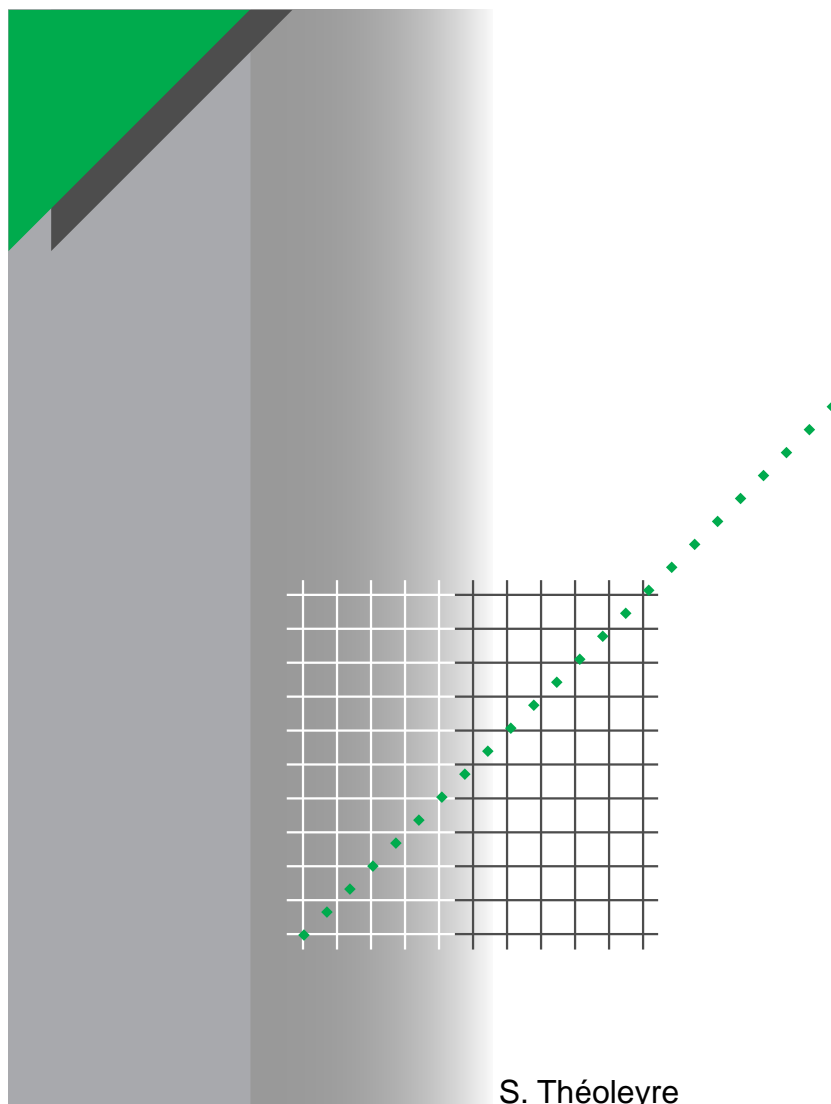


Cuaderno Técnico nº 193

Las técnicas de corte en MT



S. Théoleyre

Merlin Gerin

Eunea Merlin Gerin

Modicon

Telemecanique

Mesa

Himel

Square D

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» de **Schneider Electric España S.A.**

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 193 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 193

Las técnicas de corte en MT



Serge THÉOLEYRE

De formación científica, diplomado doctor ingeniero por la Escuela Nacional Superior de Ingenieros Eléctricos de Grenoble en 1983, entra en 1984 en el Grupo Schneider. Inicialmente fue responsable de la investigación y del desarrollo además del marketing para la actividad condensadores de potencia.

Después de 1995, tiene la responsabilidad de las acciones del Grupo Schneider en los campos de la normalización y de la comunicación técnica en el ámbito de la actividad transporte y distribución de energía eléctrica (AT/MT).

Trad.: Lluís Miret

Original francés: setiembre 1998

Versión española: abril 2001



Terminología

U_r : Tensión asignada que corresponde al valor eficaz de la tensión que el aparato debe ser capaz de soportar indefinidamente en las condiciones prescritas de empleo y de funcionamiento.

I_{cc} : Corriente de cortocircuito.

I_r : Corriente asignada que corresponde al valor eficaz de la corriente que el aparato debe de ser capaz de soportar indefinidamente en las condiciones prescritas de empleo y de funcionamiento.

Aparato de conexión: Aparato destinado a establecer o interrumpir la corriente en un circuito eléctrico.

Aparamenta: Término general que se aplica a los aparatos de conexión y a su combinación con los aparatos de mando, de medida, de protección y de ajuste que se le asocian.

Constante de tiempo de desionización: Referido a la resistencia del arco, tiempo necesario para doblar su valor admitiendo que su velocidad de variación se mantiene constante.

Cortocircuito: Conexión accidental o intencionada, a través de una resistencia o una impedancia relativamente baja, de dos o más puntos de un circuito que están normalmente a tensiones diferentes.

Defecto: Modificación accidental que afecta al funcionamiento normal.

Defecto a tierra: Defecto debido a la conexión directa o indirecta de un conductor con tierra o a la disminución de su resistencia de aislamiento a tierra por debajo de un valor especificado.

Factor de sobretensión: Razón del valor de cresta de la sobretensión al valor de cresta de la tensión máxima de la tensión admitida por un aparato.

Poder de corte (PdC): Corriente presunta que un aparato de conexión debe ser capaz de interrumpir en condiciones previstas de empleo y de comportamiento.

Reencendido: Restablecimiento de la corriente entre los contactos de un aparato mecánico de conexión durante una maniobra de corte, **antes** de un cuarto de período después del paso por cero de la corriente.

Recebado: Restablecimiento de la corriente entre los contactos de un aparato mecánico de conexión durante una maniobra de corte, **después** de un cuarto de período después del paso por cero de la corriente.

Sobretensión: Toda tensión entre un conductor de fase y tierra o neutro, o entre dos conductores de fase, cuyo valor de cresta sobrepasa el valor de cresta correspondiente a la tensión más elevada para el material.

Tensión transitoria de restablecimiento -TTR-: Tensión de restablecimiento entre los contactos de un aparato de conexión durante el tiempo en el que presenta un carácter apreciablemente transitorio.

Valor asignado: Valor de una magnitud, fijada generalmente por el fabricante, para un funcionamiento específico de un componente, dispositivo o material.

Las técnicas de corte en MT

Cortar la corriente es una acción indispensable que hay que realizar en un circuito eléctrico, para garantizar la seguridad de las personas y de los bienes en caso de fallo, y también para controlar la distribución y la utilización de la energía eléctrica.

El objetivo de este Cuaderno Técnico es que se conozcan mejor las ventajas, los inconvenientes y los campos de utilización de las técnicas de corte convencionales y nuevas en MT.

Después de haber caracterizado las corrientes que hay que cortar y el propio corte desde un punto de vista teórico, el autor presenta el corte en el aire, el aceite, el vacío y el SF₆, y termina con unas tablas comparativas.

Actualmente la solución sigue siendo el corte gracias al arco eléctrico, bien sea en el SF₆ o en el vacío; necesita una maestría y dominio de la tecnología que este Cuaderno Técnico os invita a compartir.

1	Introducción	p. 6
2	El corte de corrientes de carga y de fallo	p. 8
	2.1 Principio del corte	p. 8
	2.2 El corte de las corrientes de carga	p. 11
	2.3 El corte de corrientes de fallo	p. 16
3	Las técnicas de corte	p. 19
	3.1 El medio de corte	p. 19
	3.2 El corte en el aire	p. 20
	3.3 El corte en aceite	p. 22
	3.4 El corte en el vacío	p. 23
	3.5 El corte en el SF ₆	p. 27
	3.6 Comparación de las distintas técnicas	p. 32
	3.7 ¿Cuáles son las posibilidades de otras técnicas?	p. 34
4	Conclusión	p. 35
	Bibliografía	p. 36

1 Introducción

A partir de las centrales de producción, la energía eléctrica se transporta hacia los puntos de consumo por medio de una red eléctrica como la esquematizada en la **figura 1**.

Es indispensable poder cortar la corriente en cualquier punto de la red por razones de explotación y de mantenimiento o para proteger la red cuando hay un fallo. Igualmente hace falta poderla restablecer en diversas situaciones normales o de defecto.

Para esto se emplean aparatos de desconexión, cuya elección depende de la naturaleza de las corrientes a cortar y del campo de aplicación (**figura 2**). Estas corrientes pueden clasificarse en tres categorías:

- Intensidades de carga, por principio inferiores o iguales a la intensidad asignada I_r . La intensidad asignada I_r es el valor de la intensidad que el material debe ser capaz de soportar indefinidamente en las condiciones prescritas de uso y de funcionamiento.

- Intensidad de sobrecarga, la intensidad que es superior a su valor asignado.

- Intensidad de cortocircuito, la que se produce después de un fallo en la red. Su valor depende de la potencia de la fuente, del tipo de fallo y de las impedancias aguas arriba del circuito.

Además, tanto en la apertura como en el cierre, así como en servicio continuo, todos estos aparatos están sometidos a esfuerzos:

- dieléctricos (tensión),
- térmicos (corrientes anormales y corrientes de fallo),
- electrodinámicos (corrientes de fallo),

- mecánicos.

Los esfuerzos más importantes están vinculados a los fenómenos transitorios que intervienen en las maniobras y en los cortes con arco eléctrico de corrientes de fallo. Tienen un comportamiento difícil de determinar previamente a pesar de las técnicas actuales de modelización.

Así pues, los elementos que mayormente contribuyen al diseño de los aparatos de corte son la experiencia, el saber hacer y la experimentación. A estos aparatos se les llama «electromecánicos» puesto que, todavía hoy, el corte estático en media y alta tensión no se vislumbra ni desde el punto de vista técnico ni económico. Y, entre todos los aparatos de desconexión, los disyuntores son los más interesantes puesto que son capaces de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales y anormales (cortocircuito).

En este Cuaderno Técnico, trataremos principalmente del corte de corriente alterna por disyuntor.

El ámbito de tensión considerado es el de MT (1k - 52 kV), pues es en estos niveles de tensión donde existe un mayor número de técnicas de corte.

El estudio de los fenómenos que aparecen después del corte y del cierre constituye la primera parte de este documento.

La segunda parte presenta los cuatro tipos de técnicas de corte más extendidas actualmente, a saber: las técnicas de corte en el aire, el aceite, el vacío y el SF₆.

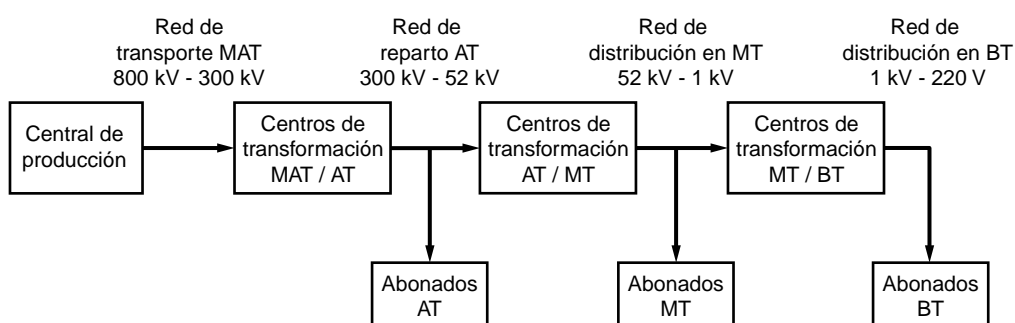








Fig. 1: Esquema de una red eléctrica.

	■ Definición CEI	Cerrar			Abrir			Aislar
	■ Función							
Seccionador	<p>■ Aparato mecánico de conexión que asegura, en posición abierto una distancia de seccionamiento que satisface ciertas condiciones específicas.</p> <p>■ Destinado a asegurar el aislamiento de seguridad de un circuito, se asocia normalmente a un seccionador de tierra.</p>	sí	no	sí <input type="checkbox"/>	sí	no	no	sí
Seccionador de puesta a tierra	<p>■ Seccionador especial diseñado para conectar los conductores de fase a tierra.</p> <p>■ Destinado a la seguridad en caso de intervención en los circuitos, conecta los conductores activos, sin tensión, a tierra.</p>	sí	no	sí <input type="checkbox"/>	sí	no	no	no
Interruptor	<p>■ Aparato mecánico de conexión capaz de establecer, soportar e interrumpir, en condiciones normales, las corrientes del circuito, incluidas eventualmente las de sobrecarga de servicio.</p> <p>■ Destinado al mando (abrir - cerrar) de circuitos, está previsto normalmente para asegurar la función de seccionamiento. En la redes MT de distribución pública y privada se asocia normalmente a fusibles.</p>	sí	sí	sí	sí	sí	no	sí <input type="checkbox"/>
Contactador	<p>■ Aparato mecánico de conexión que tiene una única posición de reposo, no accionado con la mano, capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito, incluidas las condiciones de sobrecarga de servicio.</p> <p>■ Previsto para funcionar muy frecuentemente, está destinado principalmente al mando de motores.</p>	sí <input type="checkbox"/>	sí <input type="checkbox"/>	sí <input type="checkbox"/>	sí <input type="checkbox"/>	sí <input type="checkbox"/>	no	no
Disyuntor	<p>■ Aparato mecánico de conexión capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito y además en condiciones anormales específicas del circuito, como las de cortocircuito.</p> <p>■ Aparato de conexión de uso general. Además del mando de circuitos, asegura su protección contra los defectos eléctricos. Sustituye a los contactores para el mando de grandes motores MT.</p>	sí	sí	sí	sí	sí	sí	no



= en vacío



= con carga



= cortocircuito

☐ = según los casos

Fig. 2: Los distintos aparatos de conexión, sus funciones y sus aplicaciones.

2 El corte de corrientes de carga y de fallo

2.1 Principio del corte

Un aparato de corte ideal sería un aparato capaz de interrumpir la intensidad instantáneamente. No hay ningún aparato mecánico que sea capaz de cortar la corriente sin la ayuda del arco eléctrico, que disipa la energía electromagnética del circuito eléctrico, limita las sobretensiones, pero retarda el corte total de la corriente.

El interruptor ideal

En teoría, poder interrumpir instantáneamente una corriente es ser capaz de pasar directamente del estado conductor al estado aislante. La resistencia de este interruptor «ideal» debe pasar pues inmediatamente de cero a infinito (**figura 3**).

Este aparato debería ser capaz de:

- absorber toda la energía electromagnética acumulada en el circuito antes del corte, o sea,

en caso de cortocircuito, $\frac{1}{2} Li^2$ dada la

naturaleza inductiva de las redes,

- soportar la sobretensión ($L di/dt$) que aparecería en sus bornes y que tendría un valor infinito si el paso aislante-conductor se hiciese en un tiempo infinitamente pequeño, lo que llevaría indudablemente a la descarga dieléctrica.

Imaginando que estas dificultades se eliminan por medio de una sincronización perfecta entre el paso natural por cero de la corriente y la transición aislante-conductor del aparato, todavía hay que superar otro fenómeno también muy delicado: el de la tensión transitoria de restablecimiento (TTR).

En efecto, inmediatamente después de la interrupción de la corriente, la tensión (de restablecimiento) en los bornes del interruptor alcanza la tensión de red, que es máxima en este instante, para los circuitos inductivos. Esto ocurre sin una discontinuidad brutal por la presencia de capacidades parásitas en la red. En este instante se establece un régimen transitorio que permite el ajuste de la tensión a la de la red. Esta tensión, llamada «tensión transitoria de restablecimiento» (TTR), depende de las características de la red y su velocidad de crecimiento (dv/dt) puede ser considerable (del orden de $kV/\mu s$). Simplificando, esto significa que, para afrontar el desafío del corte, el interruptor ideal debe poder soportar varios kV menos de un micro segundo después de la transición conductor-aislante.

Corte con el arco eléctrico

Dos razones explican la existencia de un arco:

- Es casi imposible separar los contactos exactamente en el cero natural de corriente debido a la incertidumbre medida-mando: para un valor eficaz de 10 kA, la corriente instantánea 1 ms antes alcanzar su cero vale todavía 3000 A. La sobretensión instantánea $L di/dt$ que aparecería en los bornes del aparato si éste se transformara inmediatamente en aislante sería infinita y conllevaría la perforación inmediata del espacio intercontactos todavía pequeño.

- La separación de los contactos se debe hacer a una velocidad suficiente para que la resistencia dieléctrica entre los contactos sea superior a la tensión transitoria de restablecimiento. Esto necesita una energía mecánica próxima al infinito que en la práctica ningún aparato puede proporcionar.

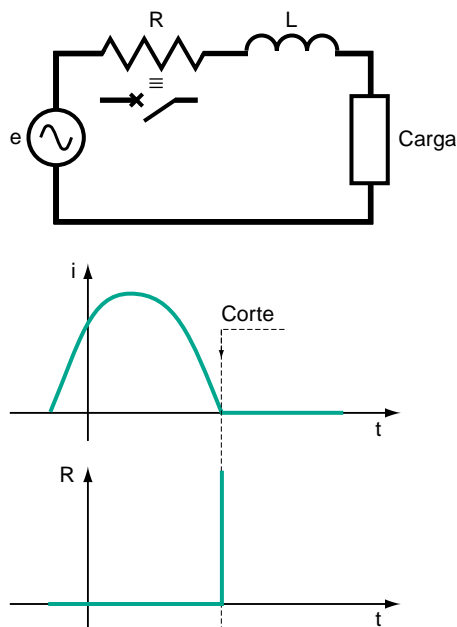


Fig. 3: Corte realizado por un interruptor ideal.

Examinemos el proceso de corte con un arco eléctrico. Está constituido por tres periodos:

- el período de espera,
- el período de extinción,
- el período post-arco.

■ El período de espera:

Antes del cero de corriente, los dos contactos se separan provocando la ruptura dieléctrica del medio intercontactos. El arco que aparece está constituido por una columna de plasma compuesta por iones y por electrones procedentes del medio intercontactos o de los vapores metálicos desprendidos por los electrodos (**figura 4**). Esta columna se conserva conductora mientras que su temperatura sea suficientemente elevada. Así el arco se mantiene por la energía que él mismo disipa por efecto Joule.

La tensión que aparece entre los dos contactos por la resistencia del arco y por las caídas de tensión de superficie (tensiones anódica y catódica) se llama la tensión de arco (U_a).

Su valor, que depende de la naturaleza del arco, está influenciada por la intensidad de corriente y por los intercambios térmicos con el entorno (paredes, materiales, ...). Estos intercambios térmicos, que se realizan por radiación, convección y conducción, son característicos de la potencia de enfriamiento del aparato.

La función de la tensión de arco es esencial, pues condiciona la potencia disipada por el equipo dentro del aparato durante el corte:

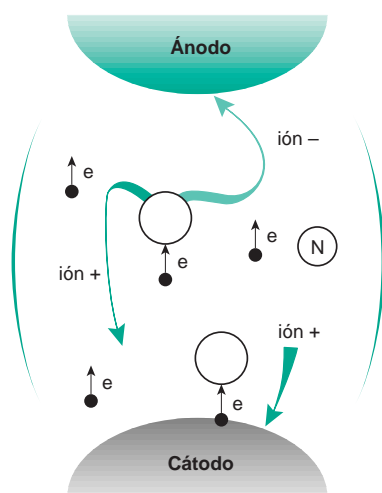


Fig. 4: Composición de un arco eléctrico en un medio gaseoso.

$$W = \int_{t_0}^{t_{arc}} U_a \cdot i \, dt, \text{ donde } t_0 \text{ es el instante de inicio}$$

del arco y t_{arc} es el instante del corte.

En Media y Alta Tensión, ésta permanece siempre mucho más pequeña que las tensiones de red y por tanto no tiene efectos limitadores, salvo artificios especiales desarrollados más adelante. El corte se realiza, pues, cerca del cero «natural» de la corriente alterna.

■ El período de extinción

La interrupción de corriente que corresponde a la extinción del arco se hace en el cero de corriente a condición de que el medio se convierta rápidamente en aislante. Para esto, la corriente de moléculas ionizadas debe romperse. El proceso de extinción se hace de la manera siguiente.

Cerca del cero de corriente, la resistencia del arco aumenta según una curva que depende principalmente de la constante de tiempo de desionización del medio intercontactos (**figura 5**).

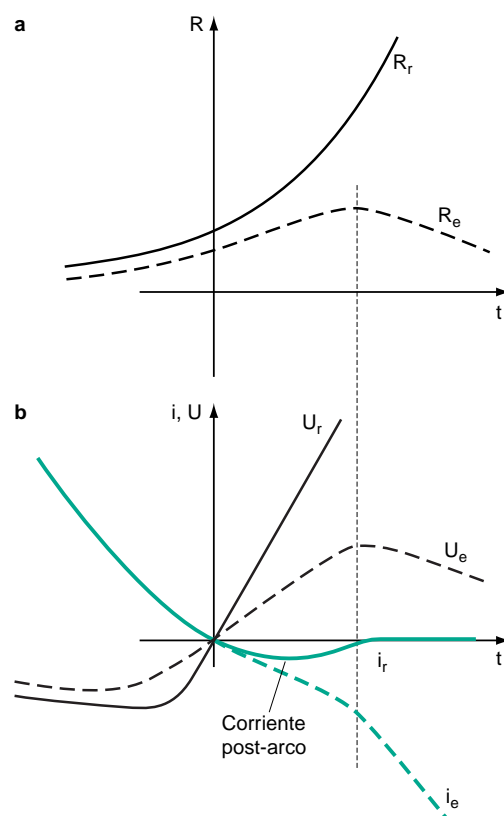


Fig. 5: Evolución de la resistencia de arco (**a**) y de la tensión y la corriente (**b**) durante el periodo de extinción, en caso de corte con éxito (**r**) o de avalancha térmica (**e**).

En el cero de corriente, esta resistencia tiene un valor que no es infinito y todavía hay una corriente post-arco que atraviesa el aparato debido a la tensión transitoria de restablecimiento que aparece en sus bornes.

Si la potencia disipada por el efecto Joule sobrepasa la potencia de enfriamiento característica del aparato, el medio no se sigue enfriando, se produce un embalamiento térmico seguido de una nueva ruptura dieléctrica: es una ruptura térmica.

Si, por el contrario, el crecimiento de la tensión no excede un cierto valor crítico, la resistencia del arco puede aumentar con suficiente rapidez para que la potencia disipada en el medio permanezca inferior a la potencia de enfriamiento del aparato, evitando así el embalamiento térmico.

■ El período post-arco

Para que el corte tenga éxito, también es necesario que la velocidad de regeneración dieléctrica sea más rápida que la TTR (figura 6) de otro modo aparece una perforación dieléctrica.

En el instante en que se produce la ruptura dieléctrica, el medio se convierte de nuevo en conductor, lo que genera fenómenos transitorios que se expondrán en detalle más adelante.

Estas rupturas dieléctricas post-corte se llaman:

- reencendidos, si tienen lugar en el cuarto de período que sigue al cero de corriente,
- recebados, si se producen después.

■ La TTR en las normas

Aunque la velocidad de crecimiento de la TTR tiene un papel fundamental en las capacidades de corte de los aparatos, su valor no puede determinarse con precisión para todas las configuraciones de red. La norma CEI 60056 define para cada tensión nominal un valor límite que corresponde a las necesidades que se encuentran normalmente (figura 7).

Tensión asignada (U_r en kV)	7,2	12	17,5	24	36	52
Valor de cresta de la TTR (U_C en kV)	12,3	20,6	30	41	62	89
Tiempo t_3 (en μs)	52	60	72	88	108	132
Velocidad de crecimiento (U_C/t_3)	0,24	0,34	0,42	0,47	0,57	0,68

Fig. 7: Tensión transitoria de restablecimiento -TTR- asignada en caso de cortocircuito en los bornes de un disyuntor (§ 4102 de la norma CEI 60056).

El PdC de un disyuntor se define entonces, a su tensión asignada y con la TTR asignada correspondiente, como el valor de corriente más elevado que puede cortar.

Por tanto, un disyuntor debe ser capaz de cortar toda corriente inferior a su PdC para toda TTR cuyo valor sea inferior a la TTR asignada.

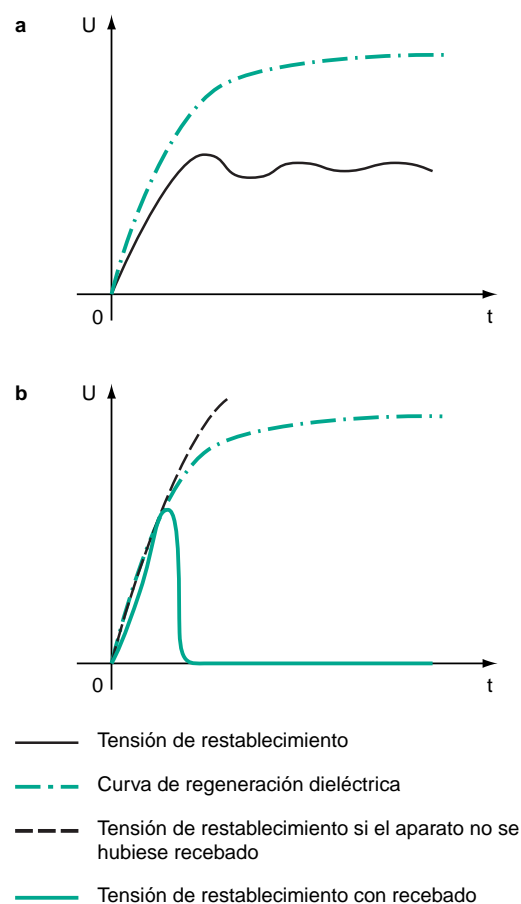
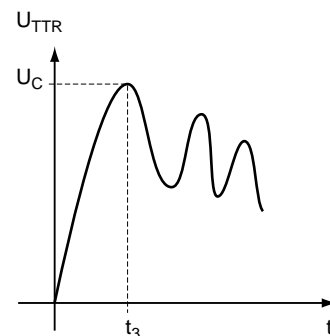


Fig. 6: Curvas de regeneración dieléctrica en caso de corte con éxito (a) o con ruptura dieléctrica.



2.2 El corte de las corrientes de carga

En explotación normal, en MT, el corte de un circuito se hace:

- sobre una intensidad de carga de algunos amperios o de algunos centenares de amperios, pequeña con relación a la intensidad de cortocircuito (de 10 a 50 kA);
- con un factor potencia superior o igual a 0,8. El desfase entre la tensión del circuito eléctrico y la intensidad es pequeño y el mínimo de tensión se produce en los alrededores del mínimo de corriente (circuito fuertemente resistivo).

La tensión en los bornes del aparato de corte se iguala entonces a la tensión de la red. Casi sin fenómeno transitorio (figura 8).

En estas condiciones el corte se realiza al paso de cero de corriente, sin dificultad, puesto que el aparato está dimensionado para corrientes elevadas en cuadratura con la tensión.

El corte de corrientes inductivas

- El arranque de corriente

El corte de corrientes inductivas puede dar lugar a sobretensiones provocadas por el corte precoz de la corriente. Es el fenómeno denominado «arranque de corriente».

Para corrientes inductivas pequeñas (entre algunos amperios hasta algunas decenas de amperios), la capacidad de enfriamiento de los aparatos dimensionados para la intensidad de cortocircuito es muy elevada en relación con la energía disipada en el arco. Esto genera

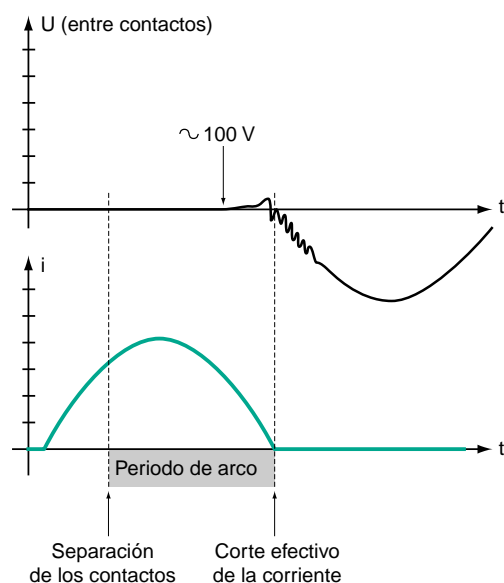
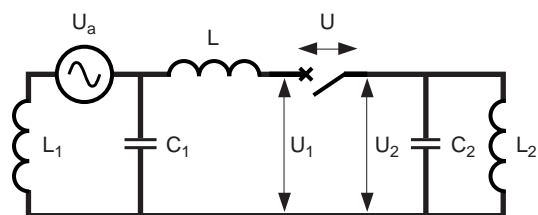


Fig. 8: Los fenómenos transitorios son muy pequeños cuando se corta la corriente de una carga resistiva.

inestabilidad del arco. Aparece un fenómeno de oscilación ligado a los intercambios de energía entre las capacidades «vistas» por el órgano de corte y las inductancias (figuras 9 y 10). Durante esta oscilación a alta frecuencia (del orden de 1 MHz) es posible que la corriente pase por cero y el disyuntor puede interrumpir esta corriente antes del paso normal por cero a la frecuencia industrial (50 Hz).

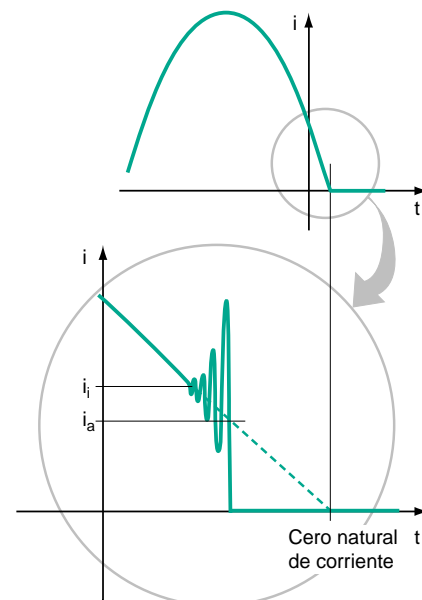


L_1, C_1 = inductancia y capacidad aguas arriba (fuente de alimentación),

L_2, C_2 = inductancia y capacidad aguas abajo (primario del transformador),

L = inductancia de enlace aguas arriba del disyuntor D (conjunto de barras o cables),

Fig. 9: Esquema de un circuito cuando se corta una pequeña corriente inductiva.



i = corriente en el disyuntor,

i_i = valor de la corriente que provoca la inestabilidad,

i_a = valor de la corriente arrancada,

Fig. 10: Fenómeno de oscilaciones a alta frecuencia o de «arranque de corriente» cuando se corta una corriente inductiva.

Este fenómeno de «arranque de corriente» viene acompañado por una sobretensión transitoria principalmente debida al régimen oscilatorio que se establece en el lado de la carga (**figura 11**). El valor máximo de la sobretensión ($U_{Cmáx}$) en el lado de la carga puede darse por la ecuación siguiente:

$$U_{Cmáx}^2 = u_a^2 + \left[\frac{\eta_m \cdot L_2 \cdot i_a^2}{C_2} \right]$$

en la que :

u_a = tensión de arranque,

i_a = intensidad arrancada,

η_m = rendimiento magnético.

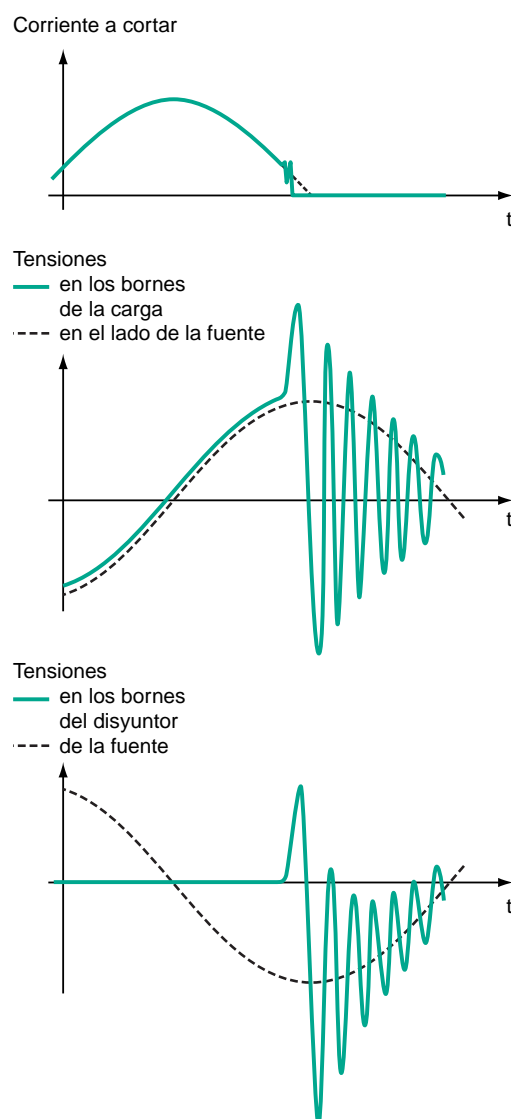


Fig. 11: Curvas de corriente y de tensión cuando se cortan pequeñas corrientes inductivas.

En el lado de la alimentación, el valor de la tensión es igual al valor de la tensión arrancada y tiende hacia la tensión de red U_n con un régimen oscilatorio que depende de C_1 y L_1 . El valor de la tensión entre los contactos del disyuntor es igual a la diferencia entre estas dos tensiones. Estas relaciones evidencian claramente la influencia de las características de la red sabiendo que la corriente arrancada depende fuertemente de C_1 y del aparato correspondiente.

■ Reencendidos

Existe otro fenómeno que puede llevar a sobretensiones importantes. Son los reencendidos a la apertura.

De una manera general un reencendido es inevitable para duraciones de arco cortas puesto que la distancia entre contactos no es suficiente para soportar la tensión que aparece en los bornes del aparato. Este es el caso cada vez que aparece un arco poco tiempo antes del paso por cero de la corriente.

La tensión en el lado de la carga alcanza entonces la tensión del lado de la alimentación con un régimen oscilatorio de alta frecuencia (del orden de 1 MHz). El valor cresta de la oscilación determinada por la tensión de carga de las capacidades parásitas aguas abajo es entonces el doble del valor precedente.

Si el disyuntor es capaz de cortar la corriente de alta frecuencia, conseguirá cortarla en el primer paso por cero de la corriente, algunos microsegundos después del reencendido. Entonces es muy probable un nuevo reencendido por el hecho del aumento de la amplitud de la oscilación y el fenómeno se repite provocando una escalada de la tensión que puede ser peligrosa para la carga (Cuaderno Técnico nº 143).

Conviene mencionar que el mismo fenómeno aparece al cerrar el aparato: se produce un precebado cuando los contactos están suficientemente próximos. Como en el caso de los reencendidos sucesivos, la energía almacenada crece a cada intento de corte, pero el crecimiento de la tensión está limitado por el acercamiento de los contactos.

■ Ámbitos de aplicación

El ámbito de aplicación en MT se centra en las corrientes magnetizantes de los transformadores en vacío o poco cargados, en las inductancias shunt y en los motores.

□ Transformadores en vacío o poco cargados

A veces los transformadores se maniobran en períodos de poca carga (por ejemplo durante la noche), según las necesidades de gestión de la red. Las corrientes corresponden entonces a sus corrientes magnetizantes, que van desde

algunos amperios hasta algunas decenas de amperios, y su posibilidad de arranque de corriente puede ser importante. Sin embargo, incluso si la corriente se arranca en su valor de cresta, los factores de sobretensión posibles son en general pequeños por las capacidades y las inductancias que se ponen en juego.

En distribución aérea, el riesgo ligado a la aparición de sobretensiones es todavía más pequeño puesto que los descargadores de tensión limitan las sobretensiones.

Por otro lado, las normas que se refieren a los transformadores definen ensayos de ondas de choque que permiten verificar su capacidad para soportar las sobretensiones de maniobra.

□ Las inductancias shunt

Estas inductancias se utilizan para compensar la componente reactiva de las líneas o para evitar la elevación de tensión de líneas muy largas y poco cargadas. Se utilizan con más frecuencia en AT, pero también en MT.

Las sobretensiones de corte permanecen en general por debajo de un factor de sobretensión igual a 2,5 como resultado de las impedancias implicadas. Si hay un riesgo de que las sobretensiones de corte superen este límite, hay que colocar descargadores de sobretensión y resistencias de corte en paralelo con el disyuntor.

□ Los motores

Los bobinados, estático y rotórico, de los motores provocan que la intensidad que absorben en vacío y sus corrientes de arranque sean esencialmente inductivas. Dado el número importante de maniobras, las sobretensiones son muy frecuentes y pueden resultar críticas por la degradación progresiva del aislamiento que provocan, en particular si las aperturas tienen lugar durante las fases de arranque.

Como regla general, hay que elegir disyuntores que no se reenciben, o con una probabilidad muy pequeña de recebado. Si no, es posible instalar o bien sistemas R-C en los bornes de los motores para derivar las corrientes transitorias de alta frecuencia, o bien sistemas limitadores de tensión del tipo ZnO.

■ El corte de corrientes inductivas y las normas

No existen normas internacionales para el corte de corrientes inductivas, sin embargo el informe técnico 61 233 de la CEI estipulan los ensayos para los disyuntores usados para la alimentación de motores y de inductancias shunt.

□ Motores

Para los ensayos de laboratorio de disyuntores con tensiones asignadas comprendidas entre un 1 kV y 17,5 kV, se especifica un circuito normalizado que simula un motor con el rotor bloqueado.

□ Inductancias shunt

Están poco extendidas en MT, sin embargo de vez en cuando se utilizan en 36 kV. Los ensayos, efectuados en el laboratorio sobre un circuito trifásico, están definidos únicamente para tensiones asignadas superiores a 12 kV.

El corte de corrientes capacitivas

El corte de corrientes capacitivas puede dar lugar a sobretensiones debidas a recebados durante el período de restablecimiento de la tensión.

■ El corte de corrientes capacitivas en principio no tiene dificultad. En efecto, cuando el aparato interrumpe la corriente, la tensión en los bornes del generador es máxima puesto que la intensidad y la tensión están desfasadas en $\pi/2$; puesto que el condensador permanece cargado a este valor después del corte de corriente, la tensión en los bornes del interruptor, inicialmente nula, aumenta lentamente sin TTR y con una derivada en relación al tiempo nula en el origen.

■ Por contra los problemas de recebado son delicados. En efecto después de un semi-período, la tensión de red se ha invertido y la tensión en los bornes del interruptor alcanza dos veces el valor de la tensión de cresta. Así pues, los riesgos de recebado entre los contactos son elevados y aumentan tanto más cuanto más lenta sea la apertura.

Si hay recebado en la cresta de tensión, la capacidad se descarga entonces en la inductancia del circuito creando una corriente oscilante cuya tensión de cresta es $3\hat{E}$ (figura 12). Si el corte es efectivo en el cero de corriente siguiente, el condensador permanece cargado a una tensión $3\hat{E}$.

Cuando la tensión «e» se invierte de nuevo, la tensión en los bornes del interruptor es igual a $5\hat{E}$. Esta sobretensión puede significar entonces un nuevo recebado. El fenómeno puede continuar por sí mismo con una tensión en los bornes del interruptor que puede alcanzar los valores de $5\hat{E}$, $7\hat{E}$, etcétera.

Para cualquier recebado que haya tenido lugar durante el cuarto de período que sigue al cero de corriente, puede observarse una «escalada de tensión» y llevar a valores de cresta inadmisibles para las cargas.

Por contra, los reencendidos cuyas apariciones dependen del dimensionamiento del aparato de corte son tolerables: la tensión de oscilación en los bornes del condensador permanece inferior, en valor absoluto, al valor cresta de la tensión del generador, lo que no presenta peligro particular para los aparatos.

Como recordatorio, el ensayo de sobretensión de condensadores se realiza a 2,25 veces su tensión asignada.

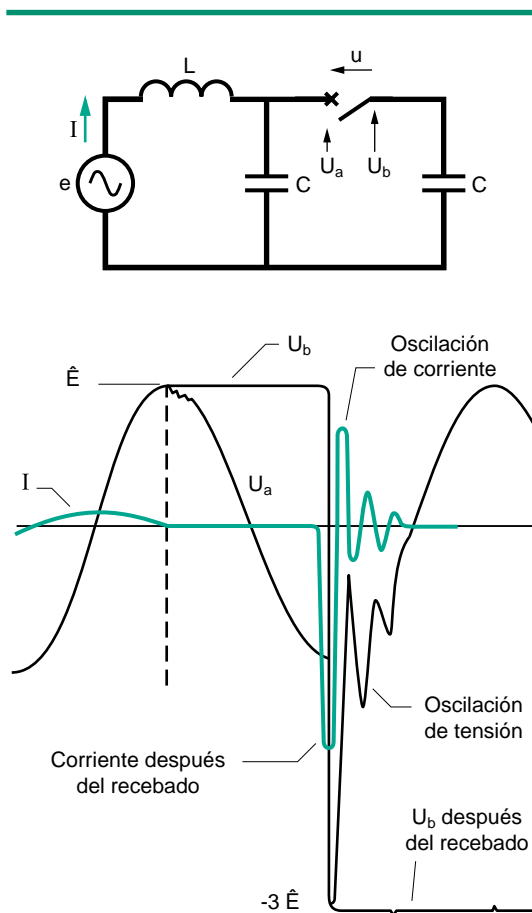


Fig. 12: Esquema de un circuito con una carga capacitiva. Después del corte, si el disyuntor no abre con suficiente rapidez, los recabados sucesivos pueden provocar sobretensiones peligrosas en la carga.

La regeneración dieléctrica del medio intercontactos debe ser suficientemente rápida para que no haya un recabado después del cuarto período.

■ Establecimiento de corrientes capacitivas y recabados

Durante el cierre del aparato de mando que alimenta las cargas capacitivas se producen fenómenos específicos de los circuitos capacitivos.

Así, la puesta bajo tensión de una batería de condensadores provoca una sobreintensidad importante a frecuencia elevada (figura 13) cuya amplitud de cresta viene dada por la

$$\text{ecuación: } I_c = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L_0 + L}}$$

donde

L_0 = inductancias de la red aguas arriba,

L = inductancias de conexión a la batería, generalmente pequeñas frente a L_0 .

En el caso de baterías en escalones, el fenómeno todavía se acentúa a nivel de cada escalón por la presencia de la energía almacenada en los condensadores que ya están bajo tensión: las corrientes transitorias pueden alcanzar varios centenares de veces la intensidad asignada con frecuencias de varios kHz debido a los pequeños valores de las impedancias de conexión entre escalones.

Después de los recabados a nivel de los contactos del aparato de mando (reencendido de un arco conductor antes de la unión de los contactos), estas corrientes transitorias

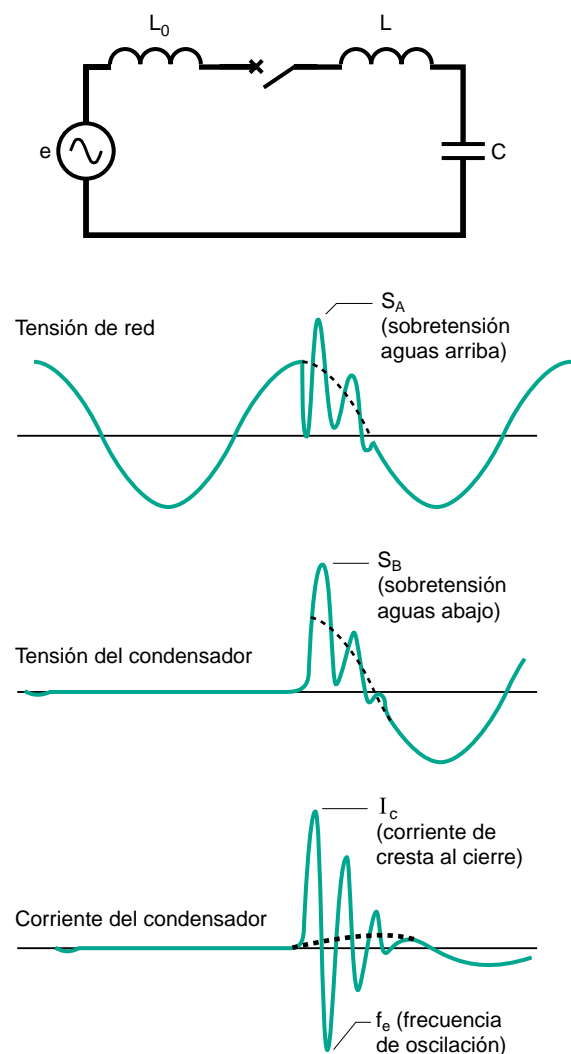


Fig. 13: Formas de la corriente y de las tensiones (sobretensión de recabado) al acoplar una batería única de condensadores.

elevadas provocan una erosión precoz de los contactos y eventualmente su soldadura. Para limitar estos fenómenos, se colocan en serie con la batería unas inductancias de limitación (impedancias de choque).

Así, para una batería de condensadores de n escalones de capacidad unitaria C , la ecuación anterior resulta:

$$I_c = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L}} \frac{n}{n+1}$$

donde

L = inductancias de limitación (impedancias de choque), elevadas frente a L_0 .

Hay que notar que existen aparatos adaptados a esta aplicación y deben especificarse.

■ Los campos de aplicación

Las corrientes capacitivas tienen principalmente dos orígenes: los cables y las líneas, así como las baterías de condensadores.

□ Los cables y líneas

Se trata de corrientes de carga de cables en vacío y de líneas aéreas largas (compensadas o no). En varios países europeos (sobre todo en los países del sur de Europa, Francia, Italia, España, ...) las redes aéreas de MT son largas y por tanto particularmente sensibles a las sobretensiones atmosféricas. En estas líneas hay pues un número elevado de desconexiones y por tanto de reconexiones.

□ Las baterías de condensadores

Están situadas en derivación en las redes y sirven para compensar la energía reactiva de las líneas (redes de transporte) y de las cargas (MT/BT). Permiten aumentar las potencias activas transportadas y disminuir las pérdidas en la línea. Pueden ser:

- únicas en el caso de una compensación pequeña y de una carga estable,
- o en escalones (múltiples o fraccionados).

Este tipo de batería es muy utilizado por ciertas grandes industrias (gran potencia instalada) y por los distribuidores de energía. Está asociada a un automatismo y el número de maniobras puede ser importante (varias operaciones al

día): hay que especificar los aparatos teniendo en consideración un número de maniobras adaptado a esta necesidad.

■ El corte de corrientes capacitivas y las normas

La norma CEI 60056 (4ª edición 1987) da, para todas las tensiones, unos valores de PdC asignado para los disyuntores situados como protección de los cables que pueden estar descargados. Pero esta especificación no obligatoria se considera inútil para las tensiones inferiores a 24 kV.

En lo que concierne al PdC asignado para los disyuntores situados como protección de líneas en vacío, la especificación se limita a los aparatos cuya tensión asignada es ≥ 72 kV.

No se especifica ningún valor para las baterías de condensadores.

La CEI 60056 especifica también, para los aparatos de mando y protección, unos ensayos de maniobra (**figura 14**) sobre corrientes capacitivas para las líneas en vacío, los cables en vacío y las baterías simples de condensadores, pero no especifica nada para las líneas largas ni para los bancos de filtros.

Las tendencias normativas, para las aplicaciones que comportan corrientes capacitivas, se orientan hacia la definición de aparatos con poca probabilidad de reencendidos, con una especificación ampliada en cuanto a las magnitudes y al número esperado de maniobras para garantizar su aptitud de empleo.

Secuencia de ensayo	I_{cc} del circuito de alimentación en función del PdC del disyuntor (I_{cc}/PdC) x 100	Corriente de ensayo (% I_{capa})
1	< 10	20 a 40
2	< 10	> 100
3	100	20 a 40
4	100	> 100

Fig. 14: Ensayos especificados por la CEI 60056 para los aparatos de mando y protección.

2.3 El corte de corrientes de defecto

En el caso de un cortocircuito, el desfase entre la intensidad y la tensión es siempre muy importante ($0,07 \leq \cos \varphi \leq 0,15$) porque las redes son esencialmente inductivas. Cuando la corriente pasa por cero la tensión de la red está en su máximo o casi.

En MT, la intensidad de cortocircuito alcanza algunas decenas de miles de amperios, en consecuencia el corte se hace sin arranque de corriente porque el arco es muy estable. Como se ha descrito anteriormente, se descompone en tres fases:

- un período de espera de paso por cero de corriente,
- un período de extinción,
- un período de restablecimiento.

Las corrientes de cortocircuito

- Los diferentes tipos de defecto

(Cuaderno Técnico nº 152)

Entre todos los tipos de fallo (tripolar, bipolar, monopolar y a tierra), el incidente más frecuente es el fallo monopolar a tierra (80% de los cortocircuitos). En general se debe a roturas de aislamiento fase-tierra posteriores a sobretensiones de origen atmosférico, a roturas o contorneos del aislador o trabajos de ingeniería civil.

Los cortocircuitos trifásicos son raros (5% de los casos) pero sirven como referencia para los ensayos pues sus corrientes de cortocircuito y sus TTR son más elevadas que para los fallos monofásicos o bipolares.

El cálculo de corrientes de fallo hace intervenir las características de las redes y los esquemas de conexión a tierra (neutro aislado, directamente puesto a tierra o impedante). Se han desarrollado métodos de cálculo normalizados (CEI 60909).

Actualmente, el cálculo de simulación por ordenador está muy extendido y los servicios de Schneider han desarrollado y disponen de programas que permiten obtener resultados muy fiables.

- Localización de los defectos

- Los fallos en los bornes de salida del disyuntor

En estas condiciones es cuando la intensidad de cortocircuito es más importante puesto que no está limitada más que por las impedancias situadas aguas arriba del aparato. Aunque este tipo de fallo es muy poco frecuente, es el que se tiene en consideración para la especificación de disyuntores en MT.

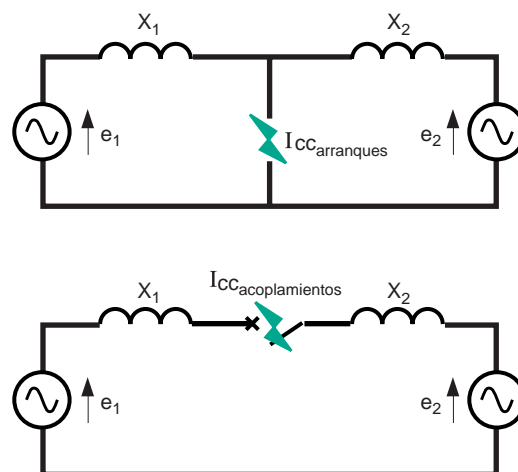
- El defecto en la línea

Este tipo de defecto es más frecuente que el anterior en redes aéreas, pero en MT, las características de arco de los disyuntores y de las conexiones disyuntores/cables/líneas hacen que la limitación sea inferior a la provocada por un cortocircuito en los bornes. Así pues no existen ensayos específicos para los disyuntores de MT. En AT este tipo de cortocircuito necesita unos ensayos particulares para los fallos próximos puesto que los fenómenos de reflexión de ondas provocan una TTR muy exigente.

- Acoplamiento en oposición de fase (figura 15)

Se trata de un cortocircuito particular que se produce al conectar dos generadores no sincronizados.

Cuando dos generadores han perdido su sincronismo, la tensión en los bornes del disyuntor de acoplamiento es igual a la suma de las tensiones de cada generador. Las corrientes que debe conectar entonces el disyuntor pueden alcanzar la mitad del valor de intensidad correspondiente un cortocircuito en el punto de acoplamiento. Ese máximo se alcanza en el caso de un acoplamiento en oposición de fases.



siendo $e_1 = e_2 = e$ y $X_1 = X_2 = X$

$$I_{cc \text{ arranques}} = \frac{e}{X} + \frac{e}{X} = \frac{2e}{X}$$

$$I_{cc \text{ acoplamiento}} = \frac{2e}{2X} + \frac{e}{X}$$

Fig. 15: Corte en caso de discordancia de fases al acoplar dos generadores no sincronizados.

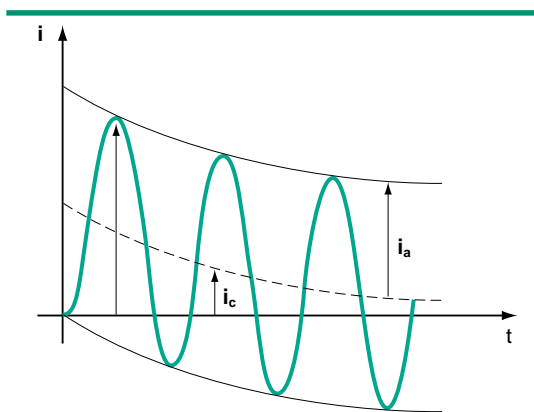


Fig. 16: Cuando hay un cortocircuito, la intensidad es la suma de dos componentes, una simétrica o periódica (i_a) y otra asimétrica o aperiódica (i_c).

La norma CEI 60056 (§ 4106) exige que en este caso, el aparato pueda conectar el 25% de la intensidad de fallo en sus bornes bajo una tensión igual a 2,5 veces la tensión con relación a tierra, lo que cubre los valores prácticos encontrados.

■ Formas de las corrientes de cortocircuito

Cuando hay un cortocircuito, la intensidad de corriente durante el período transitorio es suma de dos componentes, una simétrica o periódica (i_a) y otra asimétrica o aperiódica (i_c) (figura 16).

La componente simétrica (i_a) es producida por la fuente a alterna que alimenta la intensidad de cortocircuito.

La componente aperiódica (i_c) se crea por la energía electromagnética almacenada en la inductancia en el momento de cortocircuito. Su valor en el instante del fallo es igual y opuesta a la de la componente simétrica para asegurar la continuidad de intensidad. Decrece con una

constante de tiempo L/R , característica de la red, cuyo valor normalizado vale 45 ms. De ahí resultan las expresiones siguientes:

$$i_a = I \sin(\omega t + \theta)$$

$$i_c = -I \sin \theta e^{-t/(L/R)}$$

$$I = \text{Intensidad máxima} = E/Z_{cc}$$

θ = ángulo eléctrico que caracteriza el desfase entre el instante inicial del fallo y el origen de la onda de intensidad.

Dos casos extremos:

□ El cortocircuito se produce justo en el instante en el que la tensión (e) pasa por cero. La componente simétrica y la componente continua tienen su valor máximo. El régimen de establecimiento se llama de asimetría total.

□ El instante inicial de cortocircuito coincide con el paso por cero de la componente alterna de intensidad: la componente continua es nula y el régimen se llama simétrico.

El Poder de Corte

El poder de corte (PdC) se define como la intensidad más elevada que un aparato puede cortar bajo su tensión asignada en un circuito cuya TTR responde a una especificación precisa. El aparato debe poder cortar todas las corrientes de cortocircuito que tengan una componente periódica inferior a su PdC y una componente aperiódica cualquiera cuyo porcentaje no sobrepase un valor especificado.

Sin embargo, según el tipo de aparato, ciertas corrientes de fallo, más pequeñas que el PdC, pueden resultar difíciles de cortar, puesto que producen unos tiempos de arco muy largos con riesgos de que no se corte.

■ El corte en trifásico

Debido al desfase de las corrientes en un sistema trifásico, el corte se produce de la manera siguiente:

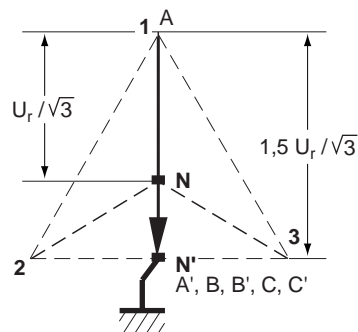
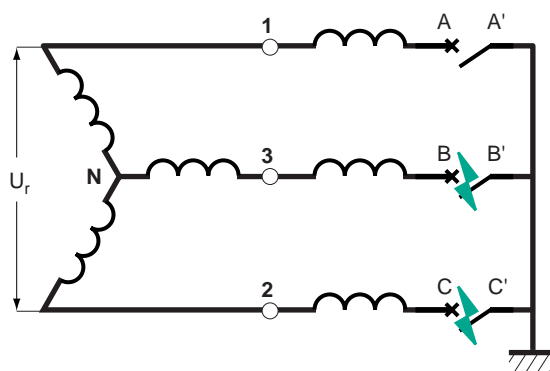


Fig. 17: Tensión $U_{AA'}$ soportada por el primer polo que abre en un aparato trifásico.

□ El disyuntor interrumpe la corriente de la primera fase (fase 1 en la **figura 17**) cuya corriente pasa por cero.

El régimen se convierte entonces en bifásico y todo ocurre como si el punto N se desplazara a N'. La tensión que se establece sobre la primera fase, en los bornes del contacto abierto AA' es la que existe entre A y N', que vale:

$$U_{red} \geq U_{AA'} = V \cdot k \geq U_{red} \frac{\sqrt{3}}{2}$$

k es el factor del primer polo. Su valor varía de 1 a 1,5 según que el neutro esté directamente puesto a tierra o perfectamente aislado.

□ 1/2 período más tarde las otras dos fases llegan a su vez a cero, el disyuntor corta y la red vuelve a convertirse en equilibrada con relación al punto neutro.

La TTR depende pues de los regímenes de neutro. La norma precisa los valores a tener en cuenta para los ensayos tomando el valor 1,5 para la MT y las redes de neutro aislado. Para los otros casos se toma el valor 1,3.

■ El cierre de un disyuntor sobre una corriente de fallo

Puesto que los fallos son a veces temporales, en la explotación normal es habitual cerrar el disyuntor después de la interrupción de una corriente de defecto. Sin embargo ciertos fallos son permanentes y el disyuntor debe pues poder restablecer la intensidad de cortocircuito.

El cierre que se acompaña de un preencendido provoca una onda de tensión de frente rápido cuya cresta de corriente puede alcanzar teóricamente $2,5 I_{cc}$ en la hipótesis de una asimetría total, de una constante de tiempo de 45 ms a 50 Hz y sin efecto de desfase de polos. Por tanto a los disyuntores se les exige un poder de cierre.

■ Poder de corte normalizado

La conformidad de los disyuntores a las normas se demuestra especialmente por su capacidad de cortar todas estas corrientes llamadas corrientes críticas. La norma CEI 60056 (§ 4.104) impone una serie de ensayos que permiten validar el PdC del aparato y verificar su aptitud para las maniobras de cierre y de apertura repetidas.

El PdC asignado se caracteriza por dos valores

□ El valor eficaz de su componente periódica llamado generalmente «poder de corte». Los valores normalizados de PdC asignado se

toman de las series de Renard (6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 16 - 20 - 25 - 31,5 - 40 - 50 - 63 - 80 - 100 kA) sabiendo que en la práctica, las corrientes de cortocircuito tienen valores comprendidos entre en 12,5 kA y 50 kA en MT.

□ El porcentaje de la componente aperiódica Corresponde al valor alcanzado al final de un tiempo τ igual a la duración mínima de apertura del disyuntor, a la que se le añade un semiperíodo de la frecuencia asignada para los aparatos de fuente auxiliar. La constante de tiempo de disminución exponencial normalizada es de 45 ms. Hay otros valores superiores en estudio para casos particulares.

Los ensayos de corte en cortocircuito se hacen con los valores especificados de TTR, para valores de intensidad de 10, 30, 60 y 100% del PdC según la tabla de la **figura 18**.

Con:

A = maniobra de apertura,

CA = maniobra de cierre seguida inmediatamente de una maniobra de apertura.

Salvo especificación particular, las secuencias asignadas de las maniobras se definen así:

□ Para los aparatos sin nuevo cierre automático rápido

A - 3 min - CA - 3 min - CA

o bien

CA - 15 seg - CA.

□ Para los aparatos previstos para un cierre automático rápido

A - 0,3 seg - CA - 3 min - CA.

Secuencia de ensayo	% de I_a (componente simétrica)	% de I_c (componente asimétrica)
1	10	< 20
2	30	< 20
3	60	< 20
4	100	< 20
5*	100	según la curva normalizada de decrecimiento

*: para los disyuntores que tengan un tiempo $\tau < 80$ ms.

Fig. 18: Valores especificados de TTR para los ensayos de corte en cortocircuito de los disyuntores.

3 Las técnicas de corte

Para cortar las corrientes de carga o de defecto, los constructores han desarrollado y perfeccionado los aparatos de corte (disyuntores y contactores principalmente) utilizando diversos medios de corte: el aire, el

aceite, el vacío y el SF_6 . Mientras que el corte en el aire o en aceite tienen tendencia a desaparecer, no ocurre lo mismo con el corte en el vacío o el SF_6 , «rey» de la MT.

3.1 El medio de corte

En el capítulo anterior se ha explicado que el corte tiene éxito cuando:

- la potencia disipada en el arco por efecto Joule permanece inferior a la potencia de enfriamiento del aparato,
- la velocidad de desionización del medio es grande,
- y el espacio intercontactos tiene una resistencia dieléctrica suficiente.

En consecuencia, la elección del medio de corte es importante en la concepción de un aparato. En efecto, este medio debe:

- tener una conductividad térmica importante, especialmente en la fase de extinción, para evacuar la energía térmica del arco,
- volver a alcanzar sus propiedades dieléctricas lo más rápidamente posible a fin de

evitar un reencendido intempestivo (la **figura 19** muestra las propiedades excepcionales del SF_6 al respecto),

- a temperatura elevada, ser un buen conductor eléctrico para reducir la resistividad del arco y por tanto la energía a disipar,
- a temperaturas más bajas, ser un buen aislante eléctrico para facilitar el restablecimiento de la tensión.

Esta capacidad de aislante se mide por la resistencia dieléctrica entre los contactos, que depende de la presión del gas y de la distancia entre los electrodos. La tensión de perforación en función de la distancia interelectrodos y de la presión viene dada por la curva de Paschen (**figuras 20 y 21**) que permite determinar tres zonas según la presión del gas.

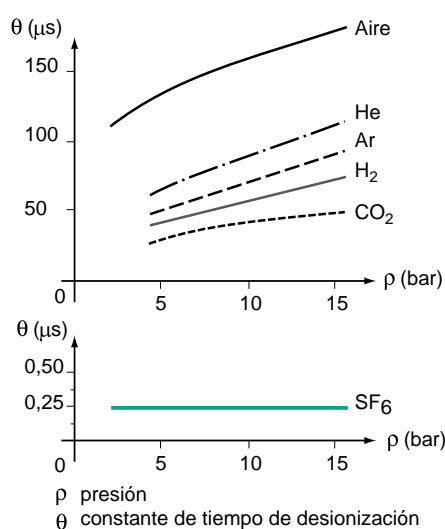


Fig. 19: Constantes de tiempo de desionización en función de la presión para distintos gases.

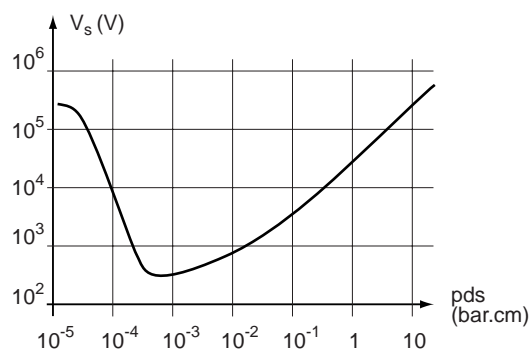


Fig. 20: Evolución de la rigidez dieléctrica del aire en función de la presión, en campo ligeramente heterogéneo. (Curvas de Paschen).

1 - La zona de alta presión llamada de «régimen atmosférico» en la que la resistencia dieléctrica es proporcional a la presión del gas y a la distancia intercontactos.

2 - La zona de presión baja, en la que la resistencia dieléctrica alcanza un verdadero mínimo entre 200 y 600 V según el gas utilizado (mínimo de Paschen). Se alcanza para un valor determinado del producto de la presión por la distancia intercontactos, situado alrededor de 10^2 mbar.cm.

3 - La zona de vacío en la que la tensión de perforación no depende más que de la distancia entre los contactos y del estado de sus superficies.

El estado conductor se asegura por los electrones y los átomos arrancados sobre los contactos en el vacío, y en un gas, por la ionización rápida de los moléculas de este gas.

Estas curvas evidencian los rendimientos posibles según los medios de corte que se han ido utilizando sucesivamente: el aire a presión atmosférica o a alta presión, el hidrógeno producido por descomposición del aceite, el vacío o el SF₆. La **figura 22** indica los márgenes de tensión en los que cada una de estas técnicas se utiliza hoy.

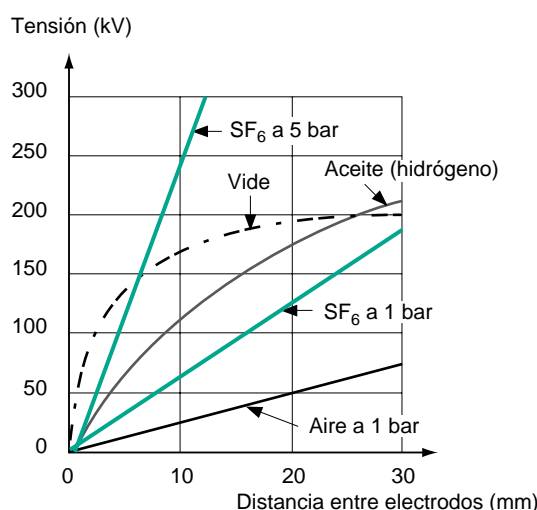


Fig. 21: Influencia de la distancia entre los contactos sobre la rigidez dieléctrica.

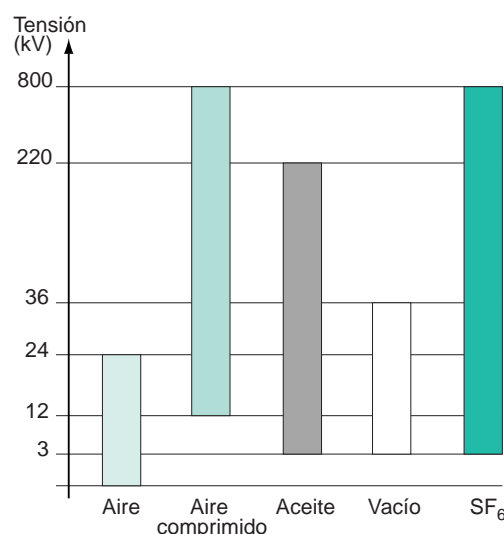


Fig. 22: Tipos de aparatos de corte utilizados según las tensiones de utilización.

3.2 El corte en el aire

Los aparatos que utilizan el corte en el aire a la presión atmosférica fueron los primeros en utilizarse (disyuntor magnético).

El aire a presión atmosférica, a pesar de su rigidez dieléctrica relativamente pequeña y su constante de tiempo de desionización elevada (10 μ s), puede utilizarse para el corte hasta tensiones próximas a 20 kV. Para ello hace falta disponer de una potencia de enfriamiento suficiente y de una tensión de arco elevada después del paso por cero de corriente para evitar el embalamiento térmico.

El mecanismo de corte en el aire

El principio fundamental consiste en mantener el arco suficientemente corto, tanto más cuanto más importante es la intensidad, para limitar la energía disipada y después alargarlo solamente cuando se acerca el cero de corriente.

Este principio ha llevado a la creación para cada polo del aparato, de una cámara de corte. Se trata de un volumen situado en el espacio cercano a los contactos y dividido en placas refractarias (placas con gran capacidad de

acumulación de energía térmica), (figura 23) entre los cuales el arco se estira.

En la práctica, cuando la intensidad decrece, el arco sometido a los esfuerzos electromagnéticos penetra entre estas placas. Se alarga y se enfría al contacto con los materiales refractarios hasta que su tensión de arco se hace superior a la de la red. Así, la resistencia del arco aumenta fuertemente. La potencia que entonces le puede aportar la red resulta inferior a la potencia de enfriamiento y el corte resulta efectivo. Debido a la elevada constante de tiempo de desionización de esta técnica, la energía de el arco a disipar permanece elevada. En contrapartida, el riesgo de sobretensión en el corte es casi nulo (figura 24).

Principales características de un dispositivo de corte en el aire

La dimensión de la cámara de corte viene principalmente definida por la potencia de cortocircuito de la red (en MVA).

En los aparatos del tipo la Solenarc, la longitud más importante del arco (varios metros en 24 kV) se obtiene en un volumen razonable gracias al desarrollo del arco bajo la forma de un solenoide. Teniendo en cuenta las velocidades que son necesarias para la apertura de los contactos, de algunos m/s, las energías de mando son de algunos centenares de julios.

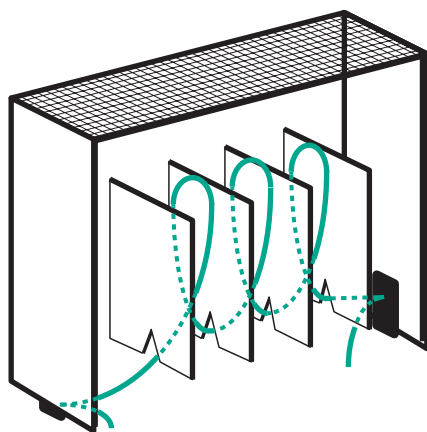


Fig. 23: Alargamiento de un arco eléctrico entre las placas refractarias en cerámica de una cámara de corte de un disyuntor de corte en el aire. (Disyuntor del tipo Solenarc - Marca Merlin Gerin).

Los campos de aplicación del corte en el aire

Este tipo de aparato se ha utilizado mucho en numerosas aplicaciones, pero su empleo se limita a tensiones inferiores a 24 kV. Para tensiones superiores, se emplea el aire comprimido, con lo que se consigue mejorar la resistencia dieléctrica y la velocidad de enfriamiento y de desionización. El arco se enfría entonces por sistemas de soplado a alta presión (entre 20 y 40 bars). Esta técnica se ha utilizado para disyuntores de alto rendimiento o para tensiones elevadas (hasta 800 kV).

En BT, la técnica de corte en el aire a presión atmosférica se ha utilizado universalmente por su simplicidad, su resistencia mecánica, su ausencia de sobretensión y su efecto limitador.

En MT, se han preferido otras técnicas, puesto que el corte en el aire presenta varios inconvenientes:

- volumen ocupado por la aparamenta (dimensiones más grandes a causa del alargamiento del arco),
- poder de corte influenciado por la presencia de las envolturas metálicas de la celda que contiene el aparato y por la humedad del aire,
- coste y ruido.

Los disyuntores de MT con corte en el aire ya casi no se fabrican hoy día.

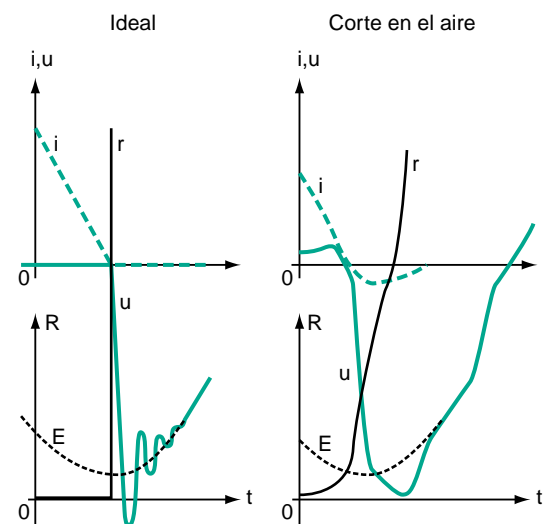


Fig. 24: Comportamientos comparados de un aparato ideal y de un aparato de corte en el aire.

3.3 El corte en aceite

El aceite, que servía ya como aislante, ha sido utilizado desde el principio del siglo XX como medio de corte, ya que esta técnica permite la concepción de aparatos relativamente sencillos y económicos. Los disyuntores en aceite se han utilizado principalmente para tensiones de 5 a 15 kV.

Principio

Los contactos están sumergidos en un aceite dieléctrico. Después de la separación, el arco provoca la descomposición del aceite que libera hidrógeno (70%), etileno (20%), metano (10%) y carbono libre. Una energía de arco de 100 kJ produce alrededor de 10 litros de estos gases. Estos gases forman una burbuja que, por inercia de la masa de aceite, se encuentra sometida durante el corte a una presión dinámica que puede alcanzar de 50 a 100 bars. Cuando la intensidad pasa por cero, el gas se expande y sopla el arco que se apaga. El hidrógeno, resultante de la descomposición del aceite, sirve como medio de extinción. Es un buen agente extintor gracias a sus propiedades térmicas y a su constante de desionización mejor que la del aire, en particular a presión elevada.

Diferentes tecnologías de corte en aceite

■ Disyuntores de gran volumen de aceite

En los primeros aparatos que utilizaban aceite, el arco se formaba libremente entre los contactos creando burbujas de gas no confinadas. Para evitar reencendidos entre fases o entre bornes y masa, estas burbujas no han de alcanzar en ningún caso la cuba o juntarse entre sí (**figura 25**). En consecuencia, los aparatos así diseñados alcanzaban dimensiones extraordinariamente grandes.

Además de las dimensiones, estos aparatos tienen numerosos inconvenientes como la falta de seguridad a causa del hidrógeno producido que se acumula bajo la tapa, el mantenimiento elevado necesario para vigilar la pureza del aceite y la conservación de sus propiedades dieléctricas. Para evitar estos inconvenientes (falta de seguridad, aparatos voluminosos), los consultores han creado los disyuntores de pequeño volumen de aceite.

■ Disyuntores de pequeño volumen de aceite

El arco y la burbuja se confinan en una cámara de corte aislante. La presión del gas aumenta durante el paso del arco por una sucesión de cámaras y después, cuando la intensidad pasa por cero, se expande a través de una boquilla en la zona del arco. Éste es entonces energicamente barrido, lo que asegura la recuperación de las propiedades dieléctricas intercontactos.

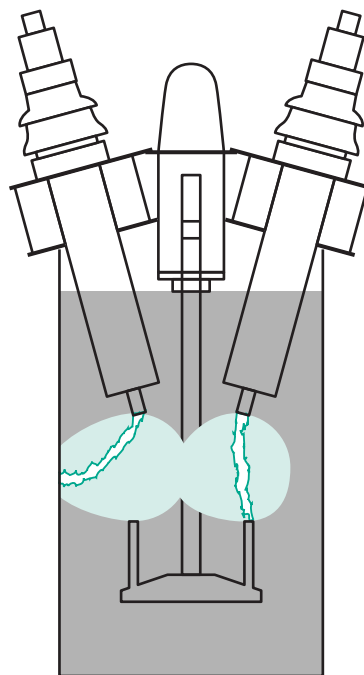


Fig. 25: Burbujas de gas en el origen de un fallo fase-masa en el momento del corte en un disyuntor de gran volumen de aceite.

□ Influencia del valor de la corriente sobre el PdC

Para las grandes corrientes, la cantidad de hidrógeno producido y los aumentos de presión son importantes. Por consiguiente los tiempos de arco son cortos. Inversamente, para las corrientes pequeñas, los aumentos de presión son débiles y los tiempos de arco son largos. Estos tiempos de arco aumentan hasta un nivel crítico en que se hace difícil alcanzar el corte. Unos dispositivos de soplado complementarios al final del recorrido pueden mejorar este punto.

□ Características principales de los disyuntores de pequeño volumen de aceite

El valor de intensidad de cortocircuito o de intensidad asignada impone un diámetro mínimo del contacto móvil. La longitud de la cámara de corte y el recorrido de la parte móvil son casi proporcionales a la tensión aplicada. Para evitar presiones excesivas, el tiempo de arco mínimo para corte de una gran intensidad debe ser inferior a 10 ms y debe permanecer inferior a 40 ms para las corrientes críticas. La envolvente aislante de la cámara de corte debe, por otra parte, ser concebida para soportar presiones muy elevadas generadas por fallos consecutivos, puesto que la disminución de presión necesita alrededor de 1 segundo.

Sin embargo, a pesar de la reducción del volumen de aceite, esta técnica presenta todavía algunos inconvenientes:

- La descomposición del aceite no es reversible.
- La degradación del aceite y el desgaste de los contactos deterioran la resistencia dieléctrica lo que conlleva costes suplementarios de mantenimiento.
- En caso de volver a cerrar rápidamente el polo, todavía hay una presión elevada y su PdC disminuye.

– El riesgo de explosión y de inflamación no se han eliminado completamente.

Los campos de aplicación del corte en aceite

Esta técnica de corte ha sido muy empleada en todos los ámbitos, tanto de transporte como de distribución, de la energía eléctrica.

Progresivamente se ha sustituido por las técnicas de corte en el vacío y en el SF₆, técnicas que no presentan los inconvenientes indicados en los párrafos anteriores.

3.4 El corte en el vacío

Las propiedades dieléctricas del vacío se conocen desde hace tiempo y se han utilizado, por ejemplo, en los tubos de vacío para rayos X. La utilización del vacío en la aparcamiento de corte se ha visto como una posibilidad desde 1920, pero, a causa de dificultades tecnológicas, no ha sido efectiva a escala industrial hasta después de 1960. Después de los años 70, la técnica del vacío se generaliza más y más por las ventajas que aporta: dimensiones reducidas, mayor seguridad y mayor resistencia mecánica.

Propiedades dieléctricas del vacío

En principio, el vacío es un medio dieléctrico ideal: no hay material y por tanto no hay conducción eléctrica. Sin embargo, el vacío nunca es perfecto y desde luego tiene un límite de resistencia dieléctrica. A pesar de todo, el «vacío» real tiene unas características espectaculares: a la presión de 10⁻⁶ bar, la rigidez dieléctrica en campo homogéneo puede alcanzar una tensión de cresta 200 kV para una distancia interelectrodos de 12 mm.

El mecanismo que hay en el origen de la ruptura dieléctrica en el vacío está vinculado a los fenómenos de emisión electrónica fría, sin efecto de avalancha por ionización. Este es el motivo por el que su resistencia dieléctrica no depende prácticamente más que de la presión

cuando ésta es inferior al 10⁻⁶ bar. Esta rigidez dieléctrica depende entonces de la naturaleza de los materiales, de la forma de los electrodos (en particular de la presencia de asperezas) y de la distancia interelectrodos. La forma de la curva que da la tensión de perforación en función de la distancia intercontactos (**figura 21**) muestra por qué el campo de aplicación del vacío permanece limitado en tensión. En efecto, las distancias necesarias para la resistencia dieléctrica aumentan muy rápidamente cuando la tensión sobrepasa de 30 a 50 kV lo que conlleva costos prohibitivos con relación a las otras tecnologías. Además está la emisión de rayos X cuando la tensión se eleva.

El mecanismo de corte en el vacío

El corte en el vacío es muy particular en razón de las características muy específicas del arco en el vacío.

■ El arco eléctrico en el vacío

El arco se compone de vapores metálicos y de electrones que provienen de los electrodos de manera distinta a las otras técnicas de corte mencionadas anteriormente en las cuales esta columna se compone principalmente por el gas intercontactos ionizado por colisiones. El arco puede tener dos aspectos concentrado o difuso, según la intensidad de corriente que lo atraviesa.

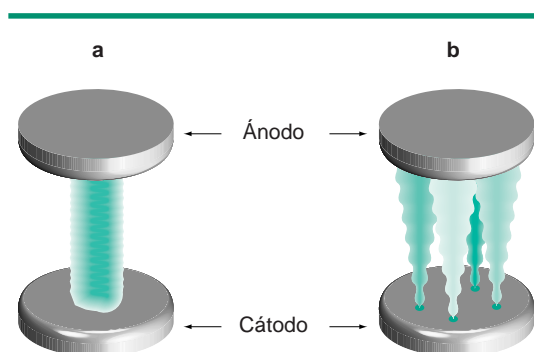


Fig. 26: Arco concentrado (a) y arco difuso (b).

■ Para valores elevados de intensidad (mayor o igual que 10000 A) el arco es único y concentrado como en los fluidos tradicionales (**figura 26a**) las manchas catódicas y anódicas de varios milímetros cuadrados alcanzan temperaturas muy elevadas. Una fina capa del material de contacto se vaporiza y el arco se desarrolla en una atmósfera de vapores metálicos que ocupan todo el espacio. Cuando la intensidad decrece, estos vapores se condensan sobre los mismos electrodos o sobre las pantallas metálicas dispuestas al efecto. En este régimen, la tensión de arco puede alcanzar 200 V.

■ Para valores de corriente inferiores a algunos miles de amperios, este arco se encuentra en forma difusa. Se compone de varios arcos separados unos de los otros, de forma cónica cuyo vértice está en el cátodo (**figura 26b**). Sus raíces catódicas, llamadas manchas, tienen una superficie muy pequeña (10^{-5} cm^2) y la densidad de corriente es muy elevada (10^5 a 10^7 A/cm^2). Las temperaturas locales muy altas (3000 K) implican una emisión combinada termoelectrónica/efecto de campo muy intensa para una evaporación del material de contacto moderada. La corriente entonces es esencialmente debida al flujo de electrones.

Los iones metálicos positivos producidos en el cátodo tienen una energía cinética tal (entre 30 y 50 eV) que pueden ocupar todo el espacio hasta el ánodo. Así neutralizan las cargas de espacios intercontactos, de lo que resulta un pequeño gradiente de potencial y una baja tensión de arco (como máximo 80 V).

■ Paso por el cero de corriente

En régimen de arco difuso directo o, si es a continuación de un arco único y concentrado, después del suficiente tiempo para que los vapores metálicos hayan podido condensarse, el corte se realiza con facilidad en el cero de corriente.

En efecto al aproximarse a cero, el número de puntos de arco disminuye hasta que el último desaparece cuando la energía aportada por el arco es insuficiente para mantener una temperatura de pie de arco suficientemente elevada. La extinción brutal del último punto es el origen de los fenómenos de arranque que se producen con frecuencia al aplicar esta tecnología.

Hay que darse cuenta de que, al invertir la tensión, el ánodo se convierte en cátodo, pero está frío y no puede emitir electrones, lo que significa una constante de tiempo de desionización excesivamente pequeña. En consecuencia, los aparatos de vacío pueden cortar las corrientes con crecimientos del TTR muy rápidos y también las corrientes de alta frecuencia.

Para las intensidades elevadas, a cero de intensidad todavía puede quedar un plasma de arco y el corte no resulta seguro. Esencialmente pues, la densidad de vapor metálico residual es la que determina el PdC.

■ Fenómenos de reencendido y de disparo indeseado

Estos fenómenos se producen cuando los contactos liberan demasiados vapores metálicos. Se considera que si la densidad de vapor después del cero de corriente sobrepasa $10^{22}/\text{m}^3$, la probabilidad de corte es casi nula.

De forma general, estos fenómenos son poco reproducibles y difíciles de modelizar.

Se necesitan numerosos ensayos para validar los diseños. En particular, se pueden observar fallos dieléctricos tardíos posteriores al corte, posiblemente fugaces, relacionados con la presencia de partículas o condensaciones de metal.

Las distintas tecnologías de corte en vacío

Todos los constructores se encuentran frente a las mismas exigencias:

- reducir el fenómeno de arranque de corriente para limitar las sobretensiones,
- evitar la erosión precoz de los contactos para obtener una durabilidad mecánica elevada,
- retrasar la aparición del régimen de arco concentrado para aumentar el PdC,
- limitar la producción de vapores metálicos para evitar los disparos indeseados,
- conservar el vacío, indispensable para mantener las características de corte durante la vida del aparato.

Sus soluciones se orientan principalmente en dos direcciones: el control del arco por un campo magnético y la composición de los materiales de los contactos.

■ Elección del campo magnético

Se emplean dos tipos de campos magnéticos: radial y axial.

□ La tecnología del campo magnético radial (figura 27)

El campo está creado por la corriente que circula entre los electrodos previstos a este efecto. En caso del arco concentrado los puntos de arranque del arco se desplazan con un movimiento circular, el calor se reparte uniformemente lo que limita su erosión y la densidad de los vapores metálicos. Cuando el arco es difuso, los puntos de arranque se desplazan libremente sobre la superficie del cátodo como si fuera un disco sólido.

Las formas de los electrodos bastante complejas que esta tecnología exige, hacen más difícil la rigidez dieléctrica entre electrodos.

□ La tecnología del campo magnético axial (figura 28)

La aplicación de un campo magnético axial imprime a los electrones y a los iones una trayectoria helicoidal siguiendo las líneas del campo magnético. Esto estabiliza el arco difuso y dificulta la aparición del régimen concentrado. La aparición de marcas anódicas se evita y la erosión queda limitada, lo que permite alcanzar potencias de corte elevadas.

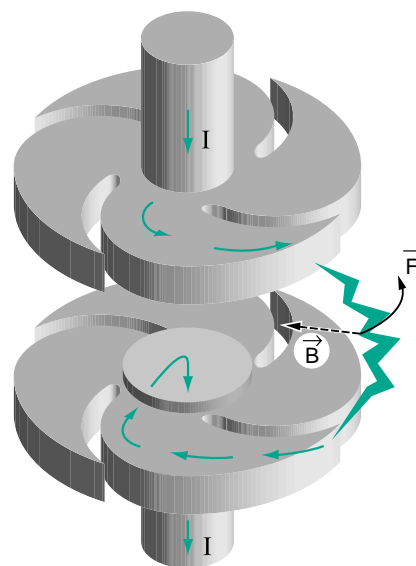


Fig. 27: Contactos que crean un campo magnético radial. El arco obedece las leyes del electromagnetismo, se desplaza desde el centro hasta el extremo de los «pétalos» y después gira en la periferia de los electrodos.

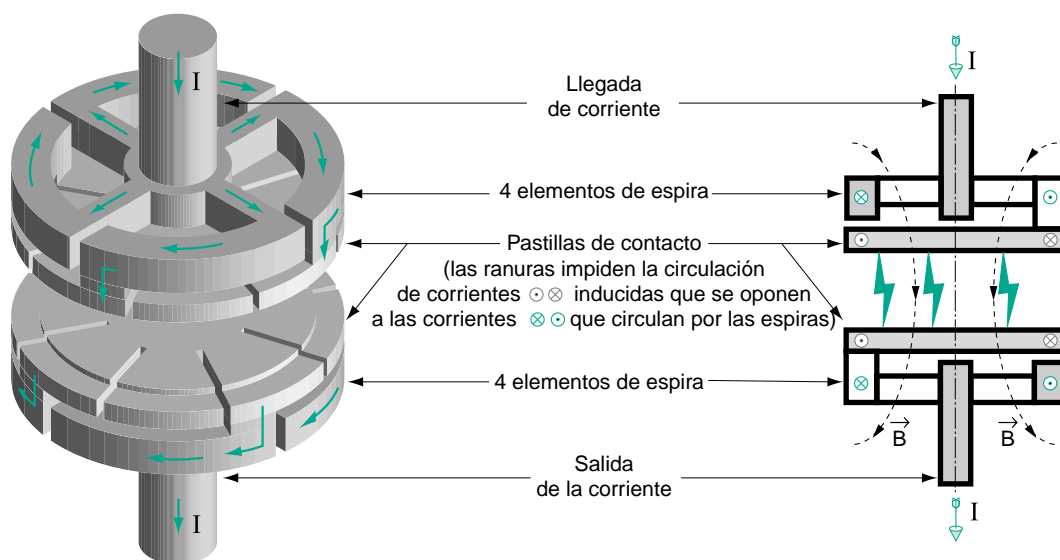


Fig. 28: Contactos que crean un campo magnético axial.

Este campo magnético puede generarse por unas espiras internas o externas a la cámara de vacío, recorridas permanentemente por la corriente.

Las espiras internas deben protegerse del arco. Las externas, no tienen el riesgo del arco, pero en contra sus dimensiones son mayores, aumentando las pérdidas térmicas e imponen límites debidos al riesgo de calentamiento.

La tabla de la **figura 29** presenta una comparación entre estas dos tecnologías.

■ Elección de los materiales

Para conservar la calidad del vacío, es indispensable que los materiales utilizados para los contactos y las superficies en contacto con el vacío sean muy puros y exentos de gas. El material de los contactos es importante porque la presión de vapor de saturación en la cámara no ha de ser ni demasiado elevada, ni demasiado baja:

□ Una presión de vapores metálicos elevada permite estabilizar el arco y delimitar el fenómeno de arranque de corriente (sobretensiones).

□ Por el contrario, una presión baja de vapores metálicos es más favorable para la interrupción de corrientes elevadas.

Además hace falta que su resistividad sea reducida, que tenga poca propensión a soldarse y una buena resistencia mecánica.

Los contactos con aleación cobre/cromo (50-80% Cu, 50-20% Cr) se utilizan en la mayoría de disyuntores por su resistencia a la erosión, su baja resistividad y su baja presión de vapor.

Otros materiales como el cobre/bismuto (98% Cu, 2% Bi) o más recientemente Ag/W/C se utilizan en los aparatos de elevada cadencia de maniobras (tipo contactores) puesto que no provocan arranque y tienen una baja propensión a la soldadura.

En lo que se refiere a los otros elementos en contacto con el vacío, los materiales cerámicos asociados con el proceso de soldado a alta temperatura son, por el momento, los más adecuados para mantener un nivel de vacío extremado (presión habitual inferior a 10^{-6} mbar).

■ Concepción de la envolvente y del dispositivo de corte

La limitación esencial es la estanqueidad de la cámara de vacío: por ejemplo, las piezas móviles que la atraviesan deben evitarse. La sensibilidad a las partículas y la posibilidad de soldadura en frío hacen que los contactos deslizantes no se utilicen en el vacío. En consecuencia, los contactos son simplemente

	Campo radial	Campo axial
Resistencia de contacto/calentamiento	+	-
Tensión de arco	-	+
Erosión de los contactos	-	+
PdC/diámetro de los contactos	=	=

Fig. 29: Tabla comparativa de los puntos fuertes y puntos débiles de cada tecnología.

frontales y la energía de maniobra para estos aparatos es pequeña (30 a 50 J). En contrapartida, las presiones de contacto deben ser elevadas para minimizar la resistencia de contacto y evitar la separación de los contactos cuando pase una intensidad de cortocircuito. Estas presiones de contacto necesarias imponen unas limitaciones mecánicas elevadas. Teniendo en cuenta que las distancias de aislamiento en el vacío son pequeñas, y que los mecanismos han de ser simples, las cámaras pueden ser muy compactas. Así, su volumen es función del PdC (que incide en el diámetro de la cámara) pero es la rigidez dieléctrica externa de la envolvente la que resulta preponderante para definir el dimensionado del aparato.

Esta tecnología la dominan bien ahora los grandes constructores, cuyos aparatos tienen una esperanza de vida superior a 20 años. Sin embargo hay que resaltar que el control permanente del vacío durante la explotación no es posible, ya que se necesita poner el equipo sin tensión y un aparato de medida adecuado.

El mantenimiento predictivo necesario, en caso de fuga accidental, para vigilar la fiabilidad de los cuadros eléctricos de MT no es pues aplicable con esta tecnología.

Los campos de aplicación del corte en el vacío

Está técnica de corte permite hoy la realización de aparatos que tienen una gran durabilidad mecánica y eléctrica con unas TTR de frente muy rápida.

Es en el campo de la MT donde más se emplea esta técnica: hay disponibles disyuntores de uso general para las diferentes aplicaciones con todos los poderes de corte habituales (hasta 63 kA). Se utilizan para la protección y mando:

- de cables y de líneas aéreas,
- de transformadores,
- de condensadores en batería única,
- de motores e inductancias shunt.

Están particularmente adaptados para el mando de hornos de arco (alta durabilidad eléctrica) pero hay que utilizarlos con precaución en el mando de escalones de condensadores en paralelo.

Esta técnica se utiliza también para los contactores que requieren una gran resistencia mecánica, pocas veces, por razones económicas, se utiliza para los interruptores.

En baja tensión: el uso de esta técnica es marginal por razones de coste y de falta de poder limitador. De una manera general, en BT su empleo se limita a las corrientes asignadas comprendidas entre 800 y 2500 A y para poderes de corte inferiores a 75 kA. En alta tensión ($U \geq 52$ kV) el uso de esta técnica está todavía en el campo de la prospectiva.

Observaciones:

■ Para el corte de corrientes capacitivas, en el vacío la resistencia dieléctrica después del corte es aleatoria, y se traduce por un riesgo de reencendidos importante. De hecho, los disyuntores bajo vacío se adaptan mal a la protección de redes capacitivas con tensiones superiores a 12 kV o que incluyen baterías de condensadores.

■ Con los interruptores con contactos en el vacío hay un riesgo de soldadura de contactos, en particular después de un cierre sobre un cortocircuito. Este es el caso en algunas operaciones de explotación, por ejemplo para reparar un defecto, o en el ciclo de ensayos previstos por las normas. En efecto, después de una abertura sin carga, la ausencia de arco no permite eliminar las asperezas dejadas por la rotura de la soldadura, soldadura realizada después del cierre en carga. Este deterioro del estado de la superficie facilita todavía más el preencendido después de cierres sucesivos y amplifica la importancia de las soldaduras, con el riesgo de una soldadura definitiva.

El empleo de estos interruptores exige pues algunas precauciones.

■ Para el mando de motores, hay que tomar precauciones particulares debido a que los disyuntores o contactores en vacío cortan las corrientes de alta frecuencia (fenómenos de reencendidos) y así están en el origen de sobretensiones. Aunque existen aparatos específicos, es preferible prever limitadores de sobretensión del tipo de ZnO.

3.5 El corte en el SF₆

El hexafluoruro de azufre –SF₆– es un gas apreciado por sus numerosas cualidades químicas y dieléctricas. La técnica de corte en este gas ha sido desarrollada, en los años 70, simultáneamente con la del vacío.

Propiedades del SF₆

■ Propiedades químicas

Es un gas no contaminante, incoloro, inodoro, no inflamable y no tóxico en su estado puro. Es insoluble en el agua.

Es químicamente inerte: sus moléculas tienen todos sus enlaces químicos saturados y una energía de disociación elevada (+ 1096 kJ/mol) así como una gran capacidad para evacuar el calor producido por el arco (entalpía elevada). Durante el período de arco, bajo el efecto de la temperatura que puede alcanzar 15 000 ó 20 000 K, el SF₆ se descompone. Esta descomposición es casi reversible: cuando la intensidad disminuye, la temperatura disminuye y entonces los iones y los electrones se recombinan para reconstruir la molécula SF₆.

En presencia de impurezas, tales como el dióxido de azufre o el tetrafluoruro de carbono, se genera una pequeña cantidad de subproductos de la degradación del SF₆. Estos subproductos permanecen confinados en las cámaras y se absorben muy fácilmente por elementos activos como el silicato de aluminio frecuentemente emplazados dentro de la envolvente del aparato de corte.

El informe 61 634 de la CEI sobre la utilización del SF₆ en la aparata de corte da unos valores típicos de subproductos encontrados después de varios años de servicio. Las cantidades producidas se mantienen pequeñas y sin riesgo para las personas ni el entorno: aire (unas pocas ppmv), CF₄ (40 ppmv a 600 ppmv), SOF₂ y SO₂F₂ (en cantidad despreciable).

■ Propiedades físicas

□ Propiedades térmicas

La conductividad térmica del SF₆ es equivalente a la del aire, pero el estudio de la curva de conductividad térmica del SF₆ a temperaturas elevadas indica un pico a la temperatura de disociación del SF₆ (figura 30).

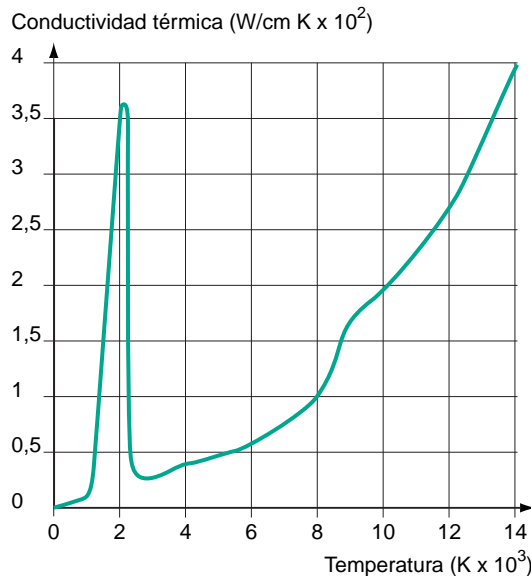


Fig. 30: Curva de conductividad térmica del SF₆ en función de la temperatura.

□ Propiedades dieléctricas

El SF₆ tiene una rigidez dieléctrica muy elevada gracias a las propiedades muy electronegativas del flúor (**figura 21**):

- Sus electrones libres tienen una vida media muy pequeña y, con las moléculas de SF₆, forman unos iones pesados de poca movilidad. La probabilidad de ruptura dieléctrica por avalancha queda así retardada.
- Confiere a su entorno una constante de tiempo de desionización muy pequeña, del orden de 0,25 μs (**figura 19**).

El mecanismo de corte en el SF₆

■ El arco eléctrico en el SF₆

Su estudio térmico permite describirlo como que está formado por un plasma de SF₆ disociado, de forma cilíndrica, constituida por un núcleo a una temperatura muy elevada en función de la corriente cortada, envuelto de una vaina de gas más frío. El núcleo y la vaina están separados por una zona de transición de temperatura ligada a la temperatura de disociación de la molécula. Cerca de 2 000 °C, esta zona de transición permanece sin cambios cuando la intensidad de la corriente varía (**figura 31**).

Durante el período de arco, la totalidad de corriente se transporta por el núcleo puesto que la temperatura de la zona de transición es inferior a la temperatura mínima de ionización y la vaina exterior se mantiene aislante. Las características generales del arco dependen del tipo de corte utilizado (auto-compresión, arco

giratorio, auto-expansión) y se indican en los párrafos que tratan de cada uno de estos tipos de corte.

■ Paso por cero de corriente

Con la disminución de la intensidad, la temperatura del núcleo disminuye, con lo que su conductividad eléctrica comienza también a disminuir.

Al acercarse el cero de corriente, los intercambios térmicos entre la vaina y el núcleo resultan muy importantes. El núcleo desaparece, implicando la desaparición de la conductividad con una constante de tiempo muy pequeña (0,25 μs) pero insuficiente para cortar las corrientes de alta frecuencia (no los reencendidos).

Las distintas tecnologías de corte en el SF₆ y sus campos de aplicación

En los aparatos de SF₆, los contactos están situados en el interior de una envoltura cerrada y rellena de gas cuya presión varía según la tensión y los parámetros de diseño. Estas envolturas generalmente están selladas de por

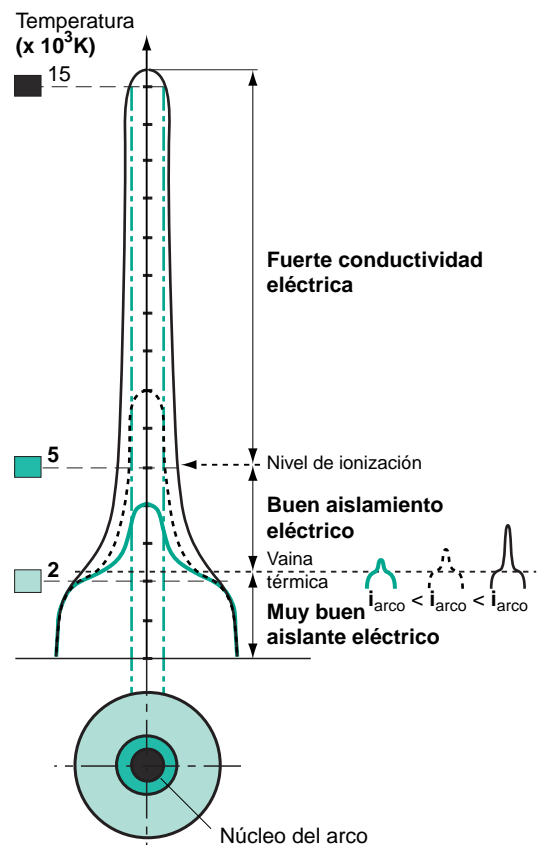


Fig. 31: Curva de distribución de la temperatura de un arco contenido en un tubo cilíndrico lleno de SF₆.

vida puesto que se ha conseguido que las tasas de fuga estén a un nivel muy bajo. Pueden instalarse unos sistemas de presostatos o de densímetros que permitan controlar permanentemente la presión del gas dentro de la envolvente.

Existen muchas tecnologías de apartamento con SF₆ que difieren por el modo de enfriamiento del arco y cuyas características y campos de aplicación varían.

■ El corte por auto-compresión

En este tipo de disyuntor, la expansión de un volumen de SF₆ comprimido por un pistón sopla el arco. Al abrir el aparato, un cilindro solidario con el contacto móvil se desplaza y comprime un volumen de SF₆ (figura 32a). Un tubo de soplado canaliza el gas hacia el centro del arco. El gas se evacúa a través de los contactos huecos.

Con intensidades fuertes, el arco provoca un efecto de tapón que contribuye a la acumulación de gas comprimido. Cuando la intensidad se aproxima a cero, el arco primero se enfría y después se extingue gracias a la inyección de nuevas moléculas de SF₆. El valor medio de la tensión de arco está comprendido entre 300 y 500 V.

Esta tecnología permite cortar sin dificultad todas las intensidades hasta el PdC, sin una intensidad crítica puesto que la energía necesaria para soplar el arco se produce por empuje mecánico y por tanto es independiente de la corriente que hay que cortar.

□ Magnitudes características

Las presiones relativas de SF₆ que se utilizan generalmente varían entre 0,5 bar (16 kA, 24 kV) hasta 5 bar (52 kV), lo que permite la realización de envolventes selladas sin fugas con todas las garantías de seguridad.

Los factores que afectan a las dimensiones de la cámara de corte son los siguientes:

- La capacidad para soportar la tensión de los ensayos de entrada/salida, lo que condiciona la distancia de aislamiento entre los contactos abiertos. Ésta puede ser constante y del orden de 45 mm teniendo en cuenta las presiones de SF₆ utilizado.

- La intensidad de cortocircuito a cortar dimensiona el diámetro del tubo de soplado y de los contactos.

- La potencia de cortocircuito a cortar impone las dimensiones del pistón de soplado (en 24 kV el volumen de gas soplado es del orden de 1 litro para un PdC de 40 kA).

La energía de apertura de 200 J (16 kA) a 500 J (50 kA), es relativamente elevada a pesar de lo compactos que son los aparatos a causa de la energía necesaria para la compresión del gas.

□ Campos de aplicación del corte por auto-compresión

El principio de auto-compresión es el más antiguo. Se ha utilizado para todos los tipos de disyuntores de uso general. No implica sobretensiones demasiado elevadas puesto que el fenómeno de arranque es pequeño y no existe el riesgo de reencendidos sucesivos.

Los disyuntores a auto-compresión se adaptan bien a la maniobra de baterías de condensadores puesto que tienen una probabilidad muy pequeña de reencendidos por una parte y una gran resistencia mecánica a las corrientes de cierre por otra parte.

Sin embargo, la energía de maniobra necesaria, relativamente importante, genera unas exigencias muy elevadas sobre los accionamientos y, eventualmente, una limitación del número de maniobras.

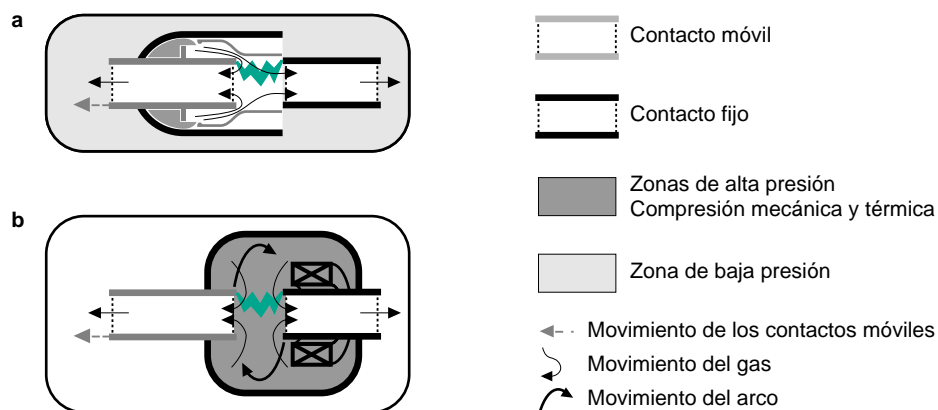


Fig. 32: Principios de corte por auto-compresión y [a], y por arco giratorio [b].

Esta tecnología todavía se utiliza hoy ampliamente, sobre todo para los aparatos de fuerte intensidad y las tensiones superiores a 24 kV.

■ El corte por arco giratorio

Con esta tecnología, el arco se enfría por su propio desplazamiento relativo en el SF₆. Un campo magnético, creado por una bobina recorrida por la corriente de fallo, genera un movimiento de rotación del arco a velocidad muy elevada (que puede superar la velocidad del sonido a presión atmosférica -P_{at}-).

Al abrir los contactos principales, la corriente se conmuta a la bobina y aparece el campo magnético axial. La fuerza de Laplace resultante acelera el arco en un movimiento circular. Los contactos de arco tienen forma de pistas circulares que pueden ser o bien concéntricas (arco radial y campo axial) o bien frente a frente, como está representado en la **figura 32b** (arco axial y campo radial). Así el arco se enfría de una manera homogénea en el SF₆.

La potencia de enfriamiento del aparato depende pues directamente del valor de la corriente de cortocircuito lo que da a estos dispositivos una suavidad de corte que no necesita más que una pequeña energía de maniobra: la energía necesaria para corte la suministra enteramente el arco y las corrientes pequeñas se cortan sin arranque ni sobretensiones.

Gracias al movimiento rápido de las chispas del arco, los puntos calientes que desprenderían vapores metálicos se evitan y la erosión de los contactos es mínima, en particular en el caso de la geometría axial.

Hay que notar que al aproximarse el cero de corriente, el campo magnético disminuye. Es importante que conserve un valor nulo de manera que el arco se mantenga en movimiento dentro del SF₆ frío en el momento de la aparición de la TTR, y que así se evite la existencia de corrientes críticas. Esto se obtiene insertando anillos en cortocircuito que obligan a que el campo magnético esté en ligero desfase con la corriente.

□ Magnitudes características

En MT, el arco giratorio en SF₆ tiene una tensión de 50 a 100 V para una longitud de 15 a 25 mm. Gracias a la pequeña energía de corte, los aparatos son muy compactos, incluso con una presión de relleno relativamente pequeña (de orden de 2,5 bar) y la energía de mando para la obertura que es inferior a 100 J.

□ Campos de aplicación

La tecnología de corte por arco giratorio se adapta bien al mando de máquinas sensibles a las sobretensiones tales como motores de MT y

alternadores. Su excelente resistencia mecánica, debida al pequeño desgaste de los contactos y a las energías pequeñas de mando, la hace muy interesante para aplicaciones con un gran número de maniobras (función contactor).

La técnica de arco giratorio utilizada sola no permite obtener más que un PdC limitado (25/ 30 kA a 17,5 kV) y no se aplica a tensiones inferiores a 17,5 kV.

■ El corte por auto-expansión

Utiliza la energía térmica disipada por el arco para aumentar la presión de un pequeño volumen de SF₆ que se escapa por un orificio atravesado por el arco (**figura 33a**). Cuanto más importante es la intensidad del arco, mayor es el efecto tapón que dificulta el escape del gas a través del orificio. El gas frío bloqueado en este volumen aumenta de temperatura, a causa de la disipación térmica del arco (principalmente por radiación), y por lo tanto su presión también aumenta. En el cero de corriente, el tapón desaparece, el SF₆ se expande y sopla el arco. El efecto de soplado depende del valor de la corriente, de donde resultan energías de mando pequeñas y cortes suaves, pero con un riesgo de existencia de corrientes críticas. Éstas se encuentran generalmente alrededor del 10% del PdC.

□ Se han desarrollado dos métodos de guiado del arco, el guiado mecánico y el guiado magnético, que permiten estabilizar el arco en la zona de soplado y además suprimir las corrientes críticas.

– El guiado mecánico (tipo auto compresión) (**figura 33b**)

El arco se mantiene centrado entre los contactos por unas paredes aislantes que confinan los flujos gaseosos de manera parecida a los tubos huecos utilizados en auto-compresión.

Esta técnica, desarrollada por todos los grandes constructores, es segura y sencilla pero aumenta la energía necesaria para la actuación. En efecto, la presencia de estos dispositivos en la zona de arco disminuye las características dieléctricas del SF₆ durante el período de restablecimiento, lo que implica aumentar las distancias entre electrodos y las velocidades de desplazamiento de los contactos, y por tanto la presión del SF₆.

– El guiado magnético (tipo arco giratorio) (**figura 33c**)

Un campo magnético hábilmente dimensionado permite centrar el arco en la zona de expansión del SF₆ al tiempo que le imprime un movimiento de rotación rápido de manera parecida a la tecnología del arco giratorio. Esta tecnología necesita una gran maestría de concepción y

tiene la ventaja de evitar la presencia de otros materiales que no sean SF_6 en la zona del arco. El rendimiento termodinámico es óptimo y el SF_6 mantiene todas sus cualidades dieléctricas. Así las distancias de aislamiento pueden reducirse al máximo, y la energía de actuación necesaria es pequeña.

□ Magnitudes características

Para las corrientes pequeñas, el soplado es casi inexistente y generalmente la tensión de arco no va más allá de los 200 V.

La presión de relleno de la cámara es cercana a la presión atmosférica.

El volumen de soplado térmico está comprendido entre 0,5 y 2 litros.

La energía de actuación a 24 kV es inferior a 100 J.

Todas estas características hacen que el corte por auto-expansión sea hoy la tecnología de mejor rendimiento. Sus capacidades de corte pueden ser muy elevadas con unas presiones y unas energías de actuación pequeñas, y por tanto con una fiabilidad muy elevada.

□ Ámbitos de aplicación

Esta tecnología, desarrollada para corte de corrientes de defecto, se adapta bien al corte de corrientes capacitivas puesto que acepta las sobreintensidades y las sobretensiones.

También es adecuada para el corte de corrientes ligeramente inductivas.

Sin un medio auxiliar, los aparatos de expansión térmica tienen un PdC y una tensión de empleo limitadas. La auto-expansión, por tanto, se asocia con frecuencia a la auto-compresión con arco giratorio o con pistón. Entonces se utiliza en los aparatos destinados a la MT e incluso a la AT, y en ésta para todas sus aplicaciones.

Los resultados alcanzados gracias a la asociación de la expansión térmica y del arco giratorio son tales que se ha considerado utilizar estas técnicas para disyuntores destinados a aplicaciones muy exigentes, por ejemplo la protección de alternadores de centrales (fuerte asimetría y TTR elevada), o que requieren una elevada resistencia mecánica.

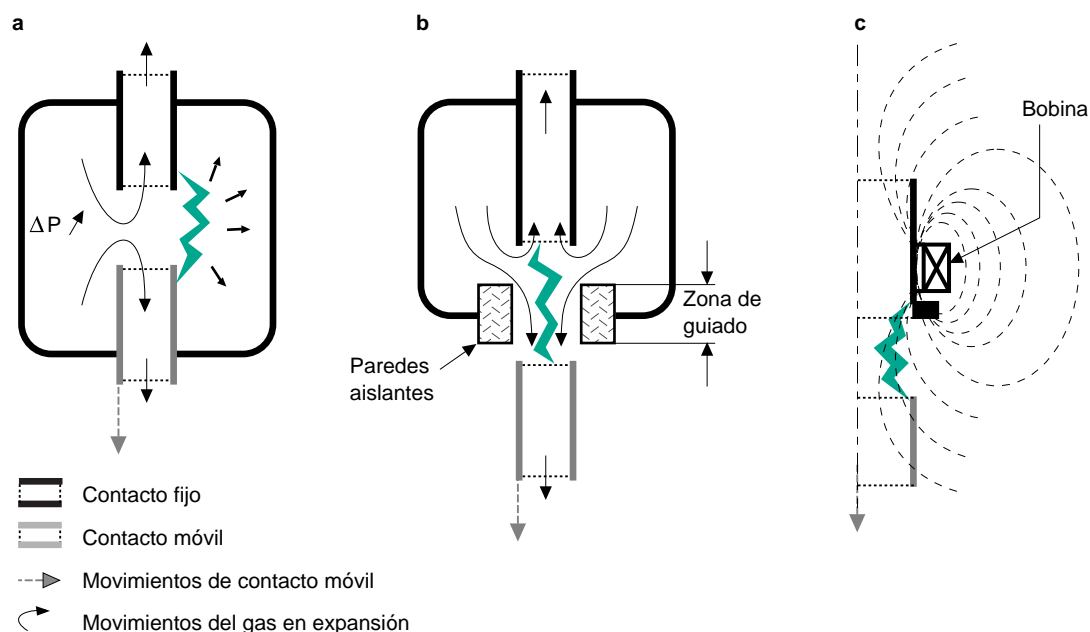


Fig. 33: Auto-expansión: Su principios de funcionamiento [a] y los dos métodos de guiado del arco, mecánico [b] y magnético [c].

3.6. Comparación de las distintas técnicas

Hoy, en el campo de la BT, el corte magnético en el aire es el único empleado, salvo unos pocos casos particulares.

En MAT, la técnica de corte en el SF₆ es prácticamente la única que se instala.

Para la MT, en la que se pueden utilizar todas las técnicas, las de corte en SF₆ y en el vacío han sustituido las del aire por razones de costo y de dimensiones externas (figura 34) y las del aceite por razones de fiabilidad, de seguridad y de reducción del coste de mantenimiento (figura 35).

Las técnicas de corte en el vacío o en el SF₆ tienen unos resultados comparables y sus cualidades respectivas hacen que una u otra se adapten mejor a ciertas aplicaciones.

Según el país, se emplean mayoritariamente una u otra de estas técnicas esencialmente por razones históricas o de elección de los constructores.

La tabla de la figura 36 resume las cualidades respectivas de cada una de estas dos técnicas.

□ Los disyuntores en SF₆ y en vacío son disyuntores de uso general y pueden adaptarse a todas las aplicaciones.

Los progresos tecnológicos en los medios de producción de cámaras de vacío han permitido obtener aparatos muy fiables y competitivos al mismo nivel que los aparatos de SF₆.

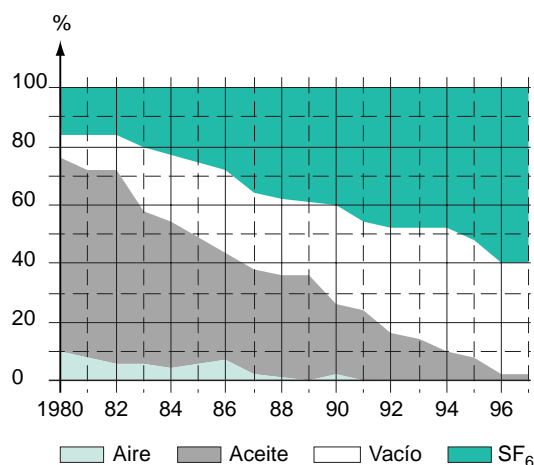


Fig. 34: Evolución del mercado de los disyuntores de Media Tensión en Europa.

	Aceite	Aire	SF ₆ /vacío
Seguridad	Riesgo de explosión y de incendio, si el aumento de presión (maniobras múltiples) produce un fallo.	Manifestaciones exteriores importantes (emisiones de gases ionizados y calientes después de los cortes).	No hay riesgo de explosión ni de manifestaciones exteriores
Ocupación del espacio	Volumen del aparato relativamente importante.	Instalación que necesita de amplias separaciones (corte no confinado).	Pequeña.
Mantenimiento	Sustitución periódica del aceite (descomposición irreversible del aceite en cada corte).	Si es posible, periódica sustitución de los contactos de arco. Mantenimiento periódico del actuador.	Nulo sobre los elementos de corte. Lubricación mínima de los mecanismos del actuador.
Sensibilidad al entorno	El medio de corte puede ser alterado por el entorno (humedad, polvo,...)		No sensibles: cámara sellada de por vida.
Corte en ciclo rápido	El tiempo de disminución de presión, largo, necesita desclasificar el PdC si hay riesgo de cortes sucesivos.	La evacuación muy lenta de aire caliente necesita una desclasificación del PdC.	SF ₆ - vacío recobran muy rápidamente sus propiedades dieléctricas: no hay desclasificaciones.
Durabilidad mecánica	Mediocre.	Media.	Excelente.

Fig. 35: Comparación de las diferentes técnicas de corte.

Las técnicas de vacío son más fáciles de implementar a tensiones bajas (tensión inferior a 7,2-12 kV). Por contra, la de SF₆ permite obtener más fácilmente elevados resultados de corte (tensión o intensidad de cortocircuito).

□ En funciones de mando (contactor, tensión e intensidad moderadas, exigencia de gran resistencia mecánica), la técnica del vacío está muy extendida a pesar de las precauciones que hay que tomar con las sobretensiones. Por

contra es casi inexistente en las funciones de apertura (interruptor) por razones económicas; en particular, la excelente rigidez dieléctrica del SF₆ después del corte permite integrar en un solo aparato las funciones de corte y de seccionamiento, cosa que con el vacío está proscrita.

La mayor parte de los grandes constructores utilizan hoy, en sus apartamentos, las dos técnicas de corte según sus especificidades.

		SF ₆	Vacío
Aplicaciones	Motores, hornos, líneas	Todas. Sobre todo adaptada a aplicaciones de corte elevadas (I y U)	Todas. Sobre todo adaptadas a tensiones pequeñas y a TTR muy rápidas.
	Disyuntores, contactores	Todas	Las funciones de seccionamiento están proscritas.
Características	Durabilidad mecánica	Satisfactoria para todas las aplicaciones habituales	Puede ser muy elevada para algunas aplicaciones habituales
	Sobretensión	No hay riesgo para pequeñas corrientes capacitivas. Muy pequeña probabilidad de recibiendo para las corrientes capacitivas	Recomendado limitador de sobretensiones para la maniobra de motores y de escalones de condensadores.
	Aislamiento entrada-salida	Muy reproducible, permitiendo funciones de seccionamiento	
	Dimensión		Muy compacto a tensiones bajas.
Seguridad de funcionamiento	Pérdidas de estanqueidad	Hasta el 80% de rendimientos se mantiene a presión atmosférica. Posible monitorización continua.	
	Mantenimiento	Reducido sobre el mecanismo de mando. Control permanente posible de la presión del gas	Reducido sobre el dispositivo de mando. Control ocasional posible del vacío.
	Número de fallos	Muy bajo (< 4/10 000), principalmente debido a los equipos auxiliares	Muy bajo, si el procedimiento de fabricación de las cámaras está bien hecho.

Fig. 36: Comparación de las técnicas de corte en el SF₆ y en el vacío.

3.7 ¿Cuáles son las posibilidades de otras técnicas?

Después de muchos años, los ingenieros siguen buscando desarrollar disyuntores sin arco y sin piezas en movimiento, utilizando principalmente componentes electrónicos.

Los tiristores permiten realizar aparatos de corte cuyo comportamiento puede ser cercano al del interruptor ideal puesto que cortan la corriente a su paso por cero. Además su resistencia mecánica es excepcional en las condiciones normales de empleo. Por desgracia, además de su coste, los componentes estáticos tienen algunos inconvenientes:

- disipación térmica importante,
- sensibilidad elevada a las tensiones y sobreintensidades,
- intensidad de fuga en estado bloqueado,
- limitación de la tensión inversa.

Estas particularidades hacen que sea necesario asociarles:

- radiadores,
- limitadores de sobretensiones,
- fusibles ultra-rápidos
- interruptores o seccionadores
- y, desde luego, una electrónica de mando.

Los semiconductores (tiristores, GTO, IGBT) han hecho enormes progresos y son ampliamente utilizados en BT en aplicaciones diversas, por ejemplo para realizar contactores cada vez que la cadencia de las maniobras es importante.

En AT, los tiristores se sitúan en automatismos de regulación de impedancias compuestos de autoinductancias y de condensadores, en los FACTS -Flexible Alternative Current Transmission System- para optimizar y estabilizar las redes de transporte, y en las Custom Power para la redes de distribución.

En MT, las aplicaciones son muy raras y los disyuntores estáticos están todavía en estado de prototipo, puesto que, además de sus puntos débiles citados arriba, para aguantar la tensión asignada, necesitan de muchos componentes en serie. En conclusión, salvo para aplicaciones muy particulares, el corte estático no tiene hoy un gran desarrollo. Cortar gracias al arco eléctrico sigue siendo actualmente **la** solución insoslayable.

4 Conclusión

De todas las técnicas de corte en MT, el corte en el SF₆ y el corte en el vacío se imponen por sus resultados.

La elección entre el vacío y el SF₆ depende, sobre todo, del ámbito de aplicación y de las elecciones tecnológicas de los constructores así como de los países: de ahí vienen las disparidades en el reparto geográfico de los aparatos que utilizan SF₆ o el vacío.

Actualmente no se vislumbra ninguna otra técnica capaz de sustituir el corte en el vacío o en el SF₆, puesto que esas dos técnicas tienen numerosas ventajas respecto a las técnicas antiguas:

- La seguridad: no hay riesgo de explosión, incendio ni de manifestaciones exteriores después del corte.
- Las reducidas dimensiones: el vacío y el SF₆ son muy buenos aislantes, por tanto los aparatos son menos voluminosos.

■ La fiabilidad: pocas piezas en movimiento con una energía de mando pequeña, de lo que resulta un mantenimiento reducido, una disponibilidad importante, y una duración de vida muy larga.

■ La puesta en envolvente más fácil de estos aparatos y la realización de celdas de tensión prefabricadas muy compactas es otra ventaja importante ya que el PdC no está influenciado por la presencia de barreras mecánicas.

Gracias a los medios de cálculo actuales que permiten la modelización y la simulación, la aparamenta mejora sin cesar. Sin embargo, los avances más importantes en términos de seguridad de funcionamiento de las instalaciones (fiabilidad, seguridad, mantenibilidad) están vinculados a la utilización generalizada de equipos bajo envolventes prefabricadas, probadas en fábrica. Con estos equipos se forman los aparatos de corte asociados a sistemas integrados de protección y de control.

Bibliografía

Normas

- CEI 60034: Machines électriques tournantes.
- CEI 60056: Disjoncteurs à courant alternatif haute tension.
- CEI 60909: Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif.
- Rapport CEI 61233: Disjoncteurs haute tension à courant alternatif - Etablissement et coupure de charge inductive.
- Rapport CEI 61634: Appareillage à haute tension - Utilisation et manipulation de gaz hexafluorure de soufre (SF_6) dans l'appareillage à haute tension.

Cuadernos Técnicos Schneider

- Análisis de las redes trifásicas en régimen perturbado con la ayuda de las componentes simétricas.
B. DE METZ-NOBLAT,
Cuaderno Técnico nº 18.
- El proceso de corte con un interruptor automático SF_6 de autocompresión, tipo Fluarc.
J. HENNEBERT,
Cuaderno Técnico nº 112.
- El proceso de corte con un interruptor automático o un contactor Rollarc mediante arco giratorio en SF_6 .
C. DUPLAY,
Cuaderno Técnico nº 123.
- El control de las sobretensiones de maniobra con los aparatos con SF_6 .
O. BOUILLIEZ,
Cuaderno Técnico nº 125.

- Cálculo de corrientes de cortocircuito.
B. DE METZ-NOBLAT & G. THOMASSET,
Cuaderno Técnico nº 158.
- Control-mando y protección de motores MT.
J.-Y. BLANC,
Cuaderno Técnico nº 165.
- El corte por autoexpansión.
G. BERNARD,
Cuaderno Técnico nº 171.
- SF_6 propiedades y uso en interruptores automáticos en MT y AT.
D. KOCH,
Cuaderno Técnico nº 188.
- Maniobra y protección de baterías de condensadores.
D. KOCH,
Cuaderno Técnico nº 189.

Obras diversas

- High Voltage Circuit Breakers-Design and Applications-. RUBEN, D. GARZON.
- Disjoncteurs HAUTE TENSION: Comparaison des différents mode de coupure.
B. JOYEUX-BOUILLON (GEC ALSTHOM) & J.-P. ROBERT (Merlin-Gerin).
- Disjoncteurs SF_6 : Evolution de 1959 à 1994.
D. DUFOURNET, (GEC ALSTHOM- T&D).
- Manoeuvre des courants capacitifs - Etat de l'art -. ELECTR nº155, Août 1994.
- Etude des technologies existantes des disjoncteurs de distribution. IREQ, Avril 1991.
- Guide technique du disjoncteur. P. POLO & P. ATTIER, 1993.