del circuito

$$F_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot 5(C_1 + C_2)}} \text{ es}$$

del orden de 5 a 20 kHz.

Aparecen entonces múltiples recebados (hachazos) hasta que la separación de los contactos, que va en aumento, los hace imposibles. Se caracterizan por trenes de ondas de alta frecuencia de amplitud creciente. Estos trenes de sobretensiones, aguas arriba y abajo del interruptor automático, pueden, pues, ser muy peligrosos para los materiales aislantes que llevan los bobinados.

Conviene no confundir este fenómeno con el denominado «reencendido» que corresponde a la reaparición de una onda de corriente a la frecuencia industrial y por tanto a un fallo de la ruptura en el cero de la onda de corriente.

■ el precebado

En el curso del cierre de un aparato interruptor (interruptor, contactor o interruptor automático) se alcanza un instante en el que la tensión dieléctrica entre los contactos se hace inferior a la tensión aplicada.

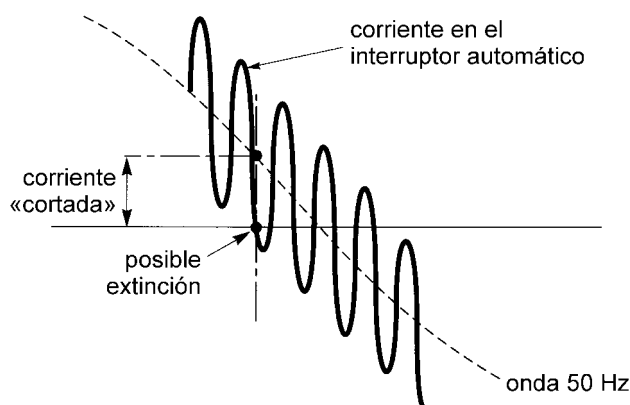


Fig. 5: Supresión de una corriente oscilante de alta frecuencia sobre una corriente de frecuencia industrial.

Para los aparatos a cierre rápido, con relación a 50 Hz, el comportamiento es función del ángulo de fase, en el momento de la maniobra.

Se establece entonces un arco entre los contactos y el circuito queda sujeto a una impulsión de tensión correspondiente a la anulación brutal de las tensiones entre los bornes del aparato.

Esta impulsión puede ocasionar oscilaciones en los circuitos paralelos existentes (descargas oscilantes de capacidades parásitas) así como reflexiones en las rupturas de impedancia y por tanto la manifestación de corrientes de frecuencia elevada, con relación a 50 Hz, a través del arco.

Si la maniobra del aparato es lenta, con relación a este fenómeno, se pueden obtener pasos por cero de la corriente de arco por superposición de la corriente de alta frecuencia y de la corriente de 50 Hz naciente.

La extinción eventual del arco, en función de las características de la aparamenta, va entonces a conllevar un comportamiento análogo al que se ha descrito para los fenómenos precedentes.

Sin embargo, como la tensión dieléctrica entre los contactos va disminuyendo a medida que se cierra, las sobretensiones sucesivas disminuyen hasta el cierre completo.

Este fenómeno es muy complejo. Las sobretensiones que de él resultan dependen entre otros:

- de las características del interruptor automático, (propiedades dieléctricas, aptitud para interrumpir una corriente de alta frecuencia, ...),
- de la impedancia característica de los cables,
- de las frecuencias propias del circuito de carga.

En general, no se puede hacer la predeterminación de las sobretensiones porque es muy difícil de calcularlas pues intervienen elementos difícilmente cuantificables y variables de una y otra parte, por lo que es necesario un modelo matemático muy preciso de la cámara de ruptura.

Las sobretensiones de precebado afectan particularmente en AT o MT a

los transformadores en vacío, al ser puestos en tensión, y a los motores en el arranque (Cuaderno Técnico Schneider n° 143).

Sobretensiones provocadas por maniobras en circuitos capacitivos

Por circuitos capacitivos entendemos a los circuitos constituidos por baterías de condensadores y a las líneas en vacío.

- puesta en tensión de baterías de condensadores

En el momento de la puesta en tensión de baterías de condensadores, a priori sin carga inicial y en el caso de un aparato de maniobra lento, un cebado de arco se produce entre los contactos de cierre en las proximidades de la cresta de la onda de tensión de 50 Hz.

Aparece entonces una oscilación amortiguada en el sistema LC de la **figura 6**. La frecuencia de esta oscilación en general es general es netamente superior a la frecuencia de la red y la oscilación de la tensión está sensiblemente centrada alrededor del valor de cresta de 50 Hz. El valor de la tensión máxima observada es entonces del orden de dos veces el valor de cresta de la onda de 50 Hz.

Con un aparato de maniobra más rápido, el cebado no se produce sistemáticamente en las proximidades de la cresta y la sobretensión eventual es pues más reducida.

Si una batería de condensadores se pone en servicio muy poco después de ser separada de la red, como aún conserva una tensión de carga residual de un valor comprendido entre cero y la tensión de cresta de la onda de 50 Hz. El cebado entre los contactos se produce en las proximidades de una cresta de polaridad opuesta (cebado del arco bajo una tensión dos veces el valor de la tensión de cresta).

La oscilación antes descrita se produce con una impulsión inicial doblada. El valor de la tensión máxima observada puede entonces ser próxima a tres veces la tensión de cresta de 50 Hz.

Por razones de seguridad las baterías de condensadores están siempre equipadas con resistencias de descarga que permiten eliminar las tensiones residuales con una constante de tiempo del orden de 1 minuto. En consecuencia un factor de sobretensión de 3 corresponde a casos muy particulares.

- puesta en tensión de líneas o cables en vacío

El cierre lento de un aparato sobre este tipo de carga conlleva, también aquí, un cebado del arco en las proximidades de la cresta de 50 Hz, y el escalón de tensión aplicada a un extremo de la línea o del cable va a propagarse y reflejarse en el otro extremo abierto (**anexo 1**).

La superposición del escalón incidente y del escalón reflejado conduce a una sobretensión igual a dos veces la tensión aplicada, despreciando los amortiguamientos, y con la hipótesis de que los 50 Hz son asimilables a una continua para estos fenómenos.

Este tipo de comportamiento, está ligado a las capacidades y autoinducciones repartidas de los conductores considerados; las líneas aéreas presentan, además, un acoplamiento entre fases, todo lo cual hace la modelización bastante compleja.

Este fenómeno de la reflexión debe tenerse en cuenta sobre todo en las líneas de transporte (MAT), a tenor de la pequeña separación relativa entre tensión de servicio y tensión de aislamiento.

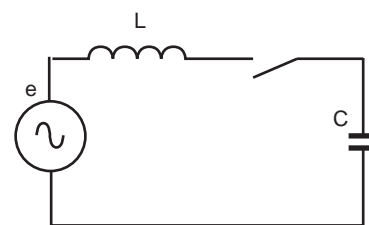


Fig. 6: Esquema de principio de un circuito de maniobra de condensadores.

■ ruptura de circuitos capacitivos

La ruptura de circuitos capacitivos pone generalmente pocas dificultades. En efecto, al extinguirse el arco al paso de la corriente por cero, las capacidades quedan cargadas, el valor de cresta de la onda de tensión 50 Hz, y la tensión de restablecimiento entre los bornes del interruptor se hace según una onda de 50 Hz. Sin embargo, un semiperíodo después de la ruptura, el aparato queda sometido a una tensión diferencial igual a dos veces la tensión de cresta.

Si el interruptor no es capaz de soportar entre los contactos que se separan esta tensión (apertura aún insuficiente) se puede producir un reencendido. A éste le siguen, si el circuito lo permite, (circuito monofásico o con neutro real) una inversión de tensión en los bornes de los condensadores, llevándolos, como máximo, a una carga de tensión de carga tres veces la tensión de cresta (**figura 7**).

La corriente se interrumpe de nuevo y se puede producir un segundo reencendido en el semiperíodo siguiente, bajo una tensión cinco veces la tensión de cresta.

Este comportamiento puede dar lugar a una escalada de tensión muy importante, que puede motivar entre fases y a masa, (cortocircuitos) y debe ser evitado eligiendo una apartenta de corte que no permita tener reencendidos.

Sobretensiones atmosféricas

Las tormentas son un fenómeno natural, conocido por todos, espectacular y peligroso.

En el mundo se producen unas 1000 tormentas cada día. En Francia (**figura 8**) ocasionan cada año un 10% de los incendios, la muerte de 40 personas y de 20 000 animales, y 50 000 cortes de corriente o de teléfonos.

Las redes aéreas son las más afectadas por las sobretensiones y sobreintensidades de origen atmosférico.

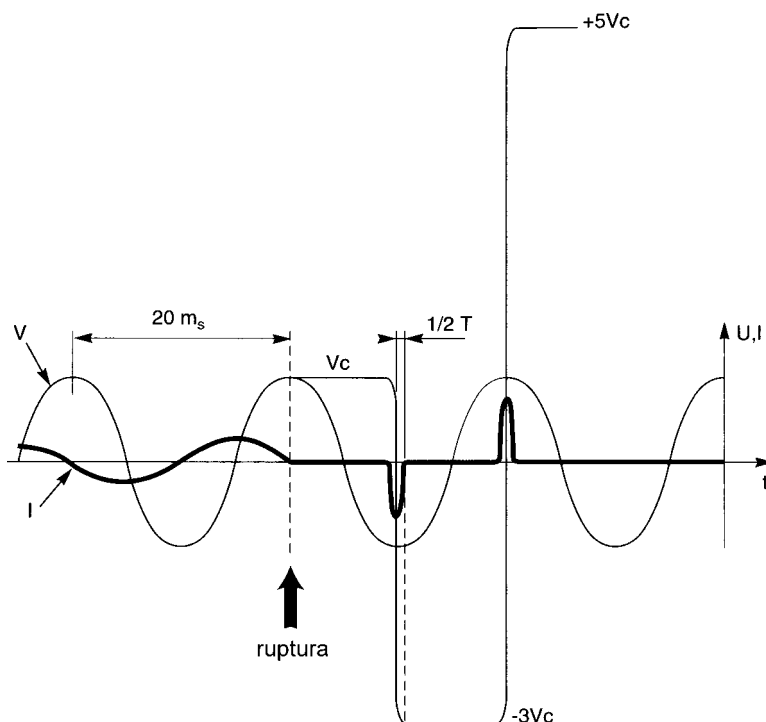


Fig. 7: Escalada de la tensión en la separación de un banco de condensadores de red por un interruptor de maniobra lenta.

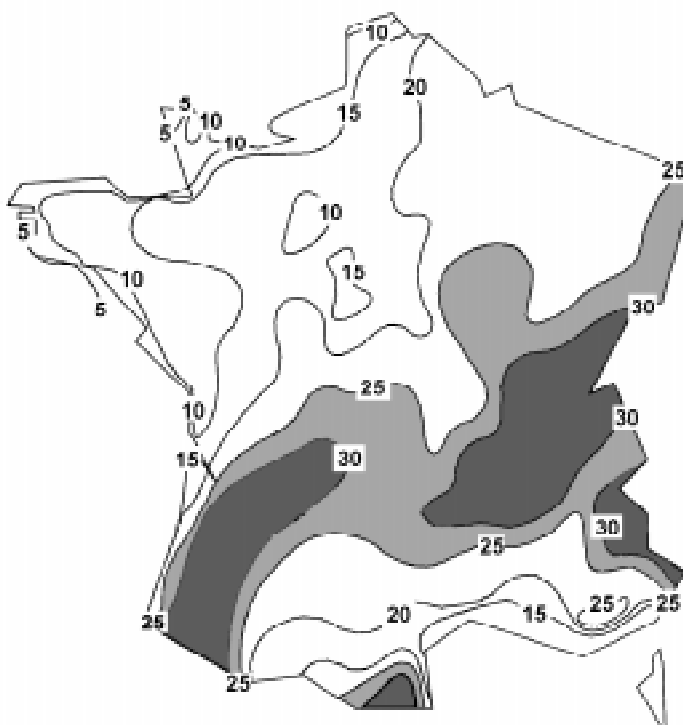


Fig. 8: Niveles isoceráunicos de Francia continental (graduado en número medio anual de días de tormenta). (Fuente: Meteorología Nacional).

Una particularidad de los rayos es su polarización: generalmente son negativos (nubes negativas y suelo positivo). Aproximadamente un 10% son de polaridad inversa y estos rayos son los más violentos. A observar que el frente de onda de la tensión del rayo, que las normas aplican, es de 1,2 μ s para la tensión y 8 μ s para la corriente.

Normalmente se distingue entre:

- la caída «directa» del rayo sobre una línea
- la caída «indirecta» del rayo, si éste cae, en las proximidades de una línea, sobre una torre metálica, o lo que viene a ser lo mismo, sobre el cable de guarda (puesto a tierra, este cable enlaza los vértices de las torres, y está destinado a proteger los conductores activos de los rayos directos).

El rayo directo

Se manifiesta por la inyección en la línea de una onda de corriente de varias decenas de kA. Esta onda de corriente que puede fundir los conductores, al propagarse a una y otra parte del punto del impacto (figura 9) provoca un aumento de la tensión U dada por la fórmula

$$U = Z_c \cdot \frac{i}{2}$$

siendo i la corriente inyectada y Z_c la impedancia homopolar características de la línea (300 a 1 000 ohms).

U alcanza valores de varios millones de voltios, que no son soportables por ninguna línea. En un punto de ésta, por ejemplo en la primera torre que encuentre la onda, la tensión crece hasta que se produce la perforación en el aire de la distancia de aislamiento (la cadena de aisladores). Según que el cebado de este arco se haya producido o no (función del valor de la corriente inyectada en la línea), la onda que continúa propagándose después de la torre se denomina cortada o plena.

Para las diferentes tensiones de red, no se tiene un cebado de arco por debajo de la corriente crítica indicada por la recta de la figura 10.

Para las redes de tensión inferior a 400 kV prácticamente todas las caídas de rayos directos implican un cebado de arco y un defecto a tierra.

En efecto, se estima que solamente un 3% de las sobretensiones detectadas en las redes públicas de MT francesas de 20 kV, exceden de 70 kV y son por tanto imputables a caídas de rayo directas. Además, por el hecho de la atenuación de la onda de tensión a lo largo de su propagación por la línea, las sobretensiones máximas (muy raras) a la llegada a un centro de transformación, o de un edificio se evalúan en 150 kV en MT.

Recordemos que el valor de cresta de la onda de rayo en el ensayo del nivel de aislamiento de la aparata de 24 kV es de 125 kV.

El rayo indirecto

Cuando el rayo cae sobre una torre, o simplemente en las proximidades de una línea, se generan en la red sobretensiones importantes.

Este segundo caso, más frecuente que el rayo directo, puede manifestarse también peligroso.

- si el rayo cae sobre una torre, o sobre el cable de guarda, el paso de la corriente a tierra determina un aumento del potencial de las masas

metálicas con respecto a tierra (figura 11). La sobretensión U correspondiente puede alcanzar varias centenas de kV

$$U = R \frac{i}{2} + \frac{L}{2} \frac{di}{dt}$$

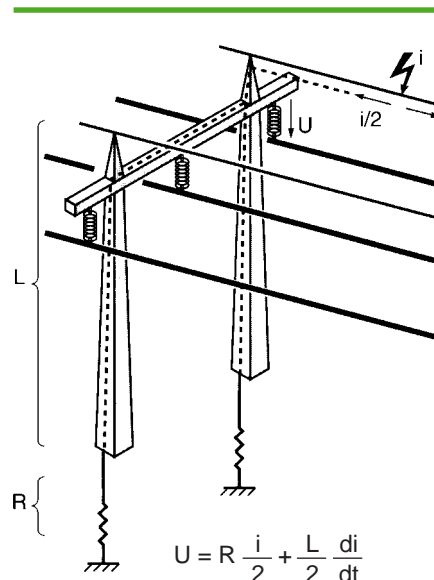


Fig. 11: Cuando el rayo cae sobre el cable de guarda, el paso de corriente provoca un aumento del potencial de la masa de la torre metálica con relación a tierra.

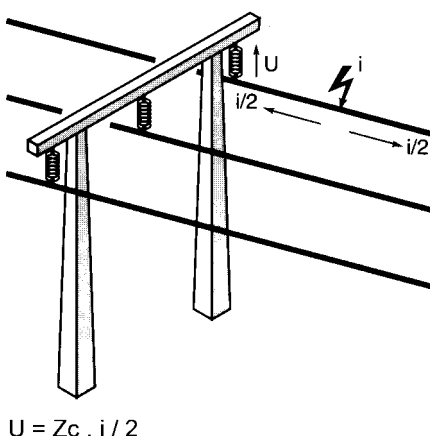


Fig. 9: Después de una caída de rayo directo, la onda de corriente se propaga a una y otra parte del punto del impacto.

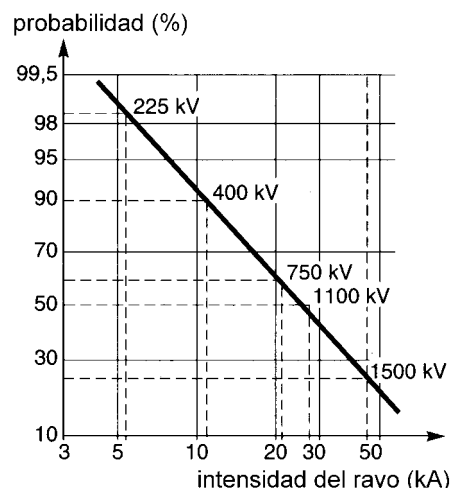


Fig. 10: Distribución estadística de las intensidades del rayo directo e intensidades mínimas de cebado de arco en función del nivel de tensión de la red.

siendo R la resistencia a la onda de frente abrupto de la toma de tierra y L la autoinducción de la torre y/o del conductor de puesta a tierra.

Cuando esta tensión alcanza el valor de la tensión de contorno de un aislador, se produce un «arco de retorno» entre la estructura metálica y uno o más conductores activos.

Para tensiones de red superiores a 150 kV este arco de retorno es poco probable. La calidad de la toma de tierra de las torres juega un papel importante.

A partir de los 750 kV, no hay prácticamente ningún riesgo de un arco de retorno, lo que justifica la instalación de cables de guarda en las líneas de MAT. Por debajo de los 90 kV estos cables no constituyen una protección eficaz más que en el caso de que la tierra de las torres sea excelente.

■ si el rayo cae en las proximidades de la línea el flujo de energía hacia el suelo provoca una variación extremadamente rápida del campo electromagnético. Las ondas de tensión inducidas en la línea son similares en forma y amplitud, a las obtenidas por la caída del rayo directo. Su característica principal es su frente, muy abrupto, (del orden del microsegundo) y su amortiguación (aperiódica o no) muy rápida, (características típicas de estas ondas según CEI 60: duración del frente 1,2 μ s y duración de la semiamplitud de la cola 50 μ s),

■ cuando la onda de tensión de una caída de rayo alcanza un transformador MT/BT, la transmisión de tensiones se hace esencialmente por acoplamiento capacitivo. La amplitud de la sobretensión así transmitida, observada sobre el

secundario lado BT, es inferior al 10% de la que se tiene en el lado MT (generalmente inferior a 70 kV). Por tanto, en las líneas BT las sobretensiones inducidas son, en general, inferiores a 7 kV.

Una observación estadística, obtenida por el Comité Electrotécnico Francés, ha demostrado que el 91% de las sobretensiones en los abonados de BT no exceden de 4 kV y el 98% de 6 kV (**figura 12**). De aquí, por ejemplo, la norma de fabricación de los interruptores automáticos de acometida que prescribe una tensión de choque de 8 kV.

Sobretensiones electrostáticas

Hay otros tipos de descargas atmosféricas. En efecto, si la mayoría de sobretensiones inducidas son de origen electromagnético, algunas son de origen electrostático e interesan particularmente a las redes aisladas de tierra.

Por ejemplo, durante los minutos que preceden a la caída del rayo, cuando una nube cargada a un cierto potencial se encuentra encima de una línea, ésta toma una carga de sentido contrario (**figura 13**).

Antes de que se produzca la caída del rayo que ha de permitir la descarga de la nube, se tiene, pues, entre la línea y el suelo un campo eléctrico **E** que puede alcanzar 30 kV/m, bajo cuyo efecto se carga el condensador línea/tierra a un potencial del orden de 150 a 500 kV, según la altura de la línea con relación al suelo.

Existen riesgos de chispas poco energéticas a nivel de los componentes menos aislados de la red.

Después de la caída del rayo entre la nube y la tierra, al desaparecer el campo eléctrico, las capacidades se descargan.

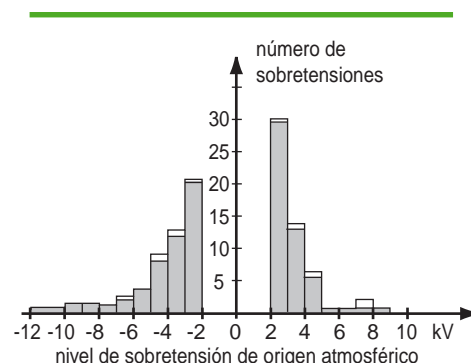


Fig. 12: Reparto estadístico de la amplitud de las sobretensiones atmosféricas, obtenido a partir de dos campañas de observación (183 entre 1 973 y 1 974 y 150 en 1975). De aquí el desdoblamiento de las curvas.

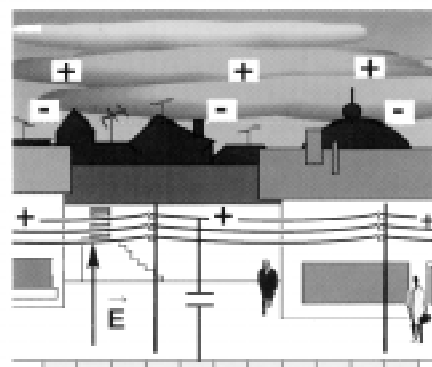


Fig. 13: Origen de una sobretensión electrostática.

2 La coordinación del aislamiento

Las primeras redes eléctricas (Grenoble-Jarrie 1 883) eran tecnológicamente muy rudimentarias y a merced de las condiciones atmosféricas, como el viento y la lluvia.

- el viento, haciendo variar las distancias entre los conductores, era el origen de cebado de arcos,
- la lluvia favorecía las corrientes de fuga a tierra.

Estos problemas han conducido a:

- utilizar aisladores,
- determinar las distancias de aislamiento,
- unir las masas metálicas de los aparatos a tierra.

Definición

La coordinación del aislamiento tiene por objeto determinar las características de aislamiento necesarias y suficientes de los diversos componentes de las redes con vistas a obtener una rigidez homogénea a las tensiones normales, así como a las sobretensiones de origen diverso (figura 14). Su finalidad principal es la de permitir una distribución segura y optimizada de la energía eléctrica.

Para optimizar es necesario comprender y buscar la mejor relación económica entre los diferentes parámetros que dependen de esta coordinación:

- coste del aislamiento,
- coste de las protecciones,
- coste de las averías (pérdida de la explotación y coste de la reparación), teniendo en cuenta sus probabilidades.

Emanciparse de los efectos nefastos de las sobretensiones supone un primer paso. Para ello es necesario atacar sus fenómenos generadores, labor que no siempre es simple.

En efecto, si con la ayuda de técnicas apropiadas, las sobretensiones de maniobra de la aparamenta pueden

ser limitadas, en cambio, es imposible actuar sobre las del rayo.

Es pues, necesario localizar el punto de más débil tensión soportada por el cual circulará la corriente engendrada por la sobretensión, y dotar a todos los otros elementos de la red de un nivel de rigidez dieléctrica superior.

Antes de abordar las diferentes soluciones técnicas (métodos y materiales) es importante recordar lo que es una distancia de aislamiento y una tensión soportada.

Distancia de aislamiento y tensión soportada

Distancia de aislamiento

Esta denominación reagrupa dos nociones, una de distancia en el gas (aire, SF₆, etc...) y la otra de la «línea de fuga» de los aislantes sólidos (figura 15):

- la distancia en el gas es el camino más corto entre dos partes conductoras,

- la línea de fuga es igualmente el camino más corto entre dos conductores, pero siguiendo la superficie exterior de un aislante sólido.

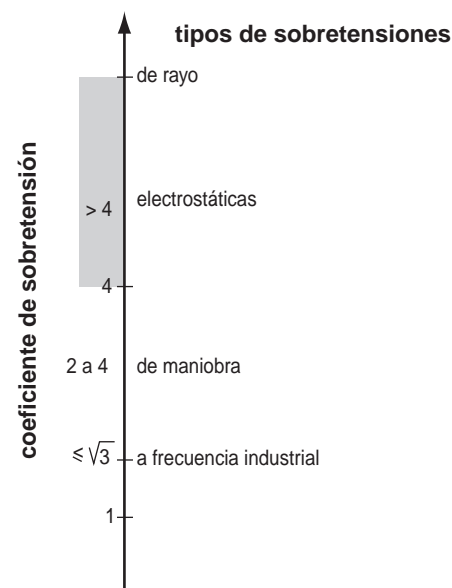


Fig. 14: Diferentes niveles de tensiones que se presentan en las redes MT-AT.

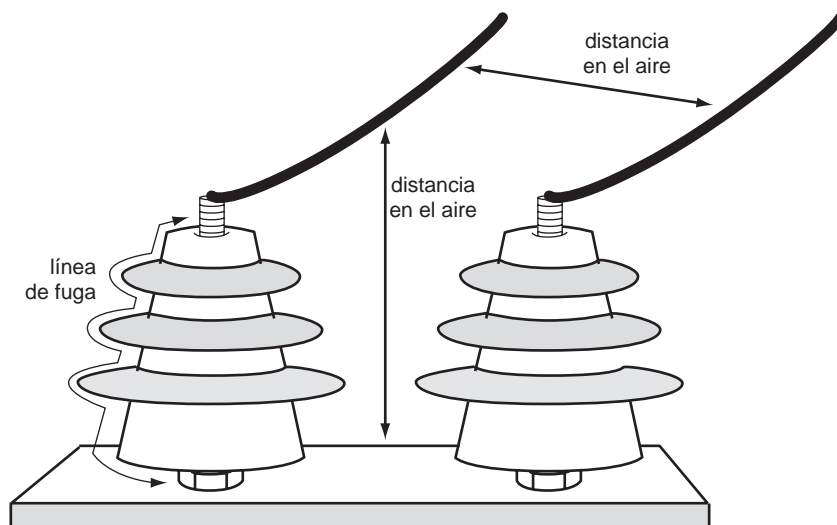


Fig. 15: Distancia en el aire y línea de fuga.

Estas dos distancias están directamente ligadas al afán de protección contra las sobretensiones, pero sus tensiones soportadas no son idénticas.

Tensión soportada

Diffiere, en particular, según el tipo de sobretensión aplicada (nivel de tensión, frente de onda, frecuencia, duración, ...). Además, las líneas de fuga pueden estar sujetas a fenómenos de envejecimiento, propios del material aislante considerado, que implica una degradación de sus características.

Los factores influyentes son principalmente:

- las condiciones ambientales (humedad, polución, radiaciones UV),
- las tensiones eléctricas permanentes (valor local del campo eléctrico).

La tensión soportada de distancia en el gas es función igualmente de la presión:

- variación de la presión del aire con la altura,
- variación de la presión de llenado de un aparato.

Tensión soportada

En un gas, la tensión soportada de un aislamiento es una función exageradamente no lineal, de la distancia. Por ejemplo en el aire, un campo eléctrico de tensión eficaz 300 kV/m es admisible por debajo de 1 m, pero este puede reducirse a 200 kV/m entre 1 y 4 m y a 150 kV/m entre 4 y 8 m. Es necesario también anotar que esta distancia no es prácticamente modificada por la lluvia.

Este comportamiento macroscópico es debido a la no homogeneidad del campo eléctrico entre dos electrodos de forma cualquiera y no a las características intrínsecas del gas.

Ésta no sería observada entre electrodos planos de superficie «infinita» (campo homogéneo).

Las líneas de fuga de los soportes aislantes de barras, de atravesadores de transformadores, de cadenas de aisladores, son

determinadas para obtener una rigidez similar a la distancia directa en el aire entre dos electrodos extremos, cuando están secos y limpios. Por el contrario, la lluvia y más la polución húmeda reducen notablemente su tensión soportada.

Tensión soportada a frecuencia industrial

En régimen normal, la tensión de la red puede presentar sobretensiones a frecuencia industrial de débil duración (fracción de segundo a algunas horas, según el modo de explotación y de protección de la red). La tensión soportada de ensayo a frecuencia industrial, recomendada en los ensayos de rigidez dieléctrica habituales, de un minuto, es generalmente suficiente.

La determinación de esta categoría de características es fácil y los diferentes aislantes son fácilmente comparables. Por ejemplo: la **figura 16** da una comparación de las tensiones de rigidez en el aire y en el SF₆ en función de la presión.

Tensión soportada a las sobretensiones de maniobra

Las distancias sometidas a tensiones de choque de maniobra reúnen cuatro propiedades fundamentales siguientes:

- la no linealidad, ya mencionada, de la relación distancia/tiempo,
- la dispersión, que hace que esta rigidez deba ser expresada en términos estadísticos,
- la asimetría (la rigidez puede ser distinta según que la onda sea de polaridad positiva o negativa),
- el paso por un mínimo de la curva de tensión soportada en función de la duración del frente. Cuando la distancia entre los electrodos crece, este mínimo evoluciona según las duraciones del frente más y más elevadas (**figura 17**). Se sitúa, como media, alrededor de los 250 µs, lo que explica la elección del frente de la onda de choque normalizada (ensayo normalizado según CEI-60: aplicación de una onda de duración de frente de 250 µs y de una dirección de semi-amplitud en la cola de 2 500 µs).

Tensión soportada a las sobretensiones atmosféricas

En la caída del rayo, la tensión soportada se caracteriza por una mucho mayor linealidad que en los demás tipos de solicitaciones.

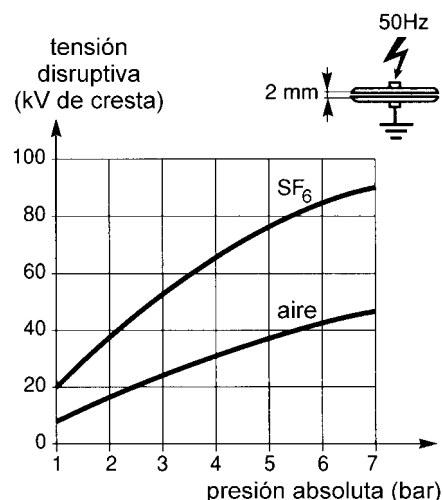


Fig. 16: Tensión disruptiva del SF₆ y del aire en función de la presión absoluta.

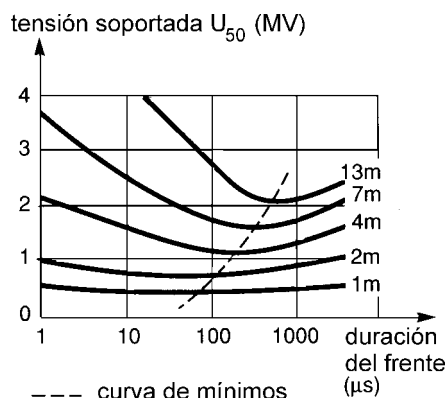


Fig. 17: Curva de mínimos de tensión soportada en función de la duración del frente de onda aplicada con polaridad positiva.

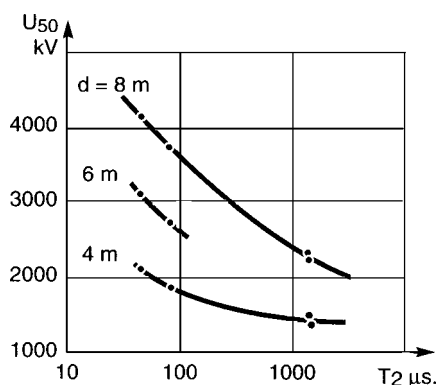


Fig. 18: U_{50} en función del tiempo T_2 de semi-amplitud en la cola. Intervalo entre punta positiva y plano: $d = 4 - 6 - 8$ m.

T_{cr} (μs)	7	22
T_2 (μs)	1 400	1 500
U_{50} (kv)	2 304	2 227
σ	370	217

Fig. 19: Influencia de la duración hasta la cresta sobre la tensión soportada dieléctrica de un intervalo punta positiva - plano, $d = 8$ m.

Aquí también existe el fenómeno de dispersión, con una tensión soportada a la polaridad positiva (la más aplicada al electrodo más puntiagudo) menos buena que a la polaridad negativa.

Las dos simples fórmulas que siguen, permiten apreciar para las redes de MAT y MT, las solicitaciones al choque de polaridad positiva 1,2 μs / 50 μs de un intervalo de aire:

$$U_{50} = \frac{d}{1,9}$$

U_{50} = tensión para la cual la probabilidad de la chispa es del 50%.

$$U_0 = \frac{d}{2,1}$$

U_0 = tensión soportada

siendo d la distancia de aislamiento en metros, U_{50} y U_0 vienen dadas en MV.

Numerosos estudios experimentales han permitido confeccionar tablas precisas de correspondencia entre la distancia y la tensión soportada, tomando en consideración diferentes factores, tales como la duración del frente de onda y de cola, la polución ambiental y la naturaleza del aislante.

A título de ejemplo, la **figura 18** nos da las variaciones de la tensión U_{50}

en función de la distancia y de la duración de cola T_2 para un intervalo punta positiva-plena.

La tabla de la **figura 19** indica, por otra parte, la independencia de la tensión soportada respecto a la duración del frente de subida.

Principio de la coordinación del aislamiento

Estudiar la coordinación del aislamiento de una instalación eléctrica es, pues, definir, a partir de los niveles de tensiones y sobretensiones susceptibles de presentarse en esta instalación, uno o más niveles de protección contra las sobretensiones.

Los materiales de la instalación y los dispositivos de protección son entonces elegidos en consecuencia (**figura 20**).

El nivel de protección se deduce de las condiciones:

- de la instalación,
- del ambiente,
- y de la utilización del material.

El estudio de estas «condiciones» permite determinar el nivel de sobretensión que podrá solicitar el material durante su utilización. La elección del nivel de aislamiento adoptado permitirá asegurar que, frente a la frecuencia industrial y frente a los choques de maniobra, al menos, el nivel de aislamiento no será nunca sobrepasado.

Frente a la caída del rayo deberá realizarse generalmente un compromiso entre el nivel de protección de los pararrayos eventuales y el riesgo de fallos admisible.

Para dominar bien los niveles de protección aportados por los limitadores de sobretensión, conviene conocer bien sus características y su comportamiento; este será el objetivo del capítulo siguiente.

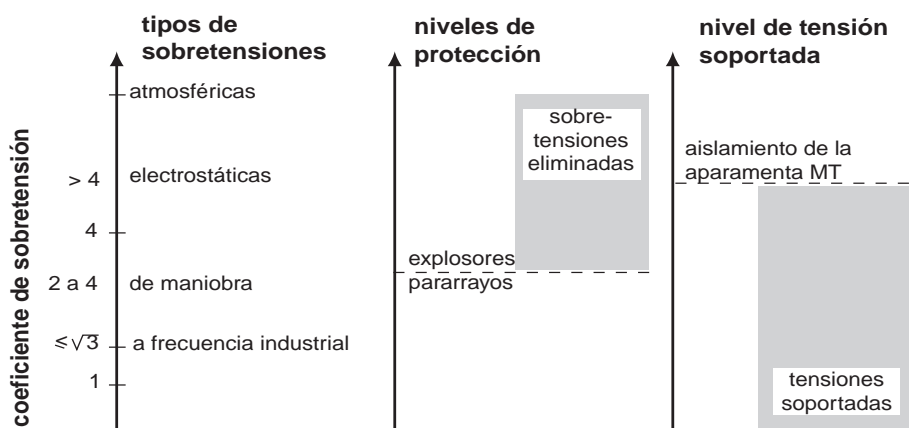


Fig. 20: Coordinación de aislamiento: posicionar correctamente el nivel de protección y la tensión soportada de la aparamenta en función de las sobretensiones probables.

3 Los dispositivos de protección contra las sobreintensidades

Los explosores y pararrayos son los dispositivos utilizados para descrestar y limitar las sobretensiones transitorias de fuerte amplitud. Generalmente se dimensionan para intervenir en las sobretensiones de la caída del rayo.

Los explosores

Utilizados en MT y AT se colocan en los puntos de la red particularmente expuestos y a la entrada de los Centros de Transformación MT/BT. Su papel es el de constituir un punto débil en el aislamiento de la red, con el fin de que un eventual cebado de arco se produzca sistemáticamente en él.

El primero y más antiguo de los aparatos de protección es el explosor de varillas. Estaba constituido por dos varillas enfrentadas frente a frente, llamadas electrodos, una unida al conductor a proteger y la otra a tierra.

Los modelos actuales más corrientes, están basados en el mismo principio pero dispuestos en forma de «cuernos» para prolongar la longitud del arco y facilitar el restablecimiento de las cualidades dieléctricas por desionización del intervalo de cebado inicial del arco y en ciertos casos llegar a la extinción del mismo.

La distancia entre los dos electrodos permite ajustar el nivel de protección. Algunos tienen, además, entre los dos electrodos una varilla vertical, destinada a evitar el cortocircuito intempestivo por pájaros y su electrocución (figura 21).

Este dispositivo es muy simple y bastante eficaz y económico, pero sus inconvenientes son numerosos:

- la tensión de cebado presenta una dispersión importante. En efecto, esta tensión depende fuertemente de las condiciones atmosféricas; se han podido observar variaciones de más del 40%;

- el nivel de cebado depende también de la amplitud de la sobretensión (figura 22);

- el retardo al cebado es tanto más largo cuanto más débil es la sobretensión.

En estas condiciones es posible que una onda de choque provoque el cebado en un aparato cuya tensión soportada es superior a la de cebado del explosor a poco que aquel aparato presente en retardo el cebado más débil (por ejemplo cables).

Además, después del cebado, la ionización entre los electrodos hace que el arco se mantenga alimentado por la tensión de la red y puede dar lugar (en función de la puesta a tierra del neutro) a una corriente de fuga a la frecuencia industrial. Para interrumpir esta corriente, que define un defecto franco a tierra, se necesita

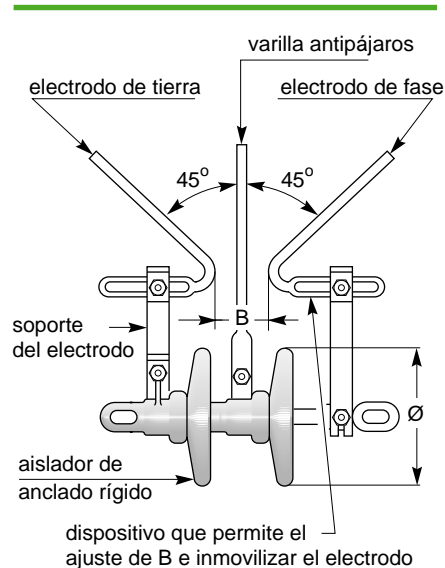


Fig. 21: Explosor MT con varilla antipájaros. Ejemplo utilizado en las redes EDF 24 kV, $B \approx 25$ m.

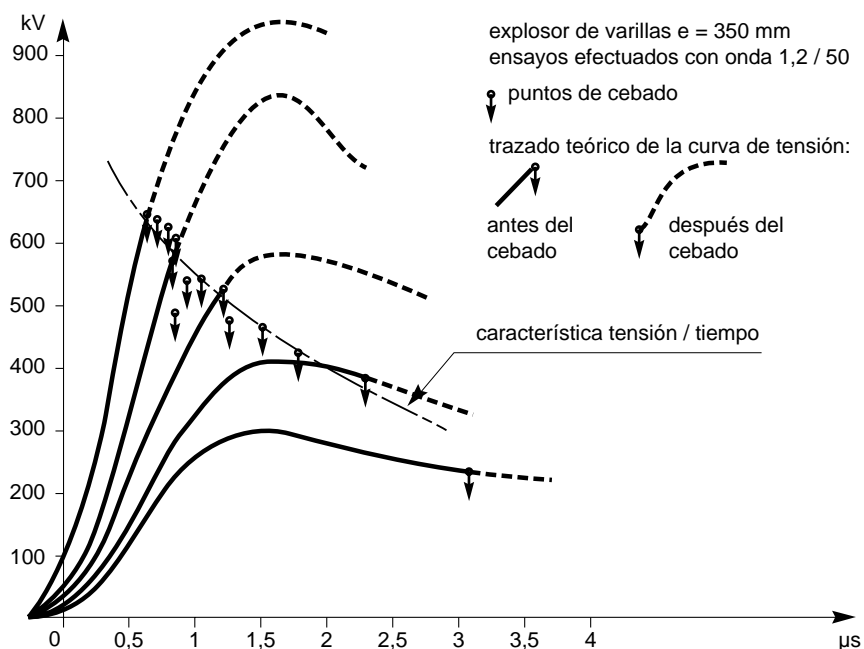


Fig. 22: Comportamiento de un explosor de varillas al choque de la onda de rayo normalizada, en función del valor de cresta.

la intervención de protecciones situadas a la cabeza de la línea (por ejemplo: interruptor automático con reenganche rápido o interruptor automático en derivación).

Por último el cebado provoca la aparición de una onda cortada de frente abrupto susceptible de dañar los devanados (transformadores y motores) situados en sus proximidades.

Aunque, aún montados en las redes, los explosores son hoy día, cada vez más, reemplazados por los pararrayos.

Los pararrayos

Su ventaja es que no presentan corriente de fuga y evitan que la red quede sometida a un cortocircuito fase-tierra y sin tensión después del cebado.

Se han diseñado diferentes modelos: pararrayos a chorro de agua, pararrayos a gas. En las líneas que siguen sólo presentamos los tipos más usuales.

Estos son utilizados en las redes AT y MT.

Pararrayos a resistencia variable y explosores

Este tipo de pararrayos asocia en serie unos explosores y unas resistencias no lineales (varistancias) capaces de limitar la corriente después del paso de la onda de choque.

Después del paso de la onda de corriente de descarga, el pararrayo queda sólo sometido a la tensión de la red. Ésta mantiene un arco en el explosor, pero la corriente correspondiente, llamada «corriente de fuga» pasa por las resistencias cuyo valor ahora es elevado. Esto hace que la corriente de fuga sea lo bastante reducida para no dañar a los explosores y pueda ser cortada al primer paso por cero de la corriente (extinción natural del arco).

La no linealidad de las resistencias permite mantener una tensión residual, que se tiene en bornes del conjunto, próxima al nivel de cebado, pues tanto más aumenta la corriente, tanto más se reduce la resistencia.

Se han utilizado diversas técnicas para la realización de estos pararrayos de varistancias y explosores. La más clásica utiliza una resistencia de carbono de silicio (SiC).

Algunos pararrayos comportan igualmente unos sistemas repartidores de tensión (divisores resistivos o capacitivos) y unos sistemas de soplado del arco (imanes o bobinas de soplado magnético).

Este tipo de pararrayos se caracteriza por:

- su tensión de extinción, o tensión asignada, que es la tensión a frecuencia industrial, más elevada bajo la cual el pararrayos puede descebarse espontáneamente. Esta tensión debe ser superior a la más elevada sobretensión temporal a frecuencia industrial susceptible de aparecer en la red,

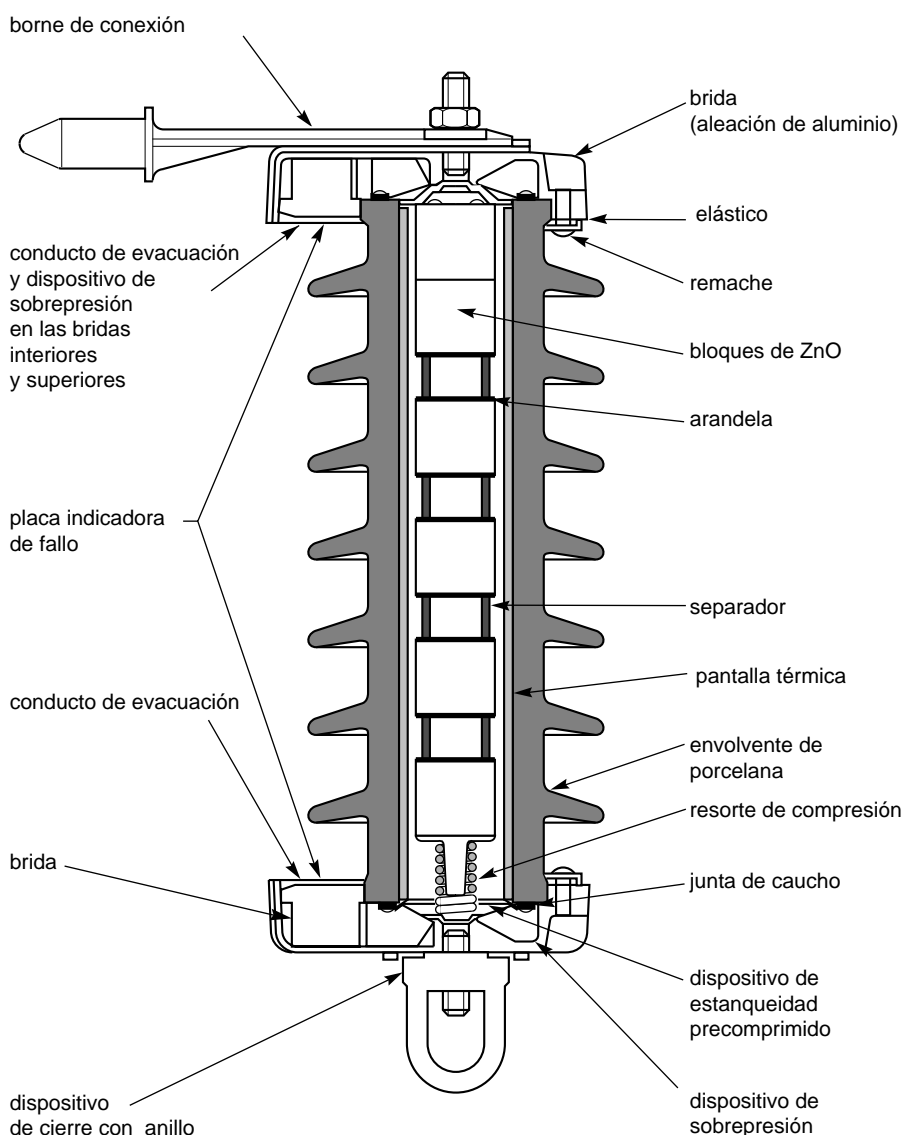


Fig. 23: Ejemplo de la estructura de un pararrayos ZnO con envoltorio de porcelana para la red 20 kV EDF.

- sus tensiones de cebado según la forma de las ondas (frecuencia industrial, choque de maniobra, choque de rayo, ...),

- su poder de descarga de la corriente de choque, es decir, su capacidad de disipación de energía. Se traduce, generalmente, la capacidad de absorción por la posibilidad de soportar ondas rectangulares de corriente.

Los pararrayos de óxido de Zinc (ZnO)

Están constituidos únicamente por varistancias y reemplazan, cada vez más, a los pararrayos a resistencias variables y explosores (figura 23).

La ausencia del explosor hace que el pararrayos a ZnO sea continuamente conductor, pero, bajo la tensión nominal de la red protegida, esta corriente de fuga a tierra es muy débil (inferior a 10 mA).

Su principio de funcionamiento es muy simple y se apoya en la característica fuertemente no lineal de las varistancias de ZnO.

Esta no linealidad es tal que la resistencia pasa de 1,5 MΩ a 15 Ω, entre la tensión de servicio y la tensión con la corriente nominal de descarga (figura 24).

Estos pararrayos tienen como ventajas mayores su capacidad de limitación y de fiabilidad con relación los pararrayos de carburo de silicio.

Estos últimos años se han aportado algunas mejoras, en particular en el dominio de la estabilidad térmica y eléctrica de las pastillas de ZnO pese a su envejecimiento.

Así en 1 989, sobre 15 000 pararrayos de este tipo instalados en EDF, después de 18 meses de experimentación, sólo se han constatado dos fallos y las características, verificadas por ensayos no habían variado.

Un pararrayos de ZnO se caracteriza por (figura 25):

- la tensión máxima de servicio permanente;
- la tensión asignada que puede estar ligada, por analogía con los pararrayos de carburo de silicio, a la capacidad de soportar sobretensiones temporales;

- el nivel de protección, definido arbitrariamente como la tensión residual del pararrayos sujeto a un choque de corriente dado (5, 10 ó 20 kA, según la clase), onda 8/20 μs;

- la corriente nominal de descarga;

- su poder de soportar una corriente de choque (este traduce la necesidad de soportar ondas largas que implican una disipación de energía importante y no la necesidad de evacuar estas corrientes en la explotación).

Envolventes

Los pararrayos de óxido de zinc están disponibles:

- con envolventes de porcelana para casi todas las tensiones de servicio;

- con envolventes sintéticas (fibra de vidrio y resina) para las redes de distribución.

Esta segunda tecnología, más reciente, permite obtener pararrayos notablemente más ligeros, menos

frágiles a los actos vandálicos y en los que los elementos activos estén mejor protegidos contra la humedad, pues están totalmente sobremoldeados. La humedad es en efecto la principal causa de fallos identificada en los ZnO.

El exterior de estos pararrayos está generalmente constituido por polímeros de silicona asegurando la capacidad de soportar el ambiente y la reconstrucción de líneas de fuga suficientes.

Estos pararrayos por su constitución interna y sus envolventes de silicona son mucho más tolerantes en cuanto a sus posiciones de instalación y permiten igualmente optimizar la instalación (por ejemplo : montaje horizontal).

Además de las especificaciones EDF, como la HN 65S20 / CEI 99-1, se aplican a los pararrayos diferentes normas francesas, por ejemplo la NFC 65-100 para los aparatos destinados a instalaciones de AT.

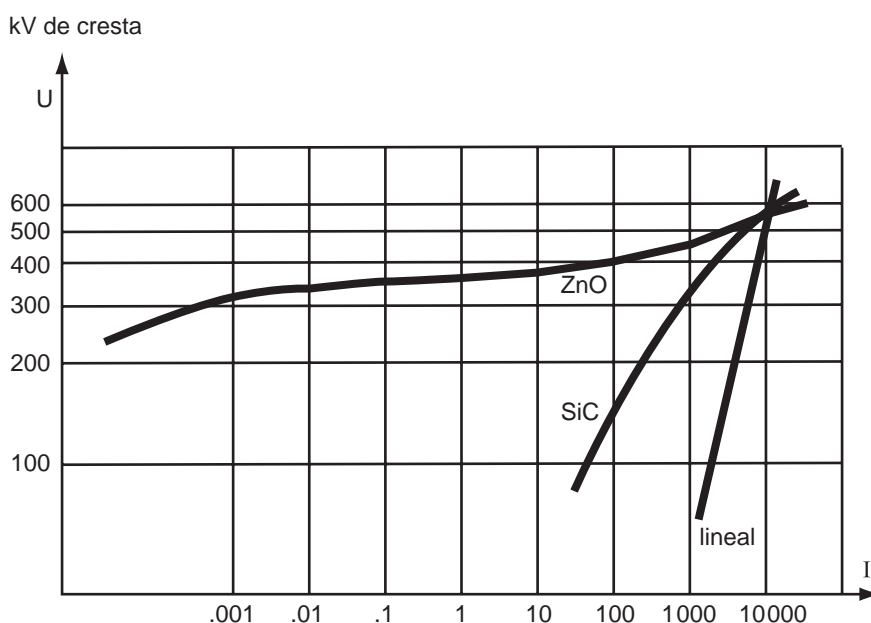


Fig. 24: Características de dos pararrayos con el mismo nivel de protección 550 kV/10 kA.

En resumen, se justifica que estos diferentes tipos de pararrayos sean utilizados para la protección de la aparamenta, de los transformadores y de los cables.

En estos casos la casi totalidad de los dispositivos puestos en servicio son los pararrayos de óxido de zinc que van reemplazando progresivamente a los explosores de varillas y a los pararrayos de carburo de silicio.

Esta evolución busca obtener una mejor precisión de los niveles de protección, permitiendo además garantizar la coordinación del aislamiento.

El lector interesado en la puesta en obra de los pararrayos puede dirigirse al **anexo 2**.

■ tensión máxima permanente	12,7 kV
■ tensión asignada	24 kV
■ tensión residual bajo la corriente nominal de descarga	< 75 kV
■ corriente nominal de descarga (onda 8/20 µs)	5 kA
■ poder de soportar una corriente de choque (onda 4/10 µs)	65 kA

Fig. 25: Ejemplo de características de un pararrayos ZnO que responde a la especificación EDF HN 65S20.

4 Disposiciones normativas y coordinación del aislamiento

Después de numerosos años la Comisión Electrotécnica Internacional ha abordado el problema de la coordinación del aislamiento en AT.

Dos documentos generales tratan de la coordinación del aislamiento:

- el CEI 664 para el dominio de la BT,
- el CEI 71 para el dominio de la AT.

El CEI 71 está organizado en dos partes, la segunda es una guía de aplicación muy completa.

Las normas «producidas» o sea:

- la CEI 694 «partes comunes para la aparamenta»,
- la CEI 76 «transformadores»,
- la CEI 99 «pararrayos»,

están en coherencia con la CEI 71 en cuanto a las tensiones soportadas específicas.

La coordinación del aislamiento AT según CEI 71

Uno de los objetivos de esta norma, que deberá ser aplicada en 1993, es la explicación y la descomposición de los diferentes coeficientes que permiten determinar las tensiones soportadas.

Esta determinación favorece la búsqueda de una optimización, o sea una bajada de los niveles de tensión soportada.

La CEI 71 propone una modelización convencional de las solicitaciones reales por formas de onda realizables en los laboratorios y que han demostrado una equivalencia satisfactoria.

Por otra parte, aparecen dos preocupaciones nuevas en esta norma:

- el aislamiento longitudinal (entre los bornes de la misma fase de un aparato abierto),
- la toma en cuenta de la altitud así como del fenómeno de envejecimiento de las instalaciones.

En este proyecto se distinguen el aislamiento interno, el aislamiento externo y dos gamas de tensiones:

- el aislamiento interno interesa a todo lo que no está emplazado en el aire atmosférico (aislamiento líquido para los transformadores, SF₆ o vacío para los interruptores automáticos);
- el aislamiento externo corresponde a distancias en el aire.
- gama I: de 1 kV a 245 kV incluido;

- gama II: por encima de 245 kV.

Para cada uno de ellos, la puesta en obra de la coordinación del aislamiento es ligeramente diferente.

A cada gama está asociada una tabla de tensiones soportadas asignadas normalizadas. Estas tablas se han establecido siguiendo criterios diferentes, hasta el presente a menudo empíricos, pero cuya elección ha sido confirmada, a veces con algunas reservas, por la experiencia. En efecto, es innegable que los niveles impuestos, sin grandes modificaciones en estos años, son de hecho aceptados desde el punto de vista de la seguridad de servicio. Además, el abandono progresivo de los explosores, en beneficio de los pararrayos, permite reducir el margen de seguridad, convertido en excesivo, entre el nivel de protección de los pararrayos y la tensión de aislamiento específica de los materiales.

Determinación de los niveles de aislamiento

La norma no indica con precisión tensiones soportadas invariables y válidas en todos los casos, pero permite la realización de estudios de coordinación de aislamiento en varias etapas:

clase de sobretensión	baja frecuencia		transitoria		
	permanente	temporal	de frente lento	de frente rápido	de frente muy rápido
forma					
gama de formas (frecuencia, frente de subida, duración)	$f = 50 \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 < f < 500 \text{ Hz}$ $3 \text{ 600} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5 \text{ 000} > T_p > 20 \text{ } \mu\text{s}$ $20 \text{ ms} \geq T_2$	$20 > T_1 > 0,1 \text{ } \mu\text{s}$ $300 \text{ } \mu\text{s} \geq T_2$	$100 > T_t > 3 \text{ ns}$ $0,3 > f_1 > 100 \text{ MHz}$ $30 > f_2 > 300 \text{ kHz}$ $3 \text{ ms} \geq T_t$
forma normalizada	$f = 50 \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_t (*)$	$48 \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \text{ } \mu\text{s}$	(*)
ensayo de tensión soportada normalizada	(*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de choque de maniobra	Ensayo de choque de rayo	(*)

(*) a especificar por el Comité del producto considerado

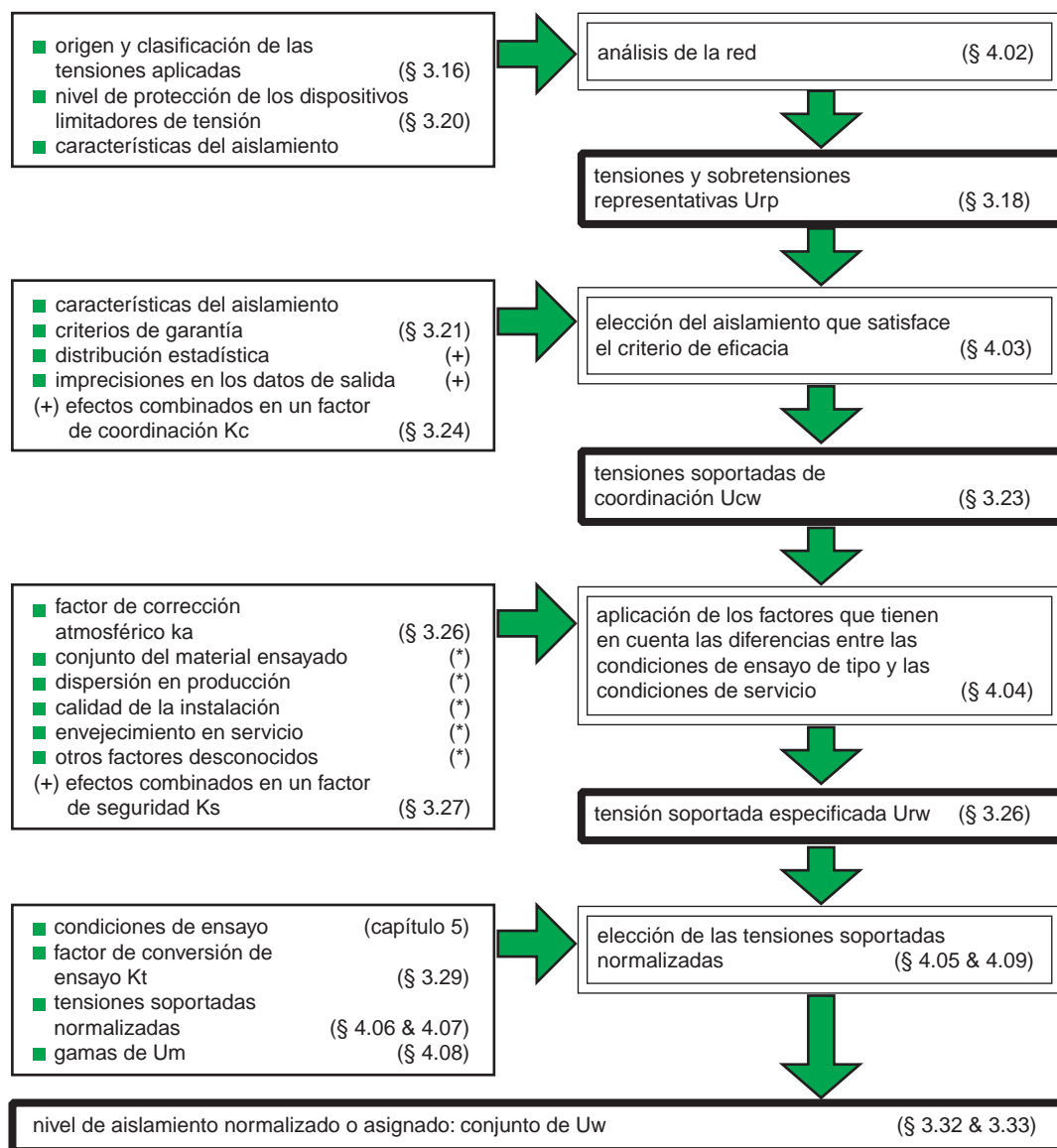
Fig. 26: Forma de sobretensiones representativas y ensayos considerados por el proyecto de la norma CEI 71.

■ definición de las relaciones entre el tipo de red y la elección de sus aislamientos.

Se trata de establecer las características de las tensiones máximas permanentes posibles y las sobretensiones temporales previsibles en función:

- de la estructura de la red y su tensión nominal,
- del esquema de las uniones a tierra del neutro,
- de los centros de transformación y de las máquinas giratorias presentes en la línea,

□ del tipo y del emplazamiento de los eventuales dispositivos de limitación de las sobretensiones, y, según las consideraciones comunes a todas las clases de sobretensiones definidas por la norma (figura 26).



Notas: Entre paréntesis párrafos de la CEI 71, donde el término está definido o la acción descrita

- _____ datos a tomar en cuenta
- ===== acciones a efectuar
- resultados obtenidos

Fig. 27: Organigrama de determinación de los niveles de aislamiento asignado o normalizados.

■ coordinación de los aislamientos de la red.

Una vez reunidos estos datos, para cada clase de sobretensión, es necesario determinar la tensión soportada de coordinación correspondiente teniendo en cuenta la garantía buscada y generalmente el porcentaje de fallos aceptables del aislamiento. El valor obtenido es específico de la red estudiada y de su situación: es la tensión más reducida soportada a la sobretensión considerada que la red debe tener en sus condiciones de explotación.

Para escoger los elementos constitutivos de una red deben definirse sus tensiones soportadas especificadas.

La determinación de las tensiones soportadas de coordinación consiste en fijar los valores mínimos de la tensión soportada de aislamiento que satisfacen al criterio de garantía, cuando el aislamiento está sometido a las sobretensiones representativas en las condiciones de servicio.

La determinación de las tensiones soportadas específicas del aislamiento consiste en convertir las tensiones soportadas de coordinación en condiciones de ensayo normalizadas apropiadas. Esto se realiza multiplicando las tensiones soportadas de coordinación por factores que compensan las diferencias entre las condiciones reales de servicio del aislamiento y aquéllas de los ensayos de tensión soportada normalizados.

La elección del nivel de aislamiento asignado consiste en seleccionar la serie de tensiones soportadas normalizadas más económicas, suficiente para demostrar que todas las tensiones soportadas especificadas son satisfechas.

El plan de estudio para determinar finalmente el aislamiento asignado viene representado en la **figura 27**. Sobre este plan los dos factores de dispersión de fabricación y de altitud definidos en el proyecto están reagrupados bajo el término factor correctivo.

■ la tensión soportada asignada o nivel de aislamiento es la misma que la tensión soportada especificada para las sobretensiones que pueden ser objeto de ensayo, es decir:

□ ensayo a frecuencia industrial,
□ ensayo a ondas de choque de maniobra,

□ ensayo a ondas de choque de rayo,

■ los factores de equivalencia propuestos por la CEI 71 permiten generalmente no especificar más que dos tensiones soportadas entre las tres consideradas.

Para tensiones de servicio inferiores a 245 kV el caso más corriente consiste en retener el ensayo a frecuencia industrial y el ensayo al choque del rayo.

■ la elección final se hace entre los niveles normalizados (**figura 28**) a partir de todas las tensiones asignadas.

Un ejemplo

La **figura 29** presenta uno de estos cálculos sacado de la guía de aplicación del proyecto de revisión de la publicación CEI 71. Muestra el estudio de coordinación de aislamiento de un Centro de Transformación caracterizado por la tensión más elevada para el material $U_m = 24 \text{ kV}$.

Este ejemplo trata esencialmente del aislamiento externo, sabiendo que el proyectista de la instalación y de la red está, en general, directamente enfrentado a los problemas de dimensionamiento de los aislamientos externos. En tanto que gracias a la utilización del SF_6 para el aislamiento, y del vacío o del SF_6 para el intervalo de ruptura, la tensión soportada dieléctrica interna está bien determinada y es independiente de las condiciones del entorno (condiciones climáticas, altitud, tasa de humedad, polución ...).

tensión más elevada para el material U_m kV eficaz	tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial kV eficaz	tensiones soportadas normalizadas al choque del rayo kV eficaz
3,6	10	20/40
7,2	20	40/60
12	28	60/75/95
17,5	38	75/95
24	50	95/125/145
36	70	145/170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185)/230	450/550
145	(185)/230/275	(450)/550/650
170	(230)/275/325	(550)/650/750
245	(275)/(325)/360/395/460	(650)/(750)/850/950/1050

Fig. 28: Nivel de aislamiento normalizado para las redes de tensión eficaz comprendida entre 1 y 245 kV (existe una tabla similar para las tensiones superiores a 245 kV).

Niveles de aislamiento asignado a retener:

■ 50 kV a frecuencia industrial, satisface la tensión soportada asignada a las sobretensiones permanentes de baja frecuencia (32 kV) y a más del 81% la tensión soportada asignada a los transitorios de frente lento (61 kV por equivalencia),

■ 125 kV considerada como compromiso técnico-económico para los transitorios de frente rápido, implica:

□ sea la aceptación de una tasa de fallos superior a la que se ha tomado como hipótesis,

□ sea la asociación de pararrayos en la instalación para asegurar que ella

no será obligada más allá de este nivel.

Para las altas y muy altas tensiones, el proceso de coordinación del aislamiento es el mismo, para los aislamientos del material son generalmente calificados por sus tensiones soportadas al choque de maniobra y el del rayo.

tensión soportada asignada kV	a frecuencia industrial de corta duración		al choque del rayo		
tensión soportada asignada al choque del rayo			74	108	141
factor de equivalencia frente lento ⇒ rápido			1,06	1,06	
tensión soportada asignada a una sobretensión a frecuencia industrial de corta duración	28	32	42	61	
factor de equivalencia frente lento ⇒ 50 Hz			0,6	0,6	
tensiones soportadas específicas					
tensión soportada	28	32	70	102	141
corrección altitud			1,13	1,13	1,13
factor de dispersión	1,15	1,15	1,05	1,05	1,05
tensiones soportadas de coordinación (caso de materiales sometidos a la presión atmosférica)	24	28	59	86	119*
sobretensiones de explotación					
forma de onda representativa convencional	frecuencia industrial 50 Hz corta duración (1mn)		sobretensión 250-2 500 µs 2% de cebado		onda 1,2 - 50 µs
amplitud representativa convencional (kV)	24	28	59 (2,6 p.U.)	86 (3,86 p.U.)	
categoría de la sobretensión	fase/ masa	entre fases	fase/ masa	entre fases	fase/masa y entre fases
	temporales a frecuencia industrial		de frente lento (maniobras)		de frente rápido (rayo)

* Este valor proviene de los criterios siguientes:

- nivel de protección del pararrayos: 80 kV,
- distancia pararrayos material: 8 m,
- coeficiente de seguridad: 1,05

Ejemplo de cálculo:

para una tensión soportada de coordinación de frente lento de 59 kV:

- tensión soportada especificada de frente lento =
= 59 kV x 1,05 x 1,13 = 70 kV,
- tensión soportada asignada a frecuencia industrial de corta duración
equivalente =
= 70 kV x 0,6 = 42 kV,
- tensión soportada asignada a la descarga de rayo equivalente =
= 70 kV x 1,06 = 74 kV.

Fig. 29: Ejemplo de una investigación de coordinación del aislamiento para una red de 24 kV, con material de aislamiento externo (extraído y adaptado del proyecto de revisión CEI 71).

5 Coordinación aplicada al diseño de instalaciones eléctricas

Este estudio es económicamente tanto más importante cuanto más elevada es la tensión de servicio.

Tres criterios justifican esta afirmación:

- el aumento del número de clientes o de la potencia distribuida,
- el aumento del coste de los fallos (coste del material a reemplazar),
- la parte, relativamente más débil del estudio de coordinación en el coste total de la instalación.

Consecuencias de un cebado de arco

Un fallo dieléctrico (perforación o cebado de un arco) puede provocar:

- el funcionamiento de las protecciones en el mejor de los casos,
- la destrucción de materiales en el peor de los casos,
- una interrupción de servicio por fallo.

En AT el corte de la alimentación que entonces se tiene puede afectar a un pueblo entero, o una región o a un centro siderúrgico; ello ocasiona:

- un riesgo de desestabilización de la red,
- una pérdida de facturación de energía para el distribuidor de energía,
- una pérdida de producción para los abonados industriales,
- un peligro para las personas (por ejemplo en los hospitales) y para los datos informáticos.

Para evitar estos accidentes deben efectuarse unos estudios en toda nueva instalación.

Éstos permitirán realizaciones coherentes y optimizadas frente a los riesgos.

Una solución es aumentar el nivel de aislamiento de las instalaciones incrementando las distancias de aislamiento.

Pero ello se traduce en un importante aumento de los costes: doblar las distancias motiva multiplicar por ocho los volúmenes y los costes. El sobredimensionamiento es, pues, inadmisibles en AT. De aquí la importancia de la optimización del equipamiento AT.

EnMT

Un defecto de aislamiento en una red de MT tiene consecuencias que, a menor escala, son los mismos que en AT.

Los cortes eléctricos que de ello resultan pueden, también, ser de consecuencias graves para los distribuidores de energía (pérdidas de facturación), para los abonados industriales (pérdidas de producción) y para las personas (seguridad).

EnBT

En la práctica, cuando más baja es la tensión de servicio más limitadas son las consecuencias de una falta en el caso de distribución de energía. Pero el desarrollo de los sistemas y equipamientos electrónicos está en el origen de numerosos incidentes consecutivos a las sobretensiones.

En efecto, el nivel de tensión soportada a las perturbaciones no está siempre especificado o no está coordinado con el nivel correspondiente a su instalación.

Como estos sistemas interfieren más y más en la integridad de una instalación, de una producción, o de una gestión, las consecuencias económicas para la empresa afectada pueden ser graves.

La coordinación de las «tensiones soportadas» no es pues despreciable, aún en BT ... y el

empleo de pararrayos deberá generalizarse.

Estos son hoy en día muy aconsejables para los abonados BT alimentados por una línea aérea.

Reducción de los riesgos y de los niveles de sobretensión

Frente a las diferentes sobretensiones examinadas en el **capítulo 1**, pueden ser consideradas soluciones simples en los primeros proyectos de la instalación.

Sobretensión debida a la ferorresonancia

El único medio de evitarla totalmente es que $1/C \cdot \omega$ sea superior a la pendiente en el origen de $L \cdot \omega \cdot i$. Sin embargo, otras soluciones son a considerar y en particular en MT donde:

□ puede producirse una discordancia entre las 3 fases en el caso de protecciones por interruptor de mando fase por fase; es necesario buscar la mayor simultaneidad posible en la conexión de las 3 fases de la red (aparato omnipolar);

□ la conexión de un transformador en vacío puede ser el fenómeno transitorio que provoque la ferorresonancia; para evitarlo es necesario reducir las capacidades aproximando, por ejemplo, la aparamenta de puesta en tensión del transformador.

La conexión de una carga previamente a la puesta en tensión es beneficiosa. Ella interviene, en efecto, como una resistencia de amortiguación, pudiendo impedir la puesta en resonancia.

Poner el neutro a tierra es también una solución frente a las resonancias fase/tierra.

Sobretensiones provocadas por la ruptura de corrientes capacitivas

La solución consiste en evitar los reencendidos sucesivos incrementando la velocidad de separación de los contactos y la utilización de un buen dieléctrico (vacío o SF₆).

Sobretensiones provocadas por la conexión de una línea en vacío

Se evitan en las redes de transporte por una puesta en tensión progresiva, obtenida asociando resistencias de inserción en el interruptor automático.

Sobretensiones provocadas por una caída del rayo

Los medios a poner en obra son de tres tipos:

- disposición de cables de guarda para evitar los choques directos (**capítulo 1**),
- instalación de protecciones en los puntos sensibles (explosores, o preferentemente, pararrayos), (**capítulo 2**),
- realización de tomas de tierra de buena calidad (**capítulo 1**).

6 Conclusión

La coordinación del aislamiento intenta encontrar un justo equilibrio entre la fiabilidad de los materiales, desde el punto de vista dieléctrico, por una parte y de su dimensionamiento, y por tanto su coste, por la otra parte.

La explicación que se ha hecho en este documento muestra la complejidad de los parámetros que intervienen en este tipo de análisis.

Además, el aspecto estadístico del comportamiento a las sobretensiones transitorias prohíbe la pretensión de hallar soluciones absolutas.

Las modelizaciones pretendidas presentan siempre un carácter hasta cierto punto arbitrario en primera lectura, pero han sido validadas por la experiencia.

El lector deseoso de profundizar en el tema puede hallar informaciones más detalladas en las publicaciones citadas.

Los progresos realizados en el conocimiento de los fenómenos permiten hoy en día conseguir una acrecentada fiabilidad en las instalaciones, autorizando una optimización en el plano económico y en el de los esfuerzos en servicio.

La utilización cada vez más frecuente de pararrayos coadyuva a un mejor dominio del nivel de protección, especialmente por la mejora de sus características y su fiabilidad.

La toma en cuenta de este proceso por la normalización voluntaria, tanto a nivel general como a nivel de recomendación, muestra la importancia del tema y las ventajas que se pueden encontrar.

Anexo 1: Propagación de las sobretensiones

Cualquiera que sea el origen de una sobretensión, ésta se propagará a lo largo de la línea, o del cable que constituyen la red.

Este soporte de propagación puede ser modelizado haciendo intervenir los valores por unidad de longitud de la inductancia y de la resistencia en sentido longitudinal y de la capacidad y la conductancia en sentido transversal (**figura 30**).

La impedancia, en régimen senoidal, viene entonces dada por:

$$Z = \sqrt{\frac{L \cdot \omega + R}{C \cdot \omega + G}}$$

Con frecuencias elevadas, generalmente asociadas a las sobretensiones, los términos inductivos y capacitivos se hacen preponderantes y la impedancia, llamada «impedancia característica» viene así dada por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Los términos resistivo y conductivo, correspondientes a pérdidas de propagación, entrañan una atenuación de la onda a lo largo de su propagación.

Las órdenes de magnitud de las impedancias características son:

- líneas MAT: 300 a 500 ohms,
- líneas AT (aéreas): aproximadamente 1 000 Ω.

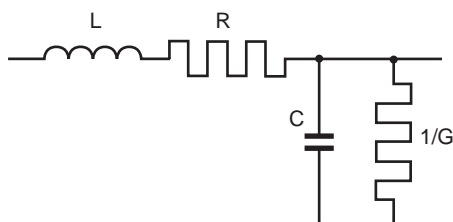


Fig. 30: Modelización del soporte de propagación.

La velocidad de propagación es próxima a la de la luz, o sea, alrededor de 3×10^8 m/s. Se puede igualmente expresar esta velocidad como igual a 300 metros por microsegundos, lo que da una mejor apreciación del reparto a lo largo del conductor de un frente de onda de duración muy corta (**figura 31**).

La teoría de la propagación guiada permite establecer que, cuando una onda se propaga a lo largo de un conductor alcanza un punto de cambio de impedancia, se observa una reflexión y una transmisión parciales.

Si Z_c es la impedancia característica del primer conductor y Z_a es la del segundo, los coeficientes de transmisión y de reflexión vienen dados por:

$$T = 2 \frac{Z_a}{Z_a + Z_c} \quad \text{y} \quad R = \frac{Z_a - Z_c}{Z_a + Z_c}$$

Los valores límite de estos coeficientes corresponden a casos físicos simples:

- $Z_a = 0$ (línea cerrada a la masa); la tensión en el punto considerado es, pues, nula en todo instante lo que corresponde a una onda transmitida

nula y una onda reflejada con un factor - 1.

- $Z_a = Z_c$ (conductor homogéneo), la transmisión vale 1 y la reflexión nula.

- $Z_a = \infty$ (línea abierta): la tensión en el punto de reflexión viene dada por la superposición de la onda incidente y de una onda reflejada con un factor + 1. Su valor máximo en este caso será igual a dos veces el valor de cresta de la onda incidente. Aún cuando no va a haber una propagación en el medio Z_a , el valor de la frontera viene siempre dado por T que vale igualmente 2.

Este caso conduce a una exigencia elevada en el punto de la reflexión y en sus proximidades (proximidades en el sentido de la repartición espacial citada anteriormente).

La expresión «doblado de la onda de tensión» a menudo empleada, se puede prestar a confusión haciendo imaginar que la onda reflejada es dos veces más importante que la onda inicial. Es únicamente en el punto de reflexión que el valor máximo observado vale el doble del de la onda incidente, pues es el único sitio donde la onda incidente y la onda reflejada suman sus crestas.

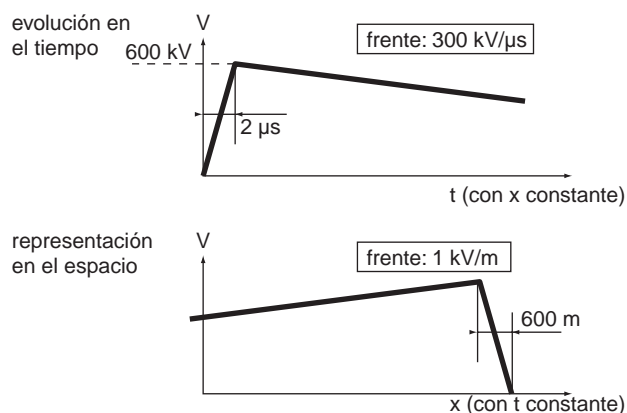


Fig. 31: Representación en el tiempo y en el espacio de una onda de choque de rayo.

Anexo 2: Instalación de pararrayos

Distancia máxima de protección

Por el hecho del fenómeno de propagación y reflexión de ondas (**anexo 1**), los pararrayos limitan las sobretensiones solamente a nivel de sus bornes.

La onda descrestada conserva el dv/dt de su frente de subida y es susceptible, por reflexión, de desarrollar, en el punto de apertura una tensión doble de la tensión de limitación.

La tensión soportada de la aparatura, siendo generalmente inferior al doble de la tensión residual del pararrayos, determina una distancia máxima, que no debe excederse, entre el pararrayos y la aparatura del centro de transformación.

Ejemplo:

- onda de choque del rayo: 300 kV/ μ s,
- de donde el gradiente de tensión en la línea al paso del frente de subida vale 1 kV/m,
- centro de transformación MT: tensión soportada al choque 125 kV,
- pararrayos: tensión residual 75 kV.

La exigencia máxima en el punto abierto será generada por la reflexión de la cresta de la onda limitada por el pararrayos. Esta exigencia será igual a dos veces esta cresta.

Para respetar el límite de 125 kV del material, el pararrayos debe pues intervenir cuanto más tarde cuando la onda incidente en su emplazamiento valga: $125 / 2 = 62,5$ kV (instante T0 de la **figura 32**).

Siendo el nivel de puesta en conducción (si uno lo aproxima al nivel de protección) de 75 kV, la intervención no puede ser obtenida más que por superposición de la onda incidente y de la onda reflejada. La onda reflejada debe tener un valor de $75 - 62,5 = 12,5$ kV.

La diferencia entre el valor incidente 62,5 kV y el valor reflejado 12,5 kV, o sea, 50 kV corresponde al frente de la onda repartido sobre el trayecto ida y vuelta entre el pararrayos y el punto abierto. Esta distancia de ida y vuelta es pues, igual a 50 m, o sea, una

distancia de protección máxima de 25 m.

Nota

El coeficiente 2 no significa el doble de la tensión de cresta sino superposición de la onda incidente y de la onda reflejada (**figura 32**).

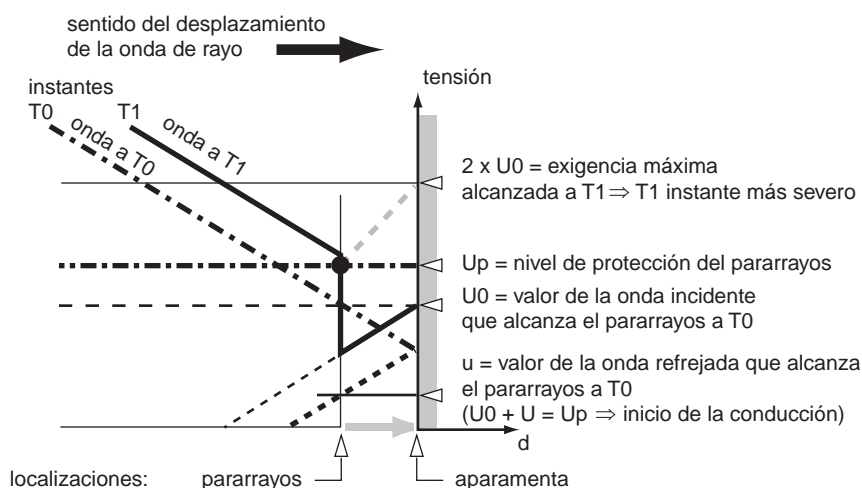
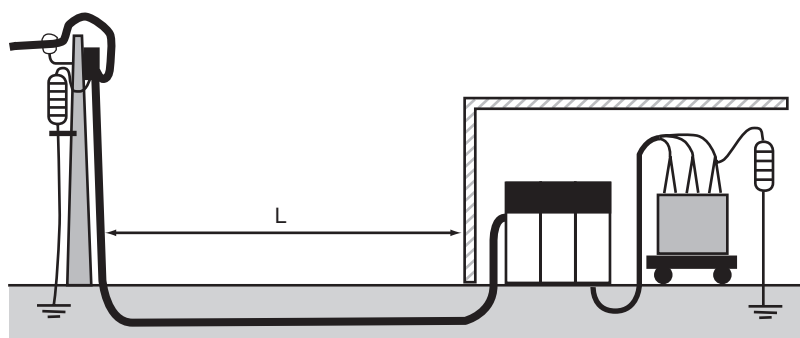


Fig. 32: Propagación y reflexión en presencia de un pararrayos.



si $L < 25$ m: es suficiente un limitador de sobretensión situado sobre el poste
si $L \geq 25$ m: es necesario un segundo limitador en bornes del transformador

Fig. 33: Emplazamiento de los limitadores de sobretensión en los centros de transformación alimentados por una red aérea.

Cableado de los pararrayos

Después de la intervención de limitación del pararrayos, una onda de corriente va a derivarse, a tierra; esta corriente resulta de la aplicación de la onda de tensión a la impedancia característica de la línea: $I = u / Z_c$.

El circuito de puesta a tierra es entonces el asiento de una caída de tensión, esencialmente inductiva, que puede alcanzar valores importantes.

Ejemplo:

- onda de corriente: 1 kA/μs,
- inductancia del cable de puesta a tierra: 1 μH/m,
- de donde se deduce que $U_L = 1 \text{ kV/m}$.

Si no se quiere que esta tensión se adicione a la tensión residual, es necesario que frente al «fenómeno del rayo» el material propuesto esté en derivación en los bornes del pararrayos.

En la práctica, esto consiste en realizar la conexión tal como indica la **figura 33**. Si el enlace AT/material no se efectúa sobre el pararrayos, la longitud del conductor debe ser lo más corta posible (**figura 34**).

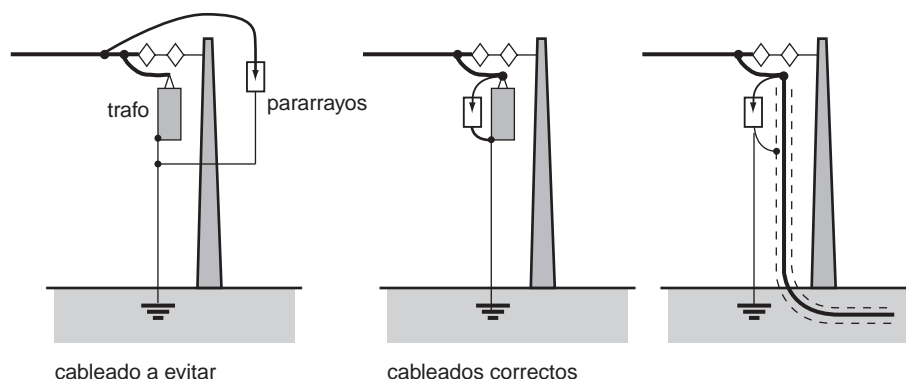


Fig. 34: Principio del cableado de los pararrayos: las conexiones cargas-pararrayos deben de ser lo más cortas posible.

Anexo 3: Las normas eléctricas

Existen 3 niveles de normalización: los tres organismos que se citan a continuación actúan respectivamente a nivel mundial, europeo y nacional:

Mundial

- la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) produce las normas «CEI»; participan 60 países. Una norma no es aceptada si frente a ella encuentra un 20% de opositores. En cada país, su aplicación puede tener derogaciones.

Europeo

- CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica), produce las normas «EN»; reagrupa 18 países, en su mayoría europeos. Sus normas votadas son de aplicación obligatoria.

Nacional

- UTE (Unión Técnica de Electricidad); produce las normas francesas «NF».
- AENOR (Asociación Española de Normalización); produce las normas españolas «UNE».

Anexo 4: Bibliografía

Normas

- CEI 60: Técnica de los ensayos en alta tensión.
- CEI 71-1: Coordinación del aislamiento: definiciones, principios y reglas.
- CEI 71-2: Coordinación del aislamiento: guía de aplicación.
- CEI 99: Pararrayos.

Publicaciones diversas

- Techniques de l'ingénieur: capítulo «Gaz Isolants».
- Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, (Publicación EDF).
- Principes and procedures of the insulation co-ordination, KH.WECK.
- Dimensionnement des parafoudres MT por le réseau EDF (1 988).
A. ROUSSEAU (EDF).