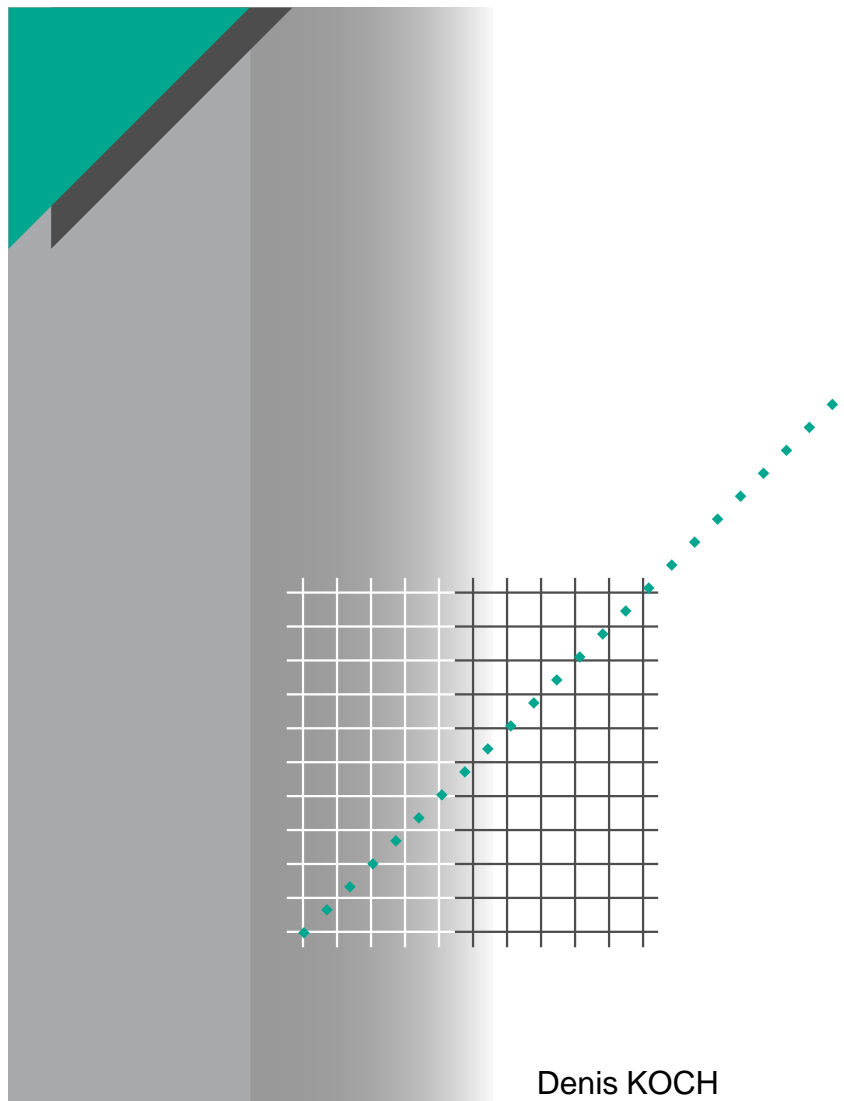


Cuaderno Técnico nº 189

Maniobra y protección de las baterías de condensadores de Media Tensión



Denis KOCH

Merlín Gerín

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» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

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

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 189 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 189

Maniobra y protección de las baterías de condensadores de Media Tensión

Denis KOCH



Ingeniero diplomado del IEG (Grenoble) en 1979; se incorporó este mismo año a la división THT (Muy Alta Tensión) de Merlin Gerin. De inmediato fue nombrado responsable técnico de los interruptores automáticos MT, poniendo a punto su marketing operacional. Después de 1995 y en la actividad T&D (Transporte y Distribución) de Schneider, se le encomendaron, en el seno del equipo de marketing estratégico, las áreas de normalización, tecnología y entorno.

Trad.: M. Pla
Original francés: junio 1997
Versión española: junio 2000



Terminología

Energía activa:

Es la que se transforma íntegramente en trabajo o en calor (pérdidas). Se mide en kWh.

Energía reactiva:

Se manifiesta cuando existe un intercambio de energía activa entre la fuente y una carga. Está asociada a los campos magnéticos internos de los motores y transformadores. Se mide en kVAr. Esta energía provoca sobrecarga en las líneas sin producir trabajo útil, por ello es necesario compensarla.

Escalones - (back to back en inglés y gradins en francés):

Conexión de las baterías de condensadores múltiples, de forma que absorben fraccionadamente la carga de la red. Es utilizada en grandes industrias (potencia instalada importante) y para la distribución de energía (centrales generadoras).

Símbolos:

U: tensión entre fases de la red,
I_{cc}: corriente de cortocircuito de la red,
S_{cc}: potencia de cortocircuito de la red,
L₀: inductancia de cortocircuito de la red,

f: frecuencia industrial,

ω: pulsación a frecuencia industrial,

L: inductancia de conexión (serie) con la batería (caso de batería única),

ℓ: inductancia de conexión (serie) con cada escalón de la batería (caso de batería de escalones),

L: inductancia de choque,

C: capacidad de la batería,

Q: potencia de la batería,

I_{capa}: corriente capacitiva que circula por la batería,

I_e: intensidad de pico al cierre,

f_e: frecuencia propia de oscilación de **I_e**,

S_a: coeficiente de sobretensión aguas arriba (lado red) **S_A** en p.u. = tensión de pico máxima

aguas arriba, al cierre, dividida por $\frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$,

S_b: coeficiente de sobretensión aguas abajo (lado condensador),

I_n: intensidad en servicio continuo,

I_{cie máx}: intensidad de pico máxima de cierre.

Maniobra y protección de las baterías de condensadores de MT

El deterioro del $\cos \phi$ debido a las cargas autoinducidas, provoca un aumento significativo de intensidad en las instalaciones eléctricas y produce pérdidas en las líneas y transformadores. Las Compañías distribuidoras y las industrias están obligadas a poner en servicio las baterías de condensadores. Conectar y desconectar los condensadores produce fenómenos muy particulares que influyen directamente en las características de la aparamenta de maniobra y de protección. Este Cuaderno Técnico tiene por objeto su estudio, haciendo continuas referencias a las normas y a los ensayos.

1 Compensación de la energía reactiva	1.1 Generalidades	p. 6
	1.2 Las técnicas de compensación en media tensión	p. 7
	1.3 Definición de los símbolos utilizados	p. 8
2 Maniobra de las baterías de condensadores	2.1 Fenómenos eléctricos relacionados con el accionamiento y conexión	p. 9
	2.2 Fenómenos eléctricos relacionados con la desconexión	p. 11
	2.3 Orden de magnitudes	p. 12
3 Problemas que presentan los condensadores y soluciones	3.1 Solicitaciones eléctricas	p. 14
	3.2 Concepción de las baterías de condensadores	p. 14
	3.3 Dimensionado térmico de la aparamenta	p. 15
4 Problemas que presenta la aparamenta y soluciones técnicas	4.1 Problemas presentados	p. 16
	4.2 Soluciones Schneider	p. 17
	4.3 Normas	p. 17
	4.4 Tabla para la elección de la aparamenta de MT de Merlin Gerin	p. 19
5 Cálculo de las intensidades de conexión e inductancias de choque	5.1 Batería única	p. 20
	5.2 Batería en escalones	p. 20
	5.3 Las inductancias de choque	p. 21
6 Protección contra las sobreintensidades	6.1 Protección con fusible	p. 22
	6.2 Protección por interruptor automático	p. 22
	6.3 Protección contra los defectos internos	p. 23
Anexo 1: Principales características de la aparamenta de MT		p. 24
Anexo 2: Valoración de las aplicaciones de la aparamenta de MT		p. 25
Anexo 3: Cuadro comparativo del cálculo de las corrientes de conexión		p. 27
Anexo 4: Bibliografía		p. 28

1 Compensación de la energía reactiva

1.1 Generalidades

La implantación de condensadores sobre una red eléctrica constituye lo que llamamos el «modo de compensación». Su implantación viene determinada por:

- el objetivo propuesto (supresión de gravámenes o penalizaciones, descarga de cables y transformadores, etc. o estabilización del nivel de tensión),
- el modo de distribución de la energía eléctrica,
- el régimen de carga,
- la influencia con aplicación de condensadores sobre las características de la red,
- el coste de la instalación.

La compensación de la energía reactiva puede ser (figura 1):

■ global; ejemplo:

- en la red de AT para Cía. de distribución ①,
- en la red de MT para un abonado en MT ②,
- en red de BT ③ para un abonado en BT sobre batería de tipo fijo,

■ por sectores; ejemplo:

- centro de distribución de Cía. eléctrica (central generadora) ④,
- fábrica, taller o edificio, para un abonado en BT ⑤,

■ individual.

Esta compensación es técnicamente ideal ya que produce la energía reactiva en el punto mismo de consumo y en cantidad rigurosamente ajustada a la demanda. A pesar de ello, esta solución es económicamente desfavorable, y conduce generalmente a una

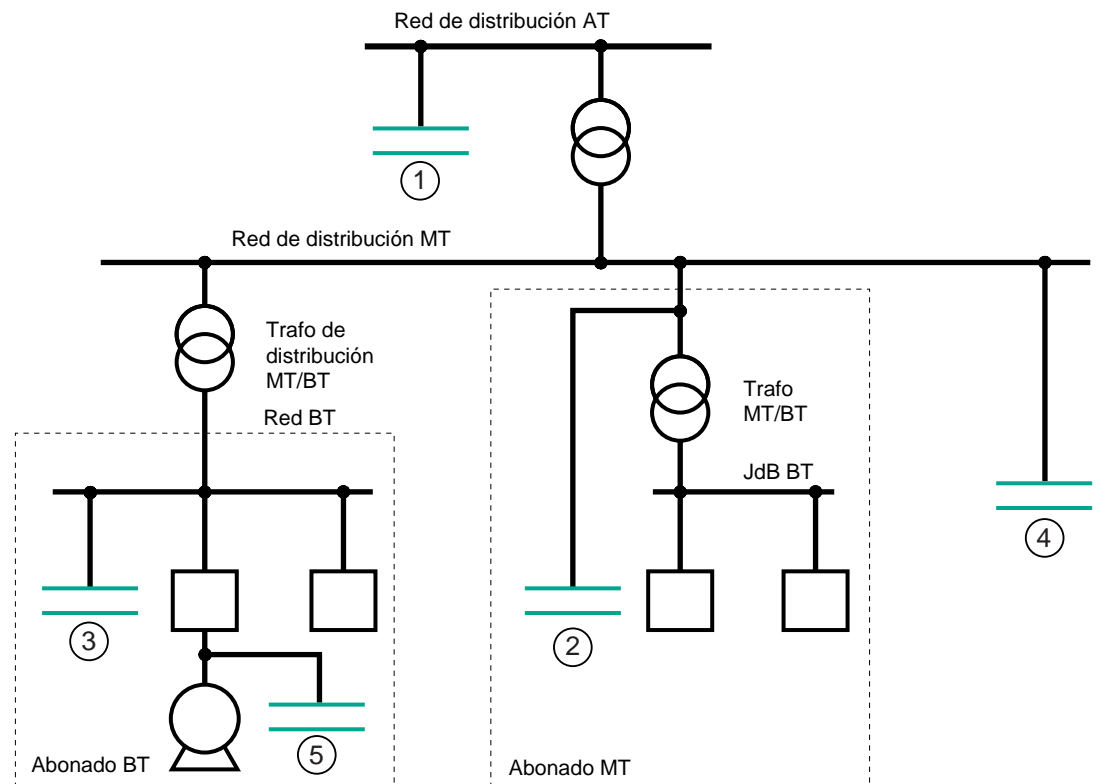


Fig. 1: La implantación de condensadores de energía reactiva.

sobrecompensación ya que no contempla la posibilidad de aplicación de los coeficientes de utilización y simultaneidad de las cargas. Ejemplo: grandes motores de MT o BT. En la práctica, instalar las baterías de condensadores en media y alta tensión, resulta ventajoso económicamente para potencias de unos 1 000 kVAr o superiores. Analizando las redes de diferentes países se llega a la conclusión que no es posible establecer una regla universal. El modo de comprensión depende de la política energética de los países y distribuidores. En los Estados Unidos la compensación se realiza esencialmente en MT por razones de tipo tarifario. Por contra, en Alemania, la compensación se realiza preferentemente en BT ya que parece lógico compensar exactamente en el punto de consumo de la energía reactiva.

En Francia:

■ La Compañía distribuidora de ámbito nacional, instala baterías fijas en las redes de 63 kV y 90 kV (baterías no fraccionadas), y en centros de producción en AT/MT, sobre las redes de 10, 15 y 20 kV instalan baterías en escalones (fraccionadas). La potencia de estas últimas baterías puede alcanzar 4,8 MVar en redes de 20 kV.

■ Los abonados en MT o BT deben compensar sus instalaciones para obtener el $\cos \phi$ en el punto de suministro a la red, igual o superior a 0,928. Este documento sólo trata de la compensación de la energía reactiva en MT. En España:

■ Se considera que la compensación en MT resulta económicamente aplicable cuando la potencia instalada es ≥ 800 kVAr. Por debajo de esta potencia la compensación se realiza en BT, si es posible.

1.2 Las técnicas de compensación en media tensión

Compensación tradicional

Las baterías de condensadores se conectan en derivación sobre la red. Pueden ser:

■ Únicas o fijas (**figura 2**).

Cuando la potencia reactiva es pequeña y la carga a compensar relativamente estable.

■ Fraccionadas (**figura 3**).

Este tipo de compensación comúnmente se denomina «en escalones» (back to back en inglés y gradins en francés). Este tipo de batería es muy utilizada en grandes industrias (potencia instalada importante) y los distribuidores de energía (centrales generadoras). Permite una regulación paso a paso de la energía reactiva. La conexión o desconexión de los escalones de condensadores puede pilotarse con relés de tipo «varmétrico» (reguladores del factor de potencia).

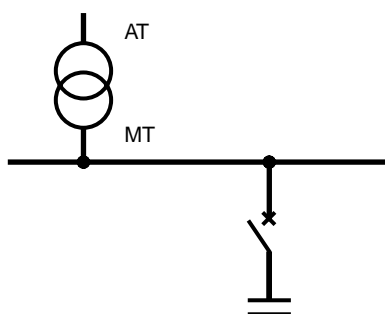


Fig. 2: Batería de condensadores única.

Compensaciones particulares

Nota: Repasamos brevemente estos sistemas a título de recordatorio.

■ Condensadores estáticos instantáneos.

En el caso que sea necesaria una compensación variable y continua (industrias de grandes cargas muy variables y regulación de tensión en algunas redes de MAT) se realizan instalaciones aplicando simultáneamente condensadores, inductancias variables y electrónica de potencia (**figura 4**).

El conjunto se compone generalmente de:

- una batería de condensadores fija,
- un conjunto de filtros de armónicos para absorber los armónicos de la red y los propios de la instalación (electrónica de potencia),
- una inductancia variable conectada por tiristores; esta inductancia absorbe la energía reactiva excedente, generada por los condensadores.

Por su parte, los condensadores pueden estar conmutados por tiristores.

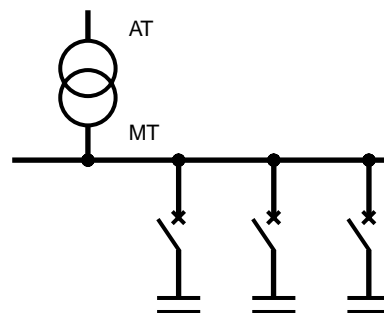


Fig. 3: Batería de condensadores fraccionadas o en escalones.

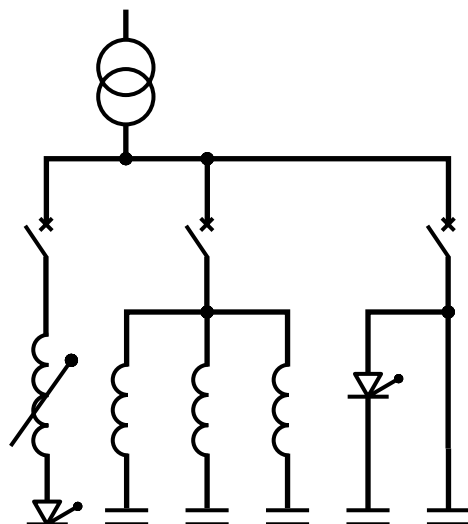


Fig. 4: Principio del compensador estático instantáneo.

■ Baterías en serie.

En el caso de grandes redes con líneas muy largas, las baterías de condensadores pueden estar montadas en serie sobre la línea (**figura 5**). Este tipo de montaje permite una compensación adaptada permanentemente a las necesidades ya que la energía reactiva suministrada depende de la corriente que circula por la línea.

Existen compensaciones de este tipo en el continente americano. Esta tecnología no se utiliza en Europa. Es necesario un sofisticado sistema de puesta en cortocircuito para evitar la descarga de los condensadores cuando por la línea circula una corriente de cortocircuito.

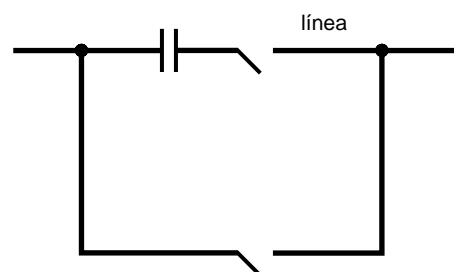


Fig. 5: Batería en serie.

1.3 Definición de los símbolos utilizados

Nota: En este estudio se tratan únicamente circuitos trifásicos.

Las notaciones son las siguientes:

■ La fuente.

□ U: tensión entre fases de la red,

□ I_{cc} : corriente de cortocircuito de la red,

□ S_{cc} : potencia de cortocircuito de la red:

$$S_{cc} = \sqrt{3} UI_{cc} = \frac{U_2}{L_o \omega}$$

□ L_o : inductancia de cortocircuito de la red,

□ f: frecuencia industrial,

□ ω : pulsación a frecuencia industrial.

■ Las conexiones.

□ L: inductancia de conexión (serie) con la batería (caso de batería única),

□ ℓ : inductancia de conexión (serie) con cada escalón de la batería (caso de batería de escalones),

□ L: inductancia de choque.

■ La carga.

□ C: capacidad de la batería,

□ Q: potencia de la batería

$$(Q = U^2 C \omega = \sqrt{3} UI_{capa})$$

□ I_{capa} : corriente capacitiva que circula por la batería.

■ Los fenómenos transitorios.

□ I_e : intensidad pico de cierre,

□ f_e : frecuencia propia de oscilación de I_e ,

□ S_a : coeficiente de sobretensión aguas arriba (lado red) S_A en p.u. = tensión de pico máxima

aguas arriba, al cierre, dividida por $\frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$.

□ S_b : coeficiente de sobretensión aguas abajo (lado condensador).

■ La aparamenta.

□ I_n : intensidad en servicio continuo,

□ $I_{cie\ max}$: intensidad de pico máxima de cierre.

2 Maniobra de las baterías de condensadores

2.1 Fenómenos eléctricos relacionados con el accionamiento y conexión

En lo que sigue, el condensador a conectar a la red se supone totalmente descargado. El condensador C está provisto de una resistencia de descarga R, esta hipótesis se verifica cuando el condensador es desconectado después de, al menos, 2 ó 3 veces la constante RC. Toda conexión intempestiva antes de este intervalo será peligrosa. La norma CIE 871 estipula que en un intervalo de 10 minutos, la carga residual de una batería de condensadores no debe exceder de 75 V. Si la aplicación necesita una respuesta más rápida de la regulación «varmétrica» (factor de potencia), la instalación debe preverse de dispositivos adecuados. La conexión de una batería de condensadores destinada a funcionar en derivación sobre una red va acompañada de un régimen transitorio resultante de la carga de la batería. Desde el punto de vista «de la intensidad de la corriente», la carga oscilante provoca una sobreintensidad de amplitud función de las características de la red y de la batería. La conexión equivale prácticamente a establecer, en el punto considerado, un cortocircuito de corta duración (frecuencia elevada con relación a la frecuencia de la red). Desde el punto de vista «de tensión», la carga va acompañada de la propagación, sobre la red, de una onda de choque. Estos fenómenos transitorios dependen de las características de la red, del instante de cierre de los contactos o del precebado. Hay que considerar dos casos: batería única y batería fraccionada con varios escalones.

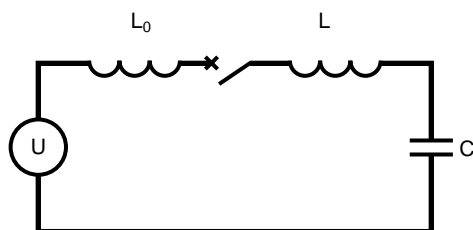


Fig. 6: Esquema de principio de la maniobra de una batería aislada en red.

Batería o condensador único (figura 6)

Nota: $L \leq L_0$.

Despreciamos L con relación a L_0 para los cálculos que siguen.

La conexión, sobre la red, de una batería en estrella aislada (el esquema de principio y curvas de corriente y de tensión, mostrando la sobreintensidad de corriente y las sobretensiones aguas arriba y abajo que acompañan a la conexión) está representada en la **figura 7**.

La frecuencia propia de las oscilaciones es igual a:

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}}$$

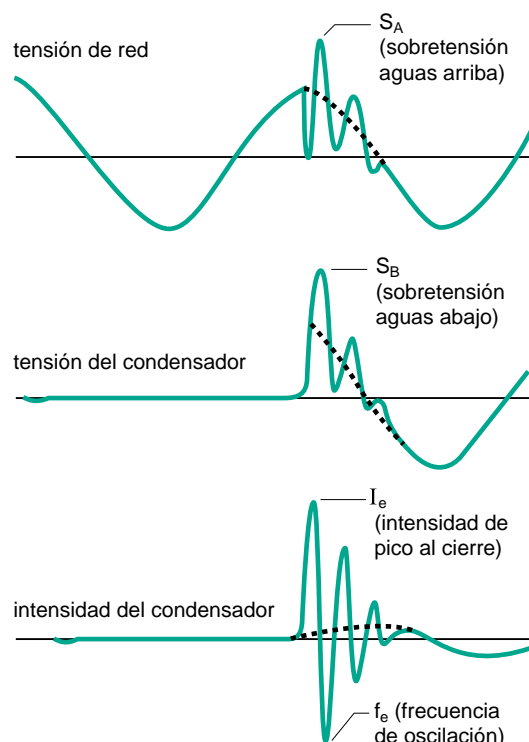


Fig. 7: Tensión e intensidad a la conexión en red de una batería aislada.

Las sobretensiones aguas arriba y abajo son iguales:

$$S_A = S_B = 2 \text{ p.u.}$$

La intensidad de pico al cierre viene dada por:

$$I_e = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L_0}} = I_{\text{capa}} \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

siendo:

S_{cc} = potencia de cortocircuito de la fuente, en MVA en el punto de conexión.

Q = potencia del condensador en MVar

Batería fraccionada (figura 8)

Nota: Para simplificar las ecuaciones, sólo consideramos el caso de escalones con condensadores idénticos. Los cálculos son más complicados en el caso general (ver norma CEI 56. 1987 anexo BB).

L_0 = inductancia del generador (conexión al juego de barras).

ℓ = inductancia de la conexión serie.

n = número de escalones en servicio cuando se conecta el $n+1$.

La conexión de un escalón se realiza en presencia de condensadores ya en tensión y va acompañada de dos fenómenos transitorios superpuestos.

El primero, muy rápido, de frecuencia:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{\ell C}},$$

que corresponde a la descarga de los condensadores sobre el escalón conectado; el segundo, más lento de frecuencia

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}},$$

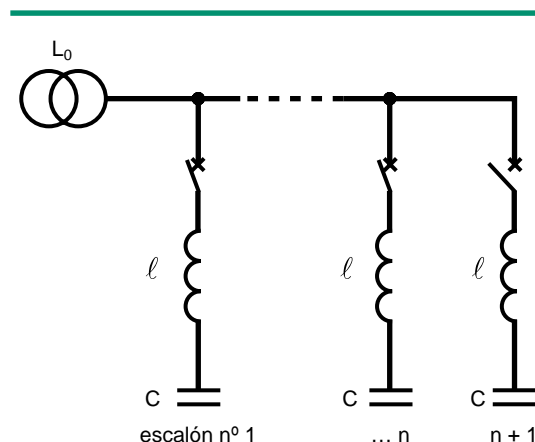


Fig. 8: Esquema de principio de una batería múltiple.

y a menudo despreciable, en comparación al anterior (L_0 es muy superior a ℓ) corresponde a la descarga sobre la red del conjunto de baterías, cuyos potenciales se igualan.

La conexión del $n+1$ escalón de una batería fraccionada a la red (esquema de principio y curvas de intensidad y de tensión mostrando las sobreintensidades y las sobretensiones por efecto de la conexión, con distinción de los dos fenómenos, están representados en la **figura 9**). Obsérvese que la sobretensión propagada, S_A es tanto más débil cuanto mayor es el número de escalones en servicio.

En contra, cuantos más escalones estén en servicio, tanto mayor es la sobreintensidad.

$$I_e = \frac{n}{n+1} \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{\ell}} = I_{\text{capa}} \sqrt{2} \frac{n}{n+1} \frac{f_e}{f}$$

siendo la frecuencia propia de oscilación

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{\ell C}}$$

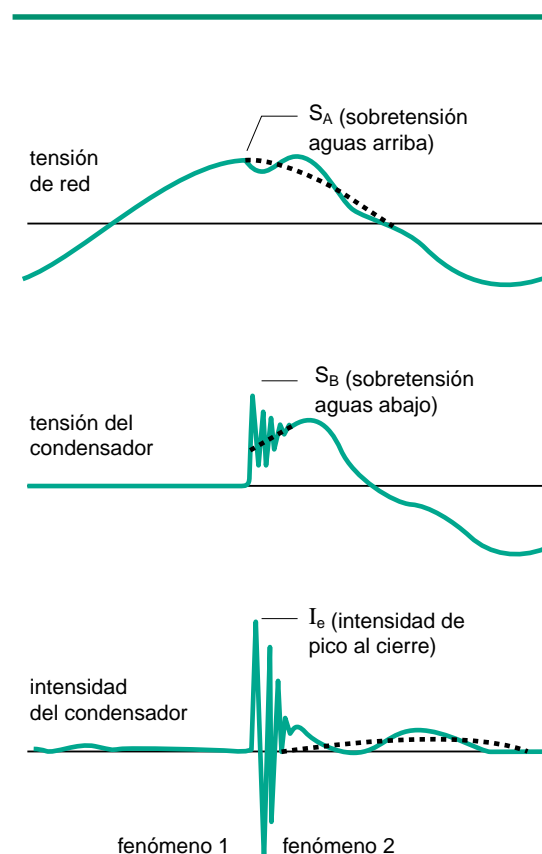


Fig. 9: Tensión e intensidad a la conexión en red de un escalón de una batería múltiple.

sobretensión lado red:

$$S_A = \frac{n+2}{n+1} \text{ p.u.}$$

y en lado condensador:

$$S_A = \frac{2n}{n+1} \text{ p.u.}$$

■ Estas sobretensiones, que alcanzan como máximo dos veces la tensión de red, no presentan generalmente problemas ya que, por construcción, todos los componentes son capaces de soportar este nivel.

■ Por contra, las sobretensiones a menudo necesitan definir medios adecuados para evitar el deterioro de los condensadores y la aparamenta.

2.2 Fenómenos eléctricos relacionados con la desconexión

Con la extinción del arco en el aparato de maniobra, a un paso por cero de la intensidad, la batería separada sigue cargada a la tensión de pico.

Esta tensión se reduce rápidamente a cero gracias a las resistencias de descarga de cada condensador (tiempo: 1 a 5 minutos).

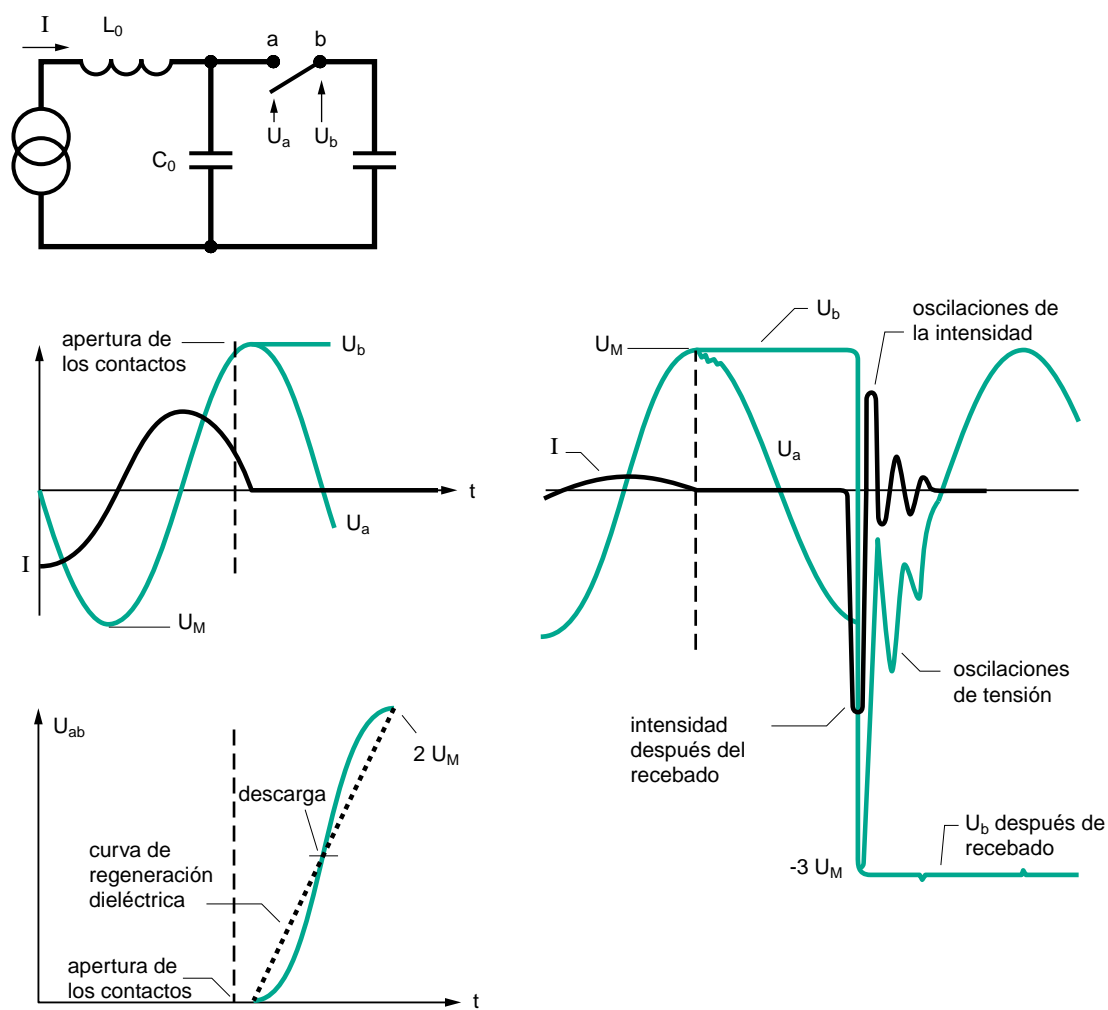


Fig. 10: Tensión e intensidad a la desconexión de una batería.

La tensión de restablecimiento en bornes del interruptor alcanza pues $2 U_m$ en un semiperíodo (hipótesis: tiempo de arco muy corto).

La ruptura se consigue normalmente cuando la regeneración dieléctrica del interruptor crece más rápidamente que la tensión de restablecimiento.

Por contra, si la regeneración crece menos que la tensión de restablecimiento, se produce una descarga (**figura 10 c**).

La norma distingue entre **reencendido** (descarga antes del cuarto de período después de la ruptura) fenómeno que da paso a un crecimiento de la tensión y el **recebado** (descarga después de un cuarto de período). En este caso (**figura 10 d**), los fenómenos son similares a los que encontramos en el cierre, pero pueden ser amplificados por el hecho que el recebado puede producirse bajo una tensión doble de la que puede presentarse en el cierre. Desde el punto de vista teórico, si se producen varios recebados, se comprueba que:

- las ondas de choque crecientes: $2 U_M$; $4 U_M$; $6 U_M$...

- las sobretensiones crecientes: $3 U_M$; $5 U_M$; $7 U_M$...

- tensiones de restablecimiento crecientes: $2 U_M$; $4 U_M$...

En la práctica las tensiones no aumentan tan rápidamente ni de forma tan regular a cada recebado de forma que no aparecen siempre que la diferencia de tensión es máxima y la amortiguación juega un papel importante. No obstante, los recebados sucesivos a la ruptura de una batería pueden conducir a sobretensiones elevadas, peligrosas para la red y los condensadores.

Por otra parte, las sobreintensidades producidas son proporcionales a la diferencia de tensión existente antes del recebado entre la red y la batería. En consecuencia, estas sobreintensidades tendrán amplitudes todavía superiores a las encontradas en el fenómeno del cierre y serán, por ello, más peligrosas para el conjunto de los materiales.

Por todo ello, es primordial utilizar una apartamentada de maniobra en la que la rápida regeneración dieléctrica evite la posibilidad de un recebado.

2.3 Orden de magnitudes

Las sobreintensidades a la conexión son muy variables según los tipos de montaje.

- En el caso de una batería única, el pico máximo de intensidad transitoria depende de la potencia de cortocircuito en el punto de conexión.

La **figura 11** da la relación:

$$\frac{I_e}{I_{\text{capa}}}$$

en función de S_{cc} y de la potencia de la batería Q .

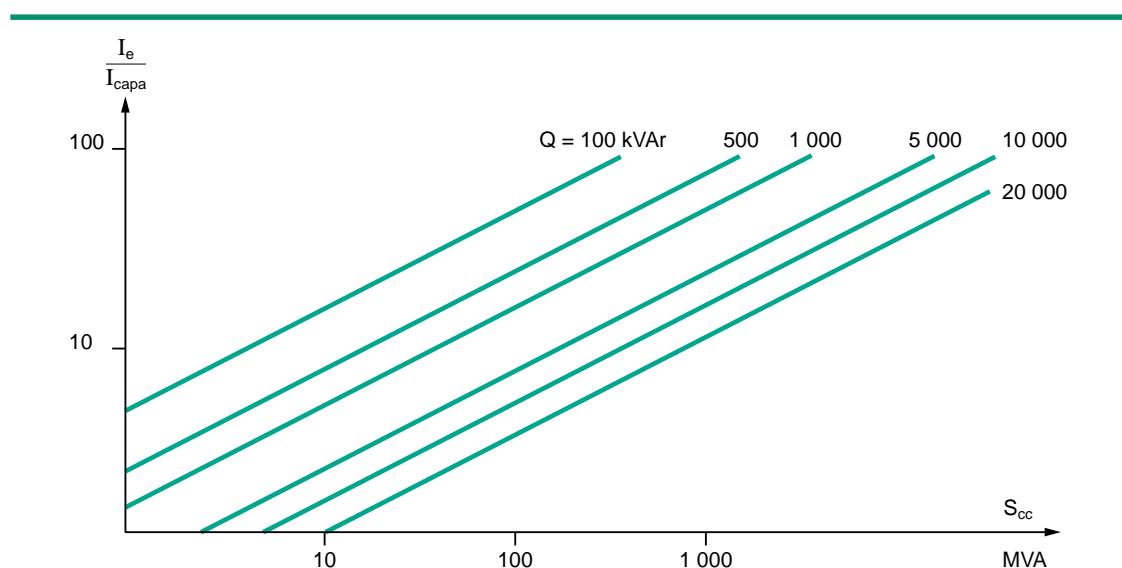


Fig. 11: Sobreintensidad al cierre de una batería de única en función de su potencia y de la potencia de cortocircuito.

Por experiencia en instalaciones existentes, la sobreintensidad no rebasa nunca 100 veces la intensidad asignada (I_{capa}).

Como valor medio, la sobreintensidad es del orden de 10 a 300 veces I_{capa} .

La frecuencia propia del régimen transitorio es de 300 a 1000 Hz:

$$\left(f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}} = \frac{\omega}{2\pi\sqrt{2}} \frac{I_e}{I_{\text{capa}}} \right)$$

■ En el caso de una batería fraccionada la intensidad transitoria es bastante más elevada

ya que la inductancia de conexión ℓ es más pequeña con relación a la inductancia de una fuente.

Sin limitaciones específicas (inductancias de amortiguación), la sobreintensidad es de 30 a 50 veces más elevada que en el caso anterior. Estas sobreintensidades, en general, rebasan los valores que pueden soportar los materiales. Se entiende que son necesarias, en la mayoría de los casos las inductancias de limitación (denominadas «self» o «bobinas de choque») (**capítulo 5**).

3 Problemas que presentan los condensadores y soluciones

3.1 Solicitaciones eléctricas

La maniobra de los condensadores genera sobreintensidades y sobretensiones que deben ser soportables por los materiales de construcción.

Si los materiales de la aparamenta se han concebido para soportar las solicitaciones normales, sin prestaciones específicas suficientes, es necesario tomar precauciones adicionales.

Desde el punto de vista de los condensadores

La sobretensión en bornes, de $2 U_M$, se soporta normalmente sin envejecimiento particular con la condición que no se presente

con una frecuencia superior a las 1 000 veces por año.

Las sobreintensidades a la conexión no deben sobrepasar 100 veces la intensidad nominal de la batería de condensadores.

Tal valor de sobreintensidad puede soportarse con una frecuencia no superior a 1 000 veces por año, una sobreintensidad de 30 veces I_n admite una frecuencia de 100 000 veces al año. En el caso de sobreintensidades superiores, es necesario instalar en serie inductancias de limitación, comúnmente denominadas «self de choque» colocadas en serie con la o las baterías de condensadores.

3.2 Concepción de las baterías de condensadores

Hay que considerar dos casos:

- batería única (figura 12),
- batería fraccionada o en escalones (back to back) (figura 13).

Batería única

El material es, en general, de concepción simple ya que:

- la S_{cc} de la red no produce sobreintensidades superiores a $100 I_{capa}$,
- el número de maniobras es bajo, dado que no hay regulación de energía reactiva. No se usan, en general, bobinas de choque. La batería de condensadores se conecta directamente a la red a través de su órgano de protección, elegido en función de sus características de tensión, poder de ruptura, corriente térmica (corriente capacitiva + 30%),
- I_e debe ser inferior al poder de cierre del aparato de protección, para el número de maniobras considerado.

Batería en escalones

Las inductancias de conexión son generalmente más reducidas, entre las diferentes baterías de condensadores. Es necesaria una limitación de las corrientes de conexión con instalación de bobinas de choque en serie con la batería:

- para no rebasar el valor de $100 I_{capa}$, admisible por los condensadores,
- para no rebasar la capacidad de cierre de la aparamenta.

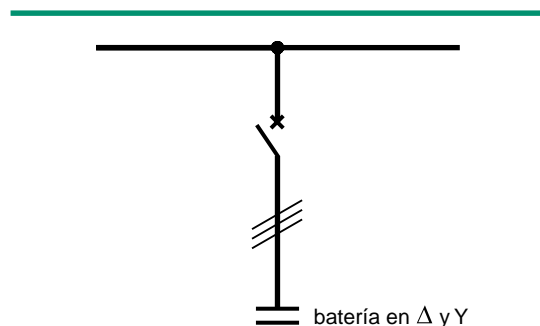


Fig. 12: Batería única.

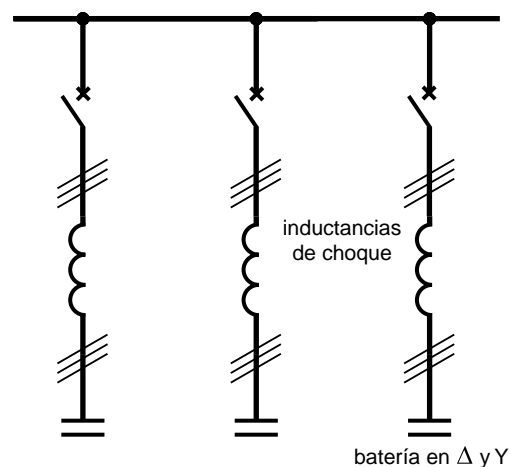


Fig. 13: Batería en escalones.

3.3 Dimensionado térmico de la aparamenta

Un aparato está caracterizado por una intensidad nominal que corresponde a un límite de calentamiento permanente. Cuando estos mismos aparatos maniobran o protegen condensadores, hay que tener en cuenta la intensidad real que circula por la batería, que puede ser superior a la intensidad asignada. Esta sobrecarga permanente proviene generalmente de armónicos de corrientes de

frecuencias superiores a la frecuencia industrial.

Los condensadores industriales de potencia pueden soportar una intensidad 1,3 veces su valor nominal.

Con esto, la intensidad capacitiva máxima asignada a 50 Hz para cualquier aparato será de $0,7 I_n$,

siendo:

I_n = Intensidad nominal de la aparamenta de maniobra.

4 Problemas que presenta la aparamenta y soluciones técnicas

En la aparamenta, podemos distinguir (figura 14):

■ los aparatos de maniobra (interruptores, contactores) que se utilizan en el caso de los escalones múltiples,

■ los aparatos de protección (interruptores automáticos) que se usan siempre con las baterías únicas, y generalmente también en el caso de escalones.

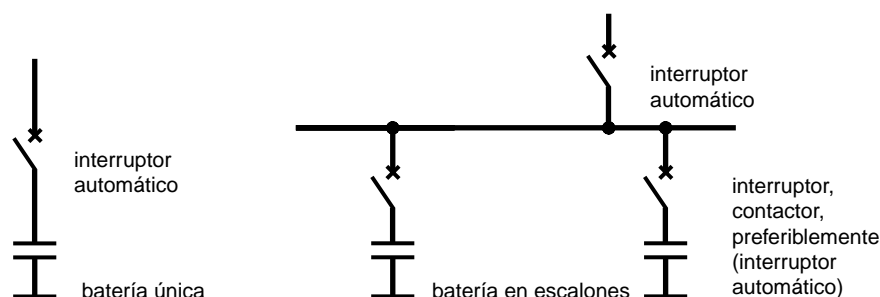


Fig. 14: Aparamenta de maniobra y protección de las baterías.

4.1 Problemas presentados

Los principales problemas que se presentan a la aparamenta los resumimos a continuación:

Intensidad de conexión

■ A la frecuencia nominal (50 ó 60 Hz) el interruptor automático no ve pico de intensidad durante el período de arco (< 3 ms).

■ A una frecuencia del orden de kHz, el interruptor automático se ve sometido a toda una serie de picos de intensidad durante el período de arco: esto significa que el desgaste de los contactos es francamente más importante a frecuencia elevada que a frecuencia nominal, para un mismo valor de intensidad.

Ruptura

Los principales fenómenos en juego están descritos en el párrafo correspondiente a los fenómenos eléctricos relacionados con la desconexión (problema dieléctrico, ante todo, atención al recebado).

Con esto, volvemos al caso donde debe asegurarse la función protección con las

solicitaciones relacionadas directamente con la ruptura de corrientes de cortocircuito.

Sobrecargas debidas a los armónicos

Los generadores y receptores con circuitos magnéticos saturables (convertidores estáticos), producen deformaciones en la onda de tensión:

De ello se desprende la aparición de armónicos de corriente no despreciables porque, en el caso de los condensadores, la corriente I es proporcional a la frecuencia del armónico de rango n , de valor relativo $x\%$

$$I = UC_n \omega = I_{50\text{Hz}} \sqrt{1 + (nx)^2}$$

siendo:

$$U = U_{50\text{Hz}} \sqrt{1 + x^2}$$

El coeficiente de sobrecarga es:

$$\frac{\sqrt{1 + (nx)^2}}{\sqrt{1 + x^2}} \approx 1 + x^2 \frac{n^2 - 1}{2}$$

Las normas UTE 127, C54.100, CEI 70, CEI 871 relativas a los condensadores, indican un coeficiente de sobrecarga de 30% (que corresponde a $n = 5$ y $x = 17\%$).

Si I_n es la intensidad en servicio continuo del aparato, la intensidad máxima capacitiva a 50 Hz que podrá circular será, pues, igual a $I_{\text{capa}} = 0,7 I_n$ (**figura 15**).

Resistencia mecánica

La apartamentación de mando y protección de las baterías de condensadores a menudo ha de maniobrar varias veces en un día; es pues necesario presentar unas buenas características de durabilidad eléctrica y resistencia mecánica.

I_n (A)	I_{capa} (A)
630	400
1250	875
2500	1750
3150	2200

Fig. 15: Intensidad I_{capa} máxima en función la intensidad en servicio continuo I_n .

4.2 Soluciones Schneider

Para responder a esta serie de problemas, Schneider Electric ha elegido la técnica de ruptura en SF_6 .

La rigidez dieléctrica de este gas, tan superior a los otros medios empleados, a igual presión, garantiza la ruptura de corrientes capacitivas sin aparición de recebado. La presión del SF_6 es relativamente baja ($\leq 2,5$ bar).

La resistencia dieléctrica a la abertura no está ligada al pico de intensidad de cierre precedente.

El desgaste en los contactos se debe principalmente a la sobreintensidad que aparece con el cierre (el desgaste de abertura es despreciable) ya que se produce en cada maniobra: es pues el valor de esta sobreintensidad de pico, así como el número de maniobras, lo que debe considerarse para la durabilidad eléctrica.

Se obtiene una buena durabilidad eléctrica gracias al empleo de aleaciones de tungsteno

en las extremidades o dedos de contacto que impiden el chisporroteo del arco y gracias a la utilización de SF_6 con un filtro molecular que tiene por misión limitar el nivel de descomposición del gas en la ruptura a valores despreciables.

La robustez y la simplicidad del mecanismo de los aparatos permite realizar, en general, 5 veces más maniobras de las exigidas por la norma CEI 56 (1987) que es de 10 000 maniobras.

El conjunto de la gama de aparatos Merlin Gerin es apto para maniobrar los equipos de condensadores conforme a las normas CEI y ANSI. Las prestaciones se consignan en las fichas técnicas.

Proponemos a título de ejemplo, algunas características de interruptores automáticos, contactores e interruptores de media tensión, en el **Anexo 1**.

4.3 Normas

Normas CEI

La norma 56.1987 indica las modalidades de ensayos para cierre y ruptura de corrientes capacitivas. Son posibles dos circuitos de alimentación:

- circuito A: Impedancia de un valor tal que la corriente de cortocircuito es igual o inferior al 10% del poder de ruptura en cortocircuito nominal del interruptor automático,
- circuito B: Impedancia de un valor tal que la corriente de cortocircuito es del orden del poder

de ruptura nominal en cortocircuito del interruptor automático.

Si I_{capa} es el poder de ruptura nominal en intensidad capacitiva, distinguiremos cuatro (4) secuencias de ensayo (**figura 16**). Cada secuencia de ensayo comporta 10 ensayos (caso trifásico) ó 12 ensayos (caso monofásico).

Referente al poder de cierre de las baterías de condensadores en escalones, la norma CEI repite los métodos de cálculo de las

intensidades de cierre e indica el orden de magnitud de la frecuencia propia de estas corrientes: 2 a 5 kHz.

Norma ANSI

Documentos concernientes al tema:
ANSI C37-06 (1987), IEEE C 37-09 (1979),
IEEE C 37-12 (1979)

Definición de los parámetros de estas normas:

- V: tensión nominal máxima,
- I_{sc} : intensidad de cortocircuito,

$$A = \frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{capa}}.$$

Ver **figura 17**.

En cada secuencia, se tolera un cebado de arco si se produce en menos de un tercio de ciclo después de la ruptura (< 5,5 ms).

Número de operaciones: 24 aperturas distribuidas de la forma siguiente:

- 12 aperturas de 0° a 180° con 2 aperturas cada 30°, es decir, 0°, 30°, 60°, 90°, 120° y 150°.
- 6 aperturas con tiempo de arco de la primera fase que corta más rápido de $\pm 7,5^\circ$.

secuencias	circuito de alimentación	I de ensayo en % de I_{capa}
1	A	20 a 40
2	A	superior a 100
3	B	20 a 40
4	B	superior a 100

Fig. 16: Las cuatro secuencias de ensayo según la norma CEI 56.

- 6 aperturas con tiempo de arco de la primera fase que corta más tarde de $\pm 7,5^\circ$.

Valor de I_{capa} (**figura 18**).

Parámetros de ensayos en escalones (**figura 19**).

Reglamento de la Compañía de suministro francesa (EDF)

Normas: NF C64.-132, interruptores de baterías en escalones de condensadores.

La Cía. utiliza los escalones de condensadores de MT, bajo envolvente con interruptor integrado.

secuencia	nº de secuencia	tensión	% capa	número de operaciones
prueba capacidad en banco aislado o cableado	1 A	$2V.(1 + A)^{-1}$	30	24 aperturas
prueba capacidad en banco aislado o cableado	1 B	$2V.(1 + A)^{-1}$	100	24 cierre/apertura
prueba múltiple	2 A	$2V.(1 + A)^{-1}$	30	24 aperturas
prueba múltiple	2 B	$2V.(1 + A)^{-1}$	100	24 cierre/apertura

Fig. 17: Secuencia de ensayo según norma ANSI.

I_n (A)	I_{capa} máx (A)	
	interruptor automático interior	interruptor automático exterior
1 200	630	400
2 000	1 000	400
3 000	1 600	400

Fig. 18: Ensayo según norma ANSI - valor de I_{capa} en función de I_n .

	interruptor automático interior		interruptor automático exterior	
	I_e (kA)	f_e (kHz)	I_e (kA)	f_e (kHz)
$I_n \leq 2\,000$ A	15	$\leq 2,0$	20	4,2
$I_n = 3\,000$ A	25	1,3	20	4,2

Fig. 19: Parámetros de ensayo condensadores múltiples.

El interruptor de Merlin Gerin utilizado es el ISF1.
 Potencia de las baterías: 4,8 MVA con 160 A capacitivos a 20 kV.
 Distingue dos clases de interruptores (**figura 20**). Los ensayos pueden ser efectuados:

- con un mismo aparato, siguiendo las indicaciones del cuadro,
- con dos aparatos, uno experimentando los ensayos de resistencia mecánica y otro los de durabilidad eléctrica.

El interruptor ISF1 satisface la especificación clase 2, que requiere 10 000 maniobras apertura-cierre, en durabilidad eléctrica ($I_e = 10,2 \text{ kA}$ con una frecuencia de 4.400 Hz e $I_{\text{capa}} = 160 \text{ A}$) y 10 000 maniobras de resistencia mecánica: estas maniobras ilustran que el material Merlin Gerin de ruptura con SF_6 satisface plenamente los requisitos eléctricos que sobrevienen en la conexión y desconexión de las capacidades sobre la red, así como el elevado nivel de durabilidad mecánica exigido.

aparatos a ensayar	clase	durabilidad eléctrica	resistencia mecánica	durabilidad eléctrica	resistencia mecánica
1	1	3 000 cierre/apertura	2 000 cierre/apertura		
	2	5 000 cierre/apertura	5 000 cierre/apertura	5 000 cierre/apertura	5 000 cierre/apertura
2	1 aparato 1	5 000 cierre/apertura			
	1 aparato 2		2 000 cierre/apertura		
	2 aparato 1	20 000 cierre/apertura			
	2 aparato 2		10 000 cierre/apertura		

Fig. 20: Ensayos realizados por la Compañía suministradora EDF.

4.4 Tabla para la elección de la aparamenta de media tensión de Merlin Gerin

Durabilidad eléctrica (al cierre)

Los diferentes ensayos que se han podido realizar en laboratorio, así como los cálculos teóricos de desgaste de los contactos según la ley de Weibull, nos permiten dar, para cada aparato, el número de maniobras máximo en función del valor de la corriente de conexión. La frecuencia de oscilación tiene poca influencia sobre el desgaste de los contactos y

el comportamiento del aparato (salvo el contactor Rollarc con 1,6 kHz máximo). Las curvas para cada aparato se consignan en el **Anexo 2** además de las referencias de los ensayos, y una tabla indicativa, para cada aparato:

- la intensidad de pico correspondiente a la resistencia mecánica del aparato,
- intensidad de pico máxima y el número de maniobras correspondiente.

5 Cálculo de las intensidades de conexión e inductancias de choque

Preliminares

■ Definición de los símbolos utilizados: ver apartado 1.3.

■ En función de las tensiones e intensidades nominales (con $I_{\text{capa}} \leq 0,7 I_n$), del poder de ruptura, etc., se elige la aparamenta en función de los cálculos que siguen.

5.1 Batería única

■ Potencia $Q = U^2 C \omega = \sqrt{3} UI_{\text{capa}}$

■ Intensidad de conexión o cierre:

$$I_e = \frac{1}{\sqrt{L_0 C}} \frac{1}{\omega} I_{\text{capa}} \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{\text{cc}}}{Q}}$$

$$S_{\text{cc}} = \sqrt{3} UI = \frac{U^2}{L_0 C}$$

con:

L_0 : inductancia de cortocircuito de la fuente,

S_{cc} : potencia de cortocircuito de la red,

■ Frecuencia propia de oscilación:

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C}}$$

En general no es necesario emplear inductancia de choque, salvo en el caso que S_{cc} sea muy elevada y Q muy débil; en cuyo caso debe limitarse el pico de corriente:

□ para los condensadores $I_e > 100 I_{\text{capa}}$

□ para la aparamenta (I_e ver incompatibilidad en las curvas del **Anexo 2**)

■ Cálculo de la inductancia de choque ℓ (que debe añadirse a L_0)

□ 1er caso

$I_e > 100 I_{\text{capa}}$ (limitación condensador)

Tomar:

$$L \geq \frac{U^2}{\omega} \left(\frac{200}{Q} - \frac{10^6}{S_{\text{cc}}} \right)$$

siendo:

L en μH

Q en MVar

U en kV

S_{cc} en MVA

□ 2º. caso

$I_e > I_{\text{cie máx}}$ corriente de pico máxima del aparato (señalada en el **Anexo 2**).

Tomar:

$$L \geq \frac{10^6}{\omega} \left(\frac{2Q}{3(I_{\text{máx conexión}})^2} - \frac{U^2}{S_{\text{cc}}} \right)$$

con:

L en μH

Q en MVar

U en kV

$I_{\text{disparo máx}}$ en kA

□ 3er caso

Corresponde a la suma del primero y el segundo.

Tomar para L el valor mayor de ambos.

5.2 Batería en escalones

■ n escalones (idénticos) conectados cuando se conecta el $n+1$.

■ Potencia unitaria:

$$Q = U^2 C \omega = \sqrt{3} UI_{\text{capa}}$$

■ Intensidad de pico de conexión o cierre:

$$I_e = \sqrt{\frac{2}{3}} U \frac{n}{n+1} \frac{\sqrt{C}}{\ell} = I_{\text{capa}} \sqrt{2} \frac{n}{n+1} \frac{f_e}{f}$$

ℓ : inductancia de conexión (serie); 0,5 $\mu\text{H}/\text{m}$ es una aproximación aceptada para barras o cables de MT.

■ Frecuencia de oscilación

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{\ell C}}$$

Las inductancias de conexión entre las diferentes baterías son generalmente muy reducidas (algunos μH). Por ello es necesario prever una inductancia de choque en serie con la batería para limitar las intensidades de conexión (figura 21).

■ Cálculo de la inductancia de choque L .

Se desprecia, en el cálculo, el valor de I , que se sumará a L .

□ 1^{er} caso

$I_e > 100 I_{\text{capa}}$ (limitación condensador).

Tomar:

$$L \geq \left(\frac{n}{n+1} \right)^2 \frac{2 \cdot 10^2}{\omega} \frac{U^2}{Q}$$

□ 2^o caso

$I_e > I_{\text{disparo máx}}$ corriente de pico máxima del aparato (señalada en el Anexo 2).

Tomar:

$$L \geq \left(\frac{n}{n+1} \right)^2 \frac{2 \cdot 10^6}{3\omega} \frac{Q}{(I_{\text{máx conexión}})^2}$$

siendo:

n : número de escalones conectados cuando se conecta el $n+1$,

L inductancia de choque en μH ,

Q potencia de batería en MVAr ,

U en kV ,

$I_{\text{disparo máx}}$ poder de cierre máximo del aparato en kA ,

□ 3er caso

Corresponde a la suma del caso primero y el segundo.

Tomar para L el valor mayor de ambos.

Nota: En el Anexo 3 se presenta un resumen comparativo de los cálculos de corrientes de conexión para una batería única y otra en escalones.

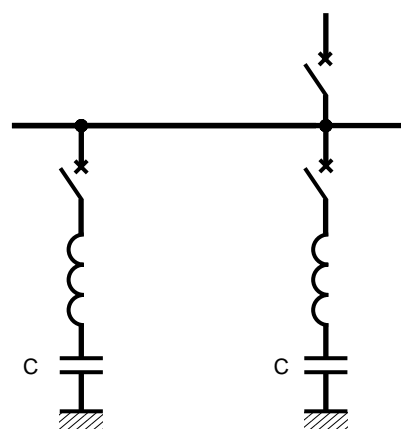


Fig. 21: Las inductancias en serie limitan las intensidades de maniobra.

5.3 Las inductancias de choque

La aplicación de las inductancias de choque deberá determinarse en función a las posibilidades de los fabricantes y de las consideraciones económicas.

Se trata de inductancias al aire, sin núcleo magnético:

Instalación: interior-exterior.

Intensidad permanente nominal: 1,3 a 1,5 I_n

Valor de la inductancia: 0 + 20%

Capacidad térmica a las sobreintensidades instantáneas: 30 a 50 I_n .

Comportamiento electrodinámico: I_{cc} de pico aplicada en el punto de conexión.

Los valores más utilizados son de inductancias de 50, 100 ó 150 μH .

Ejemplo: 50 μH 200 A con tres escalones de 4,8 MVAr a 20 kV .

6 Protección contra las sobreintensidades

La protección contra las sobreintensidades puede realizarse con fusibles o con interruptores automáticos equipados con

protecciones de doble umbral en función de la intensidad y tiempo.

6.1 Protección con fusible

La intensidad de la corriente de cierre, a limitar, puede producir el deterioro de los fusibles. Para determinar el calibre de los mismos, hace falta calcular el valor de la intensidad de pico al cierre, como se ha expuesto anteriormente, y determinar la constante de tiempo de dicha corriente transitoria. Este método resulta complejo.

Precisa conocer la resistencia de la red aguas arriba y la resistencia de los propios fusibles. Existen fórmulas que facilitan su determinación. En la práctica, el calibre de los fusibles es de 1,8 a 2,5 veces la intensidad nominal de la batería de condensadores. La protección por fusible es eficaz contra los cortocircuitos producidos en los circuitos de conexión de la batería a la red.

6.2 Protección por interruptor automático

Los interruptores automáticos deben estar equipados con protecciones de tiempo independiente, con doble umbral de disparo.

Umbral bajo I_{rb}

El umbral bajo protege las sobrecargas debidas a un índice de armónicos de tensión anormalmente alta. Debe regularse a 1,43 veces la intensidad nominal de la batería de condensadores.

$$I_{rb} = 1,43 I_{\text{capa}(n)}$$

La temporización T_b puede tener que regularse con intervalo de algunos segundos.

En presencia de armónicos, la protección contra las sobrecargas debe medir el valor eficaz verdadero de la intensidad.

Debemos observar que, en este sentido, la presencia simultánea en una red de armónicos y condensadores se analiza con

detalle en el Cuaderno Técnico nº 152, dedicado a las perturbaciones armónicas. Menciona un caso en que por causa de un aumento de la polución de armónicos por resonancia, con la inductancia de la red, pueden ponerse en peligro los condensadores.

Umbral alto I_{rh}

Como los fusibles, el umbral bajo protege contra los cortocircuitos. Debe regularse con un valor inferior a la intensidad de cortocircuito mínima.

$$I_{rh} \leq 0,8 I_{cc \text{ min}}$$

El cálculo determina que la duración de la corriente de cierre es pequeña (especialmente en el caso de las baterías de escalones). Ésta es inferior a 200 ms.

La temporización T_h puede establecerse, en consecuencia, en 0,2 segundos.

6.3 Protección contra los defectos internos

Cuando un condensador unitario tiene avería, la intensidad absorbida por su ramal aumenta. Por ejemplo, la variación es de un 11%, si suponemos que este elemento en cortocircuito franco, es uno de 10 condensadores conectados en serie; $i = 1/(10-1)$. Este defecto, indetectable por las protecciones de sobrentensidad puede suponer un efecto en cascada que conduzca a la destrucción de otros condensadores unitarios puestos en batería.

Se disponen protecciones basadas en la simetría del esquema de baterías. Como ejemplo, señalamos el conjunto denominado de «doble estrella» que es uso frecuente. Como se representa en la **figura 22**, un relé de protección contra los desequilibrios entre puntos neutros permite detectar la circulación

de corriente entre estos dos puntos. El deterioro de un condensador de la batería provoca un desequilibrio y produce una circulación diferencial detectable.

El nivel de reglaje está determinado por el constructor. Depende de la estructura interna de la batería (asociación serie y paralelo de los condensadores unitarios) y de la presencia o no de fusibles internos de protección de los condensadores.

La temporización es del orden de algunas décimas de segundo.

La presencia de fusibles internos en los condensadores (**figura 23**) es una mejora que refuerza la continuidad del servicio. La batería puede mantener entonces su función con varios elementos desconectados.

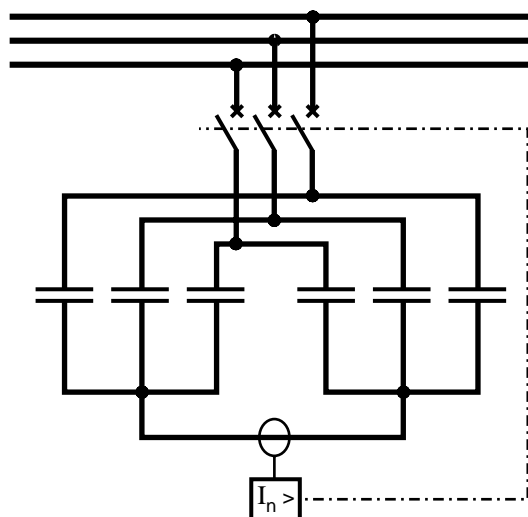


Fig. 22: Batería en doble estrella.

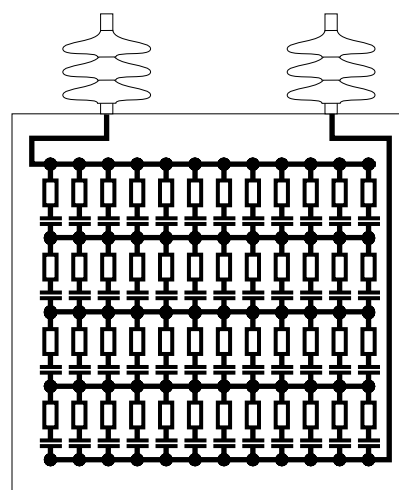


Fig. 23: Condensador con fusibles internos, constituido por 4 grupos en serie.

Anexo 1: Principales características de la aparamenta de MT

Para consultar las características técnicas actualizadas recurrir a las fichas de especificación del producto. Resumimos algunos valores obtenidos en 1997.

(*) puede utilizarse igualmente como interruptor para condensador

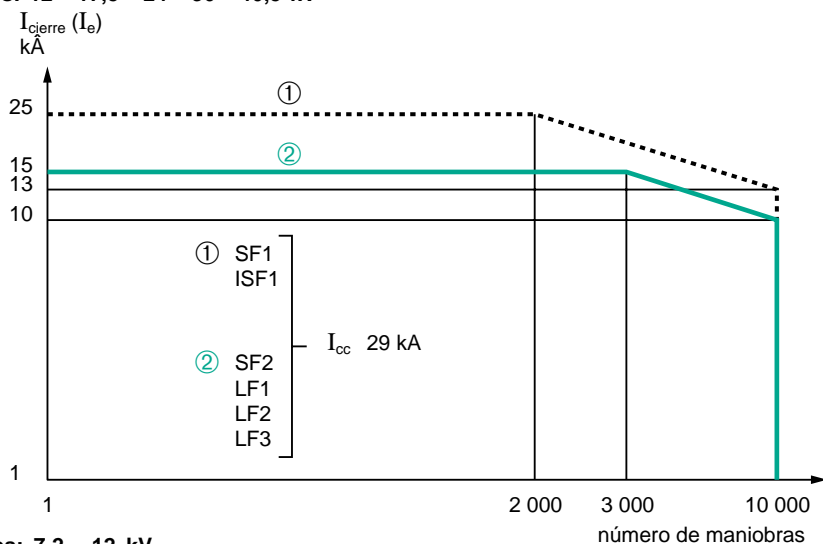
Interruptores automáticos (*)	Prestaciones de corte	Intensidad en servicio continuo	Intensidad capacitiva cortada
LF1	hasta 31,5 kA - 12 kV	630 y 1 250 A	400 A
LF2	50 kA - 7,2 kV 40 kA - 12 kV 31,5 kA - 17,5 kV	630 a 1 250 A	400 A
LF3	hasta 50 kA - 7,2 kV hasta 50 kA - 12 kV hasta 34,5 kA - 17,5 kV	1 250 a 3 150 A	400 A
SF1	hasta 25 kA - 40,5 kV	630 y 1 250 A	400 a 800 A
SF2	hasta 40 kA - 36 kV	2 500 A	400 a 1 750 A
Contactor (*)			
Rollarc R 400	10 kA - 7,2 kV	400 A	240 A
Interruptor para condensador			
ISF1	24 kV	200 A	160 A

Anexo 2: Valoración de las aplicaciones de la aparamenta de MT

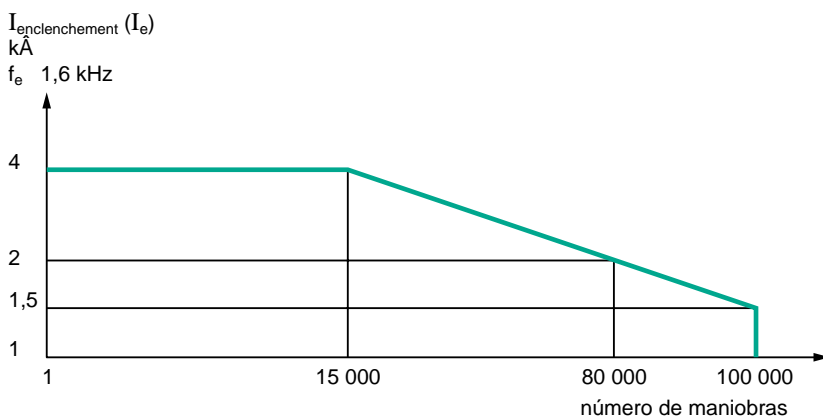
Cuadro comparativo:

Aparato	Designación	N _{máx} Nº máximo de maniobras	I _e a N _{máx} en kA	Nº de maniobras a I _e máx	I _e máx en kA
Interruptor automático	SF1	10 000	10	3 500	15
	SF2	10 000	13	2 000	25
	LF1	10 000	13	2 000	25
	LF2	10 000	13	2 000	25
	LF3	10 000	13	2 000	25
Contactor	Rollarc	80 000	2	15 000	4
Interruptor	ISF1	10 000	10	3 500	15

a) tensiones: 12 - 17,5 - 24 - 36 - 40,5 kV



b) tensiones: 7,2 - 12 kV



Intensidad de cierre en función del número de maniobras.

Referencias de los resultados de los ensayos:

■ Durabilidad al cierre

□ ISF1

Calificación del interruptor de escalones de condensadores de 4,8 MVA realizada por parte de EDF

- se aplican los ensayos de cierre/apertura ya realizados para el IFB4 (por la similitud de los órganos activos entre los dos aparatos): 10 000 cierre/apertura a 23 kV con intensidad de cierre de 11,5 kA, frecuencia de oscilación 3,4 kHz y intensidad de apertura de 160 A. Certificado EDF HM51.02.201,
- los ensayos de resistencia mecánica corresponden a 20 000 cierre/apertura en vacío. Certificado LEMT nº M534b

■ Otros ensayos de cierre/apertura

□ LF1

- Ensayos trifásicos 440 A/12 kV
Certificado VOLTA C2200.

□ LF2

- Ensayos trifásicos 440 A/17,5 kV
24 aperturas a 120 A y 80 cierre/apertura a 400 A
con $\hat{I} = 5,6$ kA y $F = 500$ Hz
Certificado VOLTA B3995.

- Ensayos monofásicos de maniobra dos a dos en batería de escalones de condensadores
80 cierre/apertura a 400 A
con $\hat{I} = 20$ kA y $F = 4\,250$ Hz
Certificado VOLTA B4004.

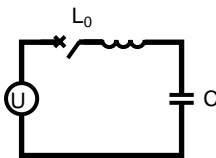
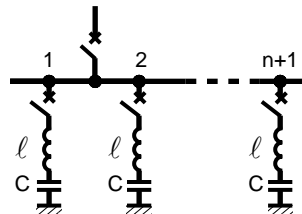
□ LF3

- Ensayos trifásicos 440 A/17,5 kV
24 aperturas a 120 A y 80 cierre/apertura a 400 A
con $\hat{I} = 5,6$ kA y $F = 500$ Hz
Certificado VOLTA B3994.

□ SF1

- SF1 630 A 24 kV 16 kA
Ensayos trifásicos 440 A/29 kV
Certificado CESI GPS 1952 A.
- SF1 630 A 36 kV 12,5 kA
Ensayos trifásicos 440 A/39 kV
Certificado CESI GPS 1952 B.
- SF1 1250 A 26,4 kV 12,5 kA
Según norma Hydro-Quebec SN-15.6a
Ensayos monofásicos con escalón único
 - 34 cierre/apertura a 1 040 A/28,4 kV
 - 33 cierre/apertura a 196 A/23,8 kVEnsayos monofásicos dos a dos en batería de escalones de condensadores
 - 24 apertura/cierre a 860 A/27,5 kV, con $\hat{I} = 20$ kA y $F = 4\,250$ Hz
 - 24 cierre/apertura a 184 A/23,5 kV
Certificado CESI GPS -94/011027.
 - SF1 1250 A 36 kV 25 kA 50 Hz
Ensayos monofásicos 790 A/29,1 kV (790 A/36 kV trifásicos).
Certificado ASTA C 2125 b.

Anexo 3: Cuadro comparativo del cálculo de las corrientes de conexión

	Batería única	Batería de escalones (caso de escalones idénticos)
	 <p> L_0: inductancia de cortocircuito de la red $S_{cc} = \sqrt{3} U I_{cc}$ con: $U / \sqrt{3} = L_0 \omega I_{cc} = U^2 / L_0 \omega$ </p>	 <p> nº de escalones conectados al conectar n+1 l = inductancia de conexión (0,5 µH/m) </p>
Potencia de la batería	$Q = U^2 C \omega = \sqrt{3} I_{capa}$	$Q = U^2 C \omega = \sqrt{3} I_{capa}$ Q = potencia de cada escalón
Intensidad de pico al cierre	$I_e = \frac{1}{\sqrt{L_0 C}} \frac{1}{\omega} I_{capa} \sqrt{2} = I_{capa} \sqrt{2} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$	$I_e = \sqrt{\frac{2}{3}} U \frac{n}{n+1} \sqrt{\frac{C}{l}} = I_{capa} \sqrt{2} \frac{n}{n+1} \frac{f_{propia}}{f_{red}}$
Frecuencia propia	$f_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C}}$	$f_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C}}$
Intensidad de pico máx. de la batería	$I_{pico \text{ máx } batería} = 100 I_{capa}$	$I_{pico \text{ máx } batería} = 100 I_{capa}$
Durabilidad eléctrica de la aparamenta	Ver curva en Anexo 2	Ver curva en Anexo 2
Intensidad nominal	$I_{nominal} \geq \frac{I_{capa}}{0,7}$	$I_{nominal} \geq \frac{I_{capa}}{0,7}$
Coeficiente de sobretenión de red	2 p.u.	$\frac{n+2}{n+1}$ p.u.
Coeficiente de sobretenión de batería	2 p.u.	$\frac{2n}{n+1}$ p.u.
Inductancia de choque	En general, no es necesario aplicar inductancia de choque (salvo si S_{cc} es alta y Q baja)	En general, se precisa instalar inductancia de choque
Cálculo de la inductancia de choque	$L \geq \frac{10^6}{\omega} \left(\frac{2Q}{3(I_{pico \text{ máx}})^2} - \frac{U^2}{S_{cc}} \right)$ <p> L: µH Q: MVA_r S_{cc}: MVA $I_{pico \text{ máx}}$: kÂ (*) </p>	$L \geq \frac{2 \cdot 10^6}{3} \frac{Q}{\omega} \left(\frac{n}{n+1} \right)^2 \cdot \frac{1}{(I_{pico \text{ máx}})^2}$ <p> L: µH Q: MVA_r S_{cc}: MVA $I_{pico \text{ máx}}$: kÂ (*) </p>

- Notas:**
- definición de los símbolos según apartado 1.
 - $I_{pico \text{ máx}}$ es la menor de los dos valores de maniobra siguientes:
 - La intensidad de pico máxima de la batería (o sea $100 I_{capa}$)
 - La intensidad de pico máxima de la aparamenta $I_{cie \text{ máx}}$ (ver Anexo 2: valores de la columna I_e de la tabla o las curvas de los gráficos.

Anexo 4: Bibliografía

Normas

- ANSI C37-06 (1 987)
Standard for switchgear AC High Voltage Circuit Breakers rated on a symmetrical current basis. Preferred ratings and related capabilities.
- ANSI/IEEE C37-09 (1 979)
Standard test procedure for AC High Voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis.
- ANSI/IEEE C37-012 (1 979)
Application guide for capacitance current switching for AC High Voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis.
- CEI 56.1987
Disjoncteurs a courant alternatif a haute tension.
- CEI871-3 (1 996)
Condensateurs shunt pour réseaux a courant alternatif de tension assignée supérieure a 1000 V. Partie 3: protection des condensateurs shunt et des batteries de condensateurs shunt.
- NF C 64-132
Interrupteurs tripolaires de tension assignée 24 kV destinés a la manoeuvre de batteries de gradins de condensateurs.
- SN-15.6a (déc. 1 993)
Disjoncteurs a 26,4 et 28,4 kV. Spécification technique normalisée. Hydro-Québec Canada.

Cuadernos Técnicos

Las perturbaciones armónicas en redes polucionadas y su tratamiento.
Cuaderno Técnico n° 152, septiembre 1 999 - C. Collombert/J.M. Lupin/J. Schonek.

Otras publicaciones

- Guide de la compensation d'énergie réactive et filtrage d'harmoniques HT/MT.
Document technique Merlin-Gerin Rectiphase.
- Electra n° 87
Spécifications concernant les essais de manoeuvres sur courant capacitif des disjoncteurs sans résistance shunt a l'aide de circuits d'essais synthétiques.
- Electra n° 155 (Août 1994)
Manoeuvres des courants capacitifs. Etat de l'art.