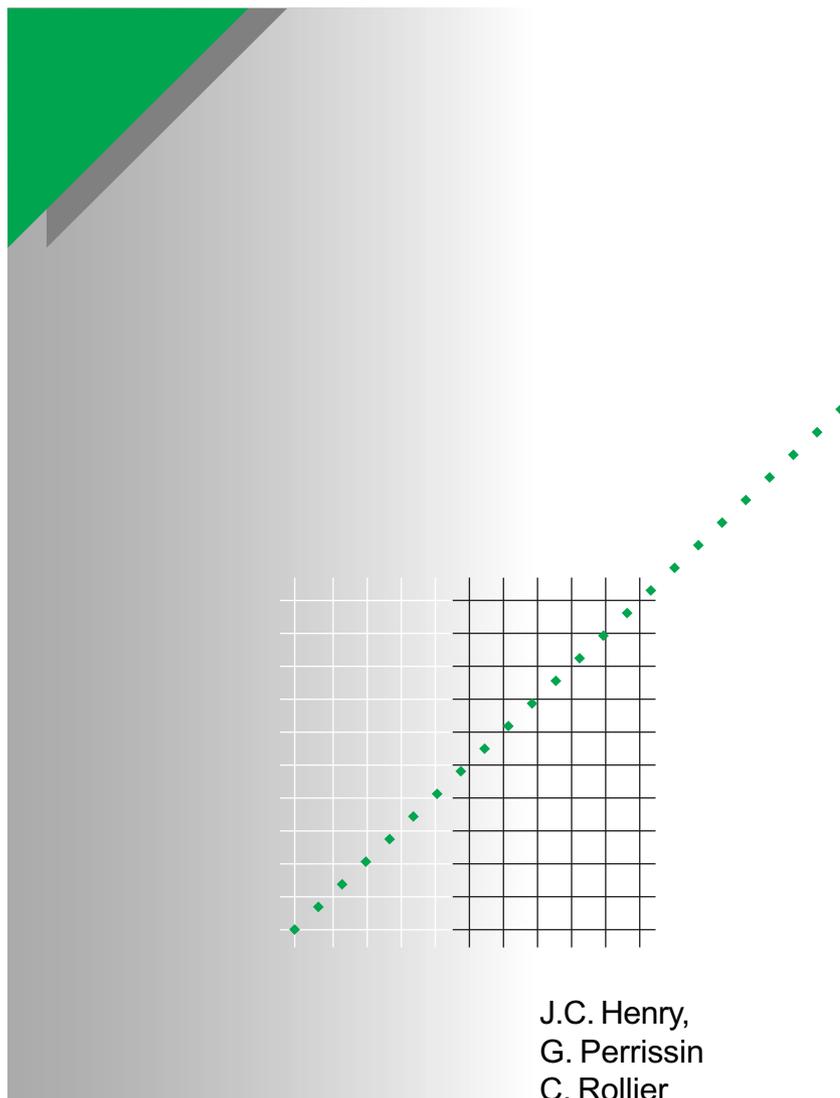


Cuaderno Técnico nº 101

Los interruptores automáticos de autosoplado con SF₆ bajo esfuerzos severos



J.C. Henry,
G. Perrissin
C. Rollier

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 101 de Schneider Electric».



cuaderno técnico nº 101

los interruptores automáticos de autosoplado con SF₆ bajo esfuerzos severos

Por: J.C. Henry, G. Perrissin y C. Rollier
Trad.: José M^a Giró

Edición francesa: octubre 1 978
Versión española: enero 2 000



los interruptores automáticos de autosoplado con SF₆ bajo esfuerzos severos

Índice

Introducción		p. 5
1 Caso de líneas largas de muy alta tensión	La conexión de líneas con su extremo abierto	p. 6
	La desconexión de líneas con su extremo abierto	p. 7
	La desconexión de reactancias shunt	p. 8
2 Caso de defecto alimentado a través de un transformador	Esfuerzos	p. 11
	Resultado de los ensayos	p. 11
	Conclusiones	p. 11
Anexo: Las sobretensiones durante el corte de corrientes inductivas	«Arranque» de la corriente	p. 13
	Reencendidos sucesivos	p. 14
Bibliografía		p. 14

El desarrollo de redes de transporte y de redes industriales pone a los interruptores automáticos de alta tensión en condiciones de funcionamiento mucho más duras que las previstas en las normas.

Es el caso de:

- las líneas muy largas (al conectar o desconectar la tensión, ruptura de reactancias shunt),
- los transformadores de gran potencia cuando aparece un defecto inmediatamente aguas abajo del aparato.

El interruptor de autosoplado con SF₆ tiene un comportamiento satisfactorio y el recurso de utilizar resistencias auxiliares no se ha de prever más que para la conexión de largas líneas de alta tensión.

Introducción

Durante los últimos veinte años ha progresado mucho el conocimiento del funcionamiento de las redes de transporte de alta tensión y de los fenómenos que se desarrollan durante la maniobra de los interruptores automáticos que las protegen. El estudio teórico de las condiciones de funcionamiento, el análisis de las incidencias y los trabajos del CIGRE han llevado a un replanteamiento de todas las condiciones que hay que tener en cuenta para el diseño y la verificación de los materiales de corte destinados a las redes de AT. Por último, este proceso se ha plasmado en el reconocimiento de estas condiciones de corte en el marco de las normas internacionales cuyo

volumen y complejidad expresan la extensión de los trabajos realizados, siendo todavía algunos aspectos objeto de trabajos importantes.

Sin embargo, de vez en cuando, pueden presentarse situaciones particulares que responden directamente a las condiciones de funcionamiento previstas por las normas. Por ejemplo, la explotación intensiva de los recursos hidroeléctricos de ciertos países, que requieren la instalación de líneas muy largas, justifica el que los diseñadores de estas redes definan condiciones no normalizadas para la verificación de los interruptores automáticos. Estos problemas se desarrollarán en la primera parte de este estudio.

Situaciones excepcionales se dan también en ciertas instalaciones con transformadores de gran potencia y baja tensión de cortocircuito. Estas instalaciones de tipo especial suponen para los interruptores automáticos esfuerzos severos que no pueden ser tenidos en cuenta por las normas, porque se alejarían mucho de las condiciones de exigencia que generalmente se necesitan en los interruptores automáticos de las redes.

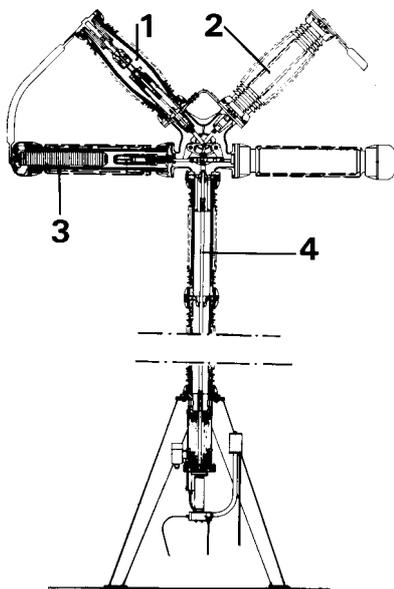
Este último problema será el objeto de la segunda parte de este estudio.

En cada caso, se expondrán los esfuerzos soportados por los interruptores automáticos y los métodos de ensayo utilizados para asegurar un buen comportamiento de un interruptor de autosoplado con SF₆.

1 Caso de líneas largas de muy alta tensión

La técnica de autosoplado con el gas SF₆ aplicada desde hace tiempo a los aparatos de redes de distribución de media tensión se extiende progresivamente, por sus ventajas, a los aparatos de redes de alta tensión.

La experiencia de uso muy satisfactoria obtenida hasta ahora ha llevado a las empresas que explotan las redes a intentar conseguir las numerosas ventajas de estos aparatos para las redes de tensiones mayores, en particular para las de 525 kV que constituyen la estructura de las redes de transporte de muchos países del continente americano, donde la importancia de las potencias a transportar y las distancias a los centros de consumo han favorecido la



1. Intervalo de corte
2. Condensador de reparto
3. Resistencia de cierre
4. Soporte aislado

Fig. 1: Corte de un elemento de polo de interruptor automático de 525 kV, equipado con resistencias de cierre.

elección de estos valores de tensión tan elevada. Hay que recordar que la elección de un valor de tensión elevado no es realmente ventajoso si no se ha previsto la limitación de las sobretensiones temporales y de las sobretensiones de maniobra que se puedan presentar en las redes de alta tensión. Sin esto, el coste añadido de aislamiento a prever para que las redes puedan soportar estas fuertes sobretensiones, reduce a cero el ahorro conseguido con la reducción de las pérdidas.

El desarrollo de redes de tensión igual o superior a 525 kV tiene por tanto una necesidad en particular, el tener en cuenta las tres condiciones de maniobra que, por lo natural, generan las sobretensiones mayores:

- enganche y desenganche de líneas con su extremo abierto;
- el corte de líneas en vacío con tensión excepcionalmente elevada;
- el corte de reactancias de shunt.

La conexión de líneas con su extremo abierto

Un interruptor automático que protege una línea puede tener que conectar una que tenga su extremo abierto. Las sobretensiones debidas a la reflexión que se produce en el extremo abierto han de controlarse completamente. Los valores de sobretensión a respetar no son objeto de normas internacionales por el momento y su especificación se convierte en competencia del diseñador de la red. Entre todos los métodos que se han

propuesto para la limitación de las sobretensiones de conexión, el más simple consiste en poner bajo tensión la línea por medio de una resistencia, escogida en función de las características y longitud de la línea.

Los interruptores automáticos aptos para proteger las redes de 525 kV y 765 kV deben por tanto estar dotados de cámaras auxiliares que permitan la inserción de resistencias durante un tiempo determinado. Esta necesidad, bien aceptada por los interruptores automáticos de aire comprimido, lo es también para los interruptores automáticos de autosoplado con SF₆. En efecto, se ha podido poner un mecanismo auxiliar muy simple en estos aparatos, una conexión mecánica que maneje los contactos de inserción de las resistencias durante una maniobra de cierre. (Figura 1).

Estos contactos pasan automáticamente a la posición de abierto inmediatamente después de la conexión de los contactos principales. Una unión mecánica de este tipo asegura una excelente precisión de los tiempos de inserción de las resistencias en el circuito en el momento de cerrar.

La elección del valor de la resistencia se puede efectuar a partir de medidas sobre modelos de redes o por cálculo. En particular, las medidas efectuadas sobre un analizador de transitorios han permitido determinar los valores máximos de resistencias y los tiempos de inserción mínimos a prever para la limitación de sobretensiones de reenganche sobre una línea de 525 kV de 400 km de longitud, con un valor de 2,2 veces cuando la línea no está compensada y con un valor de 2 veces cuando lo está. (Tabla 1).

	línea no compensada	línea compensada al 40 %	línea compensada al 70 %
valor de la resistencia (Ω)	360	360	1000
tiempo de inserción (ms)	10	8,4	10
niveles de sobretensión (probabilidad acumulada del 98 %) (en nº de veces)	2,2	2	2

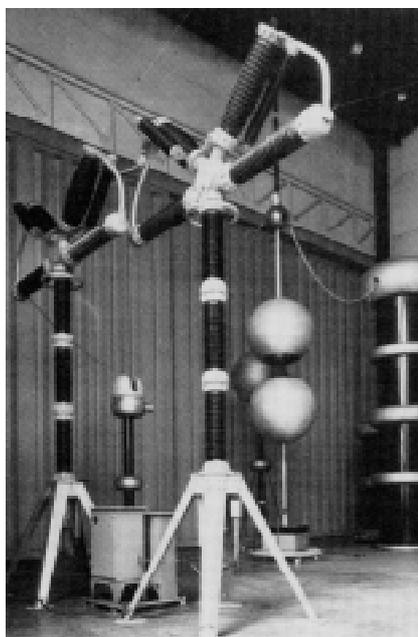
Tabla 1.

Los interruptores automáticos de autosoplado con SF₆, equipados con un juego de cámaras auxiliares (figura 2) con sus resistencias, son, por tanto, una manera de responder a la exigencia de limitación de sobretensiones de reenganche, exigencia mayor para el dimensionamiento del aislamiento de redes de muy alta tensión.

La desconexión de líneas con su extremo abierto

Esfuerzos

La severidad de las condiciones impuestas a un interruptor automático durante la apertura de una línea abierta en su extremo puede ser tal que sean estas condiciones de corte las que impongan el dimensionamiento del interruptor automático y en particular la elección del número de intervalos de corte. El hecho principal es que, un semiciclo antes del corte, el interruptor



$$U_n = 525 \text{ kV}; I_c = 50 \text{ kA}; I_n = 3150 \text{ A}$$

fig. 2: polo de un interruptor automático con autosoplado de SF₆ con 4 intervalos de corte, equipado con resistencia de cierre.

automático debe de tener aplicada entre sus bornes una tensión al menos igual al doble del valor de cresta de la tensión fase-tierra de la red antes del corte.

Desgraciadamente, en el momento de la desconexión puede suceder que la tensión entre fase y tierra del polo que debe de abrir haya alcanzado valores muy superiores a los especificados en las normas para en ensayo del interruptor automático en ese tipo de ruptura. Esta sobreelevación dinámica de la tensión puede ser el resultado de varias causas. En concreto, la apertura del interruptor situado en el extremo receptor de una línea por la que circula una fuerte carga deja a esta línea abierta en su extremo. Su tensión aumenta por el hecho de la supresión brusca de la carga, lo que no es inmediatamente compensado por la regulación de tensión ni por la carga capacitativa que constituye la propia línea. Por tanto, el interruptor automático situado en el origen puede ser llamado a abrir la línea justo en el momento en que la tensión fase-tierra en el origen ha sobrepasado largamente el valor normal.

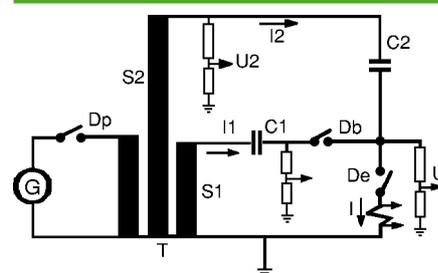
Las condiciones particulares de ciertas redes han hecho aparecer la posibilidad de sobretensiones dinámicas elevadas, del orden de 1,5 veces, a pesar del efecto favorable que producen las reactancias de compensación en la limitación de las sobretensiones dinámicas. Por ejemplo, la tensión entre fases de una red de 525 kV se puede elevar temporalmente hasta casi 750 kV y la de una red de 765 kV hasta los 1 100 kV.

Estas circunstancias son excepcionales y es muy normal que tales situaciones se excluyan de las condiciones de verificación exigidas por las normas para los cortes de líneas en vacío. Sin embargo, el hecho de que tales casos concretos se presenten ha obligado a verificar la capacidad de los interruptores automáticos para soportar esas tensiones. Incluso, si se puede admitir que tales verificaciones se hagan en el lugar mismo de explotación de la red, es absolutamente necesario que el fabricante demuestre a priori las aptitudes de su material.

Métodos de ensayo

Para tensiones de red que no sobrepasen los 245 kV, es normalmente posible hacer el ensayo directo en la estación de ensayos y utilizar una línea real. Para tensiones de red que alcancen los 420 kV, el ensayo directo es más difícil, por la serie de condiciones de explotación que hacen frecuentemente imposible el disponer de una línea sin carga de longitud suficiente.

Otro proceso de ensayo consiste en simular una línea en vacío por medio de una batería de condensadores. Aún así, los límites de los laboratorios se alcanzan rápidamente, si se tiene en cuenta el dimensionamiento de la batería necesaria para la obtención de corrientes importantes que simulen líneas de grandes longitudes con tensiones tan grandes como las que se han citado anteriormente. Por tanto el fabricante se ve obligado a hacer los ensayos no ya más sobre un polo completo, sino sólo sobre una fracción de polo, así como sobre un solo intervalo de corte. Estos ensayos se pueden efectuar sea sobre un circuito directo que abarque una batería de condensadores de gran capacidad,



- Dp: interruptor automático de protección
- Db: interruptor automático de bloqueo
- De: interruptor automático bajo prueba
- T: transformador
- G: generador
- S1: circuito «de corriente»
- S2: circuito «de tensión»
- C1: batería de condensadores del circuito «de corriente»
- C2: batería de condensadores del circuito «de tensión»
- I: corriente cortada por De.
- $I = I_1 + I_2$; $U = U_2 - U_{C2}$

Fig. 3: esquema de circuito simulador para corte de corriente de líneas en vacío.

sea con la ayuda de un circuito simulador. Es este último método el que nosotros hemos utilizado; el esquema es el de la **figura 3**. La ventaja de un circuito así es el no utilizar más que una batería de condensadores de pequeñas dimensiones. En efecto, sobre el circuito «de corriente», donde es necesario un gran valor de capacidad, es suficiente una tensión relativamente baja, y sobre el circuito «de tensión» conviene poner una capacidad de bajo valor adecuadamente aislada para la tensión máxima.

Los ensayos por elementos separados para el corte de corrientes de línea en vacío no están explícitamente previstos en las normas y su utilización requiere ciertas precauciones. Para los interruptores automáticos con baja duración mínima de arco (éste es el caso de los interruptores automáticos de autosoplado con SF₆), el defecto de sincronismo entre intervalos de corte de un mismo polo no debe sobrepasar el valor de unos 2 ms. En efecto, hace falta que la sobrecarga en tensión sobre el primer intervalo que abre sea despreciable. Un cálculo rápido muestra que, en el caso de una duración de arco mínima de 1 ms, el defecto de sincronismo de 2 ms implica una sobrecarga de tensión de 7 % sobre el primer intervalo que abre, en el caso de un interruptor

nº	U ₂ (kV)	U (kV cresta)	I (A)	t _a (ms)
1	128	345	815	2
2	128	340	815	9
3	128	353	815	8
4	128	340	815	6
5	128	352	815	5
6	128	352	815	3
7	128	353	815	2
8	128	355	815	1
9	128	332	815	9
10	128	340	815	8
11	128	332	815	7
12	128	340	815	5

Tabla 2: Resultados de los ensayos de corte de corriente de líneas en vacío.

automático de 4 cámaras, y de 12 % para uno de 6 cámaras. Por consiguiente, este método se aplica bien a los interruptores automáticos ensayados cuyo sincronismo de cámaras está bien asegurado y que no implica más que un pequeño número de intervalos de corte.

Resultados de los ensayos

Los ensayos se efectúan con un solo intervalo de corte de un interruptor automático de autosoplado con SF₆, como el representado en la **figura 2**. Los ensayos representan el esfuerzo experimentado para un solo intervalo de corte de un interruptor automático que tendría 4 intervalos en el caso de que la tensión entre fases de red de 525 kV se elevara a 750 kV.

La **figura 4** representa el oscilograma de un corte así.

La tensión de ensayo se determina conforme a la relación siguiente:

$$U_2 = 1,2 \cdot \frac{750}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{4} \text{ kV}$$

Los ensayos se han efectuado de acuerdo a la norma en lo que se refiere al instante de separación de los contactos. Los resultados se indican en la **tabla 2**.

Estos resultados, que no dan lugar a ningún recabado, demuestran perfectamente la capacidad del interruptor automático para cortar las líneas en vacío en las difíciles condiciones descritas anteriormente.

La desconexión de reactancias shunt

La utilización de reactancias de compensación conectadas en paralelo sobre líneas es casi siempre necesaria en las redes de muy alta tensión. En efecto, permiten evitar las sobreelevaciones de tensión demasiado fuertes a lo largo de la línea, en el caso de que ésta esté en vacío o muy poco cargada. Se conoce también el efecto muy favorable que ejercen las reactancias de compensación en las sobretensiones dinámicas en caso de desconexión brusca de la carga en el extremo de una línea larga. En fin, las reactancias ejercen también un efecto favorable sobre la limitación de

tensión de maniobra de enganche o desenganche de líneas en vacío.

Entonces se presentan varias posibilidades para beneficiarse de las ventajas de las reactancias shunt:

- poner permanentemente en derivación, en paralelo sobre cada fase de la línea, una inductancia cuyo valor se escoge para ser aceptable en todos los casos de funcionamiento de la red;

- o bien conectar la inductancia a la línea por medio de un interruptor automático, de manera que, ordenando su conexión o desconexión, se consiga una mayor flexibilidad en la utilización de la reactancia, según la carga transmitida por la línea. (**Figura 5**).

Estos interruptores automáticos funcionan en condiciones particulares puesto que son para interrumpir una corriente débil (algunos centenares de amperios) y que se maniobran

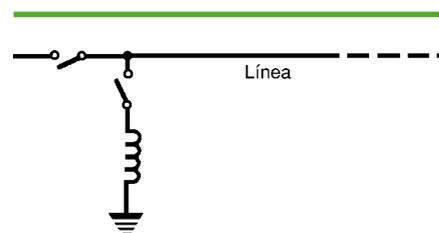


Fig. 5: Esquema de conexión de las reactancias shunt.

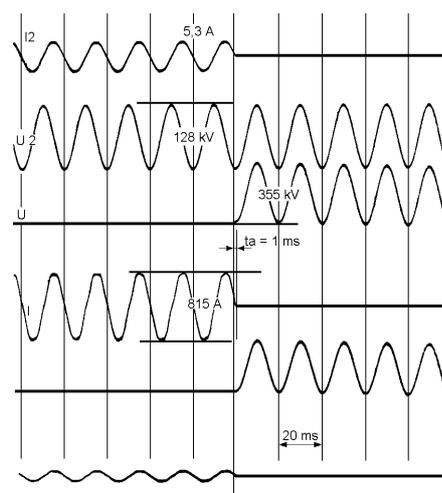


Fig. 4: Oscilograma obtenido durante el corte de una corriente capacitiva sobre el circuito representado en la figura 3.

muy frecuentemente. Tienen que tener por tanto una fiabilidad mecánica muy grande y no provocar sobretensiones anormales durante el corte de esta corriente.

Se han publicado ya diversos artículos sobre la excelente fiabilidad de los interruptores automáticos de autosoplado con SF₆, fiabilidad que se debe, sobre todo, a la simplicidad de su diseño.

En cambio, el comportamiento de los interruptores automáticos durante el corte de corrientes débiles inductivas es muy poco conocido y el establecimiento de las normas de ensayo correspondientes se revela difícil por el hecho del gran número de parámetros susceptibles de intervenir y del carácter aleatorio de los resultados normalmente obtenidos. Por otra parte, es complicado reproducir adecuadamente en laboratorio las condiciones reales de funcionamiento de los interruptores automáticos previstos para las tensiones más elevadas.

Se encuentran normalmente dos dificultades:

- tensión de ensayo demasiado baja;
- capacidades propias del circuito de ensayo demasiado elevadas.

Es por tanto muy deseable poder predeterminedar las sobretensiones susceptibles de producirse en cualquier condición de funcionamiento, basándose en los resultados de ensayos efectuados en condiciones precisas, a ser posible con un número reducido de intervalos de corte en serie. Los autores han puesto ya en evidencia ciertas leyes de la variación de la corriente arrancada de un tirón, generalmente sobretensiones. Se verá que los resultados obtenidos en la estación de ensayo sobre un interruptor automático de autosoplado con SF₆ del tipo representado en la **figura 2** cumplen bien estas leyes y que todavía es posible una valoración de las sobretensiones máximas que puede producir un interruptor automático de este tipo.

Condiciones de ensayo

Se han efectuado dos series de ensayos diferentes, totalizando más de cien cortes sobre diversos

elementos del interruptor automático. En las dos series, los circuitos de ensayo son monofásicos; sus características esenciales son las siguientes (**Figura 6**):

Serie nº 1:

U = 235 kV
 f = 50 Hz
 I = 245 – 517 – 1 100 A
 C₁ = 1 μF
 C₂ = 46 – 127 nF
 número de intervalos de corte en serie = 3.

Serie nº 2:

U = 20 – 40 kV
 f = 50 Hz
 I = 250 – 500 A
 C₁ = 17 nF
 C₂ = 1,9 a 12 nF
 número de intervalos de corte en serie = 1 ó 2.

La serie nº 1, efectuada con un interruptor automático de 3 cámaras, es representativa del funcionamiento de un aparato de 4 cámaras en una red de 525 kV. La tensión del circuito de ensayo de 235 kV ha sido el valor más alto de tensión disponible en el laboratorio. A lo largo de esta serie, no ha sido posible reducir la capacidad del circuito aguas abajo a un valor suficientemente bajo para ser representativo de la capacidad propia de una reactancia shunt. Es esto por lo que los ensayos se han efectuado con tensión reducida con capacidades aguas abajo de valor bajo a fin de estudiar la influencia del número de intervalos de corte y de la capacidad sobre el valor de la corriente arrancada.

Resultados de los ensayos

Pueden presentarse dos fenómenos cuando se cortan corrientes inductivas de bajo valor: el arrancar de un tirón la corriente y los reencendidos sucesivos (**ver anexo**).

Al hacer las dos series de ensayos, el arranque de las corrientes ha sido observado de modo casi sistemático, pero algún corte no ha dado lugar a reencendidos sucesivos. Este resultado es muy importante porque significa que las sobretensiones producidas por el interruptor automático pueden ser predeterminadas de modo seguro si se puede conocer la ley de variación de la corriente arrancada en función de los parámetros del circuito. Los resultados que han obtenido anteriormente los investigadores al hacer ensayos con interruptores automáticos de autosoplado con SF₆ y también ciertos estudios teóricos y experimentales publicados muestran que la corriente arrancada quedará determinada por la relación siguiente:

$$I_0 = \lambda \cdot \sqrt{n \cdot C'_3} \quad [6]$$

donde:

- I₀ = corriente arrancada,
- λ = es un coeficiente propio del interruptor automático expresado en A.F^{-1/2} (amperios . faradio)^{-1/2},
- n = número de intervalos de corte en serie por polo,
- C'₃ = capacidad en paralelo sobre el polo.

Para determinar el coeficiente λ, gracias a los resultados de los ensayos, sólo se toman en cuenta los resultados obtenidos para duraciones de arco iguales o mayores a 5 ms. Las duraciones de arco más cortas dan lugar a

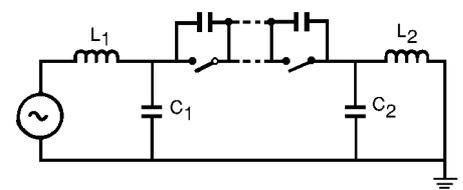


Fig. 6: Esquema del circuito de ensayo del corte de corriente inductiva.

nº de cámaras	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	
tensión (kV)	20	20	20	20	40	20	20	20	40	235	235	235
corriente (A)	250	250	250	250	500	250	250	250	500	245	517	1100
corriente cortada												
C' ₃ (nF)	4,2	5,2	9,2	9,5	9,2	3,9	7,9	8,3	7,9	110	45	47
λ · 10 ⁻³	94	89	95	90	92	81	84	96	96	81	74	92

Tabla 3: Valor medio del coeficiente λ para duraciones de arco inferiores a 5 ms.

corrientes arrancadas que no interesa estudiar por el hecho de sus valores tan bajos y de su dispersión así como por lo impreciso de su medida. La **tabla 3** indica los valores medios de λ obtenidos en los diferentes circuitos de ensayos; cada media se calcula normalmente sobre 5 ensayos. Se constata que los valores así obtenidos son muy próximos cuando las condiciones de ensayo abarcan una amplia gama de valores de los parámetros n y C'_3 ; esto demuestra que la relación [6] se aplica bien a este tipo de interruptor automático.

Puesto que el coeficiente λ es independiente del circuito de ensayo, es interesante analizar su distribución estadística para el conjunto de los ensayos considerados. La **figura 7** representa el histograma de valores de λ que hace aparecer una distribución gaussiana:

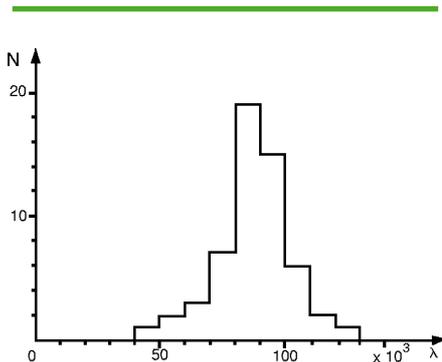


Fig. 7: Histograma de valores del coeficiente λ .

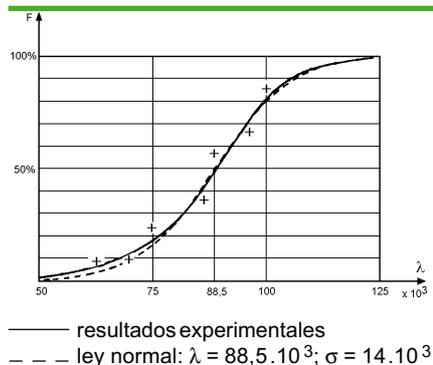


Fig. 8: Frecuencia acumulada de los valores del coeficiente λ .

valor medio de λ :

$$\bar{\lambda} = 88,5 \cdot 10^3 \text{ A.F}^{-1/2}$$

desviación típica:

$$\sigma = 14 \cdot 10^3 \text{ A.F}^{-1/2}$$

La curva de frecuencia acumulada de λ se representa en la **figura 8**, en la que se dibuja igualmente la ley normal correspondiente a λ y a σ . Se constata que la distribución de λ sigue una ley normal, en particular para los valores superiores al valor medio. Esto permite calcular la probabilidad de existencia de fuertes valores de corriente arrancada.

Cálculo de sobretensiones

En el caso general donde la capacidad aguas arriba es grande respecto a las otras capacidades del circuito, el factor de sobretensión lo da la relación siguiente, establecida en el anexo:

$$k = \sqrt{1 + \frac{n \cdot \lambda^2 \cdot L_2}{U_m^2}} \quad [5]$$

donde:

L_2 = autoinducción aguas abajo,
 U_m = amplitud de la tensión fase-tierra.

Conociendo estadísticamente el coeficiente λ es posible calcular la probabilidad de aparición de sobretensiones en el caso de un interruptor automático de 4 intervalos de corte, utilizado para la maniobra de reactancias shunt sobre una red de 525 kV. A título de ejemplo, consideraremos tres valores de reactancia, correspondientes respectivamente a las potencias monofásicas de 37, 75 y 150 MVA. Al aplicar a λ la ley normal definida en el párrafo precedente se obtienen los resultados indicados en la **tabla 4**.

Estos valores de sobretensión predeterminados, a pesar de apoyarse en un muestreo relativamente restringido (alrededor de 100 ensayos), muestran sin embargo que el interruptor automático ensayado no producirá una sobretensión anormalmente elevada al utilizarlo en una red.

A título comparativo, los ensayos efectuados con un interruptor automático de aire comprimido han permitido determinar para el coeficiente λ un valor medio de 230 A.F^{-1/2} que es un valor 3 veces mayor que el correspondiente al interruptor automático de autosoplado con SF₆. La aplicación del método de predeterminación de las sobretensiones de corte de corriente inductiva con un interruptor automático de aire comprimido, implican 6 intervalos de corte y, para los valores de reactancia considerados anteriormente, indica que los niveles de sobretensión sobrepasarían largamente los valores admisibles. En consecuencia, la limitación de sobretensiones por resistencias se impondrá. Se dispone por otra parte de resultados de ensayos comparativos efectuados sobre la red de Hydro-Québec mostrando que el corte de reactancias con interruptores automáticos de aire comprimido no dotados de resistencias para la apertura está acompañado de sobretensiones inaceptables.

Por tanto, se está demostrando que esta importante ventaja del interruptor automático de autosoplado con SF₆, del que se está hablando, será apreciada puesto que permite utilizar para la maniobra reactancias y un aparato no dotado de resistencias, sin ningún riesgo para el aislamiento de las reactancias.

P	k		
	150 MVA	75 MVA	37 MVA
10 ⁻²	1,27	1,5	1,87
10 ⁻³	1,32	1,57	2
10 ⁻⁴	1,35	1,62	2,07

Tabla 4: Probabilidad calculada de niveles de sobretensión.

2 Caso de defecto alimentado a través de un transformador

Esfuerzos

Ya se ha descrito la severidad que presentan para un interruptor automático las condiciones creadas en el momento del corte de un cortocircuito situado aguas abajo de un transformador. Se ha puesto en evidencia que el corte de un cortocircuito así, aunque de intensidad muy inferior a la plena capacidad de corte de un aparato, podrá poner en dificultades ciertos tipos de interruptores automáticos. En concreto se explica el que los interruptores automáticos de bajo volumen de aceite tengan una cierta sensibilidad por el hecho de que, para corrientes de defecto relativamente débiles, la potencia de desionización, función de la intensidad de la corriente cortada, era insuficiente, habida cuenta de la rapidez con la que se restablece la tensión en un circuito oscilante de frecuencia muy elevada. También se han destacado las condiciones de instalación de un interruptor automático de aire comprimido en las que el interruptor no tiene medio de cortar una corriente de cortocircuito que represente el 40 % de su poder de corte, por el hecho del valor de la frecuencia de la tensión de restablecimiento, compuesta principalmente por una oscilación de 20 kHz de un transformador de 150 MAV. (Figura 9).

Se encuentran cada vez más frecuentemente casos como éste en las instalaciones alimentadas a las tensiones de 72 a 170 kV, y su severidad aumenta, habida cuenta de la potencia de los transformadores instalados. La dureza de las condiciones de corte aumenta también cuando se trata de transformadores de baja tensión de cortocircuito, utilizados para la alimentación de ciertas instalaciones industriales.

Las conclusiones que se sacan de los estudios citados sobre tales redes muestran que las TTR (tensión transitoria de restablecimiento) puestas en juego en el caso de un

defecto alimentado a través de transformador, son mucho más severas que las especificadas por las normas para las corrientes de cortocircuito correspondientes al 10 y 30 % del poder de corte. Era por tanto importante asegurar que el interruptor automático de autosoplado con SF₆ no se vería en apuros en caso semejante.

Resultados de los ensayos

El aparato ensayado es un interruptor automático de autosoplado con SF₆ que tiene un solo intervalo de corte (figura 10) y que se puede utilizar sobre redes de tensiones entre 72 y 170 kV. La utilización de una reactancia en el aire, situada aguas abajo del interruptor automático (figura 11) ha permitido realizar los ensayos para los valores de corriente débil (1 y 2,5 kA). Siendo limitadas las posibilidades de ajuste del valor de la corriente en este circuito, se ha utilizado más tarde un circuito de ensayo simulador con inyección de corriente para una gama de corrientes de corte entre 5 y 20 kA.

La tabla 5 muestra las condiciones de ensayo y los resultados obtenidos.

Los ensayos efectuados presentan unas condiciones de severidad que se sitúan mucho más allá de las exigidas por las normas. Los resultados obtenidos demuestran claramente la aptitud de este interruptor automático para sobreponerse a los esfuerzos más severos que puedan aparecer en el caso de defectos alimentados por transformadores potentes, como los que se encuentran en ciertos tipos de instalaciones.

Conclusiones

Se ha puesto en evidencia que, para los interruptores de redes o de instalaciones industriales, pueden aparecer condiciones de funcionamiento excepcionales que sobrepasan largamente o que ni siquiera entran en el cuadro de condiciones normalizadas.

Se refieren especialmente a:

- el corte y conexión de corrientes de línea en vacío con tensiones excepcionalmente elevadas;
- el corte de corrientes de reactancia shunt de líneas de alta tensión;
- el corte de corrientes de cortocircuito alimentadas a través de un transformador.

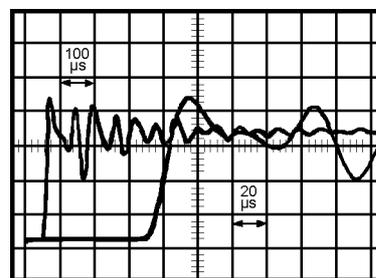


Fig. 9: Oscilograma de la TTR obtenido durante el corte de un defecto aguas abajo de un transformador 220/60 kV, P = 150 MVA, U_{cc} = 10,3 %.

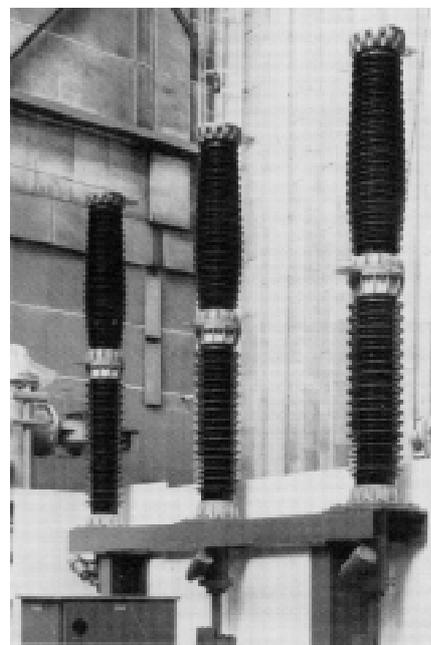


Fig. 10: Interruptor automático con autosoplado de SF₆ con 1 intervalo de corte para una tensión de 72 a 170 kV.

En cada caso, ha sido posible demostrar, por los ensayos efectuados en laboratorio, que los interruptores automáticos de autosoplado con SF₆ ensayados son capaces de hacer frente a condiciones especialmente severas con las que los interruptores automáticos de técnicas más antiguas podrían encontrarse en dificultades.

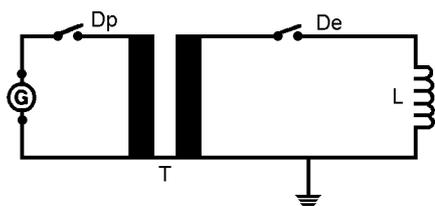


Fig. 11: Circuito de ensayo que tiene una reactancia elevada aguas abajo del interruptor automático.

Ensayos	corriente cortada I (kA)	número de ensayos	1ª cresta de tensión U ₁ ó U _c (kV)	frecuencia F (kHz)	T ₁ ó T ₃ (µs)	VATR (kV/µs)
Ensayos con autoinducción	1,1	5	140	17	26	5,4
	2,5	6	85	28	15	5,7
Ensayos con simulador	5	10	126	33	13,5	9,3
	10	3	126	22	20	6,3
	10	2	126	50	9	14
	15	3	139	22	20	7
	5	3	250	18	24,5	10,2
	10	5	250	18	24,5	10,2
	15	3	250	19	23	10,9
20	2	250	21	21	11,9	

Tabla 5: Resultados de ensayos de corte a frecuencia elevada.

Anexo: Las sobretensiones durante el corte de corrientes inductivas débiles

Se conocen perfectamente los fenómenos susceptibles de producir sobretensiones durante el corte de corrientes inductivas débiles.

Son de 2 tipos:

- la interrupción anticipada de corriente, normalmente llamada «arranque de la corriente»,
- los reenganches sucesivos.

Por otra parte, estos dos fenómenos pueden aparecer sucesivamente, en una misma maniobra.

En los dos casos, la corriente i_d se interrumpe cuando la corriente i_2 no es nula, como continuación de las oscilaciones de alta frecuencia que se superponen a la componente de corriente de frecuencia industrial en el interruptor automático. (Figura 12).

«Arranque» de la corriente

La corriente i_d se interrumpe cuando la corriente i_2 es igual a i_0 y la tensión u_2 tiene el valor de U_0 . (Figura 13).

Si se puede pasar por alto la amortiguación del circuito aguas abajo durante 1/4 de período de su oscilación propia, el cálculo de la sobretensión es evidente:

$$U_C = \sqrt{U_0^2 + \frac{L_2}{C_2} \cdot i_0^2} \quad [1]$$

donde C_2 es la capacidad en paralelo sobre la autoinducción L_2 después del corte:

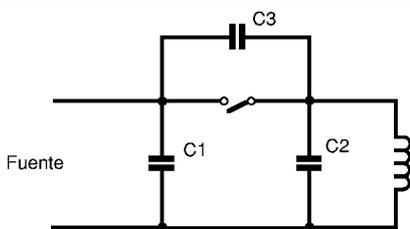


Fig. 12: Esquema representativo del corte de una corriente inductiva.

$$C'_2 = C_2 + \frac{C_1 \cdot C_3}{C_1 + C_3} \quad [2]$$

Si U_m es la amplitud de la tensión aguas abajo antes del corte
 $U_0 \approx U_m$
 el coeficiente de sobretensión $k = U_C / U_m$, se expresa entonces:

$$k = \sqrt{1 + \varepsilon^2} \quad [4]$$

donde:

$$\varepsilon = \frac{i_0}{U_m} \sqrt{\frac{L_2}{C'_2}} \quad [5]$$

Es interesante estudiar el término ε cuando el valor de la corriente "arrancada" cumple la ley:

$$i_0 = \lambda \sqrt{n C'_3} \quad [6]$$

donde:

n es el número de intervalos de corte en serie para un polo y
 C'_3 es la capacidad en paralelo sobre un polo:

$$C'_3 = C_3 + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad [7]$$

La relación (4) se convierte en:

$$\varepsilon = \frac{\lambda \sqrt{n L_2}}{U_m} \sqrt{\frac{C_1 + C_3}{C_1 + C_2}} \quad [8]$$

Por regla general, los valores de capacidad son tales que:

$$C_1 \gg C_2 \text{ y}$$

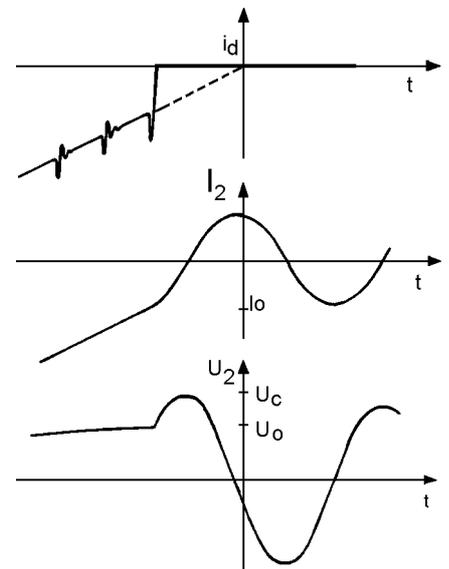
$$C_1 \gg C_3.$$

La relación (8) se convierte por tanto en:

$$\varepsilon = \frac{\lambda \sqrt{n L_2}}{U_m} \quad [9]$$

de donde:

$$k = \sqrt{1 + \frac{\lambda^2}{U_m^2} n L_2} \quad [10]$$



i_d : corriente en el interruptor automático.
 i_2 : corriente en la autoinducción aguas abajo.
 u_2 : tensión aguas abajo.

Fig. 13: Corte con «arranque» de corriente.

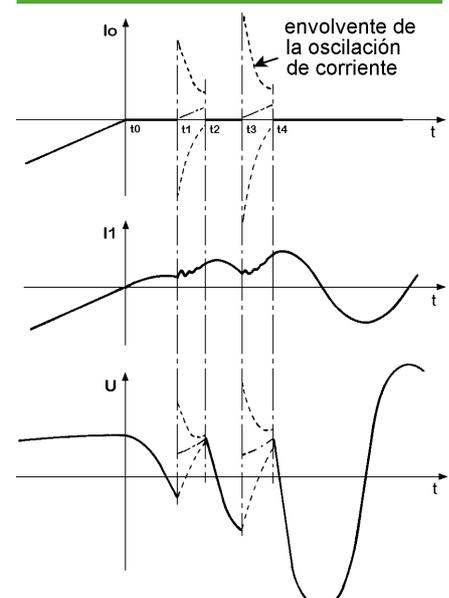


Fig. 14: Corte seguido de varios reencendidos sucesivos.

Existe siempre un límite superior del valor de L_2 más allá del cual esta relación ya no se aplica. Este límite se alcanza cuando la corriente «arrancada» es igual a la amplitud de la corriente cortada.

En definitiva, si se produce un «arrancamiento» de la corriente sin reencendido, el nivel de la sobretensión puede predeterminarse. Por otra parte, si la capacidad aguas arriba es grande respecto a otras capacidades, el nivel de sobretensión depende sólo, para un tipo de interruptor automático y una tensión dados, del número de intervalos de corte por polo y del valor de la autoinducción aguas abajo.

Reencendidos sucesivos

Los fenómenos de reencendidos sucesivos ilustrados en la **figura 14** han sido descritos en la literatura técnica. Hay que recordar esencialmente que, en este caso, la sobretensión es debida a la transferencia en la capacidad aguas abajo de la energía que es reinyectada en el circuito aguas abajo en el momento de cada reencendido. La máxima tensión no se alcanza necesariamente después del corte definitivo, pero se puede producir sobre todo en función de los intercambios de energía entre el circuito aguas arriba y el circuito aguas abajo. El nivel de sobretensión depende de numerosos parámetros, tales como:

- la frecuencia propia del circuito aguas abajo;
- el instante de apertura de los contactos respecto a la fase de corriente;
- la velocidad de restablecimiento de la rigidez dieléctrica entre contactos;
- las características de oscilación de la corriente de alta frecuencia que dependen ellas mismas de la distancia que separan las capacidades aguas arriba y aguas abajo.

La naturaleza de algunos de estos parámetros confiere a este fenómeno un carácter muy aleatorio, y parece muy difícil predeterminar el nivel de sobretensión que podrá alcanzarse en una red dada. Esto queda todavía agravado por la interacción que puede producirse entre las fases.

Bibliografía

Michaca R., Verdon J., Okerman J.C., Rollier C., Daillet J., Trolliet B. *Vers le disjoncteur sans entretien*. CIGRE. 1974. Rapport 13-06.

Berneryd S., Solver C.E., Ahlgren L., Erikson R. *Coupage de réactances shunt. Comparaison entre essais in situ et essais en laboratoire*. CIGRE. 1976. Rapport 13-04.

Comité d'études n° 13. *Tension transitoire de rétablissement relative à la coupure de courants de court-circuit limités par des transformateurs*. CIGRE. 1970. Rapport 13-07.

Harner Rh. and Rodriguez J. *Transient recovery voltages associated with power system, threephase transformer secondary faults*. IEEE PAS 91. Sep/Oct. 1972: p. 1887 a 1896.

Mircovich J.L., Perrissin G. *Comparaison des surtensions de contacteurs HT à coupures sous vide et dans l'air*. Merlin Gerin CT 66.