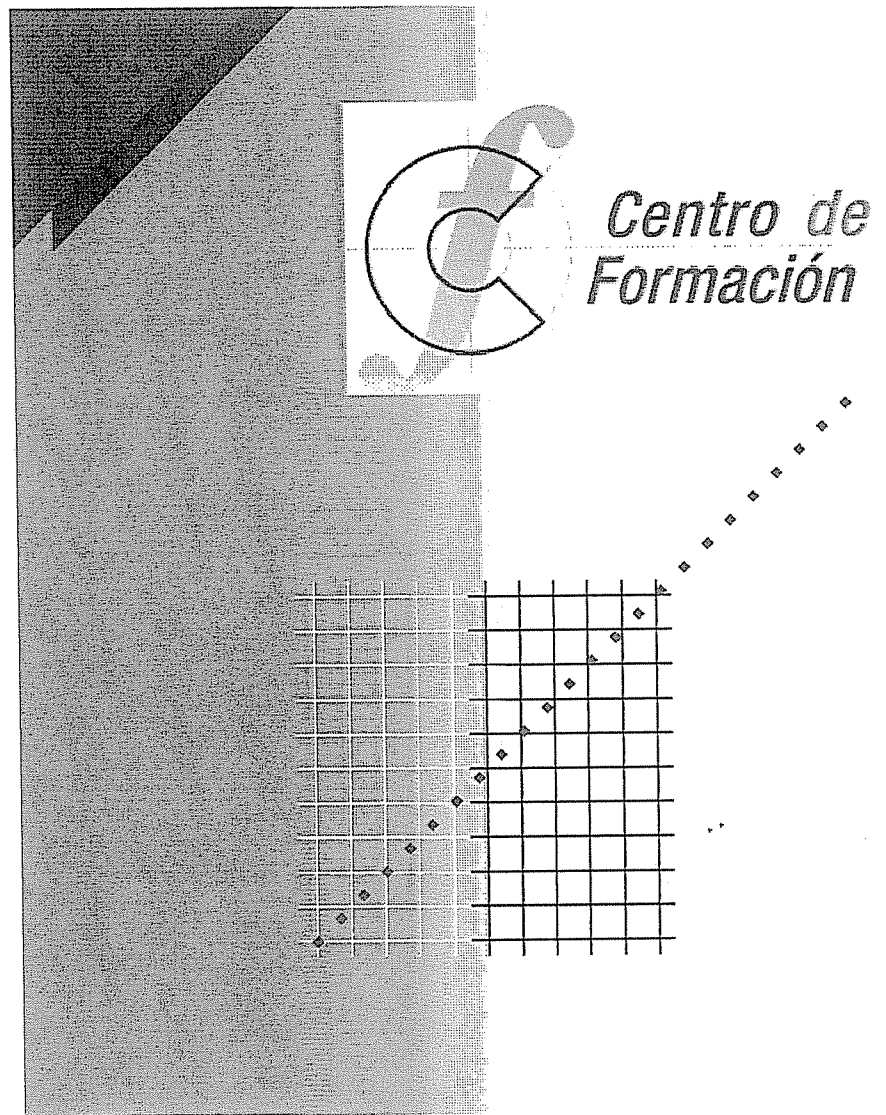
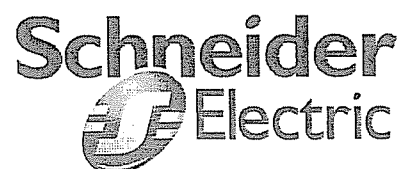


El proceso de ruptura con interruptores automáticos de SF6 por autocompresión tipo fluarc

Edición: Enero 1993



CT-112





cuaderno técnico

n° 112

**el proceso de
ruptura con un
interruptor
automático en
SF6, por
autocompresión,
tipo Fluarc**

Por: J. Hennebert

Trad.: E. Milà

el proceso de ruptura con un interruptor automático en SF6 por autocompresión, tipo Fluarc

Resumen

Seguidamente del recordatorio breve sobre el funcionamiento de un aparato de corte por autocompresión en SF6, el autor estudia con detalle los fenómenos físicos que se desarrollan, tras la separación de los contactos, en el periodo comprendido hasta el paso por cero de la corriente y en el instante del cero de corriente, presentando las posibilidades de simulación del funcionamiento.

La misión principal de los interruptores automáticos es de interrumpir todas las corrientes: de carga o de defecto. Esencialmente son aparatos con contactos separables, cualquiera que sea la técnica de corte utilizada. Inevitablemente se producirá en ellos un arco eléctrico, a partir del instante de separación de los contactos, hasta el paso natural de la corriente por cero, cuyo valor permanecerá nulo a pesar del restablecimiento de la tensión, cuando la ruptura se ha realizado. Este arco juega un papel fundamental en la interrupción de la corriente.

Seguidamente estudiaremos los fenómenos físicos que aparecen, por su orden cronológico:

- el periodo de arco, durante el cual conviene evacuar rápidamente la energía calorífica desarrollada por el arco y cedida por la red,
- el instante del cero de corriente, a partir del cual la tensión de la red reaparece entre los contactos. Esta se define por el circuito que comprende esencialmente una fuerza electromotriz en serie con una reactancia de valor débil en paralelo con un circuito RC.

Prescindiremos del estudio de la forma de la tensión transitoria de restablecimiento centrando nuestro interés en el comportamiento del interruptor automático ante las solicitaciones durante el periodo de arco y el cero de corriente.

De entre las diferentes técnicas de ruptura, hemos elegido, para ilustrar este estudio, la ruptura por autocompresión del exafluoruro de azufre, SF₆.

Existen otras tecnologías de ruptura en SF₆, por ejemplo, por desplazamiento del arco por efecto de un campo magnético creado por la propia corriente. Las dos técnicas de corte se basan en el mismo principio de desplazamiento del arco respecto a una atmósfera de gas SF₆.

El SF₆ se ha elegido preferentemente sobre otros gases porque entre un grupo de gases inofensivos y fáciles de obtener, es un excelente agente de extinción de arco. Se le conocen sus cualidades dieléctricas que permiten minimizar la aparata de alta tensión. Es por ello:

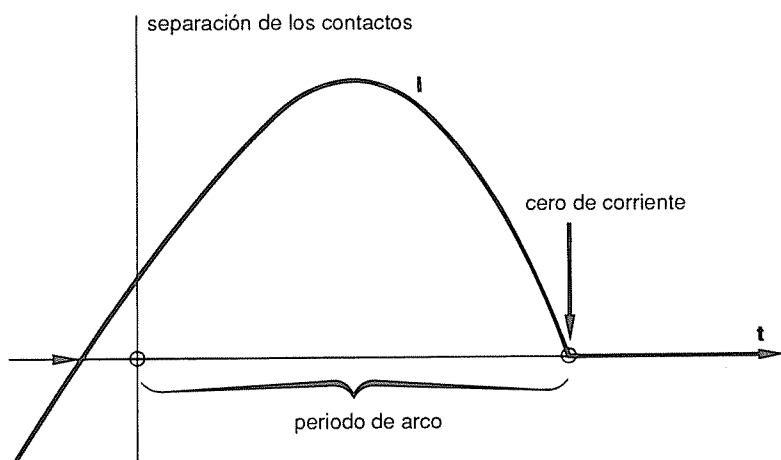


fig. 1 : esquema cronológico del proceso de ruptura

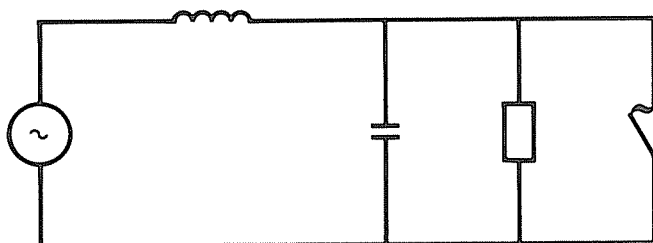


fig. 2 : esquema monofásico de ruptura de un cortocircuito

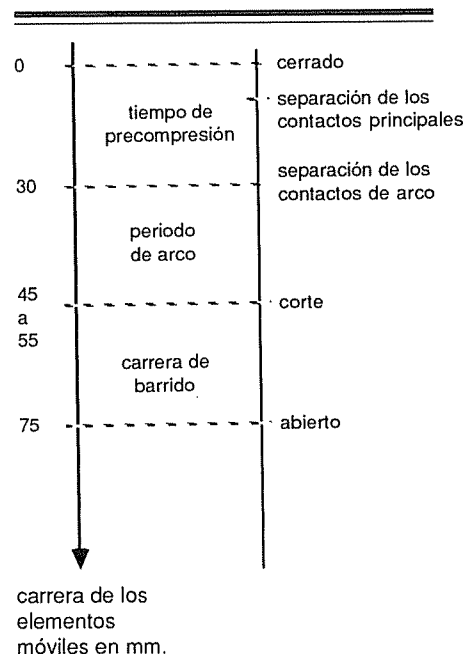


fig. 4 : funcionamiento de un automático en SF₆ por autocompresión

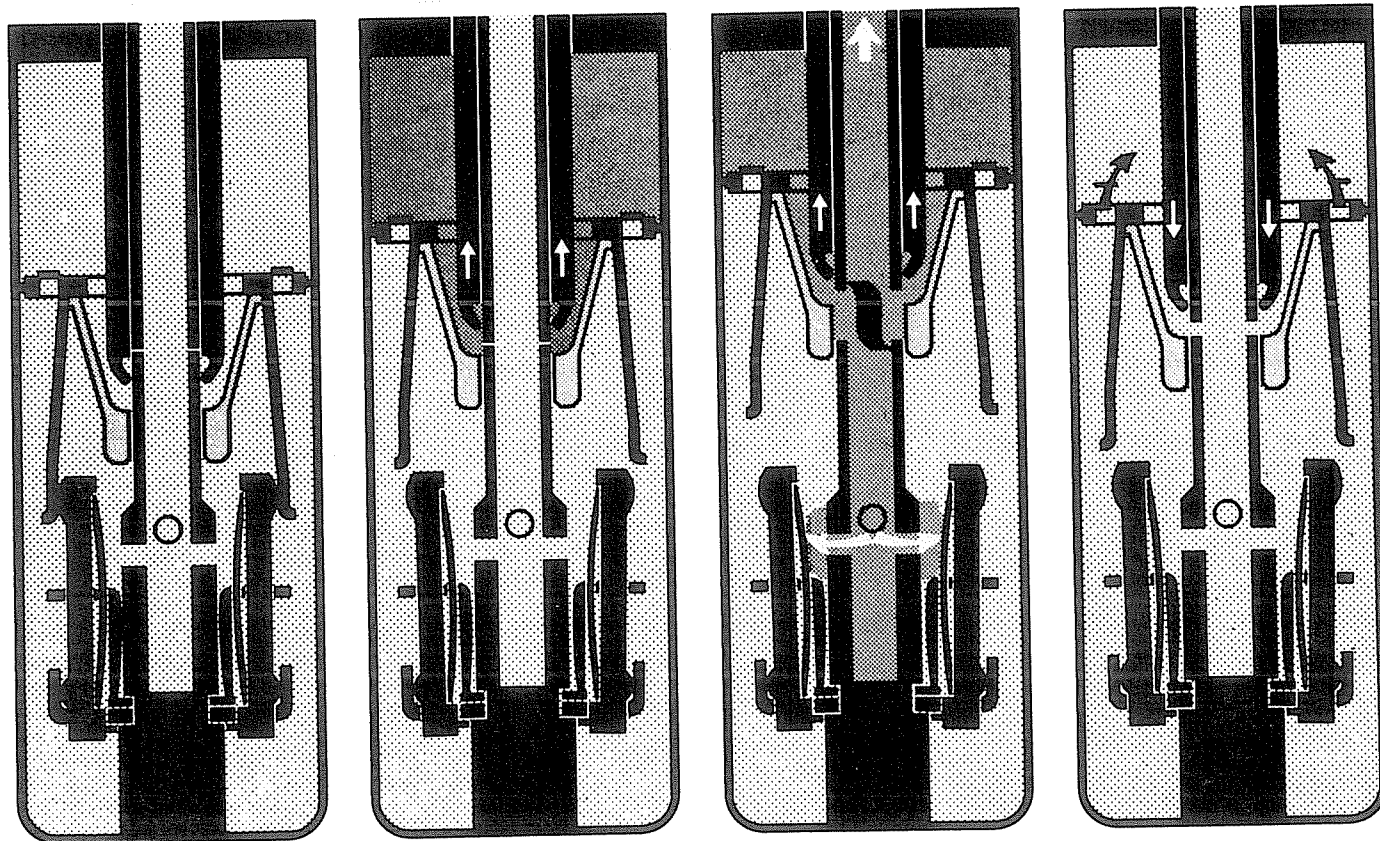
- un elemento eficaz de transporte de calor durante el periodo de arco,
- un gas fuertemente electronegativo una vez descompuesto por la energía de arco, gracias a los átomos de fluor que juegan un papel fundamental en el instante del cero de corriente.

Antes de profundizar detalladamente en

estos fenómenos, es útil la descripción, aunque breve, del funcionamiento de un aparato por autocompresión.

El soplado del arco por autocompresión es simple: el desplazamiento de las partes móviles provoca, simultáneamente, la compresión de un pequeño volumen de gas, por detrás del pistón de soplado.

El gas comprimido es retenido en el recinto durante el primer tercio del recorrido y no inicia el escape entre los contactos de arco hasta que estos se separan. Este tiempo de precompresión, permite obtener sin retraso, una diferencia de presión, es decir, una pérdida de gas por convección forzada.



Posición cerrado

Los contactos principales y los contactos de arco están cerrados.

Precompresión

El gas SF6 se comprime por el pistón solidario al contacto móvil principal. Los contactos principales se separan.

Periodo de arco

Los contactos de arco se separan. El gas comprimido es liberado y canalizado por la tobera sobre la zona de arco para enfriarlo por convección forzada.

Maniobra de cierre

Se abren unas válvulas situadas sobre el pistón, para permitir el desplazamiento rápido del gas en el curso de la maniobra de cierre.

fig. 3: esquema de funcionamiento de un interruptor automático por autocompresión (en este ejemplo los contactos principales son concéntricos a los contactos de arco).

el periodo de arco

Durante el periodo de arco, el enfriamiento del arco por convección se realiza por reemplazamiento de una cierta cantidad de gas caliente por gas frío. No se trata de un fenómeno superficial: la aportación de gas frío se realiza perpendicularmente a la dirección de escape del gas caliente para favorecer la mezcla entre ambos. El intercambio de calor que se efectúa por conducción radial es francamente débil comparado con el anterior.

Puede esperarse un intercambio de calor por radiación, considerando la elevada temperatura del arco. Realmente, la transmisión por radiación es débil ya que el arco es opaco a sus propias radiaciones y sólo radian eficazmente las capas periféricas.

Finalmente, los intercambios de calor durante el periodo de arco se efectúan principalmente por convección.

La energía transmitida por la red durante un tiempo dt a una masa dm de gas es:

$$dW = V I dt = h dm.$$

siendo:

V : la tensión de arco;

I : la intensidad del circuito y por lo tanto de arco;

h : la entalpía por unidad de masa.

También podemos decir:

$$V I dt = h \rho s dx$$

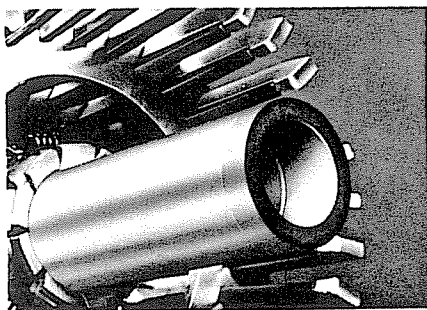


fig. 5 : contactos de Fluarc FC 2500 A poder de ruptura 40 kA a 24 kV

siendo:

ρ : la densidad;

s : la sección del arco;

dx : el camino recorrido por la masa dm durante un tiempo dt .

Con ello, $VI = h \rho s u$, con u : la velocidad de desplazamiento del gas.

La potencia transportada depende directamente de esta velocidad. Las leyes de dinámica de gases nos indican que no es posible aumentar indefinidamente esta velocidad para aumentar el escape másico de gas caliente. Es interesante mantenerse en valores próximos a la velocidad del sonido con el gas. Esta velocidad se obtiene gracias a ciertas disposiciones constructivas y a un valor suficientemente elevado de la energía de maniobra.

Los contactos tubulares facilitan el escape rápido de los gases calientes y provocan una inestabilidad de la raíz del arco que evita la erosión de los contactos de arco.

El procedimiento de soplado por auto

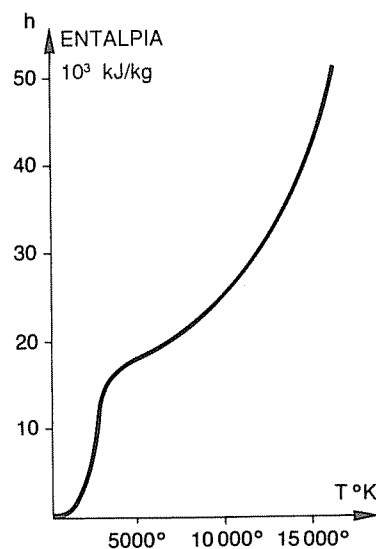


fig. 6 : entalpía del SF6 como función de la temperatura

compresión es de gran eficacia ya que la inyección de una pequeña cantidad de gas entre contactos resulta suficiente.

Con los aparatos Fluarc FB y FG, la cantidad de gas comprimido que se inyecta sobre la zona de la tobera entre contactos de arco es de unos 5 gramos en el curso de una maniobra de apertura; para limitar la temperatura del arco a unos 10.000° K ó 15.000° K. Con esto podemos evacuar el calor producido por un arco de una corriente de 25 kA que genera una energía de unos 30.000 julios.

Sobre la curva de entalpía del gas podemos ver que un gramo de gas es suficiente para transportar esta energía.

Durante el periodo de arco, el volumen ocupado por el arco en la boca de la tobera depende del valor instantáneo de la corriente. La sección del arco es proporcional al valor de la corriente y sigue, consecuentemente, la misma ley senoidal en su variación temporal. Para valores elevados de la corriente, el arco puede ocupar totalmente el volumen

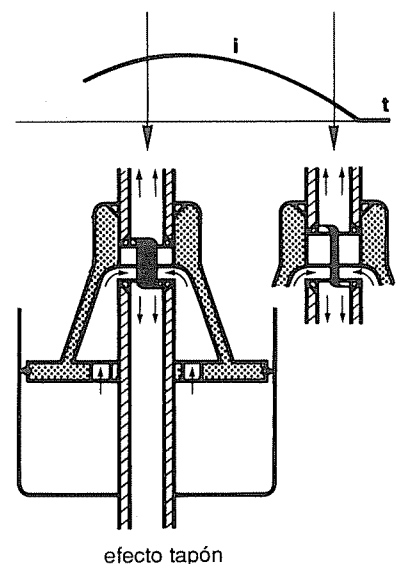


fig. 7 : efecto tapón

disponible, bloqueando la circulación del gas. Es efecto, se ha comprobado que el escape másico del gas del arco es mucho más débil que el del gas frío que rodea al arco ya que la densidad del gas es muy baja a la temperatura del arco. Se produce lo que llamamos "efecto tapón".

El escape másico total en la boca de la tobera es débil cuando los valores instantáneos de la corriente son elevados, pero aumenta rápidamente cuando la corriente disminuye y un instante antes del cero de corriente es superior al valor que corresponde a una apertura sin corriente.

El efecto tapón es favorable por dos razones:

- el interruptor automático que abre una corriente de valor elevado retiene en reserva una mayor cantidad de gas que cuando el mismo aparato interrumpe corrientes más débiles. No funciona regularmente, cualquiera que sea el valor de la corriente: se prepara mejor para el intercambio térmico al paso por cero del valor de la corriente cuando ésta es elevada y evita la interrupción brutal de

las corrientes débiles ya que la aportación másica en vacío es pequeña.

- la interrupción de una corriente elevada provoca una retención sobre la maniobra de apertura. Esta retención limita la separación de los contactos, es decir, la longitud del arco y finalmente la energía disipada en el arco. Es importante señalar que el arco es relativamente corto, del orden de unos 15 mm para un aparato de 12,24 ó 36 kV, es decir, inferior al diámetro de los contactos.

El efecto tapón sobre el aparato Fluarc FG2 debe ajustarse con exactitud. Si es poco notable, desaparecen las ventajas indicadas anteriormente. Si es importante, el efecto de frenado es excesivo, la distancia entre contactos en el instante del cero de corriente es insuficiente y la rigidez dieléctrica no puede soportar la tensión transitoria de restablecimiento. Añadiendo una masa sobre el pistón móvil, es decir, exactamente en el punto de la cadena cinemática que sufre el frenado, se limita el efecto de retención; para los valores mayores de corriente se obtiene un punto óptimo de frenado con una energía de maniobra razonable.

Son suficientes unos 250 joules para efectuar una maniobra de apertura. Es similar a la energía necesaria para abrir un interruptor automático con un principio de ruptura diferente.

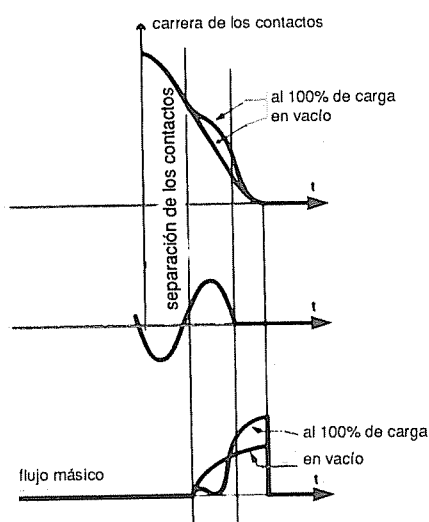


fig. 8: carrera de los contactos

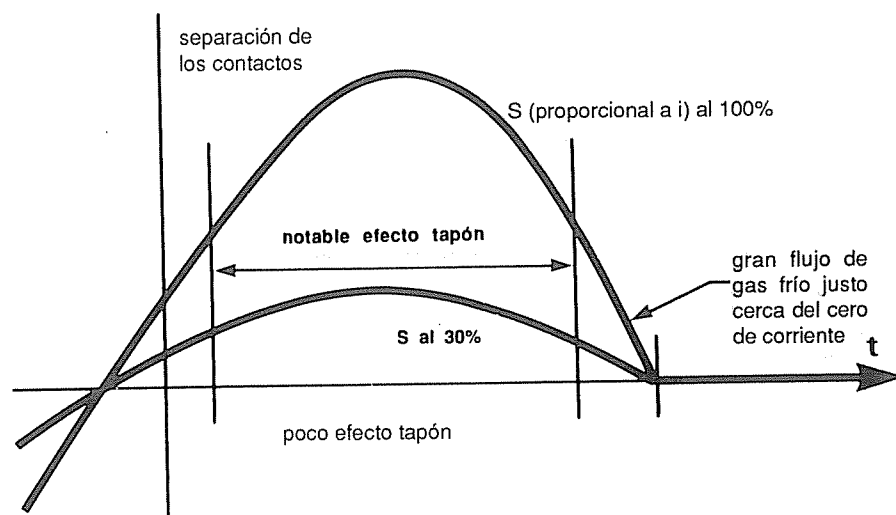


fig. 9 : variación de la sección de arco de 30% y 100% del poder de ruptura

el cero de corriente

En las proximidades del paso de la corriente por cero, el enfriamiento del arco se efectúa principalmente por conducción radial. Si analizamos el gráfico de la curva 10 podemos deducir las condiciones en que se produce esta buena conducción.

Podemos observar, sobre esta curva, un pico de conductividad térmica realmente pronunciado sobre los 2.100° K.

El arco se confina a un pequeño diámetro, donde aún es conductor y está rodeado por una corona de gas menos caliente que si bien no conduce la corriente, si transmite muy bien el calor.

Este intercambio de calor con el gas frío se efectúa rápidamente. Otra propiedad del SF6 muy interesante es la constante de tiempo de conductividad eléctrica que es débil. Cálculos verificados experimentalmente muestran que esta constante de tiempo es del orden de los microsegundos, es decir, cien veces el valor menor que corresponde a la mayoría de otros gases y del aire en particular.

Por un examen a escala molecular podemos explicar el buen funcionamiento del gas SF6. Comienza a disociarse hacia los 2.000° K. A los 2.400° K se

halla disociado a la mitad, precisamente cuando el aire alcanza este estado a una temperatura de 7.000° K.

Cuando a temperaturas elevadas, se produce el fenómeno que el SF6 es conductor la disociación es completa.

El arco se compone de un cierto número de moléculas y átomos neutros e ionizados como también de electrones libres. Aparte de estas partículas, el fluor juega un papel fundamental a causa de su afinidad electrónica. Con la extinción del arco se produce una reducción brutal del número de electrones libres.

Para confirmar esta hipótesis se ha medido la concentración de iones negativos creados por esta captura.

El valor medio en iguales condiciones, es del orden de 100 veces más grande que en el aire.

Un poco antes del cero de corriente, es la totalidad del volumen de gas comprendido entre los contactos el que reduciendo la temperatura, desciende por debajo de los 2.000° K. Precisamente, en estas condiciones la recombinación de partículas en moléculas de SF6 es

casi total.

Seguido de una ruptura fallida al paso de la corriente por cero, las partes móviles siguen su movimiento para conseguir la separación suficiente, compatible con el nivel de aislamiento del material. Esta prolongación de la carrera, continuando la autocompresión, provoca un limpiado del volumen entre contactos y evita cualquier reencendido tardío.

El dieléctrico que asegura el aislamiento entre contactos es el gas SF6 que conserva las propiedades dieléctricas iniciales. El desgaste de volumen de gas es despreciable ya que la descomposición del SF6 por altas temperaturas es totalmente reversible.

Sólo hay que considerar el desgaste de los contactos de arco. Estas circunstancias son favorables al usuario que puede desentenderse del estado del gas y que puede, si desea, constatar el nivel de desgaste de los contactos del interruptor automático sin necesidad de abrir los polos, ni efectuar otras verificaciones. Las diferencias de carrera o longitud sobre la pletina que está unida mecánicamente a los contactos, corresponden directamente al desgaste de los contactos de arco nuevos o usados. En resumen, los diferentes sistemas de intercambio de calor en un interruptor automático en SF6 por autocompresión son:

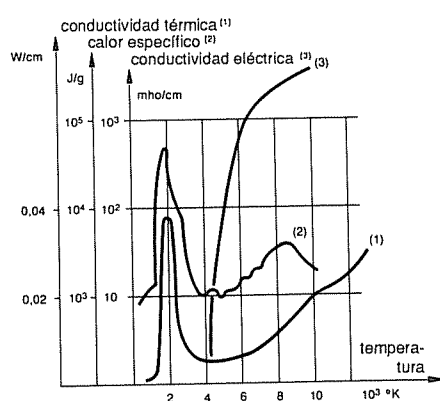


fig. 10 : conductibilidad térmica y eléctrica del SF6 en función de la temperatura

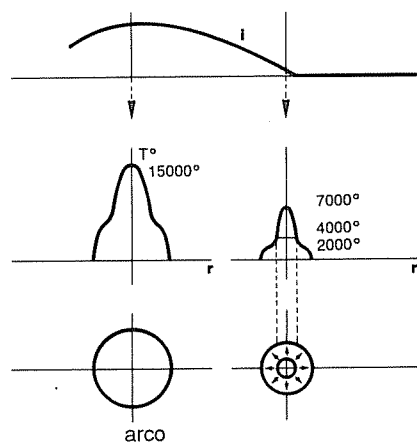


fig. 11 : enfriamiento por conductividad térmica radial

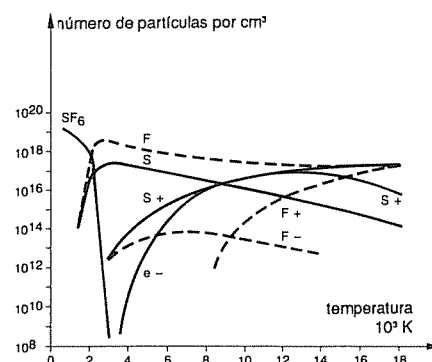


fig. 12 : número de partículas por cm³ en función de la temperatura

	conducción radial	convección	radiación
periodo de arco	intercambio débil	intercambio importante	intercambio débil
cero de corriente	intercambio importante	intercambio débil	intercambio débil
después del corte	intercambio débil	intercambio importante	nada de intercambio

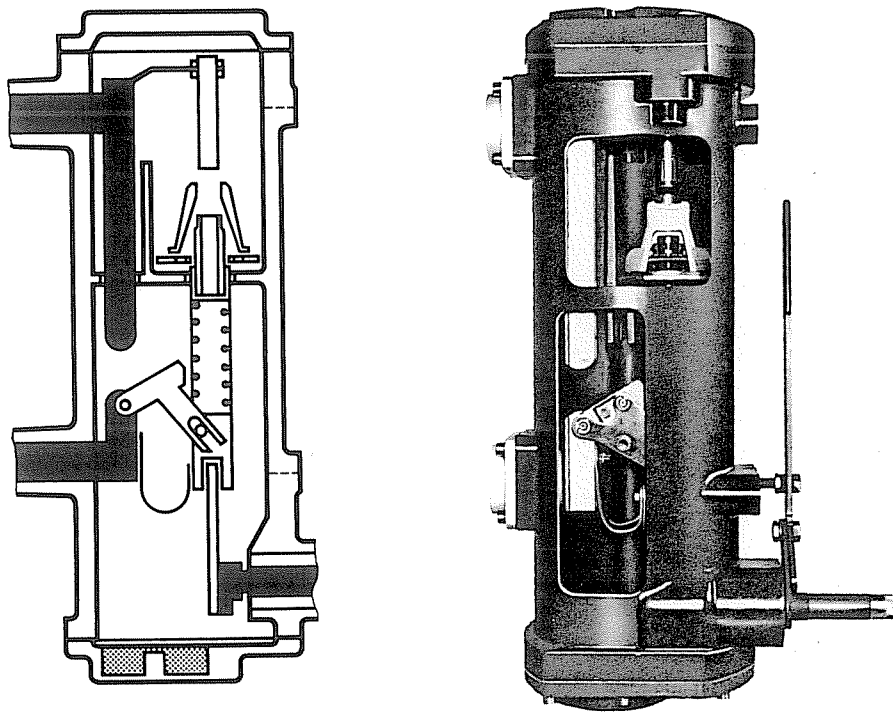


fig. 14 y fig. 15 : Fluarc FG2 parte activa

simulación del funcionamiento

Se han realizado progresos importantes en los estudios encaminados a las previsiones de funcionamiento y dominio de la tecnología de los interruptores automáticos de autocompresión debido, por una parte, a la simplicidad de los fenómenos del proceso en comparación con otras tecnologías de corte y por otra parte, causadas por los avances científicos realizados en el conocimiento de las constantes físicas y de tratamiento de las informaciones.

El cálculo no indicará formalmente si el aparato podrá cortar una corriente determinada a una tensión establecida, pero sí permitirá determinar la mayor parte de los parámetros mecánicos y

termodinámicos a considerar durante la maniobra de ruptura del aparato.

Podemos determinar los movimientos de los contactos del interruptor automáticos en vacío utilizando las leyes clásicas a partir de los esfuerzos motores obtenidos por la acción de los resortes y los esfuerzos resistentes que aparecen por el aumento de la presión tras el pistón; las masas en movimiento se sitúan como una masa única equivalente en un punto determinado del circuito cinemático, para las necesidades de cálculo. Seguidamente escribimos la ecuación básica:

$$\text{esfuerzo} = \text{masa} \times \text{aceleración}$$

que integramos para obtener la ecuación recorridos-tiempos.

A partir de este punto podemos ya elegir diferentes parámetros geométricos. La experiencia ha confirmado los valores obtenidos para unos valores estadísticos elegidos.

Para llegar a la simulación del funcionamiento en carga, se aplica la teoría del tapón gaseoso, disminuyendo la sección en la zona de la tobera en un valor igual a la sección del arco, por una ley función del tiempo.

Los resultados del cálculo se confrontan seguidamente con los que se han obtenido experimentalmente, para ajustar ciertos coeficientes y después de varias iteraciones. Con este proceso la precisión del cálculo ha aumentado en forma muy satisfactoria.

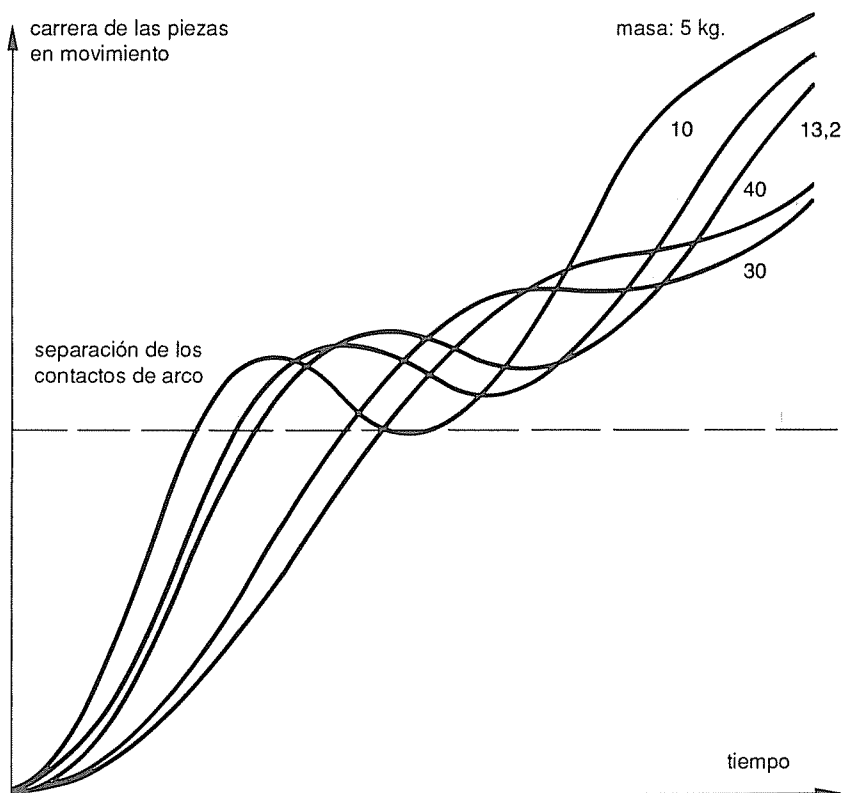


fig. 15 : carrera de los contactos de arco en función del tiempo

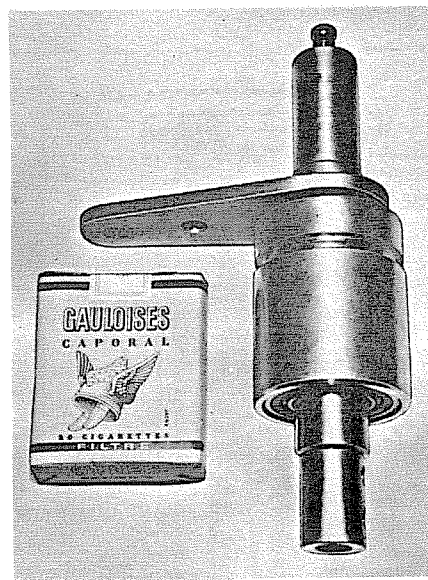


fig. 16 : El movimiento se introduce por rotación de un eje provisto de unas cámaras de estanqueidad con juntas toroidales y cámaras anulares de aceite. La garantía es para 30.000 maniobras ó 20 años sin mantenimiento alguno.

En resumen: actualmente se dispone de un útil que podemos emplear tanto para la concepción de un aparato, para conocer rápidamente las condiciones óptimas de funcionamiento (predeterminación de la geometría, los esfuerzos motores, las presiones, etc.) como, ante los ensayos, para interpretar, el comportamiento del aparato en diferentes circunstancias de funcionamiento (régimen asimétrico, conocimiento de los límites del aparato, etc.).

conclusiones

Los interruptores automáticos por autocompresión en atmósfera de SF₆, tipo Fluarc, no exigen una extraordinaria energía de maniobra. Van equipados de un mando normalizado para muchas otras técnicas de ruptura.

La concepción de una cámara estanca de larga vida sin mantenimiento, marca un importante avance sobre las técnicas de ruptura tradicionales, incluso utilizando una tecnología clásica y componentes que existen en el mercado mundial.

El dominio y la previsión de los fenómenos físicos que aparecen durante el proceso de ruptura, son considerablemente mejorados con relación a los otros medios de corte. Estos fenómenos son perfectamente repetitivos, sin dispersión notable, entre una cámara y otra. Con tales ventajas, se comprende que estos interruptores automáticos progresen más rápidamente que otros, que están mucho más condicionados a la experimentación, con el consiguiente coste de los ensayos.

bibliografía

J. Hennebert

La technique SF6, une panacée?
Revue générale de l'Electricité, déc. 77,
t 86 n° 12

Swarbrick P.

Composition et propriétés d'un plasma
d'arc d'hexafluorure de soufre.
Composition and properties of a sulfur
hexafluoride arc plasma.
British J. of Applied Physics: avril 67, pp.
419-426.

Miyamoto T., Kamatani A.

Comportement dynamique des
disjoncteurs à hexafluorure de soufre
dans la zone de courant nul.
Dynamic behaviour of SF6 gas blast
type circuit breakers around current zero.
Mitsubishi Denki Lab. Reports; n° 1, jan.
65 pp. 45-74.

Frost L. S., Liebermann R. W.

Composition et caractéristiques de
transfert du SF6. Utilisation dans un
modèle d'écoulement d'arc à enthalpie
simplifiée.
Composition and transport properties of
SF6 and their use in a simplified enthalpy
flow arc model.
IEEE, avril 71, pp. 474-484.

Perkins J. F., Frost L. S.

Influence des paramètres de buse sur la
coupure des arcs dans le SF6.
Effect of nozzle parameters on SF6 arc
interruption.
IEEE T 72 529-6 (1.972).

Perkins J. F., Frost L. S.

Caractéristiques d'interruption de courant
des arcs soufflés dans le SF6 et dans
l'air.
Current interruptio properties of gas
blasted air and SF6 arcs.
IEEE O 72 530-4 (1.972).

Muller B.

Le SF6 comme milieu extincteur de l'arc.
Schweflehexafluorid als Lichtbogen-
Loschmedium.
ETZ, partie A: juil, 73 pp. 391-395.

Korner G., Schmitz W.

Dimensionnement des disjoncteurs au
SF6 en fonction de considérations
diélectriques et de physique des plas-
mas.
Plasmaphysikalische und dielektrische
Dimensionierung von SF6
Leistungsschaltern.
ETZ, partie A, juil 73, pp. 378-383.

Hermann W., Horst R., Ragaller, K.

Interaction de l'arc de coupure et de
l'écoulement d'agents d'extinction
gazeux.
Revue Brown Boveri, avril 74, pp. 130-
134.