CHAUVIN ARNOUX

PARA LA ELECTRICIDAD, LA CALIDAD IMPORTA

Aspectos básicos de la calidad energética y cómo abordarlos.

Measure up

DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

Introducción

Si usted es el propietario o el responsable de una empresa, es muy probable que no suela dedicar demasiado tiempo a pensar en la calidad de su suministro eléctrico. Y ya que sacamos el tema, ¿qué queremos decir con "calidad energética" y cómo puede variar? Evidentemente, puede confiar en que sea su proveedor quien se encargue de este tipo de cosas, pero ¿es realmente tan importante la calidad energética, o es algo de lo que solo tienen que preocuparse los ingenieros especializados? En este artículo daremos cumplida respuesta a todas estas cuestiones, pero en todo caso empezaremos afirmando que la calidad energética es algo que nos debe importar a todos.

¿Le ha pasado alguna vez que un equipo (normalmente un ordenador u otro dispositivo electrónico) se estropeaba o funcionaba mal de vez en cuando y sin motivo aparente?

Quizá observe que las luces parpadean o, si se trata de una fábrica, que los motores se calientan y rompen antes de lo previsto. Todo esto pudiera deberse a una mala calidad energética y, si no se da cuenta de ello, seguramente acabe derrochando mucho tiempo y dinero intentando dar una solución a los síntomas. Y eso no es todo: los problemas de calidad energética pueden hacer que se disparen sus facturas eléctricas, lo que reducirá aún más los beneficios que tanto le cuesta obtener.

Por estos motivos, los propietarios o los responsables de cualquier empresa deberían estar al tanto de los aspectos básicos de la calidad energética, entender cómo evaluarla y saber qué hacer si se identifica cualquier problema. Dicho de otro modo: ¡dedicar unos minutos a leer este artículo podría ahorrarle un montón de tiempo, de problemas y de dinero!

¿Qué es la calidad energética?

En primer lugar, que quede claro que solamente vamos a hablar de suministros de corriente alterna (CA). La razón es que, aunque es posible conseguir un suministro eléctrico de corriente continua (CC) y, de hecho, fue bastante común hasta mediados del siglo XX, las operadoras de red actuales solamente ofrecen CA. También existe la posibilidad de que la CA regrese con fuerza en un futuro cercano, ya que en el mundo actual presenta ciertos beneficios, ¡pero ese tema deberá tratarse en otro estudio!

En un mundo ideal, se esperaría que la operadora de red le proporcionara un suministro de CA con una tensión constante, una frecuencia fija, una tensión perfectamente sinusoidal y unas ondas de corriente sin picos molestos. Además, si se trata de una alimentación trifásica, se esperaría que la tensión de las tres fases fuera exactamente la misma. Esto es lo que podríamos denominar una calidad energética perfecta. No obstante, como no vivimos en un mundo ideal, su suministro pudiera no cumplir con estos requisitos, e incluso si lo hiciera hasta su toma de corriente, también pudiera degradarse al ir pasando por las instalaciones eléctricas de su emplazamiento.

Así pues, si tiene problemas de calidad energética, en muchos casos no se podrá culpar a la operadora de red. De hecho, las operadoras hacen todo lo posible por asegurarse de ofrecer un servicio "limpio", pero pudieran producirse ciertos factores que afecten la calidad del suministro, como las tormentas eléctricas y los equipos que cada uno tenga instalados, que quedan fuera de su control.

Dicho esto, ¿qué más podría ir mal con la calidad energética? En la práctica, casi todos los problemas que inciden en esta pueden dividirse en seis áreas principales, a saber: los armónicos, caídas y subidas de

tensión, corrientes transitorias (picos de tensión), interferencias, desequilibrios de tensión y un bajo factor de potencia. En lo que resta de artículo, iremos examinando sucesivamente cada uno de estos problemas.

Armónicos

Como ya se mencionó en la introducción, la tensión y las ondas de corriente de un sistema eléctrico ideal serían perfectamente sinusoidales, y no resultaría demasiado difícil lograrlo si todas las cargas conectadas a la red fueran lineales, es decir, que las cargas de la corriente que se recibe de la toma sean siempre proporcionales a la tensión aplicada. Los calefactores y las bombillas incandescentes son ejemplos de carga lineal, y hasta las últimas décadas del siglo XX las cargas eran predominantemente de este tipo.

No obstante, durante los últimos 30 años se ha producido un marcado incremento en el número de cargas no lineales conectadas a la red eléctrica. Entre ellas se cuentan, entre otros, los ordenadores y equipos informáticos asociados, sistemas de alimentación ininterrumpida, motores de velocidad variable, balastos electrónicos para la iluminación e iluminación LED. El uso cada vez más generalizado de estos equipos, así como el de la electrónica para controlar casi todo tipo de cargas eléctricas, está empezando a tener unos efectos preocupantes en el suministro eléctrico y, más concretamente, en instalaciones individuales. Se calcula que en la actualidad más del 95 % de los armónicos que podamos encontrar en un emplazamiento los generan equipos instalados en el mismo.

Como ya hemos expuesto, cuando una carga lineal se conecta a la red de suministro, recibe una corriente sinusoidal con la misma frecuencia que la tensión. No obstante, las cargas no lineales reciben corrientes que no son necesariamente sinusoidales. De hecho, la onda de corriente puede volverse bastante compleja en función del tipo de carga y de su interacción con otros componentes de la instalación. Las cargas no lineales producen ondas de corriente distorsionadas en la red de suministro y, en casos especialmente graves, esto puede dar lugar a unas ondas de tensión con distorsiones importantes. Todo ello puede tener como consecuencia pérdidas de energía, una vida útil más reducida de los equipos y una eficiencia operativa menor en los dispositivos.

La distorsión de la onda producida por las cargas no lineales puede analizarse en términos matemáticos para demostrar que es equivalente a añadir componentes en múltiplos enteros de la frecuencia de suministro a la onda de frecuencia de suministro "pura". Es decir, que para un suministro de 50 Hz, la distorsión adopta la forma de componentes adicionales a 100, 150, 200, 250, 300 Hz y así sucesivamente, como podemos ver en la Figura 1.

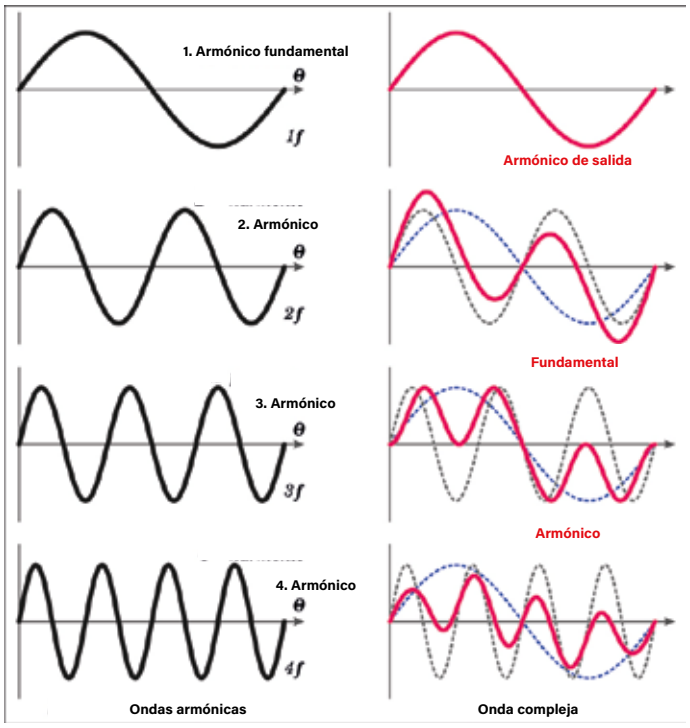


Figura 1: Una onda distorsionada puede analizarse como múltiples ondas sinusoidales juntas.

Estos componentes adicionales son los armónicos y, en teoría, pueden ir subiendo hasta el infinito. No obstante, en la práctica casi nunca resulta necesario tener en cuenta armónicos superiores a, por ejemplo, el 50.º, que tendría una frecuencia de 50 x 50 Hz = 2,5 kHz, y en la mayoría de los casos únicamente los armónicos de orden inferior, hasta el 25.º, tendrán importancia. Lamentablemente, a menos que se lo impidamos, los armónicos de una carga no lineal se irán propagando por todo el sistema causando problemas en otros lugares.

Saber que una onda de corriente con distorsiones puede representarse siempre como una serie de ondas sinusoidales superpuestas (usando un procedimiento matemático denominado análisis Fourier) hace posible elaborar una medida de la cantidad de distorsión armónica presente en la corriente de una red de distribución. Esto se conoce como la distorsión armónica total de entrada, o THDi, y se calcula con la fórmula siguiente:

$$\mathrm{THDi} = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_n^2)}}{I_1}$$

donde I1 es la corriente con la frecuencia de suministro, I2 es la corriente con el doble de la frecuencia de suministro, I3 es la corriente con el triple de la frecuencia de suministro, y así sucesivamente. Por suerte, es poco

probable que vaya a tener que usar esta fórmula en la práctica dado que los instrumentos modernos para analizar armónicos realizan automáticamente todos los cálculos necesarios y simplemente le presentan la cifra de THDi.

Las corrientes armónicas tienen efectos negativos en casi todos los elementos conectados a la red eléctrica; inciden negativamente en los dispositivos electrónicos sensibles, incrementan la temperatura y producen tensiones mecánicas. Entre los efectos más habituales de los armónicos podemos citar que se cuelguen los ordenadores, se bloqueen los equipos informáticos, parpadeen las luces, fallen los componentes electrónicos de los equipos de control de procesos, se produzcan problemas al conmutar cargas importantes, se sobrecalienten los conductores neutros, salten sin necesidad los disyuntores y se produzcan lecturas inexactas.

Si bien algunos de estos efectos, como que parpadeen las luces o se cuelguen los equipos informáticos, pudieran considerarse simples molestias, otros (por ejemplo, fallos en los equipos de procesos concretos) pueden provocar paradas muy costosas. Y los peores son los fallos en los condensadores de factor de potencia y en los equipos de distribución eléctrica, como son los cables, transformadores, motores y generadores de reserva. En estos casos, los equipos de sustitución suelen ser caros y quizá solo puedan conseguirse tras una larga espera. Además, pudieran conllevar unos enormes costes tanto de reparación como emergentes. E incluso si no se produjeran averías, la presencia de armónicos reducirá la eficiencia eléctrica de la instalación y resultará en un incremento del consumo de la instalación, que tendrá que pagar.

El riesgo para los condensadores de corrección del factor de potencia tiene que ver con la propiedad fundamental de cualquier condensador: su impedancia disminuye según aumenta la frecuencia. Con altas frecuencias, el condensador puede actuar casi como un cortocircuito. Normalmente, los condensadores de corrección del factor de potencia suelen diseñarse teniendo en cuenta un funcionamiento con la frecuencia fundamental de suministro, y la menor impedancia que presentan con corrientes de armónicos de una frecuencia superior dan lugar a un mayor flujo de corriente y a un sobrecalentamiento, lo que pudiera provocar averías antes de lo previsto. Los condensadores pueden también sufrir daños permanentes si el circuito paralelo que forman con un transformador asociado entra en resonancia con una de las frecuencias armónicas.

El calentamiento por corrientes inducidas en motores y transformadores es proporcional al cuadrado de la frecuencia armónica, por lo que si aumenta la presencia de armónicos de un orden superior en el suministro, el efecto térmico aumentará de forma aún más drástica. Y no solo aumenta la generación de energía térmica residual (que va a salir de su bolsillo), sino también el riesgo de averías o incluso de que se quemen el cableado, los motores, los transformadores y otros equipos de distribución.

Aparte de las pérdidas derivadas de los efectos del calor, los armónicos pudieran producir otro fenómeno problemático en los motores: la oscilación torsional del eje del motor. El par de torsión de los motores de CA se produce por la interacción entre el campo magnético del entrehierro y las corrientes inducidas en el rotor. Cuando se le suministran a un motor tensiones y corrientes no sinusoidales, los campos magnéticos del entrehierro y las corrientes del rotor contendrán inevitablemente componentes de frecuencia armónica.

+VE	**1, 4, 7, 10, 13**
-VE	**2, 5, 8, 11, 14**
Cero	**3, 9, 15, 21**

Estos se agrupan en componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Los armónicos de secuencia positiva (1, 4, 7, 10, 13, etc.) producen campos magnéticos y, por tanto, par de torsión, que rotan en la misma dirección que el campo y la torsión producida por la frecuencia fundamental del suministro. Los de secuencia negativa (2, 5, 8, 11, 14, etc.) producen campos magnéticos y una torsión que giran en dirección contraria. Y los de secuencia cero (3, 9, 15, 21, etc.) no desarrollan par de torsión, pero resultan en pérdidas adicionales en la máquina.

La interacción entre los campos magnéticos y corrientes de secuencias positiva y negativa producen las oscilaciones torsionales del eje del motor, que aparecen como vibraciones del eje. Si la frecuencia de las vibraciones coincide con la frecuencia mecánica natural del eje, se amplifican y pudieran producirse daños importantes en el eje del motor. En ocasiones es incluso posible oír cómo "cantan" o "gruñen" el transformador o el motor por dichas vibraciones, y a menudo esta es una de las primeras señales observables de que existe un problema con los armónicos.

Algunos de los armónicos más problemáticos son el 3.º y los múltiplos impares de este, es decir, el 9.º, 15.º, etc. A estos armónicos se les denomina "triples". Los armónicos triples de cada fase del suministro están en fase entre sí por lo que se suman en lugar de cancelarse en el conductor neutro de un sistema de cuatro cables trifásicos. Esto pudiera sobrecargar el conductor neutro si no se ha tenido en cuenta para permitir la presencia potencial de armónicos.

Registrador de energía eléctrica y potencia (PEL100)

Afortunadamente, la identificación y medición de armónicos resulta bastante sencilla si usamos un analizador de calidad energética o un registrador de potencia y energía (PEL, por sus siglas en inglés) con esta función. Si bien es cierto que los armónicos normalmente no pueden eliminarse, pues se generan durante el funcionamiento normal de muchos tipos de carga, sí puede prevenirse que se generalicen por todo el sistema de distribución y en la red eléctrica general.

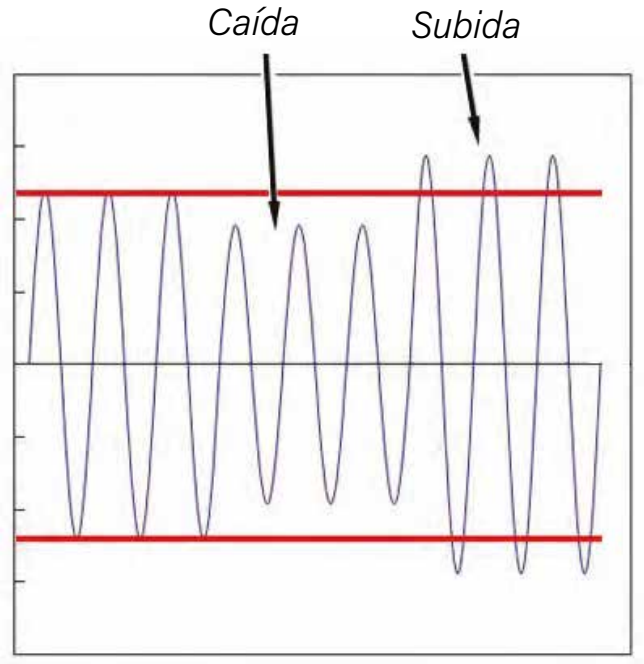
Esto normalmente se consigue instalando filtros pasivos o activos cerca de la fuente de los armónicos y, en ciertos casos, mediante un equipo de corrección ajustada del factor de potencia. Con los armónicos bajo control se eliminarán o, al menos, mitigarán todos los problemas que hemos comentado en esta sección del documento, con los beneficios consiguientes de una mayor eficiencia y vida útil de los equipos, y menores costes energéticos.

De todos modos, consideramos necesario hacer una advertencia. Es poco probable que adoptar medidas para mitigar los armónicos sea una solución para toda la vida. Dado el dinámico entorno comercial actual, seguramente se conecten nuevas cargas a su instalación eléctrica con cierta frecuencia. Y, si no se miden, ¿cómo podemos saber si van a afectar el rendimiento armónico global? Dicho de otro modo, se recomienda encarecidamente realizar una supervisión periódica de los armónicos para mantener los beneficios de la reducción de estos.

Caídas y subidas de tensión

Para que un equipo eléctrico funcione correctamente, necesita que se le suministre energía eléctrica con una tensión (y una frecuencia) que quede dentro de un rango especificado, y para ello CENELEC redactó en noviembre de 1994 la norma europea EN 50160 "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución". Esta norma establece las características principales de la tensión de los terminales de suministro de los consumidores en redes generales de distribución de media y baja tensión en condiciones operativas normales.

La norma prescribe los límites en los que se espera que se mantenga la tensión, pero no describe completamente la situación habitual de una red general de distribución. En cualquier caso, los límites son bastante amplios (230 V ± 10 % para la distribución monofásica) y la tensión puede incluso superar esta banda del ± 10 % durante un máximo del 5 % del tiempo. En la práctica, lo que verdaderamente importa no es si la tensión cumple o no los requisitos de una norma, sino si es compatible con las cargas conectadas a dicha red de distribución. En ocasiones esto no es así, y las razones más habituales tienen que ver con caídas y subidas de tensión.



¿Qué son las caídas y subidas de tensión?

Las caídas de tensión hacen referencia a una reducción súbita en la tensión de suministro de entre el 10 % y el 90 % que dure entre 10 ms y 1 minuto. La profundidad de la caída se define como la diferencia entre la media cuadrática (RMS) mínima de la tensión durante la caída y la tensión declarada de suministro. Los cambios que reducen el suministro en menos del 10 % no se consideran caídas de tensión.

Estas caídas pudieran deberse a factores externos en la red de distribución o a factores internos de la instalación.

Además, puede tratarse de sucesos únicos que se producen de forma aleatoria o de series de sucesos que se repiten formando algún tipo de patrón. En todos los casos, al supervisar y registrar la tensión de suministro a lo largo del tiempo podrá verse con exactitud lo que está ocurriendo y nos facilitará encontrar su causa.

Los factores externos suelen producir sucesos únicos, entre los que se incluyen la conmutación de carga y eliminación de fallos en la red de distribución. Podría producirse un efecto similar cuando se pasa de la red eléctrica general a un sistema de alimentación ininterrumpida o al uso de generadores de respaldo de emergencia. Algunas causas habituales por las que se producen caídas de tensión en una instalación son que se enchufen cargas importantes, como las de motores, hornos de arco y equipos de soldadura, o el uso de cargas con fluctuaciones en su demanda de corriente, y con frecuencia ocurren a intervalos periódicos o en momentos concretos.

El efecto que las caídas de tensión puede tener sobre los equipos eléctricos y los ocupantes de los edificios puede variar notablemente y depende de diversos factores, entre los que podemos citar la naturaleza del suceso y el tipo de equipos que se encuentren conectados a la red de distribución. Por ejemplo, si hablamos de una oficina que cuente con luminarias fluorescentes, que emplee equipos con fuentes de alimentación en modo conmutado y disponga de SAI, es perfectamente factible que no se den cuenta de nada incluso si se producen caídas de tensión importantes. Por otro lado, una oficina similar que cuente con un tipo distinto de iluminación, equipos más antiguos con fuentes de alimentación lineal y sin SAI, pudiera sufrir una disrupción considerable.

Las caídas de tensión de suministro pueden causar problemas específicos, con distintos niveles de gravedad, en los motores de inducción de CA. Al disminuir la tensión que llega al motor, su velocidad tiende a reducirse. En función de la profundidad y de la duración de la caída de tensión, el motor pudiera recuperar su velocidad normal cuando se recobra la tensión del suministro. No obstante, si la magnitud o la duración de la caída superan ciertos límites, pudiera calarse el motor, o pudiera desconectarse del suministro al desconectarse el contactor o por la actuación de un relé de baja tensión. En el caso de los motores que se alimentan de un variador de velocidad, este pudiera apagarse para prevenir daños potenciales en el motor.

Las subidas de tensión son, obviamente, lo contrario de las caídas y se definen como una subida repentina en la tensión de suministro, de al menos el 10 % durante un corto período de tiempo, tras el que se recupera su valor normal. De nuevo, el período que se contempla para

una subida suele ser de entre 10 ms y 1 minuto. Casi siempre se deben a la desconexión de una carga importante en algún lugar de la red de distribución o en la instalación local.

Aunque resulta más fácil observar los efectos de las caídas de tensión, los de las subidas son a menudo más destructivos. Las subidas de tensión frecuentes y sostenidas pueden ocasionar degradación en el aislamiento de los motores de inducción por el incremento en el flujo de corriente y la generación de calor, y esto pudiera, en último término, resultar en una avería prematura del motor. Además, pueden provocar averías en ciertos componentes de las fuentes de alimentación por el efecto acumulado de la sobrecarga, así como daños en los equipos electrónicos, que suelen ser sensibles a la sobretensión.

Por suerte, hay muchas maneras de mitigar los efectos tanto de las caídas como de las subidas de tensión, aunque el primer paso esencial consiste siempre en averiguar la causa del problema. Para ello se ha de realizar un estudio del emplazamiento, lo que conlleva trastear en la instalación eléctrica, midiendo la corriente y la tensión en distintas ubicaciones y usando esta información para identificar la fuente de las caídas y las subidas.

La manera más fácil de realizar estudios del emplazamiento es con un registrador de potencia y energía (PEL) moderno o con un analizador de calidad energética. Estos instrumentos pueden conectarse rápidamente y de forma no intrusiva a los cuadros de distribución y otros puntos importantes de la instalación y dejarse allí para que recopilen y registren información. En muchos casos ni siquiera es necesario apagar la instalación para conectarlos.

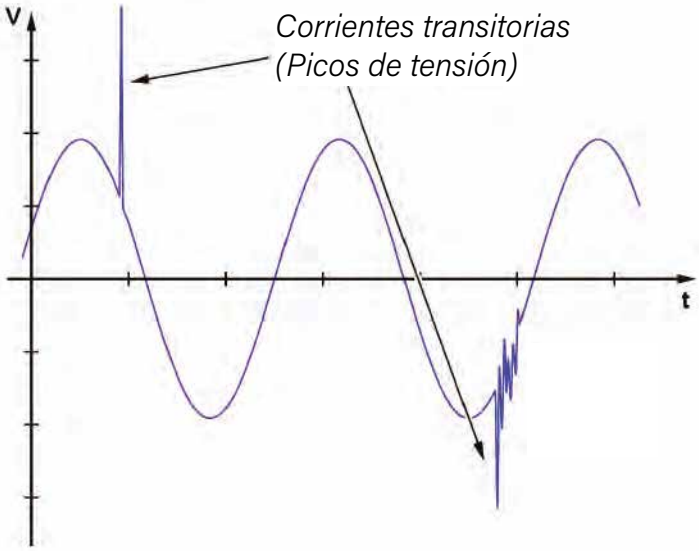
Si se observa que los problemas proceden del suministro externo y se están superando los límites de tensión establecidos para la distribución general, debe llamar a su proveedor de electricidad. No obstante, en muchos casos la fuente del problema está en su propia instalación y, una vez identificado el equipo que está causando los problemas, se puede empezar a plantear soluciones.

Estas pudieran incluir, por ejemplo, disponer que la alimentación del equipo en cuestión proceda de un circuito dedicado, instalar un SAI o, en el caso de los motores, instalar un sistema de encendido suave o un variador de velocidad para reducir los cambios repentinos en la corriente que recibe el motor al arrancar. Si ninguno de estos remedios resultara práctico o eficaz, quizá sea también una buena idea llamar en esta ocasión a su proveedor de electricidad para ver si le puede proporcionar un sistema más resiliente.

Variador de velocidad

Corrientes transitorias

El efecto de las corrientes transitorias, a menudo llamadas picos de tensión, en sus equipos e instalaciones puede ser de ligeramente irritante a extremadamente dañino y caro. Las corrientes eléctricas transitorias hacen referencia a picos de tensión de corta duración y muy rápidos de hasta varios kV de magnitud. Y aunque pueden ocurrir en una única ocasión, también se producen en ráfagas. Cuando ocurren, se produce un incremento de corriente en la carga que se observa como un aumento de corriente y que resulta en una subida momentánea en la energía que se transfiere desde la red de suministro a la carga. Según la magnitud y duración de esta corriente transitoria, la cantidad de energía adicional transferida pudiera no tener apenas (o ninguna) importancia, o ser suficiente para causar graves daños.



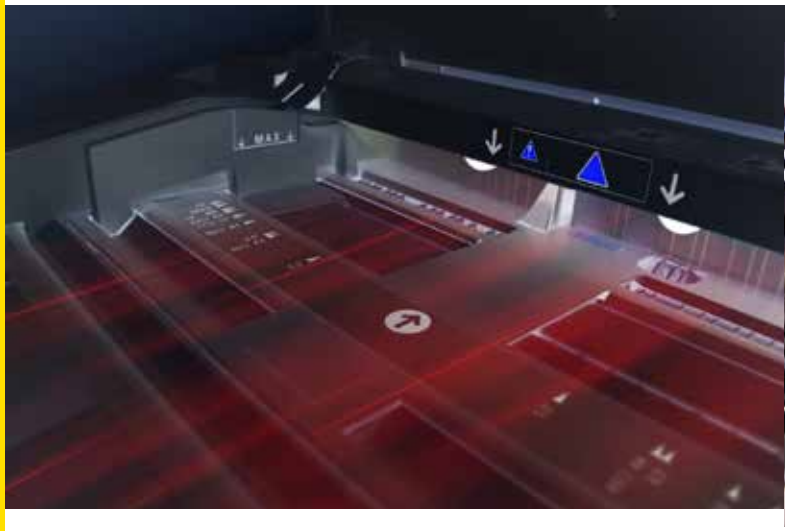
A menudo se asume que en la mayoría de las ocasiones se deben a sucesos externos a la instalación afectada, como a la caída de un rayo, a una conmutación de carga y eliminación de fallos en los equipos de la empresa distribuidora. Si bien es cierto que las corrientes transitorias derivadas de los rayos, dadas su tensión y energía tan elevadas, son las que plantean los riesgos más importantes en términos de daños y averías en los equipos, la mayoría (más del 80 %, según revelan los estudios) de hecho se genera en la propia instalación.

Ráfaga

Las corrientes transitorias derivadas de la caída de rayos son poco habituales; entonces, ¿por qué son potencialmente tan perjudiciales? La corriente de un rayo normal alcanza rápidamente su nivel máximo, en 1 a 10 ms, para después caer más lentamente, en unos 50 a 200 ms. Este cambio tan repentino en la corriente origina radiación electromagnética (ondas de radio) que se desplazan hacia los alrededores de donde cayó el rayo. Si esta radiación se cruza con algún conductor eléctrico, como pudiera ser el cableado eléctrico, una línea de comunicaciones o tuberías metálicas, el conductor actúa como antena y se induce en ellos una tensión elevada (la corriente transitoria). Y no es necesario que el rayo caiga directamente sobre el conductor; incluso si cae en el suelo cerca de este pudieran producirse corrientes transitorias muy importantes.

Hay otros factores externos, como la conmutación de carga y eliminación de errores en la red de distribución, que también pueden generar este tipo de corrientes. Las corrientes transitorias por conmutación de carga se producen por la liberación repentina de energía eléctrica, magnética o, en el caso de máquinas giratorias, mecánica almacenada en un dispositivo justo cuando se enciende o apaga. Los derivados de la eliminación de errores se producen cuando ocurre una liberación repentina similar de energía cuando se interrumpe el fallo en cuestión. Las corrientes transitorias derivadas de estas fuentes externas son comparativamente raras y casi siempre son mucho menores que las producidas por la caída de un rayo.

Mucho más habituales son las corrientes transitorias por conmutaciones de carga dentro de la propia instalación. Lo que da lugar a la corriente pudiera ser una conmutación de transferencia de bus, pero es mucho más frecuente que sea algo más simple, como que se abra o cierre un disyuntor o un contactor. Incluso pulsar el interruptor de la luz puede crear corrientes transitorias y, en cada caso, su nivel se verá incrementado si el dispositivo de conmutación tiene contactos defectuosos o con corrosión. Es consabido que los equipos de oficina, especialmente las fotocopiadoras y las impresoras láser, pueden crear corrientes transitorias, al igual que los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. De hecho, prácticamente siempre que se enciende o apaga una carga inductiva o capacitiva se produce una corriente transitoria, aunque sea pequeña en la mayoría de los casos, que se propaga por toda la instalación eléctrica.



Si tenemos en cuenta el efecto que tienen los picos de tensión en las instalaciones eléctricas y en los equipos conectados a estas, normalmente las corrientes transitorias generadas dentro de la instalación, que suelen ser pequeñas, pueden causar una lenta degradación con el paso del tiempo. Por otro lado, las producidas por la caída de rayos y por la conmutación de importantes cargas inductivas pueden provocar fallos inmediatos en el aislamiento y posteriormente trasladar ingentes cantidades de energía a los equipos, lo que puede resultar en averías o, en el peor de los casos, incluso en que los equipos se quemen o se produzcan explosiones.

El modo en que se producen estos problemas tan graves es el siguiente: cuando el equipo se ve sometido a una corriente transitoria que tiene una tensión superior a la tensión disruptiva del aislamiento del equipo, es probable que se produzca una deflagración. Esta deflagración es un arco eléctrico de baja impedancia a través del cual puede pasar corriente del sistema de distribución. Con toda la energía del suministro eléctrico tras ella, la potencia del arco y el calor que produce aumentan casi sin límite, con el consiguiente riesgo de incendio, explosión y peligro vital.

Es posible que los equipos eléctricos tradicionales solamente sufran daños si se ven expuestos a corrientes transitorias de energía importantes y/o elevadas, pero los equipos electrónicos son mucho más sensibles y, a menos que estén protegidos, pudieran sufrir daños irreparables incluso con corrientes comparativamente menores. Esto se debe a los microcontroladores y componentes similares que cuentan con unas capas de silicona mínimas, casi inexistentes, para que les proporcionen aislamiento, y este aislamiento pudiera verse comprometido por casos de sobretensión que pasarían completamente desapercibidos en los equipos tradicionales. Merece también la pena recordar que los daños transitorios en dispositivos electrónicos no resultan necesariamente en averías inmediatas, sino que pudieran revelarse en el futuro como averías aparentemente aleatorias. Dado lo que depende en la actualidad casi todo aspecto de la actividad comercial, empresarial e industrial de los sistemas electrónicos, estos problemas suponen un verdadero quebradero de cabeza, pues a menudo resultan en paradas de actividad y en costes emergentes muy cuantiosos.

Hasta si no se producen averías en los equipos, estas corrientes pueden ser disruptivas al hacer que se cuelguen los ordenadores y se pierdan datos, por ejemplo, que los sistemas de control de procesos se apaguen inesperadamente e incluso activen sin razón aparente distintos dispositivos que operan con corriente residual.

Existe un amplio abanico de medidas que pueden emplearse para protegerse contra estas corrientes transitorias y para seleccionar el tipo más adecuado se deben tener en cuenta su tensión, duración y nivel de potencia, así como el tipo de equipo que se desee proteger. Ciertos tipos de equipos, como es el caso de los motores, pudieran diseñarse para soportar las corrientes transitorias en una red normal de distribución sin protección adicional, aunque esta nunca debería darse por sentado. Los equipos eléctricos pudieran contar también con protección integral, pero es poco probable que esta sea adecuada por sí sola si no se usa otra forma de protección en la red de distribución de las instalaciones en las que se estén utilizando.

Al principio pudiera parecer innecesario suministrar protección contra corrientes transitorias para equipos de prueba como multímetros y medidores de instalaciones multifunción, pero lo cierto es que se trata de una protección básica. Las instalaciones eléctricas pueden experimentar corrientes transitorias mientras se están realizando las pruebas al igual que en cualquier otro momento, y si la energía liberada por estas fuera suficiente para romper un instrumento sin protección, el usuario, que seguramente se encuentre cerca o incluso lo esté sujetando, pudiera sufrir lesiones, o algo peor.

La necesidad de contar con protección contra corrientes transitorias para los instrumentos queda reflejada en la norma BS EN 61010, "Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio", que exige que los equipos de control puedan soportar unos niveles de estas apropiados hasta el punto de la instalación en que se vayan a usar dichos instrumentos. (Véase la tabla)

Pruebas de sobretensión transitoria BS EN 61010-1				
Tensión de suministro	Sobretensión transitoria			
	CAT I	CAT II	CAT III	CAT IV
150 V	800 V	1500 V	2500 V	4000 V
300 V	1500 V	2500 V	4000 V	6000 V
600 V	2500 V	4000 V	6000 V	8000 V
1000 V	4000 V	6000 V	8000 V	12 000 V

La norma BS EN 61010 reconoce que las corrientes transitorias generadas externamente serán más graves en el punto de entrada del suministro eléctrico al edificio y su magnitud se irá reduciendo gradualmente según avance por la instalación por causa de la inductancia, capacitancia y resistencia del cableado y los demás equipos. En pocas palabras, esto significa que los instrumentos que se conecten en la toma de entrada del suministro deberán poder soportar unas tensiones transitorias superiores a los instrumentos que se diseñan para conectarse al cableado fijo de la instalación, que, a su vez, deberá poder soportar unas tensiones transitorias mayores que los que se emplearán exclusivamente en equipos conectados a los enchufes. Esto se resume con las calificaciones de categoría (CAT) que se muestran en la tabla.

Los instrumentos de CAT I pueden emplearse para mediciones que se efectúen en circuitos secundarios, no conectados directamente a la red de distribución. Los de CAT II son idóneos para aquellas mediciones que se realicen en elementos conectados a enchufes estándar de 230 V. Por su parte, los de CAT III son adecuados para las que se lleven a cabo en el cableado fijo de la instalación de un edificio, entre los que se incluyen, por ejemplo, cuadros de distribución, disyuntores, barras de distribución, cajas de derivación y equipos industriales. Finalmente, los de CAT IV pueden usarse para las mediciones que se realicen en la fuente de la instalación de baja tensión.

Dado que los instrumentos de una categoría concreta pueden emplearse también en aplicaciones de categoría inferior (los de CAT IV pueden emplearse en cualquier ubicación de una instalación de baja tensión), a menudo resulta útil invertir en instrumentos de una categoría superior, pues esto reducirá el riesgo de que se emplee un instrumento que no resulte idóneo para una tarea en particular.

Las corrientes transitorias pueden mitigarse usando dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD, por sus siglas en inglés), diseñados para prevenir picos de tensión y las sobretensiones que pudieran dañar el cableado, la infraestructura y los equipos de la instalación. En caso de sobretensión, los SPD desvían a tierra el exceso de flujo de corriente resultante y limitan la tensión hasta un valor máximo predeterminado. En función de las circunstancias, los SPD pueden instalarse cerca de la fuente interna de corrientes transitorias, cerca de las cargas que requieran protección o de ambos lugares.

En la actualidad, hay disponibles tres tipos de SPD. Los SPD de Tipo 1 pueden descargar corrientes parciales de rayos y se emplean en edificios cuyo suministro eléctrico proceda de un tendido eléctrico aéreo o que cuenten con un sistema de pararrayos montado en el tejado que cumpla con la norma BS EN 62305. Los de Tipo 2 son idóneos para los demás tipos de instalaciones y a menudo se colocan en la propia toma principal de corriente o en los cuadros de distribución secundaria. Y los de Tipo 3 cuentan con una capacidad de descarga menor y se emplean para ofrecer protección localizada para equipos sensibles. En la mayoría de los casos, solamente deberían usarse para suplementar la protección que ofrecen los dispositivos de Tipo 2. Podrá encontrar información mucho más detallada sobre la selección y aplicación de los SPD en las páginas web de los fabricantes, y también deberá consultarse la última edición del Reglamento de cableado del IET (BS 7671), que ahora incluye una sección dedicada a la protección contra sobretensiones y los SPD.

Para decidir si una instalación está experimentando este tipo de problemas, lo primero que debe hacerse es emplear un analizador de calidad energética y, dado que las corrientes transitorias son casi siempre intermitentes, este debería estar equipado con una función de registro de datos para que estos puedan recopilarse durante períodos de tiempo suficientemente largos. Con un buen analizador podrá establecer límites y alarmas para que se le notifique cuando se detecte una corriente transitoria importante, y podrá examinar los datos almacenados en el dispositivo para recabar información adicional sobre la forma y duración de esta. Esta información resulta inestimable para determinar su fuente.

Analizador de calidad energética

Interferencia eléctrica

Las interferencias eléctricas se conocen más formalmente o bien como interferencias electromagnéticas (EMI) o como interferencias de radiofrecuencia (RFI, ambas por sus siglas en inglés). Si nos ponemos un poco pedantes, EMI es el término más general porque, en sentido estricto, la RFI solamente resulta de aplicación para las interferencias que se produzcan por encima de la banda de frecuencias que se emplea para las transmisiones de radio. No obstante, para el caso que nos ocupa, los dos términos son intercambiables y en el resto de esta sección simplemente hablaremos de EMI.

Las EMI suelen ser mucho menos dañinas que las corrientes transitorias. Lo más habitual es que resulten en que los equipos funcionen mal temporalmente, pero no en daños permanentes. En todo caso, los fallos en los equipos pueden ser costosos y disruptivos, por lo que tampoco se trata de un asunto trivial.

Las EMI pueden proceder de diversas fuentes, por ejemplo, de radares y de transmisores de TV, radio, telefonía móvil y microondas, así como de fuentes externas menos obvias, como son las tormentas magnéticas solares y las señales de radio que se producen en tormentas eléctricas distantes. Las EMI externas pueden introducirse en una instalación eléctrica por inducción electromagnética, conducción o acoplamiento electrostático. Además, pueden generarse en los propios equipos de una instalación, aunque los dispositivos y aplicaciones modernas debían fabricarse de modo que cumplan con las normas vigentes de compatibilidad electromagnética, que minimizan el riesgo de que esto ocurra.

Es poco probable que los equipos eléctricos y de iluminación se vean afectados por las EMI, aunque los dispositivos electrónicos empleados para su control sí pudieran ser susceptibles. Lo más habitual es que las EMI se capten como ruido o zumbidos en los equipos de audio y como distorsiones en la calidad de imagen en las pantallas de televisión. Otros efectos comunes que son menos obvios inmediatamente incluyen la degradación en el rendimiento de las redes de datos, y que pudieran hacer que dejen de funcionar totalmente. Esto pudiera resultar en unas

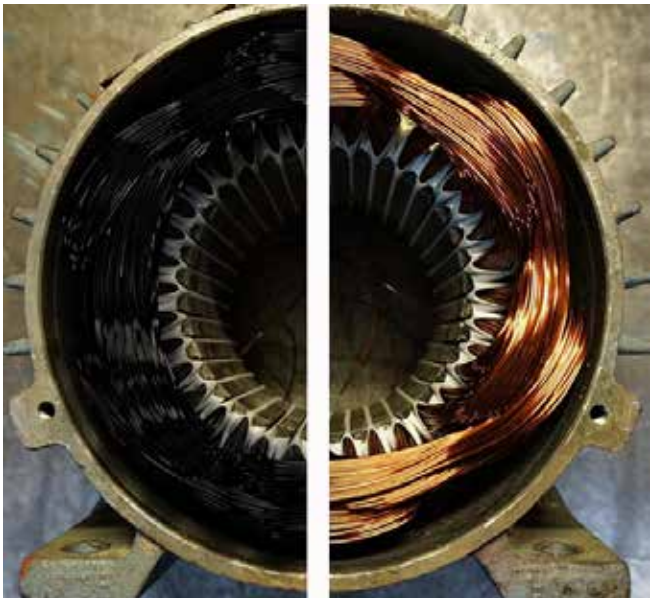
mayores tasas de error e incluso resultar en la pérdida total de los datos. Es importante tener en cuenta que las EMI pueden transmitirse por interferencias entre cables que estén colocados juntos. Por ello, deberá prestarse siempre atención para segregar el cableado eléctrico y el de datos y, cuando se considere apropiado, usar cables apantallados.

Hay bastantes productos disponibles para bloquear las EMI y evitar que entren en los equipos, entre los que se incluyen los filtros de supresión de EMI y los de líneas de CA, además de los núcleos de ferrita y los amortiguadores de microondas. Estos dispositivos solamente son eficaces contra las EMI que se propagan por conducción. La mejor protección contra las EMI radiadas e inducidas consiste en contar con un apantallamiento eficaz (introduciendo los equipos sensibles en una caja conductora con toma a tierra), por lo que se requiere una combinación de apantallamiento y filtros para disponer de una solución completa para este problema.

Si sospecha que tiene algún problema con las EMI, este es el momento de hacerse con un analizador de calidad energética e instalarlo para que supervise la instalación. Las EMI podrán verse superpuestas a las ondas del suministro eléctrico, aunque pudieran ser intermitentes y, por tanto, observarse únicamente con un registro de días o semanas.

Desequilibrios de tensión

Los desequilibrios de tensión son un problema de la calidad energética que a menudo recibe poca atención, o ninguna. Y es una pena porque, como veremos, un suministro que presente desequilibrios pudiera tener consecuencias graves. Obviamente, si su empresa solo tiene cargas monofásicas, los desequilibrios de tensión no van a ser un problema en su caso y se puede saltar tranquilamente esta sección. Sin embargo, si tuviera cualquier carga trifásica, ¡le aconsejamos que la lea con atención!



Daños en el bobinado causados por desequilibrios de tensión

En un sistema eléctrico de CA trifásico y equilibrado, las tensiones de las tres fases tienen igual magnitud y las fases se encuentran a 120 grados. Por otro lado, si el sistema no está equilibrado, las tensiones no serán iguales y/o las fases no estarán a 120 grados. Los desequilibrios de tensión son más habituales que los cambios de fase y normalmente los causan cargas monofásicas importantes, como pudieran ser los puntos de carga de VE, los hornos de inducción y algunos sistemas de tracción.

Estas cargas monofásicas pudieran conectarse entre una de las fases y la neutra de suministro, cuando reciben electricidad solo de una de las tres fases, o pudieran conectarse entre dos fases cuando la reciban de dos de las tres.

En cualquier caso, las tres fases se cargan de forma desigual y la tensión de la fase o fases con carga superior caerá. Esta reducción de tensión aparecerá como un desequilibrio de tensión en el resto de equipos que estén conectados a la misma red de suministro.

La distribución desigual de cargas monofásicas, por muy pequeña que sea, en un sistema trifásico pudiera causar, si hay una cantidad suficiente de estas, ligeros desequilibrios de tensión. Esa situación a menudo va evolucionando con el paso del tiempo al añadirse circuitos adicionales a una instalación que originalmente se encontraba perfectamente equilibrada durante su construcción. La degradación desigual de los condensadores de corrección del factor de potencia en un banco, o incluso el hecho de que rompa uno o más de estos condensadores sería otra fuente de desequilibrio, y pueden producirse desequilibrios temporales si se produce un fallo en alguna de las fases, ya sea dentro de las instalaciones o fuera de estas, en la red de distribución.

Que las tensiones de fase estén debidamente equilibradas es uno de los requisitos más importantes de cualquier instalación industrial, especialmente si utiliza motores trifásicos, y resulta esencial si están operando a plena carga, o casi. Con un motor funcionando al máximo, las tensiones no equilibradas en las terminales de este pueden causar un desequilibrio porcentual en la corriente de fase de hasta 10 veces el desequilibrio porcentual de tensión.

Esto significa que los motores que funcionan con desequilibrios en el suministro deben reducir significativamente su calificación, incluso si los desequilibrios de tensión parecen ser relativamente poco importantes. Los desequilibrios pudieran también hacer necesario rebajar la calificación de los cables por el incremento en las pérdidas I2R.

Según la IEC, los desequilibrios de tensión se definen como la ratio de tensión de secuencia negativa respecto de la de tensión de secuencia positiva. Resumiendo, las tensiones de las tres fases pueden expresarse matemáticamente como la suma de sus componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Las tensiones de secuencia positiva crean un flujo magnético dentro del motor que hace que este gire en la dirección en la que debe ir, mientras que las de secuencia negativa crean un flujo

que gira en dirección contraria. Dado que las tensiones de secuencia positiva son siempre mucho mayores que las de secuencia negativa (¡siempre que se haya conectado correctamente el motor!), la dirección de rotación no se ve afectada.

El flujo de rotación en dirección contraria causado por las tensiones de secuencia negativa causa un calor adicional en las bobinas del motor que pudiera resultar en que se dañe el aislamiento y se produzca una avería prematura en el motor. Si un motor funciona habitualmente con una temperatura superior en 10 °C a la recomendada, esto pudiera reducir la vida útil de la máquina por un factor de dos, y una menor vida útil del motor casi siempre supone disrupciones y gastos. La importancia y prevalencia de este problema queda confirmada por la gran cantidad de empresas que desarrollan y fabrican dispositivos de supervisión de desequilibrios de tensión para proteger los motores.

Además de los propios motores, muchos controladores y convertidores de motor de estado sólido incluyen componentes que son sensibles a los desequilibrios de tensión. Según el producto, algunos se protegen a sí mismos y al motor apagándose si detectan desequilibrios importantes de tensión pero, aunque esto sirve para proteger el equipo, la interrupción resultante puede resultar también cara. En el caso de productos menos sofisticados que no se apagan automáticamente, los desequilibrios de tensión son una causa habitual de reducción de la vida útil de los condensadores de bus y diodos delanteros.

La eficiencia de los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) y por conversor también es menor si operan con desequilibrios en las tensiones de suministro, y a menudo producen una ondulación mayor en la salida de CC y, en muchos casos, mayores corrientes armónicas en el sistema de distribución.

En vista de que los desequilibrios de tensión pueden tener tantos efectos perjudiciales, no debería sorprendernos que queden cubiertos por normas nacionales e internacionales. Por ejemplo, la IEC 60034-1 impone un límite de tensión de secuencia de fase negativa del 1 % en las máquinas que se alimentan de la red de distribución. Por su parte, la EN 50160 expone que pudieran esperarse desequilibrios de hasta el 3 % e indica que un estándar aceptable para los sistemas de suministro es que "en condiciones operativas normales, durante cada período de una semana, el 95 % de los valores medios de media cuadrática para 10 minutos del componente de secuencia de fase negativa de la tensión de suministro estén en un rango del 0 al 2 % del componente de secuencia de fase positiva".

Por suerte, la medición del balance de tensión y carga (corriente) y, por tanto, la identificación del desequilibrio, se obtiene fácilmente con un registrador de potencia y energía (PEL). Con un PEL conectado a la toma de suministro puede supervisarse la carga en todas las fases de la entera instalación para ver cómo varía durante un día o semana de funcionamiento normal. Además, estos dispositivos pueden desplazarse rápidamente por toda la instalación, conectarse de forma no intrusiva, y utilizarse para medir equipos individuales o cargas de circuito y tensiones concretas para conseguir un equilibrio por toda la instalación. A continuación pueden volver a conectarse a la toma de suministro para controlar en todo momento no solo el balance de tensión sino también otros parámetros importantes de suministro, como los armónicos y el factor de potencia.

Registrador de potencia y energía PEL 103

Para reducir los desequilibrios de tensión y sus efectos, existen dos pasos básicos. El primero consiste en usar circuitos independientes para las cargas monofásicas importantes y conectarlos tan cerca como sea posible de la fuente de suministro. De este modo nos aseguraremos de que la carga monofásica no provoque caídas de tensión en el cableado que utilice cualquier otro equipo. Y el segundo es que nos aseguremos de que todas las cargas monofásicas, grandes y pequeñas, se distribuyan por igual en las tres fases. Estas dos medidas pueden resultar muy útiles para ahorrarnos muchos dolores de cabeza y gastos.

Factor de potencia

Al igual que los desequilibrios de tensión, el factor de potencia no suele considerarse un problema para la calidad energética, lo que es un grave error porque es muy habitual operar con un bajo factor de potencia: básicamente significa que las empresas se están gastando un montón de dinero por una energía que ni usan ni pueden utilizar, ¡y es relativamente fácil y barato de corregir!

Este no es un problema nuevo; durante décadas, los ingenieros experimentados encargados de analizar instalaciones industriales y comerciales han ido tomando medidas para asegurarse de que estas tuvieran un buen factor de potencia. No obstante, cada vez son menos los emplazamientos que cuentan con este tipo de especialistas y, por ello, el factor de potencia a menudo queda relegado al olvido, y esto resulta inevitablemente en unas facturas energéticas mucho más caras de lo que debieran. Entonces, ¿qué es el factor de potencia y por qué es tan importante? La clave para explicarlo es que algunos tipos de equipos eléctricos empleados en aplicaciones industriales y comercia-

les consumen cierta cantidad de potencia reactiva aparte de la potencia real (o activa) que necesitan para desempeñar la labor prevista. Con frecuencia se trata de dispositivos inductivos, es decir, instrumentos que incorporan bobinas de alambre como parte de su construcción. Algunos ejemplos son los motores, calefactores de inducción, soldadores de arco, compresores y la mayoría de los sistemas de iluminación fluorescente. Es importante que entendamos que la potencia reactiva no hace nada útil en lo que respecta al usuario del equipo.

Desde una perspectiva técnica, la potencia reactiva es la diferencia vectorial entre la energía real o activa que usa un dispositivo y la energía total que consume, denominada potencia aparente. Y el factor de potencia es la ratio de la potencia real respecto de la potencia aparente. Un dispositivo con un bajo factor de potencia necesita más corriente que uno que realice la misma cantidad de trabajo útil pero que tenga un factor de potencia superior (o mejor). Emplear una corriente mayor hace que aumenten las pérdidas energéticas en la red de distribución, por lo que las empresas proveedoras penalizan a los clientes que tienen un bajo factor de potencia cobrándoles más por la electricidad.

La potencia reactiva se mide en kVAr (Kilovoltamperios reactivos), la potencia activa o real se mide en kW (kilovatios) y la potencia aparente en kVA (kilovoltiamperios).

Si nos ponemos algo menos técnicos, para entenderlo mejor pudiéramos comparar este escenario con una cerveza. Si pedimos una cerveza de barril, al

final vamos a pagar por toda la jarra; esto equivaldría a la potencia aparente. Pero si nos fijamos bien, la cerveza tiene espuma en su parte superior. Lo que nosotros queremos es la cerveza, que podríamos equiparar a la potencia activa, mientras que la espuma, que no aporta nada al disfrute de la bebida, sería la potencia reactiva. Una jarra de cerveza, sin espuma, representaría un factor de potencia de 1, sin ninguna potencia reactiva. En la práctica, es casi imposible lograr esta cifra, y un factor de potencia de 0,95 (¡que equivaldría a menos de un 5 % de espuma!) o superior suele considerarse aceptable.

Hasta aquí todo está claro, pero si los equipos eléctricos consumen potencia activa de forma inherente, ¿qué podemos hacer al respecto? Por suerte podemos corregir el factor de potencia si añadimos, lógicamente, un sistema de corrección del factor de potencia (PFC, por sus siglas en inglés). Este normalmente toma la forma de condensadores que se conectan al cuadro principal de distribución o, en ocasiones, en otras ubicaciones.

Muchos emplazamientos ya cuentan con algún tipo de PFC, pero, como ya se ha adelantado, no se trata de una solución que podamos instalar y olvidarnos ya para siempre. Si se añaden más equipos, o si varía significativamente el tipo de equipos empleados, el sistema de PFC pudiera dejar de ser idóneo. También merece la pena señalar que los condensadores que se emplean en los PFC pueden ir degradándose con el paso de los años y quizá deban sustituirse.

De hecho, según The Carbon Trust no es nada extraño que las instalaciones industriales operen con unos niveles elevados de potencia reactiva, con factores de potencia de entre 0,7 y 0,8. Esto es sorprendente y totalmente innecesario puesto que medir el factor de potencia no presenta ninguna dificultad. Puede cuantificarse usando instrumentos portátiles de prueba o, en su lugar, supervisarse de forma permanente y en tiempo real con valores observables en todo momento, junto con muchos otros parámetros útiles, entre los que podemos incluir la tensión, la corriente y el consumo energético.

Si bien las especificaciones de los sistemas de PFC para reducir la potencia reactiva exigen que se conozcan diversos factores, como el nivel de tensión y el uso típico de cargas reactivas en el emplazamiento, el perfil de uso en todo este, y la calidad energética que requieren las cargas existentes, todos estos son bastante fáciles de medir y/o calcular. Y un sistema de PFC correctamente diseñado cuesta una fracción del ahorro que se consigue.

La forma más sencilla de PFC conlleva la instalación de condensadores, pero merece la pena moverse y solicitar asesoramiento experto para encontrar el sistema ideal para sus necesidades concretas. Si solo hay una máquina que tenga un bajo factor de potencia, pueden conectarse condensadores en paralelo a esta para que compensen la situación siempre que se encienda. Por otro lado, si el factor de potencia de todo el emplazamiento está siempre bajo y no hay un único equipo que sea el responsable, pueden conectarse PFC fijas en toda red principal de suministro de entrada a las instalaciones.

En aplicaciones más complejas, con una cantidad importante de máquinas que se encienden y apagan en distintos momentos, el factor de potencia pudiera sufrir cambios constantes. En este caso, la cantidad de PFC tiene que controlarse automáticamente encendiendo y apagando bancos de condensadores, según se requiera. Y en instalaciones con grandes cargas no lineales, con sus corrientes armónicas asociadas, quizás sea necesario usar un sistema de PFC desintonizado. Podemos encontrar muchas soluciones en el mercado que proporcionen dicha funcionalidad, pero en caso de duda debemos consultar con un experto.

Atentos a la calidad

Desde Chauvin Arnoux esperamos que este documento técnico haya servido para desmitificar el tema en ocasiones complejo de la calidad energética, y explicado por qué nos parece tan importante. Si usted es el propietario o el encargado de una empresa, estamos seguros de que presta gran atención a la calidad de los productos y servicios que compra para su compañía, y lo mismo debería ocurrir con la energía y la electricidad. Después de todo, las facturas energéticas seguramente supongan una parte importante de sus gastos.

Hemos mostrado que la calidad energética puede degradarse de muchas maneras, y que dicha degradación a menudo tiene consecuencias inconvenientes y costosas. Además, e igual de importante, hemos visto que los problemas de calidad energética son fáciles de detectar (si se cuenta con los equipos adecuados, por supuesto) y que, en la mayoría de los casos, una vez identificados los problemas, existen soluciones cómodas y asequibles.

Nos hemos esforzado por presentar la información del modo más claro posible, pero no hay duda de que la calidad energética puede ser un tema intimidante. Por ello, si desea recibir información adicional sobre las ideas que hemos propuesto, o si le gustaría recibir ayuda para comenzar sus investigaciones en este campo, no dude en ponerse en contacto con nosotros. No le cuesta nada hablar con Chauvin Arnoux, ¡pero puede disfrutar de grandes beneficios en términos de costes y rentabilidad!

Julian Grant

CHAUVIN ARNOUX GROUP

Measure up

ESPAÑA
CHAUVIN ARNOUX IBÉRICA SA
C/ Roger de Flor, 293 - 1a Planta
08025 BARCELONA
Tel: +34 902 20 22 26
Fax: +34 934 5914 43
info@chauvin-arnoux.es
www.chauvin-arnoux.es

INTERNACIONAL
CHAUVIN ARNOUX
12-16 rue Sarah Bernhardt
92600 Asnières-sur-Seine
Tel: +33 1 44 85 44 38
Fax: +33 1 46 27 95 59
export@chauvin-arnoux.fr
www.chauvin-arnoux.com

CHAUVIN ARNOUX GROUP