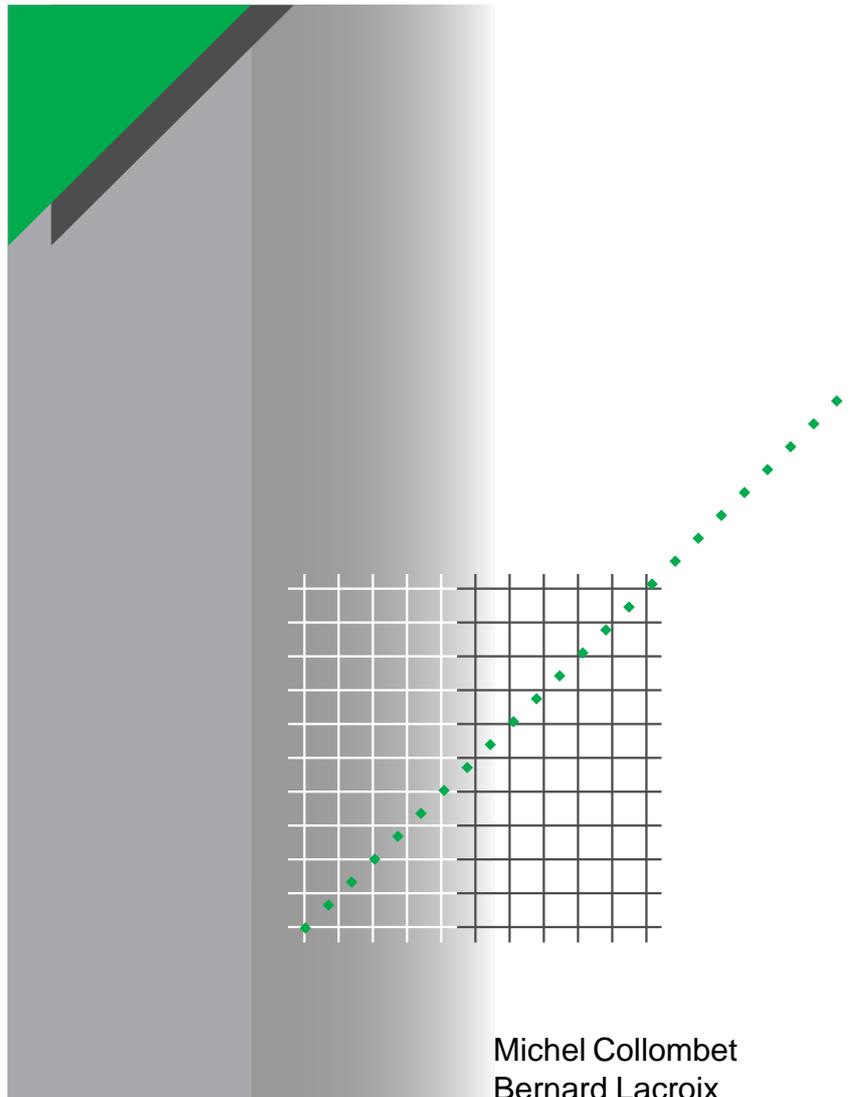


Cuaderno Técnico nº 182

Los interruptores automáticos BT frente a las corrientes armónicas, transitorias y cíclicas



Michel Collombet
Bernard Lacroix

Merlin Gerin

Eunea Merlin Gerin

Modicon

Telemecanique

Mesa

Himel

Square D

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 182 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 182

Los interruptores automáticos BT frente a las corrientes armónicas, transitorias y cíclicas



Michel Collombet

Ingeniero INPG en 1998 entra en el Grupo Schneider en 1975, donde pasa a ser responsable del desarrollo de sistemas electrónicos digitales SES (Système Electronique de Sûreté).

Actualmente es el responsable del desarrollo electrónico del DBTP (Division Basse Tension de Puissance).



Bernard Lacroix

Ingeniero ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle de Paris) en 1974, trabajó durante 5 años en Jeumont Schneider en donde participó entre otros en el desarrollo de los variadores de velocidad con troceadores para el TGV.

Entró en Merlin Gerin en 1981 y trabajó sucesivamente como técnico comercial de onduladores, después como responsable comercial de la sección de protección de personas. Desde 1991, se responsabilizó del estudio de las especificaciones en el campo de la distribución BT de potencia.

Merlin Gerin

Eunea Merlin Gerin

Modicon

Telemecanique

Mesa

Himel

Square D

Trad.: J.M. Giró

Original francés: noviembre 1996

Versión española: marzo 2001

Schneider
 **Electric**

Terminología

ASIC:

Application Specific Integrated Circuit.

Filtro IIR:

Filtro Infinite Impulse Response.

GPF:

Ground Fault Protection.

I:

Umbral de disparo de la protección magnética instantánea.

I_{cu}:

Poder de corte último (máximo) de un interruptor automático.

I_m:

Ajuste de la protección magnética o de corto retardo (I_{CR}).

I_r:

Ajuste de la protección térmica o de largo retardo (I_{LR}).

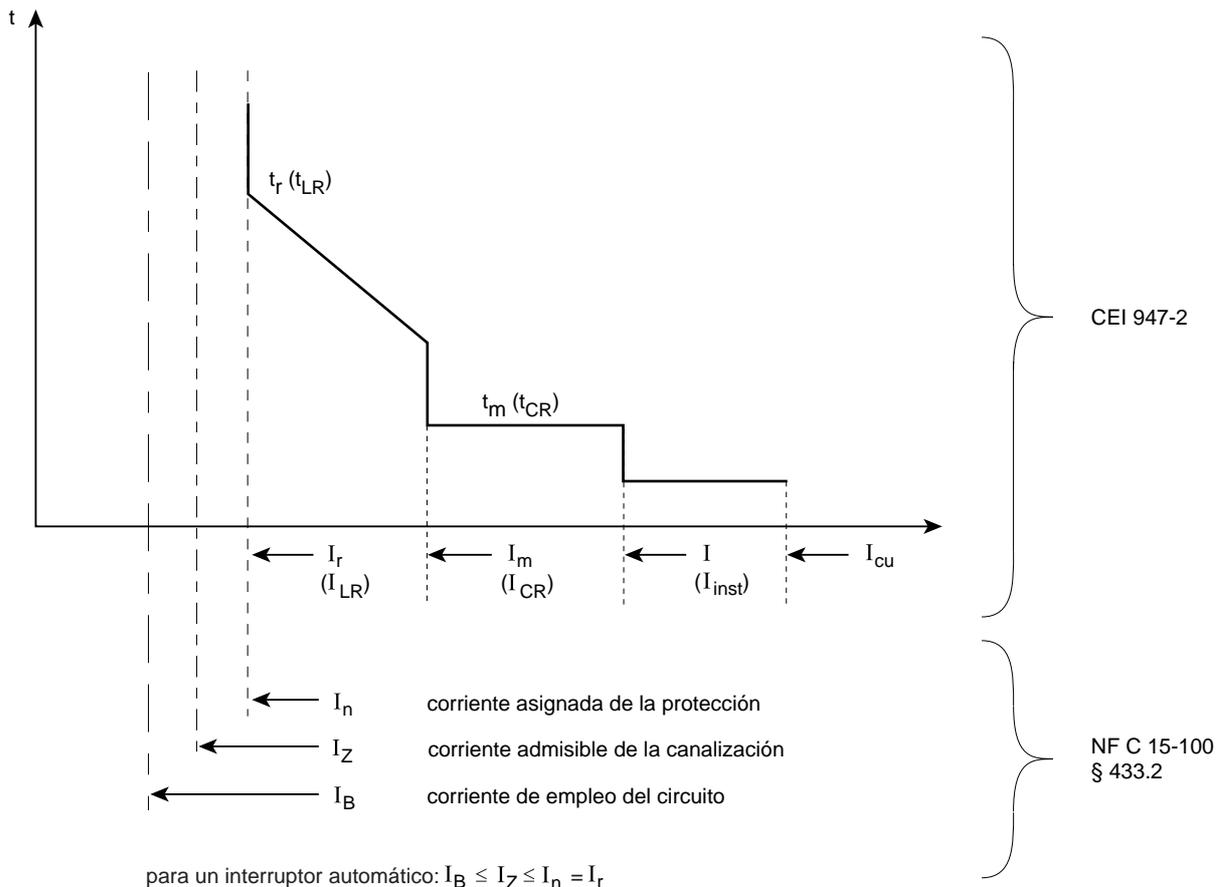
t_m:

Ajuste de la temporización del relé magnético o de la protección de corto retardo (t_{CR}).

t_r:

Ajuste (si fuera necesario) del retardo de la protección térmica o de la temporización de la protección de largo retardo (t_{LR}).

En la norma CEI 364 están indicadas otras magnitudes de corriente, según puede verse en la [figura adjunta](#).



Los interruptores automáticos BT frente a las corrientes armónicas, transitorias y cíclicas

La evolución de los receptores, resultado de los avances tecnológicos de esta última década, ha supuesto mayores exigencias para la distribución eléctrica. Por esto, las protecciones se han de adaptar a la nueva situación, especialmente por tres motivos:

- corrientes armónicas importantes debidas a la multiplicación de cargas no lineales que utilizan la electrónica de potencia (rectificadores, fuentes conmutadas...),
- corrientes transitorias provocadas por la conexión de receptores de gran intensidad de arranque, como son: cargas capacitativas, transformadores BT/BT,
- corrientes cíclicas originadas por la automatización, cada vez mayor, de cargas que desarrollan ciclos repetitivos (robots de soldadura, caldeo por trenes de ondas).

El objeto de este Cuaderno Técnico es mostrar cómo los relés electrónicos responden a las exigencias creadas por estas nuevas circunstancias, sustituyendo progresivamente a los relés electromagnéticos, y cómo, gracias a las posibilidades de la tecnología digital, se han convertido a la vez en captadores y actuadores «inteligentes y comunicantes».

1 Repaso de los interruptores automáticos BT	1.1 Misión de un interruptor automático	p. 6
	1.2 Tecnología/organización de un interruptor automático BT	p. 6
	1.3 La medida de la corriente	p. 8
2 Las corrientes armónicas	2.1 Repaso teórico de las corrientes armónicas	p. 12
	2.2 Generadores de corrientes armónicas	p. 13
	2.3 Tratamiento de las corrientes armónicas con los relés electrónicos de los interruptores automáticos BT	p. 16
3 Las corrientes transitorias y cíclicas	3.1 Ejemplos de corriente de arranque	p. 17
	3.2 Tratamiento de las corrientes transitorias con los relés electrónicos de los interruptores automáticos BT	p. 18
	3.3 Cargas con corrientes cíclicas	p. 19
	3.4 Tratamiento de corrientes cíclicas con los relés electrónicos de los interruptores automáticos BT	p. 20
4 Los interruptores automáticos electrónicos: amplio margen de posibilidades	4.1 Los ajustes de los interruptores automáticos electrónicos	p. 21
	4.2 Las ventajas de la tecnología digital en la seguridad de funcionamiento de la explotación	p. 22
	4.3 La comunicación mediante BUS	p. 22
	4.4 Las normas de los interruptores automáticos BT	p. 22
	4.5 Interruptores automáticos electrónicos: oferta de nuevas posibilidades	p. 23
5 Conclusión		p. 24
6 Bibliografía		p. 25

1 Repaso de los interruptores automáticos BT

1.1 Misión de un interruptor automático

La misión principal asignada a un interruptor automático es proteger contra condiciones anormales de funcionamiento (sobrecargas y cortocircuitos) la instalación eléctrica y los conductores situados aguas abajo. Para asegurar eficazmente esta función, el relé del interruptor automático debe tener en cuenta la evolución de los receptores.

Esta evolución se caracteriza por:

- una «perturbación» rica en armónicos

El desarrollo de la electrónica de potencia y por tanto de las cargas no lineales (máquinas de proceso de datos, rectificadores, reguladores, troceadores...) y la evolución de la tecnología de los receptores (lámparas de descarga, lámparas fluorescentes) han aumentado la intensidad de las corrientes armónicas en las redes de distribución,

- corrientes «transitorias» más frecuentes debidas tanto a las cargas clásicas como a las nuevas que generan corrientes de arranque importantes:
 - condensadores para la compensación del factor de potencia (cuyo valor de referencia ha aumentado), transformadores BT/BT,
 - pero también rectificadores con entrada a condensador, cada vez más utilizados (lámparas con encendido electrónico, ordenadores...),

- receptores automatizados con funcionamiento «cíclico»

La creciente automatización implica maniobras cada vez más repetitivas de los receptores, como por ejemplo los motores de las cadenas de montaje, los robots de producción, la regulación térmica mediante trenes de ondas...

La exigencia de una mayor continuidad y calidad del servicio aumenta en paralelo con esta evolución. Así:

- evitar los cortes de tensión y mejorar la continuidad del servicio obliga a instalar fuentes de alimentación de emergencia como los grupos electrógenos (GE). Éstos tienen características especiales que la protección deberá integrar, por ejemplo, una impedancia mucho mayor de la fuente, lo que aumenta las perturbaciones debidas a las corrientes armónicas, reduciendo el valor de las corrientes de defecto y modificando por tanto los valores de ajuste de las protecciones,
- para evitar los disparos intempestivos es fundamental que las protecciones no actúen si no hay un riesgo real. Estos disparos son contrarios a las exigencias de seguridad y confort en el sector terciario y provocan interrupciones muy costosas en la industria.

1.2 Tecnología/organización de un interruptor automático BT

En las instalaciones BT se utilizan mucho los interruptores automáticos de 1 a 6300 A. Sus relés pueden ser de dos tecnologías diferentes:

- relés magnetotérmicos

Se aplican sobre todo en la gama doméstica e industrial de pequeño calibre. En estos aparatos de tipo modular, el relé está integrado en el interruptor automático.

- relés electrónicos

Reservados antes exclusivamente a los interruptores automáticos de gran calibre, han pasado a utilizarse también en toda la gama de valores (**figura 1**), porque esta solución ofrece una gran flexibilidad y porque se han hecho cada vez más económicos.

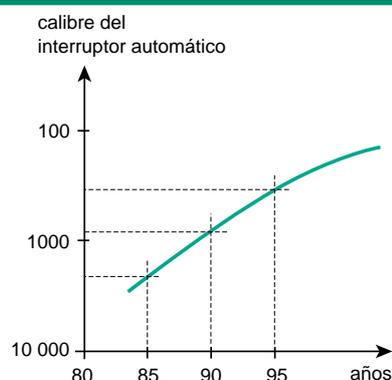


Fig. 1: Evolución de los relés electrónicos.

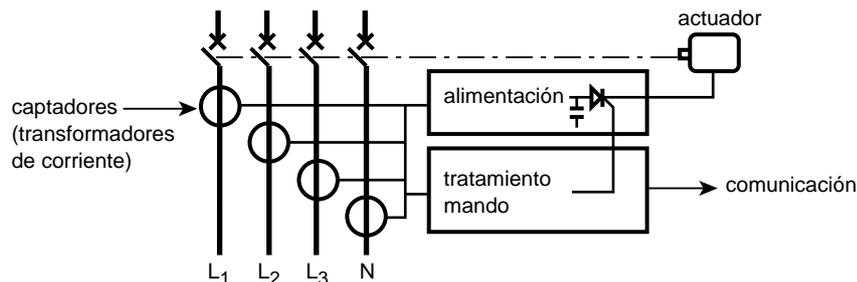


Fig. 2: Bloques funcionales de un relé electrónico.

En efecto, el uso de la tecnología digital, especialmente la utilización simple de circuitos integrados específicos (ASIC) permite:

- fabricar relés universales que facilitan el ajuste,
- tratar más información,
- asegurar la comunicación necesaria para el control y mando de la instalación.

Relé magnetotérmico

Este relé tiene un bimetálico y una bobina electroimán, normalmente montados en serie con el circuito que hay que proteger.

La acción del bimetálico es más rápida cuando la sobrecarga es elevada.

Siguiendo el principio del electroimán, la bobina, a partir de sobrecargas importantes, de forma casi instantánea.

Relé electrónico

Este relé tiene captadores, un sistema electrónico de tratamiento de la información, un sistema de mando y un actuador (figura 2).

- captadores

Por una parte, los captadores de corriente producen una imagen de la corriente a medir y por otra, para tener una mayor seguridad de

funcionamiento, producen la alimentación electrónica del relé (relés «autoalimentados»).

Como estos captadores deben realizar esta doble función (medida y alimentación del relé), utilizan un circuito magnético («TC de hierro»).

- tratamiento de la información

Este tratamiento tiene, esquemáticamente, las siguientes unidades funcionales (figura 3):

- función (1): digitalizar la señal suministrada por el captador con la ayuda de un convertidor analógico/digital para seguir en tiempo real la evolución de la corriente,
- función (2): compensar la saturación del TC (si es necesario). En efecto, los TC con núcleo magnético se pueden saturar con grandes valores de corriente y este fenómeno aumenta en caso de elevación de la temperatura (figura 4),
- función (3): calcular el valor RMS de la corriente primaria,
- función (4): comparar el valor RMS con los umbrales de ajuste predeterminados por el usuario. Según el valor, esta comparación se hace con o sin temporización; al sobrepasarse el umbral, la circuitería electrónica dará una orden eléctrica a un actuador que la transformará en una acción mecánica de disparo del interruptor automático.

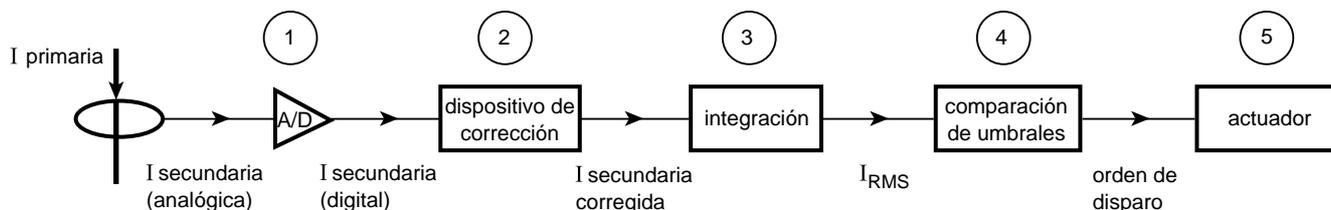


Fig. 3: Esquema funcional.

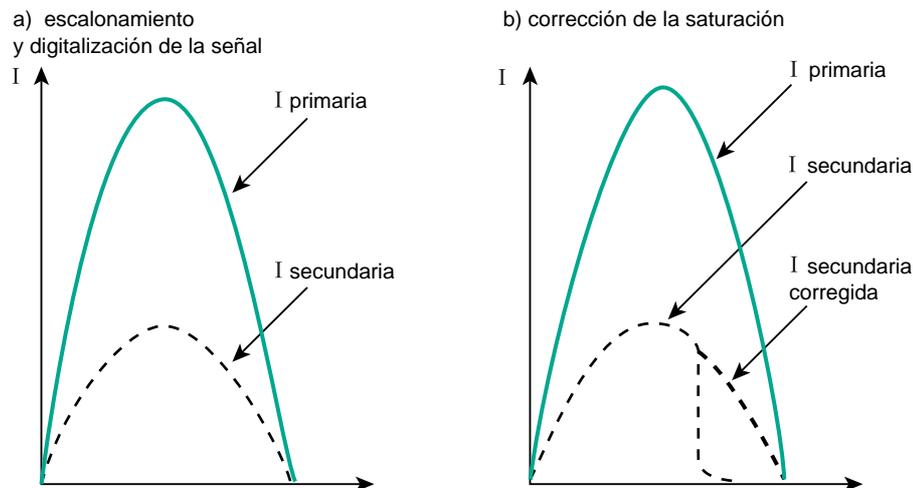


Fig. 4: Escalonamiento y corrección de la posible saturación de un TC.

■ **actuador**

La problemática del actuador es realizar esfuerzos instantáneos muy importantes... sin por otra parte consumir mucha corriente eléctrica. ¡Su acción requiere realizar un esfuerzo de varios Newtons en algunos milímetros, es decir, producir algunos julios durante algunos milisegundos, o sea, algunas centenas de vatio!

Por tanto, un actuador debe tener un rendimiento muy elevado, lo que excluye la utilización de electroimanes (bobinas) e implica la utilización de sistemas con energía potencial. Gracias a esto, es posible el disparo ultrarrápido del interruptor automático en todas las circunstancias.

1.3 La medida de la corriente

■ **Relé magnetotérmico**

En realidad, en este tipo de relé, el bimetel no proporciona los valores de corriente, sino que actúa térmica y mecánicamente a sus efectos.

■ **térmico**

El calentamiento de un bimetel se produce según el mismo principio que el de los conductores, es decir, la temperatura de calentamiento es proporcional al aporte de energía ($J = RI^2t$) proporcionada por el paso de la corriente (I) durante un tiempo dado (t). Por tanto, el disparo lo provoca una energía J_0 , que sigue la función $t = f(I)$. Ésta está definida en la norma (CEI 947-2) por un punto concreto (I, t) que corresponde a una sobrecarga del 30% durante 2 horas. Este parámetro determina el bimetel que corresponde al calibre del relé térmico.

En la práctica, un bimetel es:

□ **de calentamiento directo** para pequeños interruptores automáticos: la corriente circula hacia el polo del interruptor automático

atravesando el propio bimetel; la constante de tiempo del bimetel es en este caso baja y comparable con la de los cables a proteger,

□ **de calentamiento indirecto** para grandes interruptores automáticos: se enrolla directamente alrededor del bimetel un cable aislado a través del que circula la corriente. La distancia (de ahí la expresión de impedancia térmica) introduce un retardo en el calentamiento del bimetel cuya constante de tiempo aumenta. Sin embargo, esta constante de tiempo resulta normalmente mucho menor que la de los cables a proteger.

En los dos casos, la constante de tiempo térmica del bimetel no es ajustable.

■ **magnético**

En caso de cortocircuito, la corriente de defecto que atraviesa la bobina crea un campo magnético suficiente para provocar el desplazamiento de una lámina móvil. Ésta libera el mecanismo de retención de los resortes y abre los contactos con una acción brusca.

El ajuste del umbral se hace en el entrehierro.

A partir del umbral escogido, el tiempo de funcionamiento es sensiblemente constante (de algunos milisegundos a 50 milisegundos) (figura 5).

Los relés magnetotérmicos no miden el valor de la corriente controlada.

Interrupor automático electrónico

■ protección térmica (Largo Retardo)

El relé con tecnología digital utiliza el modelo de calentamiento y enfriamiento de un conductor.

De hecho, **modeliza** la temperatura del conductor calculando su calentamiento en tiempo real siguiendo su ecuación térmica. Una buena aproximación consiste en considerar que el calentamiento y el enfriamiento de un cable entre t y $t + dt$ se hace según los siguientes principios físicos:

□ calentamiento:

resulta del aporte de calorías, especialmente por efecto Joule: $A i^2 dt$, siendo A una constante que depende de la resistencia, de la masa y del calor específico del conductor,

□ enfriamiento:

es el resultado de las pérdidas por conducción, convección y radiación.

Estas pérdidas son prácticamente proporcionales a la diferencia entre la temperatura del conductor y la temperatura ambiente, es decir, un calentamiento θ . O sea, en total, $-\lambda \theta dt$ siendo λ función de las características físicas y geométricas de la instalación del cable.

La ecuación térmica del cable es por tanto:

$$d\theta = A i^2 dt - \lambda \theta dt,$$

o también

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = A i^2 t \quad (1)$$

siendo

$\tau = 1/\lambda =$ constante de tiempo térmica del conductor.

Si se procede por muestreo digital a la frecuencia f tal que $dt = 1/f$, se obtiene una ecuación digital equivalente a (1):

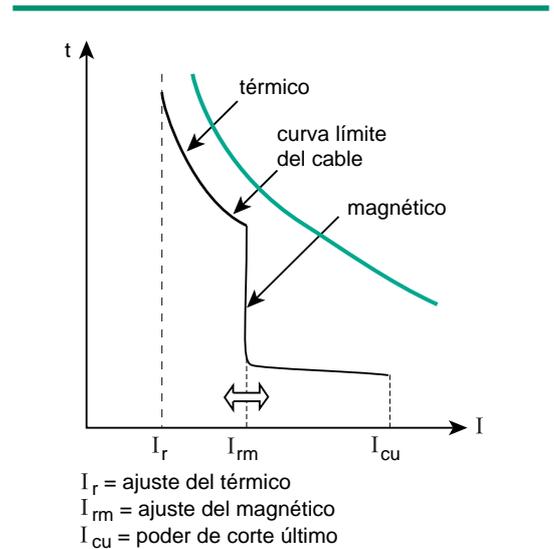


Fig. 5: Curva de disparo de un interruptor automático magnetotérmico.

$$\theta_{t+dt} = [1 - \alpha] \theta_t + \beta i^2 t$$

$$\text{con } d\theta = \theta_{t+dt} - \theta_t,$$

$$\alpha = 1/\tau f \text{ y } \beta = A dt = A/f$$

o sea,

$$\theta_{k+1} = [1 - \alpha] \theta_k + \beta I_k^2 \quad (2)$$

si la medida en el instante t representa la k ésima medida y en el instante $t + dt$, la $(k + 1)$ ésima.

La resolución de esta ecuación digital permite por tanto **la modelización exacta del calentamiento de un conductor**.

Ahora bien, la ecuación (2), que representa la temperatura calculada por muestreo, no es ni más ni menos que la función de transferencia numérica de un filtro paso bajo de 1^{er} orden (figura 6) al que se aplica como señal de entrada I_k^2 , o sea:

$$S_{k+1} = S_k + \gamma [I_k^2 - \gamma S_k] = [1 - \gamma] S_k + \gamma I_k^2$$

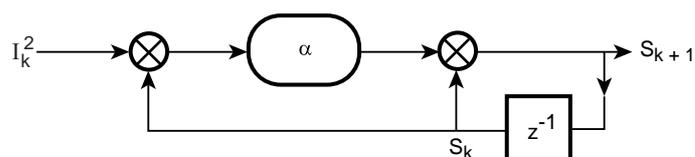


Fig. 6: Algoritmo de filtrado (R) del filtro digital de paso bajo.

S_{k+1} representa el valor eficaz I_{ef} de la corriente después de $k + 1$ muestras.

Por este motivo, la instalación de un filtro de este tipo da simplemente la temperatura del cable por su equivalente en valor eficaz de la corriente.

□ ventajas de la tecnología digital:

- permite calcular, de forma muy simple, I_k^2 ,
- permite calcular el valor eficaz I_{ef} de la corriente, y por tanto de su calentamiento, en un período de tiempo compatible con las constantes de tiempo de los conductores (del orden de varios minutos a varias horas, porque los conductores tienen, según su sección, diferentes inercias térmicas (τ). Esta característica está integrada en el filtro integrador IIR (Infinite Impulse Response) del algoritmo de cálculo; la constante de tiempo se define según el dimensionamiento del interruptor automático porque éste depende de la sección y de la inercia térmica de los cables que ha de proteger,
- el análisis de esta ecuación en tiempo real indica que este cálculo es independiente de la frecuencia de red.

Esta gestión del calentamiento, que permite seguir la evolución de los calentamientos/enfriamientos de los conductores, se llama también «memoria térmica» del relé electrónico.

■ protección térmica: Largo Retardo (LR) y memoria térmica.

El comportamiento térmico de un cable definido por la ecuación (2) corresponde también a la función «largo retardo» del interruptor automático electrónico. Protege los cables y receptores contra las sobrecargas.

El valor de la temperatura θ (o su equivalente: corriente I_{ef} calculada por el filtro digital) se compara con el valor de ajuste del umbral de largo retardo, ligado al límite admisible θ_m (figura 7) realizando así la equivalencia digital de la función de un bimetal.

El conocimiento permanente del equivalente de la temperatura del cable proporciona, mientras no se sobrepase el valor θ_m , posibilidades nuevas en la protección de la carga y del cable, como son:

□ la indicación de la sobrecarga y la gestión de la salida protegida

Esta indicación es posible desde el momento en que se rebasa la corriente de ajuste o ciertos umbrales preajustados, lo que permite el control de la carga de la derivación. El usuario puede también prevenir un disparo por sobrecarga desconectando alguna derivación no preferente. Este tipo de información abre el camino hacia los automatismos de distribución,

□ la memorización de los calentamientos después de un corte de alimentación

Si una sobrecarga provoca el disparo de un interruptor automático o si se produce un corte en la alimentación eléctrica aguas arriba (conmutación de la carga sobre la fuente de emergencia, por ejemplo) se produce como consecuencia un enfriamiento continuo. Pero en este caso, al no estar alimentado el circuito electrónico, la gestión es diferente.

En cuanto se produce el corte, la variación en el tiempo de la temperatura de los conductores sigue la de la tensión de descarga de un circuito con una constante de tiempo muy larga (similar a la constante térmica de los conductores). Al volver la alimentación, por la conexión del interruptor automático o el reenganche de la carga, el circuito electrónico del relé recupera el valor de la tensión residual que se utilizará como nueva temperatura inicial de los conductores en el algoritmo de filtro que modeliza el calentamiento de los conductores.

■ protección contra cortocircuitos (Corto Retardo – CR)

La función corto retardo protege la red contra sobreintensidades elevadas (en general, en distribución, del orden de $10 I_n$, ajustable por el usuario).

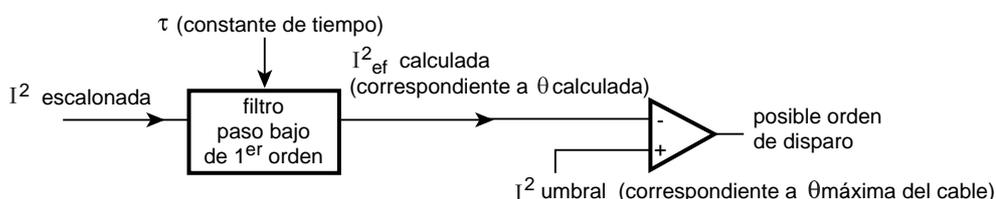


Fig. 7: Realización de la función Largo Retardo LR.

Ésta se efectúa, de la misma manera que la protección de largo retardo, mediante un filtrado, pero el valor eficaz de la corriente es tratado en un periodo de tiempo (algunos milisegundos) compatible con la rapidez de actuación necesaria para esta función. En el tratamiento de la información puede estar integrado también un retardo intencionado ajustable por el usuario (figura 8).

■ protección instantánea

La protección instantánea protege contra cortocircuitos francos.

El tratamiento se hace sobre el valor de pico no filtrado. No tiene temporización.

La protección de largo retardo, de corto retardo e instantánea dan «la» curva de disparo de un interruptor automático con relé electrónico (figura 9).

Una vez estudiado el funcionamiento de estos elementos, conviene examinar ahora cómo se tienen en cuenta las corrientes perturbadas o las aplicaciones especiales de un interruptor automático con relé electrónico.

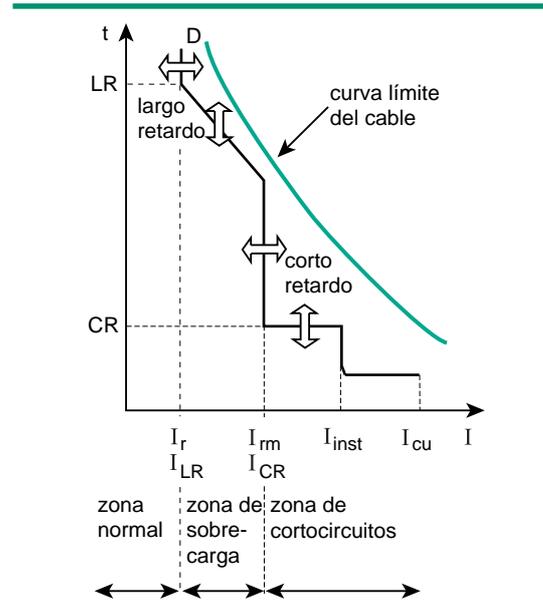


Fig. 9: Curvas de disparo de un interruptor automático electrónico.

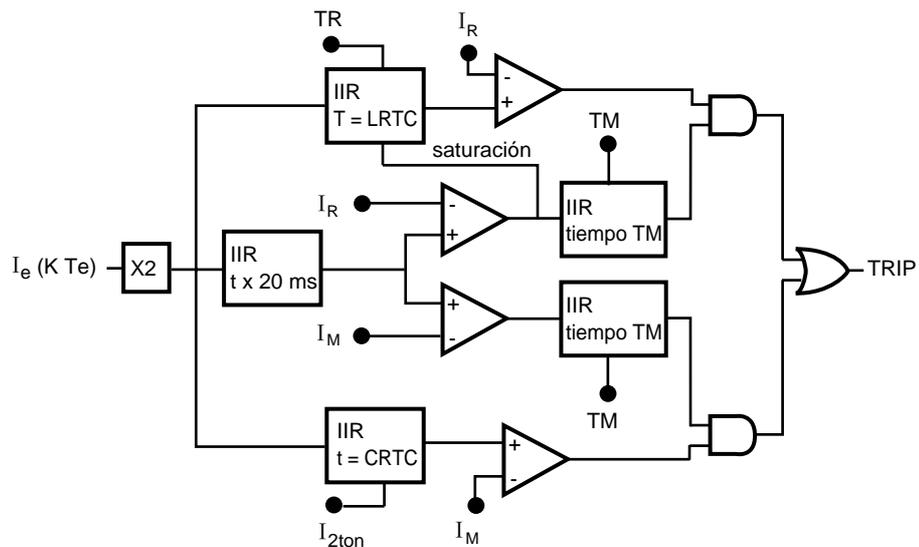


Fig. 8: Estructura del conjunto de filtros largo retardo y corto retardo.

2 Las corrientes armónicas

Debido a la evolución de los receptores (especialmente el uso cada vez más frecuente de convertidores estáticos) las corrientes que se encuentran en las líneas de distribución ya no son senoidales perfectas de 50 Hz... en realidad están muy lejos de serlo.

En cuanto a las medidas, principalmente en funcionamiento normal, estas corrientes tienen una influencia perjudicial para el control de los efectos térmicos; en el caso de corrientes de defecto de más de $10 I_n$, su efecto es prácticamente nulo.

2.1 Repaso teórico de las corrientes armónicas

Armónicos y cargas no lineales

La ley de Ohm expresa una proporcionalidad (linealidad) entre corrientes y tensiones senoidales a frecuencia industrial.

Ciertos receptores (llamados no lineales) tienen la particularidad de deformar la onda senoidal de corriente y en consecuencia la de tensión. Esta deformación se analiza con la ayuda de la descomposición en series de Fourier, que hace aparecer las llamadas corrientes «armónicas» que se superponen a la onda senoidal inicial (la fundamental) y originan su deformación.

Descomposición armónica (de Fourier)

Toda corriente y tensión en una red eléctrica puede representarse por la superposición de una componente continua, de una componente senoidal a la frecuencia industrial y de un cierto número de componentes senoidales (armónicas) que tienen una frecuencia múltiplo de la frecuencia industrial. La expresión de estas magnitudes viene dada por el desarrollo de Fourier de la función corriente o tensión y (t):

$$y(t) = Y_0 + Y_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_1) + \sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

En donde:

Y_0 = amplitud de la componente continua,

Y_1 = valor eficaz de la componente senoidal 50 Hz (o fundamental),

ω = pulsación de la fundamental,

φ_1 = desfasaje de la fundamental,

Y_n (para $n > 1$) = valor eficaz de la componente armónica de rango n ,

$n\omega$ = pulsación del armónico n ,

φ_n = desfasaje del armónico n .

Ley de Ohm

Con receptores no lineales, la ley de Ohm se aplica únicamente entre la corriente y la tensión armónicas del mismo rango « n » con un valor de impedancia calculado para una pulsación igual a n veces la de la fundamental:

$$U_n = Z(n\omega) \cdot I_n$$

Se puede decir que la deformación de la onda de corriente produce la correspondiente deformación de la tensión, para cada rango de armónicos, cuya amplitud y fase dependen del valor de la impedancia para cada frecuencia armónica. Ya no hay una relación simple entre los valores eficaces de estas dos ondas consideradas globalmente.

Corriente eficaz deformada

$$I_{ef} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \text{ que se puede}$$

expresar también mediante las diferentes tasas de armónicos en corriente

$$h_{ni}: I_n/I_1:$$

$$I_{ef} = I_1 \sqrt{1 + h_{2i}^2 + h_{3i}^2 + \dots + h_{ni}^2} = I_1 \sqrt{1 + D_i^2}$$

en la que se ve la tasa de distorsión en corriente D_i .

Factor de cresta de la corriente

Para la fundamental, $I_{1cresta}: \sqrt{2} I_1$, siendo el factor de cresta $\sqrt{2}$.

Para la corriente deformada total,

$$I_{cresta} = K \cdot I_{ef} = K \cdot I_1 \sqrt{1 + D_i^2}$$

Efectos de los armónicos

- efecto del factor de cresta:
 - si las protecciones calculan I_{ef} a partir de la I_{cresta} , hay peligro de disparo intempestivo, si el factor de cresta es superior a $\sqrt{2}$,
 - si el factor de cresta es inferior a $\sqrt{2}$ hay riesgo de sobrecalentamiento debido a que estas mismas protecciones no consiguen disparar;
 - calentamientos
- Para un receptor determinado, que tenga una corriente nominal I_n a 50 Hz, la corriente eficaz en los conductores será mayor porque queda multiplicada por $\sqrt{1+D_i^2}$, de donde:

- pérdidas adicionales y por tanto sobrecalentamientos en los transformadores, en los cables y en los generadores,
- pérdidas magnéticas, calentamientos y pares parásitos en las máquinas giratorias;
- circulación de corrientes elevadas en el neutro en presencia del armónico 3 y múltiplos de 3.

Por este motivo, para la protección de los conductores, los relés térmicos deben tener en cuenta precisamente este valor eficaz.

El lector especialmente interesado en el fenómeno de los armónicos puede leer el Cuaderno Técnico nº 152.

2.2 Generadores de corrientes armónicas

Rectificadores

Los rectificadores del tipo puente de Graëtz trifásicos crean deformaciones armónicas.

Este tipo de rectificador, frecuente en todos los aparatos industriales por su bajo costo, es, sin embargo, perturbador importante de las redes eléctricas. Estos rectificadores se encuentran en muchas unidades industriales, como por ejemplo en los variadores de velocidad, onduladores (SAI), alimentación de equipos informáticos.

También son frecuentes en el sector terciario debido a la gran cantidad de alimentaciones conmutadas para equipos de ofimática y lámparas fluorescentes con reactancia electrónica.

La forma de la corriente de entrada depende mucho de la existencia de una inductancia de alisado. La mayor parte de los rectificadores no la llevan.

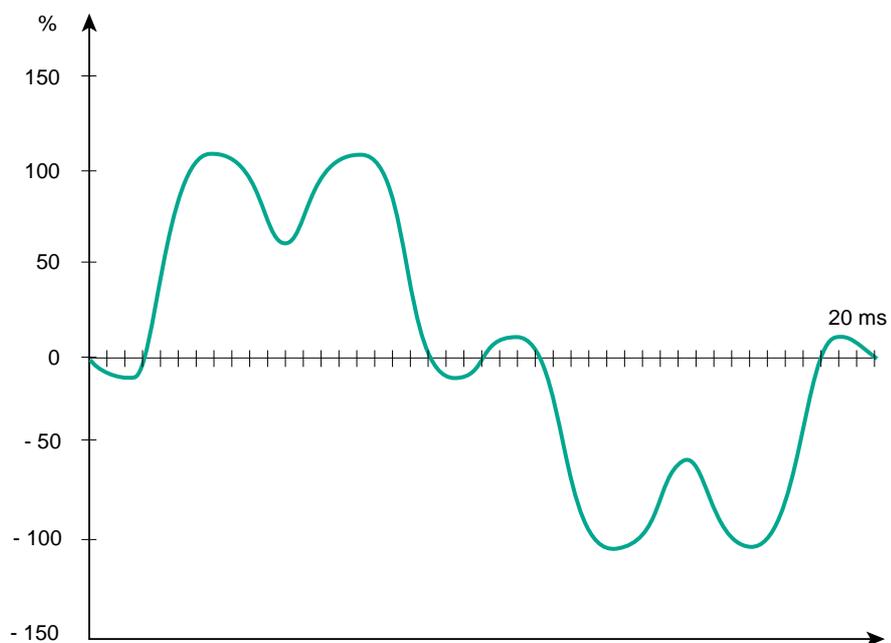


Fig. 10: Ejemplo 1: rectificador.

■ ejemplo 1: (figura 10)

Corriente de entrada de un rectificador trifásico (puente de Graëtz no controlado). La descomposición armónica que corresponde a la corriente de la figura 10 es (en porcentaje de la amplitud de la fundamental y con el desfase respecto a este último):

h_1	(50 Hz)	=	100%
h_5	(250 Hz)	=	33% (180°)
h_7	(350 Hz)	=	2,7%
h_{11}	(550 Hz)	=	7,3% (180°)
h_{13}	(650 Hz)	=	1,6%
h_{17}	(850 Hz)	=	2,6% (180°)

tasa de distorsión global:

$$D = \sqrt{h_3^2 + h_5^2 + h_7^2 + \dots + h_{17}^2} = 6\%$$

$$I_{ef} = 106\% \text{ de } I_{h1}$$

$$I_{m\acute{a}x}/V_2 = 78\%.$$

Esto significa que un relé electrónico basado en una medida eficaz a partir de la corriente de cresta indicaría un valor de 78 en lugar de 106. Por tanto, en el caso de esta figura, se tendría una protección escasa en la instalación.

■ ejemplo 2: (figura 11)

Corriente de entrada de un rectificador trifásico de un variador de velocidad para un motor asíncrono.

La descomposición armónica, que corresponde a la corriente de la figura 11, es (en porcentaje de la amplitud de la fundamental y con el desfase respecto a esta última):

h_1	(50 Hz)	=	100%
h_5	(250 Hz)	=	85% (180°)
h_7	(350 Hz)	=	72%
h_{11}	(550 Hz)	=	41% (180°)
h_{13}	(650 Hz)	=	27%
h_{17}	(750 Hz)	=	8% (180°).

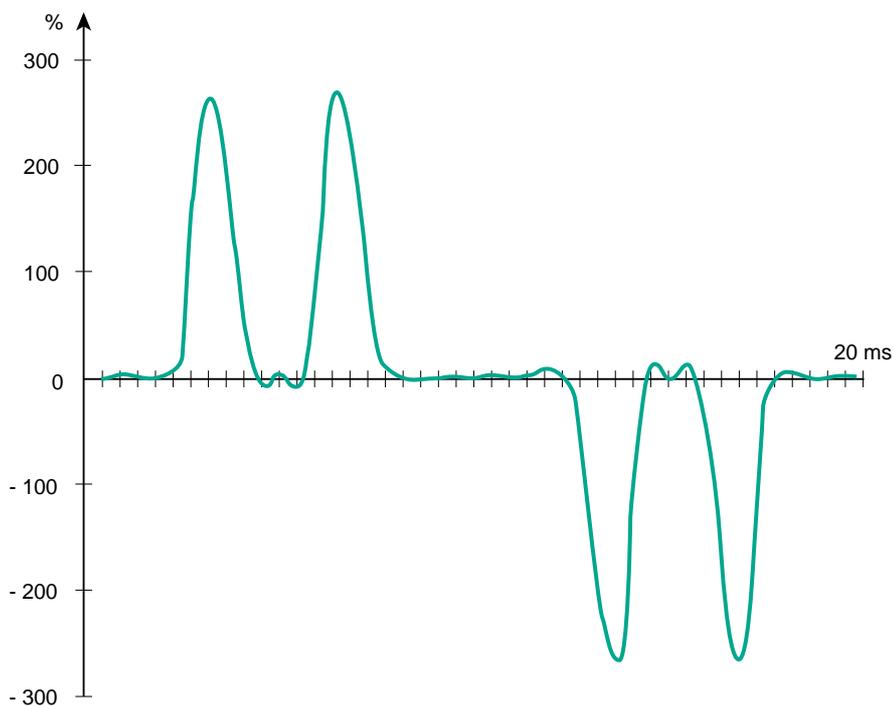


Fig. 11: Ejemplo 2: variador de velocidad de frecuencia variable.

La tasa de distorsión global es aquí:

$$D = \sqrt{h_3^2 + h_5^2 + h_7^2 + \dots + h_{15}^2} = 58\%$$

$$I_{m\acute{a}x}/V_2 = 203\%$$

Esto significa que un relé electrónico basado en una medida eficaz calculada a partir de la corriente de cresta indicaría un valor eficaz de 203 en lugar de 158. Por tanto, en el caso de esta figura, supondría una sobreprotección de la instalación.

Alumbrado fluorescente clásico

En régimen permanente se aprecia la presencia de corrientes armónicas (**figura 12**).

La descomposición armónica para la corriente de fase da:

h_1	(50 Hz)	= 100%
h_3	(150 Hz)	= 35%
h_5	(250 Hz)	= 27% (180°)
h_7	(350 Hz)	= 16,1% (180°)
h_9	(450 Hz)	= 2,2% (180°)
h_{11}	(550 Hz)	= 3,4%
h_{13}	(650 Hz)	= 1,1%
$D = 42,6\%$,		

$$I_{ef} = 199\% \text{ de } I_{h1} = 39 \text{ A.}$$

Obsérvese que, si los receptores monofásicos están uniformemente distribuidos sobre las fases, la corriente eficaz en el neutro, que debería ser nula, es de 33 A debido a las corrientes armónicas de 3^{er} orden y sus múltiplos.

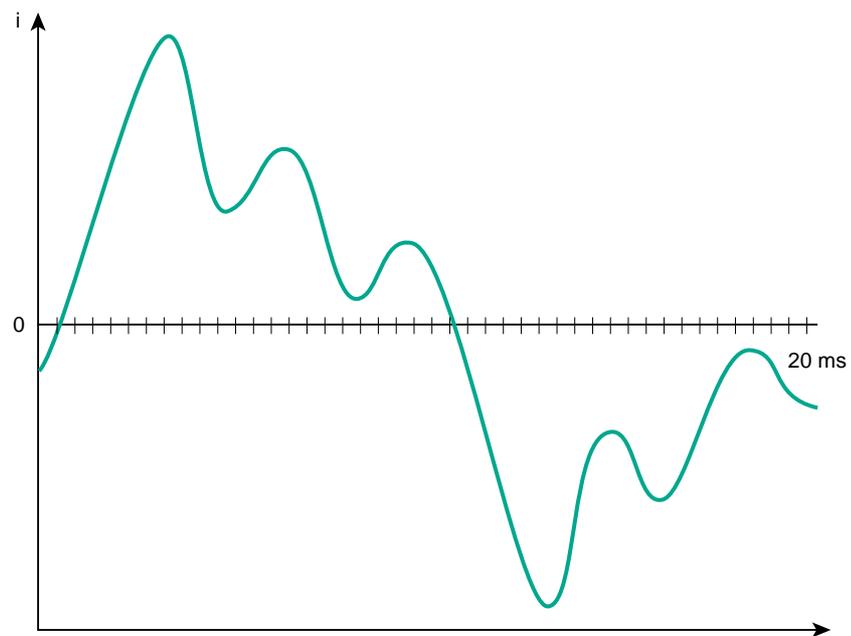


Fig. 12: Iluminación fluorescente.

2.3 Tratamiento de las corrientes armónicas con los relés electrónicos de los interruptores automáticos BT

Los primeros relés electrónicos eran de tecnología analógica. A nivel del circuito de medida, la solución consistía en instalar, detrás de un rectificador de doble onda, un filtro simple RC. Esta técnica respondía muy bien a las necesidades, puesto que las corrientes armónicas eran muy poco frecuentes.

La evolución tecnológica, en especial las soluciones integradas del tipo ASIC, que integran un gran número de componentes, hace posible la realización de un muestreo rápido y muy fino de la señal. De este modo, la utilización de un filtro digital permite calcular de forma simple el valor eficaz y modelizar la ecuación térmica del conductor (apartado 1).

Por tanto, la problemática es definir la frecuencia del muestreo para tener un valor eficaz preciso.

Para calcular el valor eficaz verdadero de una señal de frecuencia fundamental f cargada de armónicos hasta el orden n , el teorema de Shannon dice que hay que muestrear esta señal a la frecuencia $2n.f$. En la práctica, el muestreo aplicado para los relés electrónicos es de 1600 Hz, lo que permite medir corrientes armónicas hasta el orden 16.

Los ejemplos anteriores demuestran que las corrientes armónicas más allá del rango 16 son perfectamente despreciables.

3 Las corrientes transitorias y cíclicas

Para ciertas derivaciones, el principal problema que hay que resolver es discriminar con claridad la corriente normal de conexión de cargas y la corriente de defecto. Las principales cargas que presentan este tipo de problema son, sobre todo, receptores como transformadores BT/BT,

motores, lámparas de tungsteno, fluorescentes... Otro caso importante a resolver es la protección de los cables que alimentan receptores con corriente cíclica. En este capítulo vamos a examinar estos dos casos.

3.1 Ejemplos de corriente de arranque

Transformadores BT/BT

El primario de un transformador es una autoinducción con circuito magnético. Al conectarlo a una tensión, se puede producir un doble fenómeno:

- por una parte el establecimiento de la corriente de carga (régimen transitorio) de un circuito LR (que tendrá las características del primario de un transformador en régimen permanente),
- por otra parte, debido a la presencia de un circuito magnético saturable, puede aparecer un gran pico de corriente en función del instante de la conexión, debido a la saturación del circuito magnético.

Se observa entonces una curva de conexión como la de la **figura 13**, que se convierte en una serie de picos que se amortiguan siguiendo una ley exponencial.

El primer pico de corriente alcanza normalmente de 10 a 15 veces la corriente asignada del transformador y hasta puede alcanzar 20 veces

la corriente nominal para pequeñas potencias (≤ 10 kVA). La corriente de conexión se amortigua muy rápidamente con una constante de tiempo del orden de algunas decenas de milisegundo.

A título de ejemplo: para un transformador BT/BT de 50 kVA, el pico es del orden de $15 I_n$ y la constante de tiempo del fenómeno 20 ms (**figura 13**).

Motores

El 90% de los motores normalmente utilizados son asíncronos. Este tipo de motor absorbe en el arranque una corriente cuya gráfica envuelve a la gráfica de la **figura 14** (con arranque directo). Al pico inicial de excitación (8 a $12 I_n$) le sigue una corriente de arranque (de 5 a $8 I_n$) (**figura 14**).

Alumbrado fluorescente

Al conectarlas a la red, las lámparas fluorescentes absorben también una corriente térmica muy importante.

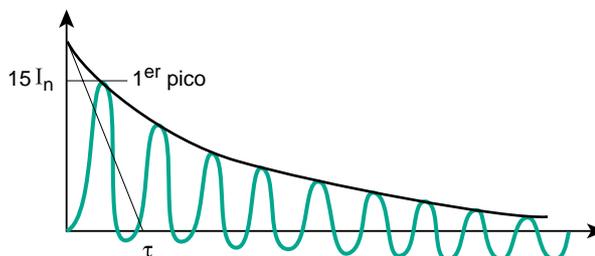


Fig. 13: Conexión de un transformador.

Alimentaciones con fuentes conmutadas

Los receptores informáticos tienen en la entrada una alimentación conmutada que presenta picos de conexión del orden de $10 I_n$ (carga de un condensador a través de un rectificador).

Conviene también destacar que muchos receptores, después de un corte breve de tensión, tienen una corriente de conexión superior a la corriente normal de la primera conexión; un ejemplo clásico es una batería de condensadores, puesto que permanece cargada.

La electrónica digital permite disponer de una protección de corto retardo bien adaptado a la diferenciación entre las corrientes transitorias y las corrientes de cortocircuito (figura 5).

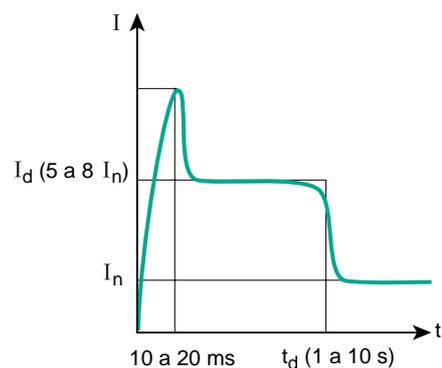


Fig. 14: Conexión de un motor.

3.2 Tratamiento de las corrientes transitorias con los relés electrónicos de los interruptores automáticos BT

Analicemos cómo trata un relé electrónico las corrientes transitorias superiores a su umbral de corto retardo.

Si la corriente sobrepasa el umbral I_m , el relé mediante un filtro IIR calcula en un tiempo muy corto (algunos milisegundos) el valor eficaz de la corriente, lo que «alisa» esta sobrecarga.

Esto constituye un tipo de temporización que depende de la energía de la corriente transitoria,

■ no se suele alcanzar el umbral de disparo si se trata de una corriente transitoria normal que proporciona una potencia importante en un tiempo muy corto y después disminuye rápidamente. El tener en cuenta la energía de pico (y no su valor de cresta) permite dejar pasar este transitorio, aunque tenga varios períodos; por el contrario, un relé magnético hubiera actuado (figura 15).

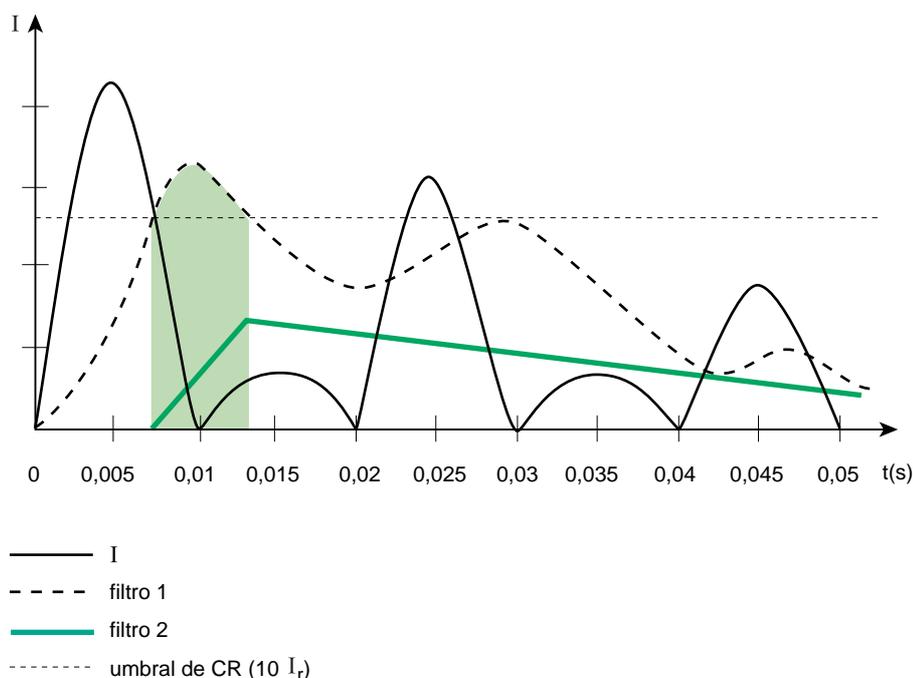


Fig. 15: Curva de impulso resuelta por «alisado» del filtro IIR.

■ si el transitorio se manifiesta como un defecto permanente (figura 16), se alcanza muy rápidamente el incremento de filtro de la función corto retardo, lo que provoca un rápido disparo en cuanto se rebasa el umbral. Esta técnica

permite también supervisar corrientes de defectos especiales, como por ejemplo la corriente que se produce al bloquearse el rotor de un motor.

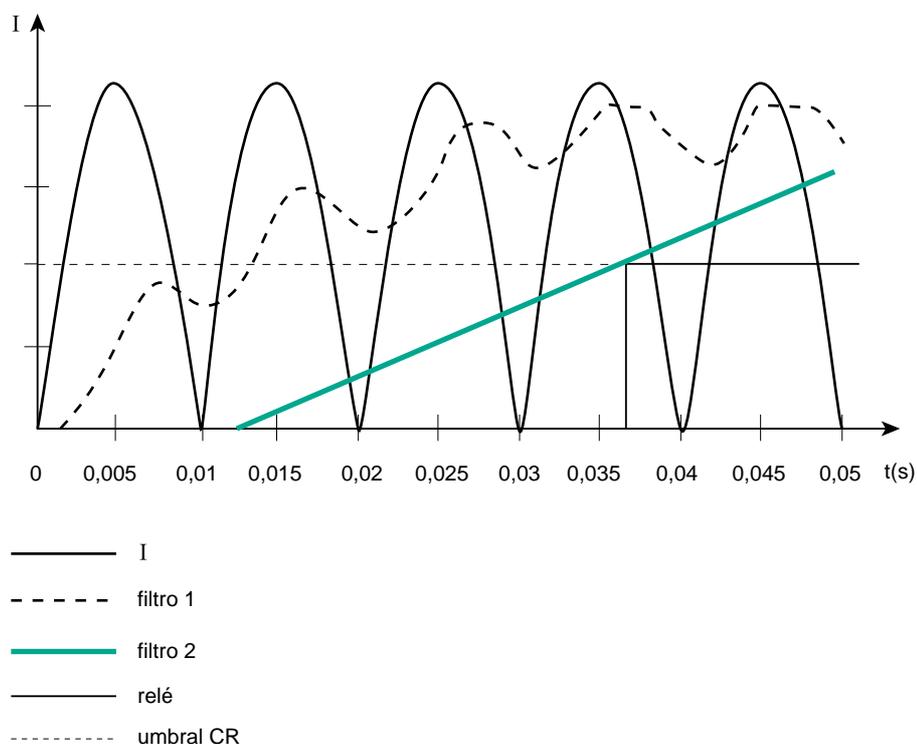


Fig. 16: Defecto persistente.

3.3 Cargas con corrientes cíclicas

El funcionamiento intermitente de un motor, de una carga, produce calentamientos rápidos, sobre todo si las corrientes de conexión son importantes.

Tanto los cables de alimentación como las cargas sufren las mismas sobrecargas de corriente, pero no necesariamente los mismos calentamientos (constantes de tiempo térmicas diferentes). Para ciertos receptores existen protecciones específicas.

El valor de las sobrecargas que un cable puede soportar es función del calentamiento

inicial y del tiempo de enfriamiento que transcurre entre dos sobrecargas sucesivas.

Así, si su ciclo es inferior a su constante de tiempo térmica, un cable puede dimensionarse para la energía que transporta.

Representando el modelo de la ecuación térmica del cable, el calentamiento cíclico del cable puede representarse mediante una curva como la de la figura 17.

Es el caso por ejemplo de los equipos de soldar, de los contactores estáticos para trenes de ondas o de los motores con arranques cíclicos.

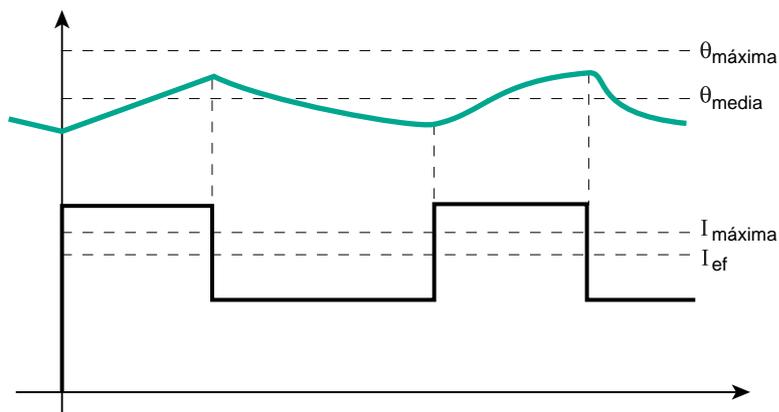


Fig. 17: Calentamiento cíclico de un conductor con carga continua y carga cíclica.

3.4 Tratamiento de corrientes cíclicas con los relés electrónicos de los interruptores automáticos BT

Como ya se ha explicado en la primera parte de este capítulo, los relés electrónicos digitales tienen en cuenta el estado de enfriamiento y efectúan un control muy fino del esfuerzo térmico. Sean las que sean las características de la corriente cíclica I/I_n , su período o la razón del ciclo, si la corriente asignada de la protección (I_r) es correcta, el cable está adecuadamente protegido. Pero, para utilizar al máximo las posibilidades del cable sin disparo del interruptor automático y limitar los esfuerzos en caso de defecto hay que utilizar las amplias posibilidades de ajuste de las protecciones de largo y corto retardo.

A título de ejemplo, la figura 18 aclara los casos extremos siguientes:

- I/I_r elevada, pero de poca duración,
- I/I_r próxima a 1, pero de larga duración.

Aquí, como para las corrientes de arranque, se puede constatar la superioridad de los relés electrónicos, gracias a la existencia de la función corto retardo, pero sobre todo por las mejores prestaciones de su función térmica en comparación con los pares bimetálicos.

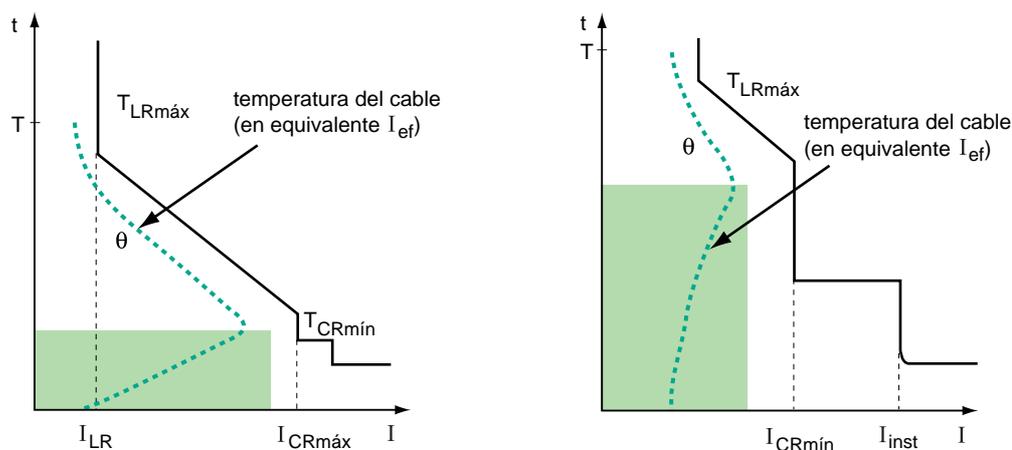


Fig. 18: Ajustes de Largo Retardo y de Corto Retardo para cargas cíclicas: gran intensidad y breve tiempo y baja intensidad y largo tiempo (régimen estable).

4 Los interruptores automáticos electrónicos: amplio margen de posibilidades

4.1 Los ajustes de los interruptores automáticos electrónicos

Frente a las corrientes deformadas y no constantes, los relés electrónicos simplifican el trabajo del diseñador de la instalación y de los usuarios, especialmente por su capacidad de medir las verdaderas corrientes eficaces verdaderas y analizar las sobreintensidades; todo ello gracias a su flexibilidad y amplio margen de sus ajustes.

Corrientes armónicas

En los relés electrónicos, no es necesario ningún ajuste especial para compensar los efectos de las corrientes armónicas, puesto que estos relés analizan exactamente estas corrientes.

La posibilidad de conocer el valor eficaz de la corriente en tiempo real, gracias a la circuitería electrónica de medida, permite afinar con precisión el ajuste de I_r . Además, la tecnología digital permite transmitir fácilmente esta información al amperímetro, local o distante, o a un bargraph.

Corrientes transitorias

La posibilidad que ofrece la electrónica de distinguir las corrientes transitorias de las corrientes de defecto permite proteger mejor los cables evitando los disparos intempestivos.

Corrientes cíclicas

El ajuste de la corriente I_r para el dimensionamiento exacto de los conductores, es perfectamente compatible con el funcionamiento que presentan las sobrecargas normales, actuando sobre los reglajes de las protecciones de corto y largo retardo.

Curvas de disparo

Una de las ventajas de los interruptores automáticos electrónicos es proporcionar una protección «universal». Gracias a la flexibilidad y extensión de los ajustes, es posible medir con un mismo relé el conjunto de datos necesarios para el usuario.

En efecto, la electrónica permite ajustes en un margen muy amplio, tanto en valor como en temporización.

Estos relés, además de la posibilidad de responder adecuadamente a la problemática de las corrientes de arranque y cíclicas, tienen ciertamente ventajas para la instalación de la selectividad cromométrica.

Así, con un mismo aparato, existe la posibilidad de proteger un transformador, un cable o un alternador (a título de ejemplo ver la **figura 19**).

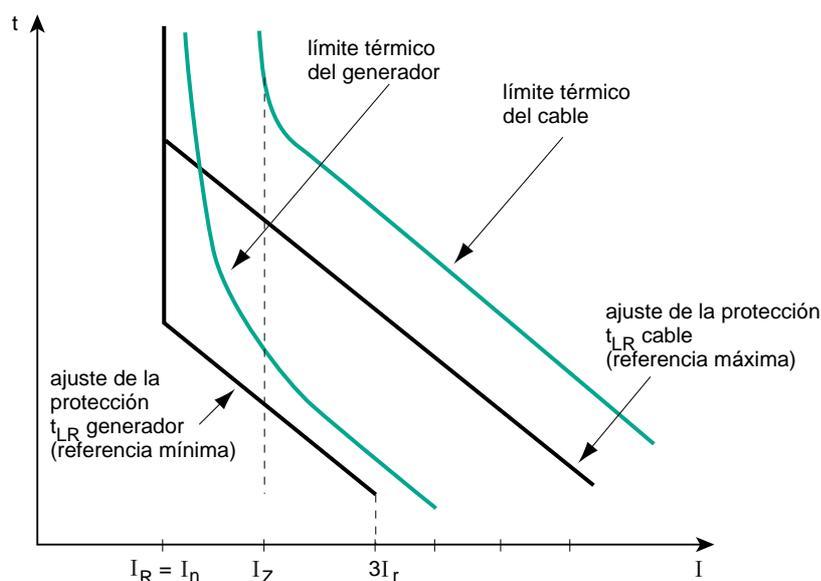


Fig. 19: Curvas de disparo LR de un interruptor automático electrónico que protege un cable o un generador.

4.2 Las ventajas de la tecnología digital en la seguridad de funcionamiento de la explotación

La tecnología digital, al utilizar ampliamente la integración ASIC, permite realizar múltiples funciones de medida, protección, mando y control y comunicación.

Esta tecnología ofrece cada vez más fiabilidad e inmunidad (compatibilidad electromagnética), mayor que la conseguida con las tecnologías discretas.

Funciones múltiples

Además de las funciones de protección de los conductores activos contra las sobrecargas y los cortocircuitos hay otras funciones integradas o que se pueden integrar, a título de ejemplo:

- protección contra defectos a tierra (Ground Fault Protection -GFP-), función que se exige sobre todo en las instalaciones USA,

- control de la carga por el cálculo de I_{ef}/I_{LR} que proporciona al usuario una indicación del nivel de carga de cada derivación en cuestión,
- corriente de cortocircuito cortada,
- número de manobras (útil para gestionar el mantenimiento).

Fiabilidad

El interruptor automático debe ser un aparato con un nivel de fiabilidad muy alto. Por este motivo, la electrónica integrada tiene una función de autosupervisión que señala cualquier disfuncionamiento eventual del microprocesador o cualquier elevación anormal de la temperatura. Además debe cumplir los ensayos definidos en las normas CEI 801 y CEI 1000 que determinan la resistencia CEM de estos aparatos, en especial, la inmunidad frente a los campos magnéticos.

4.3 La comunicación mediante BUS

La tecnología digital y la posición del interruptor automático en la instalación eléctrica permiten disponer fácilmente en un bus del conjunto de parámetros necesarios para una buena explotación de la red. La electrónica digital integrada permite comunicarse con sistemas de gestión y de supervisión de la instalación eléctrica. Los datos transmitidos corresponden a las informaciones sobre el interruptor automático:

- posición de los conmutadores de ajuste,
- intensidades de las corrientes de fase y de neutro,
- sobrepasar el umbral «control de carga»,
- alarma de sobrecarga,
- causa de disparo.

La utilización de estas informaciones para establecer los datos históricos permite al usuario o gestor mantener mejor la instalación.

4.4 Las normas de los interruptores automáticos BT

Los interruptores automáticos de tipo industrial responden a la norma CEI 947-2.

El peso cada vez más importante de los problemas del entorno, en especial la Compatibilidad Electromagnética (CEM), ha

llevado a los estamentos de normalización a integrar en la norma de los interruptores automáticos las recomendaciones relativas a estos fenómenos (**figura 20**).

ensayo	perturbaciones	ensayos realizados
F.4.1	corrientes no senoidales	3 ensayos con factor de cresta ≈ 2 $H_3 \approx 80\%$; $H_5 \approx 50$ y $H_3 \geq 60\% + H_5 \geq 14\% + H_7 \geq 7\%$
F.4.2	bajadas de tensión e interrupciones	reducción de la corriente del 30%, 60%, 100% durante 0,5 a 50 períodos
F.4.3	variaciones de frecuencia	gama de frecuencias del interruptor automático. Paso: 1 Hz
F.5	transitorios conducidos y perturbaciones AF:	
F.5.2.2.1	CEI 1000-4-4: transitorios rápidos	onda de 5/50 ns (Fr: 2,5 kHz) valor 4 kV,
F.5.2.2.2	CEI 1000-4-5: ondas de choque	onda de 1,2/50 μ s - 6 kV; y 8/20 μ s - 3 kA
F.6	perturbaciones electrostáticas CEI 1000-4-2	descargas por contacto 8 kV
F.7	perturbaciones por campos electromagnéticos CEI 1000-4-3	de 26 a 1000 MHz 10 V/m modulación de amplitud 80% 1 MHz

Fig. 20: Cuadro de ensayos CEM que sigue al anexo F de la norma CEI 947-2.

4.5 Interruptores automáticos electrónicos: oferta de nuevas posibilidades

La garantía aportada por la norma

El respeto de la norma CEI 947-2, en especial al anexo F, y un diseño adaptado son la garantía de fiabilidad para un interruptor automático electrónico. Además, los test exigidos por la

CEI 947-2 garantizan al diseñador de la instalación y al usuario **una perfecta aptitud para la función** de protección (para más detalles Cuaderno Técnico nº 150).

5 Conclusión

Los interruptores automáticos BT \geq de 250 A, con relé electrónico, están perfectamente adaptados a las diversas exigencias que se encuentran en las instalaciones.

La potencia de cálculo actual de ASIC permite numerosos avances:

- a pesar del aumento de las corrientes armónicas, la protección de largo retardo tiene en cuenta el verdadero valor eficaz,
- la memoria térmica, con mayores cualidades que los bimetales de calentamiento indirecto, permite seguir mejor la evolución de la temperatura de los cables, especialmente en el caso de cargas con funcionamiento cíclico,
- los ajustes de la protección de corto retardo permiten gestionar mejor que los relés magnéticos las corrientes de conexión,

- la amplia posibilidad de ajuste de los diversos reglajes permite adaptarse a las diversas secciones de los cables y a los generadores.

Además de estas funciones de protección, la electrónica digital permite al interruptor automático conectarse mediante un bus para transmitir las medidas, los estados... y acceder al teleajuste y hasta al telemando. Así los interruptores automáticos modernos se han convertido en captadores-accionadores inteligentes que en el cuadro de la Gestión Técnica de la Distribución Eléctrica contribuyen en gran manera a facilitar la explotación de las redes y a mejorar la continuidad del servicio.

La única objeción es el coste de la electrónica, que todavía es muy cara para utilizarse en los interruptores automáticos de calibre inferior a 250 A.

6 Bibliografía

Normas

- CEI 947-2 : Aparata de BT - 2ª parte: interruptores automáticos.
- CEI 364/NF C 15-100: Instalación eléctrica en edificios.
- CEI 801: Compatibilidad electromagnética para equipos de medida y de mando en procesos industriales.
- CEI 1000: Compatibilidad electromagnética (CEM).
- CEI 50: Índice general del vocabulario electrotécnico.

Cuadernos Técnicos Merlin Gerin

- Perturbaciones eléctricas en BT. Cuaderno Técnico nº 141 - R. CALVAS.
- Evolución de los interruptores automáticos BT según la norma CEI 947-2. Cuaderno Técnico nº 150 - E. BLANC.
- Técnicas de corte de los interruptores automáticos. Cuaderno Técnico nº 154 - R. MOREL.

- Corte en BT por limitación de la corriente. Cuaderno Técnico nº 163 - P. SCHUELLER.
- La selectividad energética en BT. Cuaderno Técnico nº 167 - R. MOREL, M. SERPINET.

Otras publicaciones Merlin Gerin

- Guide de l'installation électrique 07/91.
- Les filtres IIR et FIR - E. SUPITZ.
- La distribution électrique de qualité - D. FRAISSE.
- L'électronique dans les disjoncteurs BT - D. FRAISSE.

Otras publicaciones externas

- Guide de l'ingénierie électrique.
- J3E nº 619.
- Le contact électrique - M. RIVAL.