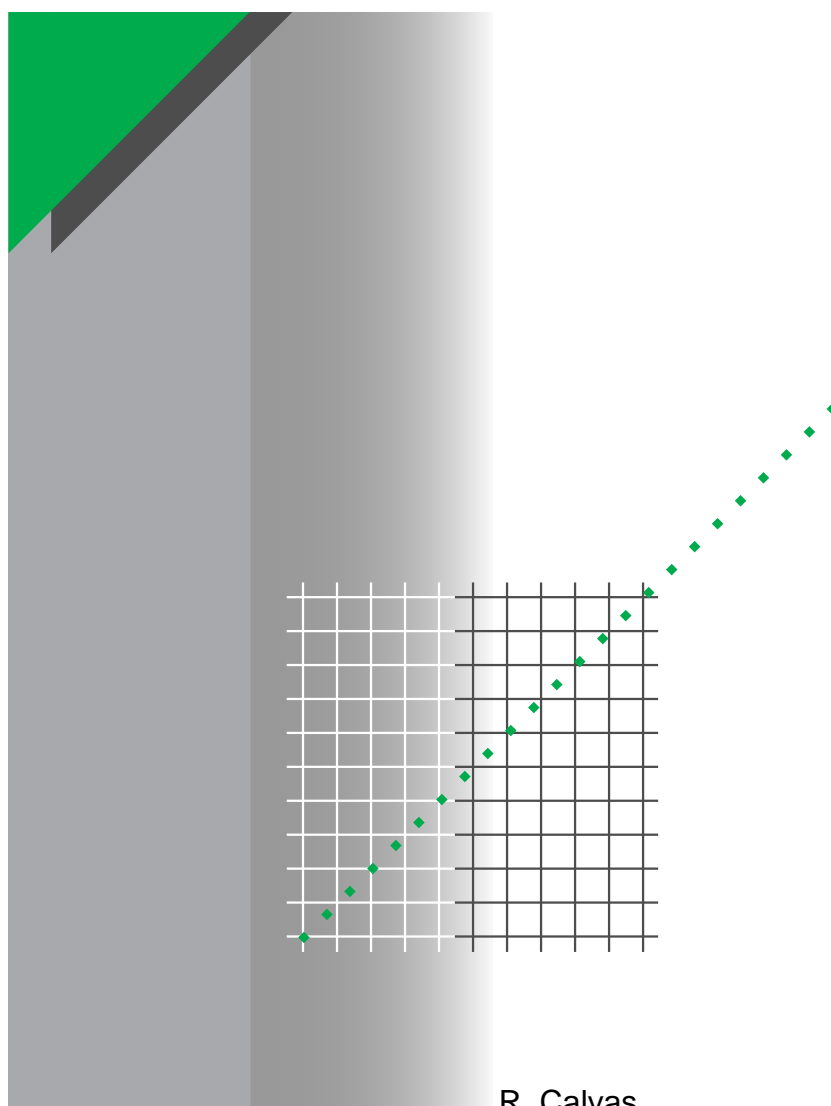


Cuaderno Técnico nº 141

Las perturbaciones eléctricas en BT



R. Calvas



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 141 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 141

Las perturbaciones eléctricas en BT



Roland CALVAS

Ingeniero ENSERG 1964 (Ecole Nationale d'Electronique et Radioelectricité de Grenoble) y diplomado del Institut d'Administration des Entreprises, entró en Merlin Gerin en 1966.

Durante su extensa vida profesional ha sido responsable del área de Comercial y después de Marketing de la sección de protección de personas contra riesgos eléctricos.

Trad.: Dr. Cortés, J.M. Giró

Original francés: enero 1999

Versión española: enero 2001

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

Terminología

Corte: Ausencia más o menos larga de tensión.

Bajada de tensión: Bajada de tensión de más de un 10%, seguida de un retorno a un valor comprendido dentro del margen de la variación normal.

Esquema de conexión a tierra (ECT): Llamado todavía a veces «régimen de neutro». La norma CEI 60364 determina los tres principales sistemas de conexión a tierra que definen las conexiones posibles del neutro, de la fuente y de las masas a tierra o a neutro. Precisamente las protecciones eléctricas necesarias en una red se definen en función del ECT instalado.

PWM: (Pulse Width Modulation): Modulación de ancho de impulso.

Perturbación eléctrica: Todo fenómeno perturbador que hace variar los valores nominales de la onda de tensión (o de corriente) de la red.

Perturbación electromagnética: Todo fenómeno perturbador de naturaleza eléctrica,

magnética o electrostática que puede afectar a la red y/o el funcionamiento de los aparatos eléctricos o electrónicos.

r.m.s.: (root mean square): en castellano, «valor eficaz».

Régimen de neutro: Ver «esquema de conexión a tierra».

Sobretensión: Incremento más o menos importante de $U_n + 10\%$.

Sobretensión breve: Onda de tensión transitoria caracterizada por una subida rápida seguida a continuación de una bajada más lenta, generalmente de carácter periódico.

Sobretensión muy corta: Onda de tensión transitoria caracterizada por una subida rápida seguida a continuación por una bajada más lenta, generalmente periódica.

Tensión de tipo impulso: Impulso de duración inferior a 10 ms superpuesto a la tensión senoidal.

Las perturbaciones eléctricas en BT

Las redes BT están muy perturbadas y sometidas a múltiples agresiones. Los materiales electrotécnicos, pero sobre todo los aparatos electrónicos, que son cada vez más abundantes y tratan señales cada vez más débiles, deben resistir a un entorno electromagnético severo. Y a la vez las exigencias de disponibilidad tanto en la producción como en la gestión y el comercio son cada vez más importantes.

Para mejorar la calidad de «el producto eléctrico» y evitar los fallos de funcionamiento y hasta la destrucción de componentes de las redes eléctricas y/o de los componentes sensibles, es imprescindible comprender el origen de las perturbaciones y valorar sus riesgos. Este es precisamente el objeto de este Cuaderno Técnico. Es una introducción al amplio campo de la compatibilidad y de la inmunidad electromagnética desde los 50 Hz hasta las frecuencias radioeléctricas.

En esta obra el autor trata todos los parámetros y las principales «anomalías» que permiten caracterizar una alimentación eléctrica:

- amplitud: variaciones - cortes - bajadas - sobretensiones,
- frecuencia: variaciones,
- forma de onda: corrientes armónicas - transitorias - portadoras,
- fase: desequilibrio,
- potencia: cortocircuitos - sobrecargas (efectos en la tensión).

1 Las tensiones industriales BT	1.1 Las tensiones nominales	p. 6
	1.2 La frecuencia	p. 6
2 Las perturbaciones de amplitud	2.1 Las bajadas de tensión y los cortes breves	p. 7
	2.2 Las sobretensiones	p. 11
3 Las perturbaciones de la onda senoidal	3.1 Los generadores	p. 19
	3.2 Los transformadores	p. 19
	3.3 Los receptores	p. 19
	3.4 Las alimentaciones conmutadas (switching)	p. 20
	3.5 Los hornos industriales	p. 20
	3.6 Las corrientes portadoras	p. 20
	3.7 Los efectos de las perturbaciones	p. 21
4 Perturbaciones particulares de los sistemas polifásicos	4.1 Los desequilibrios de corriente y de tensión	p. 22
	4.2 Los desequilibrios de fases	p. 23
5 Perturbaciones electromagnéticas	5.1 Campos y radiaciones	p. 24
	5.2 Descargas electrostáticas	p. 26
6 Conclusión		p. 27
Anexo 1: Transmisión de sobretensiones a través de los transformadores		p. 28
Anexo 2: La ferorresonancia		p. 29
Anexo 3: Bibliografía		p. 30

1 Las tensiones industriales BT

Todas las redes sufren u originan perturbaciones. Ahora bien, los receptores, y también los aparatos de mando y control y de protección son sensibles a la calidad de la tensión que se les aplica. Por tanto es muy importante conocer y tener en cuenta las exigencias de la alimentación con energía eléctrica:

- los fabricantes de equipos electrotécnicos y electrónicos destinados al mercado mundial deben de tener en cuenta las tolerancias que varían según el país,

- las oficinas técnicas y los instaladores también deben de tener en cuenta estos fenómenos en el diseño de las redes y según las necesidades de sus clientes encontrar las soluciones técnicas tanto en los esquemas de distribución como en la aparcamentación.

Recordemos que las instalaciones BT están regidas por la norma CEI 60364.

1.1 Las tensiones nominales

El campo de la BT abarca las tensiones:

- alternas: $\leq 1\,000\text{ V}$ (frecuencia $\leq 10\text{ kHz}$),
- continuas: $\leq 1\,500\text{ V}$.

Llamadas también «tensiones asignadas». Estas tensiones están definidas en la publicación CEI 60038 de 1983. La más utilizada de las tensiones BT es la de «230/400 V», oficializada en Francia desde 29-5-86.

En el mundo, hasta el año 2003, se podrán encontrar todavía diversas tensiones nominales:

- europeas: 220/380 V, 50 Hz,
- inglesas: 240/415 V, 50 Hz,
- USA: 120/240 y 480 V, 60 Hz,
- Japón: 100/200 V, 50 y 60 Hz.

Pero estas tensiones varían alrededor del valor nominal en función de la estructura y de la carga en la red (longitud de los conductores y variación de carga) y de los sistemas de regulación de la red pública (o privada).

En Europa, la norma EN 50160 indica que en explotación normal para cada período de una semana el 95% de los valores eficaces medios en 10 minutos deben situarse en el margen $Un \pm 10\%$.

Además estas variaciones deben asociarse a la noción de duración, por ejemplo:

- permanente: $Un \pm 10\%$,
- cinco minutos: $Un \pm 20\%$.

En los países en vías de desarrollo se pueden encontrar frecuentemente variaciones del $\pm 20\%$.

1.2 La frecuencia

En cuanto a la frecuencia, las variaciones lentas alrededor del valor nominal 50 ó 60 Hz son generalmente estrechas. En los países europeos cuyas redes están interconectadas, la norma EN 50160 precisa $50\text{ Hz} \pm 1\%$ durante el 95% de una

semana y $[+4\%, -6\%]$ en caso de perturbaciones más importantes. Estas variaciones pueden ser mucho más importantes en redes autónomas, por ejemplo, en una «isla».

2 Las perturbaciones de amplitud

En explotación normal, las redes sufren perturbaciones debidas a las variaciones de carga, pero, también y sobre todo, a los fenómenos aleatorios cuyo origen es accidental, como por ejemplo, los cortocircuitos.

La red BT está sometida a estas dos causas de perturbaciones que pueden producirse en cualquier nivel de la red (BT, MT o AT).

Las dos principales perturbaciones de amplitud son:

- las bajadas de tensión y los cortes breves,
- las sobretensiones.

2.1 Las bajadas de tensión y los cortes breves

La bajada de tensión se define generalmente como un descenso entre el 10% y hasta casi el 100% del valor nominal de la tensión durante un tiempo comprendido entre 10 ms y algunos segundos (**figura 1**). Cuando no hay tensión (bajada de la tensión del 100%) durante 1 segundo a 1 minuto se habla de «corte breve» de tensión, y entre 10 ms y 1 s de «corte muy breve». Cuando la duración del corte es ≤ 10 ms, el corte suele deberse a «fenómenos transitorios» o voluntarios, por ejemplo, a la utilización de arrancadores electrónicos.

Perturbaciones originadas en la explotación de las redes AT y MT

■ Las variaciones voluntarias de la geometría de la red provocan cortes breves que pueden llegar a varios segundos. Pero las redes de distribución malladas son menos sensibles a este fenómeno.

■ La conexión de grandes transformadores provoca bajadas de tensión evolutivas debido a las corrientes de conexión. La tabla de la **figura 2** da a título de ejemplo, los valores de la corriente de conexión de transformadores MT/BT.

Igual sucede en la conexión de condensadores MT y grandes motores: para los condensadores la corriente de conexión puede llegar a 100 veces su corriente nominal (según la CEI 831-1) y hasta 8 I_n durante varias decenas de segundos para los motores.

■ Perturbaciones debidas a defectos en las redes AT y MT (cortocircuito y defecto de aislamiento).

Fenómenos tales como: defecto de aislamiento del material, caída del rayo, rotura de un cable subterráneo, derivación a tierra de un cable aéreo provocan cortocircuitos que generan

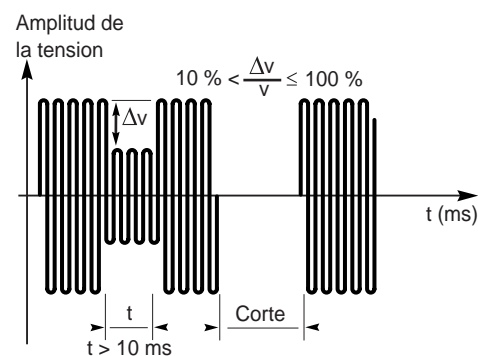


Fig. 1: Bajada de tensión (Δv) y corte de tensión.

P (kVA)	ne $ne = \frac{I_{\text{cresta conexión}}}{I_{n\text{transformador}}}$	Constante de tiempo (s)
50	15	0,1
100	14	0,15
160	12	0,2
250	12	0,22
400	12	0,25
630	11	0,3
800	10	0,3
1000	10	0,35
1250	9	0,35
1600	9	0,4
2000	8	0,45

Fig. 2: Valores de las corrientes de conexión y constante de tiempo de los transformadores MT/BT inmediatamente después de una conexión, lado MT (después de una conexión lado BT, «ne» es 2 veces mayor).

caídas de tensión importantes en una zona próxima más o menos extensa alrededor del origen del defecto; y esto antes de que los elementos de protección desconecten el elemento defectuoso. Paralelamente, los usuarios directamente afectados por el elemento averiado quedan definitiva o temporalmente privados de alimentación. Estos fenómenos afectan a todos los niveles de tensión, pero particularmente a las redes de MT (20 kV). Para cada defecto el número y el tipo de bajadas de tensión y cortes breves depende de las protecciones y de los automatismos de reenganche utilizados. En Francia:

■ sobre las redes de MAT (400 y 225 kV) hay diversos sistemas de reenganche:

- reenganches monofásicos lentos que funcionan en caso de defecto monofásico: la duración del corte es del orden de 1,5 a 2 s,
- reenganches trifásicos lentos (defectos polifásicos) cuyo funcionamiento está sujeto al control de la sincronización de las tensiones: la duración del corte es del orden de 5 s.

Estos reenganches se utilizan también en AT (90 y 63 kV),

■ en las redes MT aéreas (5 a 20 kV), en las cuales el neutro está conectado a tierra por medio de una impedancia que limita la corriente de defecto homopolar a 300 A, se encuentran a nivel de los centros de transformación fuente, «interruptores automáticos shunt» que permiten la eliminación de defectos monofásicos pasajeros (provocados por ramas), sin efecto para los usuarios BT (figura 3).

Por el contrario, los defectos polifásicos son eliminados por relés rápidos y lentos que provocan bajadas de tensión en la BT (figura 4).

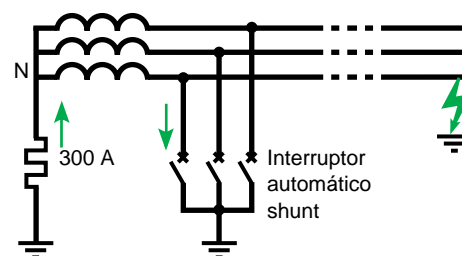
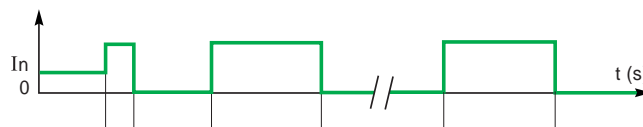
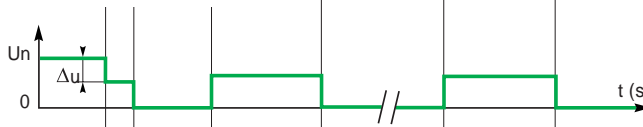


Fig. 3: Eliminación de un defecto monofásico mediante un interruptor automático shunt que al cortocircuitar el defecto permite la extinción del arco.

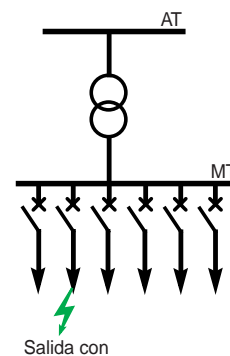
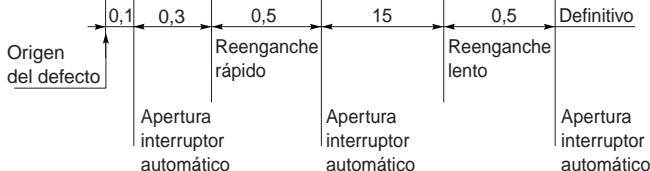
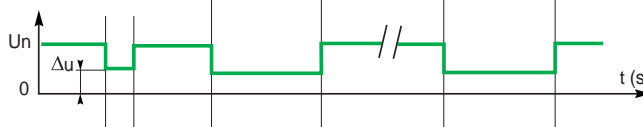
a) corriente solicitada por la salida con defecto



b) tensión en la salida con defecto



c) tensión en las otras salidas



Principio: En una red MT aérea, la mayor parte de los defectos son transitorios, por lo que el interruptor automático en cabecera de cada salida está equipado con un automatismo que hace dos intentos de reenganche (a veces, tres):

- el primero inmediatamente (tiempo de apertura + cierre = 0,3 s),
- el segundo después de unos 15 s.

Fig. 4: Variaciones de tensión durante los reenganches rápidos y lentos en una red de distribución MT.

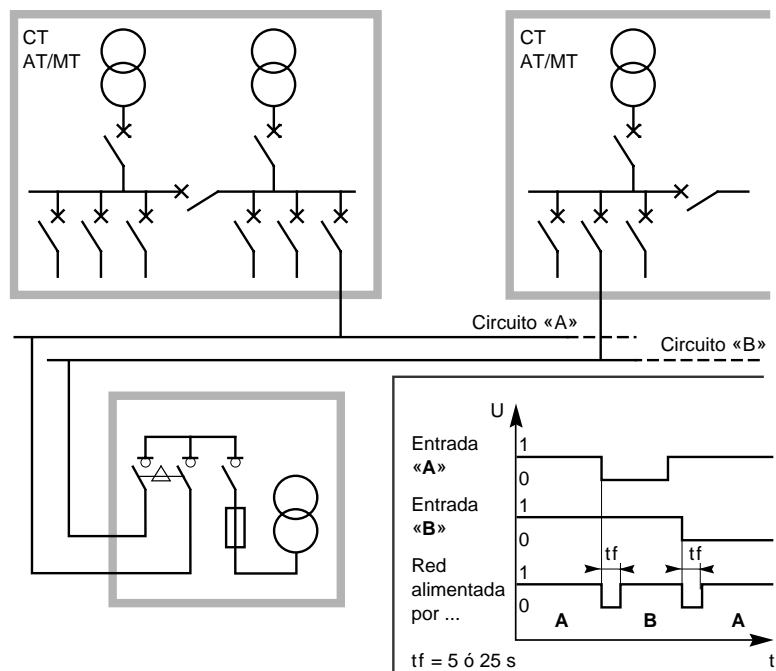


Fig. 5: Alimentación MT de doble derivación.

En el cuadro inferior derecho, secuencia del automatismo de un conmutador Merlin Gerin conforme a las especificaciones EDF (Francia).

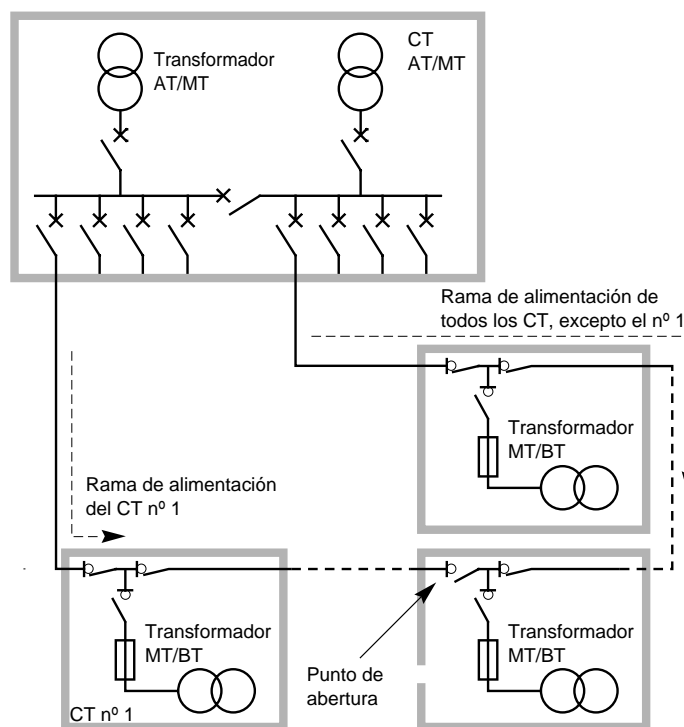


Fig. 6: Alimentación MT de bucle abierto (corte de arteria).

El 75% aproximadamente de los defectos son eliminados después del reenganche rápido, que corresponde al clásico corte breve de 300 ms,

■ en las redes MT subterráneas (5 a 20 kV). En ellas no existen a priori defectos pasajeros, por lo que todo defecto implica la desconexión «definitiva» del sector de la red afectada. Por esta circunstancia, las redes subterráneas (urbanas) se organizan o en «doble derivación» (figura 5) o, lo que es más frecuente, en anillo abierto (figura 6).

Los automatismos utilizados permiten realimentar a los centros de transformación MT/BT que no tienen el defecto en menos de un minuto.

Perturbaciones originadas en la explotación de las redes BT

Las bajadas de tensión que se observan en una red BT y que se deben a su explotación, están provocadas por:

- la conexión de condensadores (eventualmente colocados al principio de la red) que provoca, como en MT, una bajada de tensión muy breve, incluso un fenómeno transitorio de tipo oscilatorio,
- un arranque normal de grandes motores, alimentados directamente por el Cuadro General Baja Tensión, que provoca una bajada de tensión o un «arranque en marcha» (realimentación después de un corte breve) que provoca un pico de corriente casi siempre importante (hasta dos veces el 8 ó 10 I_n de un arranque directo).

Perturbaciones debidas a defectos de las redes BT

Los cortocircuitos en la red principal de distribución BT entre dos conductores activos o entre un conductor activo y una masa en el esquema de conexión a tierra TN (Cuaderno Técnico nº 172) son también la causa de bajadas y cortes de la tensión.

Estos cortocircuitos, eliminados mediante los interruptores automáticos, selectivos o no, provocan una bajada de tensión tanto más «profunda» cuanto más importante es la salida implicada respecto a la potencia de la fuente, y que puede durar de 50 a 500 ms. La forma de algunas bajadas y cortes de tensión viene dada en la figura 7.

Téngase presente que las redes BT alimentadas con grupos electrógenos giratorios y dispositivos de conmutación de fuentes (normal/emergencia) pueden permanecer sin alimentación durante varios segundos (Cuaderno Técnico nº 161):

Tiempo de interrupción = $T_1 + T_d + T$, siendo:

T_1 = tiempo de la orden de arranque del grupo electrógeno (0,4 a 10 s),

T_d = tiempo de arranque del grupo (algunos segundos),

T = tiempo de conmutación (< 0,4 s).

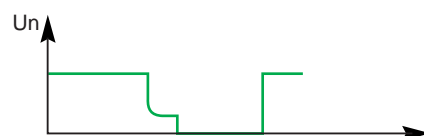
■ Conmutación voluntaria de fuentes.

Duración: de algunos milisegundos a varios minutos.



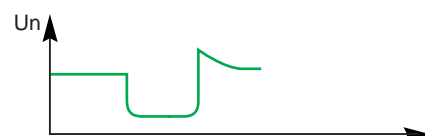
■ Conmutación automática de fuentes a continuación de un corte de suministro de red.

Duración: algunos milisegundos hasta 10 s.



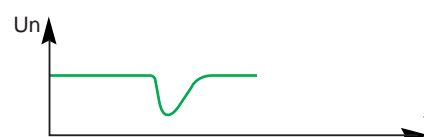
■ Cortocircuito externo.

Duración: de 10 ms a más de 100 ms.



■ Conexión de una unidad de gran potencia.

Duración: depende de la potencia de la red.



■ Paradas breves de grandes motores con reconexión inmediata «al vuelo», sin llegar a pararse.

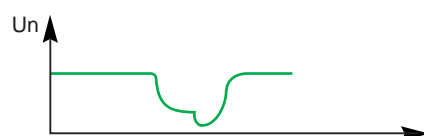


Fig. 7: Principales tipos de bajadas y cortes de tensión.

	Tipo de conmutación			
	Síncrona	Con tiempo muerto		Pseudosíncrona
		BT	MT	
Ejemplos de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> ■ cambio de juego de barras ■ sustitución de un generador por otro ■ conmutación entre SAI y red 	<ul style="list-style-type: none"> ■ alimentación de bombas ■ alimentación de circuitos auxiliares de un CT ■ alimentación de almacenes de grandes superficies 	<ul style="list-style-type: none"> ■ alimentación de 2 entradas MT intercambiables ■ alimentación de una fuente normal y una de sustitución 	<ul style="list-style-type: none"> ■ rearmado «al vuelo» de motores asíncronos
Duración de la conmutación	nula	0,5 a 10 s	1 a 30 s	0,06 a 0,3 s
Dispositivos utilizados	<ul style="list-style-type: none"> ■ acoplador ■ sincroacoplador ■ conjunto SAI con un contactor estático 	<ul style="list-style-type: none"> ■ inversor de fuentes automáticas con interruptores 	<ul style="list-style-type: none"> ■ conjunto de celdas MT con conmutador 	<ul style="list-style-type: none"> ■ interruptores automáticos AT rápidos con un conmutador ultra-rápido y un controlador de fases
Observaciones	La conmutación debe realizarse con ausencia total de tensión en la fuente principal	Los dispositivos inversores mencionados son generalmente conjuntos montados, cableados y ajustados en fábrica (ver, por ejemplo, los catálogos de Schneider Electric)		Dificultades de gestión de la orden de conmutación (presencia de tensión residual)

Fig. 8: Diversos tipos de conmutaciones y su duración.

En la tabla de la **figura 8** pueden verse los órdenes de magnitud de las bajadas de tensión según los diferentes tipos de conmutación.

Conclusiones sobre las bajadas de tensión y los cortes breves

Estadísticamente, en la cabecera de una red BT, se observan cortes y bajadas de tensión con una frecuencia que varía entre 1 vez al mes y 10 veces al día. Su origen está normalmente en la MT y AT y su duración, en el 80% de casos está comprendida entre 25 y 350 ms.

Generalmente, la aparataje electrotécnica es insensible a estos fenómenos, si descartamos los contactores y relés, en los que una caída y retorno intempestivos de la tensión pueden provocar graves problemas en los procesos industriales.

Con el desarrollo de la inteligencia repartida, microautómatas, captadores, preaccionadores inteligentes, ... es conveniente prestar una gran atención a la coordinación de la inmunidad a las bajadas y cortes de la tensión de alimentación. En efecto, la aparataje con componentes electrónicos no tiene que dar alarmas erróneas ni órdenes intempestivos.

2.2 Las sobretensiones

Dejando a parte las sobretensiones accidentales, por ejemplo, la conexión de un transformador de 220 V a 400 V, las únicas elevaciones de tensión que pueden rebasar el campo nominal de variación $U_n + 10\%$ se observan cuando la red BT no está cargada. Pero los transformadores de los centros de transformación fuente están dotados normalmente de reguladores en carga que permiten al distribuidor de energía mantener la MT dentro del margen de $U_n \pm 7\%$.

Los impulsos de sobretensión se deben, sobre todo, a maniobras en la red MT y a los rayos. Poco peligrosas para la aparataje tradicional BT conforme a sus normas de fabricación, se deben de tener necesariamente en cuenta en el diseño y en la puesta en servicio de aparatos que llevan elementos electrónicos (resistencia con tensión reducida a 1500 V).

Maniobras en la red MT

■ Conexión de baterías de condensadores MT, sin autoinducción de bloqueo: el valor de cresta puede alcanzar $2U_n$ (figura 9).

■ Desconexión de transformadores MT/BT: el valor de cresta puede alcanzar $3U_n$, y depende, sobre todo, de la corriente «cortada» por el órgano de ruptura MT (figura 10).

Estas sobretensiones se transmiten a la BT a través del transformador MT/BT en función de las relaciones de transformación, inductiva y capacitiva (anexo 2). No se deben ignorar porque son peligrosas para la aparamenta BT, especialmente cuando el circuito BT es poco capacitativo, es decir, poco extenso, lo que sucede sobre todo al conectar una instalación concreta.

El rayo

El rayo afecta directamente a las redes aéreas. Existen numerosos estudios al respecto.

No existe el mismo peligro en todas las regiones; se habla de su «nivel cerámico».

En cuanto a las instalaciones, tampoco existe el mismo riesgo. El peligro mayor corresponde al caso de líneas aéreas de gran longitud en regiones con muchas tormentas. La figura 11 indica el número y el valor de las sobretensiones que se pueden alcanzar a lo largo de un año. Se trata de valores estadísticos y se está siempre a merced de una descarga directa de rayo de valor muy superior.

Las normas de coordinación del aislamiento y la compatibilidad electromagnética -CEM- tienen muy presente este fenómeno natural que desarrolla una energía impulsional considerable, transmitida a la red BT por los transformadores MT/BT.

Las normas relativas a la aparamenta tienen cada vez más presente la necesidad de soportar las ondas de tensión y de corriente representativas del rayo.

Aparte de estas «ondas» de frente abrupto, el rayo tiene un efecto nocivo debido a los explosores y pararrayos emplazados aguas arriba de los centros de transformación MT/BT. La importancia del riesgo depende del esquema de conexión a tierra -ECT-.

Supongamos el caso de un ECT TTN (figura 12). Cuando cae un rayo en la línea MT, hace actuar al explosor o al pararrayos que deja pasar una parte de la onda de choque que puede ser amplificada por el fenómeno de la reflexión de ondas (Cuaderno Técnico nº 168).

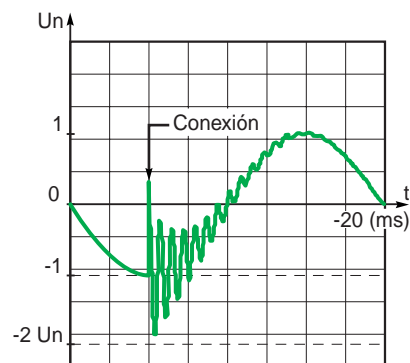


Fig. 9: Onda de tensión de la conexión de una batería de condensadores MT.

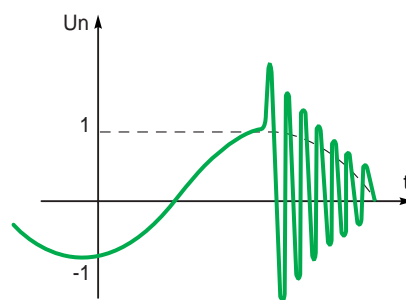


Fig. 10: Onda de tensión de la desconexión de un transformador.

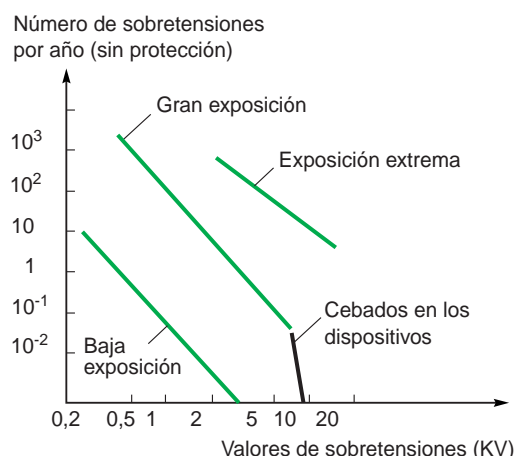


Fig. 11: Número y valor de las sobretensiones estadísticamente posibles según la probabilidad de exposición al rayo.

Este cebado del explosor origina una corriente de 50 Hz entre la fase defectuosa y la toma de tierra Rpn.

Esta corriente, limitada a 300 A (en Francia) por la impedancia Z, se mantiene hasta la intervención de las protecciones del centro de transformación fuente. Y provoca, al pasar por Rpn la subida de potencial de toda la red BT respecto a la tierra profunda a la que están conectados a través Ra los equipos BT.

Hay entonces riesgo de «perforación en retorno» del material BT que se materializa, cuando el producto «corriente x Rpn» es mayor que la tensión de aislamiento respecto a la masa de los equipos. Así con una corriente de 300 A y una tensión de aislamiento de 2500 V, Rpn no debe sobrepasar 8 Ω ; ¡valor que puede sobrepasarse según la humedad y naturaleza del terreno!

Observemos que el problema es el mismo en el caso de un defecto a masa de un elemento de MT del centro de transformación. En este caso el mayor riesgo se presenta en las redes de MT

subterráneas; por esto, la corriente está, o bien limitada a un valor superior (1000 A en Francia) o bien sin limitar, como en ciertos países extranjeros.

El ensayo de $2U + 1000$ a la frecuencia de 50 Hz durante un minuto permite verificar la rigidez dieléctrica en tensión de los materiales BT.

Por último, el régimen de neutro del centro de transformación juega también un papel importante en lo que se refiere a la transmisión de la onda de choque a la BT. En efecto, aparte de la transmisión capacitiva a través del transformador, la onda de corriente del rayo desarrolla en la impedancia de la toma de tierra una tensión U_f tanto más importante cuanto más autoinductiva sea la misma (figura 12).

Para tener en cuenta este fenómeno, en Francia los centros de transformación sobre poste se instalan (figura 13) con la toma de tierra del centro de transformación, del neutro y de los receptores BT separadas (esquema llamado de tomas de tierra separadas, TTS, según NF C 13-103).

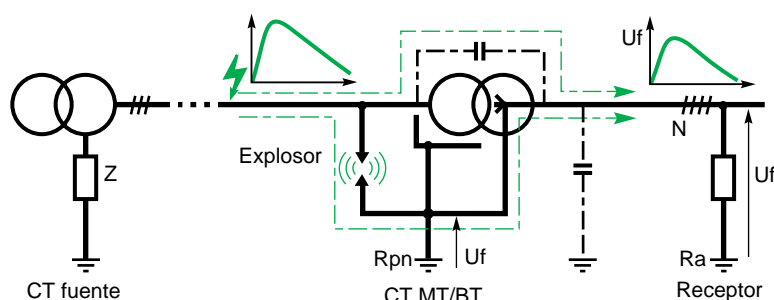


Fig. 12: Esquema TT-N de conexión a tierra de un centro de transformación MT/BT (puesta a tierra común al explosor, la masa del transformador y el neutro BT), y transmisión de la onda de rayo hacia la red BT.

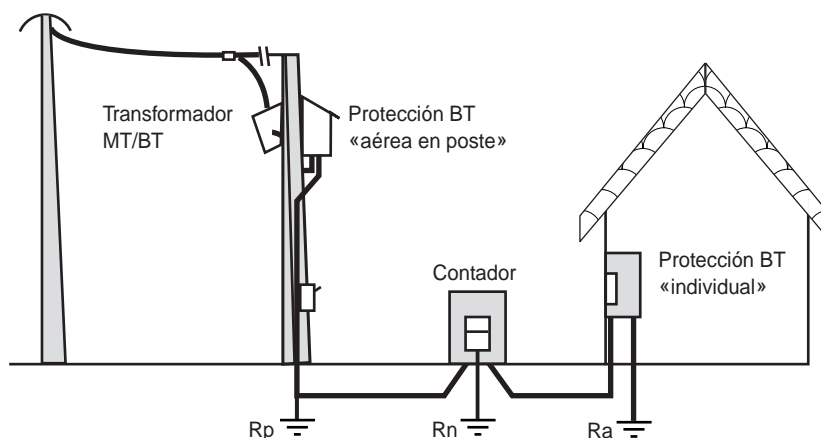
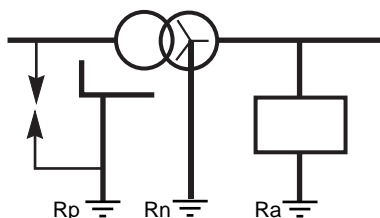


Fig. 13: Centro de transformación MT/BT «en poste». Esquema TT-S de conexión a tierra de un centro de transformación MT/BT (puestas a tierra separadas del explosor, de la masa del transformador y del neutro BT). Este ECT es IT-S si el limitador de sobretensión se inserta en la conexión a tierra del neutro BT.

Esta disposición permite evitar la subida de potencial de la instalación BT y por tanto el riesgo de cebado en retorno de la aparamenta y de los receptores BT (figura 14). Los equipos MT, según sus normas de fabricación, pueden soportar estas tensiones (resistencia a la onda de choque de 125 kV para un material especificado de 24 kV). Después de una perforación AT/BT en el transformador, es el valor de R_n o R_{pn} el que evita la perforación en retorno de los materiales BT.

Registros oscilográficos realizados en gran parte en Suiza, por Landis - Gyr, y publicados sobre todo por el IEEE, muestran que se producen varias veces al año en diversos puntos de una red BT sobretensiones transitorias superiores al kilovoltio (figura 15). Es relativamente raro detectar sobretensiones superiores a los 6 ó 7 kV, dado que, a estos niveles, se producen fenómenos de cebado de arco en el aire o en el cableado, que actúan como explosores. Esta perforación o cebado dieléctrico descreta las sobretensiones a un valor tanto menor cuanto peor es la calidad del cableado. Una «protección» así no deja de ser ilusoria, pues perjudica la instalación y puede crear graves problemas de seguridad por perforación, contorneo o carbonización de los aislantes.

La solución para estas zonas expuestas es la instalación de pararrayos entre los conductores activos y tierra; para más detalles ver el Cuaderno Técnico nº 179.



$R_p \leq 30 \Omega$ pues el equipo de porte del CT (transformador e interruptor automático) está sobreaislado a 20 kV de choque.

$R_n \leq 4 \Omega$ para cubrir el riesgo de un cebado de arco de retorno en el equipo BT del abonado a continuación de un cebado MT/BT; este valor resulta del cálculo:

$$R_n \leq \frac{2 \times U + 1000 - U}{300 \text{ A}}$$

$$R_n \leq \frac{2 \times 220 + 1000 - 220}{300} = 4 \Omega$$

Fig. 14: Tomas de tierra en un centro de transformación sobre poste MT/BT alimentado por líneas aéreas.

Maniobras de la aparamenta y funcionamiento de las protecciones BT

Las bobinas de los relés y de los contactores tienen una impedancia autoinductiva y cortar «una corriente inductiva» provoca casi siempre sobretensiones importantes. En el caso de un relé (figura 16) cuando el interruptor K corta bruscamente la corriente, la energía $1/2 Li^2$ se transforma en energía $1/2 CV^2$, de donde una sobretensión:

$$V = i \sqrt{\frac{L}{C}} = 0,15 \sqrt{\frac{10^{-1}}{0,25 \times 10^{-9}}} = 3000 \text{ V}$$

Las sobretensiones observadas pueden alcanzar más de 10 kV en un circuito de 230 V.

Estos circuitos auxiliares de mando deberían estar desparasitados por sus fabricantes, en caso contrario un circuito RC o una varistancia puestas en paralelo con su bobina permiten absorber la sobretensión.

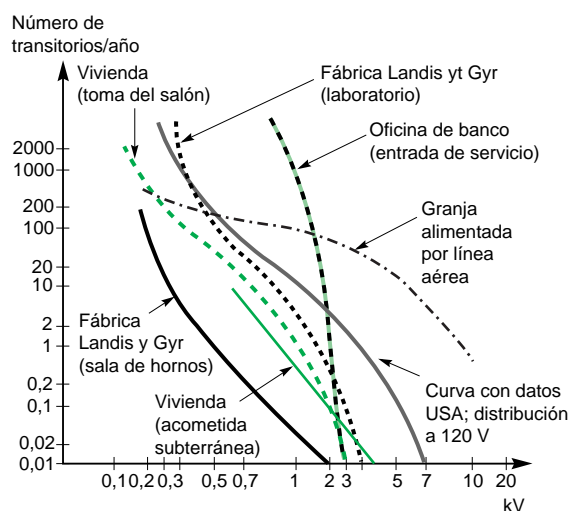


Fig. 15: Frecuencias y valores de pico de las sobretensiones debida a rayos en diversas instalaciones BT (fuente: Landis y Gyr).

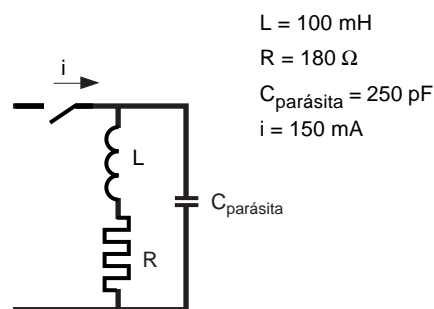


Fig. 16: Esquema equivalente de un relé.

■ En las redes BT y MT, en vacío o poco cargadas, interrumpir una pequeña corriente inductiva no es fácil y provoca la aparición de sobretensiones, frecuentemente múltiples (trenes de ondas).

Sobre el circuito monofásico de la **figura 17**, tomado como ejemplo, cuando se abre el interruptor K, la corriente continúa circulando en L₂, con lo que aparece en bornes de C₂ una tensión V_{BN}:

$$V_{BN} = i \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \sin \omega_2 t .$$

Lo mismo sucede en lo que se refiere a la red aguas arriba del interruptor, en la que se observa en los bornes de C₁ una tensión:

$$V_{AN} = i \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \sin \omega_1 t .$$

En el instante de la apertura, las tensiones V_{BN} y V_{AN} están en oposición y la tensión V_{AB} alcanza rápidamente un valor suficientemente importante como para haber reencendido el arco (recebado en los contactos del aparato de corte K).

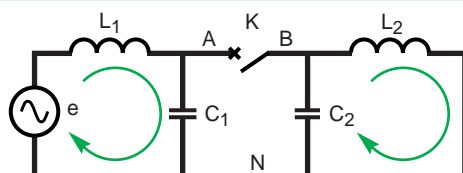
La corriente, que es débil, los contactos al separarse y la pulsación entre las dos tensiones V_{BN} y V_{AN}, son los elementos que hacen que el arco se apague; después las tensiones vuelven a subir y el fenómeno vuelve a producirse...

Se pueden tener así varios ciclos de recebado hasta que la energía disipada por el arco y la separación de los contactos, que va en aumento, detienen el fenómeno.

El resultado es la aparición de trenes de ondas, de tensión y frecuencias elevadas $\left(\omega = \frac{1}{\sqrt{2LC}} \right)$,

verdaderos generadores de parásitos.

Este fenómeno no es muy raro (circuitos en vacío con autoinducción o transformadores, aparatos de corte con apertura lenta); lo mismo se observa en el corte de corrientes de



L₁, C₁ = inductancia y capacidad red aguas arriba
L₂, C₂ = inductancia y capacidad red aguas abajo

Fig. 17: Esquema equivalente de un circuito monofásico.

cortocircuito cuando la corriente se hace al final de la ruptura suficientemente pequeña para ser «arrancada».

■ Cortar una corriente de cortocircuito no puede hacerse sin riesgo de un cierto nivel de sobretensiones:

□ es necesario actuar muy deprisa, antes de que la corriente alcance la intensidad de cortocircuito prevista,

□ e «intercalar» en el circuito una tensión de arco no siempre fácil de dominar según las condiciones del corte, porque esta tensión de arco puede constituir una sobretensión que alcanza varios centenares de voltios para los interruptores automáticos y varios kV en el caso de fusibles (**figura 18**).

Sobre este último punto hay que destacar que:

□ cuanto más cerca de los bornes de salida del aparato de corte se produzca el cortocircuito, tanto mayor y más corta será la sobretensión. Así los resultados que se presentan en la **figura 19** se han realizado para un defecto en un cable de 1,5 mm² de sección aguas abajo de un fusible de 10 A:

con L = 0

$$\frac{\Delta U + U}{U} = \frac{1700 + 220\sqrt{2}}{220\sqrt{2}} = 6,4 \quad \text{y } T = 50 \mu s$$

con L = 20 m

$$\frac{\Delta U + U}{U} = 2 \quad \text{y } T = 200 \mu s$$

□ normalmente cuanto mayor es el calibre de la protección de salida (y por tanto mayor la sección de sus conductores) respecto a la potencia de cortocircuito del «juego de barras» menor es la sobretensión y de mayor duración. La **figura 20** presenta una síntesis gráfica de varios ensayos.

	Interruptor automático C32L	Fusible GL 20 A
I _{cc} presunta (kA)	11	4
Cos φ	0,25	0,3
U (V)	380 + 10%	380 + 10%
Sobretensión (V) U + ΔU	400 a 650	2100 a 2650

Fig. 18: Sobretensiones obtenidas en dos dispositivos de protección probados con el mismo circuito de ensayo.

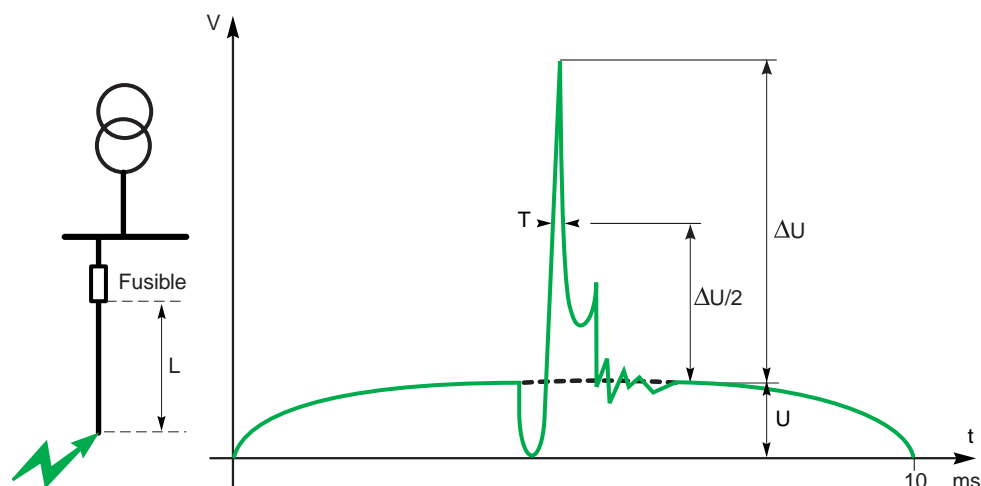


Fig. 19: La sobretensión es función de la distancia que separa el defecto de la protección.

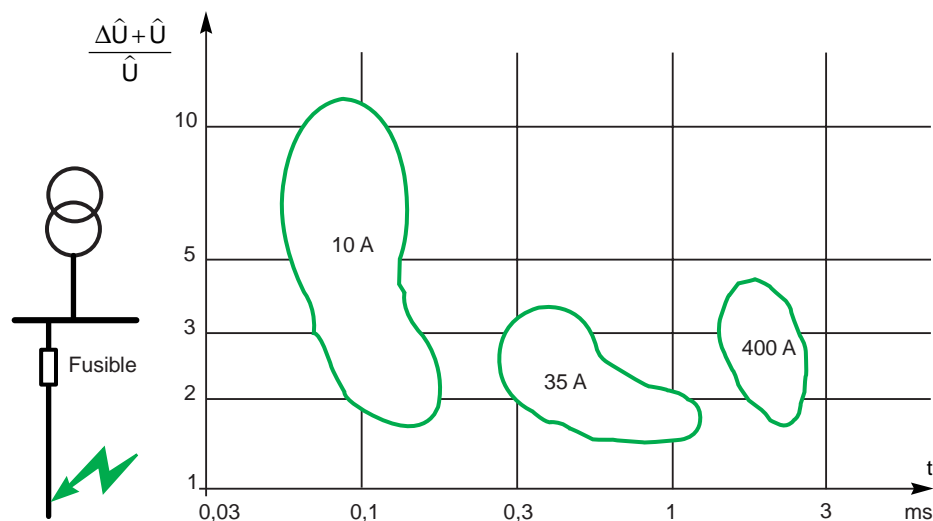


Fig. 20: Con una misma potencia de cortocircuito aguas arriba, los valores y duración de las sobretensiones en una derivación de salida son función del calibre de su protección y de la sección de los conductores.

Ferromresonancia

Es un fenómeno detectado en las redes no cargadas que se ha observado sobre todo en AT pero que puede también manifestarse detrás de pequeños transformadores o en los filtros.

El lector interesado en el tema puede consultar el Anexo 3 y leer el Cuaderno Técnico nº 190.

Ensayos y remedios relativos a las sobretensiones

Los impulsos de las sobretensiones transmitidos por conducción, por efecto inductivo o capacitativo, son muy peligrosos, especialmente

para los aparatos electrónicos. La experiencia en este campo ha permitido definir ensayos normalizados.

■ Las ondas normalizadas para probar los materiales

La mayor parte de las veces están recogidas (**figura 21**) en las publicaciones CEI 61 000 y especialmente en la 61 000-4-4, 61 000-4-5 y 61 000-4-12 (anexo 3).

Para otras formas de onda, las normas prevén, para los fabricantes del material, valores que corresponden a condiciones de utilización y a tensiones de ensayo. A título de ejemplo la

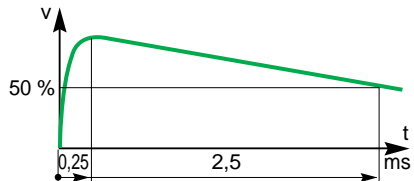
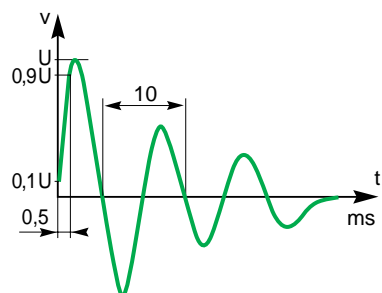

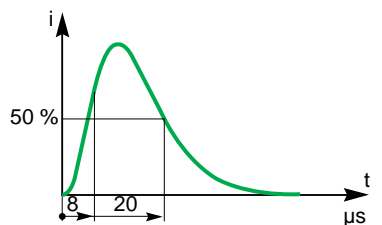
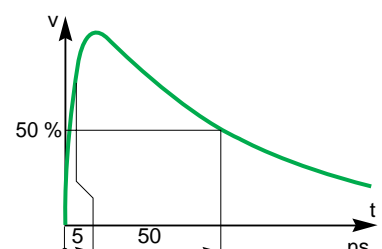
Origen	Tipo de onda	Onda de prueba
■ maniobra	Onda larga amortiguada: 0,25 / 2,5 ms	a 
	Onda oscilatoria amortiguada recurrente: $100 \text{ kHz} < f < 1 \text{ Mhz}$	b 
■ rayo	Onda de impulso de tensión recurrente: 1,2 / 50 μs	c 
	Onda de corriente: 8 / 20 μs	d 
■ aparamenta BT (por ejemplo: fusión de fusible)	Onda: 5 / 50 ns	e 

Fig. 21: Principales formas de onda de ensayo normalizadas.

figura 22 da para los diferentes valores las tensiones para los ensayos con onda de impulso de tensión (curva **d** de la **figura 21**).

■ Los remedios contra las sobretensiones

Se aplican tanto para la instalación como para la elección de los aparatos:

- en cuanto a la instalación, se aconseja prestar especial atención, por una parte, a separar las fuentes de sobretensiones de los materiales más sensibles, y por otra, a la equipotencialidad de los equipos,
- en cuanto a la elección del material, puede ser útil prever:
 - blindajes electrostáticos o condensadores (anexo 3º),
 - transformadores apantallados,
 - filtros,
 - limitadores de sobretensión (**figura 23**).

Hay también limitadores de sobretensión BT destinados a instalaciones que tienen un esquema de conexión a tierra IT (con neutro aislado de tierra), destinados a evitar cualquier elevación de tensión debida a un defecto MT. El Cuaderno Técnico nº 179 trata de su instalación.

Nivel	Tensión de ensayo $\pm 1\%$ (kV)
1	0,5
2	1
3	2
4	4
x	especial

El nivel «x» es abierto: se define en función de las especificaciones particulares de los materiales.

Fig. 22: Las tensiones de ensayo según la norma CEl 61 000-4-5.

	U limitada (kV)	I máxima (kA) (onda 8/20)
Varistancias	14 a 1200	10 a 5000
Diodos rectificadores	5 a 400	10 a 1000

Fig. 23: Características de los diferentes tipos de limitadores de sobretensiones.

3 Las perturbaciones de la onda senoidal

Las tensiones (ondas) observadas en las redes, permanentes o temporales, no son nunca perfectamente sinusoidales, porque:

- los generadores (alternadores) son más o menos perfectos,

- los transformadores tampoco son perfectos,
- los receptores generan o absorben armónicos,
- las redes se utilizan como soporte de determinadas señales (corrientes portadoras).

3.1 Los generadores

Sólo los aparatos de bajo precio, generalmente de pequeña potencia, generan armónicos (figura 24).

3.2 Los transformadores

Cuando están calculados muy ajustados, comienzan a saturarse en cuanto la tensión excede del valor nominal y entonces absorben corrientes no senoidales (figura 25).

3.3 Los receptores

Los condensadores

Cuanto mayor es la frecuencia de las corrientes armónicas, tanto mejor la absorben los condensadores. La corriente absorbida por los condensadores es pues una reproducción de la tensión de la red en la que están colocados. Asociados a una inductancia forman filtros «limpiadores» la red y absorben entonces una corriente no senoidal (Cuaderno Técnico nº 152).

Los tubos fluorescentes

Los arcos eléctricos absorben corrientes no senoidales especialmente cargadas de armónicos. El esquema «dúo» y la compensación no consiguen evitar que los tubos fluorescentes produzcan armónicos.

Los rectificadores con mando de fase

En la gran mayoría de casos alimentan un circuito inductivo y absorben sucesivamente sobre cada fase una corriente rectangular. En cada conmutación de los semiconductores, la

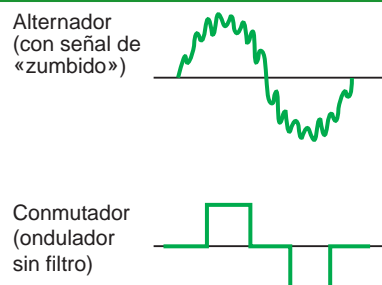


Fig. 24: Ejemplo de onda de tensión entregada por generadores «baratos».

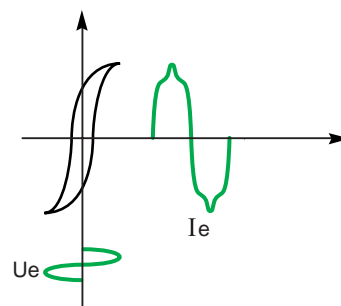


Fig. 25: Onda de corriente en vacío, absorbida por un transformador calculado excesivamente justo.

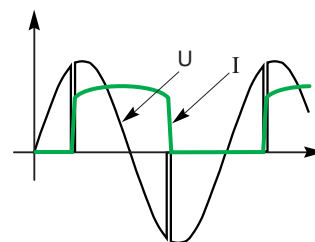


Fig. 26: Ondas de tensión y de corriente deformadas por un rectificador de mando de fase.

senoide de la tensión de alimentación queda afectada por una breve interrupción (cebado anódico); la **figura 26** representa las ondas de tensión y corriente.

En cuanto a los reguladores de temperatura con control de fase, cada cebado de los tiristores provoca un pico de tensión de alimentación debido a su componente autoinductiva, seguido de una pequeña caída de tensión que depende de la resistencia interna de la alimentación (**figura 27**).

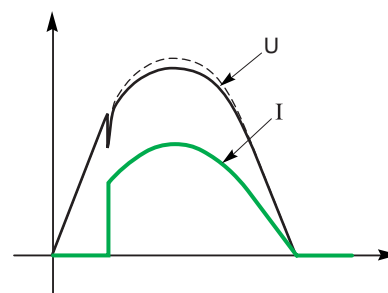


Fig. 27: Ondas de tensión y de corriente deformadas por un regulador para hornos.

3.4 Las alimentaciones conmutadas (switching)

Actualmente se utilizan mucho (microordenadores, tv, electrodomésticos, ...). Estas alimentaciones tienen en el circuito de

entrada un puente de diodos seguido por un condensador de filtro que genera corrientes armónicas importantes.

3.5 Los hornos industriales

Son auténticos generadores de perturbaciones en las redes:

- los hornos de arco producen un verdadero ruido eléctrico que contiene todas las frecuencias, con una amplitud que decrece con la frecuencia,

- los hornos de inducción AF son generadores de parásitos de banda estrecha, centrada sobre algunas decenas de kHz.

3.6 Las corrientes portadoras

Se trata de señales adicionales voluntariamente inyectadas en la red por el distribuidor de energía eléctrica, por ejemplo para el telemando del cambio de tarifa día/noche (en el sistema Pulsadix, 175 Hz).

Esta señal se puede oír en la radio del coche cuando se pasa por debajo de una línea AT.

Su frecuencia varía según los países:

110 - 175 - 183 - 217 - 283
317 - 600 - 1050 y 1350 Hz.

Las señales están constituidas por trenes de impulsos de la frecuencia elegida, inyectadas según un determinado código. Su tensión es del orden de 10 V.

Hay otras señales que pueden afectar a la red de los abonados BT:

- comunicaciones digitales, como las utilizadas en la Gestión Técnica de los Edificios,
- emisiones de los interfonos (algunas decenas de kHz),
- órdenes de telemando (50 a 150 kHz).

3.7 Los efectos de las perturbaciones

Toda señal periódica, cualquiera que sea su forma de onda, puede considerarse como la suma de señales alternas de frecuencias iguales a la de la señal «fundamental» y los múltiplos de esta señal, los «armónicos».

Los armónicos y las frecuencias particulares inyectadas en la red producen efectos nefastos, incluso peligrosos. Así, los armónicos:

- aumentan las pérdidas en el hierro y las corrientes de Foucault en los motores y los transformadores,
- Son un peligro para la vida de las baterías de condensadores, cuyas protecciones de largo retardo deben de tener en cuenta las corrientes armónicas,
- ponen también en peligro la vida de los condensadores de filtro de las alimentaciones de los circuitos electrónicos,
- pueden provocar el calentamiento del conductor de neutro (las corrientes del armónico 3 y sus múltiplos generadas por las fuentes conmutadas y los tubos fluorescentes se suman y retornan a la fuente a través del neutro).

Para evitar todos estos riesgos las protecciones electrónicas de corriente máxima «de largo retardo» o de «sobrecarga» (equivalentes a los relés electromecánicos llamados «térmicos») deben tener un circuito que mida el verdadero valor eficaz de la corriente (rms).

La norma EN 50 160 indica, para las redes públicas de distribución, que «... durante cada período de una semana, el 95% de los valores eficaces de cada tensión armónica media de 10 minutos, no debe sobrepasar los valores indicados en la tabla de la **figura 28**».

«Tensiones mayores para un armónico determinado pueden deberse a resonancias».

«Por otra parte, la tasa global de distorsión armónica de la tensión entregada (incluidos todos los armónicos hasta el rango 40) no debe sobrepasar el 8%».

Para disminuir las corrientes de las tensiones armónicas se pueden utilizar filtros pasivos o compensadores activos (Cuaderno Técnico nº 183).

Armónicos impares				Armónicos pares	
Múltiplos de 3		No múltiplos de 3			
Rango	Tensión relativa (% Un)	Rango	Tensión relativa (% Un)	Rango	Tensión relativa (% Un)
3	5	5	6	2	2
9	1.5	7	5	4	1
15	0.5	11	3.5	6 a 24	0.5
21	0.5	13	3		
		17	2		
		19	1.5		
		23	1.5		

Fig. 28: Valores de las tensiones armónicas en el punto de conexión (fuente: EN 50 160).

4 Perturbaciones particulares de los sistemas polifásicos

4.1 Los desequilibrios de corriente y de tensión

Las redes eléctricas son generalmente trifásicas, y alimentan receptores trifásicos, pero también muchos receptores monofásicos. Las corrientes absorbidas en las tres fases son de amplitud diferente y se observan desequilibrios de tensión.

Estos desequilibrios de tensión generan componentes inversas de la corriente (**figura 29**) que hacen aparecer sobre todo pares de frenado parásitos y calentamiento en los motores de corriente alterna.

A nivel europeo, la norma EN 50 160 precisa que: «en condiciones normales de explotación para cada periodo de una semana el 95% de los valores eficaces calculados en 10 minutos de la componente inversa de la tensión de alimentación debe de situarse entre el 0 y el 2% de la componente directa».

«En ciertas regiones estos desequilibrios pueden alcanzar el 3%».

En Francia, EDF estima que en las redes BT, en casa del abonado, la tasa de desequilibrio $\frac{V_i}{V_d}$

es esencialmente variable dentro de un valor medio comprendido entre el 0,5 y el 2%.

Las tasas más elevadas se observan en las redes BT alimentadas por un transformador de reducida potencia, con una mayoría de derivaciones monofásicas. Es el caso de los centros de transformación sobre poste que alimentan, en monofásico, unos pocos abonados BT.

En los casos difíciles, la conexión de las bobinas en zig-zag permite atenuar el desequilibrio de la red aguas arriba.

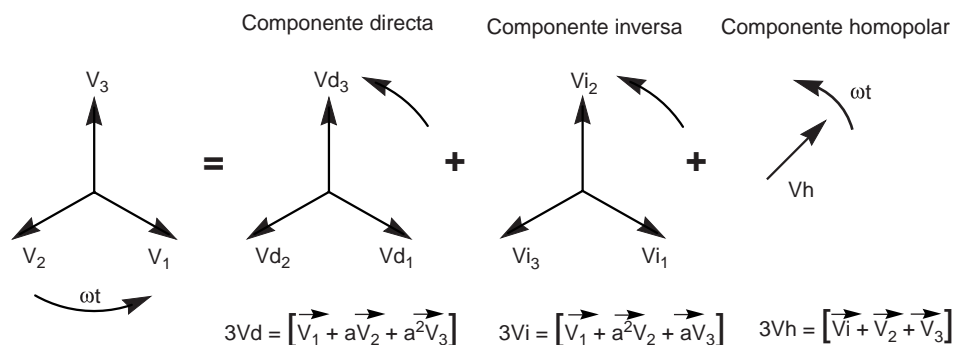


Fig. 29: Componentes directa, inversa y homopolar en un sistema trifásico.

4.2 Los desequilibrios de fases

Además de los efectos de las componentes inversas en los motores, el desequilibrio de tensiones trifásicas afecta al funcionamiento de los dispositivos con tiristores de conmutación de fase (**figura 30**).

También los armónicos, que modifican el paso por cero de las tensiones, pueden perturbar la sincronización del encendido de los tiristores.

En el campo de las protecciones contra riesgos eléctricos, este tipo de perturbaciones es también perjudicial porque los desequilibrios de corriente limitan la utilización del montaje Nicholson (conexión común de 4 transformadores de corriente) para detectar corrientes residuales debidas a fallos de aislamiento (Cuaderno Técnico nº 114).

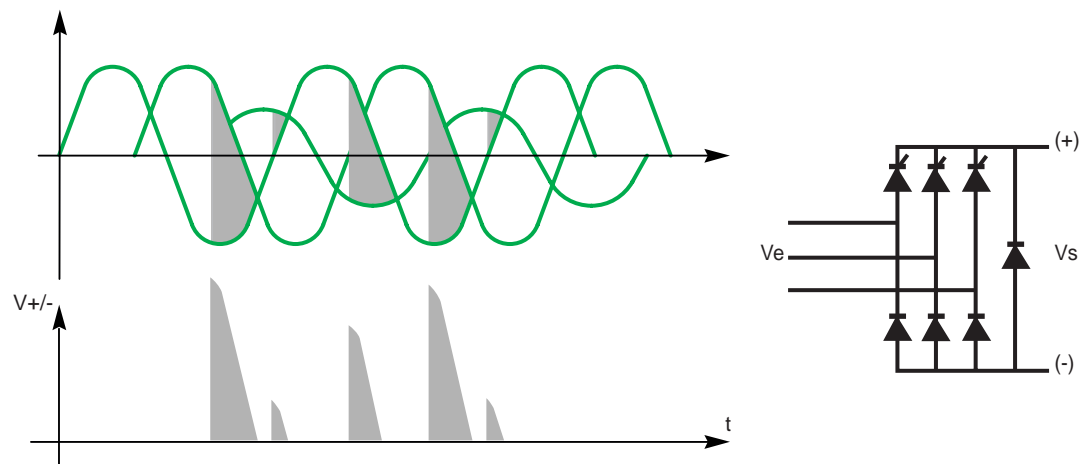


Fig. 30: Efecto de un desequilibrio de tensión en un rectificador de puente de Graetz semicontrolado.

5 Perturbaciones electromagnéticas

5.1 Campos y radiaciones

Las perturbaciones de las redes BT vistas anteriormente son esencialmente del tipo «de conducción», es decir, transmitidas por los conductores, los transformadores, las capacidades parásitas...

El técnico electricista sabe que un equipo situado en las proximidades de un conductor que transporte una gran corriente de 50 Hz, va a recibir, por acoplamiento inductivo, una fuerza electromotriz parásita; esto en realidad le sucede a cualquier circuito colocado dentro de un campo magnético (figura 31). Sabe también que un equipo situado en las proximidades de una red AT va a «recibir» una tensión parásita; esto en realidad le sucede a cualquier conductor colocado dentro de un campo eléctrico (figura 32).

Se dice que una intensidad de corriente importante «radia» un campo magnético de baja impedancia, y que una tensión importante «radia» un campo eléctrico de alta impedancia.

En efecto, la impedancia de un campo se expresa por la razón:

$$Z_c = \frac{E}{H}$$

De hecho, todo campo electromagnético está caracterizado por la presencia simultánea de campos, eléctrico y magnético, ligados por el llamado vector de Poynting:

$$\vec{P} \text{ (W/m}^2\text{)} = \vec{E} \text{ (V/m)} \wedge \vec{H} \text{ (A/m)}$$

La impedancia Z_c es función de la distancia y de la frecuencia (figura 33).

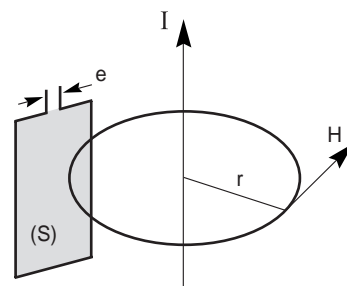
Si para los 50 Hz se puede hablar de campos E o H , en alta y baja impedancia, es porque:

$$\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f} = 1000 \text{ km}$$

Alrededor de un conductor recorrido por una corriente importante el campo magnético H decrece según la expresión $1/r$ (r = radio) hasta $\lambda / 2\pi$.

Alrededor de una antena (alta impedancia) es el campo E el que decrece en función de la distancia según la expresión $1/r^3$.

Cuando la distancia excede de $\lambda/2\pi$, los dos campos, E y H , disminuyen según la expresión $1/r$ y la impedancia es constante, siendo, en el



$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \text{ (A/m)}$$

$$\varnothing_{(s)} = \iint_{(s)} \mu \cdot H \cdot n \cdot ds \text{ (Weber)}$$

$$\vec{e} = - \frac{d\varnothing}{dt} \text{ (Volt)}$$

Fig. 31: Tensión inducida por una intensidad.

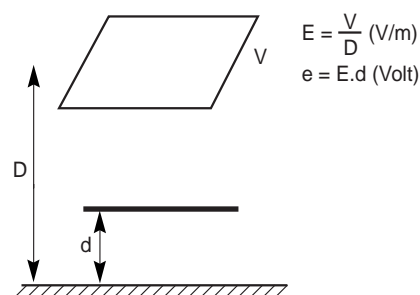


Fig. 32: Ejemplo de campo eléctrico.

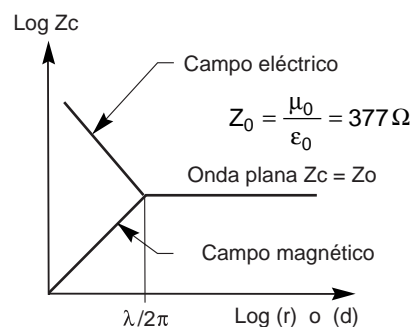


Fig. 33: Ejemplo de impedancia de onda de un dipolo.

aire, igual a 377Ω . Cuando la frecuencia de emisión de la señal parásita es, por ejemplo, la debida a la fusión de un fusible, el frente de subida de la onda es de 5 ns y la frecuencia equivalente de 10^8 Hz.

La distancia de transición es

$$\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{C}{2\pi f} = 5 \text{ cm ; más allá de este valor los}$$

campos E y H decrecen con $1/r$; se dice que se está en «onda plana».

Existe una gran diversidad de fuentes de perturbaciones radiantes, que se agrupan, generalmente, en dos grandes familias:

- de espectro estrecho: emisiones de radio, radares, hornos de inducción, microondas, ...
- de espectro ancho: rayo, descarga electrostática, aparatos de corte, motores con colector de delgas, soldadores, hornos de arco, ...

Hay que indicar que algunas fuentes, tales como los conmutadores estáticos o el rayo, son generadores de parásitos, conducidos y radiados. Son los circuitos electrónicos las principales víctimas de las perturbaciones electromagnéticas, por el hecho de que tratan señales de tensión muy bajas y que tienen gran impedancia (consumen cada vez menos). Los parásitos llegan a la «víctima» sobre todo a través del cableado que entra y sale de la caja (acoplamientos: en modo común, modo

diferencial, impedancia común, diafonía). Por otra parte las pistas de los circuitos impresos y los componentes pueden y deben estar calculados para conseguir una susceptibilidad electromagnética mínima.

Los circuitos más sensibles son:

- los amplificadores BF (paso bajo),
- los circuitos de entrada (integradores),
- los circuitos lógicos (digitales).

Además, el desarrollo de las comunicaciones digitales es la causa de nuevas dificultades porque los buses crean, con la red eléctrica, bucles sensibles a los campos magnéticos desarrollados por las grandes corrientes eléctricas de los sistemas de potencia y las caídas de rayo próximas. Por tanto hay que tomar precauciones tanto en el diseño como en la realización de las instalaciones (Cuaderno Técnico nº 187).

En el campo de la BT, los ensayos de inmunidad contra campos radiados están definidos en la norma CEI 61000-4-3 y secciones siguientes; así los relés de los interruptores automáticos Compact de la marca Merlin Gerin se han probado siguiendo el grado de máxima exigencia de la norma CEI 947-2 que hace a su vez referencia a las normas CEI 61000.

Por último, para conocer mejor la compatibilidad electromagnética -CEM-, el lector puede consultar el Cuaderno Técnico nº 149.

5.2 Descargas electrostáticas

Este tipo de perturbación afecta y/o destruye los aparatos electrónicos, pero no «afecta» a las redes eléctricas.

En efecto, la electrónica es especialmente sensible a estas descargas electrostáticas porque utiliza cada vez más componentes «de muy bajo nivel» de bajo consumo y alta impedancia. Y estos aparatos tienen siempre alguna parte que puede tocarse como por ejemplo los visores o displays, los potenciómetros, etc. Ahora bien, una persona, según el tipo de calzado que lleve y el suelo

sobre el que se desplace así como el grado de humedad del aire puede «cargarse» a un potencial que puede alcanzar los 15 kV (fenómeno modelizado y representado en la **figura 34**), en el caso de corrientes de descarga pueden alcanzar decenas de amperios (**figura 35**)!

Por tanto, ha pasado a ser imprescindible inmunizar y probar los aparatos electrónicos contra estos esfuerzos, lo que se trata en la norma CEI 61 000-4-2.

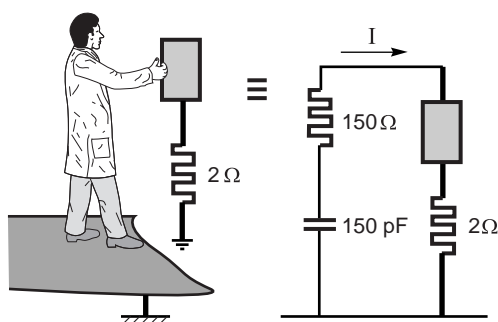


Fig. 34: Modelización de un circuito de carga electrostática de una persona.

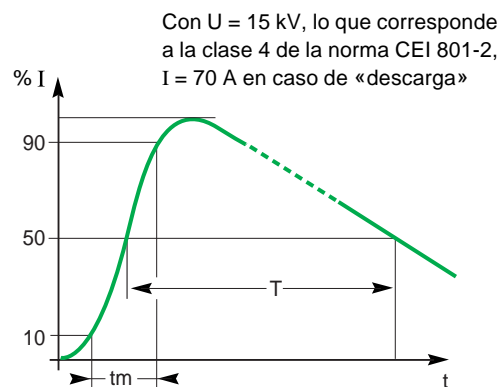


Fig. 35: Corriente de descarga electrostática ($t_m = 5\ \text{ns}$; $T = 30\ \text{ms}$).

6 Conclusión

Las redes BT están muy «sucias», porque sufren múltiples agresiones de origen diverso: externas (fuentes, redes MT, ...), de explotación (eliminación de defectos, órdenes de mando mediante portadoras, ...), de utilización (hornos, receptores electrónicos, ...).

Al mismo tiempo, son cada vez mayores las exigencias de calidad del producto «electricidad», así como de la seguridad de funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos tanto para la producción como para la gestión y el comercio.

■ A los usuarios, sensibilizados a los fallos de funcionamiento y a las pérdidas de explotación, les interesa controlar la energía que se les suministra. Cada vez efectúan más medidas de las magnitudes clásicas (tensión, intensidad, potencia, $\cos \varphi$). Y además registran las sobretensiones, las bajadas y ausencias de tensión, ... Tienen también interés en conocer por ejemplo:

- la tasa global de armónicos,
- el valor de los armónicos,
- el factor de pico,
- el porcentaje de desequilibrio de tensiones.

■ Los distribuidores de energía, por su parte, se ven obligados a garantizar un cierto nivel de calidad del producto «electricidad» que suministran (anexo 3: norma EN 50160).

■ Los fabricantes de aparataje, eléctrica y electrónica, tienen la obligación de respetar la directiva europea relativa a la CEM desde el diseño de sus productos, que ellos ensayan siguiendo las prescripciones de las normas,

como por ejemplo la CEI 61000 (anexo 3). Pero además proponen nuevos productos para responder a las necesidades de los usuarios para conseguir la calidad de la energía y la fiabilidad de la distribución, por ejemplo:

□ unidades de control instaladas en los interruptores automáticos que permiten todo tipo de medidas (I , f , P , $\cos \varphi$, ...),

□ unidades de control para cuadros centralizados que actualmente permiten conocer las potencias y energías activas y aparentes instantáneas, máximas y medias en un intervalo de tiempo determinado; pueden también medir las tasas de armónicos, factor de pico, desequilibrios de fases (de tensión y corriente).

■ Por último, los instaladores electricistas profesionales, dentro de su campo (desde el diseño de la instalación hasta el cableado), deben preguntarse sobre las diversas perturbaciones probables para encontrar la solución más adecuada. Por ejemplo, los diseñadores de las instalaciones deben prever las fuentes de emergencia, los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI), los pararrayos (limitadores de sobretensiones), los filtros o los compensadores activos de armónicos.

En este sentido, para todas las personas interesadas en la calidad y la disponibilidad de la energía eléctrica a lo largo de todo el sistema de distribución este Cuaderno Técnico, en cuanto que explica las diversas perturbaciones que pueden afectar a la red y a los equipos eléctricos es una primera herramienta que debe permitirles conocerlas mejor y combatirlas más eficazmente.

Anexo 1

Transmisión de sobretensiones a través de los transformadores

Transferencia magnética

En un transformador MT/BT, en vacío o poco cargado, las sobretensiones de rayo o de maniobra se transmiten al secundario en función de la relación de transformación, afectada por un coeficiente corrector.

Este coeficiente es, en general, inferior a 1,3 para la onda de rayo 1,2 / 50 μ s, y casi nunca sobrepasa 1,8 para las sobretensiones de maniobra, según la onda 250/2500 μ s, especificada en la CEI 60060-2.

Por ejemplo:

En el caso de un transformador 20/0,410 kV, Dyn 11, su relación de transformación vale:

$$\frac{20000}{410} = 48,8 .$$

■ una onda 1,2/50 μ s de 125 kV aplicada en el arrollamiento primario da en el secundario una onda de forma «parecida» de amplitud:

$$125 \text{ kV} \times \frac{1}{48,8} \times 1,3 = 3,3 \text{ kV}_{\text{cresta}} .$$

■ una onda 250/2500 μ s de 90 kV da:

$$90 \text{ kV} \times \frac{1}{48,8} \times 1,8 = 3,3 \text{ kV}_{\text{cresta}} .$$

Transferencia capacitativa

Depende de la disposición de los devanados primario y secundario respecto a la masa del transformador.

Generalmente para cada «columna» el devanado BT está próximo al núcleo y el MT, dispuesto alrededor del devanado BT, queda relativamente alejado (figura 36).

La sobretensión transmitida al secundario, a través de las diferentes capacidades parásitas del transformador (figura 37), se calcula mediante la fórmula:

$$U_s = U_e \frac{C_{BT/masa}}{C_{AT/masa} + C_{BT/masa}} .$$

En el peor de los casos, según la CEI 60071-2, puede alcanzar 0,7 U_e . En realidad, el coeficiente de transmisión es del orden de 0,3

para un transformador MT/BT sin ninguna conexión en el secundario. La presencia de capacidades entre los conductores activos y la masa en el cuadro general BT disminuye considerablemente estas sobretensiones.

Recordemos que, para evitar las perforaciones en la parte BT de los centros de transformación alimentados por líneas aéreas, la aparamenta correspondiente debe tener el aislamiento reforzado (10 kV/50 Hz), y que es muy aconsejable instalar limitadores de sobretensiones en el Cuadro General de BT. Además, si este cuadro tiene elementos de mando y control su alimentación debe de hacerse interponiendo transformadores BT/BT apantallados.

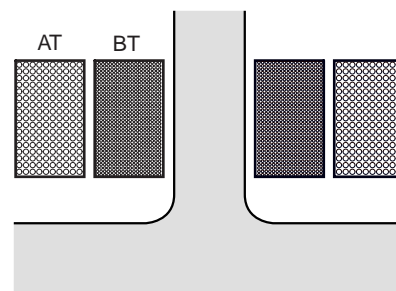


Fig. 36: Posición de los arrollamientos en la columna de un transformador MT/BT.

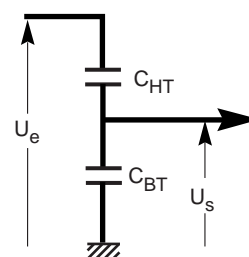


Fig. 37: Esquema de transferencia capacitativa de sobretensiones en el interior de un transformador MT/BT.

Anexo 2 La ferorrresonancia

En teoría

El fenómeno de resonancia serie (y paralelo) es muy conocido.

Cuando $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, las tensiones desarrolladas

por L y C son idénticas, opuestas y de valor absoluto mucho mayor que la tensión **e** (figura 38).

El fenómeno de la ferorrresonancia serie (y paralelo) es un caso particular que aparece cuando la autoinducción es de hierro saturable.

Si trazamos las curvas de variación de los valores absolutos de las diversas tensiones para una frecuencia dada en función de la corriente (figura 39), se observa en las gráficas que existen dos puntos de funcionamiento estables A y B. Para pasar de A a B es suficiente un simple transitorio, un parásito, que aumente temporalmente el valor de **e** y se sobrepasa la tensión límite del punto E.

En la práctica

Si las tensiones generadas en L y C son muy elevadas, se corre el riesgo de perforaciones dieléctricas y un receptor de poca potencia colocado en paralelo con C tiene muchas probabilidades de ser destruido.

Hay que indicar que, al cortarse las curvas $\frac{i}{C\omega}$

y $L\omega i$, aparece el riesgo de ferorrresonancia, porque:

- la ferorrresonancia puede producirse en un amplio margen de frecuencias, entre las que están los 50 Hz y sus armónicos; en este caso, por ejemplo, la onda de tensión de 50 Hz está sobremodulada por una tensión importante 150 Hz, por ejemplo,

- para tener la certeza de evitarlo, es necesario que $\frac{1}{C\omega}$ sea superior a $L_0\omega$ ($L_0 = L$ con

pequeña inducción) o que el circuito esté siempre cargado (amortiguado).

En conclusión

El diseñador del material BT debe tener en cuenta el riesgo de ferorrresonancia, que, en las «redes» en vacío, puede manifestarse debido a:

- el nivel de aislamiento dieléctrico fase/masa de la aparamenta (≥ 8 a $10 U_n$),
- la tensión de alimentación de los receptores de muy poca potencia (las protecciones electrónicas con su propia tensión de alimentación, por ejemplo).

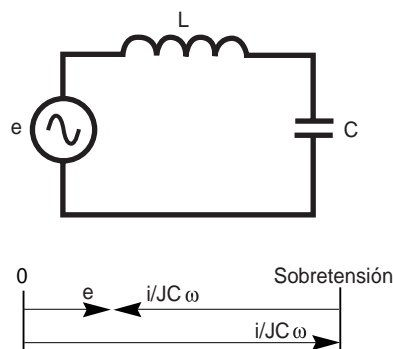


Fig. 38: Un circuito resonante.

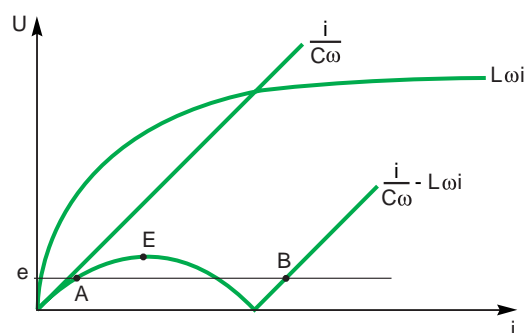


Fig. 39: Principio teórico de la ferorrresonancia.

Anexo 3 Bibliografía

Normas

■ EN 50160: Características de la tensión suministrada por las redes públicas de distribución. Esta norma especifica en MT y en BT:

- frecuencia,
- amplitud de la tensión suministrada,
- variación de la tensión suministrada,
- variación rápida de la tensión,
- bajadas de la tensión,
- cortes breves de la tensión suministrada,
- cortes largos de la tensión suministrada,
- sobretensiones temporales en la red entre fase y tierra,
- sobretensiones transitorias entre fase y tierra,
- desequilibrio de la tensión suministrada,
- tensiones armónicas,
- tensiones interarmónicas,
- transmisión de señales de información a través de la red.

■ CEI 60038 : Tensiones normales de la CEI.

■ CEI 60060-2 : Técnicas de ensayos AT - Parte 2: sistemas de medida.

■ CEI 60071 -2: Coordinación del aislamiento - Parte 2: Guía de aplicación.

■ CEI 60364: Instalación eléctrica de edificios.

■ CEI 60664: Coordinación del aislamiento de los materiales en los sistemas (redes) BT.

■ CEI 61000: Compatibilidad electromagnética (CEM). Se indica a continuación una selección de sus partes más importantes para una primera aproximación:

□ 1.1: Definiciones y términos fundamentales.

□ 2: Entorno:

– Entorno electromagnético para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales sobre las redes públicas de alimentación.

– Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales sobre las redes públicas de alimentación de baja tensión.

– Fenómenos radiados y fenómenos conducidos a frecuencias diferentes de las de la red.

– Campos magnéticos de baja frecuencia en entornos diversos.

□ 3: Límites:

– Límites para las emisiones de corrientes armónicas (aparatos ≤ 16 A por fase).

– Limitación de las fluctuaciones de tensión y parpadeo en las redes BT para equipos que tengan una corriente solicitada ≤ 16 A).

– Transmisión de señales en las instalaciones eléctricas BT.

□ 4: Técnicas de ensayo y de medida:

– Ensayos de inmunidad a las descargas electrostáticas.

– Ensayos de inmunidad a los campos electromagnéticos radiados a frecuencias radioeléctricas.

– Ensayos de inmunidad a los transitorios eléctricos rápidos en ráfaga.

– Ensayos de inmunidad a las ondas de choque.

– Guía general relativa a las medidas de armónicos y de interarmónicos.

– Ensayo de inmunidad al campo magnético a la frecuencia de red. Publicaciones fundamentales en cuanto a la CEM.

– Ensayo de inmunidad al campo magnético impulsional.

– Ensayos de inmunidad a las ondas oscilatorias.

– Ensayo de inmunidad a las bajadas de tensión cortes breves y variaciones de tensión.

– Ensayos de inmunidad a las perturbaciones conducidas en modo común en el margen de frecuencias de 0 Hz a 150 kHz.

Nota:

El lector especialmente interesado por los documentos normativos puede consultar los siguientes direcciones de internet:

■ Para la CEI: «<http://www.iec.com>»,

■ Para la UTE: «<http://www.ute-fr.com>».

Cuadernos Técnicos Schneider Electric

- Los dispositivos diferenciales residuales.
R. CALVAS.
Cuaderno Técnico nº 114.
- La compatibilidad electromagnética.
F. VAILLANT.
Cuaderno Técnico nº 149.
- Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento. C. COLLOMBET, J-M LUPIN, J. SCHONEK.
Cuaderno Técnico nº 152.
- Conmutación automática de alimentaciones en las redes AT y BT. G. THOMASSET.
Cuaderno Técnico nº 161.
- El rayo y las instalaciones eléctricas AT.
B. DE METZ-NOBLAT.
Cuaderno Técnico nº 168.
- Los esquemas de conexión a tierra BT (regímenes de neutro).
B. LACROIX, R. CALVAS.
Cuaderno Técnico nº 172.
- Parpadeo o el encendido de las fuentes luminosas. R. WIERDA.
Cuaderno Técnico nº 176.

- Perturbaciones en los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra. R. CALVAS.
Cuaderno Técnico nº 177.
- Sobretensiones y limitadores de sobretensiones -coordinación del aislamiento-.
Ch. SERAUDIE. Cuaderno Técnico nº 179.
- Coexistencia de corrientes fuertes y corrientes débiles. R. CALVAS, J. DELABALLE.
Cuaderno Técnico nº 187.
- La ferorresonancia. P. FERRACCI.
Cuaderno Técnico nº 190.

Obras diversas

- Caractéristique de la tension d'alimentation BT. Rapport UNIPEDE (Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Electricité) 1981.
- Qualité de l'alimentation électrique.
EDF, 09-90, Cahiers de l'ingénierie.
- La compatibilité électromagnétique.
A. KOUYOUMDJIAN. Institut Schneider Formation, 07-96.