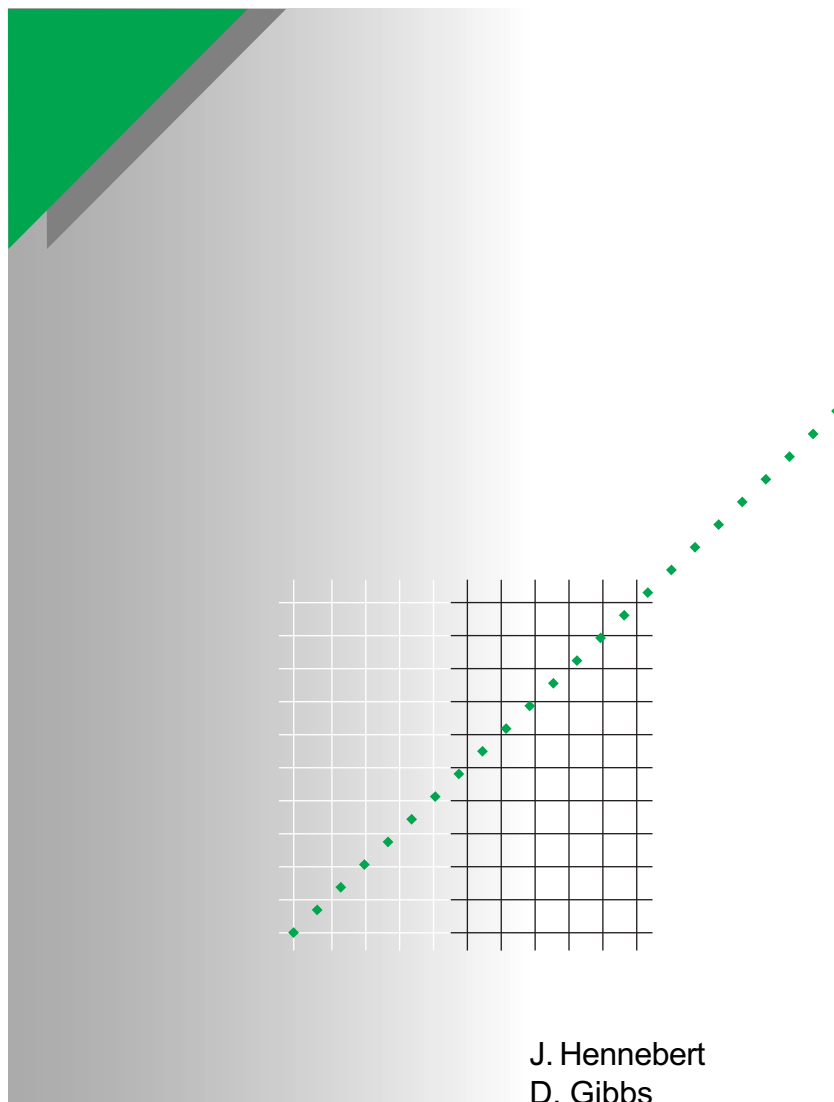


Cuaderno Técnico nº 143

Interruptor automático Fluarc SF₆ y protección de motores MT



J. Hennebert
D. Gibbs

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:
<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

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

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 143 de Schneider Electric».



cuaderno técnico

n° 143

Interruptor automático Fluarc SF6 y protección de motores MT

Por: J. Hennebert, D. Gibbs

Trad.: Dr. M. Cortes

Edición francesa: diciembre 1990

Versión española: noviembre 1995



Interrupor automático Fluarc al SF₆ y protección de motores de MT

Índice

1	Historia	p. 5
2	Ruptura por autosoplado (autoextinción)	p. 6
3	Arco giratorio	p. 8
4	Rupturas y sobretensiones de maniobra	p. 9
5	Sobretensiones y ondas de frente abrupto	p. 10
	los recebados	p. 10
	el corte brusco de la corriente	p. 13
	los precebados	p. 14
6	Aislamiento de los motores	p. 14
7	Propagación de ondas de frente abrupto en los motores	p. 15
	consecuencias de los fenómenos de sobretensión	p. 16
8	Aislamiento del motor según las normas CEI y prácticas usuales	p. 17
	aislamiento entre espiras	p. 16
	aislamiento respecto a tierra	p. 16
9	Prestaciones de los interruptores Fluarc	p. 18
	ensayos de corte	p. 18
	resultados de los ensayos	p. 19
	en la práctica	p. 19
	según la experiencia	p. 20
10	Conclusión	p. 21

1 Historia

Hasta finales de la década de los 70, los interruptores automáticos MT (media tensión) utilizaban principalmente las técnicas de ruptura en el aire y en baño de aceite.

Los interruptores automáticos en baño de aceite, a pequeño o gran volumen de aceite, eran en Europa la única alternativa tecnológica.

La mayoría de constructores de interruptores automáticos, de calificación internacional, los presentaban en sus catálogos.

Por otra parte las cualidades de los interruptores automáticos a ruptura en el aire eran muy apreciados por sus usuarios en el dominio de la distribución industrial de 6,6 a 11 kV, en Asia y en Europa y de 5 a 15 kV en el continente Americano.

Con los interruptores automáticos a ruptura en el aire, tanto para aplicaciones en BT como MT, los usuarios no se preocupaban de las

sobretensiones y muy a menudo no eran conscientes de la resistencia de este fenómeno. En efecto, gracias al soplado magnético en el aire, el gran alargamiento del arco (función del valor de la corriente cortada) y su enfriamiento permiten una ruptura dulce, sin sobretensiones excesivas.

Las técnicas de ruptura en el gas hexafluoruro de azufre -SF₆-, o en el vacío comenzaron a ser utilizadas en los años 70-75 (según el país) particularmente para los interruptores automáticos MT en los centros de transformación primarios.

El éxito de estas dos nuevas técnicas no tuvo que ser probado.

Sus ventajas son:

- una duración de vida mucho mayor que la de los interruptores automáticos en aceite,

- un mejor comportamiento en los reenganches rápidos, corte de baterías de acumuladores, etc., en comparación a los de ruptura en aceite o en el aire,

- un reducido volumen, en relación a los interruptores a ruptura en el aire.

Para reemplazar los interruptores automáticos de ruptura en el aire, en las aplicaciones industriales y particularmente en la ruptura de las corrientes de arranque de motores, el interruptor automático SF₆ es la solución, ofreciendo:

- las ventajas de una ruptura dulce,

- y un volumen mucho menor respecto a los interruptores automáticos de corte en el aire.

Por todas estas razones, después de haberse fabricado durante 35 años el interruptor automático a ruptura en el aire, tipo Solenarc, Merlin Gerin optó a partir del año 1970 por la tecnología de ruptura en el SF₆, en el sector de la media tensión.

2 Ruptura por autosoplado (autoextinción)

Todos los Fluarc son interruptores automáticos de autosoplado. Esto significa que, durante toda la vida útil de un interruptor automático -20 ó 30 años- es la misma masa del gas SF₆, contenido en un recinto cerrado estanco y sellado al vacío, la que participa en la ruptura y en el aislamiento.

Durante el período de arco, éste es enfriado por la convección del SF₆, gracias al intercambio térmico entre el gas «calentado» por el arco y el gas frío.

Más exactamente, el gas frío es impulsado perpendicularmente a la columna del arco para reforzar la mezcla de gas caliente y gas frío (fenómeno de turbulencia). Comparativamente, la energía calorífica intercambiada por conducción radial es muy poca. Cabría esperar un intercambio calorífico por radiación debido a la alta temperatura del arco. De hecho estos intercambios son ínfimos porque la radiación la producen únicamente las capas periféricas del arco. Los cambios de temperatura durante el período del arco tienen lugar, sobre todo, por convección.

La energía suministrada por el sistema, durante un tiempo dt a una masa de gas dm , es:

$$dW = V \cdot I \cdot dt = h \cdot dm,$$

siendo:

V = tensión del arco,
 h = entalpía por unidad de masa;

o bien:

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

siendo:

ρ = densidad,
 s = sección del arco durante el corte,
 dx = camino recorrido por la masa dm durante el tiempo dt .

De donde $V \cdot I = h \cdot \rho \cdot s \cdot u$, siendo u la velocidad del gas.

La energía transmitida depende directamente de esta velocidad, pero las leyes de evacuación de gases nos

enseñan que el gasto de masa no puede aumentar indefinidamente al aumentar la velocidad.

El desarrollo técnico actual hace que sea interesante mantenerse en las proximidades de la velocidad del sonido.

Esta velocidad se puede alcanzar con una geometría adecuada y con una cierta energía desarrollada en la ruptura. Tecnológicamente los contactos tubulares huecos facilitan el escape rápido del gas caliente, lo que conlleva la inestabilidad de la raíz del arco, evitando el desgaste de los contactos del mismo.

Es digna de destacar la eficacia de la técnica de soplado: sólo se necesita inyectar una pequeña cantidad de gas entre los contactos; por ejemplo, en los interruptores automáticos Fluarc FB y FG, la cantidad de gas comprimido inyectado en el cuello del tubo es de cinco gramos durante la apertura.

Para limitar la temperatura del arco, que puede alcanzar 10 000 ó 15 000 °C, al aproximarse la corriente a cero, es necesario haber evacuado la energía calorífica producida (que alcanza aproximadamente 30 000 Julios en la interrupción de una

corriente de 25 kA). La curva de entalpía del gas muestra que un gramo de SF₆ es suficiente para transportar esta energía (figura 1).

Durante el período del arco, el espacio ocupado por éste en el cuello del tubo depende del valor de la corriente instantánea.

La sección del arco, como es proporcional al valor de la corriente, está sujeta a la misma variación senoidal. Con valores elevados de corriente, el arco puede ocupar todo el espacio, impidiendo así el flujo de gas frío: es el denominado efecto «tapón» (figura 2).

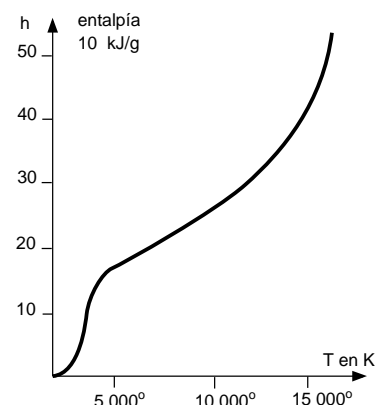


Fig. 1: Entalpía del SF₆ en función de la temperatura.

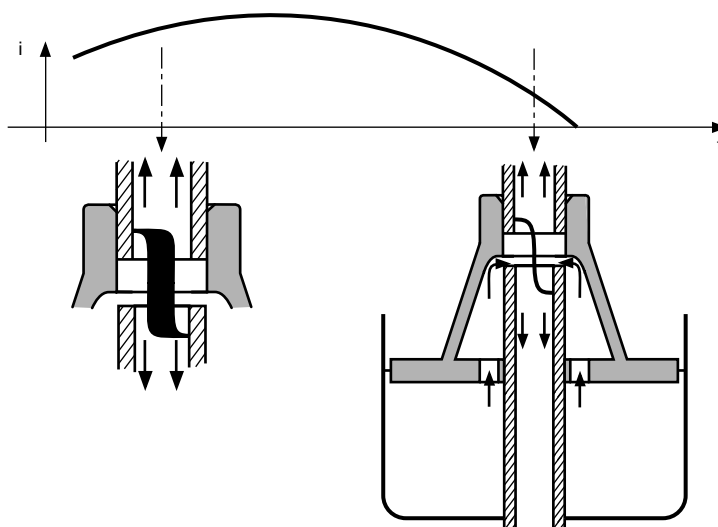


Fig. 2: Efecto tapón.

El gasto total de masa en la base del tubo es, pues, débil cuando los valores de la corriente son elevados, pero se eleva rápidamente en cuanto la corriente cesa, justo antes del cero de corriente. Esto es más importante cuando se corta una corriente débil (figura 3).

El efecto «tapón» es beneficioso por dos razones:

- cuando un interruptor automático se abre con una corriente elevada, conserva una cantidad de gas en reserva más importante que cuando interrumpe corrientes más débiles. No actúa pues «ciego» en las proximidades del cero de corriente. En consecuencia:

- con una gran corriente, el gas participa muy eficazmente en el enfriamiento y desionización del arco,

- y con corrientes débiles, el pequeño gasto de masa evita el corte brusco («arrancamiento»),

- la interrupción de una corriente fuerte implica un freno en el movimiento de la apertura. Este frenado limita la distancia entre los contactos, o sea la longitud del arco, y con ello la energía en él disipada. A título indicativo, en los aparatos de MT (12, 24 ó 36 kV) la longitud del arco es del orden de los 15 mm.

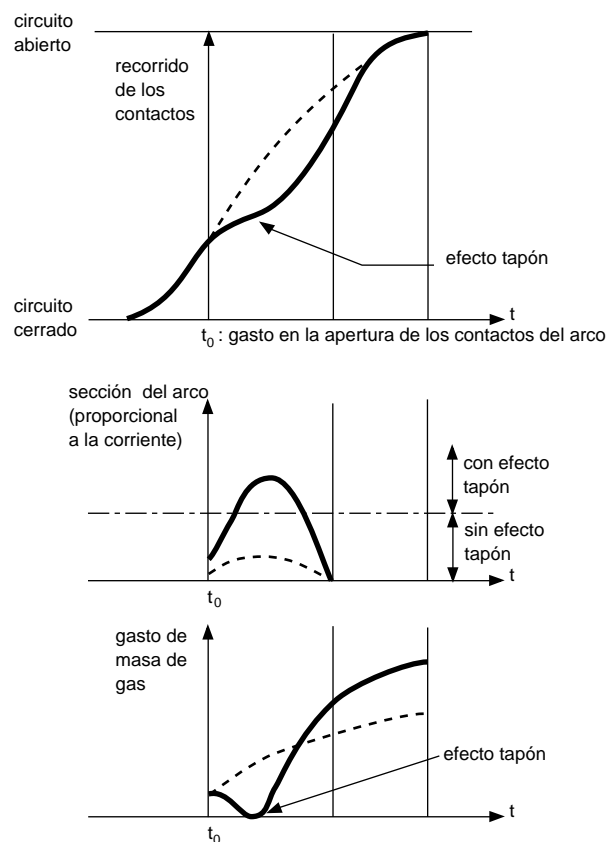


Fig. 3: Variación de la sección del arco, de la carrera de los contactos y del gasto de masa de SF_6 para un corte:

----- al 10 % del poder de corte,
 ————— al 100 % del poder de corte: efecto tapón.

3 El arco giratorio

Esta técnica se utiliza en particular en los aparatos de gran cadencia de maniobra, por ejemplo en los contactores Rollarc y en algunos interruptores automáticos.

Principio

Un conductor recorrido por una corriente y colocado en un campo magnético queda sometido a una fuerza que tiende a desplazarlo: es la ley de Laplace (campo-fuerza-corriente). Y es esta misma ley la que, aplicada a un arco eléctrico conductor, permite obtener el arco circular.

Aplicación

Después de separarse los contactos principales, la corriente a cortar pasa a través de un solenoide hasta un electrodo circular. Entre dos anillos aparece un arco, perpendicular al campo magnético β producido por el solenoide. Siendo el arco conductor, queda sometido a una fuerza F y, en consecuencia, acelerado en sentido circular (Figura 4).

La técnica del arco circular presenta varias ventajas:

- al rodearlo de SF₆, el enfriamiento del arco es muy eficaz,

- gracias al movimiento de las raíces del arco, se evitan los puntos calientes que producen vapores metálicos y el desgaste puntual;

- esta rotación del arco dura hasta el cero de corriente.

Se ha medido la velocidad de rotación del arco. Varía con la intensidad de la corriente a cortar, y, en el gas, puede alcanzar la velocidad del sonido para las grandes corrientes de cortocircuito.

Durante la ruptura de las corrientes de cortocircuito, la fuerza en las proximidades del cero de corriente es suficientemente elevada para mantener el arco en rotación. En

efecto, la fuerza es igual al producto vectorial del campo y de la corriente, dos parámetros que no están en fase, pero cuyo producto mantiene un valor significativo en las proximidades del cero de corriente (Figura 5).

Durante la ruptura de bajas corrientes, la velocidad es muy reducida justo antes del paso por cero de la corriente. Entonces el enfriamiento por convección es menor y la desionización sólo se debe a las cualidades intrínsecas del gas SF₆. Este reducido enfriamiento y esta desionización hacen que la ruptura se efectúe suavemente y sin sobretensiones de maniobra.

	velocidad de rotación del arco	
	durante el período del arco	justo antes del cero de corriente
corrientes elevadas	muy elevada elevada (velocidad del sonido)	elevada
corrientes débiles	elevada	reducida

Fig. 5: Velocidad de rotación del arco debida al campo magnético.

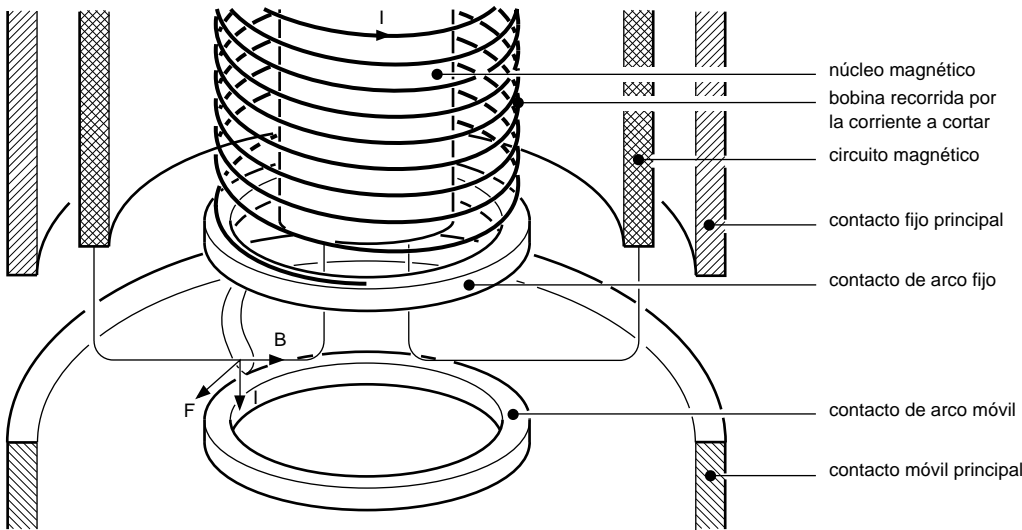


Fig. 4: Ejemplo de un contacto de arco giratorio (contactor tipo Rollarc).

4 Rupturas y sobretensiones de maniobra

La modificación brusca de la estructura de una red eléctrica provoca la aparición de fenómenos transitorios. Éstos se traducen, a menudo, en la aparición de una onda de sobretensión, o de un tren de ondas de HF de tipo aperiódico u oscilatorio de amortiguación rápida.

Este problema de las sobretensiones ligado a la maniobra de circuitos, sea cual sea el aparato (interruptor, contactor, fusible o interruptor automático), ha dado mucho que hablar y se han realizado numerosos estudios a este propósito.

Para comprender el problema es necesario examinar los fenómenos que dan origen a las diversas sobretensiones u ondas de frente abrupto, que aparecen:

- en la desconexión, recebados sucesivos o cortes de la corriente;
- al cierre, con ciertos tipos de aparatos de maniobra, en los precebados sucesivos.

Hay que tener en cuenta que:

- la amplitud de las sobretensiones que tienen por origen estos tres tipos de fenómenos depende del instante (con relación a la senoide) en el que se inicia el proceso;

- los fenómenos de precebados y de recebados sucesivos dependen sobre todo del tipo de aparato de corte.

En todos estos fenómenos, es un factor importante de sobretensión el corte de las pequeñas corrientes inductivas debidas a la energía de autoinducción ($1/2.L.I^2$) de los circuitos. Estas sobretensiones dependen de la aparamenta de corte utilizada y de la carga, especialmente transformador o motor:

- en los transformadores en vacío, si el factor de amplitud es débil, el corte de las pequeñas corrientes magnetizantes es fácil y sin peligro alguno;
- en los motores, el corte de las corrientes de arranque es más difícil y puede producir graves consecuencias, especialmente en lo que se refiere a la destrucción progresiva de los aislamientos del motor que son más delicados que en otros equipos.

De hecho, el precio y la sensibilidad a las sobretensiones de un gran número de motores MT utilizados en la industria, han convertido en prudentes a los usuarios y a los proyectistas de las redes, porque estas máquinas, durante toda su vida, sufren sobretensiones diversas en amplitud y tiempo de subida.

Recientemente, a raíz de fallos en motores y con determinadas técnicas de corte, se han efectuado numerosos estudios a cerca de las sobretensiones de maniobra.

Estos estudios demuestran que, para cualquier técnica de corte, las sobretensiones aplicadas a los bornes de un motor que gira a velocidad de régimen, esté o no cargado, no son, en la mayoría de casos, capaces de dañar el aislamiento de los motores. Esto se debe a la débil impedancia de la onda y a la fuerza contraelectromotriz generada por el bobinado del motor. En el arranque, esta fuerza contraelectromotriz no existe y el riesgo es elevado.

Para comprender mejor las influencias y prestaciones de los aparatos de corte es interesante:

- estudiar las características de las formas de las ondas de sobretensión generadas por las maniobras de corte y el efecto de estas ondas sobre los diferentes tipos de aislamiento;
- determinar los efectos de las sobretensiones sobre el aislamiento de los motores;
- conocer el comportamiento en tensión de los motores.

5 Sobretensiones y ondas de frente abrupto

El estudio de las sobretensiones pasa por el de los tres fenómenos citados precedentemente:

- los recebados,
- el corte de la corriente,
- los precebados.

Los recebados

El fenómeno

Cuando los contactos se separan, justo antes del paso por cero de la corriente de 50 Hz, se puede producir un cebado puesto que la tensión se eleva entre los contactos que, aún demasiado próximos, no han alcanzado la distancia de aislamiento necesaria. La corriente que se establece entonces es una corriente de alta frecuencia que el dispositivo de ruptura es capaz de interrumpir si su velocidad de regeneración dieléctrica es muy elevada.

Seguidamente se repite el mismo proceso y se pueden producir muchos recebados, hasta un centenar. Estos recebados producen ondas que se propagan a lo largo del circuito. La amplitud de estas ondas depende de la diferencia de tensión que hay entre los contactos justo antes de que se produzca la ruptura.

Para resumir este fenómeno, si un aparato puede interrumpir corrientes transitorias de alta frecuencia, puede también provocar trenes de ondas transitorias de alta frecuencia.

Hay que observar que un motor puede estar sometido a una onda de frente abrupto, del mismo tipo que las que aparecen en su aparato de maniobra, pero con una amplitud doble (en razón del fenómeno de reflexión de onda).

Los recebados según las normas CEI

En los documentos de la CEI, los recebados múltiples, creados por la aparamenta de conmutación, se califican como «sucesos anormales». En este caso los equipos sensibles (bobinados de los motores) deben:

■ o bien, estar preparados para soportar unos niveles muy elevados de la tensión de choque,

■ o bien, estar protegidos de un modo adecuado.

Para los motores MT el usuario tiene, pues, dos soluciones para evitar daños:

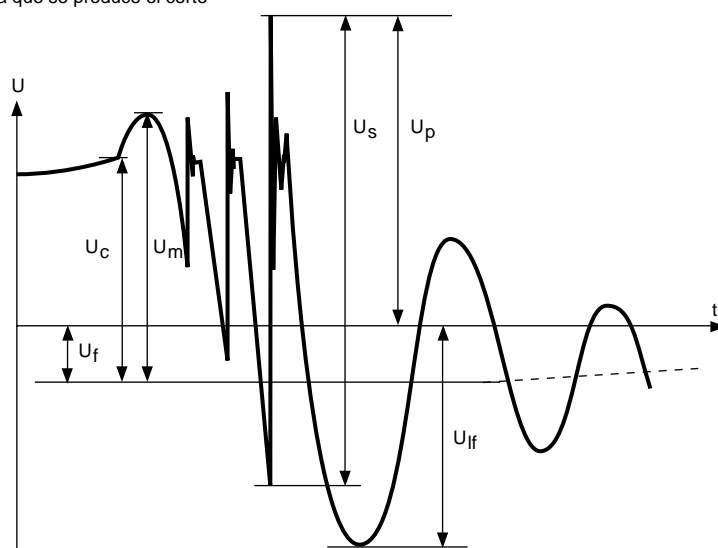
■ o bien utilizar motores que tengan un aislamiento muy bueno, que se

corresponda con las características (frente, amplitud) de las ondas de frente abrupto que se propaguen,

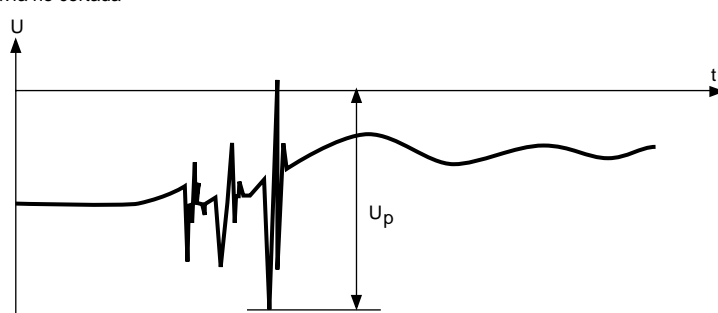
■ o bien utilizar limitadores de sobretensión (para limitar la amplitud de las sobretensiones) y sistemas RC (para derivar las corrientes transitorias de alta frecuencia).

Los documentos CEI que explican estos fenómenos (**figura 6**) dicen que

fase en la que se produce el corte



fase todavía no cortada



U_f : valor instantáneo de la tensión de red
 U_c : tensión de red en el instante del corte
 U_m : punto de extinción

U_{if} : sobretensión respecto a tierra
 U_p : sobretensión máxima respecto a tierra
 U_s : amplitud máxima, cresta a cresta, de la sobretensión debida al recebado

Fig. 6: Tensión del lado de la carga.

los recebados no quedan sólo definidos por el nivel de sobretensión con relación a tierra $-U_{If}$ sino también por el valor máximo de la tensión cresta a cresta $-U_s$.

Fenómenos transitorios de recebado

En la realidad, fenómenos transitorios acompañan, muy a menudo, los recebados anteriormente descritos. Esta realidad se representa en el esquema equivalente (figura 7) de un circuito, que comprende:

- una fuente de tensión senoidal, de inductancia L_1 y capacidad C_1 ,
- un dispositivo de corte (interruptor automático D) no disociable de los elementos parásitos L_p y C_p ,
- una carga inductiva L_2 que posee una capacidad repartida simbolizada por C_2 ,
- y una inductancia de línea L_0 .

Después de un corte, se presentan varias oscilaciones independientes:

- a nivel del interruptor automático, los valores parásitos de C_{p1} y L_{p1} provocan una primera oscilación paralela de frecuencia F_{p1} muy elevada, de 1 a 10 Mhz, durante la cual C_{p1} se descarga a través del interruptor automático:

$$F_{p1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{p1} \cdot C_{p1}}}$$

- el segundo fenómeno, denominado segunda oscilación paralela, provocado por una transferencia de energía, se produce entre la fuente y las capacidades de la carga a través de la inductancia de unión L_0 , que se refiere al bucle «interruptor automático- C_1 - L_0 - C_2 ».

Esta oscilación se produce con una frecuencia F_{p2} de 100 a 500 kHz:

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

De hecho, unos valores importantes de la inductancia de la fuente y de las inductancias de la carga hacen que el resto del circuito no quede afectado por las segundas oscilaciones paralelas.

- el tercer fenómeno, llamado oscilación del circuito principal, afecta a todo el circuito con una frecuencia F_m de 5 a 20 kHz:

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

expresión que puede simplificarse para una carga muy inductiva:

$$F_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_1+C_2)}}, \text{ si } L_1 \ll L_2$$

Estas tres oscilaciones se producen al mismo tiempo después del recebado, y la sobretensión que de ello resulta es una superposición de tres formas de onda. Sin embargo, el desarrollo de estas formas de onda depende de las características del interruptor automático, de las del circuito y de la amortiguación de los componentes resistivos.

El recebado único

Iniciada por la descarga de C_{p1} , la primera oscilación paralela se produce justo después del interruptor automático, con una frecuencia elevada F_{p1} . La segunda oscilación paralela, ahora dominante, implica una corriente oscilatoria que puede provocar (o no) un cero de corriente y, en este caso, puede (o no) ser cortada por el interruptor automático.

En caso contrario, la oscilación continúa hasta ser suficientemente amortiguada y entonces predomina la oscilación del circuito principal.

Los recebados múltiples

En circuitos fuertemente inductivos, la corriente está defasada cerca de 90° con relación a la tensión. Por tanto, después de la interrupción de la corriente en las proximidades de cero, la tensión alcanza casi su valor de cresta.

La tensión comienza a oscilar a la frecuencia f_L en el lado de la carga y a la frecuencia f_S en el lado de la fuente. Si la diferencia instantánea de las tensiones excede del nivel de tensión dieléctrica, se produce un recebado del arco.

El circuito sufre entonces las primeras y segundas oscilaciones paralelas del lado de la carga. Estas segundas oscilaciones provocan una corriente de alta frecuencia que atraviesa el interruptor automático. Cuando esta corriente se superpone a la corriente de frecuencia industrial (50 ó 60 Hz), puede crear muchos ceros de corriente de alta frecuencia. La ruptura efectiva depende entonces de la di/dt de la corriente al pasar por cero y de la capacidad del aparato de cortar con ese di/dt . Esto depende de la velocidad de regeneración dieléctrica:

- en el caso de interruptores automáticos con una gran velocidad de regeneración dieléctrica, la ruptura definitiva puede producirse después del primer paso por cero de la corriente de alta frecuencia,
- para interruptores automáticos de velocidad de regeneración más lenta,

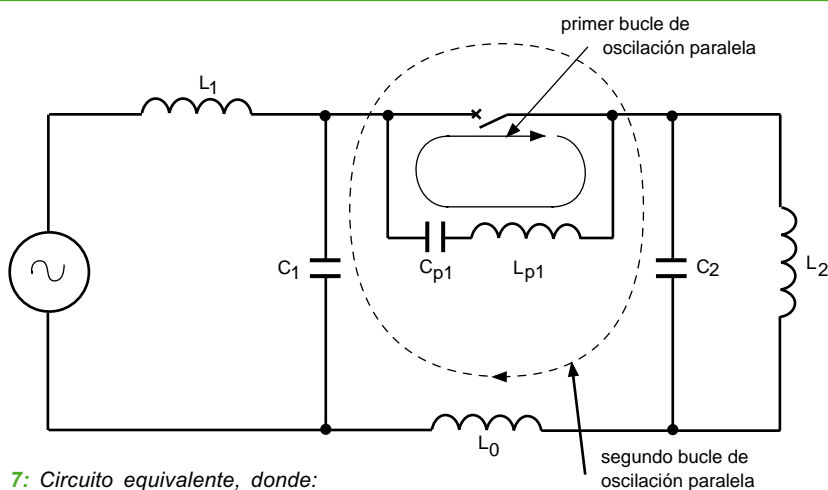


Fig. 7: Circuito equivalente, donde:
 C_{p1} : capacidad parásita del interruptor automático,
 L_{p1} : autoinducción del interruptor automático.

pueden ser necesarias muchas oscilaciones; incluso puede no producirse la ruptura.

Las segundas oscilaciones paralelas inician esta corriente de alta frecuencia y, de este hecho, esta corriente pasa por dentro del circuito del interruptor automático C_{p1} y L_{p1} (figura 7). Su frecuencia es función de los componentes de este bucle. Así, el bucle de las segundas oscilaciones paralelas, salvo para perturbaciones débiles, no afecta a la corriente que pasa por la inductancia de la carga L_2 . Durante el período de los recebados, la tensión en bornes de la carga oscila alrededor de un nivel de tensión determinado por el valor adquirido en la primera interrupción. El valor medio de tensión durante este período provoca un aumento de la corriente de carga.

Durante el período de ruptura, la tensión transitoria de restablecimiento sube hasta que sobrepasa la rigidez dieléctrica del espacio entre los contactos y provoca así un recebado.

Hay que recordar que, durante el período de apertura de un interruptor automático, sus contactos se separan y, en consecuencia, la rigidez dieléctrica del espacio entre contactos, así como la tensión de cebado, se incrementan a cada recebado.

Durante este tiempo, la corriente de carga va a aumentar y después a disminuir según que el valor instantáneo de la tensión en el lado de la carga exceda o no el nivel de tensión $E/2$, tal como muestra la figura 8.

Así, las características del circuito y del interruptor automático gobiernan la posible sobretensión de recebado. La curva de onda de recebado es, pues, función de la frecuencia del circuito de la segunda oscilación paralela, en tanto que la amplitud posible queda determinada por la potencia disponible, es decir por la potencia almacenada en la inductancia del circuito y en la capacidad en el momento de la ruptura.

En la práctica:

- los recebados sucesivos y las interrupciones de la corriente de frecuencias elevadas, que provoca el

proceso de los recebados múltiples, pueden repetirse muchas veces. La cantidad de energía crece en la inductancia de la carga conforme aumenta la separación de los contactos, pues cada recebado sucesivo se produce a una tensión más elevada;

- la amplitud está limitada por la tensión dieléctrica del espacio entre los contactos, amplitud que va creciendo durante la apertura. El verdadero valor de la tensión de recebado es pues función de la energía disponible y de la regeneración dieléctrica, si bien no puede fijarse un valor general máximo.

El proceso de recebado/corte puede interrumpirse de dos maneras:

- la primera, al acabarse los fenómenos de recebado. La separación entre contactos, necesaria para cortar, aumenta al mismo tiempo que la tensión transitoria de restablecimiento (TTR). Cuando el nivel de aumento de la tensión dieléctrica sobrepasa el nivel de crecimiento de la TTR la ruptura es definitiva;
- la segunda forma es no cortar rápidamente la corriente de AF, sino esperar a que se amortigüe y se anule, para cortarla definitivamente al próximo paso por cero de la corriente a frecuencia industrial.

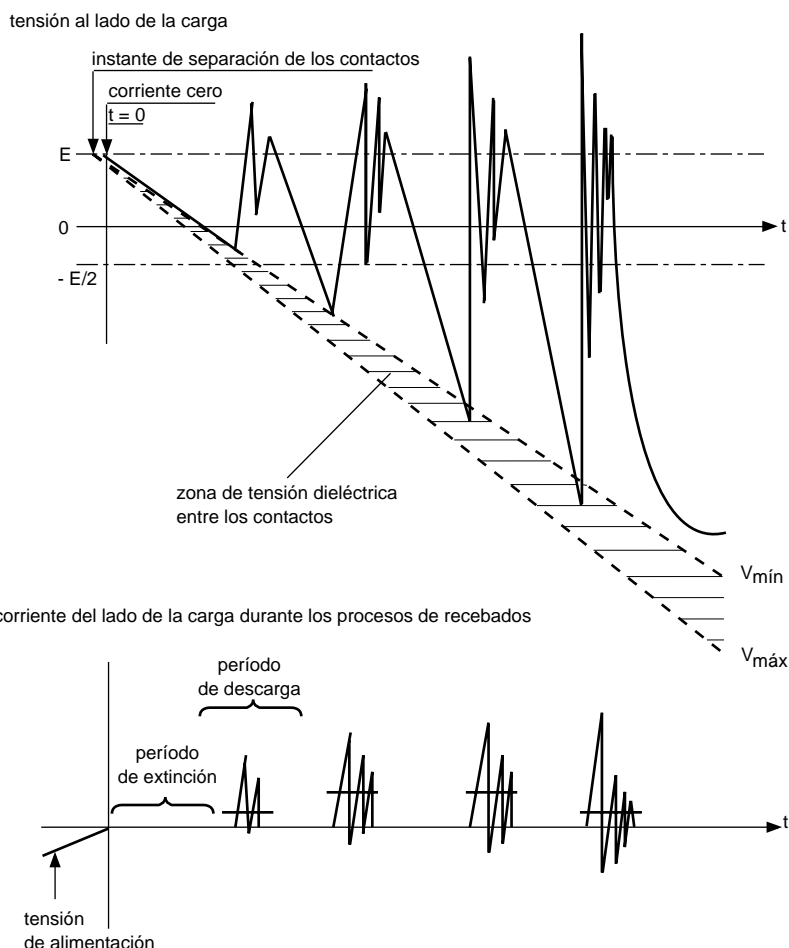


Fig. 8: Recebado.

Corte brusco de la corriente

Se define como un «corte brusco de la corriente bastante alejado del cero de corriente de 50 ó 60 Hz».

Después de que se ha llevado bruscamente a cero la corriente por medio de la ruptura, la corriente de la inductancia de carga necesita un cierto tiempo para disipar la energía magnética almacenada y permitir al campo magnético su desaparición. La energía almacenada en la inductancia L_2 (figura 7) se transfiere en cada oscilación a la capacidad C_2 y crea una sobretensión. Gracias al principio de la conservación de la energía, la relación matemática entre la corriente cortada I_a y el valor de la sobretensión es bien conocida:

$$\frac{1}{2} C_2 \cdot U_{\text{máx}}^2 = \frac{1}{2} C_2 \cdot U_c^2 + \frac{1}{2} L_2 \cdot I_a^2$$

$$U_{\text{máx}} = \sqrt{U_c^2 + \frac{L_2}{C_2} \cdot I_c^2}$$

donde:

U_c = tensión en bornes de C_2 antes de la oscilación,

C_2 = valor de la capacidad aguas abajo,

L_2 = valor de la inductancia aguas abajo.

Y por tanto, si el neutro del lado de la carga no ha sido puesto a tierra (que es el caso para la mayoría de motores), a partir del corte de la primera fase (figura 9) se produce un desplazamiento del potencial del neutro con relación a tierra y la sobretensión resultante es:

$$U_{\text{máx}} = 0,5 V \sqrt{(1,5 V)^2 + \frac{1,5 L_2}{C_2} \cdot I_c^2}$$

siendo V = tensión simple entre fase y neutro.

Pero esta ecuación no tiene en cuenta el amortiguamiento del circuito que hace decrecer progresivamente la amplitud de las oscilaciones. En la práctica es necesario, pues, introducir un factor de amortiguación K :

$$K = 1 + \frac{x}{1,5 V}$$

siendo x = amplitud de la oscilación alrededor del potencial del neutro.

De ello se deduce que:

■ hasta que no se produce la interrupción de la corriente, el valor mínimo de $U_{\text{máx}}$ obtenido es:

$$\begin{aligned} (U_{\text{máx}})_{\text{mín}} &= 0,5 V + X \\ &= 0,5 V + (K - 1) 1,5 V \\ &= 1,7 V \text{ para } K = 1,8 \\ &= 1,4 V \text{ para } K = 1,6. \end{aligned}$$

■ con una corriente interrumpida, pequeña pero no despreciable, $U_{\text{máx}}$ es mucho más importante; los valores más elevados pueden observarse cuando la ruptura de la primera fase provoca la interrupción, casi instantánea, de las otras fases. Este fenómeno se denomina interrupción de la corriente virtual.

El proceso de interrupción de esta corriente virtual depende únicamente de las características del circuito y de

la conexión entre fases. Puede, pues, producirse con cualquier interruptor automático.

■ cuando la corriente cortada es de valor elevado, la potencia almacenada en el circuito de carga en el momento de la ruptura puede ser extremadamente elevada y puede motivar sobretensiones excesivas.

Los precebados

En el momento del cierre de los aparatos de conexión (interruptor automático-contactor-interruptor), se pasa por una posición en la que la tensión dieléctrica entre los contactos se hace inferior a la tensión entre los contactos. En esta posición se produce un cebado (llamado precebado). Las tensiones del lado de la fuente y del lado de la carga van a alcanzar muy rápidamente una tensión intermedia y la tensión entre los

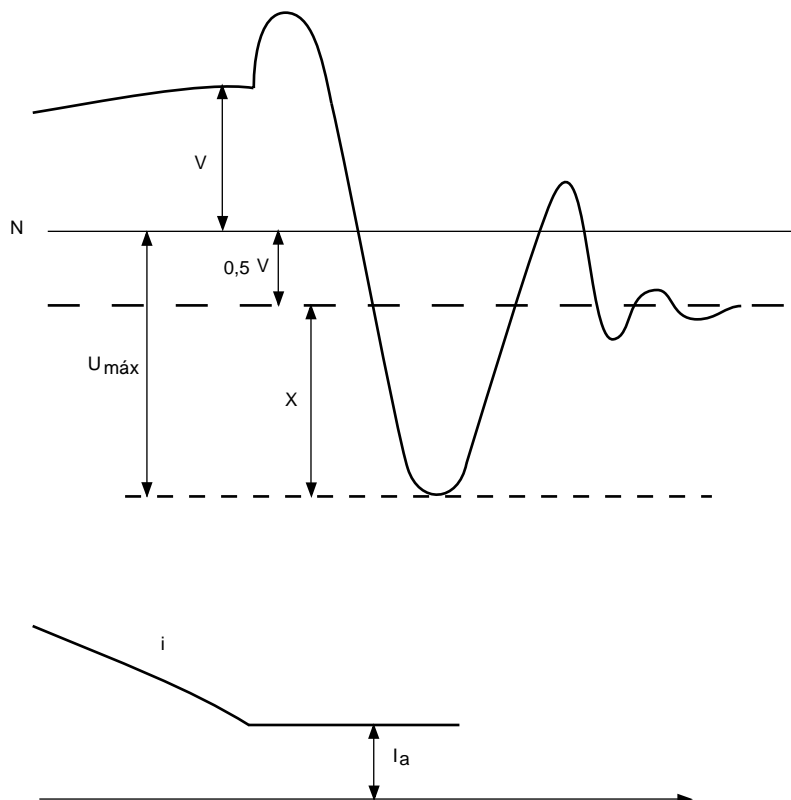


Fig. 9: Corte de la primera fase con corriente arrancada I_a .

bornes aguas arriba y aguas abajo del aparato de corte decrecen para alcanzar un valor más bajo. Este cambio rápido de tensión tiene por efecto crear una onda de tensión de frente abrupto a un lado y otro del aparato. La amplitud del frente puede alcanzar un valor tan grande como el valor de cresta de la tensión simple. Las ondas de alta frecuencia que resultan de ello alcanzan la carga en la que tiene lugar una reflexión y la onda reflejada vuelve a los bornes del interruptor automático. El arco de precebado puede entonces ser cortado al paso por cero de la corriente, o en las proximidades del cero. Su ruptura depende de la di/dt de la corriente cuando pasa por cero. Pero estando en curso del cierre, la separación entre los contactos

disminuye; esta ruptura no es pues efectiva hasta que la tensión vuelve de nuevo a un valor inferior a la tensión dieléctrica. Antes de que los contactos se toquen el proceso puede repetirse varias veces.

La tensión que aparece en los bornes del receptor presenta un «doble efecto», debido a la reflexión (generalmente del orden de 1,8 veces la tensión establecida). Después de alcanzado su valor de cresta, la onda de tensión de alta frecuencia decrece lentamente debido al paso de las ondas por el cable (la impedancia característica de un cable es de algunas decenas de ohmio).

El proceso repetido de los precebados seguido de una onda de corriente de alta frecuencia y de un corte de la corriente es pues semejante en su

naturaleza al fenómeno de recebados descrito precedentemente. Hay una diferencia: como la tensión dieléctrica disminuye con la aproximación de los contactos, la curva envolvente de los trenes de oscilación HF es decreciente.

Como acabamos de ver, el fenómeno de precebado es muy complejo y difícil de prever. La aparición de sobretensiones depende de numerosos factores:

- características del interruptor automático (propiedades dieléctricas, capacidad de cortar corrientes de alta frecuencia),
- características del circuito (impedancias características de cables y receptores),
- así como del instante del cierre.

6 Aislamiento de los motores

La mayoría de los devanados estáticos de las máquinas de corriente alterna están constituidos por bobinas preformadas, conectadas entre sí para formar el bobinado de una fase. Las bobinas están constituidas por muchas espiras en serie, debiendo de estar aisladas unas de otras y del circuito magnético puesto a tierra.

El aislamiento pues a considerar es «entre espiras» y «entre bobinado y masa».

Para asegurar su funcionamiento en el plano magnético y térmico, las bobinas se colocan en unas ranuras situadas en la parte interior del

estator, que está puesto a tierra. Así, el aislamiento de tipo seco entre espiras no tiene necesidad de ser elevado; en cambio, el aislamiento entre las bobinas y la masa debe ser elevado para soportar la tensión fase-tierra.

Esto lleva a distancias de aislamiento menores entre espiras y mayores en el aislamiento con relación a masa. Esta tecnología introduce una capacidad importante, por una parte entre espiras y, por otra, entre las bobinas y las ranuras, lo que implica una reducida velocidad de propagación de la sobretensión en los bobinados de un motor.

El bobinado de la máquina, aislado con relación a la tierra (o aislamiento principal), está sometido a esfuerzos dieléctricos de tres a siete veces superiores a la tensión nominal de 50 Hz.

El aislamiento entre espiras está normalmente sometido a un nivel de esfuerzo muy bajo, pero que puede llegar a ser de 100 a 1 000 veces mayor para las primeras espiras de los bobinados cuando se producen sobretensiones debidas a reencendidos múltiples. Este aislamiento entre espiras es, por ello, muy difícil de ensayar, lo que lleva a diversas opiniones sobre las condiciones de ensayo. No existen ensayos directos normalizados.

7 Propagación de las ondas de frente abrupto en los motores

Como se ha descrito anteriormente, el estator de un motor está constituido por numerosas espiras. Determinar con precisión el fraccionamiento entre las espiras de la tensión de choque de frente abrupto es muy difícil. Así se han desarrollado muchos modelos para estudiar estas sobretensiones y su reparto, el más conocido utiliza una red mallada de bobinas y condensadores en derivación.

En esta red mallada el bobinado está considerado como un «medio» en el cual las ondas se propagan con una independencia característica dada y durante un cierto tiempo. La onda de frente abrupto emplea, pues, un cierto tiempo (T_t) para pasar de una espira a otra; este tiempo es generalmente mucho menor que el tiempo de subida de la onda (T_f) (figura 10).

Si la amplitud de la onda es $V_{m\acute{a}x}$, la tensión desarrollada en las espiras es:

$$V_2 = V_{m\acute{a}x} \cdot (T_t/T_f).$$

Así para un motor con una característica dada de propagación de onda (T_t), la tensión que aparece en bornes de la primera espira depende de la amplitud y del tiempo de subida de la sobretensión.

Los gráficos de las experiencias (figura 11) revelan que:

- los tiempos de frente de onda superiores a 3 μs provocan una tensión despreciable en los bornes de las primeras espiras;
- la amplitud de la sobretensión es más importante en las ondas cuyo frente de subida es del orden de 0,5 a 0,2 μs ;
- estos resultados son independientes de la potencia del motor considerado.

Sin embargo la duración de tales sobretensiones (ondas de frente abrupto) es muy corta; por tanto, aún cuando la potencia instantánea de la sobretensión puede ser elevada, la energía es muy reducida. Por esto, los daños provocados en el aislamiento,

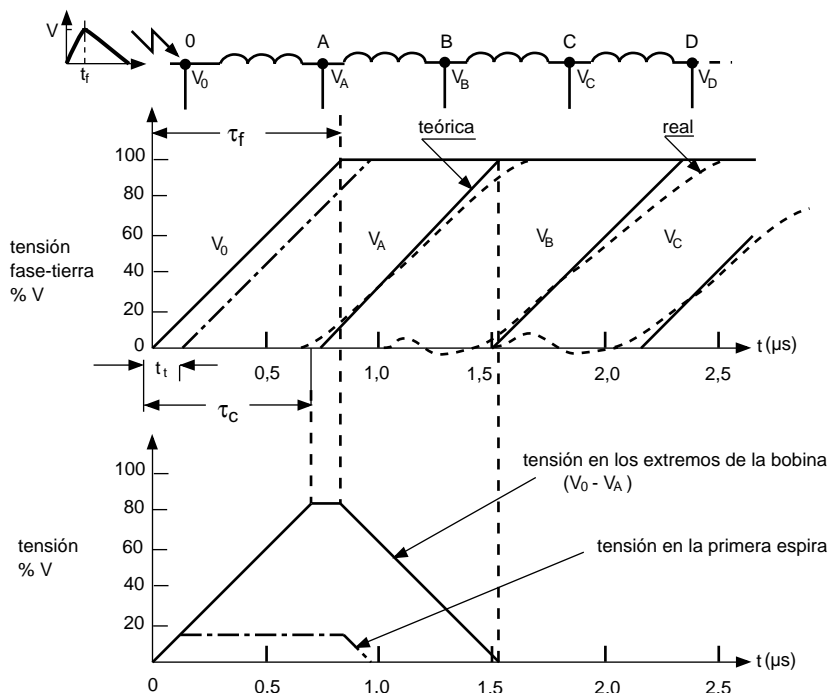


Fig. 10: Tensión desarrollada entre espiras y los extremos de la bobina, al aplicar una tensión de frente abrupto al bobinado de un motor.

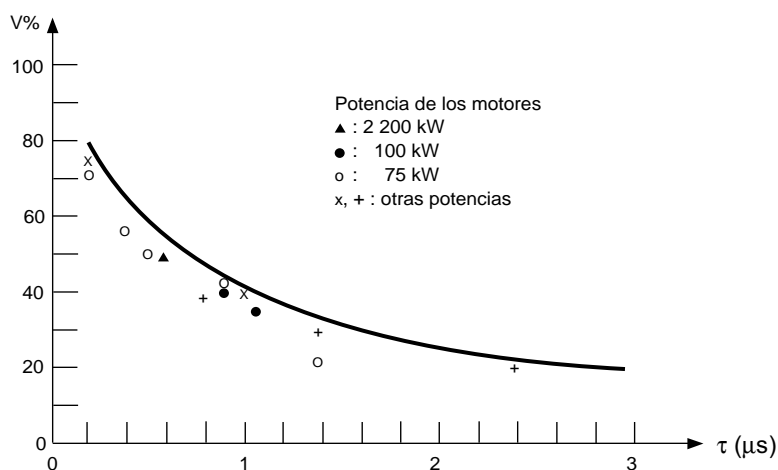


Fig. 11: amplitud de la tensión en función del tiempo de subida de la onda.

bajo la forma de agujeros microscópicos, a menudo denominados «pinchazos de alfiler», son muy limitados y, muy a menudo, no pueden ser detectados. En efecto, un solo «pinchazo» causa muy pocas modificaciones en las características del aislamiento. Pero estos «pinchazos de alfiler» se multiplican al ritmo de las sobretensiones de frente abrupto. Provocan entonces «puntos calientes», que deterioran progresivamente las características del aislante, limitando así la duración del motor. Esta degradación es un proceso normalmente lento que puede no notarse hasta que el aislamiento de la bobina esté totalmente deteriorado. Recientes discusiones sobre los daños creados en los motores de MT han conducido a establecer las curvas de resistencia de los motores a las tensiones de choque. A título de ejemplo, la **figura 12** muestra la curva de resistencia al choque en función del tiempo de subida, publicada por un Comité del Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE) que tiene en cuenta el envejecimiento de los motores. Esta curva muestra la excelente capacidad del aislamiento de los motores para soportar las sobretensiones de frente de onda de duración superior a 5 μ s, pero también, la gran sensibilidad a los cebados debidos a las sobretensiones que tienen frentes de onda de duración inferior a 1 μ s. La exigencia es, pues, función, sobre todo, del tiempo de subida de la sobretensión.

Consecuencias del fenómeno de las sobretensiones

Los recebados

Como se ha explicado anteriormente, cada recebado sucesivo se produce a una tensión más elevada con un valor máximo que no puede fijarse. Ahora bien, la repetición excesiva de las sobretensiones puede llevar a la destrucción definitiva del aislamiento entre espiras por lo que el número de recebados durante un mismo corte es un dato fundamental.

La interrupción de la corriente

Los fallos de los motores causados por este fenómeno, directamente ligado al instante inicial de la ruptura, son:

- o bien debidos a una sobretensión muy elevada, como consecuencia de la interrupción de una corriente muy fuerte,
- o bien se deben a una repetición de sobretensiones de menor valor, como consecuencia de varias maniobras de interrupción.

Los precebados

Después del precebado del primer polo, puede aparecer en bornes del motor una onda de frente abrupto de 1,8 por unidad (p.u.). Esta tensión se propaga a través de las bobinas y aparecerá en la entrada de la segunda bobina como una oscilación «lenta» de amplitud 1,8 p.u. En este momento, la tensión del lado fuente es

máxima en la fase A (1 p.u.) y, en las fases B y C, es igual a 0,5 p.u.

Así, en el caso más desfavorable, cuando el precebado se produce sobre un segundo polo, y cuando la tensión al lado motor es igual a 1,8 p.u., se aplica una tensión de 2,3 p.u. al lado de la fuente y al lado de la carga, bajo la forma de onda de frente abrupto. Esta onda sufre también una reflexión que lleva su amplitud a $1,8 + 2,3 = 4,1$ p.u. en los bornes del motor.

En resumen

Los fenómenos de precebado son muy complejos. Las sobretensiones que de ellos resultan dependen de muchos factores: del interruptor automático y de su comportamiento en tales circunstancias (capacidad o no de interrumpir prematuramente la corriente), del circuito (impedancias transitorias, frecuencias propias), así como del instante de cierre sobre la onda senoidal de la corriente.

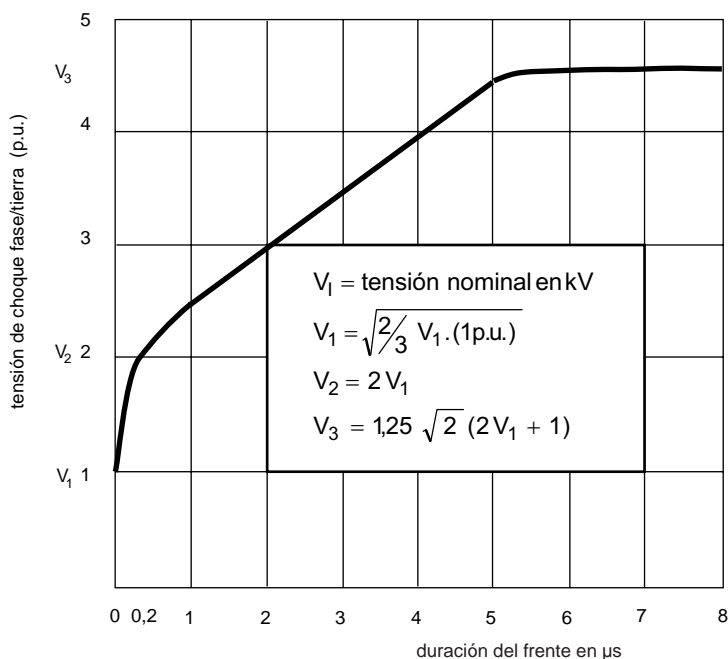


Fig. 12: Curva envolvente de la resistencia a la tensión de choque del motor.

8 Aislamiento del motor según las normas CEI y prácticas usuales

El comité técnico para las máquinas rotativas (que trabaja para la CEI) y diferentes autores de la literatura técnica, se han puesto de acuerdo sobre los niveles de aislamiento nominal de las máquinas rotativas de MT. La norma CEI 34 estipula los niveles siguientes:

Aislamiento entre espiras

El comportamiento ante una tensión de choque de rayo se verifica aplicando una onda de frente abrupto, de nivel $(4U_n + 5)$ kV, siendo U_n la tensión nominal. Así, para $U_n = 6,6$ kV, la tensión de ensayo es de:

$$(4 \times 6,6) + 5 = 31 \text{ kV (cresta)}.$$

Generalmente, el nivel de sobretensión se expresa en p.u. (por unidad), que es el valor cresta de la tensión fase-tierra:

$$\text{p.u.} = U_n \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}.$$

Para $U_n = 6,6$ kV, la tensión de ensayo se escribe también así:

$$4,9 \text{ p.u.} + 5 \text{ kV (cresta)}.$$

Por convención, el 50% de esta tensión debe ser aplicada en los bornes de una muestra de las bobinas de entrada, lo que corresponde a un compromiso, debido a la distribución no lineal de la tensión a lo largo del bobinado. El tiempo de frente de onda no debe ser inferior a $0,5 \mu\text{s}$.

Aislamiento respecto a tierra

Ensayo de tensión a frecuencia industrial

La tensión eficaz $(2U_n + 1)$ kV se aplica entre los bornes del devanado y la tierra durante un minuto, a continuación se aumenta a una velocidad de 1 kV/s hasta dos veces $(2U_n + 1)$ kV; después se reduce inmediatamente a cero, a la cadencia de al menos 1 kV/s . Después de este ensayo el motor no debe presentar ni fallo de aislamiento ni daños.

El valor de cresta $2\sqrt{2}(2U_n + 1)$ kV, derivado de este ensayo, es un poco superior al del ensayo de choque.

Para $U_n = 6,6$ kV, el valor de cresta correspondiente es, entonces, de:

$2\sqrt{2}(2U_n + 1) = 40 \text{ kV}$; pero éste sólo se aplica durante un tiempo muy breve, en tanto que el valor de cresta de 20 kV aparece cada semiperíodo durante un minuto.

Ensayo de comportamiento frente a la tensión de choque de rayo

La tensión de ensayo es $(4U_n + 5)$ kV, o $4,9 \text{ p.u.} + 5 \text{ kV}$, en valor de cresta.

Esta tensión es la misma que para probar el aislamiento entre espiras, pero con un tiempo de frente de $1,2 \mu\text{s}$.

La tabla de la **figura 13** resume los diferentes ensayos de coordinación de aislamiento que se efectúan en los motores MT.

aislamiento	ensayo a 50 (60) Hz valor eficaz	ensayo de choque
entre espiras		$4,9 \text{ p.u.} + 5 = 31 \text{ kV}$ a $6,6 \text{ kV}$ (50 % sobre una muestra) tiempo de subida $0,5 \mu\text{s}$
respecto a tierra	$2U_n + 1 \Rightarrow 2(2U_n + 1) \Rightarrow 0$ $14 \text{ kV} \Rightarrow 28 \text{ kV} \Rightarrow 0$	$4,9 \text{ p.u.} + 5 = 31 \text{ kV}$ a $6,6 \text{ kV}$ tiempo de subida $1,2 \mu\text{s}$

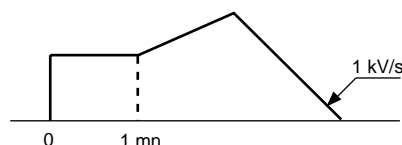


Fig.13: Niveles de aislamiento nominales para máquinas rotativas.

9 Prestaciones de los interruptores automáticos Fluarc

Se han hecho numerosos ensayos en diferentes laboratorios, desde hace años, sobre conjuntos «interruptor automático-motor MT» o en montajes equivalentes.

Recientemente, según el proyecto que está a punto de ser incluido en el documento CEI 17A, se han realizado los ensayos siguientes en el laboratorio Volta de Merlin Gerin (relación de ensayos AC 1239 y AC1241):

Ensayos de corte

Esquema del circuito: (figura 14)

100 A - 7,3 kV y 280 A - 7,3 kV.

Características de los cables:

Los extremos de la pantalla del cable de campo radial se ponen a tierra.

Longitud: 100 m

Tensión: 12/20 kV

Corriente: 295 A

Tipo: Pirelli X23

Aislamiento: polietileno

Capacidad/m: 0,22 nF/m

Impedancia: 40 W

Parámetros del circuito motor

■ corriente: 100 A
cos φ : < 0,2
frecuencia de oscilación: 11,7 kHz

■ corriente: 280 A
cos φ : < 0,2
frecuencia de oscilación: 27 kHz

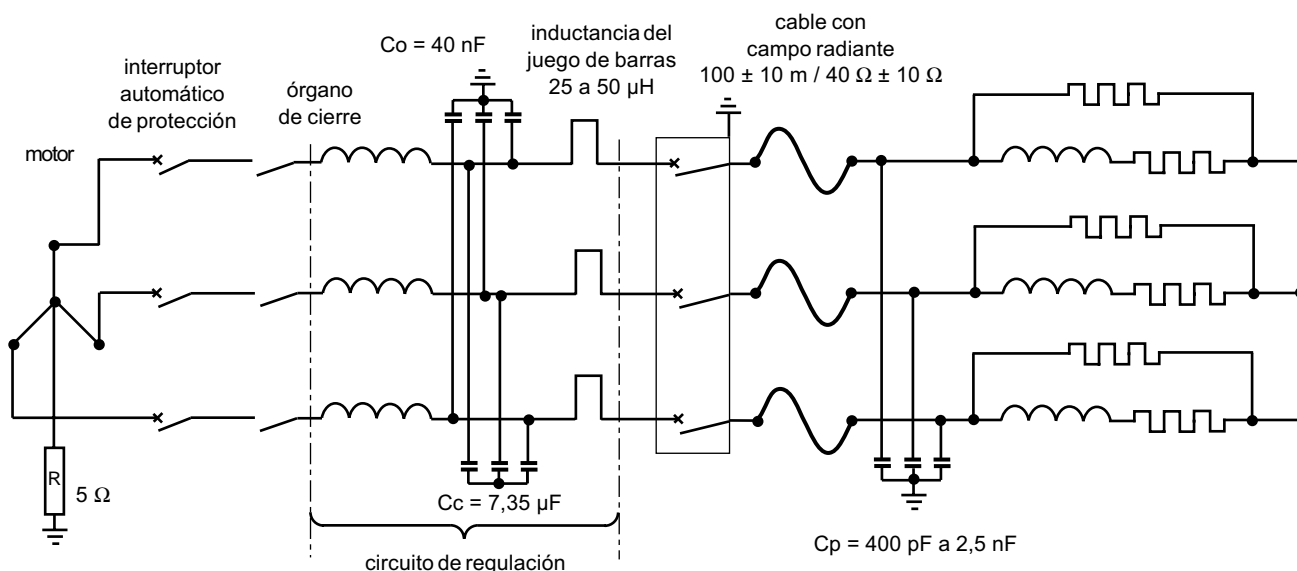


Fig. 14: Esquema del circuito de ensayo de 100 A/7,3 kV - 280 A/7,3 kV.

tipo de interruptor automático SF ₆	I(A)	K (factor de amortiguamiento)	sobretensión (p.u.)		recebados múltiples
			media	media + desvío tipo	
FG2	100	1,77	2,96	3,43	no
	100	1,77	2,94	3,41	no
	280	1,54	1,91	2,09	no
	280	1,54	1,87	2,14	no
FG1	100	1,77	1,63	1,81	no
	100	1,77	1,79	2,14	no
	280	1,54	1,69	1,78	no
	280	1,54	1,43	1,64	no

Fig. 15: Resultados de los ensayos con interruptor automático Fluarc FG2/40 kA et FG1/25 kA : no se producen recebados múltiples
tensión de ensayo: 7,3 kV - Cc: 7,35 µF).

Resultados de los ensayos

(Figuras 15, 16, y 17)

Se utilizaron los interruptores automáticos Fluarc, el FG2/40 kA y el FG1/25 kA. Tensión de ensayo: 7,3 kV.

Estos resultados se apoyan en veinte ensayos realizados para cada valor de corriente y de capacidad. El resumen tiene en cuenta el aspecto estadístico.

En la práctica

Como se explicó en el primer capítulo, las técnicas más utilizadas actualmente en la aparamenta de MT son la ruptura al vacío y la ruptura en SF₆. Estas dos técnicas presentan, sin embargo, diferencias importantes en el campo de la protección de motores MT.

Frente a frente de los recebados y precebados múltiples

Los fenómenos de recebados múltiples dependen de la capacidad del interruptor automático para cortar corrientes de alta frecuencia.

Los interruptores automáticos al vacío son capaces de interrumpir corrientes HF, por el hecho de la extremadamente alta velocidad de regeneración dieléctrica: la tensión dieléctrica puede alcanzar el 75% del valor que tendría normalmente entre los contactos, al cabo solamente de un microsegundo después del cero de corriente. Cuando los interruptores automáticos y los contactores de corte en vacío cortan un circuito que posee suficiente energía para iniciar un recebado, resulta a menudo un proceso de corte/recebado (recebados múltiples).

Este comportamiento varía según el tipo de aleación de los contactos, pero resulta diferente del comportamiento de un interruptor automático de ruptura en SF₆, que necesita aproximadamente 10 microsegundos para alcanzar el 75% de su tensión dieléctrica.

Por tanto, con la técnica de corte en SF₆, es posible conseguir un único recebado y frecuentemente cuando los contactos se separan justo antes del cero de corriente (50 Hz).

Excepcionalmente pueden producirse algunos recebados pero nunca en número importante.

Frente a frente de la interrupción de la corriente

Se pueden observar algunas sobretensiones cuando la ruptura de la primera fase provoca

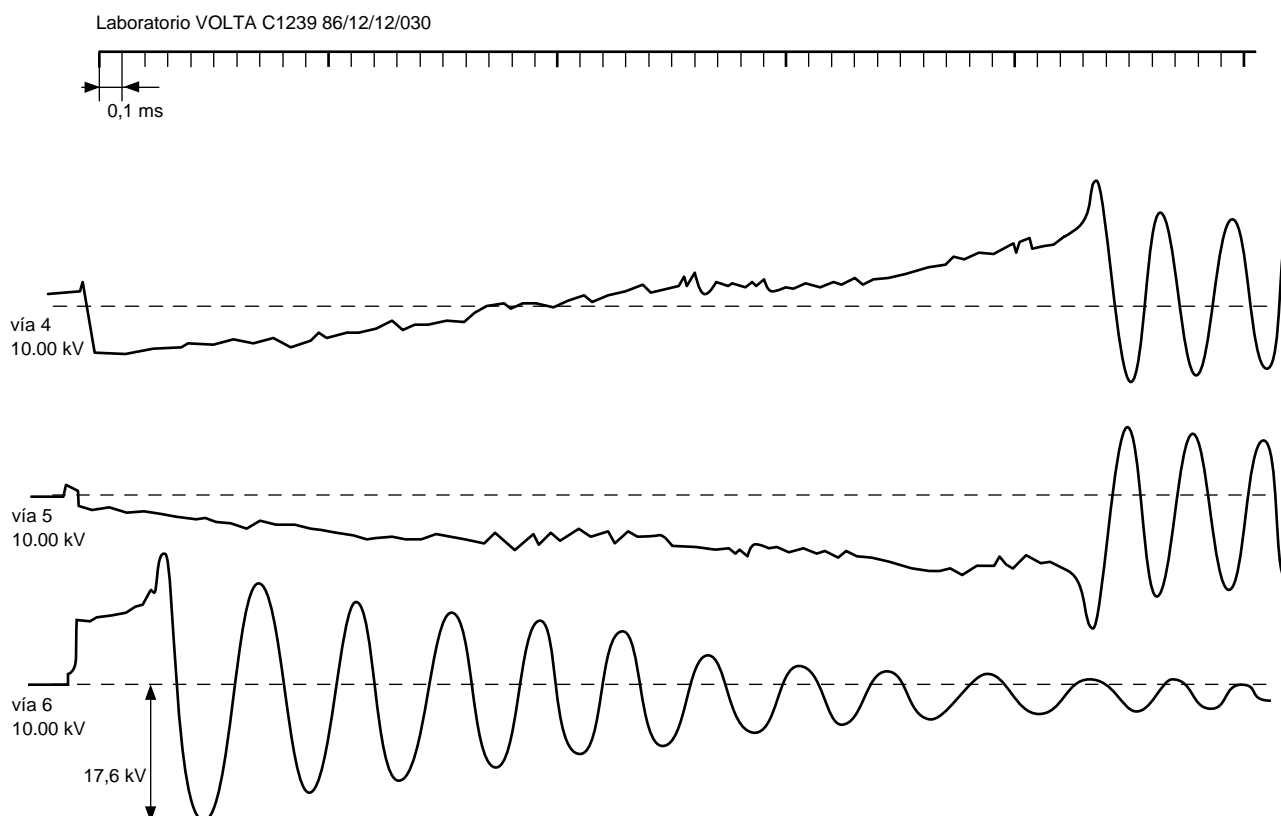


Fig. 16: Oscilograma de ruptura de un interruptor automático FG2, a 100 A sobre 7,3 kV, con el circuito de ensayo CEI.

prematuramente la ruptura de las otras fases; este proceso, denominado de ruptura de corriente virtual, depende enteramente de las características del circuito y de la conexión entre fases. Puede, pues, producirse con cualquier tipo de interruptor automático.

Y como en otros fenómenos que hacen intervenir cortes de corriente de alta frecuencia, la ruptura de corriente virtual corre más el riesgo de producirse en los interruptores automáticos de corte al vacío que en los interruptores automáticos de otras técnicas de ruptura.

En resumen

La capacidad de los interruptores automáticos de corte al vacío de interrumpir corrientes de alta frecuencia los hace mucho más sensibles a los precebados múltiples que los demás interruptores automáticos. Por el contrario, los interruptores automáticos al SF₆ no cortan prematuramente las corrientes de alta frecuencia y no provocan, en general, más que un solo precebado.

según la experiencia

El primer interruptor automático Fluarc se instaló en 1971. En 20 años, se han instalado más de 70 000 interruptores automáticos de este tipo en el mundo entero, para aplicaciones muy diversas en el campo industrial donde las maniobras de motores deben ser seguras en un 100%:

- auxiliares de centrales,
- industrias pesadas (de proceso),
- plataformas flotantes...

Esto demuestra la perfecta adaptación de los interruptores automáticos Fluarc al mando y a la protección de los motores MT.

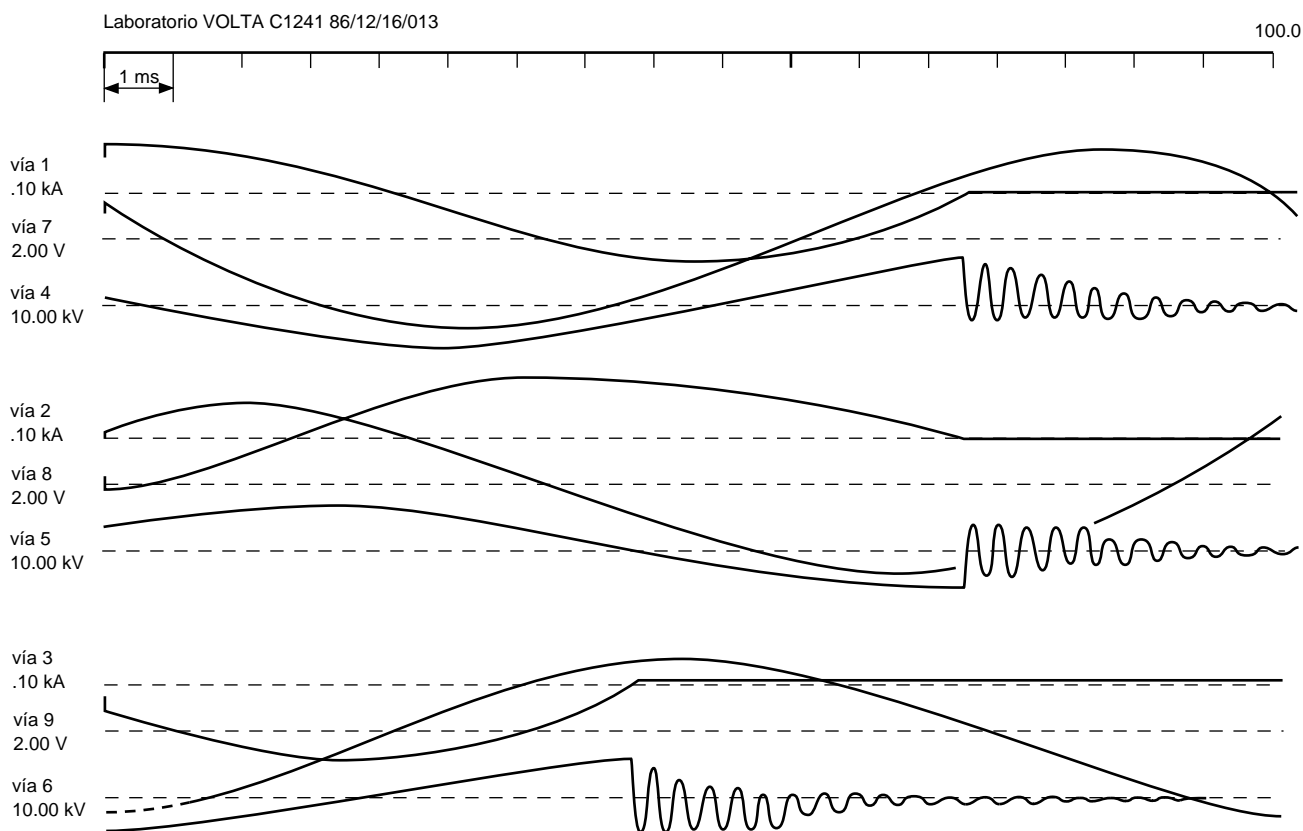


Fig. 17: Oscilograma de ruptura de un interruptor automático FG1, a 100 A sobre 7,3 kV, con el circuito de ensayo CEI. El interruptor automático corta sin arranque de la corriente.

10 Conclusión

La comparación, entre el grado de protección de los motores y la protección contra sobretensiones resultante de la utilización de los interruptores automáticos Fluarc, muestra que existe un buen margen de seguridad.

A la tensión de 6,6 kV, que es la más utilizada para los motores, el nivel de aislamiento del conjunto de la instalación MT (CEI 298) es de 60 kV «choque» y el aislamiento del motor entre sus bornes y tierra es de solamente 31 kV «choque» (CEI 34).

Este valor, comparado con los resultados de ensayo dados en el capítulo 9, muestra que los Fluarc no sobretensionan de forma peligrosa el motor.

Estos interruptores automáticos cubren una extensa gama de corrientes nominales, de tensiones y de poderes de corte. Para los casos difíciles (viejos motores o riesgos de envejecimiento acelerado), es aconsejable el empleo de los interruptores automáticos Fluarc FG1, o de los contactores Rollarc P < 250 kW), pues estos aparatos utilizan la técnica del arco giratorio.

Los Fluarc y Rollarc no generan recebados múltiples, lo que permite mantener a salvo el aislamiento entre las espiras de los motores.

La experiencia demuestra que su empleo hace innecesaria la utilización del limitador de sobretensión ZnO para descrestar, y de los circuitos RC para atenuar los efectos de los recebados múltiples.