

## Las técnicas de corte en MT (Media Tensión) parte 3

---

### 3 Las técnicas de corte

Para cortar las corrientes de carga o de defecto, los constructores han desarrollado y perfeccionado los aparatos de corte (disyuntores y contactores principalmente) utilizando diversos medios de corte: el aire, el aceite, el vacío y el SF<sub>6</sub>. Mientras que el corte en el aire o en aceite tienen tendencia a desaparecer, no ocurre lo mismo con el corte en el vacío o el SF<sub>6</sub>, «rey» de la MT.

#### 3.1 El medio de corte

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

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

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

En efecto, este medio debe:

- tener una conductividad térmica importante, especialmente en la fase de extinción, para evacuar la energía térmica del arco,
- volver a alcanzar sus propiedades dieléctricas lo más rápidamente posible a fin de evitar un reencendido intempestivo (la figura 19 muestra las propiedades excepcionales del SF<sub>6</sub> al respecto),
- a temperatura elevada, ser un buen conductor eléctrico para reducir la resistividad del arco y por tanto la energía a disipar,
- a temperaturas más bajas, ser un buen aislante eléctrico para facilitar el restablecimiento de la tensión.

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

---

---

**SUR**

---

**SUR**

1 - La zona de alta presión llamada de «régimen atmosférico» en la que la resistencia dieléctrica es

proporcional a la presión del gas y a la distancia intercontactos.

2 - La zona de presión baja, en la que la resistencia dieléctrica alcanza un verdadero mínimo entre 200 y 600 V según el gas utilizado (mínimo de Paschen). Se alcanza para un valor determinado del producto de la presión por la distancia intercontactos, situado alrededor de 102 mbar.cm.

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

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

{pagebreak}

Estas curvas evidencian los rendimientos posibles según los medios de corte que se han ido utilizando sucesivamente: el aire a presión atmosférica o a alta presión, el hidrógeno producido por descomposición del aceite, el vacío o el SF<sub>6</sub>. La figura 22 indica los márgenes de tensión en los que cada una de estas técnicas se utiliza hoy.

---

---

## SUR

---

---

## SUR

### 3.2 El corte en el aire

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

El aire a presión atmosférica, a pesar de su rigidez dieléctrica relativamente pequeña y su constante de tiempo de desionización elevada (10  $\mu$ s), puede utilizarse para el corte hasta tensiones próximas a 20 kV. Para ello hace falta

disponer de una potencia de enfriamiento suficiente y de una tensión de arco elevada después del paso por cero de corriente para evitar el embalamiento térmico.

El mecanismo de corte en el aire

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

Este principio ha llevado a la creación para cada polo del aparato, de una cámara de corte. Se trata de un volumen situado en el espacio cercano a los contactos y dividido en placas refractarias (placas con gran capacidad de acumulación de energía térmica), (figura 23) entre los cuales el arco se estira.

---

---

## SUR

En la práctica, cuando la intensidad decrece, el arco sometido a los esfuerzos electromagnéticos penetra entre estas placas.

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

---

---

## SUR

{pagebreak }

Principales características de un dispositivo de corte en el aire

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

En los aparatos del tipo la Solenarc, la longitud más importante del arco (varios metros en 24 kV) se obtiene en un volumen razonable gracias al desarrollo del arco bajo la forma de un solenoide. Teniendo en cuenta las velocidades

que son necesarias para la apertura de los contactos, de algunos m/s, las energías de mando son de algunos centenares de julios.

Los campos de aplicación del corte en el aire

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

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

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

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

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

### 3.3 El corte en aceite

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

#### Principio

Los contactos están sumergidos en un aceite dieléctrico. Después de la separación, el arco provoca la

descomposición del aceite que libera hidrógeno (70%), etileno (20%), metano (10%) y carbono libre. Una energía de arco de 100 kJ produce alrededor de 10 litros de estos gases.

Estos gases forman una burbuja que, por inercia de la masa de aceite, se encuentra sometida durante el corte a una presión dinámica que puede alcanzar de 50 a 100 bars. Cuando la intensidad pasa por cero, el gas se expande y

sopla el arco que se apaga. El hidrógeno, resultante de la descomposición del aceite, sirve como medio de extinción.

Es un buen agente extintor gracias a sus propiedades térmicas y a su constante de desionización mejor que la del aire, en particular a presión elevada.

Diferentes tecnologías de corte en aceite n Disyuntores de gran volumen de aceite

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

---

## SUR

En consecuencia, los aparatos así diseñados alcanzaban dimensiones extraordinariamente grandes.

Además de las dimensiones, estos aparatos tienen numerosos inconvenientes como la falta de seguridad a causa del hidrógeno producido que se acumula bajo la tapa, el mantenimiento elevado necesario para vigilar la pureza del

aceite y la conservación de sus propiedades dieléctricas. Para evitar estos inconvenientes (falta de seguridad, aparatos voluminosos), los consultores han creado los disyuntores de pequeño volumen de aceite.

- Disyuntores de pequeño volumen de aceite

El arco y la burbuja se confinan en una cámara de corte aislante. La presión del gas aumenta durante el paso del arco por una sucesión de cámaras y después, cuando la intensidad pasa por cero, se expande a través de una boquilla en

la zona del arco. Éste es entonces enérgicamente barrido, lo que asegura la recuperación de las propiedades dieléctricas intercontactos.

- Influencia del valor de la corriente sobre el PdC

Para las grandes corrientes, la cantidad de hidrógeno producido y los aumentos de presión son importantes.

Por consiguiente los tiempos de arco son cortos. Inversamente, para las corrientes pequeñas, los aumentos de presión son débiles y los tiempos de arco son largos.

Estos tiempos de arco aumentan hasta un nivel crítico en que se hace difícil alcanzar el corte.

Unos dispositivos de soplado complementarios al final del recorrido pueden mejorar este punto.

- Características principales de los disyuntores

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

necesita alrededor de 1 segundo.

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

– La descomposición del aceite no es reversible.

– La degradación del aceite y el desgaste de los contactos deterioran la resistencia dieléctrica lo que conlleva costes suplementarios de mantenimiento.

– En caso de volver a cerrar rápidamente el polo, todavía hay una presión elevada y su PdC disminuye.

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

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

Progresivamente se ha sustituido por las técnicas de corte en el vacío y en el SF<sub>6</sub>, técnicas que no presentan los inconvenientes indicados en los párrafos anteriores.

### 3.4 El corte en el vacío

Las propiedades dieléctricas del vacío se conocen desde hace tiempo y se han utilizado, por ejemplo, en los tubos de vacío para rayos X.

La utilización del vacío en la aparatada de corte se ha visto como una posibilidad desde 1920, pero, a causa de dificultades tecnológicas, no ha sido efectiva a escala industrial hasta después de 1960. Después de los años 70, la técnica del vacío se generaliza más y más por las ventajas que aporta:

dimensiones reducidas, mayor seguridad y mayor resistencia mecánica.

{pagebreak}

#### Propiedades dieléctricas del vacío

En principio, el vacío es un medio dieléctrico ideal: no hay material y por tanto no hay conducción eléctrica. Sin embargo, el vacío nunca es perfecto y desde luego tiene un límite de resistencia dieléctrica.

A pesar de todo, el «vacío» real tiene unas características espectaculares: a la presión de 10<sup>-6</sup> bar, la rigidez dieléctrica en campo homogéneo puede alcanzar una tensión de cresta 200 kV para una distancia interelectrodos de 12 mm.

El mecanismo que hay en el origen de la ruptura dieléctrica en el vacío está vinculado a los fenómenos de emisión electrónica fría, sin efecto de avalancha por ionización. Este es el motivo por el que su resistencia dieléctrica no depende prácticamente más que de la presión cuando ésta es inferior al 10<sup>-6</sup> bar. Esta rigidez dieléctrica depende entonces de la naturaleza de los materiales, de la forma de los electrodos (en particular de la presencia de asperezas) y de la distancia interelectrodos. La forma de la curva que da la tensión de perforación en función de la distancia intercontactos (figura 21) muestra por qué el campo de aplicación del vacío permanece limitado en tensión. En efecto, las distancias necesarias para la resistencia dieléctrica aumentan muy rápidamente cuando la tensión sobrepasa de 30 a 50 kV lo que conlleva costos prohibitivos con relación a las otras tecnologías. Además está la emisión de rayos X cuando la tensión se eleva.

#### El mecanismo de corte en el vacío

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

- El arco eléctrico en el vacío

El arco se compone de vapores metálicos y de electrones que provienen de los electrodos de manera distinta a las otras técnicas de corte mencionadas anteriormente en las cuales esta columna se compone principalmente por el gas

intercontactos ionizado por colisiones. El arco puede tener dos aspectos concentrado o difuso, según la

intensidad de corriente que lo atraviesa.

---

## SUR

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

- Para valores de corriente inferiores a algunos miles de amperios, este arco se encuentra en forma difusa. Se compone de varios arcos separados unos de los otros, de forma cónica cuyo vértice está en el cátodo (figura 26b). Sus raíces catódicas, llamadas manchas, tienen una superficie muy pequeña (10-5 cm<sup>2</sup>) y la densidad de corriente es muy elevada (105 a 107 A/cm<sup>2</sup>). Las temperaturas locales muy altas (3000 K) implican una emisión combinada

termoelectrónica/efecto de campo muy intensa para una evaporación del material de contacto moderada. La corriente entonces es Los iones metálicos positivos producidos en el cátodo tienen una energía cinética tal (entre 30 y 50 eV) que pueden ocupar todo el espacio hasta el ánodo. Así neutralizan las cargas de espacios intercontactos, de lo que resulta un pequeño gradiente de potencial y una baja tensión de arco (como máximo 80 V).

- Paso por el cero de corriente

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

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

producen con frecuencia al aplicar esta tecnología.

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

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

- Fenómenos de reencendido y de disparo indeseado

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

De forma general, estos fenómenos son poco reproducibles y difíciles de modelizar. Se necesitan numerosos ensayos para validar los diseños. En particular, se pueden observar fallos dieléctricos tardíos posteriores al

corte,  
posiblemente fugaces, relacionados con la presencia de partículas o condensaciones de metal.

Las distintas tecnologías de corte en vacío

Todos los constructores se encuentran frente a las mismas exigencias:

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

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

- Elección del campo magnético

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

- La tecnología del campo magnético radial (figura 27)

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

{pagebreak}

- La tecnología del campo magnético axial (figura 28)

La aplicación de un campo magnético axial imprime a los electrones y a los iones una trayectoria helicoidal siguiendo las líneas del campo magnético. Esto estabiliza el arco difuso y dificulta la aparición del régimen concentrado.

La aparición de marcas anódicas se evita y la erosión queda limitada, lo que permite alcanzar potencias de corte elevadas.

---

---

**SUR**

---

---

**SUR**

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

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

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

---

## SUR

### - Elección de los materiales

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

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

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

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

Los contactos con aleación cobre/cromo (50-80% Cu, 50-20% Cr) se utilizan en la

mayoría de disyuntores por su resistencia a la erosión, su baja resistividad y su baja presión de vapor.

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

a la soldadura. En lo que se refiere a los otros elementos en contacto con el vacío, los materiales cerámicos asociados con el proceso de soldado a alta

temperatura son, por el momento, los más adecuados para mantener un nivel de vacío extremado (presión habitual inferior a 10<sup>-6</sup> mbar).

{pagebreak}

### - Concepción de la envolvente y del dispositivo de corte

La limitación esencial es la estanqueidad de la cámara de vacío: por ejemplo, las piezas móviles que la atraviesan deben evitarse. La sensibilidad a las partículas y la posibilidad de soldadura en frío hacen que los contactos deslizantes no se utilicen en el vacío. En consecuencia, los contactos son simplemente frontales y la energía de maniobra para estos aparatos es pequeña (30 a 50 J). En contrapartida, las presiones de contacto deben ser elevadas para minimizar la resistencia de contacto y evitar la separación de los contactos cuando pase una intensidad de cortocircuito.

Estas presiones de contacto necesarias imponen unas limitaciones mecánicas elevadas.

Teniendo en cuenta que las distancias de aislamiento en el vacío son pequeñas, y que los mecanismos han de ser simples, las cámaras pueden ser muy compactas. Así, su volumen es función del PdC (que incide en el diámetro de la cámara) pero es la rigidez dieléctrica externa de la envolvente la que resulta preponderante para

definir el dimensionado del aparato.

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

El mantenimiento predictivo necesario, en caso de fuga accidental, para vigilar la fiabilidad de los cuadros

eléctricos de MT no es pues aplicable con esta tecnología.

Los campos de aplicación del corte en el vacío. Esta técnica de corte permite hoy la realización de aparatos que tienen una gran durabilidad mecánica y eléctrica con unas TTR de frente muy rápida.

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

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

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

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

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

Observaciones:

- Para el corte de corrientes capacitivas, en el vacío la resistencia dieléctrica después del corte es aleatoria, y se traduce por un riesgo de reencendidos importante. De hecho, los disyuntores bajo vacío se adaptan mal a la protección de redes capacitivas con tensiones superiores a 12 kV o que incluyen baterías de condensadores.
- Con los interruptores con contactos en el vacío hay un riesgo de soldadura de contactos, en particular después de un cierre sobre un cortocircuito. Este es el caso en algunas operaciones de explotación, por ejemplo para reparar un defecto, o en el ciclo de ensayos previstos por las normas. En efecto, después de una abertura sin carga, la ausencia de arco no permite eliminar las asperezas dejadas por la rotura de la soldadura, soldadura realizada después del cierre en carga. Este deterioro del estado de la superficie facilita todavía más el preencendido después de cierres sucesivos y amplifica la importancia de las soldaduras, con el riesgo de una soldadura definitiva.

El empleo de estos interruptores exige pues algunas precauciones.

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

### 3.5 El corte en el SF<sub>6</sub>

El hexafluoruro de azufre &ndash;SF<sub>6</sub>&ndash; es un gas apreciado por sus numerosas cualidades químicas y dieléctricas. La técnica de corte en este gas ha sido desarrollada, en los años 70, simultáneamente con la del vacío.

Propiedades del SF<sub>6</sub>

- Propiedades químicas

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

agua.

Es químicamente inerte: sus moléculas tienen todos sus enlaces químicos saturados y una energía de disociación elevada (+ 1096 kJ/mol) así como una gran capacidad para evacuar el calor producido por el arco (entalpía elevada).

Durante el período de arco, bajo el efecto de la temperatura que puede alcanzar 15 000 ó 20 000 K, el SF<sub>6</sub> se descompone. Esta descomposición es casi reversible: cuando la intensidad disminuye, la temperatura disminuye y

entonces los iones y los electrones se recombinan para reconstruir la molécula SF<sub>6</sub>.

En presencia de impurezas, tales como el dióxido de azufre o el tetrafluoruro de carbono, se genera una pequeña cantidad de subproductos de la degradación del SF<sub>6</sub>. Estos subproductos permanecen confinados en las cámaras y se absorben muy fácilmente por elementos activos como el silicato de aluminio frecuentemente emplazados dentro de la envolvente del aparato de corte.

El informe 61634 de la CEI sobre la utilización del SF<sub>6</sub> en la aparata de corte da unos valores típicos de subproductos encontrados después de varios años de servicio. Las cantidades producidas se mantienen pequeñas y sin riesgo para las personas ni el entorno: aire (unas pocas ppmv), CF<sub>4</sub> (40 ppmv a 600 ppmv), SOF<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> (en cantidad despreciable).

- Propiedades físicas
- Propiedades térmicas

La conductividad térmica del SF<sub>6</sub> es equivalente a la del aire, pero el estudio de la curva de conductividad térmica del SF<sub>6</sub> a temperaturas elevadas indica un pico a la temperatura de disociación del SF<sub>6</sub> (figura 30).

---

## SUR

- Propiedades dieléctricas

El SF<sub>6</sub> tiene una rigidez dieléctrica muy elevada gracias a las propiedades muy electronegativas del flúor (figura 21):

&ndash; Sus electrones libres tienen una vida media muy pequeña y, con las moléculas de SF<sub>6</sub>, forman unos iones pesados de poca movilidad.

La probabilidad de ruptura dieléctrica por avalancha queda así retardada.

&ndash; Confiere a su entorno una constante de tiempo de desionización muy pequeña, del orden de 0,25 s (figura 19).

El mecanismo de corte en el SF<sub>6</sub>

- El arco eléctrico en el SF<sub>6</sub>

Su estudio térmico permite describirlo como que está formado por un plasma de SF<sub>6</sub> disociado, de forma cilíndrica, constituida por un núcleo a una temperatura muy elevada en función de la corriente cortada, envuelto de una vaina de gas

más frío. El núcleo y la vaina están separados por una zona de transición de temperatura ligada a la temperatura de disociación de la molécula.

Cerca de 2 000°C, esta zona de transición permanece sin cambios cuando la intensidad de la corriente varía (figura 31).

---

## SUR

Durante el período de arco, la totalidad de corriente se transporta por el núcleo puesto que la temperatura de la zona de transición es inferior a la temperatura mínima de ionización y la vaina exterior se mantiene aislante. Las características generales del arco dependen del tipo de corte utilizado (auto-compresión, arco giratorio, auto-expansión) y se indican en los párrafos que tratan de cada uno de estos tipos de corte.

- Paso por cero de corriente

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

Al acercarse el cero de corriente, los intercambios térmicos entre la vaina y el núcleo resultan muy importantes. El núcleo desaparece, implicando la desaparición de la conductividad con una constante de tiempo muy pequeña

(0,25 s) pero insuficiente para cortar las corrientes de alta frecuencia (no los reencendidos).

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

En los aparatos de SF6, los contactos están situados en el interior de una envolvente cerrada y rellena de gas cuya presión varía según la

tensión y los parámetros de diseño. Estas envolventes generalmente están selladas de por vida puesto que se ha conseguido que las tasas

de fuga estén a un nivel muy bajo. Pueden instalarse unos sistemas de presostatos o de densímetros que permitan controlar permanentemente la presión del gas dentro de la envolvente. Existen muchas tecnologías de aparatación con SF6 que difieren por el modo de enfriamiento del arco y cuyas características y campos de aplicación varían.

- El corte por auto-compresión

En este tipo de disyuntor, la expansión de un volumen de SF6 comprimido por un pistón sopla el arco. Al abrir el aparato, un cilindro solidario con

el contacto móvil se desplaza y comprime un volumen de SF6 (figura 32a). Un tubo de soplado canaliza el gas hacia el centro del arco. El gas se evacúa a través de los contactos huecos.

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

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

- Magnitudes características

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

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

— La capacidad para soportar la tensión de los ensayos de entrada/salida, lo que condiciona la distancia

de aislamiento entre los contactos abiertos. Ésta puede ser constante y del orden de 45 mm teniendo en cuenta las presiones de SF6 utilizado.

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

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

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

{pagebreak}

- Campos de aplicación del corte por autocompresión

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

el riesgo de reencendidos sucesivos.

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

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

---

## SUR

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

- El corte por arco giratorio

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

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

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

Gracias al movimiento rápido de las chispas del arco, los puntos calientes que desprenderían vapores metálicos se evitan y la erosión de los contactos es mínima, en particular en el caso de la geometría axial. Hay que notar que al aproximarse el cero de corriente, el campo magnético disminuye. Es importante que

conservar un valor nulo de manera que el arco se mantenga en movimiento dentro del SF<sub>6</sub> frío en el momento de la aparición

de la TTR, y que así se evite la existencia de corrientes críticas. Esto se obtiene insertando anillos en cortocircuito que obligan a que el campo magnético esté en ligero desfase con la corriente.

#### - Magnitudes características

En MT, el arco giratorio en SF<sub>6</sub> tiene una tensión de 50 a 100 V para una longitud de 15 a 25 mm. Gracias a la pequeña energía de corte, los aparatos son muy compactos, incluso con una presión de relleno relativamente pequeña (de orden de 2,5 bar) y la energía de mando para la obertura que es inferior a 100 J.

#### - Campos de aplicación

La tecnología de corte por arco giratorio se adapta bien al mando de máquinas sensibles a las sobretensiones tales como motores de MT y alternadores. Su excelente resistencia mecánica, debida al pequeño desgaste de los contactos y a

las energías pequeñas de mando, la hace muy interesante para aplicaciones con un gran número de maniobras (función contactor).

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

#### - El corte por auto-expansión

Utiliza la energía térmica disipada por el arco para aumentar la presión de un pequeño volumen de SF<sub>6</sub> que se escapa por un orificio atravesado por el arco (figura 33a). Cuanto más importante es la intensidad del arco, mayor es el efecto tapón que dificulta el escape del gas a través del orificio. El gas frío bloqueado en este volumen aumenta de temperatura, a causa de la disipación térmica del arco (principalmente por radiación), y por lo tanto su presión también aumenta. En el cero de corriente, el tapón desaparece, el SF<sub>6</sub> se expande y sopla el arco.

El efecto de soplado depende del valor de la corriente, de donde resultan energías de mando pequeñas y cortes suaves, pero con un riesgo de existencia de corrientes críticas. Éstas se encuentran generalmente alrededor del 10% del PdC.

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

&ndash; El guiado mecánico (tipo auto compresión) (figura 33b)

El arco se mantiene centrado entre los contactos por unas paredes aislantes que

confinan los flujos gaseosos de manera parecida a los tubos huecos utilizados en autocompresión.

Esta técnica, desarrollada por todos los grandes constructores, es segura y sencilla pero aumenta la energía necesaria para la actuación.

En efecto, la presencia de estos dispositivos en la zona de arco disminuye las características dieléctricas del SF<sub>6</sub> durante el período de restablecimiento, lo que implica aumentar las distancias entre electrodos y las velocidades de

desplazamiento de los contactos, y por tanto la presión del SF<sub>6</sub>.

&ndash; El guiado magnético (tipo arco giratorio) (figura 33c)

Un campo magnético hábilmente dimensionado permite centrar el arco en la zona de expansión del SF<sub>6</sub> al tiempo que le imprime un movimiento de rotación rápido de manera parecida a la tecnología del arco giratorio. Esta tecnología

necesita una gran maestría de concepción y tiene la ventaja de evitar la presencia de otros materiales que no sean SF<sub>6</sub> en la zona del arco.

El rendimiento termodinámico es óptimo y el SF<sub>6</sub> mantiene todas sus cualidades dieléctricas. Así las distancias de aislamiento pueden reducirse al máximo, y la energía de actuación necesaria es pequeña.

- Magnitudes características

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

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

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

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

Todas estas características hacen que el corte por auto-expansión sea hoy la tecnología de mejor rendimiento.

Sus capacidades de corte pueden ser muy elevadas con unas presiones y unas energías de actuación pequeñas, y por

tanto con una fiabilidad muy elevada.

{pagebreak}

- Ámbitos de aplicación

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

También es adecuada para el corte de corrientes ligeramente inductivas.

Sin un medio auxiliar, los aparatos de expansión térmica tienen un PdC y una tensión de empleo limitadas. La auto-expansión, por tanto, se asocia con frecuencia a la auto-compresión con arco giratorio o con pistón.

Entonces se utiliza

en los aparatos destinados a la MT e incluso a la AT, y en ésta para todas sus aplicaciones.

Los resultados alcanzados gracias a la asociación de la expansión térmica y del arco giratorio son tales que se ha considerado utilizar estas técnicas para disyuntores destinados a aplicaciones muy exigentes, por ejemplo la

protección de alternadores de centrales (fuerte asimetría y TTR elevada), o que requieren una elevada resistencia mecánica.

---

## SUR

### 3.6. Comparación de las distintas técnicas

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

En MAT, la técnica de corte en el SF<sub>6</sub> es prácticamente la única que se instala.

Para la MT, en la que se pueden utilizar todas las técnicas, las de corte en SF<sub>6</sub> y en el vacío han sustituido las del aire por razones de costo y de dimensiones externas (figura 34)

---

## SUR

y las del aceite por razones de fiabilidad, de seguridad y de reducción del coste de mantenimiento (figura 35).

---

## **SUR**

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

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

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

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

{pagebreak}

---

## **SUR**

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

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

- En funciones de mando (contactor, tensión e intensidad moderadas, exigencia de gran resistencia mecánica), la técnica del vacío está muy extendida a pesar de las precauciones que hay que tomar con las sobretensiones. Por contra es casi inexistente en las funciones de apertura (interruptor) por razones económicas; en particular, la excelente rigidez dieléctrica del SF6 después del corte permite integrar en un solo aparato las funciones de corte y de seccionamiento, cosa que con el vacío está proscrita.

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

### 3.7 ¿Cuáles son las posibilidades de otras técnicas?

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

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

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

Estas particularidades hacen que sea necesario asociarles:

- radiadores,

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

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

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

En MT, las aplicaciones son muy raras y los disyuntores estáticos están todavía en estado de prototipo, puesto que, además de sus puntos débiles citados arriba, para aguantar la tensión asignada, necesitan de muchos componentes en

serie. En conclusión, salvo para aplicaciones muy particulares, el corte estático no tiene hoy un gran desarrollo. Cortar gracias al arco eléctrico sigue siendo actualmente la solución insoslayable.

#### 4 Conclusión

De todas las técnicas de corte en MT, el corte en el SF6 y el corte en el vacío se imponen por sus resultados. La elección entre el vacío y el SF6 depende, sobre todo, del ámbito de aplicación y de las elecciones tecnológicas de los constructores así como de los países: de ahí vienen las disparidades en el reparto geográfico de los aparatos que utilizan SF6 o el vacío.

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

- La seguridad: no hay riesgo de explosión, incendio ni de manifestaciones exteriores después del corte.
- Las reducidas dimensiones: el vacío y el SF6 son muy buenos aislantes, por tanto los aparatos son menos voluminosos.
- La fiabilidad: pocas piezas en movimiento con una energía de mando pequeña, de lo que resulta un mantenimiento reducido, una disponibilidad importante, y una duración de vida muy larga.
- La puesta en envolvente más fácil de estos aparatos y la realización de celdas de tensión prefabricadas muy compactas es otra ventaja importante ya que el PdC no está influenciado por la presencia de barreras mecánicas.

Gracias a los medios de cálculo actuales que permiten la modelización y la simulación, la aparamenta mejora sin cesar. Sin embargo, los avances más importantes en términos de seguridad de funcionamiento de las instalaciones

(fiabilidad, seguridad, mantenibilidad) están vinculados a la utilización generalizada de equipos bajo envolventes prefabricadas, probadas en fábrica. Con estos equipos se forman los aparatos de corte asociados a sistemas integrados de protección y de control.

Bibliografía: «Reproducción del Cuaderno Técnico n° 193 de Schneider Electric».