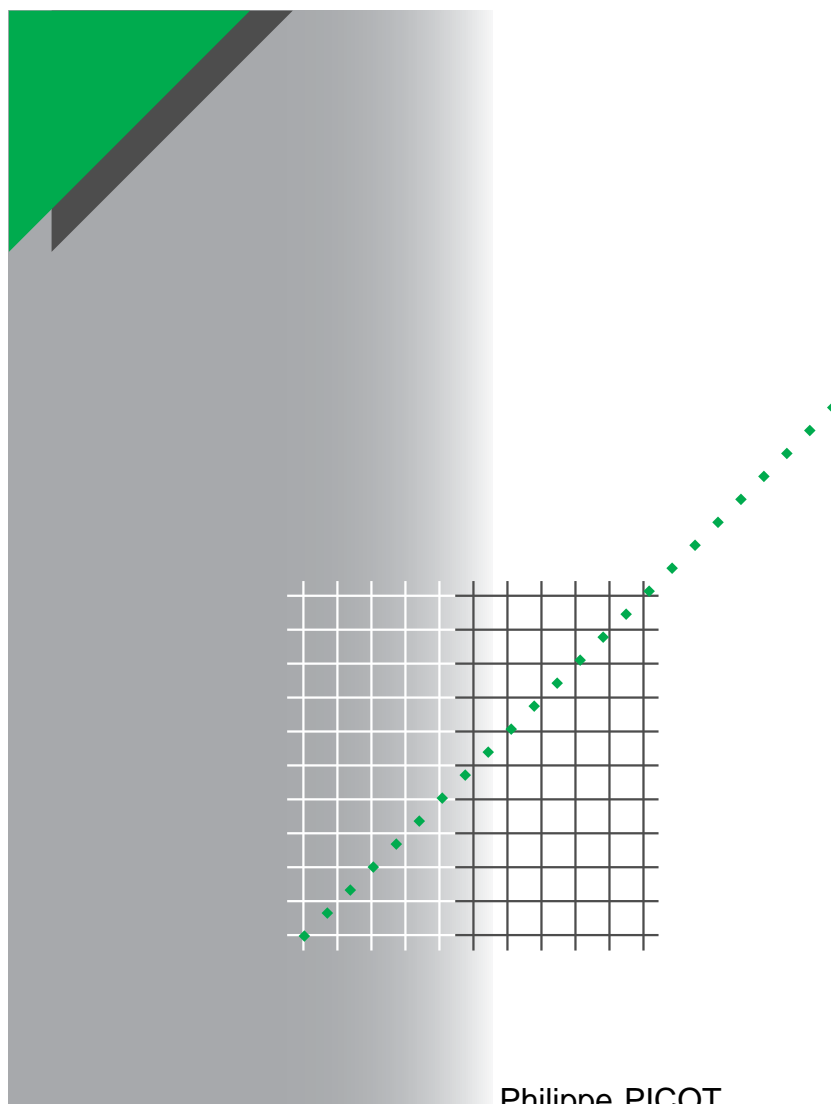
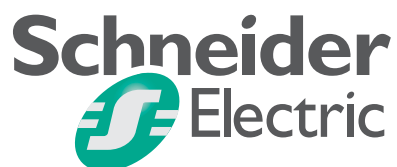


Cuaderno Técnico nº 198

El corte de corriente eléctrica en vacío



Philippe PICOT



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 198 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 198

El corte de corriente eléctrica en vacío



Philippe PICOT

Ingeniero civil de minas (ENSMP).

Entró en Merlin Gerin en 1992, asumiendo diversas responsabilidades, especialmente en aspectos técnicos de la división MT.

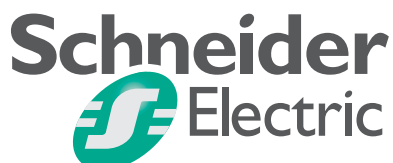
Desde 1995 participa en el desarrollo de cámaras de vacío en Schneider Electric.

Actualmente es responsable de la previsión y perspectiva de desarrollo tecnológico de la aparamenta MT.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: abril 2000

Versión española: febrero 2003



El corte de la corriente eléctrica en vacío

Este Cuaderno Técnico constituye una presentación general de las nociones básicas relativas al funcionamiento y a la utilización de los aparatos de corte en vacío.

La primera parte, titulada «Teoría y Práctica del corte en vacío» es una descripción rápida de los fenómenos físicos propios del corte en vacío y de su utilización. También incluye una presentación de diferentes opciones tecnológicas que están a disposición de los diseñadores de cámaras de vacío.

La segunda parte se dedica a las interacciones entre el aparato de corte en vacío y la red eléctrica en el caso de los circuitos inductivos que, con el corte en vacío, pueden provocar sobretensiones, y por tanto, también, sobre la protección contra éstas.

En la tercera parte, el autor explica cómo las características propias del corte en vacío, que se han explicado en las dos partes anteriores, determinan los principales campos de aplicación de esta técnica, según los valores de tensión y los diversos tipos de aparamenta.

Este Cuaderno Técnico se completa con una amplia bibliografía de obras y documentos a los que podrá dirigirse el lector que desee profundizar en algún detalle especial.

Índice

1 Introducción: utilización del vacío como medio de corte en la aparamenta eléctrica	p. 6
2 Teoría y práctica del corte en vacío	p. 6
2.1 Propiedades dieléctricas del vacío	p. 6
2.2 El arco eléctrico en el vacío	p. 9
2.3 Fenómenos asociados al corte con corriente cero	p. 11
2.4 Diseño práctico de las cámaras de los interruptores de vacío	p. 15
3 Corte en vacío y sobretensiones al abrir circuitos inductivos	p. 22
3.1 Los fenómenos generadores de sobretensiones	p. 22
3.2 Las medidas de protección contra las sobretensiones	p. 26
4 Los principales campos de aplicación del corte en vacío	p. 28
4.1 Las aplicaciones de la técnica de corte en el vacío en MT	p. 28
4.2 Utilización del corte en vacío en BT	p. 32
4.3 Utilización del corte en vacío en AT	p. 32
5 Conclusión	p. 34
Bibliografía	p. 35

1 Introducción: utilización del vacío como medio de corte en la aparamenta eléctrica

El SF₆ y el vacío son las dos técnicas modernas de corte que se aplican en el campo de la MT (1 a 52 kV) y de la AT (>72,5 kV). Aparecidas en los años 60, se desarrollaron rápidamente a partir de los años 70 y hoy han sustituido a las antiguas técnicas de corte en el aire y en aceite. (Figura 1).

El SF₆ se utiliza en los equipos de las gamas MT y AT; en cambio, el corte en vacío se ha desarrollado esencialmente en el campo de la MT, con limitadas extrapolaciones a la BT o a la AT: por tanto, ambas técnicas sólo compiten en el campo de la MT.

De hecho, actualmente, la idea de competencia entre ambas técnicas ha quedado defasada: hubo una competencia comercial entre los constructores que habían optado por una u otra de estas técnicas, pero actualmente, todos los grandes fabricantes disponen de la una y de la otra para poder ofrecer a cada usuario la solución que mejor satisfaga sus necesidades. En efecto, cada técnica tiene sus puntos fuertes y sus puntos débiles. ¡Aunque cada una es muy polivalente y susceptible de ofrecer una solución fiable y competitiva a la mayor parte de los problemas de corte en MT, los usuarios suelen estar en condiciones de escoger en función de sus aplicaciones, de sus políticas de explotación y de mantenimiento, de sus prioridades y hasta de sus costumbres!

Históricamente, la técnica de corte en el vacío ha sido desarrollada de acuerdo con los constructores americanos e ingleses (los pioneros fueron General Electric y VIL), seguidos por los japoneses y los alemanes: sus países tienen en común el utilizar para la distribución de la energía eléctrica en MT redes con tensión nominal relativamente baja (de 7,2

a 15 kV). Por el contrario, en países como Francia e Italia, que distribuyen la energía eléctrica con tensiones próximas a los 24 kV, los constructores han optado por la técnica de corte en SF₆.

Es importante destacar, 30 años después, la importancia tecnológica de esta elección, referida a una aplicación determinada. En efecto, aún ahora, la evolución técnico-económica global de ambas técnicas resulta equivalente para los valores situados entre 12 y 24 kV, con una ventaja relativa para el SF₆ por la parte alta y para vacío por la parte baja de estos valores. Sin embargo, las diferencias de coste son pequeñas, lo que explica que puedan coexistir ambas ofertas, vacío y SF₆, en todo el conjunto de valores MT comprendidos entre 7,2 y 36 kV.

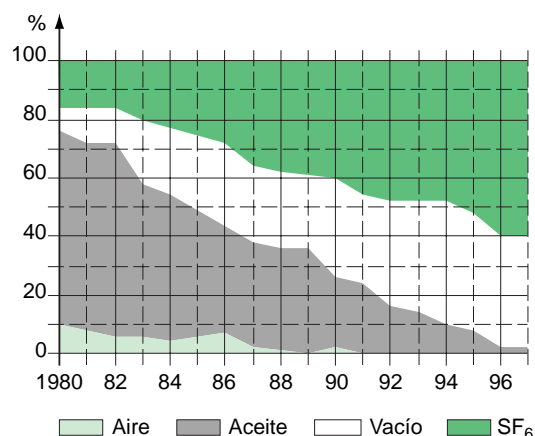


Fig. 1: Evolución del mercado de los interruptores automáticos MT en Europa.

2 Teoría y práctica del corte en vacío

2.1 Propiedades dieléctricas del vacío

Todo medio de corte debe de ser, ante todo, un buen aislante, puesto que se trata de oponerse al paso de la corriente. El vacío no es una excepción a esta regla: tiene propiedades dieléctricas interesantes, pero particulares respecto a los aislantes gaseosos, que son los que habitualmente se utilizan a presiones iguales o superiores a 1 bar.

El vacío, cuando se le califica de «alto» (margen de presión comprendido entre 10^{-1} y 10^{-5} Pa, o sea 10^{-3} y 10^{-7} mbar), que es el de las cámaras de los interruptores de vacío (**figura 2**) es, de hecho, un gas a baja presión: típicamente 10^{-6} mbar, en una cámara nueva.

A esta presión, un volumen de 1 mm^3 contiene todavía $27 \cdot 10^6$ moléculas de gas, pero éstas se pueden ignorar tranquilamente puesto que su recorrido libre entre dos colisiones es del orden de un centenar de metros: el término «vacío» es pues apropiado, ya que cada molécula se comporta aproximadamente como si estuviera sola...

Repaso del comportamiento dieléctrico de los gases

Con los valores normales de presión (presión atmosférica y superiores) el comportamiento dieléctrico del gas queda representado por la



Fig. 2: Una cámara de vacío de 17,5 kV de Schneider Electric.

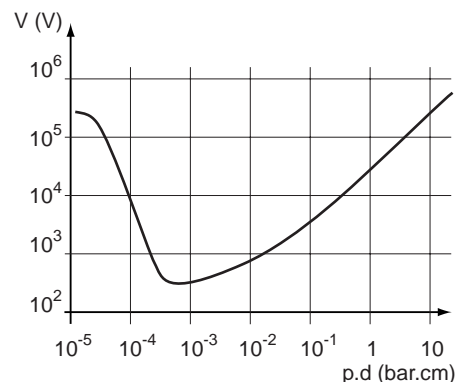


Fig. 3: Evolución de la rigidez dieléctrica en el aire en función de la presión (curva de Paschen).

parte derecha de la curva de Paschen (**figura 3**): la tensión de ruptura dieléctrica V es una función creciente del producto p.d (p = presión, d = distancia entre los electrodos). Esta relación caracteriza el mecanismo de ionización en cadena (avalancha de Townsend), responsable de la ruptura dieléctrica: entre dos colisiones, los electrones deben de adquirir una energía suficiente (proporcional a $\frac{V}{pd}$) para ionizar las

moléculas del gas y crear así otros electrones.

A bajas presiones, este mecanismo ya no funciona. En efecto, los electrones pueden adquirir mucha energía durante su recorrido libre por el medio, pero, la probabilidad de que encuentren las moléculas a ionizar antes de alcanzar el electrodo, se vuelve muy baja: el proceso de avalancha y de multiplicación de los portadores de carga ya no puede producirse y la rigidez dieléctrica mejora. Esto es lo que expresa la curva de Paschen que presenta la mínima rigidez dieléctrica para un producto p.d del orden de 1 Pa.m para el nitrógeno. Por debajo de este valor, la rigidez dieléctrica aumenta rápidamente (lado izquierdo de la curva de Paschen) hasta aplanarse para valores de p.d inferiores a 10^{-2} Pa.m . Esta parte aplanada es la que caracteriza el comportamiento dieléctrico en las cámaras de vacío (presión inferior a 10^{-3} mbar, o sea 10^{-1} Pa, y distancias del orden de 1 a 10 cm).

Corresponde a un valor elevado de rigidez dieléctrica, comparable a la del gas SF₆, de unos 2 bares para distancias del orden de centímetros. Con estos valores, no son los mecanismos de ionización del gas residual los que limitan la rigidez dieléctrica, sino fenómenos debidos al estado de las superficies de los electrodos, como por ejemplo, la emisión electrónica de campo y la presencia de partículas sueltas.

■ Emisión electrónica de campo

La emisión electrónica consiste en la extracción de los electrones del metal de los electrodos. Esto se puede hacer elevando suficientemente la temperatura del metal: la emisión termiónica que se produce en los cátodos calientes de las válvulas electrónicas. Pero otro medio es aplicar un campo eléctrico suficientemente elevado en la superficie del metal. Este último fenómeno, la emisión electrónica de campo, es susceptible de producirse en las cámaras de vacío. Sigue la ecuación de Fowler-Nordheim que, en su forma simplificada, puede expresarse:

$$j_e = \frac{AE^2}{\phi} \exp\left(-\frac{B\phi^{1,5}}{E}\right),$$

donde:

j_e es la densidad de corriente electrónica en Am⁻²,

$A = 1,54 \cdot 10^{-6} \text{ AJV}^{-2}$,

E es el campo eléctrico en Vm⁻¹,

ϕ es el trabajo de extracción en eV (4,5 eV para el cobre),

$B = 6,83 \cdot 10^9 \text{ VJ}^{-1,5} \text{ m}^{-1}$.

Como se puede comprobar a partir de los valores numéricos indicados anteriormente, la emisión electrónica de campo no se vuelve apreciable hasta valores de campo, en la superficie de los metales, comprendidos entre algunos 10⁹ Vm⁻¹ y 10¹⁰ Vm⁻¹. Se trata de valores muy elevados, claramente por encima de los valores de campo macroscópico aplicados en las cámaras de vacío (del orden de 10⁷ Vm⁻¹ = 100 kV/cm). A pesar de ello, se observa emisión electrónica de campo en las cámaras de vacío: por tanto, hay que concluir que, localmente, a nivel microscópico, el campo eléctrico queda reforzado por un factor de intensificación β del orden de algunos 10² ó 10³. Los fenómenos que pueden explicar estos altos valores de β no están todavía completamente aclarados por los investigadores, que anteponen normalmente o el efecto de puntas microscópicas o el efecto de la presencia de partículas aislantes en la superficie de los metales.

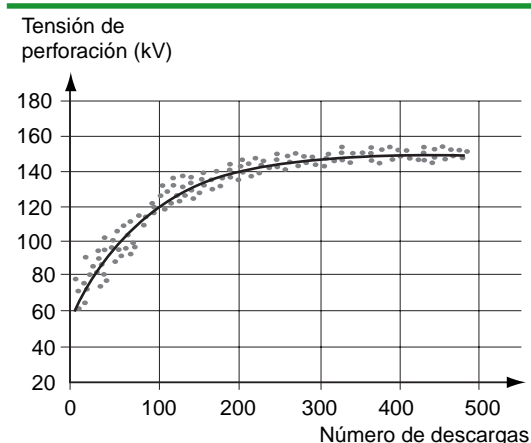


Fig. 4: Evolución en el tiempo de la tensión de perforación o ruptura dieléctrica entre dos electrodos en el vacío mediante descargas.

□ Acondicionamiento en tensión

La existencia de zonas microscópicas activas de emisión se traduce normalmente en una mala rigidez dieléctrica en las cámaras de vacío nuevas (algunos 10 kV/cm); en cambio, se comprueba experimentalmente que las rupturas dieléctricas repetidas destruyen estas zonas o al menos reducen muy sensiblemente el valor del factor de intensificación que las caracteriza. La rigidez dieléctrica satisfactoria (respecto a los valores asignados) sólo se consigue después de un proceso de «acondicionamiento en tensión» consistente en la aplicación de una tensión elevada (de un orden de magnitud similar a la rigidez que se pretende conseguir) durante algunos minutos: las múltiples rupturas dieléctricas que se producen elevan progresivamente la rigidez dieléctrica entre electrodos. La **figura 4** ilustra este fenómeno, mostrando la evolución en el tiempo de la tensión de ruptura dieléctrica al irse produciendo descargas: el límite de mejora de la rigidez dieléctrica se alcanza para un valor próximo a 10⁸ Vm⁻¹, lo que corresponde todavía a una β microscópica, «irreductible», del orden de 100.

□ Mecanismos de ruptura dieléctrica

Las rupturas dieléctricas que tienen su origen en la corriente de emisión electrónica producen diversos mecanismos complementarios: en efecto, las corrientes de emisión electrónica estables (para valores máximos de algunos mA) no degeneran forzosamente en rupturas dieléctricas si no se aumenta la tensión aplicada; hasta incluso pueden disminuir por efecto del acondicionamiento. La ruptura dieléctrica propiamente dicha depende de la aparición de un plasma (gas ionizado)

localizado, suficientemente denso para que se produzca el fenómeno de avalancha de las descargas gaseosas.

El plasma puede producirse al lado del cátodo por la explosión de un punto emisor microscópico, explosión provocada por un calentamiento intenso debido a una densidad de corriente localmente muy elevada (efecto Joule): la ruptura dieléctrica se produce en el vapor metálico generado por la destrucción del punto emisor.

El plasma también puede producirse al lado del ánodo bombardeado por un haz de electrones fuertemente energéticos (lo que se produce, por otra parte, por la emisión de rayos X). Este flujo localizado de energía provoca la desabsorción del gas absorbido en la superficie y la vaporización del metal del ánodo: por tanto, el gas generado es ionizado por los electrones del haz y se produce la ruptura dieléctrica.

■ Influencia de las partículas desprendidas

Hay un segundo factor susceptible de provocar rupturas dieléctricas en el vacío: se trata de las partículas que hay en las paredes de las cámaras de vacío y que se pueden desprender. Liberadas o por un choque o por el efecto de las fuerzas electrostáticas, estas partículas cargadas adquieren energía al atravesar el espacio entre electrodos. En el momento de impactar en los electrodos que las atraen pueden desencadenar la ruptura dieléctrica de dos formas eventualmente complementarias:

□ por aumento local de la densidad de gas, debido a la desabsorción de las moléculas de gas absorbidas,

□ por el disparo del fenómeno de emisión electrónica y la vaporización parcial de la partícula o del electrodo bajo el efecto del haz que los bombardea.

Una confirmación de la importancia práctica de las partículas es la comprobación experimental de que la rigidez dieléctrica del vacío en el espacio entre electrodos crece aproximadamente en proporción de la raíz cuadrada de la distancia que los separa. Esta relación puede explicarse por la hipótesis de que las partículas deben de alcanzar una energía suficiente (proporcional a V^2/d) para poder provocar una ruptura dieléctrica. Por esta misma razón, las partículas grandes, susceptibles de llevar una carga eléctrica más importante, son peores que las pequeñas.

Hay que recordar dos consecuencias de la influencia desfavorable que tienen las partículas desprendidas en la rigidez dieléctrica de las cámaras de vacío:

■ es difícil alcanzar valores elevados de rigidez dieléctrica, incluso con una separación importante entre electrodos (**figura 5**),

■ la rigidez dieléctrica de una cámara de vacío tiene un carácter aleatorio: la ruptura dieléctrica puede producirse con retraso respecto a la aplicación de la tensión y para una tensión inferior a la soportada antes de la perforación.

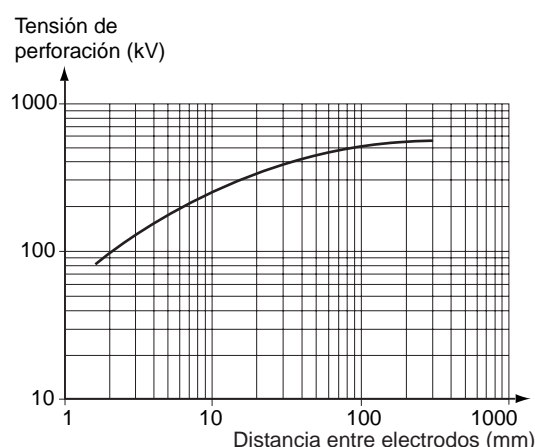


Fig. 5: Rigidez dieléctrica que puede alcanzarse entre electrodos en función de su distancia.

Síntesis

■ El vacío tiene propiedades dieléctricas interesantes a condición de limitar las tensiones aplicadas a unos 100 ó 200 kV, lo que corresponde a los valores de aislamiento necesarios para las tensiones asignadas ≤ 36 kV, para las que las distancias de algunos centímetros entre electrodos son suficientes. Por encima de estos valores, el alcanzar la rigidez dieléctrica adecuada resulta laborioso y es menos eficaz que con un aislamiento gaseoso con SF_6 .

■ La rigidez dieléctrica de todo dispositivo de corte en vacío evoluciona con el tiempo. En efecto, la maniobras mecánicas y los efectos del arco eléctrico modifican el estado de la superficie de los contactos y generan partículas: por tanto, los valores de rigidez obtenidos como resultado del acondicionamiento en tensión, no pueden considerarse como definitivamente conseguidos. Así pues, el vacío no es el medio aislante ideal cuando la fiabilidad de la rigidez dieléctrica es primordial, como por ejemplo, en los seccionadores.

2.2 El arco eléctrico en el vacío

Aunque, como se ha descrito en la sección precedente, el vacío es un excelente dieléctrico, un arco también puede «vivir» muy bien en el «vacío». De hecho, las tensiones de arco en el vacío son, con frecuencia, claramente inferiores a las de los arcos desarrollados en otros medios, lo que constituye una ventaja respecto a la energía disipada en el arco. El arco en vacío puede presentarse, simplificando intencionadamente, de dos formas principales: el modo difuso y el modo concentrado.

Un modo difuso, característico del medio «vacío»

El modo difuso es específico del arco en el vacío: presenta particularidades notables que lo diferencian claramente de los arcos en medios gaseosos. Es el modo que adopta naturalmente un arco en el vacío con un margen de corriente entre algunos amperios y algunos kiloamperios.

Las principales características del modo difuso son las siguientes:

- el cátodo emite hacia el espacio entre electrodos, a través de uno o varios puntos («spot») catódicos, un plasma, básicamente neutro, constituido por electrones y iones, con gran velocidad, dirigidos normalmente sobre todo a la superficie del cátodo,
- el ánodo, bañado por este plasma en toda su superficie, actúa como colector pasivo de cargas. Los puntos catódicos y el plasma son las características específicas del arco en modo difuso.
- el punto («spot») catódico

El punto catódico es una zona de dimensiones muy pequeñas (radio del orden de 5 a 10 μm), capaz de emitir una corriente que puede alcanzar un centenar de amperios.

En la zona del punto catódico se tienen unas condiciones extremas de temperatura y de campo eléctrico (típicamente de 5000 K y $5 \cdot 10^9$ V/m), que permiten la emisión electrónica por la combinación de los mecanismos de emisión –termoiónica y de campo–, capaz de producir densidades de corriente muy elevadas (del orden de 10^{11} a 10^{12} A/m²).

Por encima de los 100 A, este punto se subdivide coexistiendo varios puntos en el cátodo, en número suficiente para transportar la corriente a razón de un centenar de amperios cada uno de ellos. Se repelen mutuamente, lo que ha hecho calificar su movimiento de «retrógrado» porque está en contradicción con

la actuación normal de las fuerzas electromagnéticas. Así un arco en modo difuso tiende a ocupar toda la superficie disponible del cátodo (aunque en un momento dado los puntos de emisión no representen más que una pequeña parte del cátodo).

■ El plasma

A escala macroscópica, el punto catódico (cráter y plasma próximo asociado) aparece como el punto de producción de un plasma de baja densidad que sale del punto y llena el espacio entre electrodos. Este plasma, globalmente neutro (densidades iguales de cargas + y –), está constituido por electrones y iones, típicamente con carga doble (para un arco sobre electrodos a base de Cu). Una de las características de este plasma es la gran velocidad de los iones que presentan energías superiores a la tensión de arco (lo que pone de manifiesto que se producen fenómenos altamente energéticos en la zona del punto catódico). Estos iones que salen del punto con una distribución de velocidad aproximadamente en cos (ángulo/normal) no tienen pues dificultad en alcanzar el ánodo y crean una corriente iónica de sentido opuesto a la corriente electrónica principal que representa típicamente un 10% de la corriente del arco. La velocidad dirigida de estos iones es del orden de 10^4 m/s, superior a su velocidad de agitación térmica.

Una de las consecuencias importantes de la elevada velocidad de los iones creados por los puntos catódicos es su corto tiempo de tránsito en el espacio entre los electrodos (típicamente del orden de 1 μs). El plasma, creado en el punto catódico, al estar constituido por partículas extremadamente móviles (electrones y iones rápidos, prácticamente sin partículas neutras) desaparece pues muy rápidamente cuando el punto deja de funcionar (cero de corriente).

El ánodo, sumergido en el plasma que desprenden los puntos catódicos, se comporta como un electrodo pasivo que recoge las cargas y extrae la corriente impuesta por el circuito, ajustando su potencial: es negativo respecto al del plasma, mientras que la corriente es inferior a la que corresponde a los impactos debidos a la agitación térmica de los electrones.

La distribución de los potenciales en el arco es la siguiente:

- un salto o escalón catódico del orden de 20 V en la proximidad inmediata al cátodo,

□ una caída de tensión de algunos voltios en el plasma que aumenta con la distancia y la corriente (característica positiva que permite la coexistencia de varios arcos en paralelo, contrariamente a los arcos en el seno de un gas),

□ un salto o escalón anódico negativo en el caso antes considerado (circulación de una corriente moderada por el ánodo).

De este modo, la erosión del cátodo es pequeña: corresponde al flujo de iones que abandonan el cátodo, aproximadamente unos 40 $\mu\text{g}/\text{C}$. Una parte importante de estos iones se deposita en el ánodo, lo que, en corriente alterna, hace que la erosión nítida sea mucho menor: dividida aproximadamente por un factor de 10 para los contactores que trabajan de este modo con corrientes limitadas y electrodos con poca separación.

Un modo concentrado análogo al del arco en un medio gaseoso

Cuando la corriente aumenta, la situación descrita tiende a evolucionar ante todo en el lado del ánodo. Varios fenómenos contribuyen a esta evolución:

■ ante todo, una contracción de la columna de plasma, generalmente explicada por el efecto Hall (desviación de las cargas por el campo magnético azimutal creado por las otras líneas de corriente, lo que deduce la aparición de una componente radial que tiende a apretar las líneas de corriente alrededor del eje): la corriente se concentra en una región menor del ánodo,

■ por otra parte, puesto que el ánodo atrae cada vez más a los electrones, el plasma va dejando de ser neutro: faltan iones positivos para equilibrar la carga espacial de electrones

en las proximidades del ánodo. Esto produce la formación de un salto positivo de tensión anódica, necesario para atraer a los electrones a pesar de la carga espacial. La energía recibida por el ánodo aumenta y tiende a concentrarse en una zona reducida: el ánodo se calienta y comienza a emitir las partículas neutras que son ionizadas por los electrones incidentes. Aparece entonces alrededor del ánodo un plasma secundario formado de electrones secundarios y iones menos energéticos emitidos por los puntos catódicos.

Estos fenómenos acaban produciendo una mancha anódica luminosa, de dimensiones claramente más importantes (del orden de tamaño del cm^2) que la de los puntos de emisión catódicos, hecha de metal fundido, que vierte en el espacio entre electrodos cantidades de vapor que dependen de que se ionicen en el flujo procedente del cátodo.

Este efecto de contracción en el lado del ánodo acaba por afectar también la contracción del lado del cátodo, porque se crea un camino preferente gracias al plasma generado por el ánodo: aparece una mancha catódica correspondiente a la mancha anódica y el arco toma la forma característica concentrada de los arcos en un medio gaseoso. Se trata entonces de un arco en una atmósfera de vapores metálicos densos, cuyos mecanismos de funcionamiento se basan en la ionización de un medio gaseoso.

Por tanto, este arco en modo concentrado se caracteriza por ser un plasma formado de electrones (para la mayor parte secundarios), partículas neutras y de iones, cuya energía es próxima a la de las partículas neutras, y por tanto, relativamente lentos.

2.3 Fenómenos asociados al corte con corriente cero

Principios generales del corte

Todos los interruptores automáticos de MT aprovechan el paso natural por cero de la intensidad de corriente alterna (2 veces por período, o sea, cada 10 ms, para corriente de 50 Hz) para interrumpir la corriente.

■ La inevitable fase de arco

Cuando se establece una corriente de defecto en un circuito, la separación de los contactos del interruptor automático no tiene repercusión inmediata en la circulación de la corriente. En los últimos puntos de contacto, la densidad de corriente se vuelve muy elevada, lo que provoca una fusión local y la aparición de un puente metálico líquido. Los contactos continúan separándose, este puente caliente debido al paso de la intensidad, se vuelve inestable y su ruptura produce la aparición de un arco concentrado en los vapores metálicos que proceden de la explosión del puente líquido. La tensión de arco que aparece en el caso del vacío es baja debido a las fuerzas electromotrices de los generadores de las redes BT o AT: por tanto, la intensidad que circula por el circuito no resulta sensiblemente afectada ni limitada por esta tensión de arco.

Este arco adoptará el modo difuso o concentrado antes descritos, cambiando

eventualmente de un modo a otro, y manteniéndose hasta el cero de corriente.

■ La fase de restablecimiento después del cero de corriente

Si el plasma, que hasta este momento permitía el paso de corriente, aprovecha este reposo para disiparse muy rápidamente, la corriente puede conseguir no restablecerse en la próxima alternancia. Aparece entonces en los bornes del elemento, una TTR (tensión transitoria de restablecimiento), impuesta por el circuito, que lo hace pasar del estado conductor al estado aislante. Si el circuito hace aparecer en bornes del elemento una tensión transitoria de restablecimiento (TTR), éste pasa del estado conductor al de aislante. En caso de corto-circuito, las oscilaciones entre las capacidades locales y las inductancias de red provocan esta TTR, que tiene, en su fase inicial, aproximadamente, una forma en $(1 - \coseno)$, con una frecuencia natural, para las redes MT, del orden de algunas decenas de kHz y que alcanza un valor cresta superior a la tensión normal de la red, lo que corresponde a unas velocidades medias de aumento de algunos kV/ μ s. Si el medio, nuevamente aislante, soporta este esfuerzo dieléctrico que se le aplica, se consigue la interrupción de corriente (**figura 6**).

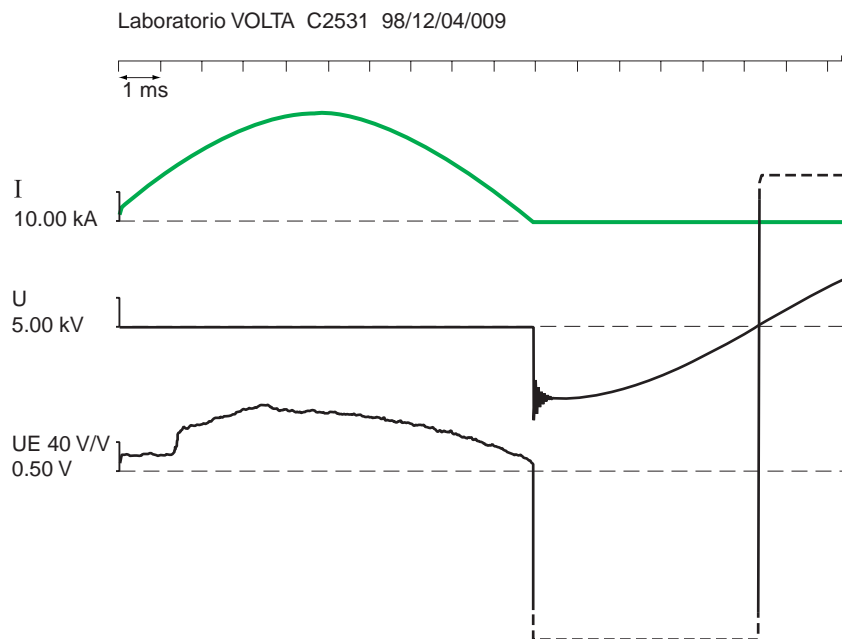


Fig. 6: Un corte satisfactorio de la intensidad de corriente (fuente: Merlin Gerin).

Caso del corte en el vacío

Para determinar las condiciones de éxito del corte de la corriente, es necesario estudiar los fenómenos que se producen en el plasma del arco en vacío cuando la corriente tiene un valor próximo a cero.

■ Corriente post-arco

Cuando se acerca el final de la semionda, la corriente decrece tanto más rápidamente cuanto mayor ha sido la corriente de cresta y la frecuencia de la red ($di/dt = \omega \cdot i$). El arco en el vacío vuelve a pasar al modo difuso y, cuando se está cerca del cero de corriente, sólo queda un único punto catódico. En cambio, el espacio entre los contactos todavía está lleno de un plasma residual, globalmente neutro, constituido por electrones, iones y partículas neutras, procedentes del arco anterior.

En el momento del cero de corriente, el último punto catódico se extingue debido a la desaparición de la tensión de arco. Por tanto, ya no hay una zona de emisión que cree partículas cargadas (electrones y iones) necesarios para la circulación de la corriente eléctrica.

A partir de este instante, comienza aparecer entre ambos contactos una tensión de polaridad opuesta a la tensión de arco precedente (TTR): el ex-ánodo se vuelve negativo respecto al ex-

cátodo y rechaza los electrones. La corriente que circula en el circuito ya no está constituida más que por la corriente iónica que el ex-ánodo extrae del plasma residual que se va enrareciendo: esta corriente, de polaridad opuesta a la del arco, se denomina corriente post-arco.

Entonces, el ex-ánodo ya no está en contacto con el plasma neutro, todavía presente en el espacio entre contactos: queda separado por una funda (en inglés «sheath») de la que están ausentes los electrones, puesto que son rechazados por la tensión negativa del ex-ánodo y donde ya no existen más que iones positivos que atraviesan la frontera del plasma neutro y son entonces acelerados hacia el ex-ánodo. Por tanto, la tensión que aparece entre ex-cátodo y ex-ánodo sólo se aplica al grosor de la funda que separa el plasma neutro del ex-ánodo. Además, la presencia de cargas de espacio positivas en esta funda refuerza el campo eléctrico en la superficie del ex-ánodo que es más elevado que el campo medio correspondiente al valor de la TTR dividida por el grosor de la funda (**figura 7**).

El espesor de la funda que rodea el ex-ánodo es directamente proporcional a la tensión aplicada entre el plasma neutro y el electrodo e inversamente proporcional a la densidad de iones positivos: aumenta, pues, en función de la

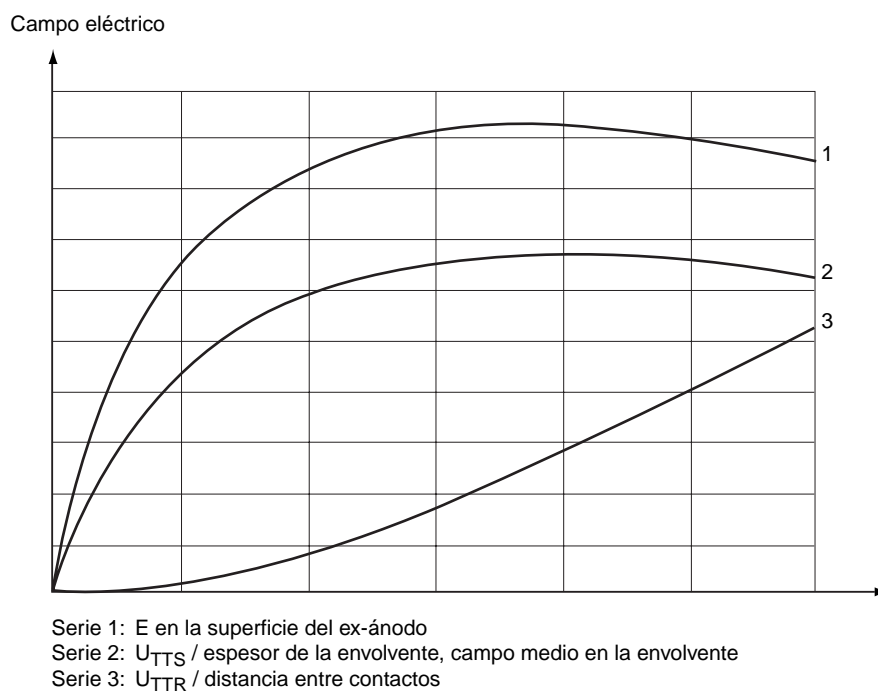


Fig. 7: Campo eléctrico en la superficie del ex-ánodo y campo medio correspondiente entre electrodos.

evolución de la TTR y más aún cuando el plasma se enrarece. Cuando el límite de la funda alcanza el ex-cátodo, el plasma residual ha desaparecido, puesto que el conjunto de sus cargas han sido utilizadas por la corriente post-arco que ha pasado a ser nula.

Estos fenómenos se desarrollan en un plazo de tiempo muy reducido: la duración total de la corriente post-arco es típicamente de 1 a 10 μs (figura 8).

■ Causas del no-corte

Para que la corriente pueda mantenerse, es necesario que los mecanismos de creación de cargas eléctricas tomen el relevo de los puntos catódicos apagados del ex-cátodo.

Un primer mecanismo posible es la ionización del vapor metálico neutro presente en el espacio entre contactos. Esta ionización será tanto más fácil cuanto mayor sea la densidad de partículas neutras. Si la densidad de vapor es muy importante (zonas muy calientes en los contactos producen vapores metálicos en abundancia), la corriente no llega a interrumpirse del todo: no se produce un aumento de la TTR, lo que se denomina un «no-corte térmico». Si la densidad de partículas neutras es suficientemente alta como para que la rigidez dieléctrica del vacío sea baja (cerca del mínimo de la curva de PASCHEN), la corriente podrá ser interrumpida, pero el espacio entre contactos no puede

soportar la TTR aplicada y se produce una ruptura dieléctrica durante la subida de la TTR, lo que se denomina «no-corte dieléctrico».

Un segundo mecanismo posible es la aparición de puntos catódicos en el ex-ánodo. Para esto, deben de producirse localmente condiciones favorables de emisión en la superficie del ex-ánodo:

□ emisión termoiónica, si quedan puntos muy calientes, que es cuando el ánodo contiene un metal refractario (W),

□ emisión de campo o emisión combinada, si el campo eléctrico aplicado a la superficie es importante en ciertas zonas con un factor de intensificación β elevado.

Ahora bien, se ha visto antes que el campo eléctrico aplicado a la superficie del ex-ánodo aparece con valores elevados desde el principio de la aplicación de la TTR, pues el espesor de la funda es pequeño y tanto menor cuanto mayor es la densidad de iones. Por otra parte, el ex-ánodo es bombardeado por los iones acelerados en la funda por la TTR, lo que provoca calentamientos localizados. La probabilidad de aparición de puntos catódicos en el ex-ánodo es pues tanto mayor cuanto mayor es la densidad de iones en el plasma residual, lo que va a la par con una densidad importante de partículas neutras que frenan, por colisión, los iones rápidos emitidos por los

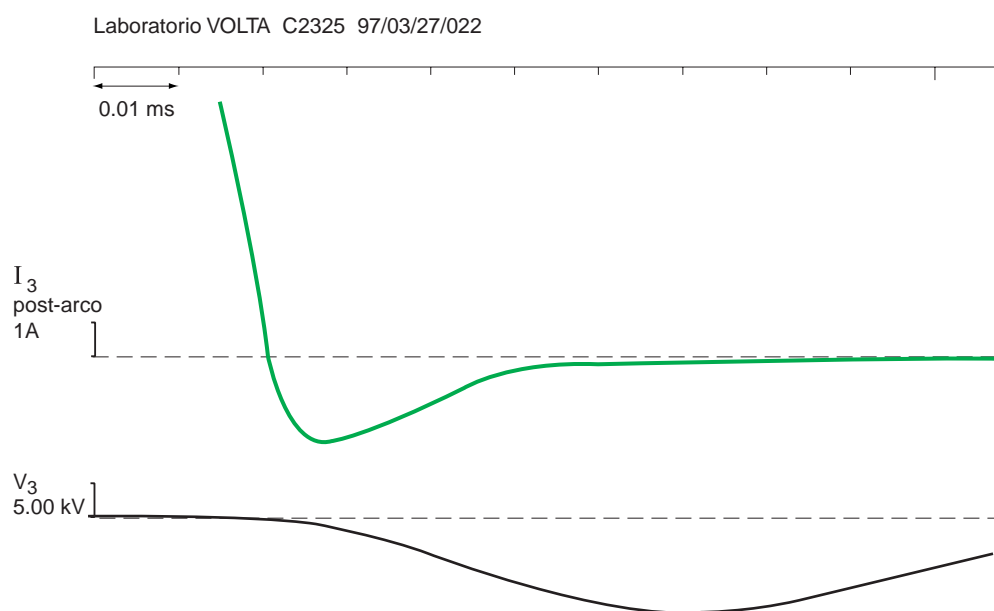


Fig. 8: Intensidad de corriente post-arco de una duración especialmente larga, alrededor de 40 μs , prueba del límite del poder de corte de una cámara.

puntos catódicos, los calientan (energía media cercana de la temperatura del plasma) y ralentizan su difusión en el momento del cero de corriente.

Si la densidad de plasma es suficientemente baja en el momento del cero de corriente, probablemente se darán las condiciones necesarias para conseguir el corte del arco: la corriente es interrumpida y el espacio entre electrodos soporta la tensión de restablecimiento hasta su valor de cresta.

Sin embargo, en el caso de los interruptores automáticos de vacío, una vez superada esta etapa el éxito del corte no está completamente asegurado. En efecto, durante algunos milisegundos después del corte, la situación dentro de la cámara va evolucionando y pueden producirse rupturas dieléctricas:

- las partículas generadas en la fase de arco pueden desprenderse de las paredes debido a vibraciones y/o a las fuerzas electrostáticas,
- las zonas en fusión de los contactos pueden emitir gotitas bajo el efecto de fuerzas electrostáticas,

□ la solidificación del metal líquido puede modificar la superficie del contacto o liberar gases disueltos.

Incluso cuando se prueba una cámara de vacío hasta el límite de su poder de corte, después de haber conseguido un corte aparentemente exitoso, no es raro observar fallos dieléctricos tardíos (**figura 9**), que pueden ser:

□ transitorios (duración del algunos μs) si la cámara es capaz de cortar la corriente de AF que sigue a la descarga. Si estas rupturas dieléctricas transitorias se producen más de una vez por cuarto de período de la frecuencia industrial después del cero de corriente, se consideran como de descargas disruptivas no mantenidas (NSDD = non-sustained disruptive) y se interpretan como un signo de debilidad del aparato (por esta razón el número máximo de NSDD tolerado es de tres para una serie completa de ensayos de corte de un interruptor automático, según la CEI 60056),

□ completos y, en este caso, hay reaparición de corriente de potencia después de un período más o menos largo (del orden de 0,1 a 1 ms) de interrupción.

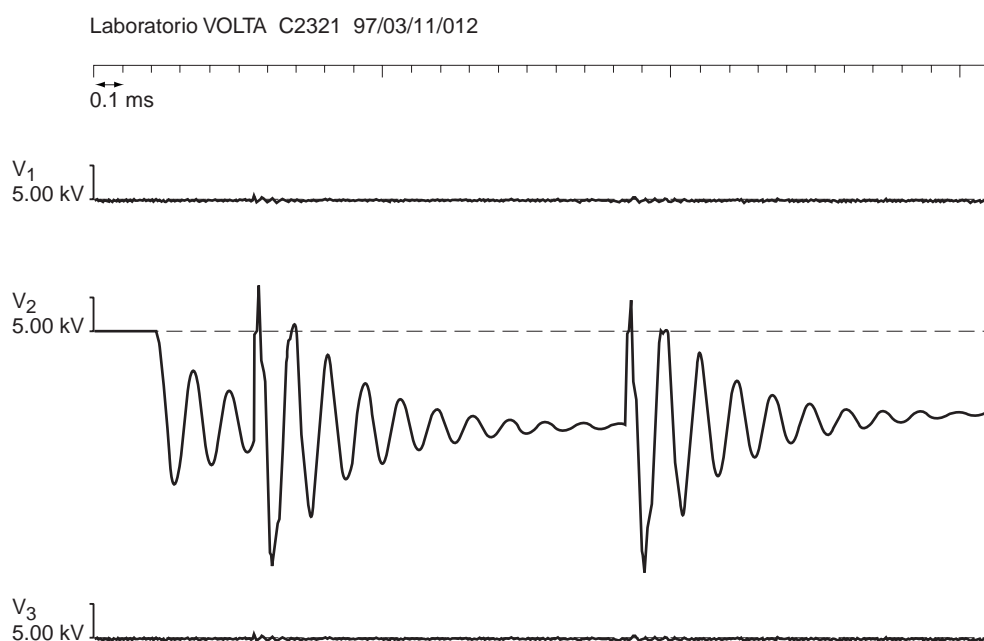


Fig. 9: Ejemplo de fallos dieléctricos tardíos.

2.4 Diseño práctico de las cámaras de los interruptores de vacío

Elección de la técnica de corte

La sección precedente ha aclarado las condiciones que deben de cumplirse para conseguir el corte. En la práctica, estas condiciones siempre se dan cuando el arco queda en modo difuso, que es cuando las corrientes a cortar no sobrepasan algunos kA. Este es el caso de los interruptores y contactores que pueden por tanto utilizar contactos frontales muy simples.

Cuando el arco pasa a modo concentrado, la energía se disipa en una superficie de electrodo reducida, lo que provoca un calentamiento localizado y una vaporización considerable. Si el arco se queda inmóvil, el corte no es seguro.

Se emplean dos métodos para superar las dificultades producidas por el paso del arco al modo concentrado.

□ El primero consiste en provocar un movimiento rápido circular del arco concentrado para que la energía sea repartida sobre una gran parte del contacto y por tanto que el calentamiento de cada punto sea menor: esto se consigue aplicando un campo magnético radial en la zona de arco.

□ El segundo consiste en impedir el paso al modo concentrado aplicando un campo magnético axial: cuando el campo alcanza un

valor suficiente, el arco se estabiliza en un modo calificado de «columna difusa» y no se concentra; y, puesto que el arco inmovilizado utiliza la mayor parte de la superficie de los contactos, el calentamiento resulta por tanto, también en este caso, limitado.

■ Técnica con campo radial \vec{B}_r

El arco concentrado puede asimilarse a un conductor atravesado por una corriente cuya dirección es paralela al eje de los contactos. Si se aplica un campo magnético radial a este conductor, la fuerza electromagnética resultante tendrá una dirección azimutal y provocará la rotación del arco alrededor del eje de los contactos.

El campo \vec{B}_r es provocado por el recorrido que se obliga a seguir a la corriente en los contactos. Para obtener este resultado, se utilizan dos tipos de estructura de contacto (figura 10):

- contactos de tipo espiral,
- contactos de tipo copa (o «contrate»)

El funcionamiento correcto de las cámaras con campo radial depende de un compromiso en la geometría de los contactos y en particular de la anchura de las ranuras para los contactos de tipo espiral:

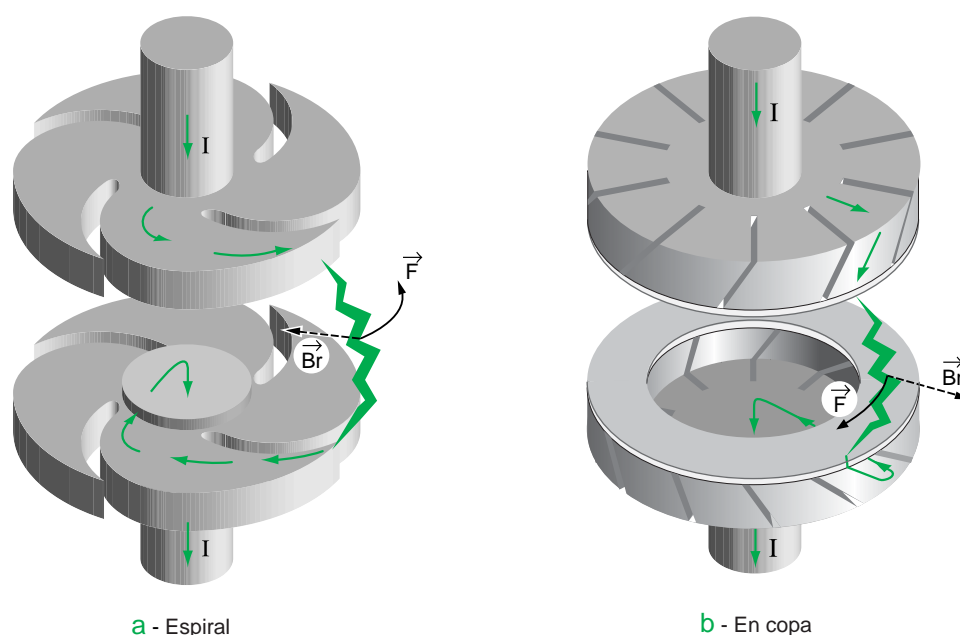


Fig. 10: Estructuras de contactos utilizados para crear el campo radial (espiral y copa «contrate»).

□ si la anchura es excesiva, se tiene el efecto negativo de que el arco tiende a «saltar» de una porción de contacto a otra, lo que puede hacer que se quede quieto en el extremo de una sección calentándola excesivamente (puesto que el arco está en modo concentrado),

□ si la anchura es insuficiente, la hendidura puede rellenarse con el material fundido del contacto y el recorrido de la corriente, así modificado, produce la desaparición del campo radial y por tanto la inmovilización del arco.

Aunque móvil, el arco giratorio se mantiene concentrado y haciendo por tanto una acción energética en la porción de electrodo que lo soporta; las grandes presiones que aparecen en las raíces del arco provocan la emisión de material de contacto fundido en forma de gotitas. Este proceso es un medio eficaz de limitar el calentamiento del resto del electrodo (o de facilitar su enfriamiento), porque la energía que aporta el arco se evacúa, con los materiales desprendidos, condensándose en las paredes próximas; por desgracia, provoca también una erosión relativamente importante de los contactos.

■ Técnica de campo axial \vec{B}_a

Cuando un plasma de arco se somete a un campo magnético axial suficientemente importante, los electrones son obligados a seguir trayectorias paralelas a las líneas de campo, que son como las hélices de eje paralelo al de los contactos, porque \vec{B}_a se combina con el campo azimutal generado por la propia corriente.

Los iones positivos del plasma, mucho más pesados, no son controlados de modo tan eficaz por el campo, sino que son retenidos por el esfuerzo electrostático desarrollado por la carga de espacio negativa de los electrones cogidos en la trampa por el campo axial: éstas son las fuerzas electrostáticas que hacen que el plasma tienda a quedar globalmente neutro. En consecuencia, el confinamiento de los electrones se convierte en un confinamiento del conjunto del plasma en una columna que corresponde al tubo de campo interceptado por el cátodo: si este tubo es paralelo al eje de los electrodos, la mayor parte del plasma producido por el cátodo llega al ánodo. En estas condiciones, el arco conserva esencialmente las características del modo difuso, aunque con un valor de densidad de corriente claramente superior:

□ la tensión de arco se mantiene moderada porque el plasma se conserva neutro hasta cerca del ánodo (no se da el fenómeno de «falta» de iones),

□ la tendencia del arco a concentrarse en las proximidades del ánodo por efecto Hall se contrarresta por el campo axial que fuerza a los electrones a mantener una trayectoria esencialmente paralela al eje;

□ si la superficie de los electrodos, en particular del ánodo, donde se apoya la columna de arco es suficiente para la corriente, la densidad de energía, y por tanto el calentamiento, quedan limitados. La vaporización del material del contacto es bastante reducida, quedando así sin modificar la naturaleza del plasma por la ionización de las partículas neutras.

Para que el arco quede en este modo de columna difusa, adecuada para el corte, se han de dar dos condiciones principales :

□ \vec{B}_a debe de ser suficientemente elevado. El valor de campo axial crítico necesario para impedir la formación de una mancha anódica viene dado por la fórmula experimental:

$$B_{a \text{ crítico}} = 3,9 (I_p - 10)$$

donde, B_a en mT, siendo I_p el valor de la corriente de cresta en kA),

□ la superficie del electrodo debe ser suficiente para un valor de corriente dado: la densidad de corriente que no hay que sobrepasar es del orden de 17 A/mm^2 (fórmula de RENTZ). De hecho, este límite en densidad de corriente sólo es válido en una primera aproximación y el poder de corte de las cámaras con campo axial no evoluciona en proporción directa de la superficie de los contactos. En efecto, hay que tener en cuenta, por una parte, que el arco concentrado inicial produce la separación de los contactos y, por otra, el tiempo necesario para que el arco ocupe la totalidad de la superficie disponible de los electrodos: el poder de corte en función del diámetro de los contactos sigue aproximadamente una variación de $d^{1,4}$.

El arco en una cámara con campo axial es mucho menos móvil que en una cámara con campo radial. Incluso si la densidad de corriente es suficientemente elevada para provocar la fusión del material del ánodo, las proyecciones son limitadas. Por tanto, la erosión de los contactos resulta menor que en un cámara con campo radial; en cambio, el material fundido se queda en su sitio y retrasa el enfriamiento de la superficie del electrodo. Por esto, aunque en principio la utilización de la superficie disponible del contacto parezca más eficaz con un campo axial que con un campo radial, esto no siempre se cumple; especialmente con grandes corrientes y tensiones bajas, es posible alcanzar, con un campo radial, y para una superficie dada, poderes de corte superiores, aunque, eso sí, con una mayor erosión.

Pueden utilizarse diversas soluciones para obtener el campo axial entre los contactos, utilizando la propia corriente que hay que cortar:

- espiras integradas detrás de los contactos (**figura 11**),
- circuito magnético que canaliza el campo azimuthal creado por las citadas corrientes y que lo convierte en un campo axial en la zona entre contactos,
- espira, exterior a la cámara, que envuelve la zona entre contactos (**figura 12**).

De un modo general, el camino impuesto a la corriente, para crear un campo axial suficiente en el espacio entre contactos, es más largo que el necesario para crear un campo radial local. Para un volumen dado, la resistencia de los contactos es pues menor con la técnica de campo radial, lo que es una ventaja para los interruptores automáticos de grandes calibres.

Por el contrario, las formas necesarias para los contactos con campo radial son más retorcidas que las de los contactos con campo axial y por tanto menos favorables en el plano dieléctrico: el campo axial será mejor para las tensiones más elevadas.

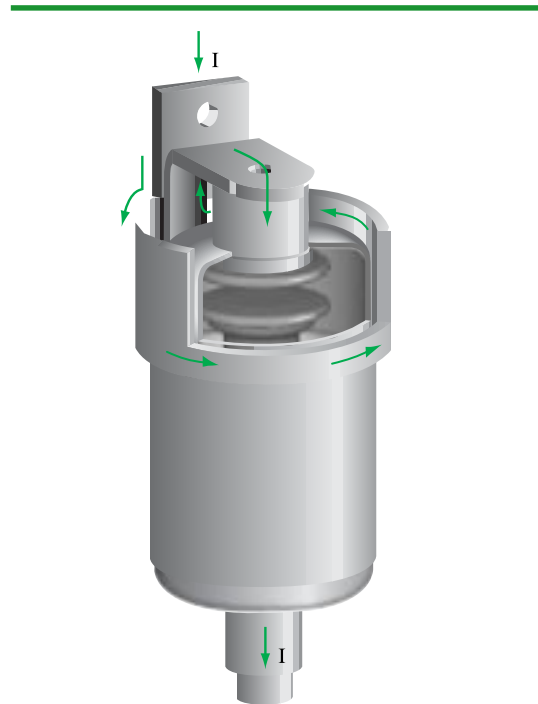


Fig. 12: Cámara con campo magnético axial con espira exterior.

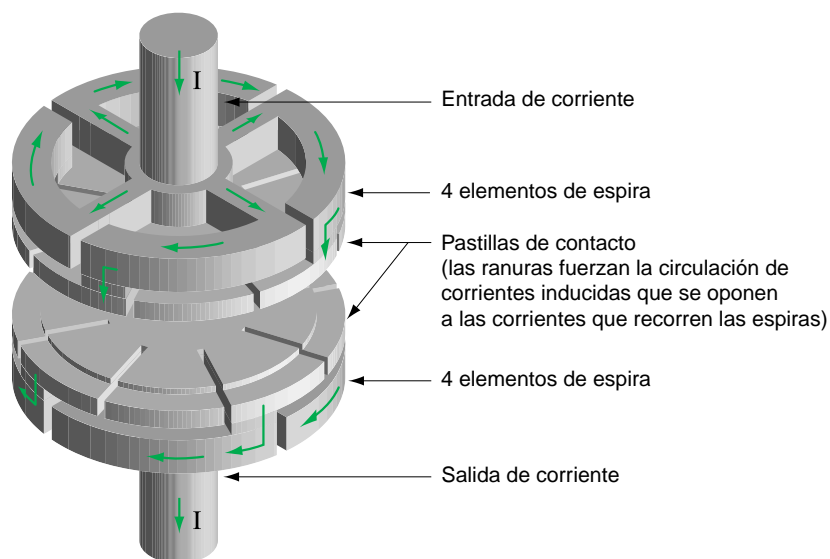


Fig. 11: Ejemplo de contacto con campo magnético axial.

El diseñador escoge pues una u otra técnica en función de sus ventajas respectivas según la aplicación prevista (figura 13).

Elección de la arquitectura

■ Constitución de una cámara de vacío

Una cámara de vacío sólo tiene unos pocos componentes (figura 14).

En esta figura se pueden ver:

□ dos conjuntos de contactos eléctricos del tipo «contactos frontales» (porque, en el vacío, los contactos deslizantes se soldarían); el uno, fijo; el otro, móvil. Cada unidad tiene un electrodo cilíndrico que transporta la corriente hasta el contacto propiamente dicho,

□ una envoltura estanca con un aislador que asegura el aislamiento eléctrico entre los contactos fijo y móvil,

□ una pantalla de protección, en la cara interna del aislador, contra la condensación de los vapores metálicos generados por el arco,

□ un fuelle metálico para permitir el desplazamiento del contacto móvil manteniendo la estanqueidad de la envoltura.

Se trata de constituyentes básicos presentes en toda cámara. Además, en las cámaras para interruptores automáticos, están los dispositivos generadores del campo magnético (radial o axial) necesarios para el corte del arco de potencia.

Las posibles variantes se dan sobre todo para la pantalla y los dispositivos de creación del campo magnético.

■ Configuraciones de pantalla

La elección principal en cuanto a la pantalla se refiere a:

□ su modo de fijación, que determina su potencial: el potencial es fijo (el del electrodo fijo) si la pantalla está unida a esta extremidad

Aptitud para:	Técnica con campo radial	Técnica con campo axial
Intensidad permanente elevada	xxx	x
Tensión asignada elevada	x	xxx
Endurancia eléctrica	x	xxx
Poder de corte	xx	xx

xxx = muy bueno; xx = bueno; x = medio

Fig. 13: Tabla comparativa de las dos técnicas de corte.

de la cámara; es flotante si la pantalla se fija en un punto intermedio del aislador sin conexión eléctrica con uno u otro de los contactos,

□ su posición, que puede ser interna o externa a la envoltura; en este último caso, la pantalla forma parte de la envoltura y debe ser estanca.

Las combinaciones de estas diversas opciones llevan a cuatro configuraciones posibles, todas ellas utilizadas según las características que se pretendan.

Por regla general:

□ cuando se pretende un bajo coste, se escoge una pantalla a potencial fijo; en cambio, cuando se prevén prestaciones elevadas, se escoge una pantalla a potencial flotante,

□ se escoge una pantalla externa, para tener un diámetro menor y una pantalla interna para la sencillez de fabricación.

■ Dispositivos generadores de campo radial o de campo axial

Los dispositivos que producen el campo radial necesario para la rotación del arco deben estar lo más cerca posible de él: por tanto, quedan totalmente integrados en la estructura misma de los contactos, en el interior de la cámara. Las dos geometrías más frecuentes se han descrito en el capítulo anterior: se trata de los contactos «espirales» y de los contactos de tipo «copa» o

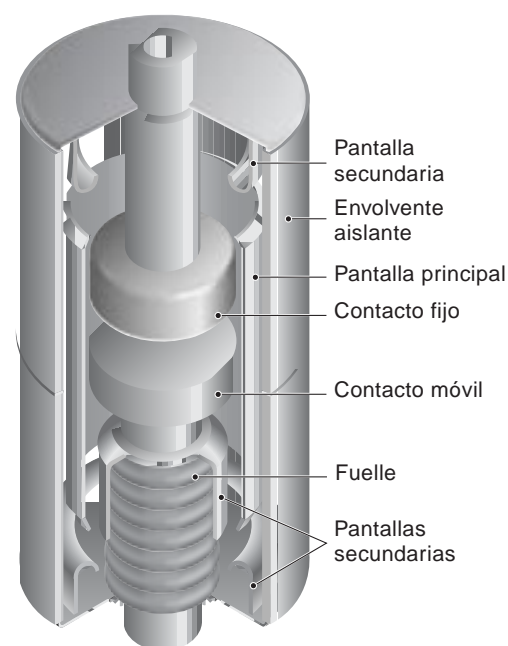


Fig. 14: Constitución de una cámara de corte en vacío.

«contrate». La elección de una u otra solución no modifica la arquitectura del conjunto de la cámara. Por el contrario, para las cámaras con campo axial hay dos arquitecturas posibles. En efecto, el dispositivo que produce el campo axial (que la mayor parte de las veces son elementos de espira circular con el eje paralelo al de la cámara) puede alojarse en la estructura de los contactos internos, como para las cámaras de campo radial, o en el exterior de la cámara. En este último caso, se trata de una espira que rodea la zona de separación de los contactos. La espira está en serie con el contacto fijo y es atravesada por la corriente del circuito. La **figura 15** representa un montaje con esta configuración: nótese que, para reducir la potencia disipada en el dispositivo, la espira está constituida por tres elementos en paralelo. Uno de los inconvenientes de esta estructura es la longitud del recorrido impuesto a la corriente para crear un campo axial suficiente en el interior de un volumen considerable. Esto supone, por tanto, pérdidas más importantes que no se traducen sin embargo forzosamente en los calentamientos superiores, puesto que las espiras en el aire están mejor enfriadas (por convección) que estando integradas en los contactos de las cámaras.

Por otra parte, la presencia de una espira al potencial del contacto fijo, alrededor de los contactos, fuerza en la práctica la elección de una pantalla a potencial fijo para este tipo de cámara.

Se podría pensar que la presencia de una espira exterior tiene inconvenientes en cuanto a las dimensiones de la cámara, que aumenta su diámetro exterior. De hecho, la posibilidad de utilizar la totalidad de la superficie de los contactos sometidos a un campo axial relativamente uniforme creado por la espira exterior (que no es el caso para los contactos con espiras integradas) compensa esta desventaja y sus considerables molestias.

La principal ventaja de la arquitectura con campo axial con espira exterior es la posibilidad de realizar una cámara compacta, sencilla y por tanto económica. Los inconvenientes por calentamiento y dieléctricos (debido al diseño con pantalla fija) hacen preferible la estructura con dispositivos integrados en los contactos (campo axial o campo radial) para valores de tensión elevada (hasta 24 kV) o de intensidades nominales elevadas (hasta 3150 A).

Elección de los materiales y tecnologías de fabricación

Para las cámaras de vacío de interruptores, la elección de los materiales y de las tecnologías de fabricación se guía por la necesidad de:

□ garantizar la conservación del alto vacío ($<10^{-3}$ mbar) necesario para el funcionamiento de la cámara durante su vida útil (unos 30 años),

□ asegurar la fiabilidad de las prestaciones asignadas y en especial del poder de corte.

■ Elección en función de las exigencias de calidad del vacío

Todo recinto con vacío queda sometido a una degradación de su valor de vacío debido a fenómenos de desgasificación que aparecen cuando la presión alcanza valores suficientemente bajos. La desgasificación es, ante todo, un fenómeno de superficie que corresponde al desprendimiento de las moléculas de gas absorbidas en las paredes. Este gas es fácil y rápidamente eliminado por el calentamiento relativamente moderado (del orden de 200°C) de las paredes del recinto durante la aspiración. A continuación aparece una desgasificación volumétrica que corresponde a la difusión, hacia la superficie de las sustancias metálicas, de los gases en ellas disueltos, como el hidrógeno.

Para evitar que la desgasificación, proveniente esencialmente de las piezas macizas, degrade progresivamente valor del vacío de una cámara, es importante:

□ utilizar sustancias que tengan la menor cantidad posible de gas (por ejemplo cobre Cu-OFE, exento de oxígeno),

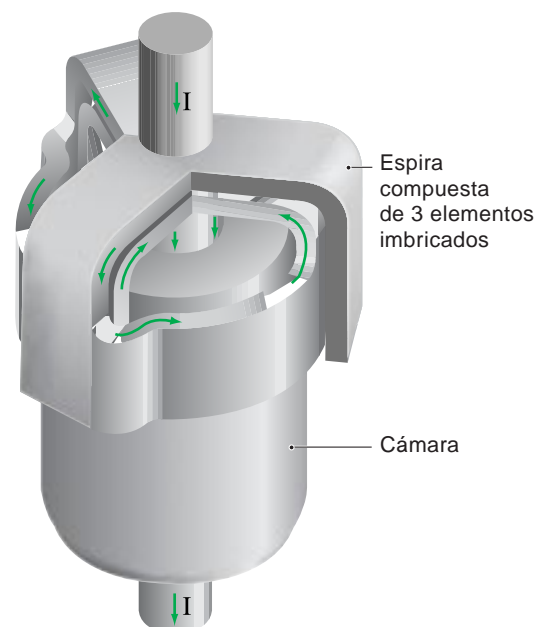


Fig. 15: Ejemplo de una espira, alrededor de la zona de separación de los contactos, constituida por tres elementos en paralelo.

□ proceder a una desgasificación forzada de estos materiales efectuando una aspiración, de duración larga, de la ampolla a temperatura suficientemente elevada (típicamente, una decena de horas a una temperatura del orden de 500°C),

Los gases debidos a los metales (bajo forma de compuestos químicos) no son susceptibles de desgasificación; en cambio, pueden ser liberados por efecto del arco. Es pues necesario que las sustancias utilizadas para los contactos de arco se elaboren en vacío, para tener la menor desgasificación ulterior posible.

La estanqueidad de la envoltura de la cámara debe de ser perfecta, lo que implica ausencia de fugas y de permeabilidad en condiciones de servicio. Por estos motivos, las envolturas se fabrican con sustancias metálicas y cerámicas: los aisladores con cerámica de aluminio han sustituido al vidrio porque pueden soportar temperaturas más elevadas y permitir una mejor desgasificación.

Las uniones entre las piezas metálicas de la envoltura se realizan mediante soldadura o soldadura fuerte. Las uniones cerámica-metal también se hacen con soldadura fuerte, sea soldadura con reactivo, permitiendo la unión directa sobre cerámica, sea con soldadura fuerte tradicional, con una metalización (Mo-Mn + Ni) previa de la cerámica.

Las operaciones finales de soldadura fuerte se realizan en un horno, en vacío, para asegurar la desgasificación de las sustancias. Cada vez es más frecuente que el sellado de la cámara se realice también durante la operación de soldadura fuerte en vacío, lo que permite eliminar la operación de aspiración.

Teniendo en cuenta el grado de estanqueidad necesario para permitir el movimiento del contacto móvil, la única solución que se utiliza es el fuelle metálico. Generalmente se fabrica en acero inoxidable austenítico de poco grosor (típicamente 0,1 a 0,2 mm). Su diseño y el de las uniones por soldadura fuerte con el resto de la envoltura deben de ser esmeradamente estudiadas para asegurar una resistencia mecánica elevada a pesar del efecto desfavorable de los ciclos térmicos impuestos por las operaciones de soldadura fuerte.

Por último, hay que citar otros materiales utilizados en pequeña cantidad, pero que juegan un papel importante en la obtención de un alto vacío y de su conservación en el tiempo. Se trata de los «getters» (*) a base de metales (bario, circonio, titanio, etc.) muy activos químicamente con la mayor parte de gases

susceptibles de encontrarse en los recintos de vacío. Los «getter» (*) se activan, con alto vacío, por calentamiento a una temperatura suficiente para provocar la difusión de la capa superficial «pasivada» en la masa y la generación de una superficie metálica activa capaz de absorber las moléculas de gas presentes en la ampolla. Esta operación de activación se realiza durante la aspiración o después del precintado de la cámara por soldadura fuerte en vacío: el que pueda desarrollarse este último proceso, más industrial que la aspiración, asegurando una cualidad de vacío satisfactoria, es una propiedad especial de los materiales getters.

■ Elección de las sustancias del contacto

Un buen material del contacto, para una cámara de vacío, debe de responder a cierto número de exigencias:

□ ser buen conductor de la electricidad, que proporcione una baja resistencia de contacto,

□ tener una buena resistencia mecánica a los choques repetidos que sufren los contactos al cerrar,

□ no formar soldaduras sólidas al cerrar en carga o en cortocircuito, para que el mecanismo de apertura pueda separar los contactos y que la rotura de la zona soldada no produzca excesivos daños a su superficie,

□ producir pocos vapores metálicos durante la fase de arco para permitir una regeneración dieléctrica rápida del espacio entre contactos después del corte, lo que implica:

– una presión de vapor poco elevada,

– una producción reducida de gotitas durante la fase de fusión del material,

□ tener buenas características dieléctricas durante la fase de aplicación de la TTR, lo que implica:

– superficie suficientemente lisa, sin asperezas notables (β poco elevada),

– no existencia de puntos sobrecalentados que emitan por efecto termiónico (caso de los materiales refractarios con conductividad térmica reducida),

– sin propensión a formar partículas que se desprendan fácilmente.

(N. del T.) Getter. 1) Sustancia, normalmente un metal como el titanio, evaporado sobre las paredes de un tubo de vacío, vaso, etc. para absorber el gas residual y bajar la presión. 2) Quitar (un gas) por la acción de un getter. (The Collins English Dictionary, 1998).

□ permitir la existencia de puntos catódicos estables incluso con valores muy bajos de corriente a fin de minimizar los valores finales de la corriente arrancada y las sobretensiones asociadas a este fenómeno, lo que requiere una presión de vapor suficientemente elevada.

Hay que destacar que todas estas numerosas cualidades requeridas resultan a veces opuestas entre sí. Por tanto, hay que llegar a un equilibrio aceptable según las aplicaciones a las que se destina, privilegiando las cualidades más importantes, que son:

□ para los interruptores automáticos, el restablecimiento dieléctrico después del corte del arco con corriente elevada (buen poder de corte),

□ para los contactores, baja erosión y una corriente final arrancada mínima (resistencia eléctrica y reducción de las sobretensiones),

□ para los interruptores, la resistencia a la soldadura y rigidez dieléctrica con tensiones elevadas (ausencia de recebado o rupturas dieléctricas).

Actualmente, el mejor compromiso se consigue con los materiales compuestos, siendo las tres familias de materiales siguientes las más utilizadas:

□ CuCr, para la utilización en interruptores automáticos,

□ AgWC, para la utilización en contactores,

□ WCu, para la utilización en interruptores, especialmente los destinados a la carga de condensadores de alta tensión.

De los compuestos CuCr se dice que son los mejores para su utilización en interruptores automáticos y no parece que puedan ser

destronados a corto plazo, aunque nunca puede excluirse una evolución.

Las proporciones que se utilizan pueden variar entre el 80 y 50% para el Cu, y el resto para el Cr.

Una proporción elevada de Cu favorece la conductividad eléctrica (baja resistencia de contacto) y térmico (buena evacuación de la energía del arco).

Una proporción elevada de Cr es favorable para la resistencia a la soldadura y para la rigidez dieléctrica.

El contenido en gas del material de los contactos debe de ser el menor posible, porque durante la fusión o vaporización, este gas se libera en el espacio entre contactos y perjudica el corte. En cuanto a mantener el vacío, el efecto a largo plazo es menos perjudicial de lo que podría pensarse a priori, porque el Cr condensado en las paredes de la cámara juega un papel de «getter» y reabsorbe este gas.

Hay que indicar, por último, que el arco modifica la capa superficial del material y mejora sus cualidades:

□ eliminando el gas e incluso los óxidos de superficie,

□ produciendo una granulometría muy fina (precipitación del Cr fundido en la matriz de cobre),

□ homogeneizando el material.

A veces, este efecto se califica de «acondicionamiento en corriente» (por analogía con el acondicionamiento en tensión): en general, el comportamiento de los contactos y el resultado en cuanto al corte mejoran después de algunas maniobras de corte.

3 Corte en vacío y sobretensiones al abrir circuitos inductivos

Los aparatos de corte en vacío (contactores, interruptores automáticos, interruptores) pueden generar sobretensiones al abrir circuitos inductivos (transformadores en vacío, motores en vacío o durante su arranque). Debido a las especiales propiedades del vacío, estas sobretensiones pueden ser de distinta naturaleza que las producidas, en las mismas

circunstancias, por la aparamenta de corte que utiliza otros medios (aire, SF₆, aceite...). En general estas sobretensiones no suponen un problema y no necesitan de disposiciones particulares. Sin embargo, en el caso de receptores sensibles (motores, por ejemplo) se recomienda prever dispositivos limitadores de sobretensiones.

3.1 Los fenómenos generadores de sobretensiones

Sobretensión asociada a un corte ideal

Incluso en el caso teórico de un corte perfecto mediante un interruptor automático ideal, la producción de un cierto valor de sobretensiones es inherente a la interrupción de la corriente de un circuito inductivo. En efecto, los valores de tensión en bornes de los diversos elementos del circuito deben de alcanzar un estado nuevo de equilibrio correspondiente al estado abierto. La transición desde el estado anterior, cerrado, produce, en el instante del corte (cero de corriente), oscilaciones alrededor de un nuevo equilibrio y provoca la aparición de sobretensiones respecto a la tensión máxima normal de la red (figura 16).

En el caso de un corte trifásico, el hecho de que el corte no sea simultáneo en las tres fases, introduce además un régimen transitorio generador de sobretensiones. A título de ejemplo, en caso de corte de una corriente de cortocircuito en una red con neutro no puesto directamente a la tierra, la tensión de restablecimiento en bornes del primer polo que corta alcanza alrededor de 2,1 a 2,2 p.u. (TTR normalizado CEI) y 2,5 p.u. para el corte de una batería de condensadores con neutro aislado.

«Arranque» de la corriente

El fenómeno más conocido y el más extendido, porque se refiere a todas las técnicas de corte, es el del «arranque» de la corriente: interrupción prematura de la corriente alterna antes de su paso natural por cero. Este fenómeno afecta sobre todo a los interruptores automáticos (que están dimensionados para interrumpir las corrientes de cortocircuito) cuando cortan bajas corrientes.

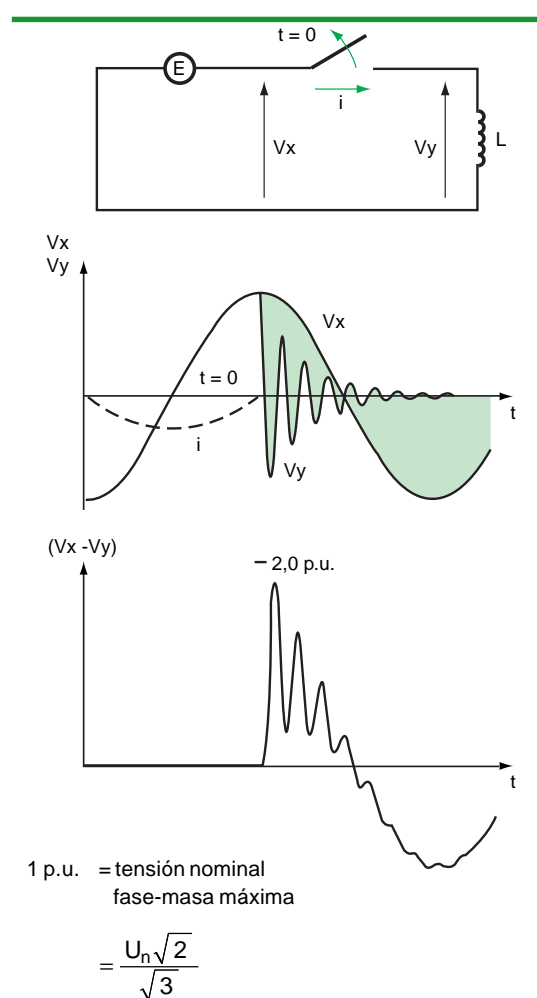


Fig. 16: Sobretensiones respecto a la tensión máxima normal de la red durante el corte de un circuito inductivo.

Si I_a es el valor de la corriente arrancada, corriente que circula por la carga con inductancia L inmediatamente antes de la interrupción, la energía electromagnética almacenada en la carga se transfiere en forma de energía electrostática a la capacidad C situada en bornes de la carga

$$\frac{1}{2} L I_a^2 = \frac{1}{2} C V^2.$$

Aparece un aumento de tensión, lado carga, que acentúa el desequilibrio respecto a la situación de equilibrio con «circuito abierto» y amplifica las sobretensiones asociadas al corte (**figura 17**).

Estas sobretensiones son, por tanto, proporcionales al valor de la corriente arrancada

y a la impedancia característica $\sqrt{\frac{L}{C}}$ de la

carga.

En el caso de corte en vacío, el arranque de la corriente corresponde a la extinción prematura del último punto catódico por su inestabilidad con bajas corrientes: esta característica depende principalmente de la naturaleza del material de los contactos. En el cuadro de la **figura 18** se indican los valores medios de corriente arrancada para algunos materiales de uso frecuente.

En la práctica, los valores de corriente arrancada de algunos amperios, característicos de la sustancia CuCr, no tienen ningún problema. En cambio, los valores obtenidos con

el cobre puro son excesivos y explican, con otras consideraciones, que este metal no pueda utilizarse tal cual.

Precebados y reencendidos múltiples

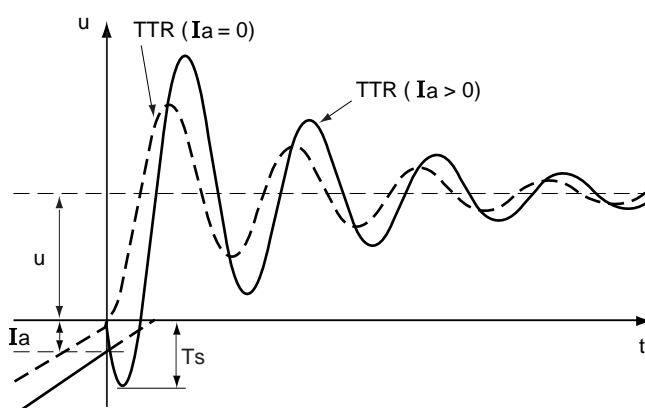
Hay cebado entre los contactos cuando la tensión aplicada es superior a la rigidez dieléctrica del intervalo. Este fenómeno es inevitable cuando este intervalo es muy reducido (al final del cierre y al principio de apertura).

El precebado al cierre es pues sistemático cuando la maniobra se hace con tensión: el intervalo de tiempo entre el precebado y el instante en que los contactos se tocan (tiempo de prearco) depende de la velocidad de cierre y del valor de la tensión aplicada cuando los contactos se acercan.

El reencendido durante la apertura sólo se produce si el tiempo de arco (intervalo de tiempo entre la separación de los contactos y la interrupción de la corriente) es corto: en este caso, la separación de los contactos es insuficiente para soportar la TTR y se producen rupturas dieléctricas repetidas.

Material	$I_{\text{arrancada media}}$	$I_{\text{arrancada máxima}}$
Cu	15	21
CuCr	4	8
AgWC	1	1,1

Fig. 18: Valores de corriente arrancada de algunos materiales usuales (Cu, CuCr, AgWC).



$$V_s: \text{tensión de supresión} = I_a \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Fig. 17: Sobretensiones asociadas al corte de un circuito con arranque de corriente.

Durante un precebado o un reencendido, la descarga oscilante de las capacidades locales se traduce en una corriente de AF (decenas de kHz) que circulan entre los contactos, superpuesta a la corriente de frecuencia industrial que se establece progresivamente (nula antes del cebado).

Estos fenómenos, inevitables, afectan a todos los tipos de apartamentas. La particularidad de la apartamentas de corte en vacío es su capacidad de interrumpir la corriente de AF que sigue al cebado, mientras que otras técnicas de corte son generalmente incapaces, debido a los altos valores de di/dt en el momento del paso por cero de la corriente.

La interrupción de la corriente AF produce una nueva TTR aplicada entre contactos, cuya separación sólo ha variado un poco, porque estos fenómenos se producen en un lapso de tiempo muy reducido, debido a la duración del movimiento de los contactos, lo que produce, por tanto, un nuevo cebado y la repetición de los mismos fenómenos (figura 19). Hay una sucesión de cebados múltiples asociados a las ondas de tensión de amplitud variable, según la evolución de la separación de los contactos:

□ al cierre, la amplitud del tren de ondas de sobretensión decrece linealmente, hasta que los contactos se tocan,

□ a la apertura, las amplitudes son crecientes, hasta que la separación de los contactos sea finalmente suficiente para soportar la tensión de restablecimiento que, debido a un proceso de subida escalonada de la tensión, es siempre mayor que la tensión correspondiente a un corte normal. Los trenes de ondas de sobretensiones de frente abrupto, generados por estos fenómenos de cebados múltiples, quedan pues siempre limitados por la rigidez dieléctrica del espacio entre contactos, que juega el papel de un explosor. Sin embargo, esta limitación no es realmente eficaz más que al cierre, pero en cambio, a la apertura, los valores que se alcanzan pueden ser elevados (figura 20).

Las características de estos dos tipos de fenómenos próximos se resumen en la tabla de la figura 21.

El inconveniente de estos trenes de ondas de sobretensiones está más en su frente abrupto que en su amplitud. En efecto, estas ondas de tensión con un tiempo de subida muy corto (del orden de 0,2 a 0,5 μs) no se distribuyen de forma homogénea en los arrollamientos de los transformadores y de los motores, sino que solicitan esencialmente las primeras espiras (figura 22). Por tanto, pueden provocar una degradación y un envejecimiento acelerado del aislamiento entre estas primeras espiras.

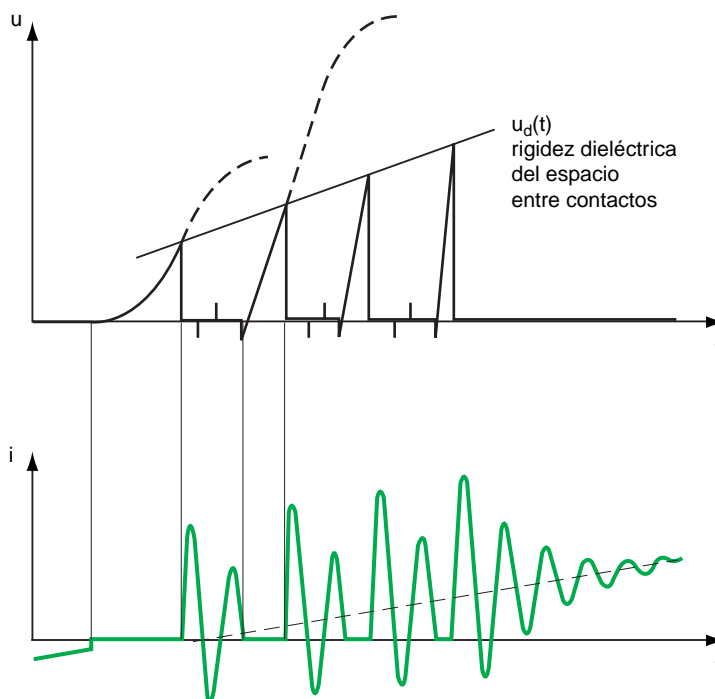


Fig. 19: Sucesión de cebados múltiples asociados a las ondas de tensión de amplitud variable.

Arranque de corriente virtual

En configuraciones particulares (que rara vez se encuentran en práctica), caracterizadas por un gran acoplamiento capacitativo/inductivo entre las fases del circuito, los fenómenos de reencendidos múltiples en la primera fase que se intenta cortar llevan no sólo a oscilaciones de corriente de AF apreciables en la fase afectada, sino también en las fases próximas, aún recorridas por una corriente todavía notable, porque está alejada de su cero natural.

Si las corrientes de AF inducidas alcanzan una amplitud del mismo orden que la corriente a frecuencia industrial, se producen ceros de corriente («artificiales», pero muy reales y no virtuales). El aparato puede aprovechar para interrumpir la corriente mucho antes de su cero natural. En tal caso, las corrientes arrancadas se cifran en decenas y hasta centenas de amperios y las sobretensiones asociadas son muy elevadas. Una solución que se puede proponer es decalar en adelante la apertura de uno de los polos del aparato de manera que, durante el intervalo de tiempo en que se pueden producir reencendidos múltiples, las otras dos fases todavía están cerradas y son por tanto insensibles a las perturbaciones inducidas. En la práctica, esta solución no ha sido aplicada por los problemas que supone (acción no uniformemente repartida entre los polos durante el corte de corrientes de cortocircuito) y por el carácter excepcional del fenómeno.

Tipo de cebado	Frecuencia	Amplitud de las sobretensiones
Precebado al cerrar	sistemático	baja
Reencendidos al abrir	ocasional	alta

Fig. 21: Características de las sobretensiones debidas a los fenómenos de cebados múltiples.

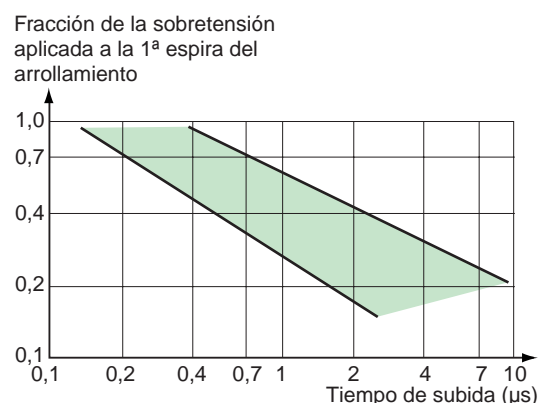


Fig. 22: Porcentaje de la sobretensión aplicada a la primera espira del arrollamiento según su tiempo de subida.

Laboratorio VOLTA C2581 99/04/22/035

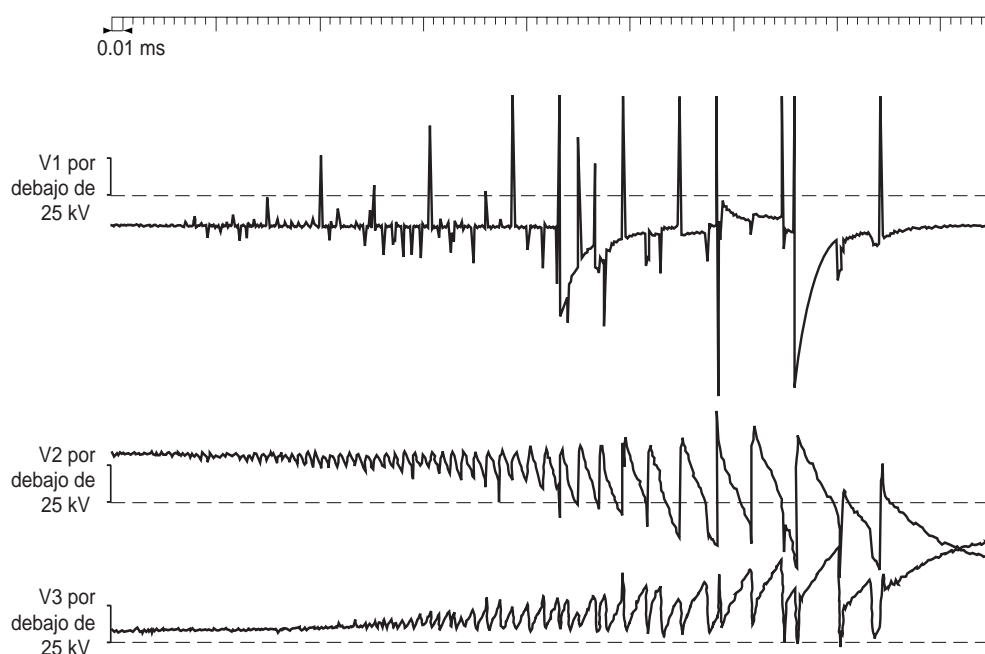


Fig. 20: Fenómenos de cebados múltiples al separarse los contactos cortando pequeñas corrientes inductivas.

3.2 Las medidas de protección contra las sobretensiones

Materiales de contacto «blando»

Para la aplicación a contactores, se han probado diversos materiales de contacto (por ejemplo, AgWC, CuBi) que presentan un valor muy bajo de corriente arrancada. Este resultado se ha alcanzado asociando la baja conductividad térmica y la gran tensión de vapor para conseguir obtener puntos catódicos estables hasta con valores muy bajos de corriente.

Estas características van en contra del poder de corte: lo que es aceptable para su aplicación a los contactores, no lo es para los interruptores automáticos.

Además, el empleo de estos materiales sólo es eficaz para reducir las sobretensiones debidas a las corrientes arrancadas, que no tienen problema en la práctica cuando no exceden de algunos amperios (caso del CuCr).

Los materiales de contacto «blandos» no aportan ninguna mejora respecto a los materiales clásicos «duros» (CuCr) en cuanto a los cebados múltiples. En efecto, estos materiales son también capaces de interrumpir las corrientes con elevados valores de di/dt y se caracterizan por una velocidad de restablecimiento dieléctrico más lenta después de la separación de los contactos (figura 23). Por tanto, los trenes de ondas de sobretensiones de frente abrupto no son eliminados sino que al contrario, tienen tendencia a durar más mucho tiempo que con materiales más adecuados para el corte.

Corte sincronizado

Una solución teórica para eliminar estos fenómenos de reencendidos múltiples es el controlar el instante de apertura de los contactos respecto a la onda de corriente para evitar los tiempos de arco cortos. En la práctica, tiene problemas complejos de fiabilidad en cuanto al tiempo respuesta del mecanismo de mando, por lo que no se utiliza más que en el campo de la MAT donde el control de las sobretensiones de maniobra puede justificar el sobre coste de la apartament. En cambio, en MT, es más económico utilizar dispositivos adecuados para sobretensiones sólo cuando hay que proteger un receptor.

Dispositivos de protección por limitación de las sobretensiones

Como se ha indicado anteriormente, el fenómeno más perjudicial es el de los cebados múltiples, que sobrecargan especialmente a las

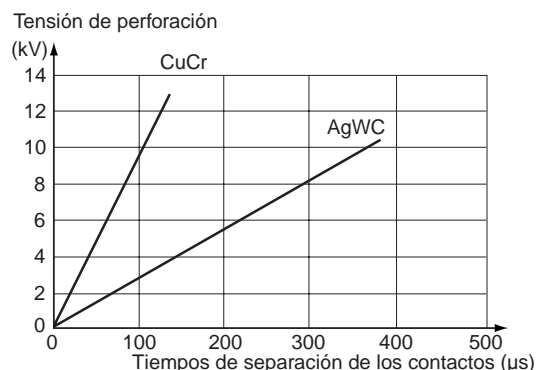


Fig. 23: Evolución de la rigidez dieléctrica entre contactos a partir del instante de su separación, según el tipo de material.

primeras espiras de los arrollamientos del transformador o del motor.

Hay que analizar por separado estos dos tipos de receptores.

En efecto, los transformadores están diseñados para soportar los esfuerzos dieléctricos generados por descargas de rayo, que son sobretensiones de frente abrupto, por lo que tienen un buen nivel de aislamiento en las primeras espiras del arrollamiento.

Por otra parte las corrientes inductivas a interrumpir son bajas (transformador en vacío) y las sobretensiones asociadas quedan limitadas. Por regla general, pues, no es necesario prever una protección específica para los transformadores maniobrados con apartament de corte en vacío, salvo, eventualmente, para los transformadores con aislamiento sólido, menos resistente que el de aceite.

Los motores tienen una rigidez dieléctrica inferior a la de los transformadores, a pesar de que las corrientes a interrumpir pueden ser elevadas (corte durante el arranque o con rotor bloqueado) y, por tanto, con sobretensiones severas. En general, se recomienda colocar dispositivos de protección en bornes del motor, sea el que sea el su dispositivo de mando, contactor o interruptor automático, y el material de sus contactos. Estos dispositivos pueden ser condensadores que reducen la pendiente del frente de subida de las sobretensiones, circuitos RC (típicamente C del orden de 0,1 a 0,5 μF y R del 10 a 50 Ω) y/o pararrayos (como limitadores de sobretensiones) de ZnO.

4 Los principales campos de aplicación del corte en vacío

Las propiedades del vacío como medio de corte para aparataje eléctrica se resumen en la tabla de la **figura 24**.

Estos puntos, fuertes y débiles, de la técnica de corte en vacío sirven para elegir su utilización en los diversos campos de aplicación de la aparataje eléctrica. En la presentación que sigue, se agrupan los campos de aplicación de la siguiente forma:

- valor de la tensión,
- después, por función o por tipo de aparataje de conexión,
- por último, según el tipo de carga a conectar.

Este capítulo pasa pues sucesivamente revista a los campos de aplicación

Campo	Características	Puntos fuertes	Puntos débiles
Poder de corte	Regeneración dieléctrica muy rápida.	Corte de corrientes de defecto severas con di/dt de la TTR.	Corte de corrientes AF durante los recebados: generación de sobretensiones, protecciones necesarias en ciertas redes.
	Tensión (energía) de arco baja.	Endurancia eléctrica elevada.	Sin efecto limitador en BT.
	Capacidad de corte incluso sin desplazamiento de los contactos.	Interrupción de la corriente en caso de cebado entre contactos abiertos (compensa en parte la falta de fiabilidad de la rigidez dieléctrica).	
Rigidez dieléctrica	Influenciada por el estado de la superficie de los electrodos y la presencia de partículas.		Rigidez dieléctrica intrínseca limitada en AT y susceptible de evolución en el tiempo.
	Influenciada por la fase de arco inmediatamente precedente.		Rigidez dieléctrica post corte aleatoria: riesgo de recebados después de corte capacitativo si la cámara es no-adaptada.
Paso de la corriente	Contactos de tipo «frontal», no compensado.		Necesidad de una presión de contacto elevada para evitar la repulsión por efecto electromagnético.
	Contactos en vacío.	Resistencia de contacto constante (no oxidación y no degradación al cerrar).	Tendencia a soldarse al cerrar.
	Mismos contactos para el corte y el paso de la corriente permanente,		Resistencia de los contactos elevada: disipación térmica importante para grandes calibres.
Medio de corte	Vacío < 10 ⁻³ mbar.	Sin productos de descomposición y de efectos sobre el entorno.	Imposibilidad de controlar permanentemente el estado del vacío: el control dieléctrico periódico necesita la desconexión.

Fig. 24: Propiedades del vacío como medio de corte.

de MT (MT: $1 < U < 52 \text{ kV}$),
de BT (BT: $U < 1 \text{ kV}$)
y de AT (AT: $U \geq 52 \text{ kV}$).

El estudio más largo se reserva a la MT, que constituye el campo de aplicación principal de la

técnica de corte en vacío. Los campos de la BT y AT se tratan con mucha menor extensión, porque las limitaciones intrínsecas de la técnica de corte en vacío sólo le permiten ocupar una posición marginal: las técnicas dominantes son, en BT, el corte en aire y, en AT, el corte en SF₆.

4.1 Las aplicaciones de la técnica de corte en el vacío en MT

La MT se utiliza esencialmente para distribución de la energía eléctrica, entre el transporte a gran distancia, que se efectúa en AT, y la utilización, que se hace, sobre todo, en BT. Los valores de tensión inferiores de la MT se utilizan también para alimentar receptores de potencia unitaria demasiado importante para la BT. En MT, los principales tipos de aparata de conexión que se utilizan son los interruptores, los seccionadores, los interruptores automáticos y los contactores (**figura 25**).

Los interruptores son aparatos simples y relativamente económicos que se utilizan en la explotación normal de las redes eléctricas: se maniobran por orden de un operador y permiten establecer o interrumpir la corriente en un elemento de la red. Son capaces de cortar la corriente de carga normal del circuito en el que están insertados, y de establecer la corriente de defecto provocado por un cortocircuito situado aguas abajo de su posición respecto a la alimentación eléctrica.

Los interruptores de uso general destinados a las redes de distribución MT, en los que la frecuencia de las maniobras es baja, tienen, por construcción, una endurancia eléctrica y mecánica relativamente limitadas, típicamente:

- un centenar de cortes con In,
- un millar de maniobras mecánicas.

Para aplicaciones especiales, algunos interruptores deben de ser capaces de soportar esfuerzos más severos, por ejemplo:

- interruptores de hornos de arco, que se conectan frecuentemente con corrientes elevadas,
- interruptores de escalones de condensadores que actúan muy frecuentemente, y deben de establecer las corrientes de conexión (de frecuencia y amplitud elevadas).

Tipo de aparato de conexión	Definición CEI	Norma aplicable para MT
Interruptor	Aparato de conexión capaz de establecer, mantener e interrumpir corrientes en las condiciones normales del circuito, incluidas eventualmente las condiciones especificadas de las corrientes en condiciones anormales especificadas del circuito, tales como las de cortocircuito. (CEI 60050-441-14-10).	CEI 60265-1
Seccionador	Aparato de conexión que asegura, en posición abierto, una distancia de seccionamiento que satisface las condiciones especificadas. (CEI 60050-441-14-05).	CEI 60126
Interruptor automático	Aparato de conexión capaz de establecer, mantener e interrumpir corrientes en las condiciones normales del circuito, así como de establecer, mantener durante un tiempo especificado e interrumpir las corrientes en condiciones anormales especificadas del circuito, como las de cortocircuito. (CEI 60050-441-14-20).	CEI 60056
Contactador	Aparato de conexión que tiene una única posición de descanso, no operado con la mano, capaz de establecer, mantener e interrumpir corrientes en las condiciones normales del circuito, incluidas las condiciones de sobrecarga en servicio. (CEI 60050-441-14-33).	CEI 60470

Fig. 25: Definiciones normalizadas de los principales tipos de aparata.

Los seccionadores no son propiamente órganos de corte, puesto que maniobran sin carga (deben sin embargo ser capaces de interrumpir corrientes capacitivas residuales de los circuitos abiertos). Se utilizan para aislar un circuito del resto de la red y permitir que se trabaje con seguridad en el circuito. Por este motivo, deben de tener una rigidez dieléctrica elevada entre contactos y respetar las disposiciones constructivas tendentes a evitar el franqueo de distancia de seccionamiento incluso con las sobretensiones de la red. A pesar de estas disposiciones, la seguridad de los que trabajan no está plenamente asegurada más que si el elemento de red, aislado por los seccionadores, está puesto a tierra de manera eficaz. Los seccionadores están asociados frecuentemente a dispositivos que no cumplen la función de seccionamiento, como los interruptores automáticos y contactores. Sin embargo, los interruptores son frecuentemente los mejores elementos para abarcar también la función de seccionamiento: son, entonces, interruptores-seccionadores.

Los interruptores automáticos son los órganos de seguridad que protegen la red separando automáticamente las secciones de red con defecto o falta: son capaces de interrumpir la corriente de cortocircuito máximo susceptible de aparecer en el punto donde están instalados. Los interruptores automáticos son, por tanto, interruptores con altas prestaciones, capaces de

maniobrar por orden de un operador o de un dispositivo automático de protección que detecte una situación de defecto. Estos aparatos deben de tener una alta fiabilidad, porque de su buen funcionamiento dependen la seguridad y la disponibilidad de la red.

Las durancias eléctrica y mecánica exigidas a los interruptores automáticos son más elevadas que las de los interruptores, típicamente:

- de 10 a 100 cortes con corriente de cortocircuito,
- de 2000 a 10000 maniobras mecánicas y cortes con I_n .

Los contactores son los órganos de mando de los receptores que funcionan de modo intermitente, especialmente los motores eléctricos. Son interruptores con una elevada cadencia de maniobras que deben de poder interrumpir corrientes de sobrecarga más elevadas que la corriente nominal (por ejemplo, corriente de arranque o con rotor bloqueado), pero no las corrientes de cortocircuito que han de ser eliminadas por un dispositivo de protección asociado (interruptor automático o fusibles). Su durancia mecánica y eléctrica, elevadas, se cifra generalmente en centenares de miles de maniobras.

El gráfico de la **figura 26** permite visualizar la posición relativa de los cuatro tipos de mecanismos descritos anteriormente.

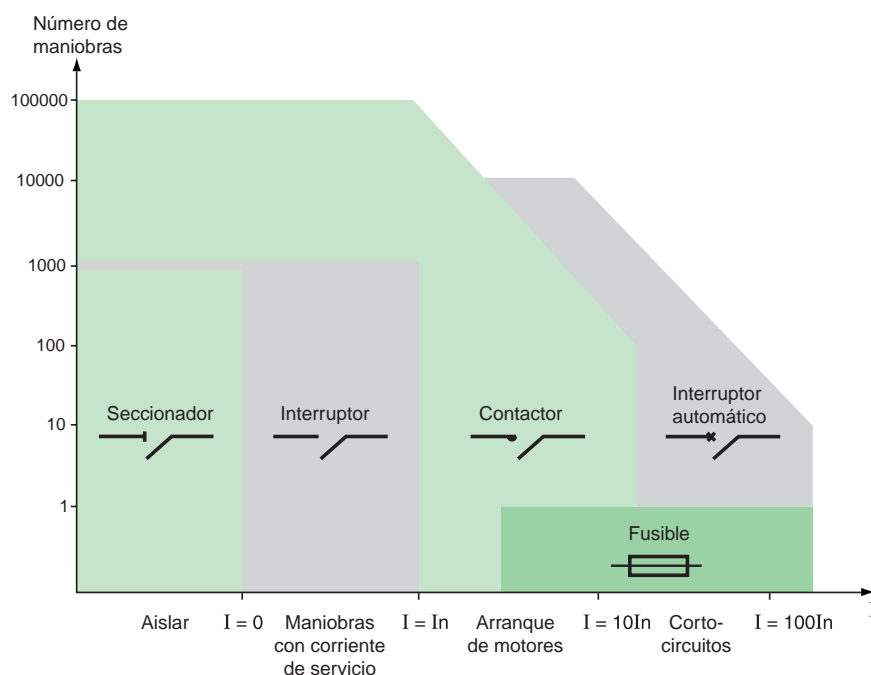


Fig. 26: Posición específica de los cuatro tipos de aparatos en términos de corriente a cortar y del número de maniobras a efectuar.

Uno de los puntos fuertes de la técnica de corte en vacío es su aptitud para proporcionar poderes de corte y endurancias eléctricas elevadas: por esta razón esta técnica se utiliza sobre todo para los interruptores automáticos y los contactores.

Utilización de los interruptores automáticos en MT

Los interruptores automáticos requieren necesariamente un gran poder de corte. Las cámaras de vacío utilizadas para esta aplicación pueden utilizar tanto la tecnología de campo radial como la de campo axial. Una y otra permiten alcanzar los poderes de corte más elevados exigidos en MT (hasta 63 kA); por tanto se utilizan en función de sus respectivas ventajas (**figura 12**). Como el SF₆, el vacío proporciona para esta aplicación las ventajas de un corte estanco sin manifestación exterior y de un diseño sin mantenimiento, con una endurancia eléctrica elevada.

La muy rápida regeneración dieléctrica del vacío puede constituir una ventaja respecto al SF₆ en aplicaciones particulares en las que la velocidad de subida de la TTR es mayor que la prescrita por las normas CEI 56 y ANSI C37-06 (por ejemplo, el caso de un interruptor automático conectado directamente al secundario de un transformador de gran potencia). En tal caso, poco frecuente porque las TTR normalizadas cubren la mayor parte de las aplicaciones, los interruptores automáticos de vacío necesitan una menor desclasificación que los interruptores automáticos SF₆.

Para el corte en vacío sin aporte de energía exterior, los interruptores automáticos de vacío requieren menos energía de mando que los interruptores automáticos de SF₆ con auto-compresión. Por lo que se refiere a los interruptores automáticos de SF₆ con arco giratorio o con auto-expansión, la diferencia es menor. Sin embargo, esta ventaja es compensada por el inconveniente inherente a la técnica de vacío que no puede utilizar más que contactos frontales. Estos contactos necesitan presiones de contacto elevadas para vencer la repulsión y la soldadura al cerrar sobre un defecto: las presiones de contacto necesarias por polo son del orden de 200 daN para un interruptor automático de 25 kA, y de 600 daN para un interruptor automático de 50 kA. Esta exigencia obliga a aumentar la energía de mando para el cierre y a reforzar la estructura de los polos que deben de soportar estos esfuerzos permanentes en posición cerrada.

Por otra parte, a pesar de las presiones de contacto elevadas, la utilización de contactos frontales con materiales como CuCr no permite obtener las resistencias de contacto tan bajas como con contactos múltiples plateados: los interruptores automáticos de vacío están por tanto en inferioridad de condiciones respecto a los interruptores automáticos con SF₆ por su mayor disipación térmica para grandes intensidades nominales (2500 A y superiores). Los contactos de la cámara de vacío, al abrigo de la oxidación, no están limitados en calentamiento, a diferencia de los contactos de otros interruptores automáticos, pero el entorno de la cámara debe de evacuar las calorías producidas por ésta, respetando las temperaturas límite tolerables en los empalmes y contactos; por este motivo, los interruptores automáticos de vacío de gran calibre se caracterizan por conexiones y radiadores especialmente voluminosos. Independientemente de su entorno, las cámaras de vacío también están limitadas en calentamiento, no por la naturaleza de los materiales que las componen o por su proceso de fabricación (soldadura fuerte a gran temperatura), sino por la posibilidad de penetración del gas a través de las paredes metálicas (en particular del fuelle) que llegan a ser significativas en cuanto al hidrógeno atmosférico a partir de 200-250°C.

En conclusión, la técnica de corte en vacío se adapta bien los interruptores automáticos de uso general en MT y cubre el conjunto de las cualidades habitualmente exigidas en tensión, corriente nominal y poder de corte. Para aplicaciones especiales, como mando de cargas inductivas o capacitivas, hay que tomar precauciones particulares o utilizar otras tecnologías mejor adaptadas.

Utilización de contactores MT

Se trata de una aplicación particularmente bien adaptada a la técnica de corte en el vacío que tiene, por tanto, conseguida una posición dominante en este segmento. En efecto, las corrientes a cortar se sitúan en la gama de corrientes fácilmente interrumpidas por un arco en vacío en modo difuso, con contactos de formas simples y un bajo desgaste de material del contacto, y por tanto, una excelente endurancia eléctrica. Las presiones de contacto pueden ser bajas, debido a los valores moderados de las corrientes nominales y a la limitación que hacen los fusibles de las corrientes de defecto, además de que los materiales de contacto utilizados son de muy baja soldabilidad, soportando, por tanto, un cierto grado de repulsión.

Las tensiones de alimentación de los motor MT, situadas en la parte baja de la MT (en general $\leq 7,2$ kV) permiten un desplazamiento muy corto de los contactos (del orden de 4 mm) y la construcción de cámaras compactas con una gran endurance mecánica, que están particularmente bien adaptadas al mando mediante electroimán.

Todas estas ventajas explican el éxito de la técnica de corte en vacío para su utilización con contactores. Sin embargo, no hay que perder de vista el riesgo de las sobretensiones durante la apertura de circuitos inductivos (motor durante el arranque o transformadores en vacío), específica para el corte en vacío y la necesidad de instalar protecciones adaptadas (capítulo 3). Este problema, que afecta a todos los aparatos de corte en vacío, debe tenerse especialmente en cuenta en el ámbito del mando de motores, que son receptores sensibles a las sobretensiones.

Utilización de interruptores y seccionadores MT

La técnica de corte en vacío, aplicable a interruptores automáticos y contactores MT, tiene que tener necesariamente una respuesta adecuada a las necesidades más modestas de los interruptores. Sin embargo, para esta aplicación, esta técnica tiene un éxito limitado. En efecto, en general pueden ser válidos para aplicaciones menos exigentes y de menor coste económico mediante las técnicas de corte en aire o en SF₆. Pero esta función suele ir asociada a la función de seccionamiento, que es más fácilmente realizable en técnica de corte en aire o en SF₆. No resulta competitivo asociar a un interruptor en vacío un seccionador convencional.

La imposibilidad de asegurar el seccionamiento con una cámara de vacío se debe al fenómeno de desacondicionamiento en tensión provocado por la degradación del estado de las superficies de los contactos debido al efecto de las maniobras mecánicas y eléctricas. Este pérdida de calidad no permite garantizar la rigidez dieléctrica que se logra obtener, sin dificultad especial, en una cámara nueva, con un proceso de acondicionamiento en tensión. Por otra parte, la imposibilidad de controlar permanentemente la integridad del medio dieléctrico en la cámara de vacío es también un freno a su utilización como seccionador.

Con un interruptor, el cierre en cortocircuito es particularmente perjudicial para la rigidez

dieléctrica entre sus contactos, porque a este cierre no le sigue un corte capaz de erosionar las asperezas provocadas por la rotura de la soldadura de los contactos debida al precebado.

Para evitar una degradación importante de su rigidez dieléctrica, cuando se producen cierres consecutivos en cortocircuito, los contactos de los interruptores se realizan con materiales de muy baja soldabilidad, como WCu, en vez de CuCr, utilizado para interruptores automáticos.

Para aplicaciones particulares que requieran una gran endurance eléctrica, (por ejemplo, interruptores para horno de arco), la técnica de corte en vacío tiene el máximo interés y es muy utilizada, aunque los problemas de las sobretensiones, propias del corte en vacío, pueden, en ciertos casos, hacer preferible la tecnología SF₆, a pesar de su peor endurance.

Otra aplicación particular es el interruptor para escalones de condensadores, que puede quedar asegurada por un interruptor automático de SF₆ estándar, pero que, con la técnica de vacío, necesita una cámara específica. En efecto, la carga eléctrica del condensador induce una tensión de restablecimiento, que se aplica a los bornes del aparato de corte, especialmente elevada. Ahora bien, la rigidez dieléctrica post-corte de una cámara de vacío no es su punto fuerte, debido a las posibilidades de rupturas dieléctricas provocadas por las partículas producidas durante el corte (capítulo 2).

En el caso de escalones de condensadores en paralelo, que se conectan uno a uno progresivamente, el riesgo de recebado se acentúa por efecto de la corriente de alta frecuencia debida a la descarga de los condensadores contiguos sobre el que se está conectando: esta corriente de conexión o enganche obliga a la utilización de un material en los contactos de baja soldabilidad, del tipo WCu, incompatible con la función de interruptor automático. Además, para evitar los intentos de corte de la corriente de AF de enganche durante la fase de precebado, que se traduce en sobretensiones perjudiciales para las baterías de condensadores, hay que tomar diversas configuraciones: la adición de autoinducciones de choque reduce la frecuencia de la corriente de enganche y el aumento de la velocidad de cierre reduce la duración de precebado.

En síntesis: no hay que excluir la técnica de corte en vacío para el mando de cargas capacitivas, aunque otras técnicas, y en particular el SF₆, son mejores.

4.2 Utilización del corte en vacío en BT

La técnica de corte en vacío, muy utilizada en MT para los interruptores automáticos y contactores, es también capaz de servir para esas mismas aplicaciones en BT. Sin embargo, es poco utilizada para estas tensiones. En efecto, por una parte, entra en competencia con la técnica de corte en el aire, más simple, económica y mejor adaptada, y, por otra, los inconvenientes señalados en la utilización MT, son más molestos en BT.

El principal defecto del corte en vacío en BT, para la función interruptor automático, se debe a la baja tensión de arco que no puede alcanzar o sobrepasar la tensión de red, como en un interruptor automático de corte en aire: esta técnica no puede pues limitar la corriente de defecto a un valor sensiblemente inferior a la corriente de cortocircuito prevista. Este efecto limitador es especialmente útil porque permite evitar los grandes esfuerzos electrodinámicos que se producirían con las corrientes de cortocircuito presuntas, frecuentemente elevadas en BT (hasta a 100 kA o más). Este efecto limitador facilita también la selectividad natural entre interruptores automáticos, tanto más importante cuanto más pequeño sea el calibre de los interruptores automáticos.

Por otra parte, los inconvenientes de las cápsulas de vacío ya mencionados para la MT, que se deben a la utilización de contactos frontales (presión de contacto elevado y gran resistencia de contacto), son más molestos en BT de potencia cuyos circuitos pueden transportar corrientes de cortocircuito importantes (no limitadas) y necesitan mayores calibres que en MT.

Por último, el gran poder de corte necesario en BT obliga a un sobredimensionamiento de las

cámaras de vacío lo que las hace menos adecuadas que otras soluciones de corte al aire para los interruptores automáticos de pequeño calibre.

Por todos estos motivos, la utilización de cámaras de vacío en los interruptores automáticos BT se limita a un estrecho segmento que corresponde a las siguientes prestaciones:

- poder de corte ≤ 75 kA,
- calibres comprendidos entre 800 y 2500 A.

En este marco, aunque el corte en vacío no sea menos costoso que el corte en el aire, puede ser interesante por las siguientes razones:

- corte estanco, sin manifestación exterior,
- utilización en atmósfera contaminada,
- endurance eléctrica más elevada.

En utilización para contactores BT, ya no hay que mencionar los inconvenientes de las cámaras de vacío para la utilización como interruptor automático. Los principales factores que frenan el desarrollo de esta técnica en este campo, son:

- ante todo, la diferencia de coste en favor de las soluciones clásicas al aire,
- a continuación, las características del vacío en cuanto a las sobretensiones producidas al cortar, ya comentadas en el capítulo 3.

En resumen, en BT, la técnica de corte en vacío no está realmente en condiciones de competir con el corte en el aire, salvo en el caso particular de corte estanco, que tiene una ventaja significativa.

4.3 Utilización del corte en vacío en AT

En el campo de la AT, se puede considerar la técnica de corte en vacío para la función de interruptor automático: hasta el momento, se han hecho diversas tentativas sin éxito convincente. En efecto, parece que las características del corte en vacío no permiten rivalizar realmente con el corte en SF₆ en AT.

Una de las primeras dificultades a superar es la realización de cápsulas de vacío de tensión unitaria suficientemente elevada. Si por debajo de los 36 kV se utilizan normalmente cámaras

de vacío capaces de cortar, hasta los 52 kV es frecuente tener que utilizar dos cámaras en serie. En el momento actual, el valor de tensión más elevado para el que se comercializa un interruptor automático dotado de una única cámara por polo es de 72,5 kV.

Las cámaras destinadas a aplicaciones a 123-145 kV, no han pasado, por ahora, la fase de prototipo, mientras que se fabrican cámaras de corte en SF₆, hasta una tensión unitaria de 420 kV.

La solución consiste en colocar un gran número de cámaras en serie para alcanzar tensiones elevadas; a parte de los problemas técnicos que tiene (reparto de la tensión, fiabilidad...), no puede evidentemente rivalizar económicamente con el corte en SF₆. El principal obstáculo para la obtención de única ampolla de vacío de tensión unitaria elevada es el sobrepasar el «techo» de las prestaciones dieléctricas para altas tensiones de unos 500 kV (**figura 4**), que corresponde al valor de resistencia a la descarga de rayo que han de alcanzar los aparatos de 123-145 kV. Actualmente, no se está considerando ninguna solución tecnológica.

Por otra parte, la utilización del vacío con tensiones unitarias elevadas se enfrenta al problema de los rayos X, susceptibles de ser emitidos por las cámaras sometidas a tensiones de servicio del orden del centenar de kV. Se trata de los valores de tensión que se aplica a las cámaras MT para acondicionarlas: esta operación se efectúa en recintos blindados para proteger los operadores contra la emisión de rayos X. Con cámaras de diseño dieléctrico adaptado a la AT y ya acondicionadas, el valor de radiación emitido (en posición abierta)

debería ser aceptable, pero como el funcionamiento de las cámaras puede provocar un des acondicionamiento parcial, esta preocupación no puede ser totalmente descartada.

Por tanto, por las razones de limitación física, el corte en vacío no puede pretender rivalizar con el SF₆, más que para los más bajos valores de tensión, dentro del campo de la AT y esto en condiciones económicas desfavorables. Para aplicaciones muy particulares, la asociación de ambas técnicas de corte, vacío y SF₆, puede considerarse, como ya se ha hecho para un interruptor automático de 250 kV de corriente continua que utiliza una cámara de vacío en serie con una cámara de corte con SF₆. Esta solución reúne las cualidades del vacío, para el corte con di/dt y velocidades de aumento de la TTR inicial elevados, con las del SF₆, que toma el relevo para asegurar la rigidez dieléctrica al final de la subida de la TTR. Para aplicaciones a interruptores automáticos AT corrientes, no es seguro que las soluciones híbridas puedan rivalizar económicamente con soluciones 100% SF₆, aunque en el plano técnico estas soluciones son atractivas puesto que permiten asociar las cualidades de cada técnica de corte.

5 Conclusión

Para acabar esta panorámica, la técnica de corte en vacío se presenta, por sus buenas prestaciones en poder de corte y endurancia eléctrica, como generalmente bien adaptada para aplicaciones de interruptor automático y contactor en MT.

Sin embargo, la técnica de corte en el SF₆ suele ser preferible cuando las características que se buscan son la rigidez dieléctrica, los bajos valores de sobretensiones de maniobra o la aptitud para soportar corrientes permanentes elevadas.

Aunque madura, la técnica de corte en vacío tiene todavía un potencial notable de desarrollo de sus cualidades, en particular con la tecnología campo axial, relativamente reciente. Así, deberá seguirse persiguiendo la reducción del tamaño de las cámaras de los interruptores automáticos. Para esto, hay que avanzar en la optimización de la utilización de la superficie de los contactos y en el aumento de las densidades de corriente admisibles. Con estos objetivos, los principales ejes de investigación actual, son:

- la modelización del arco y su interacción con el campo magnético axial,

- los mecanismos de difusión y de reparto de la energía de arco en la superficie de los contactos,

- la mejora de las características de los materiales de los contactos.

Para extender los campos de aplicación de la técnica de corte en vacío y explotar mejor sus cualidades, los constructores de aparatos consideran también soluciones nuevas y particularmente la asociación a otras técnicas, en particular la del SF₆, para conjugar sus respectivas ventajas. Esta aproximación ya se utiliza para ciertas celdas MT con aislamiento gaseoso que unen las cualidades del corte en vacío y las de aislamiento en SF₆.

Otra vía, aún poco explorada por el momento, es la realización de interruptores automáticos procedes a una hibridación que asocian las dos técnicas de corte, en vacío y en SF₆. A priori más costosa, podría sin embargo revelarse interesante en ciertos campos de aplicación si llega a conciliar eficazmente lo mejor de ambas tecnologías.

Bibliografía

Cuadernos Técnicos Schneider Electric

- Las técnicas de corte en MT. Cuaderno Técnico nº 193. 1998. S. THEOLEYRE.

Otras publicaciones

- Obras de referencia
 - Circuit interruption - Theory and techniques. 1984. THOMAS E. BROWNE. Marcel Dekker, Inc
 - Vacuum Switchgear. 1994. ALLAN GREENWOOD. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
 - Handbook of vacuum arc science and technology - Fundamentals and applications. 1995. RAYMOND L. BOXMAN, PHILIP J. MARTIN, DAVID M. SANDERS. Noyes publications.
- Generalidades sobre el corte
 - Circuit-breaker application (in Circuit interruption). 1984. CHARLES L. WAGNER. Marcel Dekker, Inc.
- Aislamiento en vacío
 - The effect of contact geometry and HV conditioning on the field intensification factor of vacuum interrupter contacts. Elektryka Nr 38. 1989. R. P. P. SMEETS, H. F. REIJNDERS, W. M. C. VAN DEN HEUVEL, Y. H. FU.
 - Isolation sous vide. D2540 et D2541. 1991. ANNE ZEITOUN-FAKIRIS. Techniques de l'ingénieur.
- Arco en vacío
 - Sheath growth in a low pressure plasma. February 1971. J. G. ANDREWS, R.H. VAREY. The physics of fluids.
 - Interruption in vacuum (in Circuit interruption). 1984. CLIVE W. KIMBLIN, PAUL G. SLADE, ROY E. VOSHALL. Marcel Dekker, Inc.
 - Physique de la coupure du courant de court-circuit dans les disjoncteurs à vide. Revue ABB - 5/1993. EDGAR DULLNI.

- Measurements and modelling in the current zero region of vacuum circuit-breakers for high current interruption. 1996. JOHANNES KAUMANN. IEEE 17th ISDEIV-Berkeley.

- Post-arc dielectric breakdown in vacuum circuit-breakers. August 1999. STEPHEN W. ROWE. IEE High voltage engineering symposium, 22-27.

■ Campo magnético axial

- Interaction between a vacuum arc and an axial magnetic field. 1978. H. C. W. GUNDLACH. IEEE 8th ISDEIV-Albuquerque
- Axial magnetic field type vacuum circuitbreakers based on exterior coils and horse shoes. 1986. H. SCHELLEKENS, K. LENSTRA, J. HILDERINK, J. TER HENNEPE, J. KAMANS. IEEE 12th ISDEIV-Shoreh.
- The current distribution and the magnetic pressure profile in a vacuum arc subject to an axial magnetic field. 1986. I. IZRAELI, R. L. BOXMAN, S. GOLDSMITH. IEEE 12th ISDEIV-Shoreh.
- Effect of an axial magnetic field upon the development of the vacuum arc between opening electric contacts. March 1993. B. SCHULMAN, PAUL G. SLADE, J. V. R. HEBERLEIN. IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology.
- Evaluation of AC axial magnetic field needed to prevent anode spots in vacuum arcs between opening contacts. March 1994. BRUCE SCHULMAN, JOHN A. BINDAS. IEEE transactions on components, packaging, and manufacturing technology.
- Technological progress of axial magnetic field vacuum interrupters. 1996. K. WATANABE, E. KANEKO, S. YANABU. IEEE 17th ISDEIV-Berkeley.
- Arc behaviour in axial magnetic field vacuum interrupters equipped with an external coil. 1998. HANS SCHELLEKENS. IEEE 18th ISDEIV-Eindhoven.

■ Materiales de contacto

□ Contact materials for vacuum switching devices. 1992. F. HEITZINGER, H. KIPPENBERG, K. E. SAEGER, K.-H. SCHRÖDER.
IEEE 15th ISDEIV-Darmstadt.

□ Advances in material development for high power, vacuum interrupter contacts. March 1994. PAUL G. SLADE.
IEEE transactions on components, packaging, and manufacturing technology.

■ Sobretensiones

□ Vacuum circuit-breaker application and switching surge protection (in Circuit interruption). 1984. JOHN F. PERKINS. Marcel Dekker, inc.

□ Types of reignition following high frequency current zero in vacuum interrupters with two types of contact material. 1992. R. P. P. SMEETS, T. FUNAHASHI, E. KANEKO, I. OHSHIMA.
IEEE 15th ISDEIV-Darmstadt.

□ Mathematical modelling of the high frequency behavior of vacuum interrupters and comparison with measured transients in power systems. 1996. J. HELMER, M. LINDMAYER
IEEE 17th ISDEIV-Berkeley.