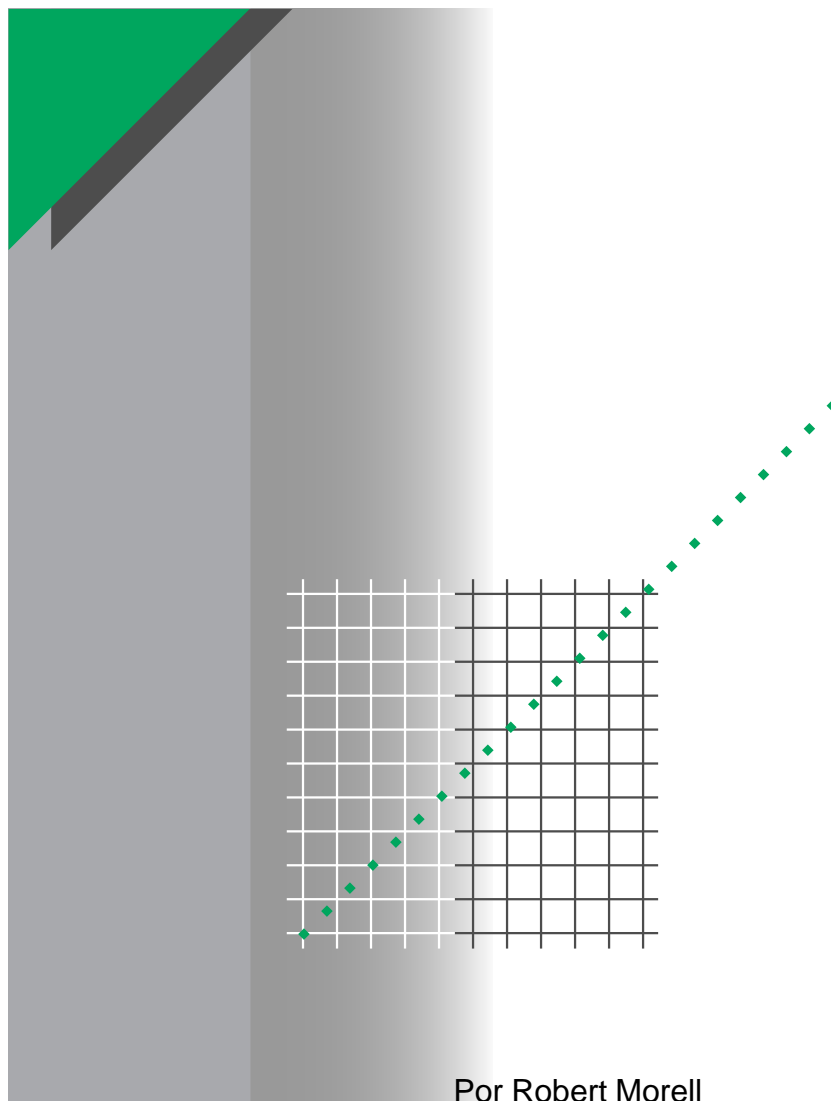


Cuaderno Técnico nº 154

Las técnicas de corte de los interruptores automáticos BT



Por Robert Morell



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 154 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 154

Las técnicas de corte de los interruptores automáticos BT



Robert MOREL

«... a mis amigos de trabajo».

Ingeniero ENSMM Besançon, entra en Merlin Gerin en 1971 y se especializa en el diseño de aparataje eléctrica BT.

Colabora en los estudios del sistema Sellim.

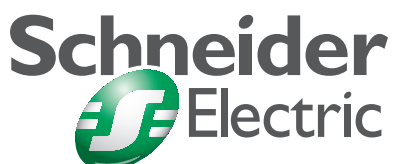
En 1980 se encarga del desarrollo de los interruptores automáticos Compact y de los interruptores Interpact.

En 1985, pasa a ser responsable de la oficina de estudio «corte en BT» de la división de Potencia Baja Tensión.

Trad.: E. Milà, J.M. Giró

Original francés: junio 2000

Versión española: noviembre 2000



Terminología

a: Ángulo de desfase inicial, en tensión.

Calibre (de un interruptor automático): Es el valor de la intensidad nominal del interruptor automático, que se fija mediante el ajuste máximo de disparo (protección, electrónica o térmica, contra sobrecargas).

Categoría (de un interruptor automático): definida en la norma CEI 60947.2:

- A = interruptor no retardado al corte en condiciones de cortocircuito,
- B = interruptor retardado al corte en condiciones de cortocircuito $\leq I_{cw}$.

E: Tensión nominal, en corriente continua; tensión de pico, en corriente alterna;

ϕ : Ángulo de defasaje tensión/corriente.

i, (i_0): Corriente en un instante t (o en un instante t_0).

i_a : Corriente de arco en un instante t.

\hat{i}_c : Corriente de pico cortada.

I_{cc}: Corriente de cortocircuito.

I_{cs}: Poder asignado de corte de servicio (expresado en kA o en % de I_{cu}).

I_{cu}: Poder asignado de corte último en cortocircuito.

I_{cw}: Corriente asignada de corte de duración admisible.

I_n: Corriente nominal en régimen permanente, A_{ef} .

I_p: Corriente presunta.

I_s: Corriente de sobrecarga.

r: Impedancia del generador.

R, L, C: Componentes totales del circuito cortado.

t (t_0): Tiempo (instante inicial).

t_a : Duración del arco.

Talla (de un interruptor automático): Es el calibre mayor que puede aceptar la caja de un interruptor automático; corresponde a la corriente asignada del aparato.

τ : Constante de tiempo.

u: Tensión en el instante t.

u_a : Tensión de arco en el instante t.

U_a: Tensión de arco estabilizada.

U_{AC}: Tensión ánodo-cátodo de cada arco elemental.

U_{d+}, U_{d-}: Características de regeneración.

U_n: Tensión nominal en ca. V_{ef} .

U_r: Tensión de restablecimiento.

W_a: energía del arco.

W_{LO}: energía inicial de autoinducción, para $i = i_0$.

ω : pulsación en ca ($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$).

Las técnicas de corte de los interruptores automáticos

El objetivo de este Cuaderno Técnico es:

- definir las corrientes a cortar en una instalación de BT,
- tomar conciencia de un fenómeno que inevitablemente aparece al interrumpir un circuito: **el arco eléctrico**,
- analizar, desde un punto de vista teórico, el corte de diferentes corrientes gracias al arco puesto en condiciones de extinción,
- tratar los aspectos tecnológicos de los dispositivos de corte, particularmente de los interruptores automáticos.

| | | |
|--|---|--------------|
| 1 Introducción | 1.1 Definir las corrientes a cortar | p. 7 |
| 2 El arco eléctrico | 2.1 Condiciones de formación | p. 8 |
| | 2.2 Propiedades físicas | p. 8 |
| | 2.3 Propiedades eléctricas | p. 9 |
| | 2.4 Condiciones de extinción | p. 10 |
| 3 Cortar gracias al arco | | p. 12 |
| 4 Interrumpir las corrientes establecidas | 4.1 Con una tensión continua | p. 13 |
| | 4.2 Con una tensión alterna monofásica | p. 14 |
| | 4.3 En corriente alterna trifásica | p. 15 |
| 5 Interrumpir las corrientes presuntas (con limitación) | 5.1 Definiciones | p. 16 |
| | 5.2 Ruptura con limitación | p. 18 |
| | 5.3 Con una tensión de corriente continua | p. 18 |
| | 5.4 Con una tensión de corriente alterna monofásica | p. 20 |
| | 5.5 Con una tensión de corriente alterna trifásica | p. 20 |
| | 5.6 Los parámetros del corte o ruptura | p. 21 |
| | 5.7 Ruptura con fusibles | p. 22 |
| 6 El interruptor automático BT | 6.1 Sus funciones | p. 24 |
| | 6.2 Tecnología | p. 24 |
| | 6.3 Prestaciones | p. 28 |
| 7 Conclusión | | p. 31 |
| Bibliografía | | p. 31 |

1 Introducción

Las fuentes de energía de las instalaciones eléctricas son los alternadores y los transformadores. Estos generadores, a pesar de la perfección de su diseño y construcción, presentan una impedancia interna. Esta impedancia tiene dos consecuencias muy importantes (**figura 1**):

- en régimen normal provoca una caída de tensión de vacío, para trabajar a una tensión nominal U_n , entregando una intensidad I_n ,
- en caso de cortocircuito limita la corriente a un valor, que suele expresarse en múltiplos de I_n .

Si tomamos el caso de los transformadores, su tensión de cortocircuito U_{cc} (en %) corresponde al límite superior de su caída de tensión relativa para I_n .

A título de ejemplo, a una tensión de cortocircuito del 5% corresponde un valor de I_{cc} de: $I_n/5\% = 20 I_n$, que, para un transformador de 1 000 kVA y 400 V, toma un valor de 29 kA. Es fácil imaginar los daños que puede ocasionar en una instalación una corriente de esta magnitud (¡recuérdese que los calentamientos y esfuerzos electrodinámicos son proporcionales al cuadrado de la corriente!).

Así, aunque se tomen las máximas precauciones para que estas corrientes no se presenten, es necesario prever dispositivos de protección capaces de cortar las corrientes de cortocircuito.

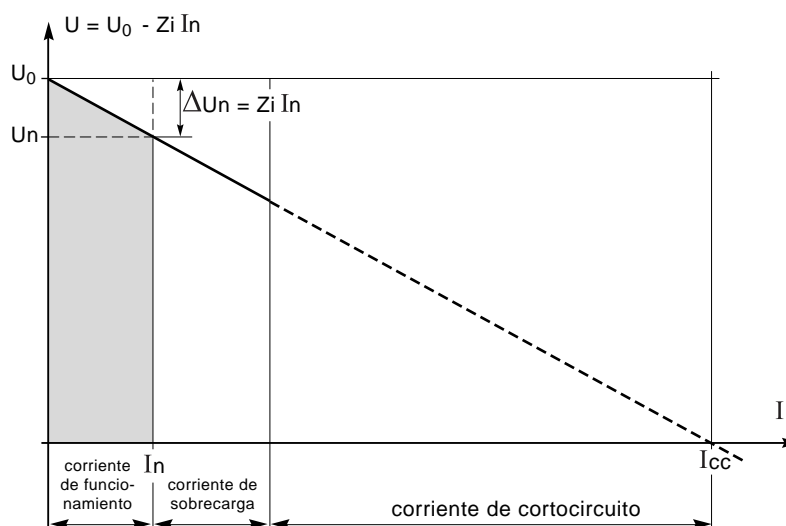


Fig. 1: Incidencia de la impedancia interna de la fuentes de energía (Z_i) sobre la tensión entregada y la corriente de cortocircuito máxima.

1.1 Definir las corrientes a cortar

¡Para diseñar un dispositivo de corte no es suficiente conocer únicamente el valor de la corriente a interrumpir!

La interrupción de las corrientes es función de múltiples parámetros que dependen del tipo de generador (alternador o transformador), de las líneas y de los receptores:

- un circuito eléctrico es siempre inductivo, por lo que las variaciones de corriente a cortar generan, a partir de la apertura del circuito, una «contrarreacción» en tensión que contribuye a mantener la corriente. Esta fuerza contraelectromotriz, de tipo $L \cdot di/dt$, puede tener un valor importante, cualquiera que sea el valor de la corriente i , hasta la anulación de dicha corriente,
- si la corriente tiene un valor importante, el valor resistivo del circuito a cortar facilita el corte; pero no supone ninguna ayuda cuando $i \approx 0$: en este caso la caída de tensión óhmica resulta despreciable,
- las capacidades entre conductores activos, tanto si están repartidas (capacidades «parásitas» de generadores y cables), como si son añadidas (batería de condensadores de compensación de energía reactiva o de filtro), modifican las condiciones del corte,
- la frecuencia de la corriente a cortar, ya que, a priori, parece más fácil cortar una corriente alterna, con sus pasos periódicos por valor cero, que una corriente continua,
- finalmente, por la tensión permanente producida por el generador: el aparato de corte, una vez anulada la corriente, debe de resistir dieléctricamente la tensión de red, que siempre está conectada.

En la práctica definimos tres tipos de corriente a cortar:

1 Corriente de cortocircuito

Ésta, en un punto dado del circuito, no será sistemáticamente igual a « $20 I_n$ » del generador:

- su valor depende de las características del generador, $3\% < U_{cc} < 7\%$, por ejemplo,
- estos valores pueden ser menores:
 - según que el defecto sea más o menos franco,
 - según la longitud y sección de las líneas aguas arriba,
- pero también su valor puede ser mayor si hay varios generadores acoplados en paralelo.

2 Corriente de sobrecarga

La corriente puede sobrepasar el valor nominal y resultar inaceptable a partir de un cierto tiempo:

- durante el periodo transitorio de arranque o de funcionamiento de un receptor,
- si, en toda o parte de la instalación, la suma de las potencias de los receptores en funcionamiento rebasa las previsiones del diseñador (coeficiente de funcionamiento).

3 Corriente nominal (o más débil)

Un interruptor automático destinado a cortar las enormes corrientes de cortocircuito y las prolongadas de sobrecarga, podrá, evidentemente, con corrientes más pequeñas: un tal aparato de corte podrá asegurar, sin ningún problema, el mando y protección de circuitos y receptores.

2 El arco eléctrico

El arco eléctrico no es un invento; se le presentó ya al primer físico que intentó abrir un circuito recorrido por una corriente eléctrica.

En efecto, el circuito, siempre inductivo, dota a los electrones de suficiente energía para salvar la distancia que aparece en la zona de separación de los conductores.

Normalmente, son estos electrones «pioneros» los que ionizan el gas, sea el que

sea, y la creación de plasma facilita desde el principio el paso de la corriente.

En estas condiciones podríamos imaginar que la ruptura total es muy difícil de conseguir... a no ser que, un mejor conocimiento de este fenómeno nos permita descubrir algunas propiedades que nos van a resultar irremplazables.

Por suerte, es así: ¡existen esas propiedades!

2.1 Condiciones de formación

El arco aparece en un medio gaseoso:

- Por perforación dieléctrica entre dos electrodos:
 - a partir de un valor de campo eléctrico E/d , que depende de la forma de los electrodos y de la naturaleza y densidad del gas (en la **figura 2**, siendo d la distancia entre los electrodos),
 - después de un contorneo sobre un material aislante con la degeneración del gas ambiente.
 - Al abrir un circuito eléctrico recorrido por una corriente; aunque el circuito sea puramente resistivo, siempre hace falta una cierta separación mínima para evitar la perforación dieléctrica del medio.
- En realidad, los circuitos suelen ser inductivos, lo que aumenta el peligro de



Fig. 2: El arco eléctrico y la influencia del campo E/d .

perforación y obliga por tanto a aumentar la distancia mínima de separación entre electrodos.

De hecho, toda tentativa de disminuir rápidamente la corriente indica la existencia de un $L \cdot di/dt$ importante, que favorece el arco, cualquiera que sea el valor de la intensidad.

2.2 Propiedades físicas (figura 3a)

Al separarse los dos contactos, uno, el cátodo, emite electrones, el otro, ánodo, los recibe. Por la naturaleza energética del fenómeno de emisión de electrones, el cátodo se calentará. La base del arco se convierte en una fuente de emisión termoiónica: el punto caliente es el principal emisor de electrones y, si el arco se estanca, pueden aparecer vapores metálicos. Estos vapores y el gas ambiente se ionizarán debido a:

- la presencia de electrones libres,
- la creación de iones positivos que se desplazan hacia el cátodo y mantienen su calentamiento,
- la creación de iones negativos que bombardeando el ánodo, provocan también su calentamiento.

El conjunto de toda esta agitación se produce en el seno de una columna de plasma a alta temperatura 4 000 a 20 000 K, según sea la corriente y su confinamiento.

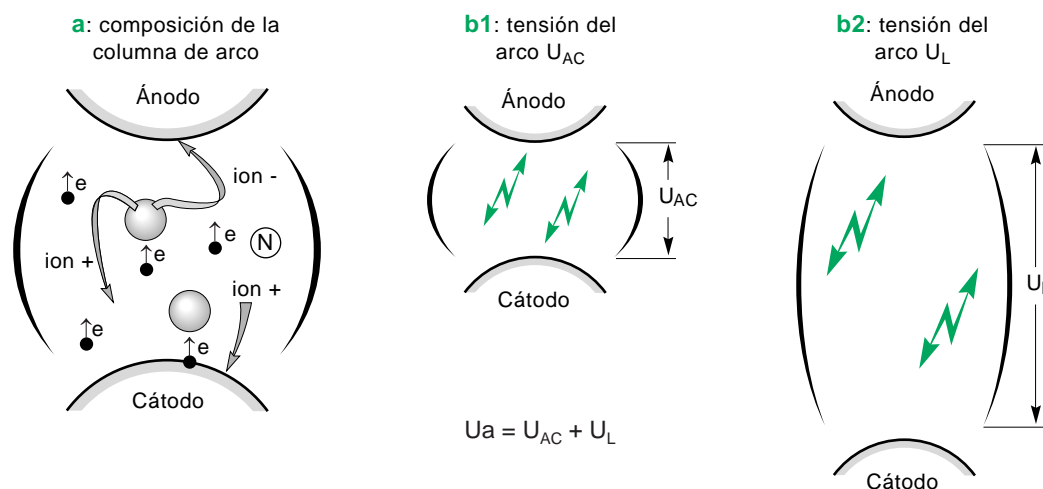


Fig. 3: El arco eléctrico: fenómeno físico (a) y tensión característica o tensión de arco U_a (b).

2.3 Propiedades eléctricas (figura 2b)

■ La más notable es la aparición de una tensión de arco cuyo valor tiene:

□ una parte fija, $U_{AC} \approx 20$ a 40 V, que aparece a partir del instante de separación de los contactos y depende de los materiales empleados,

□ una parte variable, $U_L = 50$ a 100 V/cm, cuando el arco se ha estabilizado en su contexto de presión-temperatura.

Así se obtiene un valor total:

$$U_a = U_{AC} + U_L.$$

Hay que destacar que:

- el signo de U_a cambia al modificarse el sentido de la corriente de arco,
- el valor de la corriente del arco no influye fundamentalmente sobre la tensión del mismo y que, por tanto, el arco «trabaja» con una

densidad de corriente ($j = i/s$) casi constante (las secciones de las manchas catódicas y anódicas y de la columna del arco son proporcionales al valor de la corriente y, por analogía con una resistencia:

$$U = Ri = \rho \frac{\text{long}}{\text{secc}} i = \rho \cdot \text{long} \cdot j = \text{constante});$$

■ Se produce una energía de arco:

$$W_a = \int u_a i_a dt;$$

■ Si el arco está situado en un campo magnético, se verá sometido a las fuerzas de Laplace, $F = B \cdot i \cdot \text{long} \cdot \sin \alpha$; lo que produce el efecto de combarlo, desplazándolo transversalmente, si \vec{B} es perpendicular a \vec{i} .

2.4 Sus condiciones de extinción

Se produce la extinción cuando la corriente del arco **pasa a ser cero**.

Aspecto térmico

Cuando la corriente de arco es o pasa a ser pequeña, inferior a 10 A por ejemplo, los intercambios de energía térmica pueden llegar a ser superiores a la energía interna generada por el arco y éste «muere de frío» (arco congelado) lo que provoca un aumento de la tensión del arco (**figura 4a**).

Durante este aumento de la tensión, puede aparecer una extinción brutal si las capacidades parásitas «cortocircuitan» el arco, fenómeno que se produce cuando la tensión de arco es y se mantiene en un valor superior a la tensión de carga de las capacidades repartidas (**figura 4b**). Este fenómeno se denomina «recortado».

Pero no siempre sucede esto así:

- si la corriente de un arco se estabiliza contra una pared aislante, su superficie de intercambio térmico disminuye y los componentes del aislante, localmente muy calientes, pueden favorecer la conducción y mantenimiento del arco,
- si la corriente de arco es importante, la columna es muy exotérmica y sólo las evoluciones conjuntas de la tensión de arco y de la tensión de la red permiten reducir y anular esta corriente.

Aspecto dieléctrico

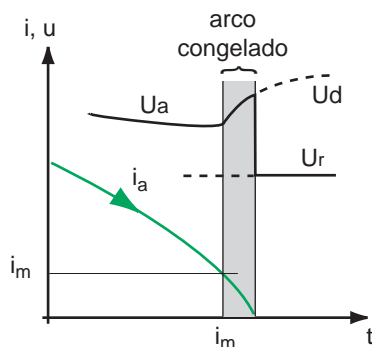
No es suficiente que el valor de la corriente de arco pase por cero en un instante para asegurar su extinción: es necesario que el medio, que está ionizado, se regenere dieléctricamente para «resistir» a la tensión de red, ¡que aún está presente!

¡Estos fenómenos de regeneración por recombinación de los iones + o - y de los electrones son, por suerte, muy rápidos! Así, en la práctica, para que la corriente de arco se mantenga nula, la tensión de red debe de ser inferior a la tensión característica de regeneración (U_d).

Si la tensión de arco alcanza y mantiene un valor superior a la tensión de red (en valor absoluto, si se trata de una tensión alterna), el fenómeno de regeneración disminuirá durante la aproximación al cero de la corriente: el número de cargas eléctricas del plasma se ajusta al mínimo estrictamente necesario y se anula al mismo tiempo que la corriente.

Pero el arco y las capacidades parásitas tienen la misma tensión hasta la extinción de la corriente del arco. Una vez que se ha anulado la corriente de arco, esta tensión retorna al valor de la tensión de la red por un fenómeno de oscilación libre entre las capacidades distribuidas y las constantes L y R del circuito (**figura 5**). Esta «acomodación» de la tensión se denomina Tensión Transitoria

a: extinción del arco



b: las capacidades parásitas «cortocircuitan» el arco

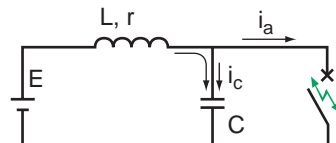


Fig. 4: Extinción de un arco eléctrico por «recortado».

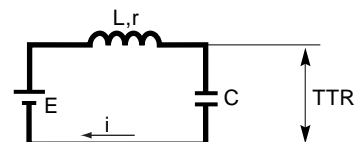
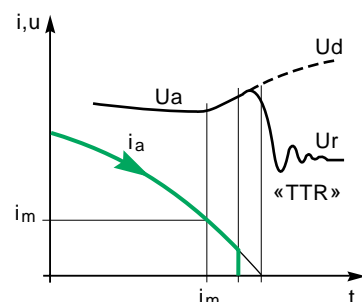


Fig. 5: La tensión transitoria de restablecimiento, TTR.

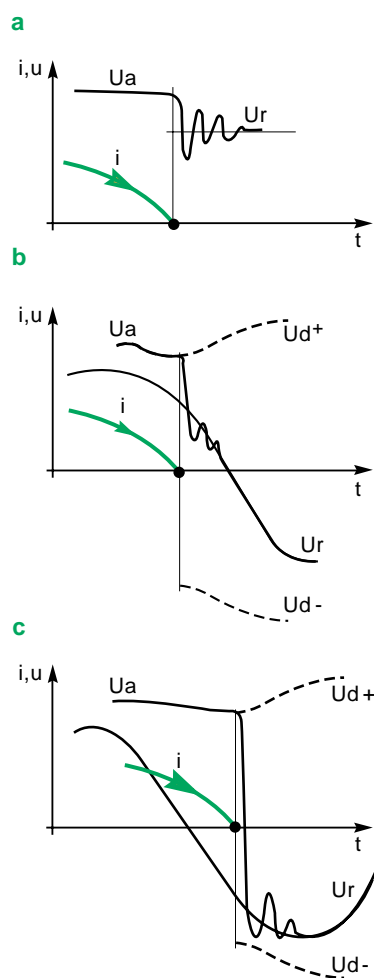


Fig. 6: El arco en condiciones de extinción:
a: con tensión continua,
b: con tensión alterna, siendo U_r del mismo signo que U_a , en el instante del cero de corriente,
c: con tensión alterna, siendo U_r de signo opuesto a U_a .

de Restablecimiento (TTR). Si estas capacidades son bajas, las oscilaciones tienen una frecuencia muy alta y están muy amortiguadas.

Estas condiciones se dan:

■ con tensión continua (**figura 6a**):

La tensión de arco U_a es superior a la tensión de red U_r cuando la corriente se anula y la característica de regeneración U_d se mantiene superior a U_r con TTR,

■ con tensión alterna:

□ cuando el valor instantáneo de la tensión de la red es todavía del mismo signo que la tensión de arco en el momento del cero de corriente (**figura 6b**). La condición de ruptura definitiva se dará cuando la evolución posterior de la tensión de red no supere nunca las características de regeneración tanto en valores positivos como negativos,

□ cuando el valor instantáneo de la tensión de la red es de signo opuesto a la tensión de arco, pero en valor absoluto inferior (**figura 6c**). La extinción del arco es definitiva si la TTR no rebasa las características de regeneración.

En caso contrario, cuando la TTR corta la curva de regeneración, puede provocar la aparición de una corriente post-arco de carácter electroluminiscente. Y entonces:

- si la corriente post-arco persiste con tipo o carácter «congelado» las condiciones de extinción subsisten;
- si la corriente post-arco rebasa un valor crítico con una tensión igualmente crítica, se producirá un reencendido de la corriente de arco y deberemos esperar un nuevo «cero» de la corriente para poder extinguirlo.

3 Cortar gracias al arco

La corriente que se establecerá al cerrar el circuito podemos calcularla por la ley de Ohm generalizada:

$$e - R.i - L \frac{di}{dt} = 0.$$

Pasado el período transitorio de cierre, la corriente se estabiliza, es decir, se pasa al régimen permanente y tiene el valor:

$$I = e/R.$$

Según esta ley, la corriente no podrá anularse definitivamente si la tensión «e» no toma un valor nulo o si «R» no toma un valor infinito.

Estos dos extremos, prácticamente imposibles de encontrar en la realidad de la explotación, nos obligan a admitir la existencia de un circuito con arco y a utilizar sus propiedades de tensión U_a y sus condiciones de extinción.

A partir del instante de separación de los contactos, la ecuación se transforma en:

$$e - R.i - L \frac{di}{dt} - u_a = 0.$$

Con ello, la corriente será forzada a pasar por cero o pasará por cero y éstas son precisamente las condiciones de extinción del arco que permitirán la interrupción de la corriente.

Un estudio progresivo de la teoría del corte pasa por los dos casos siguientes, según que la tensión de arco U_a se introduzca o no en el circuito:

- cuando la corriente circula en régimen permanente o estable (capítulo 4),
- antes de que la corriente haya llegado al valor estabilizado de corriente de cortocircuito presunto (capítulo 5).

4 Interrumpir las corrientes establecidas

Para determinar las corrientes establecidas hay que tener presentes las corrientes nominales, corrientes de sobrecarga y corrientes de cortocircuito que alcanzan un valor estable cualquiera en un momento de apertura del circuito.

La apertura del circuito puede ser:

- voluntaria, ordenada por el usuario, independientemente del valor de la corriente,

- reflejada, por la acción de un dispositivo, sensible al mismo valor de la corriente, que ordena, directa o indirectamente, la apertura del circuito.

Para simplificar, estudiamos las condiciones de corte:

- en corriente continua,
- en corriente alterna.

4.1 Con una tensión continua (figura 7)

$$u = E$$

antes de abrir: $i_0 = E/R$,

después de abrir: $E - R \cdot i - L \cdot di/dt - u_a = 0$

A partir de la apertura de los contactos se produce una variación de u_a hacia un valor U_a .

La ley de Ohm generalizada demuestra que no se podrá forzar la corriente al valor «0»

mientras u_a sea mayor que E . Si no, evolucionará hacia: $i'_0 = (E - U_a)/R$, de valor no nulo.

En el caso de precisar cortar la corriente es muy simple y suficientemente demostrativo considerarla como una función escalón, $u_a = U_a$ para $t > t_0$, (tomando t_0 = instante en que $u_a = E$).

El cálculo completo nos lleva entonces a:

$$i_a = \frac{E}{R} - \frac{U_a}{R} \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right)$$

y

$$t_a = \tau \log \frac{U_a}{U_a - E}$$

considerando que se produce ruptura en el instante en que la corriente pasa por cero (una corriente «negativa» que se debería a la preponderancia de U_a respecto a U_r no tiene ningún sentido físico).

El cálculo de integrales:

$$W_a = \int_{t_0}^{t_a} u_a i_a dt$$

da

$$W_a = \left(\frac{1}{2} L i_0^2 \right) 2 \frac{U_a}{E} \left[1 + \left(1 - \frac{U_a}{E} \right) \log \frac{U_a}{U_a - E} \right].$$

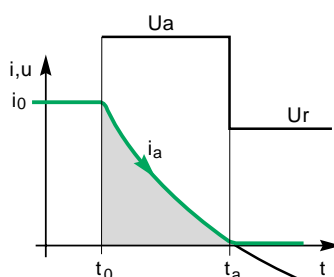
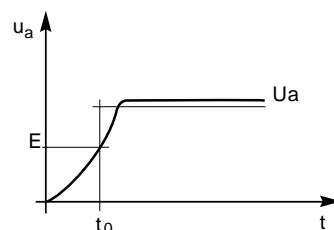
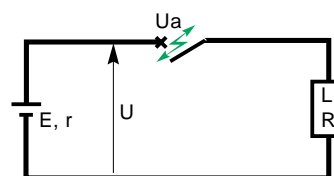


Fig. 7: Corte en corriente continua.

La interpretación de esta expresión es más aceptable haciendo $W_{L0} = (1/2 L \cdot i_0^2)$ y observando las curvas (W_a/W_{L0}) y (τ_a/τ) en función de U_a/E (figura 8).

Estas curvas indican que:

- si $U_a = E$, entonces W_a/W_{L0} es igual solamente a 2! ¡Pero el tiempo de apertura es infinito!

■ si U_a es muy grande, tiende a infinito, entonces el valor $W_a/W_{L0} = 1$.

La energía del arco es igual a la energía inductiva inicial y el tiempo de corte es casi nulo: la potencia del arco W_a/t_a es muy elevada!

■ que la inflexión de la curva W_a/W_{L0} es un óptimo práctico y por ello, que

$1,5 < \frac{U_a}{E} < 2,5$ es un buen compromiso; por

tanto $W_a \approx 1,2 W_{L0}$ y $t_a \approx \tau$.

El coeficiente 1,2 (señalado sobre la curva) es muy satisfactorio ya que se acerca al valor mínimo de los mínimos «1», difícil de alcanzar.

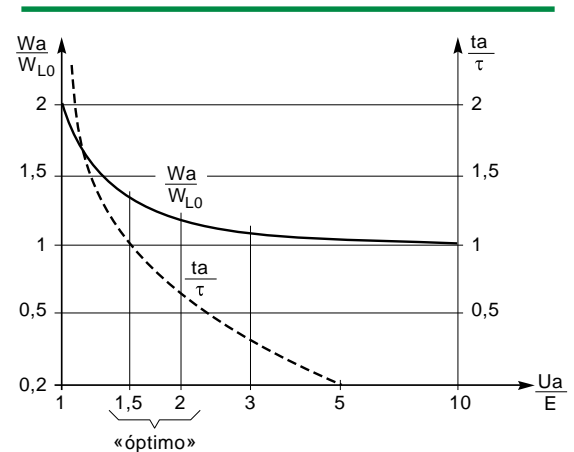


Fig. 8: Curvas (W_a/W_{L0}) y (t_a/τ) .

4.2 Con tensión alterna monofásica

$$u = E \cdot \sin \omega t$$

$$i = I_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi), \text{ siendo}$$

$$\cos \varphi = \frac{L \omega}{\sqrt{(L \omega)^2 + R^2}}$$

e

$$I_0 = \frac{E}{\sqrt{(L \omega)^2 + R^2}}.$$

A partir del instante de separación de los contactos, aparece el arco y la evolución en el tiempo de su tensión puede parecer compleja. Sin embargo, u_a es siempre del mismo signo que « i » y su valor absoluto medio tiende al valor de U_a (figura 9).

Aunque puede resultar complicado, siempre es posible el estudio matemático de i_a , t_a y W_a , a partir de la ley de Ohm generalizada: $u - R \cdot i - L \cdot di/dt - u_a = 0$.

Además, estos cálculos simples no tienen en cuenta las condiciones de restablecimiento en tensión de la ruptura real de un circuito de corriente alterna; por ello se impone el análisis de los dos casos: $U_a \geq E$ y $U_a \ll E$:

■ si $U_a \geq E$ (figura 10), la tensión de arco contribuye a forzar la corriente hacia «0» y a mantenerla en ese valor. Sea el que sea el desfase « φ » de « i » respecto a la tensión « u »,

■ si $U_a \ll E$, el corte de la corriente es posible y, en general, más fácil que en corriente continua, porque habrá ceros «naturales» de corriente.

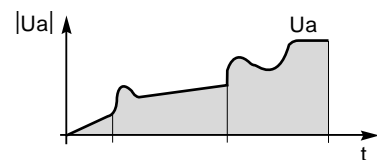
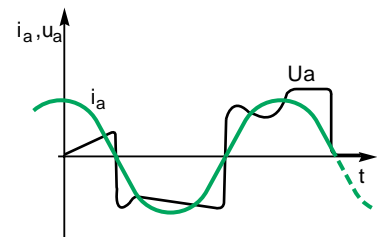


Fig. 9: Ruptura en corriente alterna.

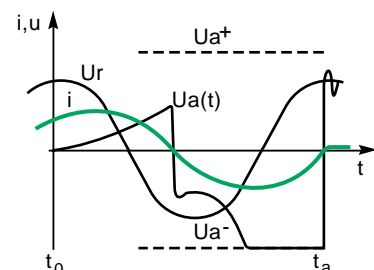


Fig. 10: $U_a \geq E$.

La posibilidad del corte está condicionada por fenómenos de post-arco a cada paso por cero de la corriente; esta condición podemos compararla a una carrera de velocidad entre la regeneración del dieléctrico del arco y la tensión de red.

Examinemos dos posibilidades:

□ si la simétrica de U_a en el instante de un cero de corriente es superior a la tensión de la red en este instante (**figura 11a**), comprendida la TTR, entonces la «curva» de evolución de la regeneración dieléctrica se mantiene mayor que la tensión de la red: hay corte,

□ si la simétrica de U_a en el instante de un cero de corriente es inferior a la tensión de la red en ese instante (**figura 11b**), comprendida la TTR, entonces esta tensión de la red puede cortar la curva de regeneración dieléctrica si ésta es muy lenta. En este caso, el arco puede reencenderse, no hay corte ¡al menos en este paso por cero de la corriente!

Dentro de estas dos posibilidades, la influencia del factor de potencia, $\cos \varphi$, del circuito a cortar es importante por el desfase de los ceros de corriente respecto al valor de la tensión de la red. En concreto, si $\cos \varphi \approx 1$, la tensión y la intensidad son nulas a la vez y la ruptura es mucho más fácil.

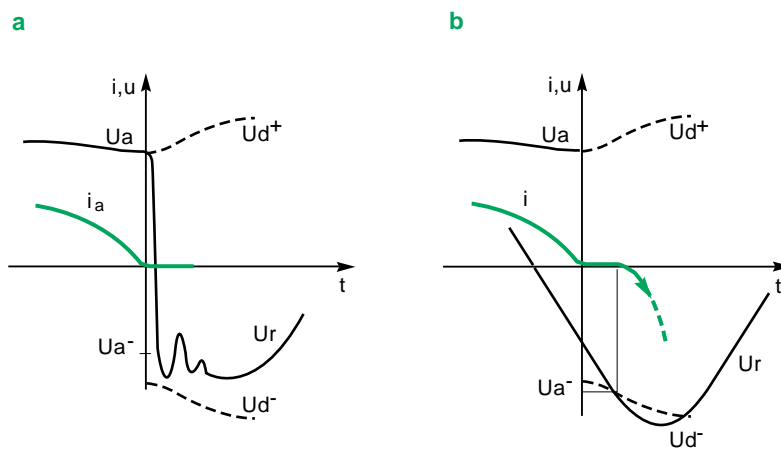


Fig. 11: $U_a \ll E$.

4.3 En corriente alterna trifásica

Cuando se distribuye el neutro, las condiciones de ruptura con una tensión trifásica son las mismas que con una monofásica, razonando, fase a fase, como con tensión simple.

Cuando no se distribuye el neutro, el punto de cortocircuito define un punto neutro flotante (**figura 12**) con lo que:

■ el primer polo que corta deberá soportar una tensión de restablecimiento igual a una tensión semi compuesta por el hecho que el neutro se desplaza de N hacia N' (de hecho N' tiende a N'', según la proporción de tensión de arco sobre las otras dos fases). En estas circunstancias, el restablecimiento en tensión queda penalizado por un factor de 1,5 (hasta $\sqrt{3}$),

■ los otros polos quedan en serie, asegurando el corte definitivo con una tensión compuesta. Se favorece el final de esta ruptura si en cada fase aparece una tensión de arco U_a . Sin embargo, esto no es más fácil

que cortar la misma corriente sobre una sola fase con tensión simple (porque se tiene, por una parte, $\sqrt{3}/2 = 0,86$ en lugar de 1 y, por otra, una menor rigidez dieléctrica en cada polo porque quedan dos en serie al cortar con una tensión compuesta).

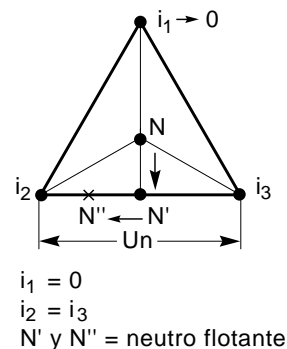


Fig. 12: Neutro no distribuido.

5 Interrumpir las corrientes presuntas (con limitación)

5.1 Definiciones

Corriente presunta

En una instalación, es la corriente que circulará por un circuito, si cada polo del aparato de conexión, o del fusible, se ha sustituido por un conductor de impedancia despreciable (CEI 60 050).

En un circuito de ensayos de aparamenta, es la corriente ajustada o patrón.

Recordemos que:

■ **con tensión continua**, la evolución de la corriente es de la forma:

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = I_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (\text{figura 13})$$

■ **con tensión alterna monofásica**, tiene una importancia capital el instante en que «se produce el defecto» o el cierre del circuito, ya que el valor de la tensión de la red tiene una influencia definitiva sobre la evolución de la corriente transitoria.

Teniendo en cuenta este instante, caracterizado por el ángulo de desfase α , la tensión instantánea puede expresarse como:

$$u = E \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad (\text{figura 14a})$$

La evolución de la corriente es de la forma:

$$i = \frac{E}{R} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

con dos componentes:

□ una alterna, desfasada un ángulo φ respecto a la tensión,

□ otra continua o unidireccional que tiende a cero cuanto t tiende a infinito.

Existen dos casos concretos $\alpha = \varphi$ y $\alpha = 0$:

□ $\alpha = \varphi$, también llamado «régimen simétrico» (figura 14b).

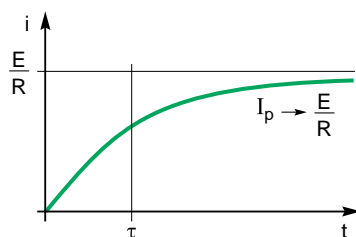


Fig. 13.

La corriente es de forma:

$$i = \frac{E}{R} \sin \omega t$$

La corriente tomará, desde el inicio del régimen, los mismos valores que en régimen permanente, con un valor de cresta E/Z .

□ $\alpha = 0$, también llamado «régimen asimétrico» (figura 14c).

La corriente es de la forma:

$$i = \frac{E}{R} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{R}{L}t} \right]$$

Con ello, el valor de cresta de la primera semionda es función del $\cos \varphi$ del circuito.

■ **con tensión alterna trifásica (figura 15)**

La corriente de cada fase puede originar los mismos casos particulares (simétrico y asimétrico) que en monofásica. De todas formas, cualquiera que sea el valor de α , se tiene casi siempre:

- una fase en régimen quasi-simétrico,
- una fase en régimen quasi-asimétrico,
- la última fase, con una «pequeña ondulación o valle».

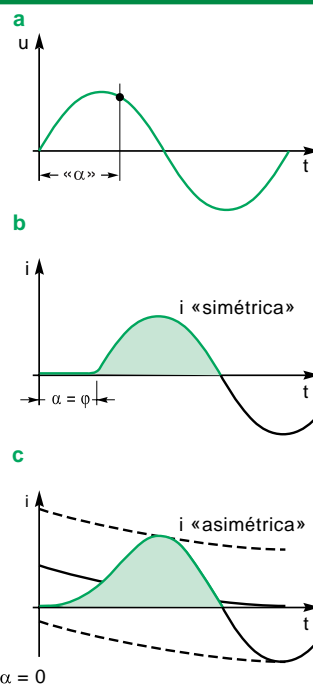


Fig. 14: Evolución de la intensidad en corriente alterna.

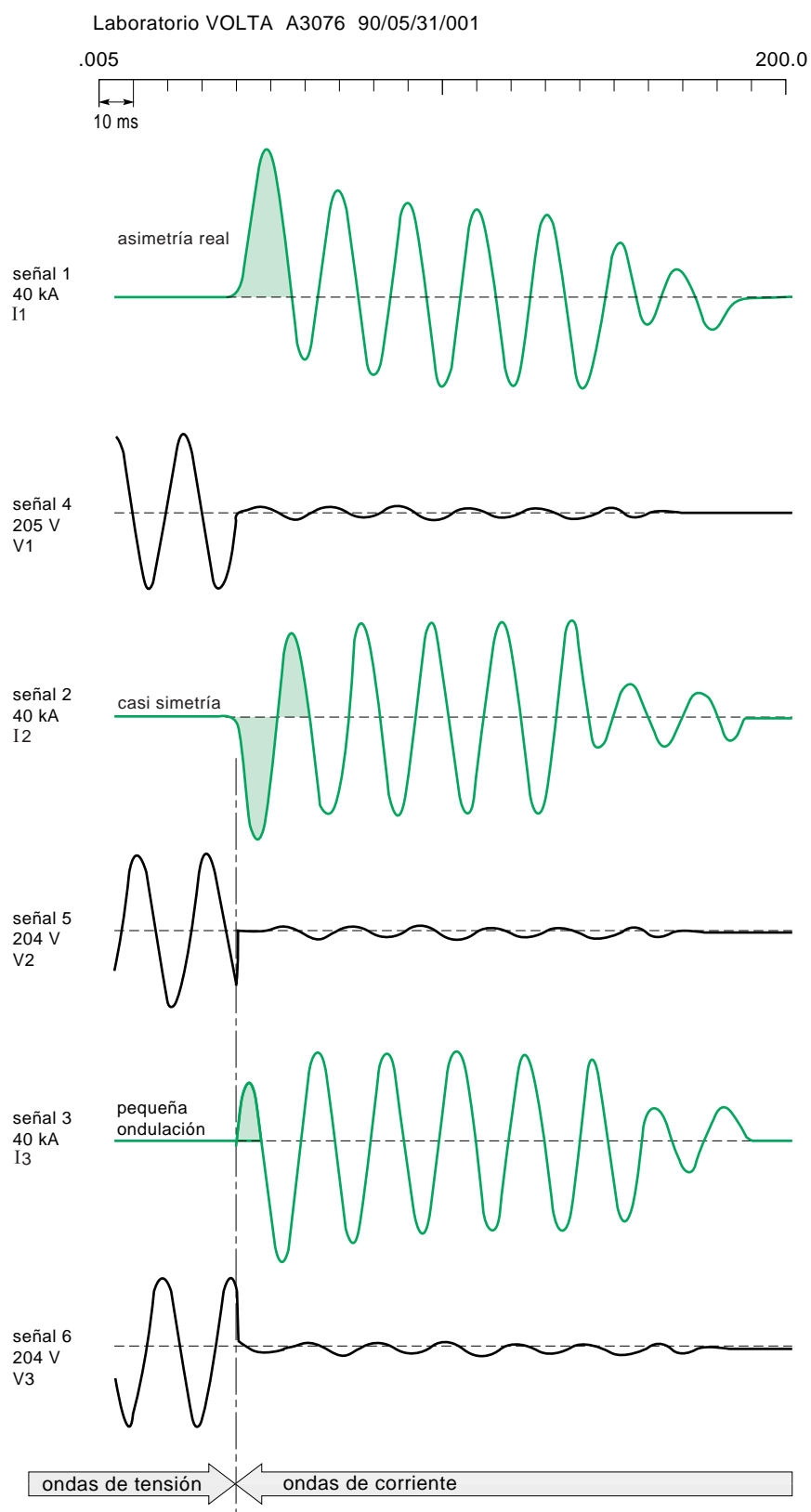


Fig. 15: Oscilogramas de un corte de un circuito de ensayo con tensión alterna trifásica, siendo $\alpha = 0$ (para la fase 1).

5.2 Ruptura con limitación

Entendemos con esta expresión, que tomamos todas las disposiciones para impedir que la corriente de cortocircuito alcance el valor de cresta máxima correspondiente a su valor presunto (**figura 16a**).

En la práctica, el conseguirlo es importante y hasta indispensable para evitar desgastes y daños en la instalación.

Esta limitación no la obtendremos, gracias al arco, si la tensión de arco no alcanza rápidamente un valor mayor que la tensión y se mantiene ahí (**figura 16b**).

En efecto, la ley de Ohm $e - Ri - L \frac{di}{dt} - U_a = 0$

permite definir tres condiciones de limitación (**figura 16c**):

- crear **inmediatamente** una tensión de arco,
- que esta tensión de arco evalúe lo más **rápidamente** posible, para lograr que $U_a = e - Ri$,

con lo que

$$L \frac{di}{dt} = 0,$$

lo que significa que la corriente alcanza su valor máximo \hat{i}_c ;

- mantener esta tensión de arco con el valor más **alto** que se pueda, con lo que di/dt es negativo y la corriente se ve forzada a decrecer.

Resumiendo: «**Inmediato, Rápido, Alto**» es la consigna para:

«**Cortar gracias al arco...**
las corrientes presuntas,
...con limitación»

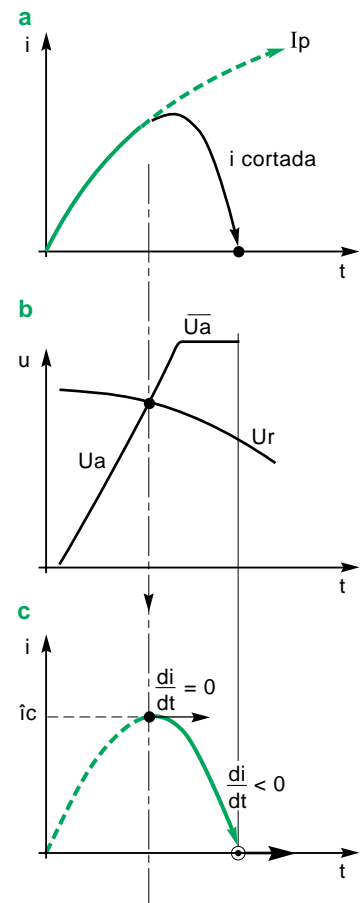


Fig. 16: Condiciones de limitación.

5.3 Con una tensión de corriente continua

La tensión continua es de la forma: $u(t) = E$.

■ A partir de la apertura del circuito, la corriente evoluciona según la expresión:

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = I_p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

■ al abrir el circuito, aparece una tensión de arco. Si su valor crece rápidamente, su evolución global puede asimilarse a una función escalón cuyo frente de subida quedará definido, en el instante t_0 , por $U_a = E$ (figura 17).

A continuación, la corriente, que habrá alcanzado un valor i_0 , decrecerá de forma exponencial y se anulará en un tiempo $t_a \ll \tau$.

El cálculo de la energía de arco es:

$$W_a = \int_{t_0}^{t_a} u_a i_a dt$$

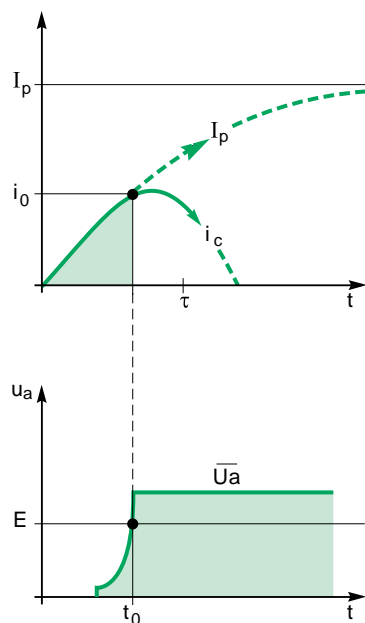


Fig. 17: Limitación con tensión continua.

de donde,

$$W_a = \left(\frac{1}{2} L i_0^2 \right) 2 \frac{U_a}{R i_0} \cdot \left[1 - \frac{U_a - U_n}{R i_0} \log \left(1 + \frac{R i_0}{U_a - U_n} \right) \right]$$

Al tener en cuenta la razón de limitación $k = i_0/i_p$, se obtiene el conjunto de curvas (W_a/W_{L0}) de la figura 18.

Hay que destacar que la energía de arco es tanto menor cuanto menor es el coeficiente k . El mejor valor («óptimo») se consigue para una relación de tensiones tal que: $1,5 < U_a/E < 2,5$, que es el caso de la corriente establecida.

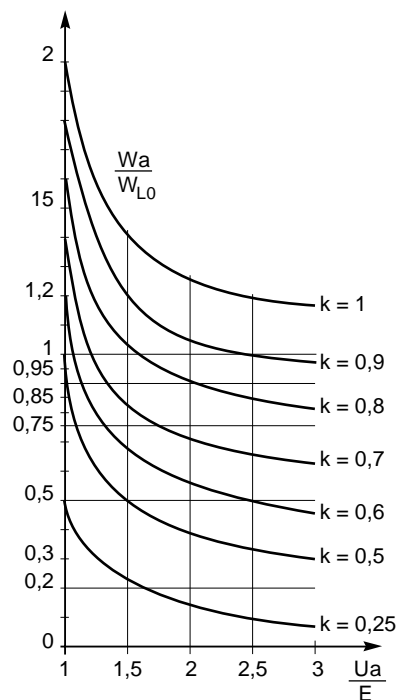


Fig. 18: Grupo de curvas según la razón k .

5.4 Con una tensión de corriente alterna monofásica

En condiciones de limitación, la ruptura de este tipo de corriente se realiza como si momentáneamente se tratara de una ruptura en corriente continua.

■ en particular, caso de **régimen simétrico**, es como considerar la ruptura de una corriente presunta con una tensión de red (**figura 19a**),

■ normalmente, en el caso de un **régimen asimétrico**, la limitación se mejora porque la tensión de arco «corta» a la tensión de red antes de que la corriente haya aumentado demasiado (**figura 19b**),

■ en el resto de casos «**intermedios**», con una «pequeña ondulación o valle», la ruptura con limitación sólo se puede obtener a partir de la segunda semionda de corriente, ya que la primera ha ocurrido con una corriente demasiado débil (**figura 19c**).

Nota: Con corrientes de cortocircuito elevadas, sólo se puede obtener un efecto de limitación notable si la tensión de arco interviene o aparece en un tiempo muy inferior a $T/4$.

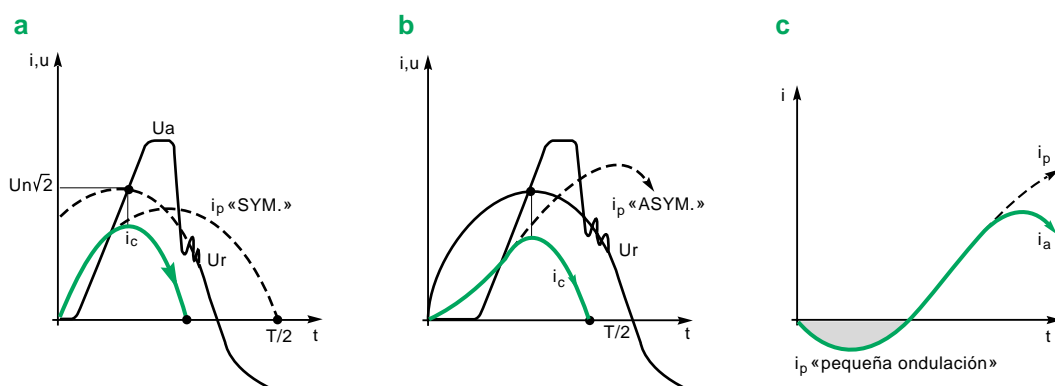


Fig. 19: Limitación con tensión alterna monofásica.

5.5 Con tensión de corriente alterna trifásica

Se pueden considerar dos casos:

1^{er} caso: **separación independiente de los polos**.

Cada fase provoca la aparición de una tensión de arco en función de la corriente que la recorre (**figura 20**).

En primera aproximación, todo pasa como si:

■ una de las fases corta en régimen simétrico monofásico pero su restablecimiento en tensión se produce sobre una tensión semicompuesta,

■ las otras dos fases aseguran un corte con tensión bifásica de la «cola de corriente».

2^o caso: **separación simultánea de los polos**.

La corriente de la fase en régimen simétrico actúa directamente sobre un dispositivo de disparo omnipolar que garantiza una apertura muy rápida.

En este caso, las tensiones de arco se desarrollan a la vez sobre las tres fases

El fenómeno se produce como si la fase en régimen «quasi simétrico» cortara con una tensión compuesta con una tensión de arco de valor doble.

Esta ruptura omnipolar debe realizarse en un tiempo menor que $T/4$ y se obtendrá la máxima eficacia para un tiempo menor que $T/8$; en estas circunstancias, la fase con la «pequeña ondulación o valle» cortará pero habiendo soportado una pequeña corriente.

Este tipo de corte:

■ se produce con dispositivos cuyo conjunto de piezas móviles tengan muy poca inercia,

■ se pretende conseguir en los aparatos grandes aportando energías de maniobra externas ultra rápidas (efecto Thomson con descarga capacitativa, por ejemplo).

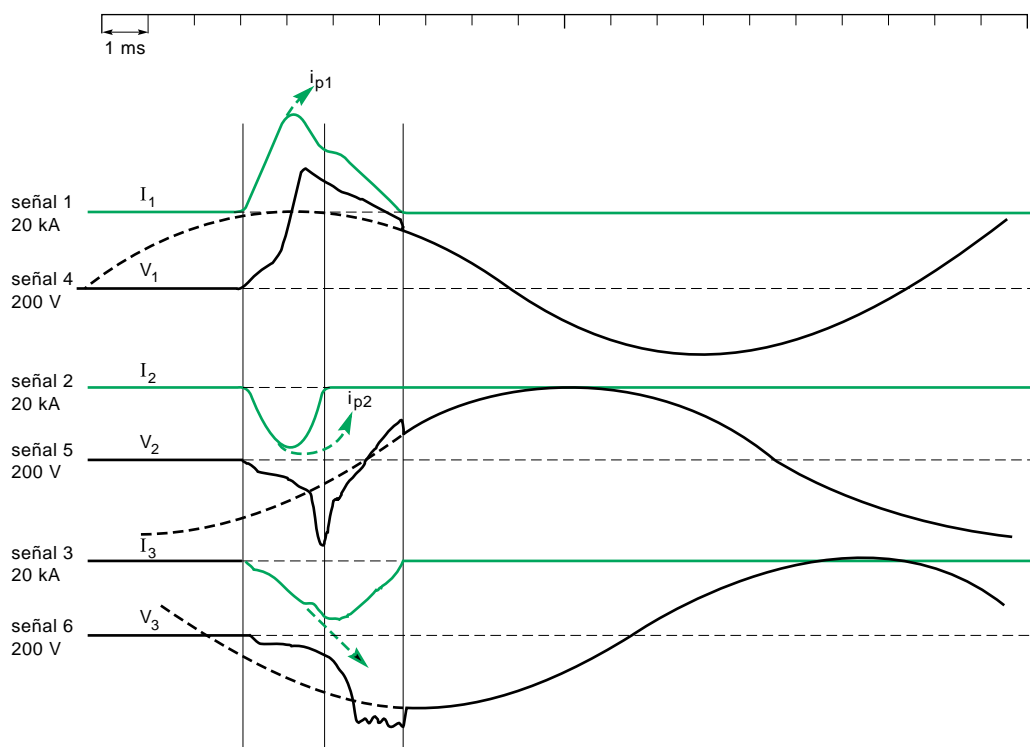


Fig. 20: Oscilogramas del corte de un cortocircuito de ensayo con una tensión trifásica, con apertura independiente de los polos.

5.6 Los parámetros del corte o ruptura

Para poder apreciar la eficacia de la ruptura, los parámetros a tener en cuenta son:

■ **intensidad de cresta cortada** = \hat{i}_c (valor máximo absoluto de la cresta de corriente)

El conocimiento de esta magnitud permite definir las sollicitaciones electrodinámicas máximas en el circuito,

■ «**solicitación térmica**» o **integral de Joule**

$$= \int i^2 dt$$

Esta denominación ha quedado consagrada con el uso.

Como la forma de onda de la corriente cortada no corresponde a una función matemática simple, el cálculo de esta integral se realiza paso a paso, por medios informáticos.

Esta integral expresa las sollicitaciones energéticas térmicas, pero también electrodinámicas, sobre los elementos del circuito,

■ **tiempo de ruptura** = t_a

Tiempo total de la ruptura, si el circuito es trifásico,

■ **tensión de arco máxima** = U_a

Órdenes de magnitud:

□ 250 a 500 V, para un interruptor automático standard,

□ 600 a 900 V, para un interruptor automático limitador.

Estas «sobretensiones» no son peligrosas ya que su valor es inferior a las tensiones de ensayo normalizadas para las instalaciones BT,

■ **energía de arco** = $\int u_a i_a dt$

Esta integral también se calcula paso a paso, por ordenador. Representa la energía que se consume en la zona del arco.

Órdenes de magnitud: 1, 10, 100 kJ en función de los aparatos y las intensidades cortadas. Es uno de los parámetros que condiciona la durabilidad de los aparatos de corte.

5.7 Ruptura con fusibles

Un fusible corta la corriente gracias al arco.
La relativa simplicidad está basada en que un filamento, debidamente calculado, se calienta hasta su temperatura de fusión por la corriente que lo recorre.

Para valores elevados de la corriente, el calentamiento que produce la fusión del filamento es de tipo adiabático, con una energía de prearco definida por la expresión:

$$R \int_0^{t_{pa}} i^2 dt = mcT_f$$

con:

R = resistencia del elemento fusible,

m = masa del filamento,

c = capacidad calorífica,

T_f = temperatura de fusión,

t_{pa} = tiempo de prearco.

Esta energía térmica, denominada de prearco, es independiente de la tensión de red.

El arco alcanza rápidamente la longitud de la parte de filamento fundido y la tensión de arco alcanza un valor que es función de esta longitud y de la presión que aparece en la cámara de fusión (**figura 21**).

Esta cámara puede estar llena de polvo de sílice para que la fusión de esta arena absorba la energía del arco.

Nota: La «cola» de corriente se explica por el camino «preferencial» que el arco crea en la masa de sílice fundida. El arco se va extinguiendo contra las paredes aún calientes.

Algunas observaciones a propósito de los fusibles:

- sólo pueden actuar en caso de corrientes de sobrecarga muy fuerte o de cortocircuito,
- algunos tipos de fusibles tienen un percutor, para señalar su fusión o para provocar el disparo indirecto de un dispositivo de corte complementario que garantice la abertura de todos los conductores activos,
- después de un defecto que provoque la fusión de un fusible, los «supervivientes» (los de las fases que no se han fundido) pueden haber rozado la fusión, con lo que sus características se habrán modificado sustancialmente. En estas condiciones pueden fundir intempestivamente, incluso para intensidades inferiores a su calibre. Por esto es necesario cambiar todos los fusibles a la vez.

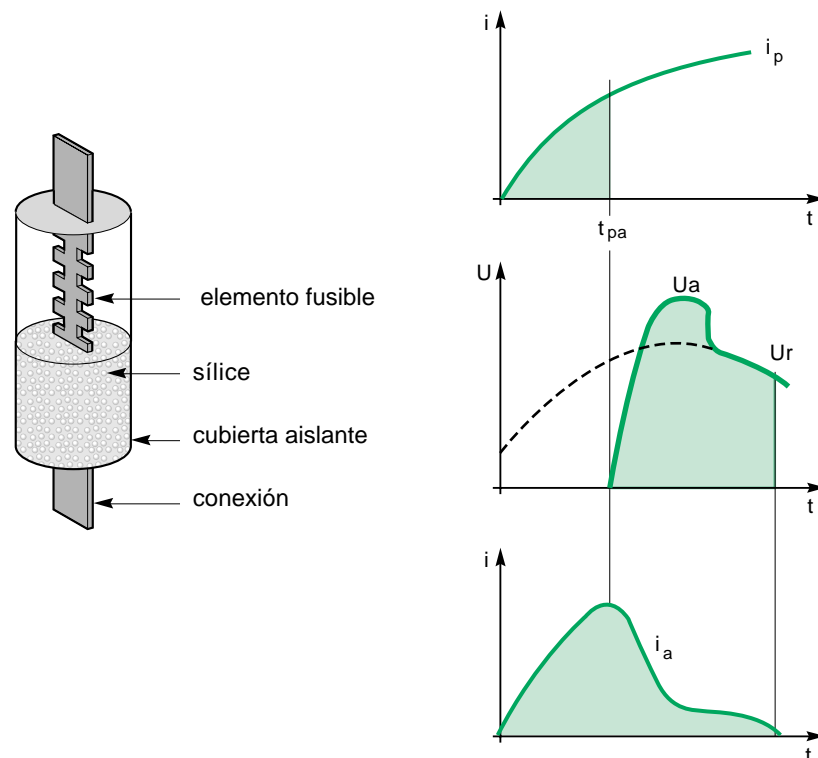


Fig. 21: El fusible, constitución y curvas características de corte.

6 El interruptor automático BT

Un interruptor automático (**figura 22**) es un aparato de conexión capaz de cerrar e interrumpir un circuito ante cualquier valor de la corriente hasta su **poder de ruptura último: Icu** (norma CEI 60947-2).

Aunque su función básica es la interrupción de las corrientes de cortocircuito y de sobrecarga por acción «refleja», permite también, mediante una acción exterior voluntaria, el corte de corrientes de sobrecarga y «normales» (las de empleo y más pequeñas). Además, una vez abierto, asegura un aislamiento en tensión del circuito interrumpido.

El diseño de un interruptor automático que reúna en una misma caja todas estas funciones ha hecho adoptar soluciones específicas en cuanto a:

- mecanismos de cierre y apertura,
- relés,
- circuitos eléctricos de los polos,
- elementos de corte (contactos, cámaras de corte, ...).

Este capítulo analiza estas funciones, su tecnología y prestaciones.

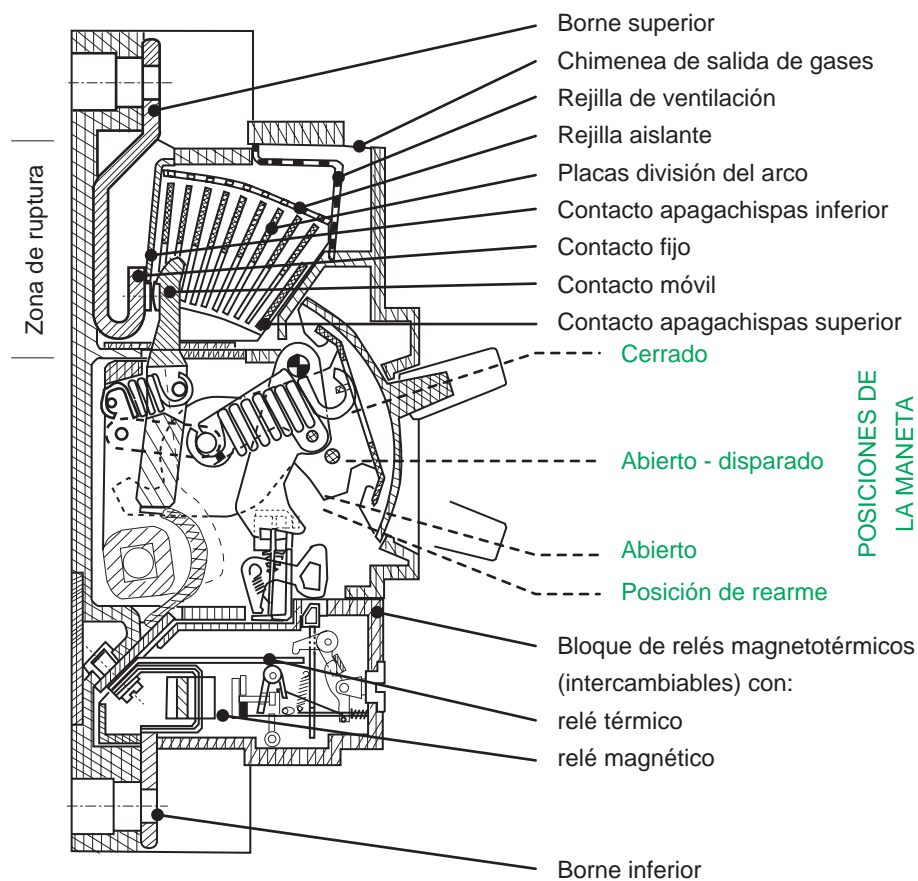


Fig. 22: Corte de un interruptor BT industrial 400 A.

6.1 Sus funciones

Cerrar el circuito

Por acción sobre el mecanismo, al mínimo contacto, el o los receptores reciben alimentación en corriente; estos receptores, al conectarse, absorben valores de corriente netamente superiores al valor nominal I_n (por ejemplo: un motor puede absorber de 7 a 8 I_n durante algunos segundos). Para que estas sobreintensidades no den lugar a fenómenos nefastos para la zona de contactos (erosión producida por el arco), la aproximación debe de ser brusca, especialmente a partir de 100 A.

Para atender a todos los casos usuales sin problemas, los interruptores automáticos han de poder establecer corrientes de 15 a 20 veces mayores que su valor nominal.

La realización de esta función requiere unas especificaciones, ya que un interruptor automático debe de estar siempre a punto para abrir, en caso de defecto en la instalación, incluso inmediatamente después de su conexión o cierre.

Conducir la corriente

Esta función pasiva precisa de precauciones constructivas para responder a las prestaciones de calentamiento admisible y posibilidad de apertura rápida.

Y además, si el interruptor automático es selectivo, puede precisar una capacidad electrodinámica elevada para soportar las corrientes de cortocircuito durante el acompañamiento selectivo, tiempo necesario para la actuación de los aparatos situados aguas abajo.

Abrir el circuito, cortar la corriente

- Mediante la acción voluntaria sobre el mecanismo, manual o telecomandado, cualquiera que sea la corriente,
- mediante la acción refleja sobre el mecanismo provocada por el relé a continuación de una sobreintensidad, lo que provoca una apertura automática y definitiva del interruptor automático aunque el órgano de maniobra se mantenga en posición «cerrado»,
- mediante la actuación de un relé auxiliar sobre el mecanismo: dispositivos de mínima tensión, de emisión de corriente, de corriente diferencial, ... La apertura es automática y definitiva, cualquiera que sea el valor de la corriente en este instante.

Asegurar el seccionamiento

Cuando el interruptor está abierto se requiere un nivel de aislamiento entre partes «en tensión» y partes «sin tensión».

Este nivel de aislamiento es el requerido para los ensayos dieléctricos prescritos en la norma CEI 60947-2.

- un ensayo de corriente de fuga máxima entre entrada y salida bajo una tensión U_e máxima,
- una tensión de choque superior (por ejemplo a 12,3 kV en vez de 9,8 kV exigibles para un aparato de un mismo tipo que no tenga esta función),
- un ensayo de resistencia mecánica del mecanismo denominada «de contacto soldado» (Cuaderno Técnico Schneider Electric nº 150).

6.2 Tecnología

Los mecanismos

Los tres principales y básicos son:

- mecanismo de «2 posiciones» estables «A» (abierto) y «C» (cerrado) para los aparatos de calibre inferior a 100 A,
- mecanismo de «3 posiciones» estables «A», «C» y «A/D» (abierto - disparado), utilizado sobre todo en interruptores automáticos industriales (**figura 22**) cuyo órgano de maniobra permite:
 - el cierre brusco de los contactos, independiente de la acción del operador,
 - la apertura brusca de los contactos, independiente de la acción del operador,

- la apertura, por acción de los relés de disparo, brusca e independiente, de mantener o no, la palanca en posición «C». En este caso, para cerrar debe de realizarse una acción de rearme,
- el seccionamiento aparente (el órgano de maniobra solamente puede enclavarse en posición «A» si los contactos están realmente abiertos),
- mecanismo para interruptor automático de gran intensidad, muy sofisticado, ya que comporta un dispositivo de rearme por acumulación de energía antes del cierre y de la apertura que debe permitir un ciclo completo «A-CA» sin rearme intermedio.

Los relés de disparo

Hay una gran diversidad; tratamos aquí sólo los necesarios para provocar la apertura o corte de las sobreintensidades.

■ Relés magnetotérmicos:

□ régimen de sobrecarga, es el que provoca un calentamiento significativo debido a una corriente determinada (o una sobretemperatura, por excesivo número de maniobras), que a su vez produce el disparo mediante la actuación de un elemento «termo-mecánico», generalmente un bimetal:

- cuando la sobrecarga es débil, el calibre nominal del relé queda definido por las condiciones de calentamiento en régimen asintótico. El relé puede ser del tipo «compensado» para evitar la influencia de la temperatura ambiente,
- ante las sobrecargas importantes, los calentamientos evolucionan en régimen adiabático. Por ello, el tiempo de desconexión es función del estado de calentamiento previo del interruptor automático.

□ en condiciones de cortocircuito, a partir de un determinado umbral de corriente, las desconexiones serán «instantáneas» por la acción de un circuito magnético que acciona una armadura o un núcleo. El umbral se define para un impulso de corriente de 200 ms, pero el tiempo de acción es muy pequeño (3 a 5 ms) para valores de intensidad elevados.

■ Los relés «electrónicos»

Su primer objetivo es medir la corriente que circula a través de los polos del interruptor automático para actuar en consecuencia sobre un mecanismo de desconexión. La ventajas de este sistema son:

- mucha mayor precisión en los umbrales de disparo,
- curvas de desconexión ajustables según las necesidades,
- posibilidad de información local o a distancia.

Los contactos

Los contactos de los interruptores automáticos BT están constituidos en parte por elementos conductores que trabajan con presión entre sí, en la misma dirección de su desplazamiento (**figura 23**), por tanto, no son como los contactos «de cuchilla» de muchos interruptores.

Merecen especial atención dos fenómenos físicos que están directamente ligados a la naturaleza de los materiales empleados y a las fuerzas de contacto.

■ La resistencia de contacto (R_c)

Su valor debe ser el menor posible ya que condiciona la potencia y energía desarrollada en el punto de contacto, que debe evacuarse

por conducción. Los calentamientos producidos por este fenómeno pueden acelerar la oxidación y corrosión. Para preservarlos de esta acción, los contactos pueden ser de cobre hasta unos 100 A y a partir de este valor han de ser de aleaciones de plata.

Al producirse el paso de grandes corrientes en el punto de contacto, la potencia generada puede superar, con mucho, la potencia disipable. En este caso, la zona de contacto alcanza y rebasa la temperatura de fusión del material; para evitar la soldadura de los contactos, éstos se construyen de una mezcla heterogénea, por ejemplo con adición de telurio o de carbono en uno de los contactos.

La técnica de «contacto único» se emplea hasta $I_n = 630$ A. Para mayores valores nominales es recomendable utilizar varios «dedos» de contacto en paralelo.

■ La repulsión por estricción

Por efecto de interacción magnética entre las líneas de corriente «radiantes», aparece una fuerza de repulsión de los contactos que llamamos repulsión de estricción. Esta fuerza produce consecuencias nefastas ya que durante su acción hay:

- erosión inútil de las pastillas de contacto por la energía de arco,

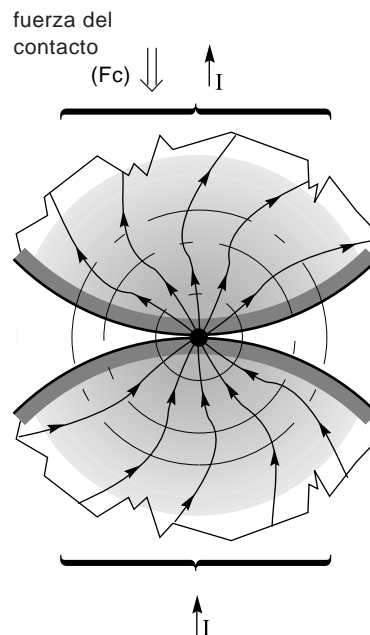


Fig. 23: La presión de los contactos de los interruptores automáticos BT se aplica en el mismo sentido del desplazamiento.

□ riesgo de soldadura o microsoldadura, si los contactos no se separan,

□ creación de «puntos calientes» que favorecen el estancamiento del arco y, por tanto, la emisión termoiónica; así se podrán comprender las condiciones de extinción del arco en su fase de regeneración.

Hay que destacar que, para mejorar las condiciones de sollicitación electrodinámica, por encima de $I_n = 630\text{ A}$, la repulsión por estricción induce también a utilizar la técnica de multi-contacts.

Resumiendo: la elección de los materiales y la fuerza de contactos son determinantes en cuanto a la resistencia de contacto, al umbral de repulsión y también a otros aspectos, como erosión, microsoldaduras, etc.

Contacto móvil

Para grandes corrientes, a partir de $15 I_n$, es necesario:

■ para aparatos que deben permanecer cerrados, reforzar la resistencia electrodinámica mediante un efecto de

«compensación», con la corriente propia. Hay varias disposiciones posibles:

□ por atracción mutua, sistema utilizado en interruptores con apertura impedida ante puntas de corriente (**figura 24a**),

□ por repulsión equilibrada, sistema utilizado con los interruptores automáticos de gran intensidad nominal (**figura 24b**). Estos interruptores, situados normalmente en cabecera de instalación, son de disparo temporizado para que haya selectividad; por tanto, su resistencia electrodinámica debe ser elevada, del orden de los valores de cortocircuito « $20 I_n$ »,

■ para aparatos que deban abrir y cerrar rápidamente, se mejoran las condiciones de repulsión del contacto móvil para conseguir lo antes posible una tensión de arco. Hay varias soluciones posibles (**figura 25**):

□ sistema con un único bucle de repulsión,

□ sistema con un bucle de repulsión doble (habitualmente con un «doble contacto»),

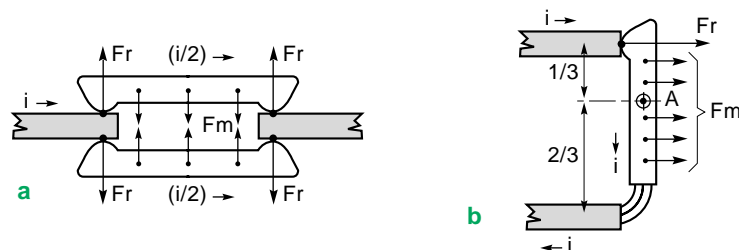


Fig. 24: Reforzamiento del esfuerzo electrodinámico de los contactos.

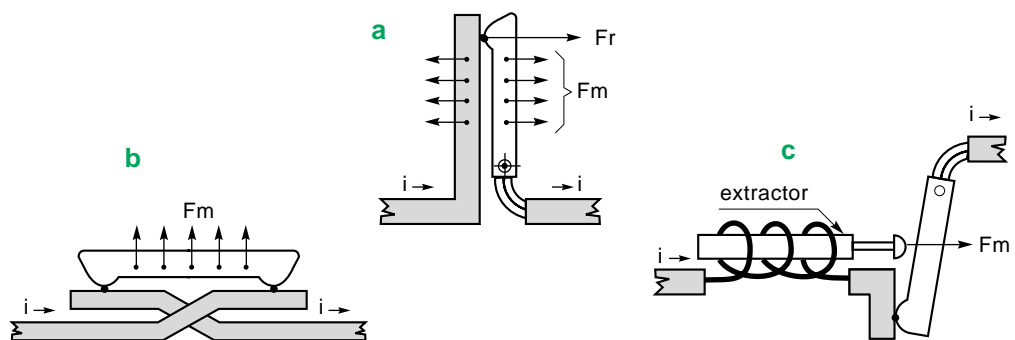


Fig. 25: Principio de repulsión de los contactos:

a: bucle sencillo de repulsión,

b: doble repulsión (normalmente también con doble contacto),

c: con «extractor»: núcleo magnético que empuja o tira del contacto móvil.

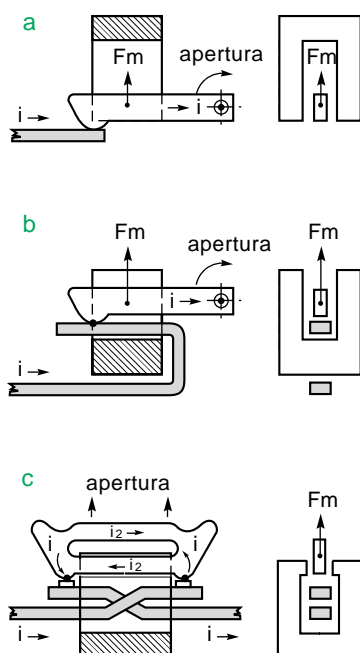


Fig. 26: Dispositivos magnéticos de repulsión de los contactos:

- a:** circuito de atracción en U,
- b:** circuito de repulsión en U,
- c:** repulsión con gran di/dt .

□ con «extractor»: un núcleo magnético empuja el contacto móvil.

Los efectos de repulsión pueden reforzarse utilizando circuitos magnéticos.

□ con efectos proporcionales al cuadrado de la corriente:

- circuito de atracción en U (**figura 26a**),
- circuito de repulsión en U (**figura 26b**),

□ con efectos proporcionales a la pendiente de la corriente (di/dt), por tanto,

especialmente indicado y eficaz para grandes corrientes (I_{cc}) (**figura 26c**).

Lo que se pretende a veces es que los contactos móviles se vuelvan a cerrar «solos», transcurrido un cierto tiempo, para no volver a abrirse, salvo que el cortocircuito no haya sido eliminado por un interruptor automático situado aguas abajo.

Las cámaras de ruptura

La función esencial de esta parte de un interruptor automático es mantener la tensión de arco en un valor conveniente absorbiendo la energía desarrollada por éste (esta energía es, a veces, enorme: si $U_a = 500$ V e $i = 10000$ A durante 2 ms, resulta que $P_a = 5$ MW y $W_a = 10$ kJ!).

Esta zona debe satisfacer también las condiciones suficientes de regeneración dieléctrica para garantizar la ruptura definitiva al paso de la corriente por cero, a pesar de la presencia de la tensión de la red.

Los fenómenos físicos a considerar, para garantizar el corte de la corriente, no son todos esencialmente eléctricos: los térmicos (fusión, sublimación, evaporación), los aerodinámicos, las radiaciones juegan un papel igualmente importante en la distribución de energías en cada momento.

El principio básico de una cámara de ruptura consiste en desplazar el arco contra una batería de separadores o plaquitas, dispuestas transversalmente a la columna del arco principal para:

- fraccionarlo en una serie de arcos elementales, tantos como espacios interseparadores (**figura 27a**), con lo que cada uno de ellos producirá una caída de tensión de arco mínima U_{AC} de 20 a 40 V, debida a fenómenos de caídas ánodo-cátodo y que provocan el alargamiento de este arco.

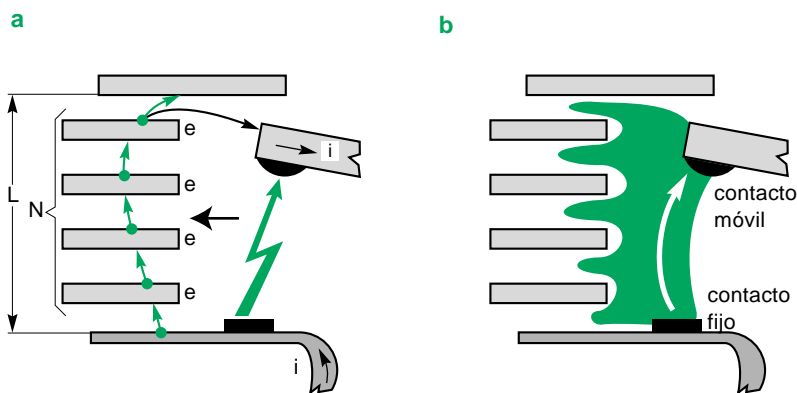


Fig. 27: Los separadores colocados en las cámaras de corte facilitan la ruptura.

La caída de tensión de arco, cuando éste está fraccionado, podemos calcularla:

$$U_a \approx N U_{AC} + (L - N e) U_L,$$

siendo:

e = espacio entre dos separadores,

N = número de separadores,

L = longitud de la cámara de ruptura.

Por ejemplo: si N = 10, L = 4 cm, e = 0,2 cm,

$U_{AC} \approx 30 \text{ V}$ y $U_L \approx 75 \text{ V/cm}$,

$$U_a \approx 200 + 150 = 350 \text{ V}.$$

■ almacenar, por calentamiento o licuefacción temporal de los separadores, la energía que producen en la columna de plasma las corrientes muy fuertes.

Pero en unas condiciones determinadas y con grandes corrientes, existe un límite superior de la intensidad por encima del cual el arco se queda delante de los separadores a pesar de los intercambios térmicos muy importantes que se producen (**figura 27b**). Aunque el arco ya no se fracciona más, la tensión de arco es del mismo orden de magnitud o un poco más pequeña.

La precámara

Esta zona comprende el volumen de separación entre la zona de contactos y el principio de los separadores que forman la cámara de corte.

Su presencia es normalmente necesaria y hasta indispensable para:

■ evitar el estancamiento del arco entre los contactos (erosión y puntos calientes); el apagachispas «inferior» contribuye a asegurar el desplazamiento de la base del arco desde los contactos fijos hacia el interior de los separadores de la cámara,

■ favorecer un alargamiento mayor y más rápido del arco que el que se provoca por la simple separación mecánica de los contactos.

Los efectos magnéticos ya indicados para la repulsión del contacto móvil ayudarán a conseguir estos objetivos, actuando sobre la corriente del arco.

Además de este «soplado magnético», aparecerá un soplado real aerodinámico si la energía del arco naciente vaporiza o sublima parte de los materiales aislantes gasógenos.

Por último, la presión, inevitable al producirse la ruptura de fuertes corrientes en un recinto cerrado, favorece la evolución de la tensión de arco, ya que:

■ la sección derecha de la columna de arco se encuentra reducida y su «resistencia» incrementada,

■ las diferencias de presión entre esta zona (sobrepresión debida al arco) y el fondo de la cámara de ruptura (presión atmosférica) favorecen la entrada y permanencia del arco en el interior de la cámara.

6.3 Prestaciones

Las prestaciones de un interruptor automático permiten garantizar su capacidad de empleo en una instalación determinada y en un punto concreto.

Las instalaciones eléctricas precisan el empleo de numerosos interruptores automáticos (en el origen de la instalación -en cabecera-, en los cambios de sección de las líneas, cerca de ciertos receptores, ...) cuyas características pueden ser muy diferentes:

- las tensiones nominales, 400 a 690 V en trifásica,
- las intensidades nominales, I_n , comprendidas entre algunos amperios y 6300 A, según su emplazamiento en la instalación,
- las protecciones contra las sobrecargas, de 1,3 a 10 I_n , según los elementos protegidos,
- los poderes de corte de valores que suelen ser normalmente inferiores a 35 kA, pero que pueden llegar algunas veces hasta 150 kA, según la potencia instalada.

Particularidades de los interruptores automáticos BT

Para satisfacer el conjunto de necesidades de una distribución eléctrica industrial o terciaria

es pues necesario disponer de una «gama de interruptores automáticos» (**figura 28**).

Interruptores automáticos cuyas características se obtienen mediante soluciones técnicas adaptadas a sus funciones y a sus calibres.

Así, la función de corte, adaptada a cada nivel, contribuye a la seguridad de cualquier instalación:

- la protección (de las personas y bienes),
- la disponibilidad de la energía, o continuidad de servicio, especialmente con la selectividad de desconexión de los interruptores automáticos.

En BT, son especialmente útiles dos tipos de selectividad: la selectividad amperimétrica y la selectividad cronométrica.

■ La primera, en declive por el empleo de la selectividad energética (Cuaderno Técnico Schneider Electric nº 167), se consigue con los interruptores automáticos de categoría A según la norma CEI 60947-2. Estos interruptores automáticos deben cortar muy rápidamente la corriente de defecto y limitar mucho las corrientes de cortocircuito.

■ La segunda, la selectividad cronométrica, se consigue con los interruptores automáticos de categoría B. Estos aparatos, situados generalmente en cabecera de la instalación, deben soportar, durante el tiempo de retardo, el paso de las corrientes de defecto que puedan presentarse y, por tanto, tener una gran capacidad para soportar los esfuerzos electrodinámicos.

Una gran limitación de la corriente de cortocircuito (ver también Cuaderno Técnico Schneider Electric nº 163)

Esta limitación se considera especialmente importante en los interruptores automáticos de calibre inferior o igual a 630 A.

Estos interruptores automáticos desarrollan una tensión de arco del orden de 600 a 900V en

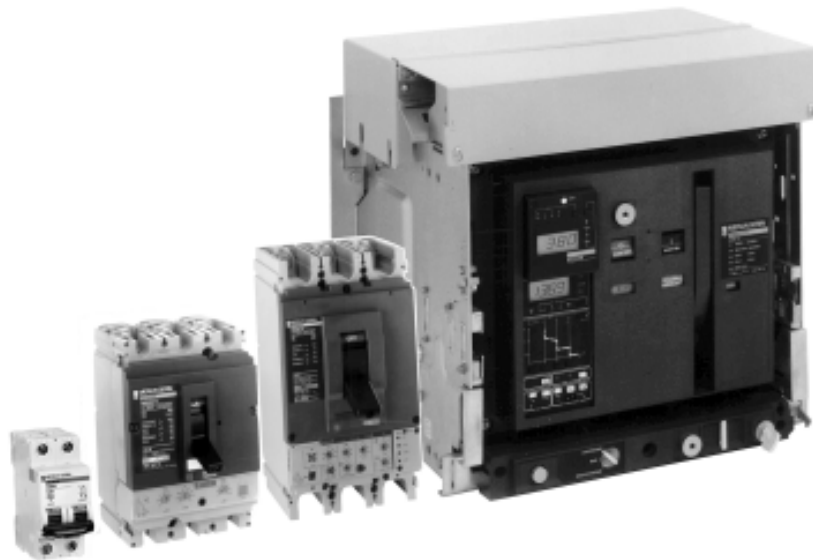


Fig. 28: Gama de interruptores automáticos BT de Merlin Gerin.

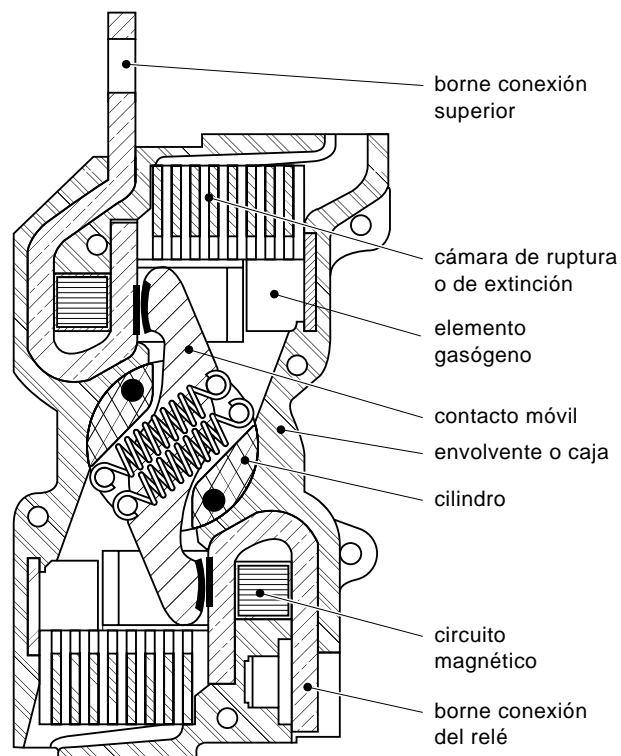


Fig. 29: Cámara de corte de un interruptor automático BT con contactos rotativos (Compact NS - Merlin Gerin).

pequeños volúmenes. Esta tensión se obtiene más fácilmente con sistemas de doble corte (por combinación de los esquemas de las **figuras 25b y 26b**), y la instalación de un contacto móvil de tipo rotativo que ofrece la ventaja adicional de tener un recinto cerrado independiente para cada polo (**figura 29**).

Con la tecnología actual es posible cortar «100 kA» en 2,5 ms con un interruptor automático de 250 A.

Una gran capacidad para soportar esfuerzos electrodinámicos

Es necesaria para interruptores de calibre igual o superior a 800 A.

Esta característica necesita un principio de compensación de los esfuerzos electromagnéticos más fácil de resolver con un corte simple (**figura 24b**) más aún cuando la apertura es tan grande (distancia entre polos del contacto) que permite obtener también una tensión de arco elevada, entre 600 y 900 V.

De esta manera un interruptor automático de 3200 A corta «100 kA» en 15 ms (sin retardo en la desconexión), pero también puede soportar 75 kA durante 3 s (**figura 30**).

Prestaciones confirmadas por los ensayos

La evaluación y la garantía de las prestaciones de los interruptores automáticos se obtienen realizando los ensayos normalizados (ver CEI 60947-2 y UNE-EN 60947.2).

Así, por lo que se refiere al «corte», los ensayos permiten verificar, por ejemplo:

- las endurancias con I_n ,
- las endurancias con sobrecarga (con $6 I_n$, por ejemplo),
- los poderes de corte para los ciclos:
 - A-CA con I_{cu} , corriente de cortocircuito última,
 - o para A-CA-CA con I_{cs} , corriente de cortocircuito en servicio con $I_{cs} \leq I_{cu}$.

Nota:

La publicación de la norma CEI 60947-2, que trata de los interruptores automáticos de BT industriales, ha sido objeto del Cuaderno Técnico Schneider nº 150, cuya lectura puede completar estas informaciones.

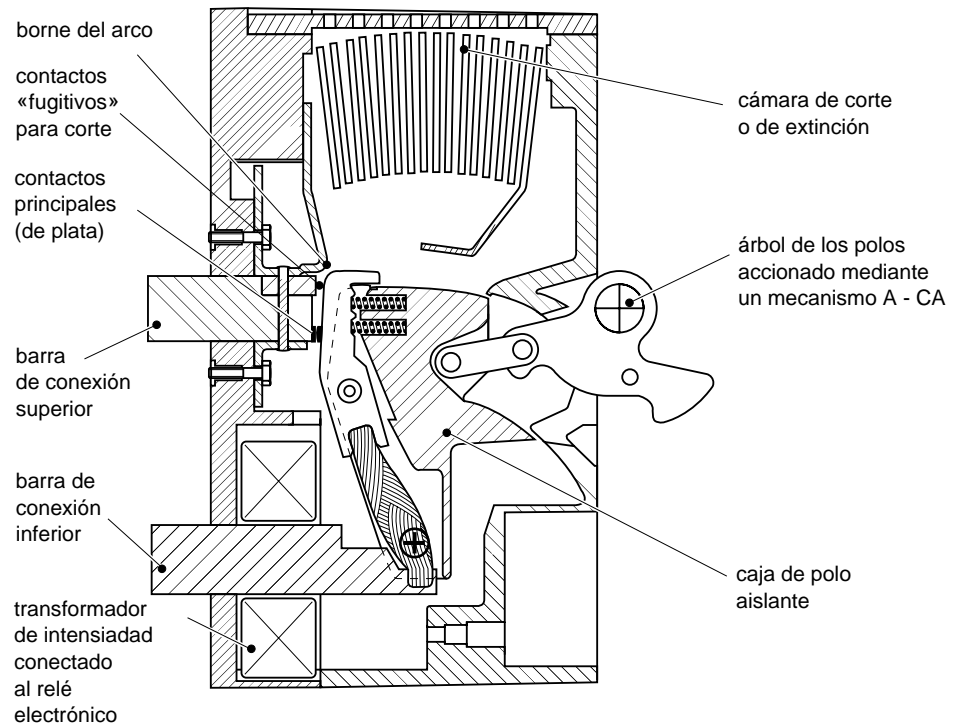


Fig. 30: Cámara de corte de un interruptor automático BT de gran resistencia electrodinámica (Masterpact - Merlin Gerin).

7 Conclusión

¿Cuál es el futuro del arco?

Todavía hoy el arco eléctrico es un fenómeno muy ligado a la técnica de corte con limitación de corrientes en BT.

Además los interruptores automáticos de BT han conseguido importantes mejoras relacionadas con la evolución de los conocimientos técnicos de los materiales y con el empleo de la electrónica.

No obstante, todavía durante varias décadas, la protección de los circuitos eléctricos precisará la utilización de interruptores automáticos con el «dominio del arco».

Bibliografía

Normas

- CEI 60946-2: Aparamenta de BT - 2ª parte: Interruptores automáticos.
- CEI 60050: Índice general de vocabulario electrotécnico.
- UNE-EN 60947-2: Aparamenta BT - 2ª parte: Interruptores automáticos.

Cuadernos Técnicos Schneider Electric

- Evolución de los interruptores automáticos BT con la norma CEI 60947-2». CT150. E. BLANC.
- Corte en BT por limitación de la corriente. CT nº 163. P. SCHUELLER.
- La selectividad energética en BT. CT nº 167. R. MOREL - M. SERPINET.