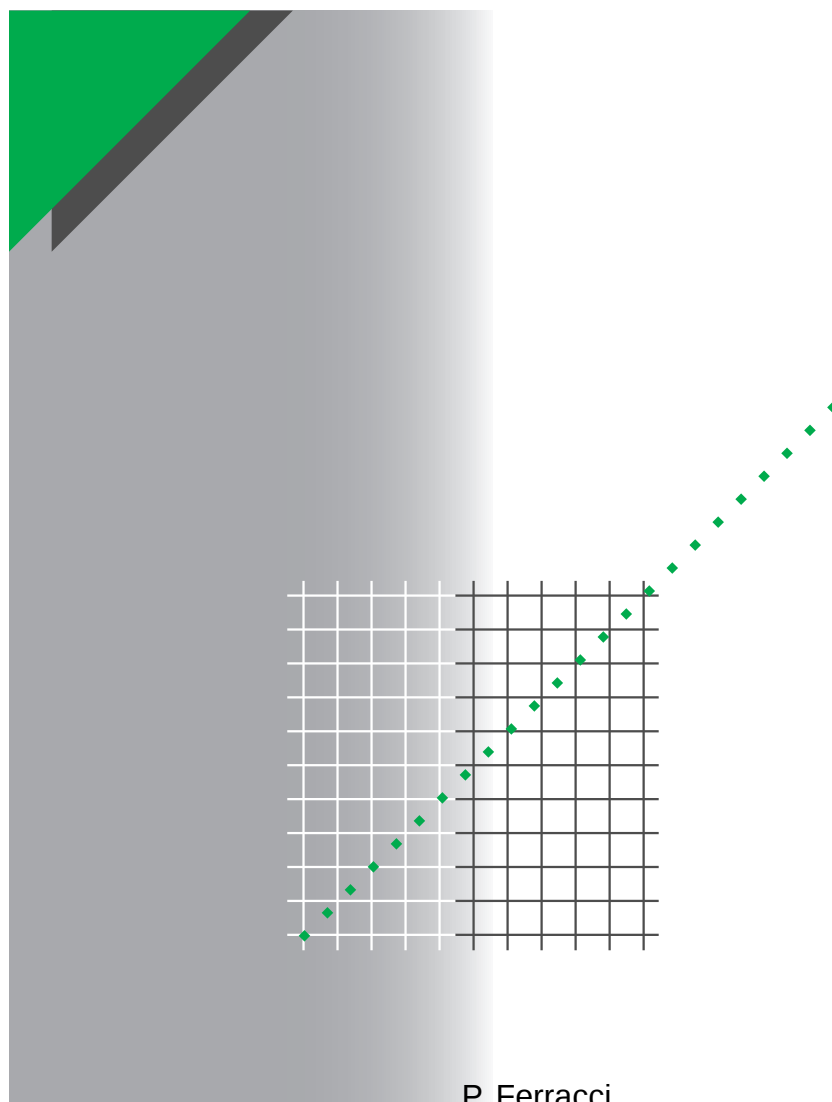
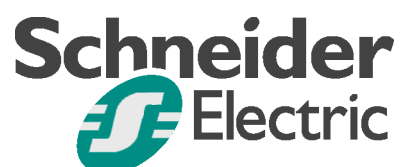


Cuaderno Técnico nº 199

La calidad de la energía eléctrica



P. Ferracci



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>

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 199 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 199

La calidad de la energía eléctrica



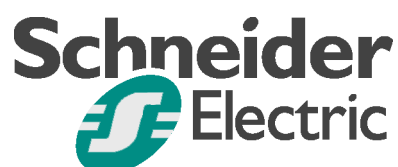
Philippe FERRACCI

Diplomado por la Escuela Superior de Electricidad en 1991, defendió una tesis sobre el régimen de neutro compensado, en colaboración con la Dirección de Estudios e Investigación de EDF. En 1996 se incorpora a Schneider Electric donde dirige estudios avanzados en el campo de la electrotecnia y de las redes eléctricas.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: octubre 2001

Versión española: octubre 2004



La calidad de la energía eléctrica

Una de las propiedades particulares de la electricidad es que algunas de sus características dependen, a la vez, tanto del productor/distribuidor de electricidad, como de los fabricantes de equipos y hasta del usuario. Esta abundancia de protagonistas y la utilización de una terminología y de unas definiciones simplemente aproximadas explican en parte la complejidad del problema.

El objetivo de este Cuaderno Técnico es facilitar los intercambios de información entre especialistas y no-especialistas, y entre cliente, constructor, instalador, diseñador y distribuidor. Su clara terminología debe de conseguir evitar las confusiones. Describe además los fenómenos principales que degradan la Calidad de la Energía Eléctrica (QEE), sus orígenes, las consecuencias en los equipos y las principales soluciones. Según los objetivos, propone diversas metodologías de medida de la QEE. Se proponen dos ejemplos prácticos de aplicación de soluciones, demostrando que sólo el respeto a las reglas del arte y la aplicación de una metodología rigurosa (diagnósticos, estudios, soluciones, instalación, mantenimiento preventivo) permiten una calidad de alimentación personalizada y adaptada a la necesidad del usuario.

1 Introducción	1.1 Contexto	p. 5
	1.2 Objetivos de la medida de la calidad de la energía	p. 6
2 Degradación de la QEE: orígenes, características, definiciones	2.1 Generalidades	p. 8
	2.2 Huecos de tensión y cortes	p. 8
	2.3 Armónicos e interarmónicos	p. 10
	2.4 Sobretensiones	p. 13
	2.5 Variaciones y fluctuaciones de tensión	p. 13
	2.6 Desequilibrios	p. 14
	2.7 Resumen	p. 14
3 Efectos de las perturbaciones en las cargas y procesos	3.1 Huecos de tensión y cortes	p. 15
	3.2 Armónicos	p. 17
	3.3 Sobretensiones	p. 18
	3.4 Variaciones y fluctuaciones de tensión	p. 19
	3.5 Desequilibrios	p. 19
	3.6 Resumen	p. 19
4 Nivel de calidad de la energía	4.1 Metodología de evaluación	p. 20
	4.2 La CEM y los niveles de planificación	p. 22
5 Soluciones para mejorar la QEE	5.1 Huecos de tensión y cortes	p. 23
	5.2 Armónicos	p. 27
	5.3 Sobretensiones	p. 29
	5.4 Fluctuaciones de tensión	p. 30
	5.5 Desequilibrios	p. 30
	5.6 Resumen	p. 31
6 Estudio de casos concretos	6.1 Filtro híbrido	p. 32
	6.2 Compensación automática en tiempo real	p. 33
	6.3 Protección contra el rayo	p. 36
7 Conclusión		p. 37
8 Bibliografía		p. 38

1 Introducción

1.1 Contexto

La calidad de la electricidad se ha convertido en un objetivo estratégico para las compañías de electricidad, para el personal de explotación, de mantenimiento o de gestión de las instalaciones terciarias o industriales, y para los fabricantes de equipos, especialmente por estos motivos:

- la necesidad económica de aumentar la competitividad entre las empresas,
- la generalización de equipos sensibles a las perturbaciones de tensión, siendo, también ellos a su vez, perturbadores,
- la liberalización del mercado de la electricidad.

La necesidad económica de aumentar la competitividad entre las empresas

- La reducción de costes debidos a la pérdida de continuidad del servicio y a la falta de calidad

El coste de las perturbaciones (cortes, huecos de tensión, armónicos, sobretensiones atmosféricas...) es elevado.

Estos costes deben de tener en cuenta, entre otros, la falta de producción, las pérdidas de materias primas, el reinicio de las máquinas-herramientas, la falta de calidad de la producción, los retrasos de las entregas... El mal funcionamiento o la parada de receptores prioritarios, como los ordenadores, el alumbrado y sistemas de seguridad, pueden poner en entredicho la seguridad de las personas (hospitales, balizamiento de los aeropuertos, locales de pública concurrencia, edificios de gran altura...).

Es determinante también la detección anticipada de los problemas mediante un mantenimiento preventivo, dirigido y optimizado. Se constata además una transferencia de responsabilidad del industrial-usuario hacia el constructor de los equipos para asegurar el mantenimiento de las instalaciones; el constructor se convierte en proveedor del producto «electricidad».

- La reducción de los costes debidos al sobredimensionamiento de las instalaciones y aumento de las facturas de electricidad

Otras consecuencias más disimuladas pero perversas de la degradación de la QEE son:

- la disminución del rendimiento energético de la instalación, lo que hace más costosa la factura energética,
- la sobrecarga de la instalación, que provoca un envejecimiento prematuro aumentando el riesgo de averías, lo que a su vez obliga a un sobredimensionamiento o redundancia de las instalaciones de distribución.

Por tanto, los usuarios profesionales de la electricidad manifiestan la necesidad de optimizar el funcionamiento de sus instalaciones eléctricas.

La generalización de equipos sensibles a las perturbaciones de tensión, siendo, también ellos a su vez, perturbadores

Debido a sus múltiples ventajas (flexibilidad de funcionamiento, excelente rendimiento, buenas prestaciones...) se constata el desarrollo y la generalización de uso de autómatas y variadores de velocidad en la industria, y de sistemas informáticos y alumbrados flúo-compactos en el sector servicios y en el doméstico. Estos equipos tienen la particularidad de ser a la vez sensibles a las perturbaciones de la tensión y generadores de perturbaciones.

Su abundancia dentro de un mismo emplazamiento exige una alimentación eléctrica cada vez mejor en términos de continuidad y de calidad. En efecto, la parada temporal de un elemento de la cadena puede provocar la parada del conjunto del sistema de producción (fábricas de semiconductores, de cemento, tratamiento del agua, logística de suministros, imprentas, industrias siderúrgicas o petroquímicas) o de servicios (telecomunicaciones, centros de cálculo, bancos...).

En consecuencia, los trabajos de la CEI sobre compatibilidad electromagnética (CEM) concluyen en normas y recomendaciones cada vez más exigentes (en cuanto a las limitaciones de los niveles de emisión de perturbaciones...).

La liberalización del mercado de la electricidad

Las reglas de juego del sector eléctrico tienen o van a tener una profunda evolución: la liberalización del sector, es decir, la competencia en la producción de electricidad, la producción descentralizada, y la posibilidad, para los grandes consumidores, de escoger su proveedor.

Así, en 1985, la comisión europea determinó que la electricidad era un producto (directiva 85/374) lo que obliga a definir muy bien sus características esenciales.

Por otra parte, en el contexto de la liberalización del mercado de la energía, la búsqueda de la competitividad entre compañías eléctricas hace que la calidad sea un factor diferencial.

Precisamente, la garantía de calidad puede ser, para un industrial, un criterio determinante al elegir su proveedor de energía.

1.2 Objetivos de la medida de la calidad de la energía

Según las aplicaciones, los parámetros a medir y la precisión de la medida no son los mismos.

Aplicación contractual

Dentro de un mercado liberalizado, pueden establecerse relaciones contractuales entre el proveedor y el usuario final o entre el productor y la empresa de transporte, y hasta entre la empresa de transporte y la de distribución. Una relación contractual necesita que sus términos se definan de común acuerdo y que sean aceptados por las diferentes partes. Se trata por tanto de definir los parámetros de medida de la calidad y de comparar sus valores con los límites predefinidos, incluso contractuales.

Esta aplicación requiere frecuentemente el tratamiento de un número importante de datos.

Mantenimiento correctivo

A pesar del respeto de las reglas del arte (diseño del esquemageneral, elección de las protecciones, del esquema de conexión a tierra o régimen de neutro y aplicación de las soluciones adaptadas) desde la fase de diseño, pueden presentarse disfunciones durante la explotación:

- las perturbaciones pueden haber sido olvidadas o subestimadas,
- la instalación ha evolucionado (cargas nuevas y/o modificaciones).

Debido a estos problemas es frecuente tener que realizar acciones correctivas. Y también es frecuente pretender obtener resultados muy rápidamente, lo que puede llevar a conclusiones precipitadas o infundadas.

Los sistemas de medida portátiles (durante un tiempo limitado) o los aparatos fijos (vigilancia permanente) facilitan el diagnóstico de las instalaciones (detección y archivo de las perturbaciones y disparo de alarmas).

Optimización del funcionamiento de las instalaciones eléctricas

Para conseguir mejoras en la productividad (economías de funcionamiento y/o reducción de los costes de explotación) es necesario tener un buen funcionamiento de los procesos y una buena gestión de la energía, dos factores que dependen de la QEE. Disponer de una QEE adaptada a las necesidades es un objetivo del personal de explotación, de mantenimiento y de gestión de las instalaciones de los sectores terciario o industriales. Se necesitan para ello programas (software) complementarios que aseguren el mando y control de las instalaciones y supervisión constante de las mismas.

Estudios estadísticos

El análisis de estos datos requiere un estudio estadístico basado en numerosos resultados obtenidos mediante encuestas realizadas generalmente por los explotadores de las redes de transporte y de distribución.

- Encuestas sobre las prestaciones generales de una red

Permiten, por ejemplo:

- Planificar y definir las intervenciones preventivas gracias a una cartografía de los niveles de perturbaciones de una red. Esto permite reducir los costes de explotación, mejorando a la vez el control de las perturbaciones. Una variación anormal respecto a los valores medios puede detectarse y relacionarse con la conexión de nuevas cargas. También se pueden estudiar las tendencias estacionales o las derivas.

- Comparar la QEE que proporcionan los diversos distribuidores en las diferentes zonas geográficas. En efecto, los clientes potenciales pueden querer conocer las características de fiabilidad de suministro de la electricidad antes de instalar nuevas fábricas.

■ Encuestas sobre las prestaciones en un punto concreto de la red

Permiten, por ejemplo:

□ Determinar el entorno electromagnético al que quedará sometida una futura instalación o un nuevo equipo. Por tanto, pueden llevarse a cabo, preventivamente, acciones de mejora de la red de distribución y/o la desensibilización de la del cliente.

□ Especificar y verificar las prestaciones o condiciones que recogerá el contrato con el proveedor. Estas informaciones sobre la calidad de la electricidad son particularmente estratégicas para las compañías suministradoras que en el contexto de la liberalización del mercado de la energía buscan la mejor competitividad, la satisfacción de las necesidades y la fidelización de sus clientes.

2 Degradación de la QEE: orígenes, características, definiciones

2.1 Generalidades

Las perturbaciones electromagnéticas susceptibles de afectar al buen funcionamiento de los equipos y de los procesos industriales se clasifican generalmente en varias clases, que corresponden a las perturbaciones conducidas y radiadas:

- de baja frecuencia (< 9 kHz),
- de alta frecuencia (≥ 9 kHz),
- de descargas electrostáticas.

La medida de QEE consiste habitualmente en determinar las perturbaciones electromagnéticas conducidas de baja frecuencia (gama ensanchada para incluir las sobretensiones transitorias y la transmisión de señales en la red):

- hueco de tensión y cortes (*voltage dips and interruptions*),
- armónicos e interarmónicos (*harmonics and interharmonics*),
- sobretensiones temporales (*temporary overvoltages*),
- sobretensiones (*swell*),

- sobretensiones transitorias (*transient overvoltages*),
- fluctuaciones de tensión (*voltage fluctuations*),
- desequilibrios de tensión (*voltage unbalance*),
- variaciones de frecuencia de alimentación (*power-frequency variations*),
- componentes cc en las redes ca (*d.c. in a.c. networks*),
- tensiones de señalización (*signalling voltages*).

En general no es necesario medir todo el conjunto de estas perturbaciones.

Pueden agruparse en cuatro categorías según que afecten a la amplitud, la forma de onda, la frecuencia y la simetría de la tensión.

Frecuentemente, una misma perturbación afecta o modifica a la vez a varias de estas características. Pueden también clasificarse según su carácter aleatorio (rayo, maniobra, cortocircuito...), en permanentes o semipermanentes.

2.2 Huecos de tensión y cortes

Definiciones

Un hueco de tensión es una bajada súbita de la tensión en un punto de una red de energía eléctrica, hasta un valor comprendido (por convenio) entre el 90% y el 1% (CEI 61000-2-1, CENELEC EN 50160), o entre el 90% y el 10% (IEEE 1159) de una tensión de referencia (U_{ref}), seguida de un restablecimiento de la tensión de red después de un corto lapso de tiempo comprendido entre un semiperíodo de la fundamental de la red (10 ms a 50 Hz) y un minuto (**figura 1a**).

Generalmente, la tensión de referencia es la tensión nominal para las redes BT y la tensión declarada para las redes MT y AT. También puede utilizarse una tensión de referencia desplazada, igual a la tensión antes de la perturbación, en las redes MT y AT equipadas con un sistema de ajuste (ajuste en carga) de la tensión en función de la carga. Esto permite estudiar (con la ayuda de medidas simultáneas en cada red) la transferencia del hueco entre los diferentes niveles de tensión.

El método que se utiliza normalmente para detectar y caracterizar un hueco de tensión es el cálculo del valor eficaz «rms (1/2)» de la señal en un período de la fundamental de todos los semiperíodos (envolvente de un semiperíodo) (figura 1b).

Los parámetros característicos (figura 1b) de un hueco de tensión son pues:

- su profundidad: ΔU (o su amplitud U),
- su duración ΔT , definida como el lapso de tiempo durante el cual la tensión es inferior al 90%. Se habla de hueco de tensión a $x\%$ si el valor rms (1/2) está por debajo de $x\%$ del valor de referencia U_{ref} .

Los cortes son un caso particular de hueco de tensión de profundidad superior al 90% (IEEE) o al 99% (CEI-CENELEC). Se caracterizan por un único parámetro: la duración. Los breves tienen una duración inferior a 3 minutos (CENELEC) o a 1 minuto (CEI-IEEE). Tienen su origen principalmente en los reenganches automáticos lentos destinados a evitar los cortes largos (ajustados entre 1 y 3 minutos); los cortes largos son de una duración superior. Los cortes breves y los cortes largos son diferentes, tanto por su origen como por las soluciones a aplicar para prevenirlos o para reducir su número.

Las perturbaciones de tensión de duración inferior a un semiperíodo de la fundamental T de la red ($\Delta T < T/2$) se consideran como si fueran transitorios.

Los americanos utilizan diferentes adjetivos para calificar los huecos de tensión (*sag*) o (*dip*) y los cortes (*interruption*) según su duración:

- instantáneo (*instantaneous*)
($T/2 < \Delta T < 30 T$),
- momentáneo (*momentary*)
($30 T < \Delta T < 3 s$),
- temporal (*temporary*)
($3 s < \Delta T < 1 \text{ min}$),
- mantenido (*sustained interruption*) y subtensión (*undervoltage*)
($\Delta T > 1 \text{ min}$).

En función del entorno, las tensiones medidas pueden ser entre conductores activos (entre fases o entre fase y neutro) o entre conductores activos y tierra (fase/tierra o neutro/tierra), o también entre conductores activos y conductor de protección.

En el caso de un sistema trifásico, las características ΔU y ΔT son en general diferentes en las tres fases. Por este motivo un hueco de tensión debe de detectarse y caracterizarse separadamente en cada una de las fases.

Se considera que un sistema trifásico sufre un hueco de tensión si al menos una de las fases sufre este tipo de perturbación.

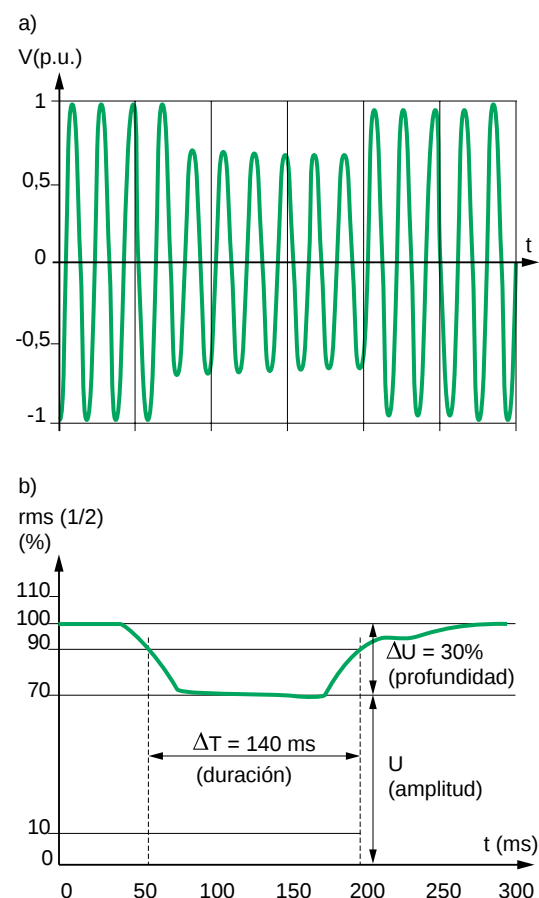


Fig. 01: Parámetros característicos de un hueco de tensión; [a] forma de onda, [b] rms (1/2).

Origen

■ Los huecos de tensión y los cortes breves están ocasionados principalmente los fenómenos conducidos con corrientes elevadas que provocan, a través de las impedancias de los elementos de la red, una caída de tensión de amplitud tanto menor cuanto más alejado de la fuente de perturbación está el punto de observación.

Los huecos de tensión y los cortes breves se deben a diferentes causas:

- defectos en la red de transporte (AT), de distribución (BT y MT), o en la instalación en sí misma.

La aparición de los defectos provoca huecos de tensión a todos los usuarios. La duración de un hueco depende generalmente de las temporizaciones de funcionamiento de los órganos de protección. Cuando los dispositivos de protección (interruptores automáticos, fusibles) aíslan o separan un defecto, se

producen cortes (cortos o largos) en la red de los usuarios alimentados por la sección con defecto. Aunque la fuente de alimentación haya desaparecido, la tensión en la red puede mantenerse debido a la tensión residual que siguen suministrando los motores asíncronos o síncronos en proceso de ralentización (durante 0,3 a 1 s) o a la tensión procedente de la descarga de los condensadores conectados a la red.

Los cortes breves se deben generalmente a la actuación de los automatismos de red, como los reenganches rápidos y/o lentos o la conmutación de transformadores o de líneas. Los usuarios sufren una sucesión de huecos de tensión y/o de cortes breves al producirse defectos con arcos intermitentes, o durante los ciclos de desenganche y reenganche automáticos (en red aérea o mixta radial) que permiten la eliminación de los defectos transitorios, o incluso cuando se reenvía una tensión para localizar un defecto.

□ la conmutación de cargas de gran potencia respecto a la potencia de cortocircuito (motores asíncronos, hornos de arco, máquinas de soldar, calderas...).

■ Se producen cortes largos cuando los dispositivos de protección aíslan definitivamente un defecto permanente, o cuando se produce la apertura, voluntaria o intempestiva de un aparato o mecanismo.

Los huecos de tensión o los cortes se propagan hacia los niveles de tensión inferiores a través de los transformadores. El número de fases afectadas, así como la gravedad de estos huecos de tensión, dependen del tipo de defecto y del acoplamiento del transformador.

El número de huecos de tensión y de cortes es más elevado en las redes aéreas, sometidas a la intemperie, que en las redes subterráneas. Pero una derivación subterránea con origen en el mismo juego de barras que las aéreas o mixtas sufrirá también los huecos de tensión debidos a los defectos que afectan a las líneas aéreas.

■ Los transitorios ($\Delta T < T/2$) son causados, por ejemplo, por la conexión de condensadores o el aislamiento de un defecto por un fusible o por un interruptor automático rápido BT, o incluso por las muescas de las conmutaciones de convertidores polifásicos.

2.3 Armónicos e interarmónicos

Resumen

Toda función periódica (de frecuencia f) se puede descomponer en una suma de senoides de frecuencia $h \times f$ (h : entero); h se llama orden o rango del armónico ($h > 1$). La componente de primer orden es la componente fundamental.

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(2\pi h f + \varphi_h)$$

El valor eficaz es:

$$Y_{ef} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + Y_h^2 + \dots}$$

La tasa de distorsión armónica (THD: Total Harmonic Distortion) da una medida de la deformación de la señal:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1} \right)^2}$$

Los armónicos proceden principalmente de cargas no lineales cuya característica es absorber una corriente que no tiene la misma forma que la tensión que los alimenta (**figura 2**).

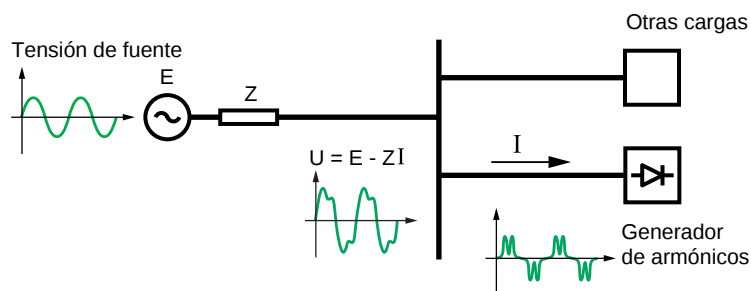


Fig. 02: Degradación de la tensión de red producida por una carga no lineal.

Esta corriente es rica en componentes armónicos y su espectro será función de la naturaleza de la carga. Al circular a través de las impedancias de la red, estas corrientes armónicas crean las tensiones que pueden perturbar el funcionamiento de otros usuarios conectados a la misma fuente. La impedancia de la fuente a las diferentes frecuencias armónicas tiene pues un papel fundamental en la gravedad de la distorsión en tensión. Hay que observar que, si la impedancia de la fuente es baja (Pcc elevada), la distorsión en tensión es menor.

Las principales fuentes de armónicos

Las principales fuentes de armónicos son precisamente las propias cargas y se pueden clasificar según su pertenencia al entorno industrial o doméstico.

- Las cargas industriales
 - equipos de electrónica de potencia: variadores de velocidad, rectificadores con diodos o tiristores, onduladores, fuentes de alimentación conmutadas;
 - cargas que utilizan el arco eléctrico: hornos de arco, máquinas de soldar, alumbrado (lámparas de descarga, tubos fluorescentes). Son también generadores de armónicos (temporales) los arranques de motores con arrancador electrónico y la conexión de transformadores de potencia.
- Hay que destacar que se ha generalizado la utilización de equipos basados en la electrónica de potencia debido a sus múltiples ventajas (flexibilidad de funcionamiento, excelente rendimiento energético, prestaciones elevadas...).
- Las cargas domésticas con convertidores o con fuentes de alimentación conmutada: televisores, hornos de microondas, placas de inducción, ordenadores, impresoras, fotocopiadoras, reguladores de luz, equipos electrodomésticos, lámparas fluorescentes.

Aunque su potencia unitaria es mucho menor que las cargas industriales, el efecto acumulado, debido a su gran abundancia y a su utilización simultánea en períodos largos, las convierten en fuentes importantes de distorsión armónica. Hay que destacar que la utilización de este tipo de aparatos crece en número y a veces en potencia unitaria.

Los niveles de armónicos

Varían generalmente según el modo de funcionamiento del aparato, la hora del día y la estación (climatización).

Las fuentes de alimentación generan normalmente armónicos impares (**figura 3**).

Tanto la conexión de transformadores o las cargas polarizadas (rectificadores de media onda) como los hornos de arco producen también (además de armónicos impares) armónicos de rangos pares.

Los interarmónicos son componentes senoidales, pero que no son de frecuencias múltiplos enteros de la fundamental (están, por tanto, entre los armónicos). Se deben a las variaciones periódicas o aleatorias de la potencia absorbida por diferentes receptores como los hornos de arco, las máquinas de soldar y los convertidores de frecuencia (variadores de velocidad y cicloconvertidores). Las frecuencias de telemando utilizadas por el distribuidor son también interarmónicos.

El espectro puede ser discreto o continuo, y variable de forma aleatoria (horno de arco) o intermitente (máquinas de soldar).

Para estudiar los efectos a corto, medio o largo plazo, las medidas de los distintos parámetros deben hacerse a intervalos de tiempo compatibles con la constante de tiempo térmica de los equipos.

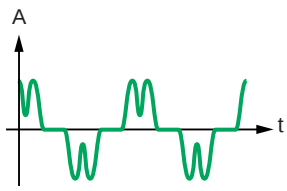
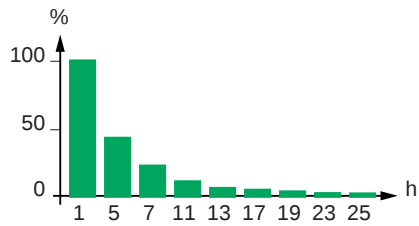
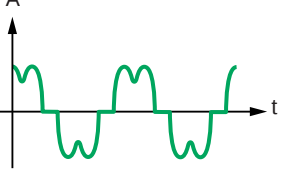
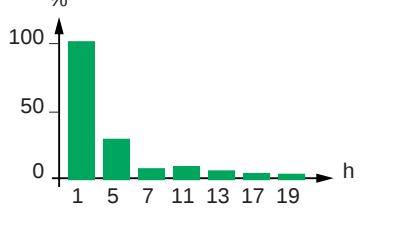
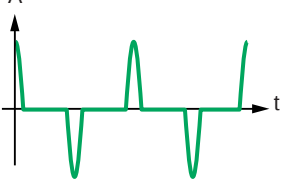
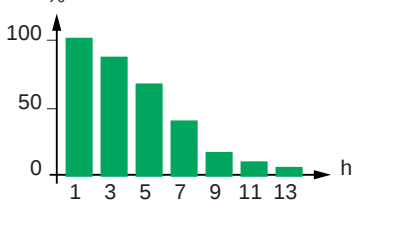
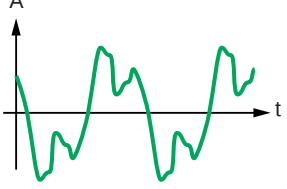
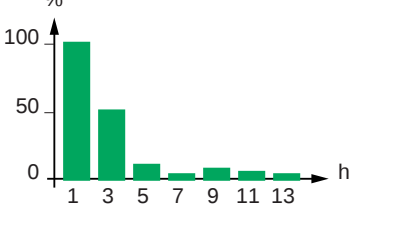
Cargas no lineales	Forma de onda de corriente	Espectro	THD
Variador de velocidad			44%
Rectificador/cargador			28%
Carga informática			115%
Alumbrado fluorescente			53%

Fig. 3: Características de algunos generadores de armónicos.

2.4 Sobretensiones

Toda tensión aplicada a un equipo cuyo valor de cresta sobrepasa los límites de un intervalo definido por una norma o una especificación es una sobretensión (Cuadernos Técnicos n° 141, 151 y 179).

Las sobretensiones son de tres tipos:

- temporales, a frecuencia industrial,
- de maniobra,
- de origen atmosférico (rayo).

Pueden presentarse:

- en modo diferencial (entre conductores activos fase/fase o fase/neutro),
- en modo común (entre conductores activos y la masa o la tierra).

Sobretensiones temporales

Por definición son de la misma frecuencia que la de la red (50 Hz ó 60 Hz). Tienen diversos orígenes:

- Un defecto de aislamiento

Al producirse un defecto de aislamiento entre una fase y tierra en una red con neutro impedante o aislado, la tensión de las fases sanas respecto a tierra puede alcanzar la tensión compuesta. Las sobretensiones en las instalaciones BT pueden proceder de las instalaciones AT a través de la toma de tierra del centro de transformación MT/BT.

- La ferorresonancia

Se trata de un raro fenómeno oscilatorio no lineal, frecuentemente peligroso para los equipos, que se produce en un circuito con un condensador y una inductancia saturable. Con facilidad se le suele considerar la causa de disfunciones o averías mal aclaradas (Cuaderno Técnico n° 190).

- Fallo (corte) del neutro

Los aparatos alimentados por la fase menos cargada ven aumentar su tensión (a veces hasta a la tensión compuesta).

- Los defectos del regulador de tensión de un alternador o del ajuste en carga de un transformador

- La sobrecompensación de la energía reactiva

Los condensadores shunt producen un aumento de la tensión desde la fuente hasta ellos. Esta tensión es especialmente elevada en períodos de poca carga.

Sobretensiones de maniobra

Están provocadas por modificaciones rápidas de la estructura de la red (apertura de aparatos de protección...). Se distinguen:

- las sobretensiones de conmutación con carga normal,
- las sobretensiones provocadas por el establecimiento y la interrupción de pequeñas corrientes inductivas,
- las sobretensiones provocadas por la maniobra de circuitos capacitativos (líneas o cables en vacío, baterías de condensadores).

Por ejemplo, la maniobra de una batería de condensadores provoca una sobretensión transitoria cuya primera cresta puede alcanzar $2\sqrt{2}$ veces el valor eficaz de la tensión de la red, y una sobreintensidad transitoria del valor de cresta que puede alcanzar 100 veces la corriente asignada del condensador (Cuaderno Técnico n° 189).

Sobretensiones atmosféricas

El rayo es un fenómeno natural que aparece en caso de tormenta. Se distinguen las descargas directas de rayo (en una línea o en una estructura) y los efectos indirectos de una descarga de rayo (sobretensiones inducidas y aumento del potencial de tierra) (Cuadernos Técnicos n°151 y 179).

2.5 Variaciones y fluctuaciones de tensión

Las variaciones de tensión son variaciones del valor eficaz o del valor de cresta de una amplitud inferior al 10% de la tensión nominal.

Las fluctuaciones de tensión son una sucesión de variaciones de tensión o de variaciones cíclicas o aleatorias de la envolvente de una tensión cuyas características son la frecuencia de la variación y su amplitud.

- Las variaciones lentas de tensión están causadas por la variación lenta de las cargas conectadas a la red.

- Las fluctuaciones de tensión son debidas principalmente a las variaciones rápidas de las cargas industriales, como las máquinas de soldar, los hornos de arco, las laminadoras.

2.6 Desequilibrios

Un sistema trifásico está desequilibrado cuando las tres tensiones no son iguales en amplitud y/o no están defasadas unas respecto a otras 120°. El grado de desequilibrio se define utilizando el método de las componentes de Fortescue, calculando la razón de la componente inversa (U_{1i}) (u homopolar (U_{1o})) de la fundamental respecto a la componente directa (U_{1d}) de la fundamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \text{ y } \Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|}$$

También puede utilizarse la fórmula aproximada siguiente:

$$\Delta U_i = \max_i \frac{V_i - V_{med}}{V_{med}},$$

siendo:

V_i = tensión de la fase i

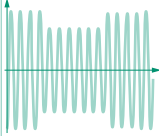
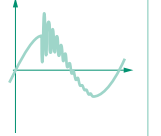
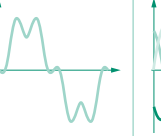
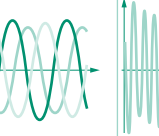
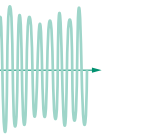
y

$$V_{med.} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}.$$

La tensión inversa (u homopolar) está provocada por las caídas de tensión que, a lo largo de las impedancias de la red, se producen debido a las corrientes inversas (u homopolares) producidas por las cargas desequilibradas que conducen a unas corrientes no idénticas en las tres fases (cargas BT conectadas entre fase y neutro, cargas monofásicas o bifásicas MT, como máquinas de soldar y hornos de inducción).

Los defectos monofásicos o bifásicos provocan los desequilibrios hasta que actúan las protecciones.

2.7 Resumen

Perturbaciones	Hueco de tensión	Sobre-tensiones	Armónicos	Desequilibrios	Fluctuaciones de tensión
Formas de onda características					
Origen de la perturbación					
■ Red					
□ Defecto de aislamiento, fallo de neutro					
□ Maniobras y ferresonancia					
□ Rayo					
■ Equipos receptores					
□ Motor asíncrono					
□ Motor síncrono					
□ Máquina de soldar					
□ Horno de arco					
□ Convertidor					
□ Cargas informáticas					
□ Alumbrado					
□ Ondulador o inversor					
□ Batería de condensadores					

 Fenómeno ocasional
 Fenómeno frecuente

3 Efectos de las perturbaciones en las cargas y procesos

Generalizando, cualquiera que sea la perturbación, los efectos pueden clasificarse de dos maneras diferentes:

■ **Efectos inmediatos:** maniobras intempestivas de contactores o de órganos de protección, mal funcionamiento o parada de una máquina. El impacto financiero de la perturbación es entonces directamente cuantificable.

■ **Efectos diferidos:** pérdidas energéticas, envejecimiento acelerado de los equipos debido a los calentamientos y a los esfuerzos electrodinámicos suplementarios producidos por las perturbaciones.

El impacto financiero (por ejemplo, sobre la productividad) es más difícilmente cuantificable.

3.1 Huecos de tensión y cortes

Los huecos de tensión y los cortes alteran el funcionamiento de numerosos aparatos conectados a la red. Son la causa más frecuente de los problemas de calidad de la energía. Un hueco o un corte de tensión de algunas centenas de milisegundo puede tener consecuencias nefastas durante varias horas.

Los sistemas más sensibles son:

■ las cadenas o líneas completas de fabricación continua cuyo proceso no tolera ninguna parada temporal de ninguno de sus elementos (impresión, siderurgia, papelera, petroquímica...),

■ los alumbrados y sistemas de seguridad (hospitales, balizamiento de los aeropuertos, locales de pública concurrencia, edificios de gran altura...),

■ los equipos informáticos (centros de proceso de datos, bancos, telecomunicaciones...),

■ los elementos auxiliares esenciales de centrales de producción de energía.

Los párrafos siguientes citan las consecuencias principales de los huecos de tensión y cortes en los principales equipos utilizados en los sectores industrial, terciario y doméstico.

Motor asíncrono

Durante un hueco de tensión, el par de un motor asíncrono (proporcional al cuadrado de la tensión) disminuye bruscamente y provoca una ralentización. Esta disminución de la velocidad de rotación es función de la amplitud y de la duración del hueco, de la inercia de las masas giratorias y de la característica par-velocidad de la carga arrastrada. Si el par que el motor desarrolla pasa a ser inferior al par resistente, el motor se va parando según su inercia.

Pasado el corte, el retorno de la tensión produce una sollicitación de corriente de reacceleración próxima a la intensidad de corriente de arranque, cuya duración depende de la duración del corte.

Cuando la instalación tiene muchos motores, sus reacceleraciones simultáneas pueden provocar una caída de tensión en las impedancias de la red aguas arriba, lo que alarga la duración del hueco y puede hacer que la reacceleración resulte difícil (rearranques largos con sobrecalentamiento) y hasta imposible (par motor inferior al par resistente).

La realimentación rápida (~ 150 ms), sin ningún tipo de precaución, de un motor asíncrono que está perdiendo velocidad puede llevar a una conexión en oposición de fase entre la tensión de la fuente y la tensión residual mantenida por los motores asíncronos. En este caso la primera cresta de corriente puede alcanzar hasta tres veces la corriente de arranque (15 a 20 In) (Cuaderno Técnico n° 161).

Estas sobreintensidades y las caídas de tensión que ellas producen tienen consecuencias para el motor (calentamientos adicionales y esfuerzos electrodinámicos en los arrollamientos, lo que puede deteriorar el aislamiento, y también variaciones bruscas de par, con sobreesfuerzos anormales en los acoplamientos y en los reductores, lo que provoca su envejecimiento prematuro y hasta su rotura) y también en los otros equipos, como los contactores (desgaste e incluso soldadura de los contactos). Las sobreintensidades pueden provocar el disparo de las protecciones generales de la instalación, lo que provoca la parada de todo el proceso.

Motor síncrono

Los efectos son aproximadamente iguales que en el caso de los motores asíncronos.

Sin embargo, los motores síncronos pueden soportar huecos de tensión más importantes (del orden del 50%) sin perder apenas velocidad, debido a su inercia, generalmente mayor, a las posibilidades de sobreexcitación y a la proporcionalidad de su par con la tensión. En caso de pérdida de sincronismo, el motor se para, y hay que volver a realizar todo el proceso de arranque, que es bastante complejo.

Accionadores

Los órganos de mando (contactores, interruptores automáticos con bobina de tensión mínima) alimentados directamente por la red son sensibles a los huecos de tensión cuya profundidad sobrepase el 25% de U_n . En efecto, para un contactor clásico, existe un valor de tensión mínima a respetar (tensión llamada de desprendimiento o caída) a partir de cual los polos se separan, convirtiéndose entonces un hueco de tensión (de algunas decenas de milisegundos) o un corte breve, en un corte largo (de varias horas).

Equipos de tipo informático

Los equipos informáticos (ordenadores, aparatos de medida) ocupan hoy un lugar destacado en la vigilancia y el control-mando de las instalaciones, la gestión y la producción. Todos estos equipos son sensibles a los huecos de tensión de una profundidad superior al 10% de U_n . La curva ITI (Information Technology Industry Council) -antigua CBEMA- indica, en la gráfica tiempo-amplitud, la tolerancia típica de los equipos informáticos a los huecos de tensión, cortes y sobretensiones (**figura 4**).

El funcionamiento fuera de estos límites lleva a pérdidas de datos, órdenes erróneas, paradas o averías en los equipos. Las consecuencias de la pérdida de funciones de los equipos dependen especialmente de las condiciones de reinicio cuando se restablece la tensión. Por ejemplo, ciertos equipos tienen su propio dispositivo de detección del hueco de tensión que permite salvaguardar los datos y garantizar la seguridad interrumpiendo el proceso de cálculo y las órdenes erróneas.

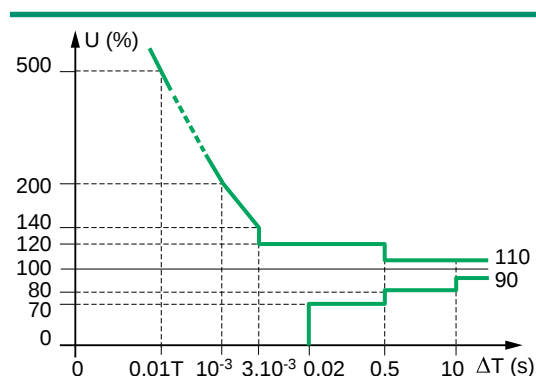


Fig. 4: Tolerancia típica definida por la curva ITI.

Máquinas a velocidad variable

Los problemas que suponen los huecos de tensión en los sistemas con variadores de velocidad son:

- imposibilidad de suministrar la tensión suficiente al motor (pérdida de par, ralentización),
- imposibilidad de funcionamiento de los circuitos de control alimentados directamente por la red,
- sobreintensidad al producirse el retorno de la tensión (recarga del condensador de filtro de los variadores),
- sobreintensidad y desequilibrio de corriente en caso de hueco de tensión en una sola fase,
- pérdida de control de los variadores de corriente continua cuando funcionan como inversores (frenado por recuperación de energía).

Generalmente, los variadores de velocidad se desconectan por defecto para un hueco de tensión superior al 15%.

Alumbrado

Los huecos de tensión provocan un envejecimiento prematuro de las lámparas de incandescencia y de los tubos fluorescentes.

Los huecos de tensión de profundidad superior o igual al 50% y con una duración del orden de 50 ms producen la extinción de las lámparas de descarga. En este caso se necesita apagar la lámpara durante algunos minutos, para permitir su enfriamiento, antes de reiniciar el encendido.

3.2 Armónicos

Sus consecuencias dependen del aumento, en tensión o en intensidad, de sus valores de cresta (ruptura dieléctrica) y de sus valores eficaces (calentamiento suplementario) y dependen también de su espectro en frecuencia (vibración y fatiga mecánica).

Sus efectos tienen siempre un impacto económico por el coste adicional debido a:

- un deterioro del rendimiento energético de la instalación (pérdidas de energía),
- un sobredimensionamiento de los equipos,
- una pérdida de productividad (envejecimiento acelerado de los equipos, disparos intempestivos).

Son probables las disfunciones más allá de una tasa de distorsión armónica de tensión del 8%; y entre el 5 y el 8%, ya empiezan a ser posibles.

■ Efectos inmediatos o a corto plazo

□ Disparos intempestivos de las protecciones: los armónicos tienen una influencia molesta principalmente en los dispositivos de control por sus efectos térmicos. En efecto, cuando los aparatos de control, y hasta los de protección, calculan el valor eficaz de la corriente a partir del valor de cresta, hay riesgo de error y de disparo intempestivo, incluso en funcionamiento normal, sin sobrecarga real.

□ Perturbaciones inducidas en los sistemas de corriente débil (telecomunicaciones, telemando, cadena hifi, pantalla de ordenador, televisor).

□ Vibraciones y ruidos acústicos anormales (cuadros BT, motores, transformadores).

□ Destrucción por sobrecarga térmica de condensadores.

Si la frecuencia de resonancia del conjunto condensador-red aguas arriba es próxima a algún orden de armónico, hay resonancia y amplificación del armónico correspondiente.

□ Pérdida de precisión de los aparatos de medida.

Un contador de energía, de inducción, de clase 2, da un error adicional del 0,3% con una tasa del 5% del armónico 5 en corriente y en tensión.

■ Efectos a largo plazo

Una sobrecarga en corriente provoca calentamientos suplementarios y, por tanto, un envejecimiento prematuro de los equipos:

□ calentamiento de las fuentes de energía: transformadores, alternadores (por aumento de las pérdidas Joule, de las pérdidas en el hierro),

□ fatiga mecánica (par pulsante en las máquinas asíncronas),

□ calentamiento de los receptores: los conductores de fases y del neutro, por aumento de las pérdidas de Joule y dieléctricas.

Los condensadores son particularmente sensibles a los armónicos, porque su impedancia disminuye proporcionalmente con el orden del armónico.

□ destrucción de equipos (condensadores, interruptores automáticos...).

Una sobrecarga y un calentamiento suplementario del conductor de neutro pueden ser consecuencia de la presencia de corrientes de armónicos de tercer orden y sus múltiplos en los conductores de fases que se suman en el neutro.

En el régimen de neutro TN-C, el conductor de neutro es el mismo que el conductor de protección. Ahora bien, este CPN interconecta todas las masas de la instalación incluidas las estructuras metálicas del edificio. Por tanto, las corrientes armónicas de 3^{er} orden y sus múltiplos van a circular en estos circuitos y provocar variaciones de potencial cuyas consecuencias son:

□ corrosión de piezas metálicas,

□ sobreintensidad en las conexiones de telecomunicación que conectan las masas de dos receptores (por ejemplo, impresora y ordenador),

□ radiación electromagnética que afecta a las pantallas (ordenadores, aparatos de laboratorio).

El cuadro de la **figura 5** resume los principales efectos de los armónicos, así como los niveles habituales admisibles.

Los interarmónicos perturban los receptores de telemando y provocan un fenómeno de parpadeo (flicker) (Cuaderno Técnico n° 176).

Material	Efectos	Límites
Condensadores de potencia	Calentamiento, envejecimiento prematuro (perforación), resonancia.	$I < 1,3 I_n$ (THD < 83%), ó $U < 1,1 U_n$ para 12 h/d en MT u 8 h/d en BT
Motores	Pérdidas y calentamientos suplementarios. Reducción de las posibilidades de utilización a plena carga. Par pulsante (vibraciones, fatiga mecánica). Molestias sonoras.	$FVH \leq 2\%$ para los motores asíncronos habituales
Transformadores	Pérdidas (en el hierro y en el cobre) y calentamientos suplementarios. Vibraciones mecánicas. Molestias sonoras.	
Interruptores automáticos	Disparos intempestivos (sobrepasar los valores de la tensión de cresta...).	$U_h/U_1 \leq 6$ a 12%
Cables	Pérdidas dieléctricas y óhmicas suplementarias (particularmente en el neutro en caso de presencia del tercer armónico).	THD $\leq 10\%$ $U_h/U_1 \leq 7\%$
Ordenadores	Transtornos funcionales.	$U_h/U_1 \leq 5\%$
Electrónica de potencia	Transtornos debidos a la forma de onda (conmutación, sincronización).	

$$FVH = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} U_h^2 / h} \quad (\text{Factor de variación armónica, según CEI 892})$$

Fig. 5: Efectos de los armónicos y límites habituales.

3.3 Sobreteniones

Sus consecuencias son muy diversas según el tiempo de duración, la repetitividad, la amplitud, el modo (común o diferencial), lo escarpado del frente de subida, la frecuencia:

- perforación del dieléctrico, que destruye el material sensible (componentes electrónicos),
- degradación de material por envejecimiento (sobretensiones no destructivas pero repetidas),
- corte largo provocado por la destrucción de material (pérdida de facturación para los distribuidores de energía, pérdidas de producción para los industriales),
- perturbaciones de los circuitos de control-mando y de comunicación de corriente débil (Cuaderno Técnico n° 187),

■ sobreesfuerzos electrodinámicos y térmicos (incendio) causados por:

- el rayo (normalmente).

Las redes aéreas son las más afectadas por el rayo, pero las instalaciones alimentadas por las redes subterráneas pueden sufrir sobreesfuerzos de tensión en caso de descarga de rayo cerca del emplazamiento.

- Las sobretensiones de maniobra que son repetitivas y cuya probabilidad de aparición es claramente superior a la del rayo y además, de más larga duración. Pueden llegar a producir defectos tan importantes como los del rayo.

3.4 Variaciones y fluctuaciones de tensión

Como las fluctuaciones tienen una amplitud que no excede de $\pm 10\%$, la mayor parte de los aparatos no resultan afectados. El principal efecto de las fluctuaciones de tensión es la fluctuación de la luminosidad de las lámparas (parpadeo o flicker) (Cuaderno Técnico nº 176). La molestia fisiológica (cansancio visual y nervioso) depende de la amplitud de las

fluctuaciones, de la cadencia de repetición de las variaciones, de la composición espectral y de la duración de la perturbación. Existe sin embargo un umbral de perceptibilidad (amplitud en función de la frecuencia de variación) definido por la CEI por debajo del cual el flicker o parpadeo no es visible.

3.5 Desequilibrios

El principal efecto es el sobrecalentamiento de las máquinas asíncronas trifásicas. En efecto, la reactancia inversa de una máquina asíncrona es equivalente a su reactancia durante la fase de arranque. La tasa de desequilibrio en corriente será por tanto varias veces la de la tensión de alimentación. Entonces, las corrientes de fase pueden diferir considerablemente, lo que

aumenta el calentamiento de la o de las fases recorridas por la corriente más elevada y reduce la esperanza de vida de la máquina.

En la práctica, es aceptable una tasa de desequilibrio de tensión del 1% durante un largo período de tiempo, y hasta el 1,5% durante algunos minutos.

3.6 Resumen

Equipos	Sensibilidad a las perturbaciones				
	Hueco de tensión < 0,5 s	> 0,5 s	Sobretensiones	Armónicos	Desequilibrios
■ Motor asíncrono					
■ Motor síncrono					
■ Actuador					
■ Variador de velocidad					
■ Carga informática, mando digital					
■ Horno a inducción					
■ Alumbrado					
■ Batería condensadores					
■ Transformador					
■ Ondulador					
■ Interruptor automático					
■ Cable					

4 Nivel de calidad de la energía

4.1 Metodología de evaluación

Aplicación contractual

El contrato debe indicar:

- la duración del contrato,
- los parámetros a medir,
- los valores contractuales,
- el(los) punto(s) de medida,
- las tensiones medidas: estas tensiones (entre fases y/o entre fases y neutro) deben ser las que alimentan los equipos,
- para cada uno de los parámetros medidos, debe de indicarse el método de medida, el intervalo de tiempo, el período de la medida (por ejemplo 10 minutos y 1 año para la amplitud de la tensión) y de los valores de referencia; por ejemplo, para los huecos de tensión y los cortes, hay que definir la tensión de referencia, los márgenes de detección y el límite entre cortes largos y cortes breves,
- la precisión de la medida,
- el método de determinación de las penalizaciones en caso de no respetarse los compromisos,
- las cláusulas en caso de desacuerdo en la interpretación de las medidas (intervención de una tercera parte...),
- acceso a los datos y su confidencialidad.

Mantenimiento correctivo

La búsqueda de soluciones para aplicar medidas correctivas se inicia normalmente después de producirse incidentes o disfunciones en la explotación.

En general, los pasos a seguir son:

- Recogida de datos

Su objeto es recoger informaciones como el tipo de cargas, la antigüedad de los componentes de la red y el esquema unifilar.

- Búsqueda de síntomas

Su objeto es identificar y localizar los equipos perturbados, determinar la hora y la fecha (fija o aproximada) del problema, la posible relación con las condiciones meteorológicas concretas (viento fuerte, lluvia, tormenta) o con una modificación reciente de la instalación (instalación de máquinas nuevas, modificación de la red).

- Conocimiento y comprobación de la instalación

En esta fase basta a veces determinar rápidamente el origen de la disfunción. Las condiciones de medio ambiente tales como la humedad, el polvo, la temperatura no deben de subestimarse. Debe de verificarse toda la instalación, y en particular, el cableado, los interruptores automáticos y los fusibles.

- Colocar aparatos de medida en la instalación

Esta etapa consiste en dotar el emplazamiento con aparatos de medida que permitan detectar y registrar el fenómeno origen del problema. Puede ser necesario colocar instrumentos en varios puntos de la instalación y en particular, si se puede, lo más cerca posible, del (o de los) equipo(s) perturbado(s).

El aparato detecta en qué circunstancias se sobrepasan los umbrales de los parámetros de medida de la calidad de la energía y registra los datos característicos del suceso (por ejemplo, fecha, hora, profundidad de un hueco de tensión, THD). También pueden guardar los datos de las formas de ondas justo antes, durante y después de la perturbación. La sensibilidad de los equipos debe de estar en consonancia con los umbrales a medir.

Cuando se utilizan aparatos portátiles, la duración de las medidas debe ser representativa del ciclo de funcionamiento de una fábrica (por ejemplo, una semana). Evidentemente, hay que esperar que la perturbación se reproduzca.

Los aparatos fijos permiten una vigilancia permanente de la instalación. Si estos aparatos están correctamente conectados y ajustados, puesto que registran cada perturbación, aseguran una función de prevención y detección. Las informaciones pueden visualizarse o localmente o a distancia, mediante una intranet o la red internet. Esto permite diagnosticar los fenómenos, y también anticiparse a los problemas (mantenimiento preventivo). Este es el caso de los aparatos de la gama Power Logic System (Circuito Monitor - Power Meter), Digipact y la generación última de interruptores automáticos Masterpact, equipados con un disparador Micrologic P (**figura 6**).

Los registros de perturbaciones que proceden de la red del distribuidor y que hayan causado los daños (destrucción de equipos, pérdida de producción) pueden ser también útiles en caso de negociación de indemnizaciones.

■ Identificación del origen

El trazado (forma de onda, perfil de valor eficaz) de la perturbación permite en general a los expertos localizar e identificar la fuente del problema (un defecto, un re arranque de motor, una conexión de una batería de condensadores...). En concreto, el conocimiento simultáneo del trazado o gráfica de la tensión y de la corriente permite determinar si el origen del problema se ubica aguas arriba o aguas abajo del punto de medida. En efecto, la perturbación puede proceder de la instalación o de la red del distribuidor.

■ Estudio y elección de soluciones

Se establecen la lista y los costes de las soluciones. La elección de la solución se efectúa frecuentemente comparando su coste con lo que se deja de ganar en caso de perturbación.

Después de aplicar una solución, es importante verificar, midiendo, su eficacia.

Optimización del funcionamiento de las instalaciones eléctricas

Esta preocupación por optimizar el funcionamiento de una instalación eléctrica se concreta en tres acciones complementarias:

- Economizar la energía y reducir las facturas de energía
- Sensibilizar de los costes a los usuarios.

□ Asignar internamente los costes (por unidad, por servicio o por línea de producto).

□ Localizar los posibles ahorros.

□ Administrar los picos de consumo (desconexiones o desenganches, fuentes autónomas).

□ Optimizar el contrato de energía (reducción de la potencia contratada).

□ Mejorar el factor de potencia (reducción de la potencia reactiva).

■ Asegurar la calidad de la energía

□ Visualizar y vigilar los parámetros de medida de la calidad de la energía.

□ Detectar por anticipado los problemas (vigilancia de los armónicos y de la corriente de neutro) para un mantenimiento preventivo.

■ Velar por la continuidad del servicio

□ Optimizar el mantenimiento y la explotación.

□ Conocer la red en tiempo real.

□ Vigilar el plan de protección.

□ Diagnosticar los defectos.

□ Después de un defecto, reconfigurar la red.

□ Asegurar una conmutación automática de fuentes.

Existen programas informáticos que aseguran el control-mando y la vigilancia de la instalación. Permiten, por ejemplo, detectar y guardar archivados los acontecimientos, vigilar, en tiempo real, los interruptores automáticos y los relés de protección, gobernar a distancia los interruptores automáticos y, de manera general, explotar las posibilidades de los aparatos comunicantes (**figura 6**).

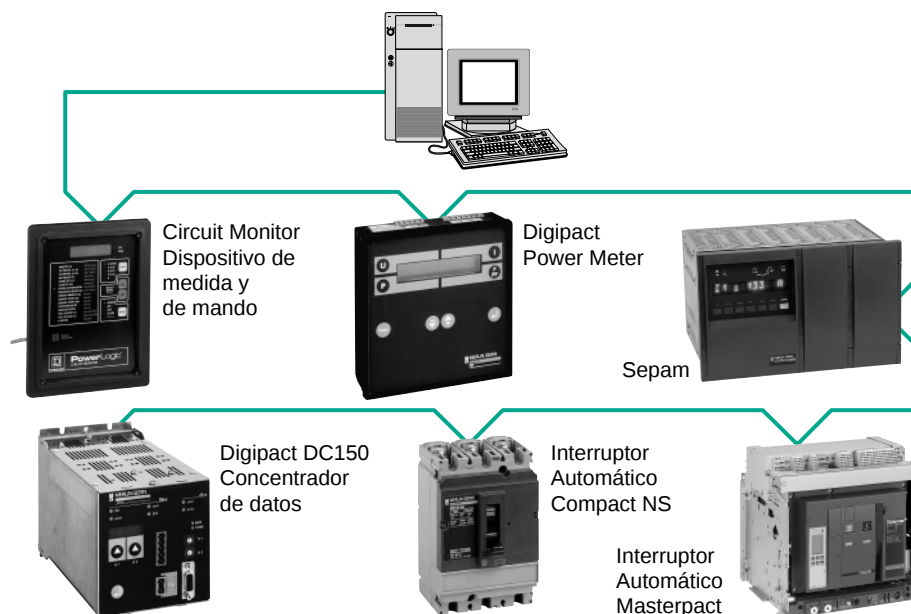


Fig. 6: Algunos productos con posibilidad de comunicación (Merlin Gerin).

4.2 La CEM y los niveles de planificación

La compatibilidad electromagnética (CEM)

La compatibilidad electromagnética es la aptitud de un aparato o de un sistema para funcionar en su medio ambiente electromagnético de manera satisfactoria y sin producir él mismo las perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo elemento que se encuentra en su medio ambiente (VEI 60050 [161]).

El objetivo de la compatibilidad electromagnética es asegurar que:

- La emisión por separado de cada fuente de perturbaciones es tal que la emisión conjunta de todas las fuentes no excede los niveles de perturbación esperados en el medio ambiente.
- El nivel de inmunidad de los equipos permite que trabajen satisfactoriamente con el nivel de perturbaciones previsto, según las tres clases de medio ambiente (figura 7).

Hay que destacar que el medio ambiente está determinado también por las características específicas de la instalación del usuario (esquema eléctrico de la instalación, tipos de cargas) y por las características de la tensión de alimentación.

Un medio de asegurar los niveles de compatibilidad es especificar los límites de emisión de las instalaciones de los usuarios con un margen suficiente por debajo del nivel de compatibilidad. En la práctica, esto es factible en instalaciones de gran potencia (CEI 61000-3-6, CEI 61000-3-7). Para las otras instalaciones (por ejemplo BT) las normas «de producto» especifican los límites de emisión por familias de equipos (por ejemplo, la norma CEI 61000-3-2 fija los límites de emisión armónica en corriente para las cargas de menos de 16 A).

En ciertos casos, es necesario aplicar determinados medios técnicos para mantener los niveles de emisión por debajo de los niveles prescritos.

Características de la tensión

El método permite evaluar las características reales de la tensión en un punto dado de la red y comparar con los límites preestablecidos, basándose en un cálculo estadístico en un período dado de medidas. Por ejemplo, para la tensión armónica, no deben de sobrepasarse los límites especificados con un período de medida de una semana y el 95% de los valores eficaces, calculados en períodos sucesivos de 10 minutos.

Niveles de planificación

Estos son objetivos internos de calidad especificados por el explotador de la red y que se utilizan para valorar la incidencia en la red de todas las cargas perturbadoras. Normalmente, son iguales o inferiores a los niveles de compatibilidad.

Resumen

La figura 8 resume las relaciones entre los diferentes niveles de perturbación.

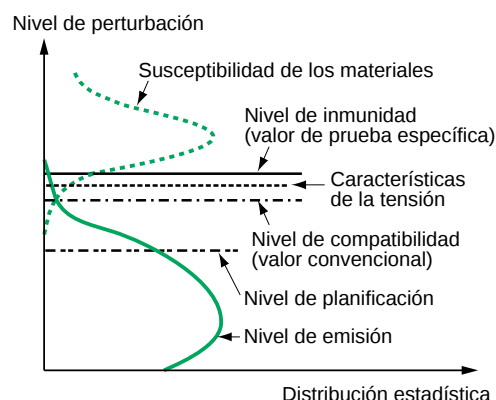


Fig. 8: Relaciones entre los diferentes niveles de perturbación.

Perturbaciones	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Variaciones de tensión $\Delta U/U_N$	$\pm 8\%$	$\pm 10\%$	+ 10% -15%
Huecos de tensión ⁽¹⁾ $\Delta U/U_N$ ΔT (número de semiperíodo)	10% a 100% 1	10% a 100% 1 a 300	10% a 100% 1 a 300
Cortes breves (s)	ninguno	—	≤ 60
Desequilibrio de tensión U_i/U_d	2%	2%	3%
Variaciones de frecuencia $\Delta f/f_N$	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$

(1) Estos valores no son niveles de compatibilidad: son datos a título orientativo.

Fig. 7: Los niveles de compatibilidad según la norma CEI 61000-2-4.

5 Soluciones para mejorar la QEE

Una pérdida de calidad puede modificar el comportamiento o los resultados y hasta provocar la destrucción de los equipos y de los procesos que de ellos dependen, con posibles consecuencias para la seguridad de las personas y con costes económicos adicionales.

Se tienen tres elementos implicados:

- uno o varios productores de perturbaciones,
- uno o varios receptores sensibles a estas perturbaciones,
- y entre ambos, un camino de propagación de estas perturbaciones.

Las soluciones consisten en actuar sobre todos o parte de estos tres elementos, globalmente (sobre la instalación) o localmente (sobre uno o varios receptores).

Estas soluciones pueden aplicarse para:

- corregir una disfunción en una instalación,
- actuar preventivamente ante la conexión de cargas perturbadoras,
- obtener la conformidad de la instalación respecto a las normas o recomendaciones del distribuidor de energía,
- reducir la factura energética (reducción de la potencia contratada y del consumo).

Puesto que los receptores no son sensibles todos a las mismas perturbaciones y sus niveles de sensibilidad son diferentes, la solución adoptada, además de ser la mejor desde un punto de vista técnico-económico, debe garantizar un nivel de QEE, medible y adaptado a las necesidades reales.

Es imprescindible un diagnóstico previo, efectuado por especialistas, para determinar la naturaleza de las perturbaciones contra las que hay que prevenirse (por ejemplo, las soluciones son diferentes según la duración de un corte).

La calidad de este diagnóstico determinará la eficacia de la solución aplicada. También deben de ser especialistas los que efectúen el estudio y elijan la solución y los responsables de la instalación y el mantenimiento.

La utilidad de la solución y de su aplicación dependen:

- Del nivel de prestaciones deseado

Una disfunción puede ser inadmisibles si pone en juego la seguridad de las personas (hospitales, balizamiento de los aeropuertos, alumbrados y sistemas de seguridad de locales de pública concurrencia, sistemas auxiliares de centrales...).

- De las consecuencias financieras de la disfunción

Toda parada no programada, incluso muy corta, de ciertos procesos (siderurgia, petroquímica, fabricación de semiconductores), lleva a una pérdida o a una no calidad de la producción, e incluso a volver a poner en condiciones adecuadas los medios de producción.

- Del tiempo requerido para el retorno de la inversión

Es la razón entre las pérdidas financieras (materias primas, pérdidas de producción...) provocadas por la no-calidad de la energía eléctrica y por el coste (estudio, puesta en marcha, funcionamiento, mantenimiento) de la solución.

También hay que tener en cuenta otros criterios, como las costumbres, la reglamentación y los límites de perturbaciones impuestas por el distribuidor.

5.1 Huecos de tensión y cortes

La arquitectura de la red, los automatismos de realimentación, el nivel de fiabilidad de los equipos, la existencia de un sistema de control y mando y hasta la política de mantenimiento juegan un papel importante en la reducción y la eliminación del tiempo de corte.

Para escoger una solución eficaz, ante todo, es necesario realizar un buen diagnóstico. Por ejemplo, en el punto de acometida (entrada eléctrica del cliente), es importante saber si el hueco de tensión procede de la instalación del cliente (con aumento correspondiente de la intensidad) o de la red (sin aumento).

Existen diversas soluciones.

Reducción del número de huecos de tensión y de cortes

Los distribuidores pueden adoptar ciertas disposiciones como mejorar la fiabilidad de las infraestructuras (mantenimiento preventivo programado, renovación de las instalaciones, soterramiento de las mismas), reestructurar las redes (acortamiento de la longitud de las acometidas). Pueden también, en los sistemas con neutro impedante, sustituir los interruptores de desenganche-reenganche automático por interruptores automáticos shunt que tienen la gran ventaja de no provocar cortes en la salida averiada en caso defecto transitorio a tierra (reducción del número de cortes breves).

Estos interruptores automáticos provocan la extinción de los defectos fugitivos a tierra anulando durante al menos 300 ms la tensión en bornes del defecto, por la puesta a tierra de la única fase en defecto en el juego de barras del centro de transformación. Esto no afecta a la tensión entre fases que alimenta a los clientes.

Reducción de la duración y de la profundidad de los huecos de tensión

- En la red
- Aumento de las posibilidades de bucle (nuevos centros de transformación, interruptores de bucle).
- Mejora de las prestaciones de las protecciones eléctricas (selectividad, automatismo de reconexión de la alimentación, telemando de los órganos de la red, televigilancia, sustitución de explosores por limitadores de sobretensiones).
- Aumento de la potencia de cortocircuito de la red.

■ En los equipos

Disminución de la potencia absorbida por las cargas de gran potencia durante la conexión de los compensadores automáticos en tiempo real y de los arranques progresivos que limitan los picos de corriente (y también las solicitaciones mecánicas).

Insensibilización de las instalaciones industriales y terciarias

El principio general de insensibilización contra el hueco de tensión y los cortes es compensar la falta de energía por un dispositivo de reserva de energía intercalado entre la red y la instalación. Esta reserva debe tener una autonomía superior a la duración del defecto de tensión del que protege.

Las informaciones necesarias a la elección del dispositivo de insensibilización son:

- calidad de la fuente (nivel máximo de perturbaciones presente),
- exigencias de los receptores (sensibilidad en cuanto a duración y profundidad).

Sólo se puede llegar al equilibrio mediante un análisis fino de los procesos y de las consecuencias técnicas y financieras de la perturbación.

Existen diversas soluciones de insensibilización, según la potencia necesaria para la instalación y la duración del hueco de tensión o del corte.

Frecuentemente es interesante estudiar las soluciones distinguiendo entre la alimentación de los sistemas de mando, control y regulación, y la alimentación de los motores y de los consumidores de gran potencia. En efecto, un hueco de tensión o un corte (incluso breve) puede ser suficiente para hacer caer todos los contactores cuyas bobinas se alimentan del circuito de potencia, con lo que los receptores alimentados por estos contactores ya no reciben alimentación hasta el retorno de la tensión.

Insensibilización del control-mando

La insensibilización de unos procesos está generalmente basada en la insensibilización del control-mando.

El control-mando de los equipos consume, en general, poca energía y es sensible a las perturbaciones; es pues con frecuencia más económico insensibilizar únicamente el control-mando y no la alimentación de potencia de los equipos.

Para mantener alimentado el sistema de mando de las máquinas se requiere:

- que no haya peligro para la seguridad del personal y de los equipos hasta el retorno de la red,
- que las cargas y los procesos admitan un corte breve del circuito de potencia (inercia fuerte o ralentización tolerada) y puedan reaccelerar al vuelo al volver la tensión,
- que la fuente de potencia pueda asegurar la alimentación del conjunto de receptores en régimen permanente (caso de una fuente de sustitución) pero también que pueda soportar la gran corriente de llamada provocada por el re arranque simultáneo de numerosos motores.

Las soluciones consisten en alimentar todas las bobinas de los contactores con una fuente auxiliar segura (batería o grupo que gira con un volante de inercia) o utilizar un relé temporizado a la conexión o incluso en conectar un rectificador y un condensador en paralelo con la bobina.

Insensibilización de la alimentación de potencia de los equipos

Ciertos receptores no soportan los niveles de perturbaciones alcanzados ni, incluso, los huecos de tensión ni los cortes. En caso de cargas «prioritarias», como ordenadores, alumbrados y sistemas de seguridad (hospitales, balizamiento de los aeropuertos, locales de pública concurrencia) y las cadenas de fabricación continua (fabricación de semiconductores, centros de cálculo, fabricación de cemento, tratamiento de aguas, logística, industria del papel, siderurgia, petroquímica, etc.).

En función de la potencia necesaria para la instalación y de la duración del hueco de tensión o del corte, la elección puede hacerse entre las diversas soluciones técnicas siguientes:

■ Sistemas de alimentación estática ininterrumpida (SAI)

Un SAI está constituido por tres elementos principales:

- un rectificador-cargador, alimentado por la red, que transforma la tensión alterna en tensión continua,
- una batería, que se mantiene cargada, que, al producirse un corte, suministra la energía necesaria a la alimentación de la carga a través del ondulador,
- un ondulador, que transforma la corriente continua en corriente alterna.

Se utilizan dos tecnologías: on-line y off-line.

□ La tecnología on-line

En funcionamiento normal, la alimentación es suministrada permanentemente por el ondulador, sin descargar la batería. Por ejemplo, el caso de los onduladores Comet, Galaxy de la marca MGE-UPS. Aseguran la continuidad (sin cortes de conmutación) y la

calidad (regulación de tensión y de frecuencia) de la alimentación para las cargas sensibles de algunas centenas a varios millares de kVA.

Para conseguir más potencia y para asegurar la redundancia, pueden ponerse en paralelo varios SAI.

En caso de sobrecarga, los receptores se alimentan a través del contactor estático (**figura 9**) desde la red 2 (que puede ser la misma que la red 1).

El paso a mantenimiento se realiza sin corte mediante un by-pass de mantenimiento.

□ La tecnología off-line (o stand-by)

Se emplea para aplicaciones que no sobrepasan unos pocos kVA.

En funcionamiento normal, los receptores se alimentan directamente de la red. En caso de caída de la red o de tensión fuera de límites, la utilización se transfiere automáticamente al ondulador. Esta conmutación provoca un corte de 2 a 10 ms.

■ La conmutación de redes

Un dispositivo da la orden de conmutación de la fuente principal a una fuente de sustitución (e inversamente) para la alimentación de las cargas prioritarias y, si es necesario, da la orden de desconexión de las cargas no prioritarias. Existen tres tipos de conmutación, según la duración de transferencia (Δt):

- síncrono ($\Delta t = 0$),
- con corte ($\Delta t = 0,2$ a 30 s),
- pseudo-síncrono ($0,1 \text{ s} < \Delta t < 0,3 \text{ s}$).

Estos dispositivos obligan a precauciones especiales (Cuaderno Técnico n° 161). Por ejemplo, cuando la instalación tiene muchos motores, sus reaceleraciones simultáneas provocan una caída de tensión que puede impedir el arranque o provocar arranques

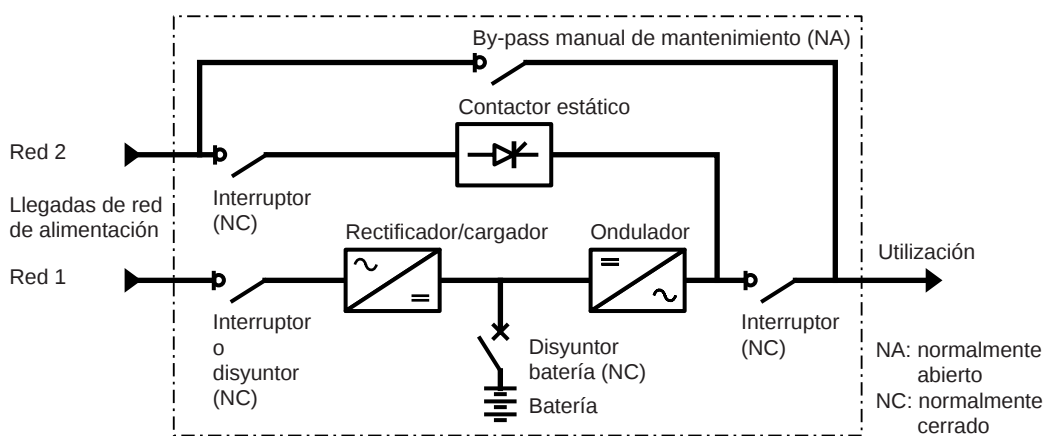


Fig. 9: Esquema de principio de funcionamiento de una alimentación sin interrupción (SAI) on-line.

demasiado largos (con riesgo de calentamiento). Entonces es aconsejable prever un autómata que realice un re arranque escalonado de los motores prioritarios, particularmente cuando se utiliza una fuente de sustitución (de socorro) de poca potencia de cortocircuito.

Esta solución se aplica cuando una instalación no puede soportar un corte largo, superior a algunos minutos, y/o necesita una gran potencia disponible. Puede también preverse como complemento de un SAI.

■ Grupo a tiempo cero

En ciertas instalaciones, la autonomía necesaria en caso de corte es tal que se instala un grupo electrógeno (las baterías supondrían costes prohibitivos y problemas de realización técnica o problemas de instalación). En caso de corte de red, esta solución permite efectuar, gracias a la autonomía de la batería o a la inercia de un volante, el arranque del grupo electrógeno, esperar que alcance su velocidad de régimen, y ordenar la desconexión-conexión sin corte mediante un conmutador de fuentes automático.

■ Compensadores electrónicos

Estos dispositivos electrónicos modernos compensan en una cierta medida los huecos de

tensión y los cortes con un corto tiempo de respuesta; por ejemplo, el compensador automático en tiempo real efectúa una compensación en tiempo real de la potencia reactiva; está especialmente bien adaptado para cargas que varían rápidamente y de manera importante (soldadores, elevadores, prensas, machacadoras, arranque de motores...).

La parada adecuada

Si hay que soportar que se produzca una parada, es especialmente importante impedir un re arranque no controlado cuando un re arranque intempestivo presenta un riesgo para el operador que está en la máquina (sierra circular, máquina giratoria) o para el equipo (depósito de compresores todavía con presión o escalonamiento en el tiempo de re arranque de compresores de equipos de aire acondicionado, bombas de calor o grupos frigoríficos) o para la aplicación (necesidad de controlar el re arranque de la fabricación). Así, un autómata puede asegurar un re arranque automático del proceso, según una secuencia de re arranque preestablecida, cuando las condiciones vuelven a ser normales.

Resumen (ver tabla)

Potencia de la instalación	Duración (valores indicativos) y exigencias técnicas						Solución de desensibilización
	0 a 100 ms	100 ms à 400 ms	400 ms a 1 s	1 s a 1 min	1 min a 3 min	> 3 min	
Algunos VA							Temporización de los contactores.
							Alimentación en cc con reserva por capacidad.
< 500 kVA							Grupo giratorio con volante de inercia.
< 1 MVA							Conmutación de fuentes (grupo electrógeno diesel).
< 300 kVA	Entre 15 minutos y varias horas, según la capacidad de la batería.						Alimentación en cc con reserva por batería.
< 500 kVA	La conmutación de fuentes de emergencia puede provocar un corte breve.						Grupo giratorio con volante de inercia y motor térmico o fuente de emergencia.
< 500 kVA	Entre 15 minutos y varias horas, según la capacidad de la batería.						Motor de cc con una batería y un alternador.
< 1 MVA (hasta 4.800 kVA con varios SAI en paralelo)	Entre 10 minutos (standard) y varias horas, según la capacidad de la batería.						SAI.

	Sistema de desensibilización eficaz
	Sistema de desensibilización ineficaz

5.2 Armónicos

Existen al menos tres formas posibles para suprimirlos o, al menos, reducir su influencia. Se dedica un párrafo específico al tema de las protecciones.

- Reducción de las corrientes armónicas producidas

- Inductancia de línea

Se coloca una inductancia trifásica en serie con la alimentación (o integrada en el bus de cc de los convertidores de frecuencia), con lo que se reducen los armónicos de corriente de línea (en particular, los de orden elevado) y por tanto, el valor eficaz de la corriente absorbida, y también la distorsión en el punto de conexión del convertidor. Además, es posible instalarlo sin intervenir en el generador de armónicos y utilizar inductancias comunes a diversos variadores.

- Utilización de rectificadores dodecafásicos

Esta solución consigue, por combinación de las corrientes, eliminar en el primario los armónicos de orden más bajo, como el 5º y 7º (frecuentemente, los más molestos, por su mayor amplitud). Necesita un transformador con dos secundarios, uno en estrella y otro en triángulo, consiguiéndose no generar armónicos más que de orden $12k \pm 1$.

- Aparatos de muestreo senoidal (Cuaderno Técnico nº 183)

Este método consiste en utilizar convertidores estáticos cuya etapa rectificadora utilice la técnica de conmutación PWM (Pulse Width Modulation) que absorbe una corriente senoidal.

- Modificación de la instalación

- Inmunizar las cargas sensibles con la ayuda de filtros

- Aumentar la potencia de cortocircuito de la instalación

- Desclasificar los equipos

- Arrinconar o confinar las cargas perturbadoras

Ante todo, hay que conectar los equipos sensibles lo más cerca posible de su fuente de alimentación.

A continuación, hay que identificar, y después separar, las cargas perturbadoras de las cargas sensibles, por ejemplo alimentándolas desde fuentes separadas o mediante transformadores dedicados exclusivamente a ellas. Todo esto sabiendo que las soluciones que consisten en actuar sobre la estructura de la instalación son, en general, pesadas y costosas.

- Protecciones y sobredimensionamiento de los condensadores

La elección de esta solución depende de las características de la instalación. Una regla simplificada permite elegir el tipo de equipo con Gh (potencia aparente de todos los generadores de armónicos que están alimentados por el mismo juego de barras que los condensadores) y Sn (potencia aparente de el o los trafos aguas arriba):

- si $Gh/Sn \leq 15\%$ es conveniente utilizar equipos de tipo estándar,

- si $Gh/Sn > 15\%$, hay que pensar en dos soluciones:

- 1.-** Caso de redes contaminadas

($15\% < Gh/Sn \leq 25\%$): hay que sobredimensionar en corriente la aparatura y las conexiones en serie; y, en tensión, los condensadores.

- 2.-** Caso de redes muy contaminadas

($25\% < Gh/Sn \leq 60\%$): hay que asociar bobinas (selfs) antiarmónicos a los condensadores sintonizados a una frecuencia inferior a la frecuencia del armónico más bajo (por ejemplo, 215 Hz para una red de 50 Hz) (**figura 10**). Esto elimina los riesgos de resonancia y contribuye a reducir los armónicos.

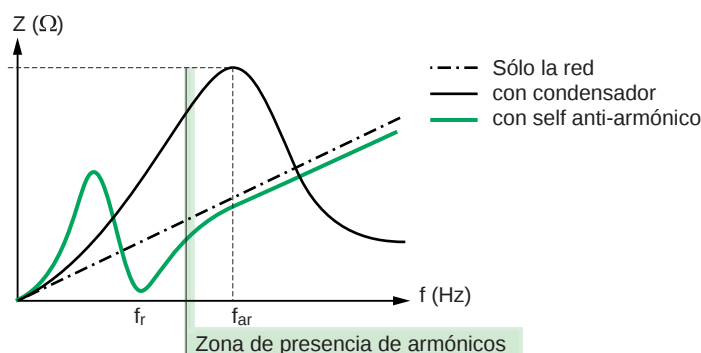


Fig. 10: Efectos de una self (autoinducción) antiarmónicos en la impedancia de una red.

■ Filtrado

En el caso de $Gh/S_n > 60\%$, el cálculo y la instalación del filtro de armónico deben ser realizados por especialistas (**figura 11**).

□ Filtro pasivo (Cuaderno Técnico nº 152)

Consiste en colocar una impedancia baja a las frecuencias a atenuar mediante una adecuada configuración de componentes pasivos (inductancia, condensador, resistencia). Esta unidad se instala en derivación con la red. Para filtrar varias componentes, pueden ser necesarios varios filtros pasivos en paralelo. El dimensionamiento de los filtros armónicos

debe de ser cuidadoso: un filtro pasivo mal diseñado puede conducir a resonancias cuyo efecto es amplificar las frecuencias que no eran perjudiciales antes de su instalación.

□ Filtro activo (Cuaderno Técnico nº 183)

Consiste en neutralizar los armónicos emitidos por la carga analizando los armónicos consumidos por la carga y reconstruir la misma corriente armónica con la fase conveniente. Es posible poner en paralelo varios filtros activos. Un filtro activo puede ser, por ejemplo, asociarse a un SAI para reducir los armónicos inyectados aguas arriba.

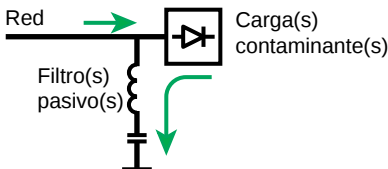
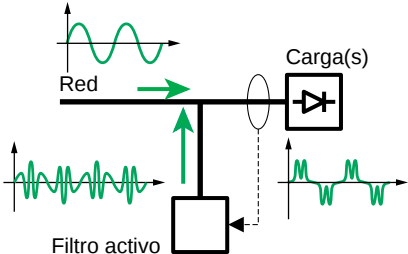
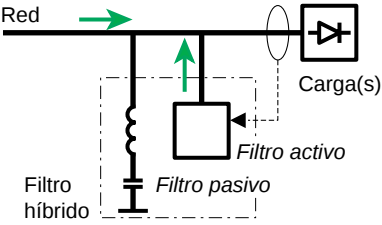
Filtro	Principio	Características
Pasivo	Derivación mediante un circuito LC sintonizado a cada una de las frecuencias del armónico a eliminar. 	■ Sin límites en corriente armónica. ■ Se asegura la compensación de energía reactiva. ■ Eliminación de uno o varios órdenes de armónicos (normalmente: 5, 7, 11). Un filtro para uno o dos de los rangos a compensar. ■ Riesgo de amplificación de los armónicos en caso de modificación de la red. ■ Riesgo de sobrecarga por perturbación exterior. ■ Filtro «de red» (global). ■ Estudio caso por caso.
Activo	Generación de una corriente que anula todos los armónicos creados por la carga. 	■ Solución que se adapta bien para el filtrado de «una máquina» (local). ■ Filtrado de una gran banda de frecuencias (eliminación de los armónicos desde el rango 2 al 25). ■ Se autoadapta: □ modificación de la red sin influencia, □ se adapta a todas las variaciones de la carga y del espectro armónico, □ solución evolutiva y flexible en función de cada tipo de carga. ■ Estudio simplificado.
Híbrido		Abarca las ventajas de las soluciones de filtrado pasivo y activo y cubre un amplio margen de potencias y prestaciones: ■ Filtrado de un ancho margen de frecuencias (eliminación de armónicos del 2º al 25º). ■ Compensación de energía reactiva. ■ Gran capacidad de filtrado en corriente. ■ Buena solución técnico-económica para un filtrado «de red».

Fig. 11: Principios y características del filtrado pasivo, activo e híbrido.

□ Filtro híbrido

Se compone de un filtro activo y un filtro pasivo sintonizado con el armónico preponderante (por ejemplo, el 5º) y que suministra la energía reactiva necesaria.

■ Caso particular: los interruptores automáticos (Cuaderno Técnico nº 182)

Los armónicos pueden provocar disparos intempestivos de los dispositivos de protección; para evitarlos, conviene escoger bien estos aparatos.

Los interruptores automáticos pueden estar equipados con dos tipos de relés disparadores, magnetotérmicos o electrónicos.

Los primeros (magnetotérmicos) son especialmente sensibles a los armónicos debido a sus captadores térmicos que «ven» correctamente la carga real que sufren los conductores por la presencia de los armónicos.

Por este motivo, se adaptan bien al uso, (especialmente doméstico e industrial) en circuitos de intensidades pequeñas.

Los segundos (electrónicos), por su sistema de cálculo de las intensidades que lo atraviesan, pueden tener el riesgo de disparo intempestivo, por lo que hay que escoger bien estos aparatos y prestar atención al hecho de que miden el verdadero valor eficaz de la corriente (RMS). Estos aparatos tienen entonces la ventaja de seguir mejor la evolución de la temperatura de los cables, particularmente en el caso de cargas con funcionamiento cíclico pues su memoria térmica es mejor que la de los termoelementos de calentamiento indirecto.

■ La desclasificación

Esta solución, aplicable a ciertos equipos, es una solución fácil y con frecuencia suficiente, para los problemas ocasionados por los armónicos.

5.3 Sobretensiones

Una buena coordinación del aislamiento consiste en lograr la protección de personas y de equipos contra las sobretensiones con el mejor compromiso técnico-económico posible.

Se necesita (Cuaderno Técnico nº 151):

- conocer el nivel y la energía de las sobretensiones que puedan existir en la red,
- escoger el nivel de resistencia a las sobretensiones de los componentes de la red que permita soportar estos valores,
- utilizar protecciones cuando sea necesario.

Evidentemente, las soluciones a aplicar dependen del tipo de sobretensiones que se encuentren.

Sobretensiones a frecuencia industrial

- Desconectar todos o parte de los condensadores cuando hay poca carga.
- Evitar configuraciones con riesgo de ferorresonancia o introducir pérdidas (resistencias de amortiguamiento) que amortigüen el fenómeno (Cuaderno Técnico nº 190).

Sobretensiones de maniobra

- Limitar los transitorios provocados por la maniobra de condensadores mediante la instalación de bobinas de choque (self) y resistencias de preinserción. Los compensadores estáticos automáticos, que

permiten controlar el instante de conexión, están particularmente adaptados a aplicaciones BT, pero no soportan las sobretensiones transitorias (autómatas industriales, informática).

- Colocar inductancias de línea aguas arriba de los convertidores de frecuencia para limitar los efectos de las sobretensiones transitorias.

- Utilizar, en la acometida BT, interruptores automáticos con diferenciales selectivos (tipo «S») e interruptores automáticos diferenciales superinmunizados de tipo «SI» ($I\Delta n = 30 \text{ mA}$ y 300 mA). Su utilización evita disparos intempestivos debidos a corrientes de fuga transitorias: sobretensiones atmosféricas, de maniobra, conexión de circuitos con gran capacidad respecto a tierra (filtros capacitivos conectados a tierra, redes de cables extensas), lo que provoca la circulación de corriente aguas abajo del DDR (Dispositivo de corriente Diferencial Residual) a través de las capacidades a la tierra de la red.

Sobretensiones atmosféricas

■ Protección primaria

Protege el edificio y su estructura contra los impactos directos del rayo (pararrayos, jaulas malladas (de Faraday), cables de guarda / cable de tierra).

■ Protección secundaria

Protege los equipos contra las sobretensiones atmosféricas que siguen a la descarga de rayo.

Los limitadores de sobretensión (cada vez menos, explosores) se instalan en los puntos de las redes AT y MT, especialmente expuestas, y a la entrada de los centros de transformación MT/BT (Cuaderno Técnico nº 151).

En BT, se instalan a la vez, lo más arriba posible de la instalación BT (a fin de proteger lo más globalmente posible) y lo más cerca posible de los receptores eléctricos. A veces, es necesaria la instalación en cascada de limitadores de sobretensiones: uno, en cabeza de la instalación, y otro, lo más cerca posible de los receptores (Cuaderno Técnico nº 179). A un limitador de sobretensiones BT siempre se le

asocia un dispositivo de desconexión. Por otra parte, la utilización de un interruptor automático diferencial y selectivo en la acometida BT, evita que la derivación de corriente a tierra a través del limitador provoque el disparo intempestivo del interruptor automático de entrada, lo que es incompatible con ciertos receptores (congelador, programador...). Hay que indicar que las sobretensiones pueden propagarse hasta un aparato por otras vías distintas de la alimentación eléctrica: las líneas telefónicas (teléfono, fax), los cables coaxiales (conexiones informáticas, antenas de televisión). Existen en el mercado protecciones específicas para ello.

5.4 Fluctuaciones de tensión

Las fluctuaciones producidas por las cargas industriales pueden afectar a un gran número de consumidores alimentados por la misma fuente. La amplitud de la fluctuación depende de la razón entre la impedancia del aparato perturbador y la de la red de alimentación. Las soluciones consisten en:

- Cambiar el tipo de alumbrado

Las lámparas fluorescentes tienen una sensibilidad menor que las de incandescencia.

- Instalar una alimentación sin interrupción

Puede resultar rentable cuando los usuarios afectados están identificados y agrupados.

- Modificar el perturbador

Cambiar el sistema de arranque de los motores con arranques frecuentes permite, por ejemplo, reducir las sobreintensidades.

- Modificar la red

□ Aumentar la potencia de cortocircuito conectando los circuitos de alumbrado lo más cerca posible de la alimentación.

□ Alejar «eléctricamente» la carga perturbadora de los circuitos de alumbrado, alimentando la carga perturbadora con un transformador independiente.

- Utilizar un compensador automático

Este equipo realiza una compensación en tiempo real, fase a fase, de la potencia reactiva. El flicker puede reducirse entre un 25% y un 50%.

- Colocar una reactancia serie

Colocando una reactancia serie aguas arriba de un horno de arco, se reduce la corriente de conexión, y con ello, la tasa de flicker en un 30%.

5.5 Desequilibrios

Las soluciones consisten en:

- equilibrar las cargas monofásicas en las tres fases,

■ disminuir la impedancia de la red aguas arriba de los generadores de desequilibrio, aumentar las potencias de los transformadores y la sección de los cables,

- prever una protección adaptada de las máquinas,

■ utilizar cargas L, C adecuadamente conectadas (montaje de Steinmetz).

5.6 Resumen

Tipos de perturbación	Orígenes	Consecuencias	Ejemplos de soluciones (equipos específicos y modificaciones)
Variaciones y fluctuaciones de tensión	Variaciones importantes de carga (máquinas de soldar, hornos de arco...).	Fluctuación de la luminosidad de las lámparas (parpadeo o flicker).	Compensador electromecánico de energía reactiva, compensador automático en tiempo real, compensador electrónico en serie, regulador de carga.
Huecos de tensión	Cortocircuito, conmutación de cargas de gran potencia (arranque de motores...).	Perturbación o parada del proceso: pérdida de datos, datos erróneos, caída de contactores, bloqueo de variadores de velocidad, ralentización o pérdida de inercia de motores, extinción de lámparas de descarga.	SAI, compensador automático en tiempo real, regulador electrónico dinámico de tensión, arranque progresivo, compensador electrónico serie. Aumentar la potencia de cortocircuito (Pcc). Modificar la selectividad de las protecciones.
Cortes	Cortocircuito, sobrecargas, mantenimiento, disparos intempestivos.		SAI, conmutación mecánica de fuentes, conmutación estática de fuentes, grupos electrógenos sin corte, interruptores automáticos shunt, telecontrol.
Armónicos	Cargas no lineales (variadores de velocidad, hornos de arco, máquinas de soldar, lámparas de descarga, tubos fluorescentes...).	Sobrecargas (de conductor de neutro, de fuentes...), disparos intempestivos, envejecimiento acelerado, degradación del rendimiento energético, pérdida de productividad.	Choques (self) antiarmónicos, filtro pasivo o activo, filtro híbrido, inductancia de línea. Aumentar la Pcc. Agrupar las cargas perturbadoras. Desclasificar los equipos.
Interarmónicos	Cargas fluctuantes (hornos de arco, máquinas de soldar...), convertidores de frecuencia.	Perturbación de las señales de tarificación, parpadeo (flicker).	Reactancia en serie.
Sobretensiones transitorias	Maniobra de aparamenta y de condensadores, rayo.	Bloqueo de variadores de velocidad, disparos intempestivos, destrucción de la aparamenta, incendios, pérdidas de explotación.	Limitador de sobretensión, pararrayos, conexión sincronizada, resistencia de preinserción, bobina (self de choque), compensador automático estático.
Desequilibrios de tensión	Cargas desequilibradas (cargas monofásicas de gran potencia...).	Par motor invertido (vibraciones) y sobrecalentamiento de máquinas asíncronas.	Equilibrar las cargas. Compensador electrónico shunt, regulador electrónico dinámico de tensión. Aumentar la Pcc.

6 Estudio de casos concretos

6.1 Filtro híbrido

Descripción de la instalación

Los remotes mecánicos se alimentan desde un transformador MT/BT (800 kVA).

Las cargas conectadas son las telesillas y, además, otras cargas, como las cajas registradoras, los sistemas de validación de forfaits, la instalación de cronometraje oficial para competiciones y una red telefónica.

Problemas encontrados

Durante el funcionamiento del telesilla, la red de baja tensión procedente del transformador MT/BT resulta perturbada.

Las medidas efectuadas in situ demuestran la preexistencia de una tasa muy importante de distorsión armónica en tensión ($\text{THD} \approx 9\%$) procedente de la red MT, así como una perturbación armónica procedente de la

alimentación del telesilla. La deformación resultante de la tensión de alimentación ($\text{THD} \approx 12\%$) afecta a los receptores sensibles (cajas registradoras, cronometraje...).

Soluciones

El objetivo del dispositivo es asegurar a la vez la compensación de energía reactiva en presencia de armónicos y la neutralización de los armónicos susceptibles de perturbar la instalación.

La solución aplicada (**figura 12**) es la instalación de un filtro híbrido (**figura 13**) compuesto por un filtro pasivo sintonizado con la frecuencia del armónico preponderante (H5) que suministra la energía reactiva necesaria (188 kVar) y por un filtro activo, de calibre 20 A, utilizado para el tratamiento de los otros órdenes de armónicos.

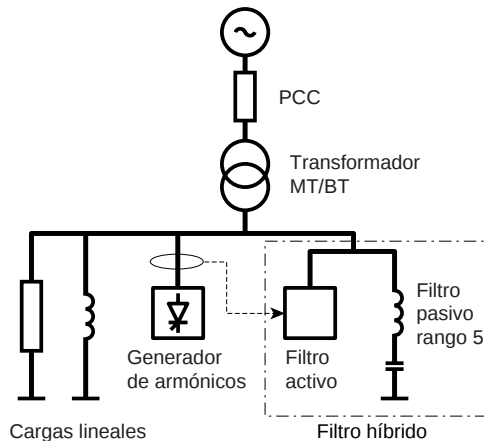


Fig. 12: Aplicación e instalación de la solución.



Fig. 13: Equipo Rectiphase de filtrado híbrido (Merlin Gerin).

Las medidas, después de instaladas, indican que este dispositivo permite reducir la amplitud de los armónicos en un amplio rango de armónicos en corriente y en tensión (**figura 14**) y hace pasar la tasa de distorsión en tensión del 12,6% al 4,47%. Tiene también el efecto de pasar el factor de potencia de la instalación de 0,67 a 0,87. Esta solución ha permitido resolver todos los problemas sin que se haya observado después ninguna disfunción.

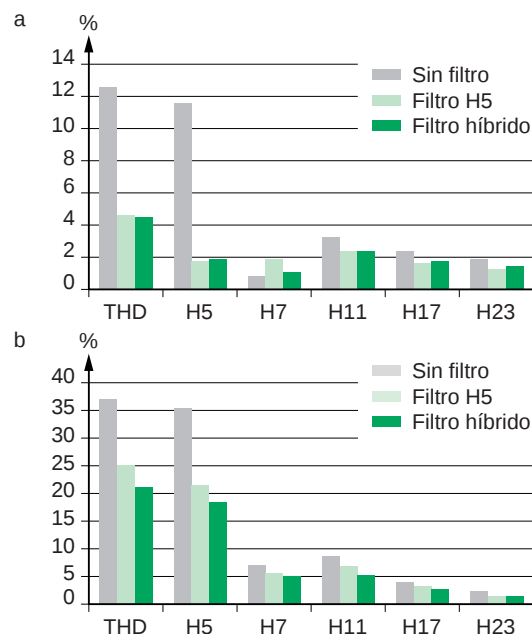


Fig. 14: Espectros mostrando la eficacia de un filtro híbrido **[a]** en tensión, **[b]** en corriente.

6.2 Compensación automática en tiempo real

Descripción de la instalación

Fábrica de equipos para el automóvil localizada en Concord (Ontario-Canadá) que se alimenta de un transformador de 2000 kVA; 27,6 kV/600 V; Yy; Ucc = 5,23%.

Fabrica tubos de escape a partir de chapa de acero mediante soldadura por puntos y por roldanas.

Problemas encontrados

- Cansancio visual y nervioso del personal, debido a la fluctuación de la luminosidad de las lámparas (parpadeo o flicker), cuando las soldadoras están en funcionamiento.
- Molestias sonoras y envejecimiento mecánico prematuro de los equipos provocados por las vibraciones, principalmente en el transformador y de la aparamenta de mando cuando las soldadoras están en funcionamiento.

■ Imposibilidad de añadir nuevos equipos por miedo a sobrecargar la instalación (presencia de una corriente de cresta, en el momento de soldar, superior a la corriente nominal del interruptor automático de entrada). La expansión de la instalación necesita, por tanto, inversiones costosas, o para redimensionar la instalación existente, o para instalar un nuevo centro de transformación.

■ Penalizaciones anuales de 5000 euros, por sobrepasar el consumo de energía reactiva (factor de potencia de 0,75).

■ Piezas defectuosas a causa de defectos de soldadura que se detectan al final de la fabricación, en el momento de dar forma a los tubos.

Todo esto reduce la productividad de la empresa.

Soluciones

Las medidas efectuadas durante el funcionamiento de las soldadoras ponen en evidencia una tensión nominal de 584 V, o sea, huecos de tensión de una profundidad del 5,8%, picos de corriente de 2000 A y picos de potencia reactiva de 1200 kVAr (**figura 15**).

Los problemas encontrados tienen evidentemente origen en las fluctuaciones de tensión provocadas por el funcionamiento de las soldadoras, que son cargas con variaciones rápidas y frecuentes que consumen una importante potencia reactiva.

Un hueco de tensión del 6% tiene como consecuencia una reducción del 12% ($1-0,94^2$) de la energía disponible para la soldadura. Esto explica el importante número de soldaduras defectuosas.

Los dispositivos clásicos de compensación de energía reactiva, que utilizan contactores electromecánicos, no permiten alcanzar el tiempo de respuesta necesaria; las maniobras de conexión escalonada de los condensadores se temporizan voluntariamente para reducir el número de maniobras y no reducir la esperanza de vida de los contactores con un desgaste prematuro, pero también para permitir la descarga de los condensadores.

	Antes	Después
Tensión (V)	584	599
Hueco de tensión		
■ Profundidad (%)	5,8	3,2
■ Duración (ciclo)	20 a 25	10 a 15
Corriente		
■ Media	1000	550
■ De cresta	2000	1250
Potencia reactiva (kVAr)	600 a 1200	0 a 300
Factor de potencia	0,75	> 0,92

Fig. 15: Mejoras aportadas por el compensador automático en tiempo real.

La solución aplicada ha sido la instalación de una compensación automática en tiempo real (**figura 16**). Este dispositivo innovador permite:

- una compensación rapidísima de las variaciones de potencia reactiva en un período de la fundamental (16,6 ms a 60 Hz; 20 ms a 50 Hz), particularmente bien adaptada al caso de las cargas que varían rápidamente y de manera importante (soldadoras, elevadores, prensas, machacadoras, arranque de motores...),
- una conexión sin transitorio, conseguida por el control del instante de conexión, especialmente interesante con cargas que no soportan sobretensiones transitorias (autómatas industriales, equipos informáticos),
- un aumento de la esperanza de vida de los condensadores y de los contactores, puesto que se evitan movimientos mecánicos innecesarios y sobretensiones.

Una compensación de 1200 kVAr habría sido ideal para minimizar los huecos de tensión, pero se han juzgado suficientes 800 kVAr para mantener la tensión a un nivel aceptable para todos los procesos de la fábrica en todas las condiciones de carga.

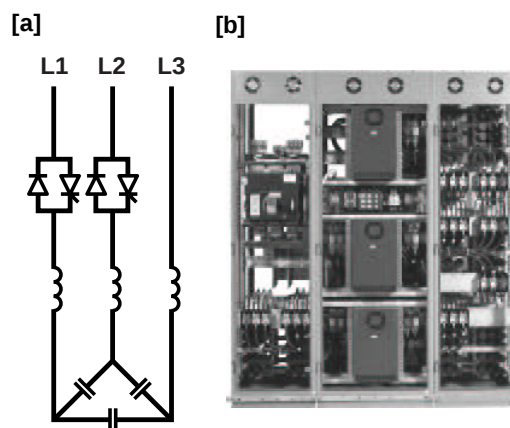


Fig. 16: Compensador automático en tiempo real: **[a]** principio, **[b]** realización práctica.

La aplicación de la solución ha permitido (figura 17):

- reducir los picos de corriente a 1250 A y así poder añadir cargas suplementarias sin modificación de la instalación, mejorando el rendimiento de la instalación por reducción de las pérdidas por efecto Joule,
- reducir los picos de potencia reactiva a 300 kVAr y aumentar el factor de potencia por encima de 0,92, lo que además evita las penalizaciones en la facturación energética;

■ aumentar la tensión nominal a 599 V y reducir la profundidad de los huecos de tensión al 3,2% (figura 16), lo que es consecuencia del aumento del factor de potencia y de la reducción de la amplitud de la corriente (figura 18). El cansancio visual y nervioso del personal, debido al flicker, también se ha eliminado. Se ha mejorado la calidad de las soldaduras y la cadencia de producción.

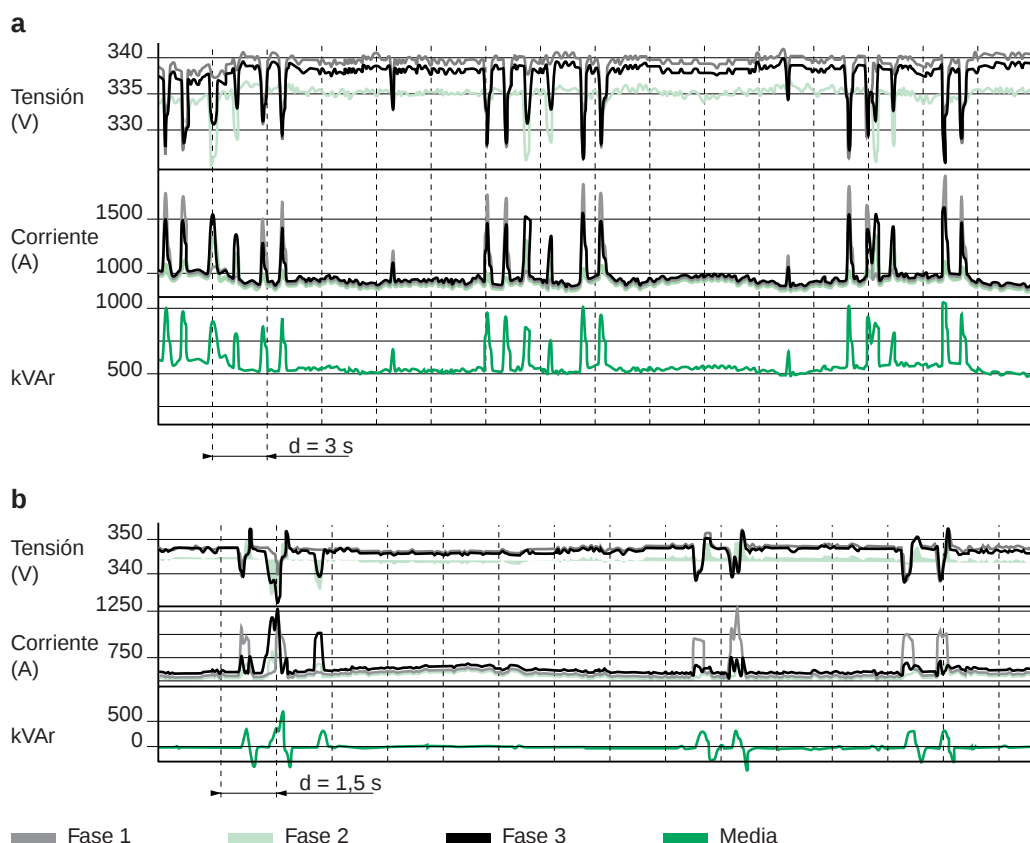


Fig. 17: Medida de corrientes, tensiones y potencia reactiva: [a] sin compensación, [b] con compensación.

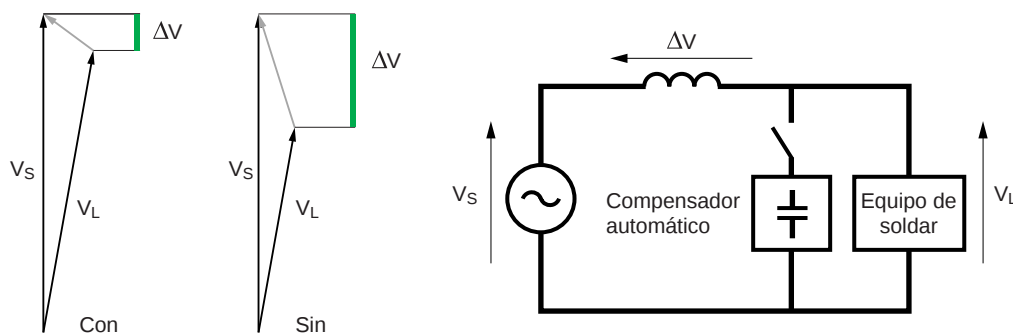


Fig. 18: Reducción de la caída de tensión conseguida con un compensador automático en tiempo real.

6.3 Protección contra el rayo

Descripción de la instalación

Instalación que está compuesta por oficinas (material informático, alumbrado y calefacción), de un puesto de vigilancia (alarma de incendios, alarma de intrusos, control de accesos, vigilancia por cctv) y de tres edificios industriales de proceso, todo ello instalado en 10 hectáreas en la región de Avignon (nivel cerámico o densidad de caída de rayo de 2 impactos por km² y año).

El paraje está rodeado de algunos árboles y de estructuras metálicas (postes). Todos los edificios están equipados con pararrayos. Las alimentaciones MT y BT son subterráneas.

Problemas encontrados

Descargó una tormenta en el lugar y destruyó la instalación BT de seguridad del puesto de vigilancia, provocando unas pérdidas de explotación de 36000 euros. La existencia de pararrayos ha evitado el incendio de la estructura, pero los equipos eléctricos destruidos no estaban protegidos por limitadores de sobretensión, en contra de la recomendación de las normas UTE C-15443 y CEI 61024.

Soluciones

Después de analizar la red de equipotencialidad y la de tomas de tierra y después también de comprobar la instalación de los pararrayos y controlar el valor de la resistencia de las tomas de tierra, se ha decidido instalar limitadores de sobretensión.

Se han instalado limitadores de sobretensión en cabeza de la instalación (cuadro general BT) y, en cascada, en cada edificio de la fábrica (figura 19). Como el esquema de conexión a tierra o esquema de neutro era TN-C, la protección sólo era útil en modo común (entre fases y CPN o PEN).

Conforme a la guía UTE C-15443, en presencia de pararrayos, las características de los limitadores PF65 y PF8 de marca Merlin Gerin (figura 20), son:

- En cabeza de instalación

$I_n = 20 \text{ kA}$; $I_{m\acute{a}x} = 65 \text{ kA}$; $U_p = 2 \text{ kV}$,

- En cascada (con una distancia mínima entre ellos de 10 m)

$I_n = 2 \text{ kA}$; $I_{m\acute{a}x} = 8 \text{ kA}$; $U_p = 1,5 \text{ kV}$.

Estos últimos aseguran una protección fina a nivel de los cuadros de distribución intermedios (oficina y puesto de vigilancia).

El esquema de conexión a tierra se ha pasado a TN-S, para asegurar la protección en modo común (entre fase y CP o PE) y en modo diferencial (entre fases y neutro). Los dispositivos de desconexión asociados son aquí interruptores automáticos con un poder de corte de 22 kA.

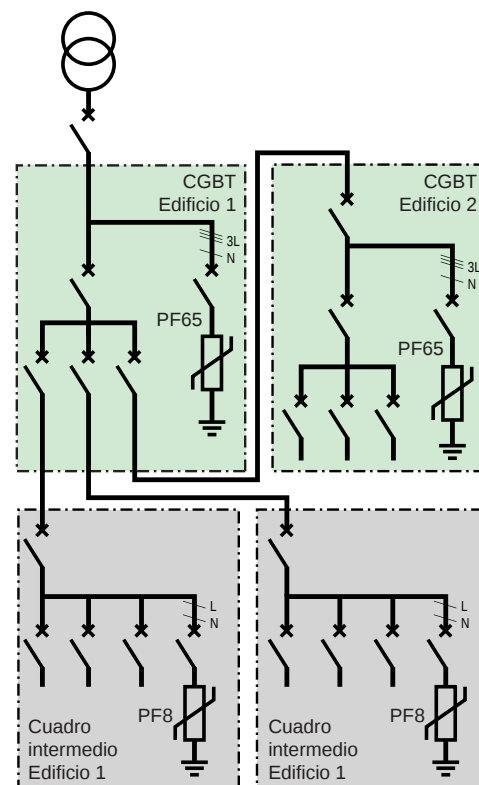


Fig. 19: Esquema de instalación en cascada de varios limitadores de sobretensión.

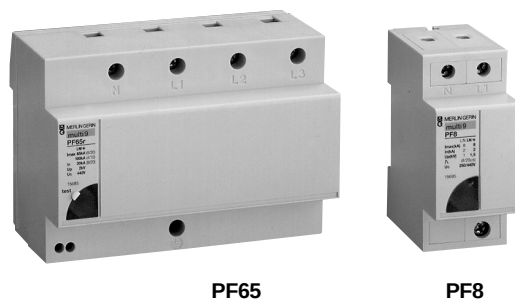


Fig. 20: Limitadores de sobretensión BT (PF65 y PF8 de Merlin Gerin).

7 Conclusión

Las perturbaciones eléctricas pueden originarse en la red del distribuidor, en la instalación del usuario afectado o en la de un utilizador próximo.

Según el contexto económico y el campo de aplicación, estas perturbaciones tienen diversas consecuencias, que afectan desde a la incomodidad hasta el deterioro de los medios de producción, e incluso al riesgo para las personas.

La búsqueda de una mejor competitividad de las empresas y la desregulación del mercado de la energía eléctrica hacen que la calidad de

ésta sea un objetivo estratégico de las empresas de electricidad, del personal de explotación y de mantenimiento, de la gestión de emplazamientos industriales y terciarios y hasta de los fabricantes de equipos.

Entretanto, las perturbaciones no deben ser sufridas como una fatalidad, pues existen soluciones. Su definición y aplicación, dentro del respeto a las reglas del arte, y su mantenimiento por especialistas permiten conseguir una calidad de alimentación personalizada adaptada a las necesidades de cada usuario.

8 Bibliografía

Normas

- CEI 61000-X-X - Compatibilidad electromagnética (CEM):
 - 2-1: Entorno electromagnético.
 - 2-2: Niveles de compatibilidad (redes públicas de alimentación en BT).
 - 2-4: Niveles de compatibilidad (instalaciones industriales BT y MT).
 - 2-5: Clasificación de los entornos electromagnéticos.
 - 3-2: Límites de emisiones de corrientes armónicas (corriente de conexión ≥ 16 A).
 - 3-3 y 3-5: Limitación de las fluctuaciones de tensión y de flicker en las redes BT para las corrientes de conexión ≥ 16 A.
 - 3-6: Evaluación de los límites de emisión para cargas perturbadoras conectadas a la red MTyAT.
 - 3-7: Evaluación de los límites de emisión de las cargas fluctuantes sobre redes MT y AT.
 - 4-7: Medidas de armónicos e interarmónicos.
 - 4-11: Ensayos de inmunidad a los huecos de tensión, cortes breves y variaciones de tensión.
 - 4-12: Ensayos de inmunidad a las ondas oscilatorias.
 - 4-15: Contador de parpadeos.
- Otras normas y leyes
 - Unión Europea: «Council Directive 85/374 on the approximation of the laws of the Member States relating to the liability for defective products». Diario oficial (07.08.1985).
 - EN 50160: Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution (07-1994).
 - Application Guide to the European Standard EN 50160 on «Voltage Characteristics of Electricity by Public Distribution Systems» Julio 1995-UNIPED.
 - IEEE Std 1159-1995: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
 - IEEE Std 1000-1992: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment.
 - CEI 60071-1: Coordination de l'isolement.
 - VEI 60050(161): Vocabulaire Electrotechnique International.

Cuaderno Técnicos Schneider

- Los dispositivos diferenciales residuales en BT.
R. CALVAS. Cuaderno Técnico nº 114.
- Las perturbaciones eléctricas en BT.
R. CALVAS. Cuaderno Técnico nº 141.
- La CEM: la compatibilidad electromagnética.
F. VAILLANT. Cuaderno Técnico nº 149.
- Sobre tensiones y coordinación del aislamiento.
D. FULCHIRON. Cuaderno Técnico nº 151.
- Perturbaciones armónicas en las redes perturbadas y su tratamiento.
C. COLLOMBET, J-M. LUPIN y J. SCHONEK. Cuaderno Técnico nº 152
- Onduladores y armónicos (caso de cargas no lineales).
J-N. FIORINA. Cuaderno Técnico nº 159
- Armónicos aguas arriba de los rectificadores de los SAI.
J. N. FIORINA. Cuaderno Técnico nº 160.
- Conmutación automática de alimentaciones en las redes AT y BT.
G. THOMASSET. Cuaderno Técnico nº 161.
- El diseño de redes industriales en AT.
G. THOMASSET. Cuaderno Técnico nº 169.
- Los esquemas de conexión a tierra en BT (régimen de neutro).
B. LACROIX y R. CALVAS. Cuaderno Técnico nº 172.
- Los esquemas de conexión a tierra en el mundo y su evolución.
B. LACROIX, R. CALVAS. Cuaderno Técnico nº 173.
- Flicker o parpadeo 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.
- El esquema IT (neutro aislado) de los esquemas de conexión a tierra en BT.
F. JULLIEN, I. HERITIER. Cuaderno Técnico nº 178.
- Sobre tensiones y pararrayos en BT. Coordinación del aislamiento en BT.
Ch. SERAUDIE. Cuaderno Técnico nº 179.

■ Los interruptores automáticos BT ante las corrientes armónicas impulsionales o cíclicas. M. COLLOMBET, B. LACROIX. Cuaderno Técnico nº 182.

■ Armónicos: convertidores y compensadores activos. E. BETTEGA, J-N. FIORINA. Cuaderno Técnico nº 183.

■ Coexistencia de corrientes fuertes y corrientes débiles. R. CALVAS, J. DELABALLE. Cuaderno Técnico nº 187.

■ Maniobra y protección de baterías de condensadores MT. D. KOCH. Cuaderno Técnico nº 189.

■ La ferresonancia. Ph. FERRACCI. Cuaderno Técnico nº 190.

Obras diversas

■ Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 2: voltage dips and short interruptions. Working Group UIE Power Quality 1996.

■ Guide de l'ingénierie électrique des réseaux internes d'usines. Collection ELECTRA.

■ Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks - Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs, Junio 1918 - C.L. FORTESCUE .

■ Supply Quality Issues at the Interphase between Power System and Industrial Consumers, PQA 1998. A.ROBERT.

■ Real time reactive compensation systems for welding applications - PQ 1998, R. WODRICH.

■ Low voltage hybrid harmonic filters, technical & economic analysis - PQ 1999, J. SCHONEK.