

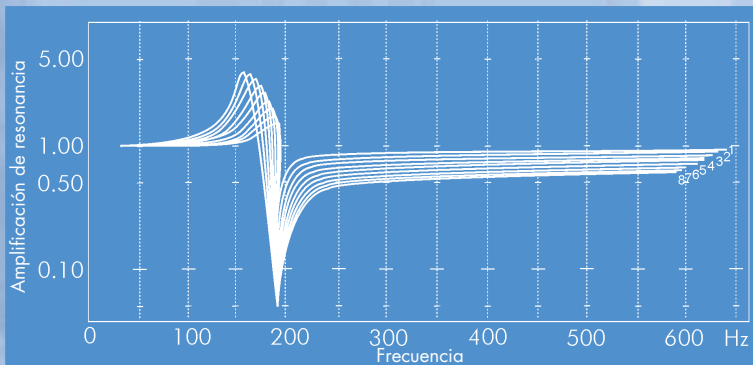
Guía de Calidad de la Energía Eléctrica



Armónicos

Condensadores en medios ricos en armónicos

3.1.2



Armónicos

Condensadores en medios ricos en armónicos

Stefan Fassbinder
Deutsches Kupferinstitut
Julio 2004



Esta Guía ha sido publicada como parte de la Iniciativa Leonardo para la Calidad de la Energía Eléctrica (LPQI), un programa europeo de formación y educación respaldado por la Comisión Europea (dentro del Programa Leonardo da Vinci) y la International Copper Association. Para más información sobre LPQI visite www.lpqi.org.



Centro Español de Información del Cobre (CEDIC)

CEDIC es una asociación privada sin fines de lucro que integra la práctica totalidad de las empresas fundidoras-refinadoras y semitransformadoras de cobre y de sus aleaciones en España. Su objetivo es promover el uso correcto y eficaz del cobre y sus aleaciones en los distintos subsectores de aplicación, mediante la compilación, producción y difusión de información.



European Copper Institute (ECI)

El European Copper Institute (ECI) es un proyecto conjunto formado por ICA (International Copper Association) y la industria europea fabricante. Por medio de sus socios, ECI actúa en nombre de los principales productores mundiales de cobre y fabricantes europeos para promover la utilización del cobre en Europa. Fundado en Enero de 1996, ECI está respaldado por una red de once Centros de Promoción del Cobre en Alemania, Benelux, Escandinavia, España, Francia, Grecia, Hungría, Italia, Polonia, Reino Unido y Rusia.

Limitación de Responsabilidad

El contenido de este proyecto no refleja necesariamente la posición de la Comunidad Europea, y tampoco implica ninguna responsabilidad por parte de la Comunidad Europea.

El European Copper Institute, el Deutsches Kupferinstitut, la Copper Development Association UK y el Centro Español de Información del Cobre (CEDIC) rechazan cualquier responsabilidad por cualquier daño directo, indirecto, consecuencial o incidental que pueda resultar del uso de la información, o de la incapacidad de usar la información o los datos contenidos en esta publicación.

Copyright© European Copper Institute, Deutsches Kupferinstitut y Copper Development Association UK.

Su reproducción está autorizada siempre que el material sea íntegro y se reconozca la fuente.

La LPQI es promovida en España por los miembros nacionales asociados al programa:



Bovis Lend Lease, S.A.



ETSII-UPM



Fluke Ibérica, S.L.



MGE UPS SYSTEMS
ESPAÑA, S.A.



Prysmian Cables y
Sistemas



Universidad
de Cantabria



Universidad Carlos III
de Madrid

Condensadores en medios ricos en armónicos

Viejas instalaciones en un ambiente nuevo

Las baterías de condensadores, utilizadas para la compensación de la potencia reactiva fundamental, son esenciales para la operación económica de sistemas que incluyan cargas resistivo-inductivas. De hecho las cargas resistivo-inductivas han estado presentes desde los comienzos del empleo industrial de la electricidad. Sin embargo, teniendo en cuenta que, de la misma forma, actualmente se están encontrando en las instalaciones gran número de cargas no lineales, aparecen dos nuevos riesgos en las baterías de condensadores y su entorno:

- ◆ Sobrecargas de corriente de los condensadores.
- ◆ Resonancias en paralelo de condensadores con inductancias en su proximidad (eléctrica).

La compensación con ayuda de los condensadores sigue siendo indispensable, y es relativamente fácil diseñarlos o mejorarlos para hacer frente a los nuevos retos. Esta Guía expone la mejor solución a adoptar al proyectar una nueva instalación y mejorar las baterías de condensadores existentes a fin de prevenir los problemas causados por armónicos.

Fundamentos: características de las inductancias y capacitancias

Eléctricamente, la inductancia es análoga a la inercia de la masa en un sistema mecánico. Una carga reactiva, es decir, un componente con un valor de inductancia definido y previsto, representa el equivalente eléctrico de un volante que tuviese una inercia determinada. Por supuesto, todo lo que tiene masa también tiene inercia y, del mismo modo, cualquier fragmento de conductor presenta una inductancia parásita.

Tanto la inductancia L como la capacitancia C representan componentes reactivos con una reactancia y una potencia reactiva de entrada/salida, mientras que la potencia reactiva de entrada capacitiva es el equivalente de la potencia reactiva inductiva de salida y viceversa. De hecho, la potencia reactiva no tiene una dirección de flujo claramente definible. Las reactancias se calculan con las formulas siguientes:

$$X_L = 2\pi f L \quad y \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

Así pues, la reactancia inductiva X_L es proporcional a la frecuencia f , mientras que la reactancia capacitiva X_C es inversamente proporcional a la frecuencia f . Para cualquier combinación en paralelo de L y C habrá una frecuencia f_0 a la cual las reactancias son iguales —es la frecuencia de resonancia. Esta frecuencia a la cual oscila la combinación LC se calcula mediante la formula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Con respecto a las corrientes desfasadas, puede parecer un poco difícil imaginar cómo una corriente capacitiva puede ser lo bastante inteligente para saber anticipadamente lo que la tensión que la genera hará un cuarto de período después pero, de alguna manera, esto es lo que sucede realmente. Para ser precisos, es una **variación** de la corriente la que se retrasa o adelanta como consecuencia de la correspondiente **variación** de la tensión, por ejemplo en el cruce por el valor cero. Procede de la energía que se almacena en la capacitancia y de las características especiales de la forma de onda.

La capacitancia eléctrica sería el equivalente a la flexibilidad (elasticidad) de un componente mecánico. Un condensador puede fabricarse con una determinada capacitancia, que se corresponde a la característica de un muelle en un sistema mecánico, pero, al igual que cualquier material es flexible (elástico) en cierta medida, también hay una cierta cantidad de capacitancia parásita entre dos fragmentos cualquiera de material conductor.

La cuestión es si estas reactancias parásitas serán lo bastante importantes para jugar un papel significativo en la ingeniería práctica. A altas tensiones o altas frecuencias generalmente lo serán, pero normalmente no es el caso a niveles de tensión y de frecuencia bajos en la red principal.

Condensadores en medios ricos en armónicos

El contenido de energía en cada uno de los dos almacenes de energía viene dado por:

$$W_{muelle} = \frac{D}{2} * s^2, \quad W_{masa} = \frac{m}{2} * v^2$$

donde:

- D = constante de elasticidad (elongación por fuerza, Ley de Hooke)
- s = elongación (distancia instantánea desde el punto de estado relajado)
- m = masa
- v = velocidad de movimiento de la masa

donde s y v pueden, y deben, expresarse como funciones del tiempo $s(t)$ y $v(t)$, ya que es lo que son, puesto que cambian periódicamente con el tiempo.

Combinando ahora las dos, la masa inercial del muelle flexible, se obtiene un sistema con dos reservorios de energía. La energía que se libera de uno de los componentes puede fluir directamente al otro. Si el muelle se extiende y se libera, la masa se acelera, y la fuerza para ello proviene del muelle al relajarse. En el punto de cruce por cero, la fuerza el muelle está en su estado relajado y la masa se mueve a la velocidad máxima. Como la masa tiene inercia continua moviéndose, comprimiendo ahora al muelle, de modo que la energía se transfiere de la masa en movimiento de nuevo al muelle. Cuando los almacenes de energía son un condensador y un inductor, la tensión del muelle, extendido/comprimido se corresponde con la tensión positiva/negativa en el condensador y la velocidad de la masa es la corriente, que también cambia de polaridad a intervalos regulares. Todos los cambios de polaridad se producen alternativamente y a intervalos constantes, primero la tensión, y después la corriente, cada cuarto de período (o cada 90° porque todas las variaciones de las dimensiones de los dos sistemas, la tensión mecánica y la velocidad en el sistema mecánico y la tensión y la corriente en el modelo eléctrico, siguen una función senoidal). Respecto al desplazamiento de fase de 90° también puede decirse que una de las dimensiones sigue una función cosenoidal y, como se supone un funcionamiento lineal y componentes sin pérdidas, en cualquier punto de la oscilación en el tiempo se cumplirá que:

$$\text{sen}^2(\omega t) + \text{cos}^2(\omega t) = 1$$

y entonces la energía interna

$$W = \frac{C}{2} * u^2(t) + \frac{L}{2} * i^2(t) = \text{const}$$

en cualquier instante del tiempo. Con componentes reales se producen pérdidas y el desplazamiento de fase de la corriente respecto de la tensión en un componente inductivo/capacitivo se hace ligeramente inferior a $\pm 90^\circ$ pero, si se opera dentro del rango especificado, las pérdidas son bajas y la influencia de la no linealidad de los materiales del núcleo de la bobina es prácticamente despreciable para fines técnicos, siempre que la bobina de reactancia esté adecuadamente diseñada.

¿Qué tiene de especial una onda senoidal?

Las tensiones senoidales generan corrientes senoidales, y las corrientes senoidales producen caídas de tensión senoidales. ¿Es esto cierto para cualquier función o sólo para una onda senoidal? Respondiendo directamente, es una peculiaridad de la onda senoidal. Véanse los ejemplos para otras formas

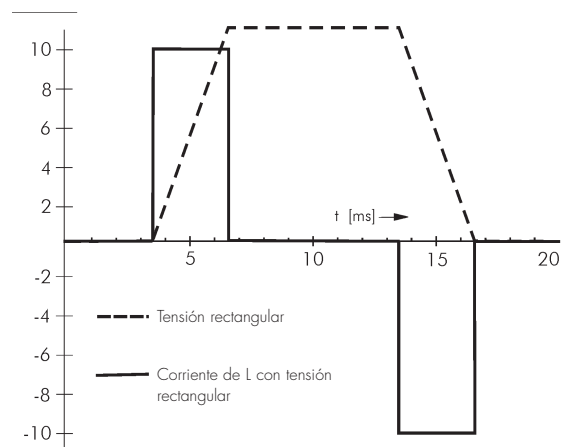


Figura 1- Una tensión rectangular produce una corriente trapezoidal en una bobina ideal (sin pérdidas)

Condensadores en medios ricos en armónicos

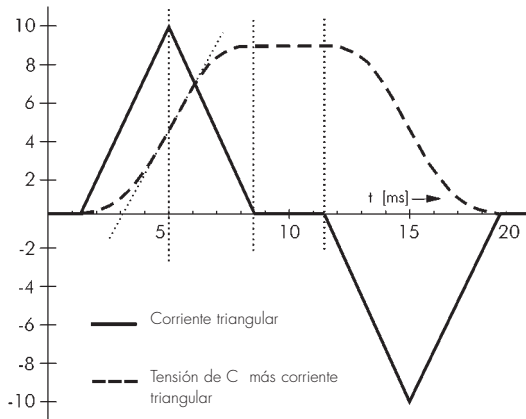


Figura 2 - Corriente triangular al pasar a través de un condensador

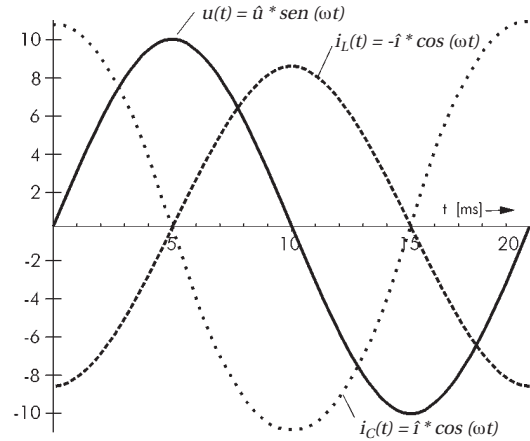


Figura 3 - Tensiones senoidales generan corrientes cosenoidales en componentes reactivos

de onda en las Figuras 1 y 2. Sólo en los elementos resistivos los valores instantáneos de tensión son proporcionales a los valores instantáneos de corriente, de modo que cualquier curva de tensión produce una curva de corriente de la misma forma y viceversa. Para cargas reactivas (por ejemplo en el caso de una inductancia L) la tensión instantánea es proporcional a la velocidad de variación de la corriente con respecto al tiempo (di/dt) o, en el caso de una capacitancia C , la corriente es proporcional a la velocidad de variación de la tensión instantánea con respecto al tiempo (du/dt). Lo mismo es aplicable para una onda senoidal y para una onda cosenoidal.

Las curvas de tensión y corriente senoidales tienen la misma forma para componentes resistivos y reactivos, pero con un desplazamiento de fase. Para los componentes reactivos la tensión es proporcional a la velocidad de la variación de la corriente. Pero la velocidad de variación de una senoide se describe por medio de una cosenoide, que tiene la misma forma y simplemente su punto inicial es diferente. Como el punto inicial de las tensiones y corrientes de la red principal está en algún punto del pasado, que ya no es de interés, es como si las tensiones senoidales generasen corrientes senoidales y las corrientes senoidales produjesen caídas de tensión senoidales, sólo que con un desplazamiento de fase entre ellas.

¿Qué es la potencia reactiva?

En las cargas resistivas los valores instantáneos de tensión y corriente son proporcionales los unos a los otros (Figura 4). En los componentes reactivos no lo son (Figura 6). En el último caso, si una de las dimensiones tiene una forma de onda senoidal, la otra también, pero con un desplazamiento de fase entre ambas; por lo tanto, durante dos secciones de cada período de corriente alterna tienen el mismo signo, pero durante las otras dos secciones sus signos son diferentes. Durante esos períodos en que las polaridades de tensión y corriente son opuestas su producto, la potencia es negativa, de modo que un consumidor de potencia se convierte temporalmente de hecho en una “fuente” de energía. La energía eléctrica absorbida un

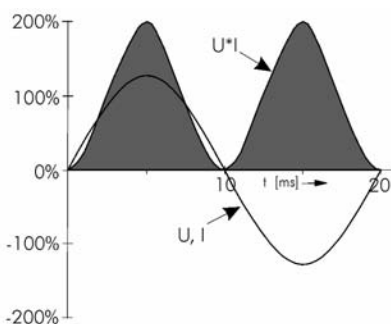


Figura 4 - Carga resistiva

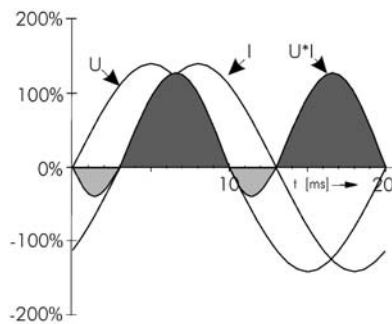


Figura 5 - Carga resistivo-inductiva

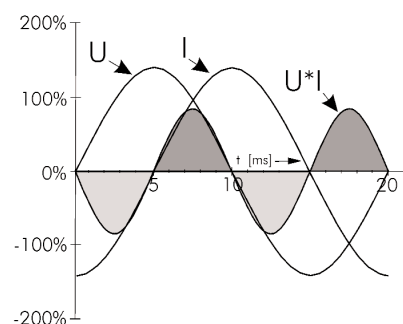


Figura 6 - Carga inductiva

Condensadores en medios ricos en armónicos

cuarto de período antes no fue consumida (por ejemplo convertida en otra forma de energía, como calor), sino que se almacenó y ahora se recupera y es devuelta a la red. La energía “activa” real transferida durante cada período completo es igual a la integral de la potencia, que es el área que queda por debajo de la curva de tensión multiplicada por la curva de corriente (áreas sombreadas en las figuras), restando las partes que quedan por debajo del eje de abscisas a las de la parte superior. De modo que la potencia reactiva fundamental es una oscilación de energía.

Hasta aquí, la definición de la potencia reactiva, en lo que se refiere a tensiones senoidales y cargas reactivas, es todavía relativamente simple. Sin embargo, la potencia reactiva también está presente en las cargas resistivas controladas por el ángulo de fase. En una revista alemana de ingeniería eléctrica un autor afirmaba que una carga de ese tipo, por ejemplo una lámpara incandescente con regulador de intensidad, no produce una potencia reactiva fundamental, ya que no hay ningún período de tiempo en toda la onda en que la tensión y la corriente tengan polaridades opuestas. Esta afirmación levantó voces de desacuerdo entre los lectores, que señalaban que en el análisis de Fourier de esa corriente controlada por el ángulo de fase la onda fundamental tiene un retraso de fase respecto a la tensión, por lo que es evidente que hay una potencia reactiva fundamental. Ambos puntos de vista parecen lógicos, pero ¿cuál de ellos es el correcto?

La Figura 7 nos da la explicación. Visto desde el simple punto de vista de la carga (fila superior de la Figura 7), no hay potencia reactiva —la corriente está en fase con la tensión (a pesar de la forma de onda distorsionada) y el coeficiente de desfase de potencia es la unidad. Pero en un sistema normal se encuentran todo tipo de cargas, que deben ser examinadas desde la perspectiva del sistema, que se muestra en la fila inferior de la Figura 7. Ahora la forma de onda de tensión es también sinusoidal y el coeficiente de desfase de potencia es de 0,8 retrasado (véanse los valores de W, VA y VAR).

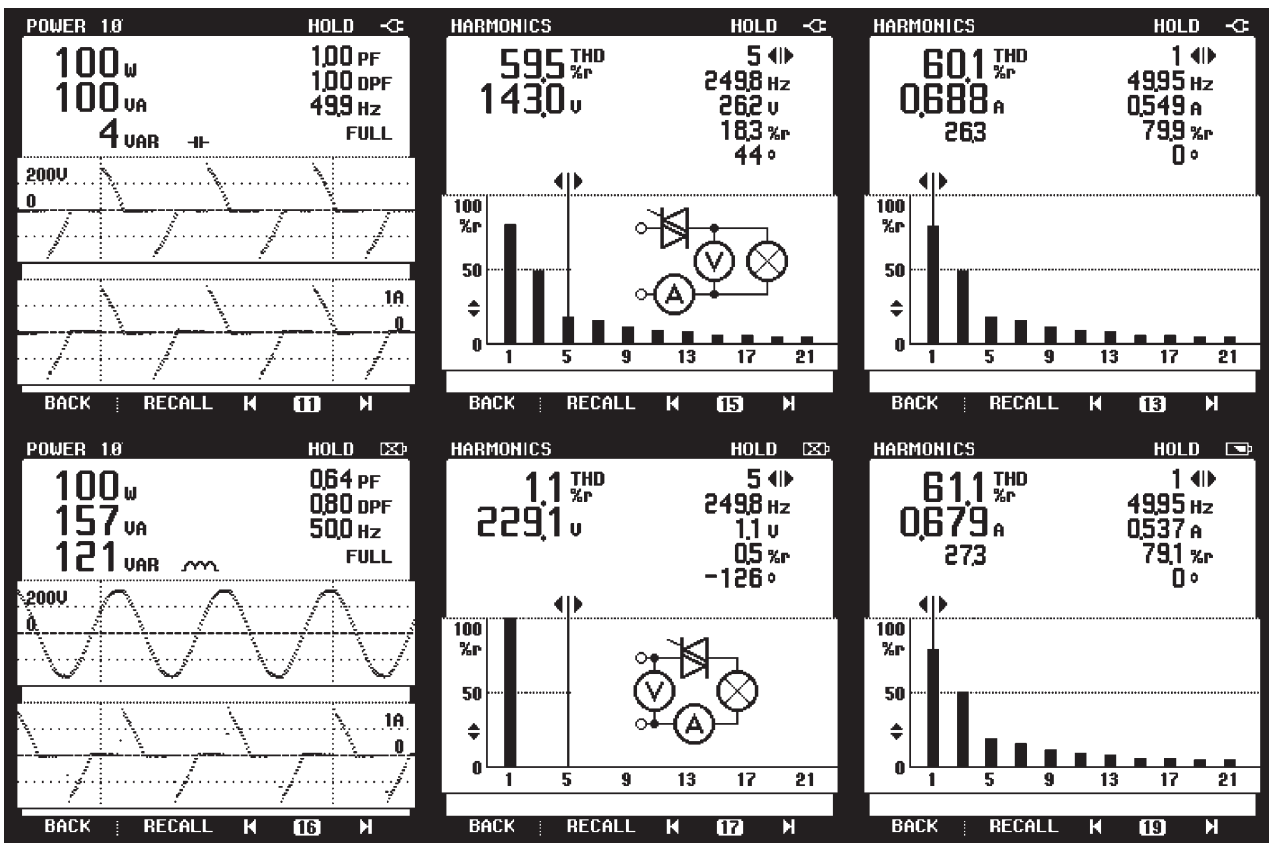


Figura 7 - ¿Produce una carga resistiva controlada por ángulo de fase potencia reactiva fundamental, o no? Desde el punto de vista de la empresa distribuidora el impacto adicional en la red está de hecho ahí, mientras que la oscilación de la energía, que muchos expertos consideran un prerrequisito para la existencia de la potencia reactiva, no se produce.

¿Por qué compensar?

En una red normal se encuentran simultáneamente muchas cargas activas. Muchas serán resistivas, mientras que otras tendrán un componente capacitivo, en el cual la curva de corriente estará un poco por delante de la curva de tensión (adelantada), y otras tendrán un componente inductivo en que la corriente estará retrasada con respecto a la tensión aplicada. En la mayoría de las redes predominan las cargas resistivo-inductivas de modo que la corriente total tiene una naturaleza resistivo-inductiva (Figura 5). Esta incesante, aunque indeseada, oscilación de energía supone un flujo adicional de corriente en los cables y transformadores que se suma a su carga, produce pérdidas resistivas adicionales y utiliza una parte potencialmente elevada de su capacidad. Por lo tanto, las razones básicas para compensar son evitar:

- ◆ La demanda indeseada de capacidad de transmisión.
- ◆ Las pérdidas de energía causadas por ésta.
- ◆ Las caídas de tensión adicionales que producen estas corrientes adicionales en el sistema de distribución.

Estas caídas adicionales de tensión en el sistema son importantes. Una corriente reactiva que fluye a través de una resistencia provoca una pérdida de potencia real. Incluso si la impedancia es mayoritariamente reactiva las variaciones rápidas en la corriente reactiva pueden causar oscilaciones (flicker). Un buen ejemplo de esto es el de una grúa empleada en la construcción de un edificio nuevo en una zona residencial conectada a un transformador de distribución relativamente pequeño. Las grúas normalmente están accionadas por motores de inducción trifásicos regulados por relés, que suelen conmutarse desde la posición de parada a la de marcha, de lento a rápido y de la de subir a la de bajar. Las corrientes de arranque de estos motores son muy elevadas, varias veces superiores a la corriente nominal, pero estas corrientes de arranque tienen un componente inductivo muy elevado y un factor de potencia en torno a $\cos f = 0,3$, o incluso menor en máquinas más grandes. La caída de tensión en el transformador es también mayoritariamente inductiva, por lo que su caída de tensión tiene más o menos el mismo ángulo de fase que la corriente de arranque del motor e introduce mucha más oscilación que la provocada por la misma corriente sobre una carga resistiva (Figura 8). Sin embargo, esto también presupone que esta oscilación puede atenuarse fácilmente añadiendo un condensador para compensar el componente inductivo de la corriente de arranque del motor.

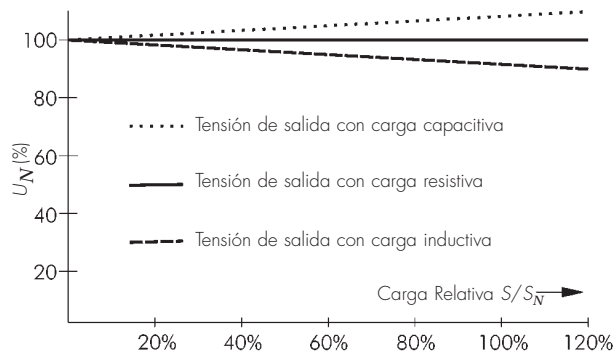


Figura 8 - La caída de tensión en un transformador (aquí de 630 kVA según HD 428, lista C) es muy pequeña bajo una carga resistiva, mayor con una carga inductiva y negativa con una carga capacitiva

Cómo compensar en las condiciones actuales

Control y regulación de la potencia reactiva

Normalmente es deseable compensar la potencia reactiva. Esto es bastante sencillo de lograr añadiendo una carga capacitiva adecuada en paralelo con las cargas resistivo-inductivas, de modo que la componente inductiva quede compensada. De este modo, mientras el elemento capacitivo está descargando a la red la energía que tenía almacenada, el componente inductivo la está extrayendo, y viceversa, porque las corrientes adelantada y retrasada fluyen en direcciones opuestas en cualquier instante en el tiempo. De esta manera, la corriente total se reduce añadiendo una carga. Esto se denomina compensación en paralelo.

Para hacerlo adecuadamente es necesario saber cuanta carga inductiva hay en la instalación, de otro modo se podría producir una sobrecompensación. En ese caso la instalación se convertiría en una carga resistivo-capacitiva que en casos extremos podría ser peor que no tener ninguna compensación en absoluto. Si la carga —más exactamente su componente inductivo— varía, sería necesario utilizar entonces un compensador

Condensadores en medios ricos en armónicos

variable. Normalmente esto se consigue agrupando los condensadores y conectándolos y desconectándolos por grupos mediante relés. Esto naturalmente produce picos de corriente con el consiguiente desgaste de los contactos, provoca riesgo de soldadura de los contactos y tensiones inducidas en líneas de datos en paralelo. Debe prestarse atención a la sincronización de la conexión. Cuando se aplica tensión a un condensador completamente descargado en el momento en que se produce un pico de tensión de la línea, el pico de corriente incidente es equivalente al de un cortocircuito. Todavía peor sería conectarlo un tiempo muy corto después de la desconexión, ya que el condensador puede estar cargado casi por completo con la polaridad inversa, lo que provocaría un pico de corriente incidente de casi el doble que el pico de corriente de cortocircuito de la instalación. Si en el mismo sistema operan muchos conmutadores de alimentación en carga (SMPS), un condensador de compensación cargado, reconectado a la fuente de suministro, puede alimentar directamente un gran número de condensadores de amortiguamiento descargados, más o menos directamente de capacitancia a capacitancia sin apenas ninguna impedancia entre si. El pico de corriente resultante es extremadamente breve, pero extremadamente elevado, mucho mayor que el de un cortocircuito. Existen muchos informes sobre fallos de dispositivos, especialmente de los contactos de los relés que controlan los grupos de condensadores, debidos a breves interrupciones en la red eléctrica que se producen automáticamente, por ejemplo por disyuntores de reconexión automática, para extinguir un arco eléctrico en una línea aérea de transporte de electricidad de alta o media tensión. A menudo se sugiere que este doblado del valor de pico no puede presentarse con condensadores equipados con resistencias de descarga según lo especificado en IEC 831. Sin embargo la normativa prescribe que la tensión disminuya por debajo de los 75 V después de 3 minutos, por lo que tienen un efecto pequeño durante una breve interrupción de una duración desde unas cuantas decenas de milisegundos hasta unos cuantos segundos.

Si en el instante de la reconexión del condensador a la tensión de la línea, la tensión residual del condensador es igual a la tensión de alimentación, no se produce ningún pico de corriente. Al menos esto es cierto si se considera el compensador como una capacitancia pura y la tensión de entrada procede de una fuente de tensión ideal, es decir, con una impedancia cero. Pero si se tiene en cuenta la autoinductancia del sistema, pueden producirse ciertas resonancias entre ésta y la capacitancia. Supongamos el siguiente caso: la tensión residual del condensador es la mitad del valor pico e igual a la tensión instantánea de la línea, que sería el caso después de 45° del último cruce por cero de la tensión, es decir:

$$u_C = u\left(\frac{\pi}{2}\right) = 400V \frac{\sqrt{2}}{2} = 283V$$

En ese instante en el tiempo se esperaría que la corriente en el condensador fuese:

$$i_C = -\frac{\hat{i}}{2}$$

Pero no es así, porque el condensador ha estado desconectado de la red de alimentación hasta ese instante en el tiempo. En el momento de la conexión, despreciando la inductancia del sistema, la corriente se elevaría inmediatamente a este valor, y no sucedería nada que no hubiese sucedido en cualquier caso en el estado estacionario. Pero un sistema real no está libre de inductancia, por lo que la corriente sólo tomará este valor poco a poco al principio, para elevarse rápidamente después y, de nuevo debido a la inductancia (su 'inercia'), dispararse más allá del valor objetivo hasta alcanzar casi el doble del valor esperado. Después desciende de nuevo, y así sucesivamente, y por lo tanto pasa por un breve período de oscilación que puede llegar a atenuarse hasta cero dentro del primer ciclo de la red de alimentación tras la conexión. La frecuencia de esta oscilación puede ser bastante elevada, ya que la inductancia de la red principal es baja, y puede producir interferencias en los equipos de la instalación. Sólo si la tensión instantánea de la línea y la residual del condensador están ambas en sus picos positivos o negativos, momento en que la corriente instantánea sería cero en cualquier caso, la corriente resistivo-inductiva comenzará sin oscilación.

Más exactamente, se deben satisfacer dos condiciones. En primer lugar, que la suma de las tensiones a través de la capacitancia y su reactancia en serie (sean parásitas o debidas a una desintonización intencionada) debe ser igual a la tensión de la línea. En segundo lugar, la corriente instantánea prevista, suponiendo que la conexión ya haya tenido lugar mucho antes, debe ser igual a la corriente real, que naturalmente es cero hasta el instante de la conexión. Esta segunda condición sólo se cumple en el valor de la tensión de pico de la línea, que por lo tanto debe ser igual a la tensión del condensador. Para conseguirlo, el condensador se

Condensadores en medios ricos en armónicos

habrá precargado desde una fuente de alimentación suplementaria. Este procedimiento tiene la pequeña ventaja secundaria de que asegura que siempre haya la máxima cantidad posible de energía almacenada en el condensador mientras no está en uso, de modo que en el instante de la conexión puede contribuir a mitigar alguna caída rápida de tensión y la correspondiente oscilación (flicker) que en otro caso podría producirse.

Sin embargo, los relés son demasiado lentos y no operan con la suficiente precisión para realizar la conmutación en un determinado punto de la onda. Cuando se utilizan relés deberían adoptarse medidas adecuadas para atenuar el pico de la corriente incidente, tales como la colocación de resistencias limitadoras de entrada o reactancias de desintonización. En cualquier caso, estas últimas se utilizan frecuentemente por otras razones (véase la sección 3.3.1 de esta guía), y a veces son requeridas por las empresas de distribución eléctrica. Aunque estas reactancias en serie sustituyen el pico de corriente incidente en el momento de la conexión por un pico de tensión (sobretensión) en el momento de la desconexión se trata de un mal menor, ya que la potencia reactiva nominal de la reactancia es sólo una fracción del valor nominal del condensador y por lo tanto la energía disponible es menor.

Los conmutadores electrónicos, tales como los tiristores, pueden regularse fácilmente para conseguir la conmutación en un punto exacto de la onda. También es posible controlar la conmutación para amortiguar la oscilación rápida producida por una gran carga inductiva inestable, tal como el motor de grúa mencionado anteriormente, un horno de arco eléctrico o un soldador por puntos.

Una opción alternativa que se aplica frecuentemente en algunas partes de Europa es la compensación FC/TCR, que consiste en la conexión en paralelo de un Condensador Fijo (FC) y una Bobina Regulada por tiristor (TCR).

¿Centralizado o disperso?

La razón por la que los abonados al empleo de la electricidad utilizan normalmente la compensación reactiva se debe a que algunas empresas distribuidoras facturan por la potencia reactiva —no es un cargo tan elevado como el de la potencia activa, pero a pesar de ello es un cargo importante— con el fin de compensar el “uso inútil” de la red de distribución. En algunos países se está dejando de facturar por la potencia reactiva y la compensación del factor de potencia se está haciendo menos común. Los usuarios de la electricidad ven esto como una ventaja, pero de hecho supone una carga añadida para aquellos sistemas que trabajan cerca de su máxima capacidad.

La solución tradicional es situar un gran compensador estático en el punto de acoplamiento común, en la entrada de la red de distribución, y corregir allí el factor de potencia al nivel requerido para evitar cargos, normalmente $\cos \phi = 0,90$ o $\cos \phi = 0,95$. La solución alternativa es dispersar la compensación situándola en las proximidades de las cargas resistivo-inductivas y, en el caso extremo, en cada aparato individual que provoca corrientes reactivas.

Con frecuencia se cree que la compensación centralizada es más económica porque una unidad central es menos costosa de adquirir que distribuir el mismo valor nominal de potencia reactiva por toda la instalación en pequeñas unidades dispersas. La capacidad de compensación instalada también puede ser menor porque cabe suponer que no todos los consumidores de corriente reactiva estarán activos simultáneamente. Sin embargo, debe recordarse que las corrientes reactivas provocan pérdidas reales en la instalación —la caída de tensión en un elemento resistivo, como por ejemplo un cable, está en fase con la corriente, por lo que el producto, la pérdida de potencia, es siempre positiva. La compensación central no hace nada para reducir estas pérdidas, simplemente reduce el importe del cargo por factor de potencia impuesto por la compañía distribuidora. Por otra parte, cuando la compensación se ha dispersado, el coste total de las unidades individuales es mayor que el coste de una sola unidad centralizada y la capacidad de compensación total instalada es generalmente mayor —cada dispositivo tiene su compensación, tanto si está en uso como si no. Las pérdidas son más reducidas porque la corriente reactiva fluye solo entre la compensación y el aparato, en lugar de hasta el compensador centralizado instalado en el punto de acoplamiento común.

Aparte de la eficiencia, existen argumentos técnicos a favor y en contra de la compensación centralizada. Por ejemplo, si la carga total sobre un transformador es capacitiva, la tensión de salida se eleva por encima de la nominal. Este efecto se emplea a veces para compensar la caída de tensión en transformadores con

Condensadores en medios ricos en armónicos

carga muy grande. La carga es simplemente sobrecompensada de forma que la carga total aparezca como capacitiva para el transformador, reduciendo así la caída de tensión inductiva en el mismo [1]. En los casos en que una carga muy grande, que se conmuta con frecuencia, provoque un problema de oscilación (flicker), esta solución puede resultar más robusta y fiable que los compensadores de oscilación electrónicos y puede ser también considerablemente más efectiva en cuanto a costes ya que, en cualquier caso, sería necesario un cierto grado de compensación.

Sin embargo, en términos generales, la sobretensión de un transformador bajo una carga capacitiva es un riesgo que se debe evitar o atajar adecuadamente mediante, por ejemplo, una clasificación de tensión ligeramente superior a la nominal ($\approx 6\%$). A veces es necesario o deseable aplicar la compensación a nivel de media tensión (MT) y es atractivo conectar condensadores de baja tensión (BT) a través de un transformador MT/BT en lugar de pagar un precio mayor por condensadores de media tensión. En ese caso, la carga del transformador es capacitiva y la tensión de salida es mayor que la esperada. Esto puede resolverse mediante la adecuada selección de componentes con la clasificación de tensión correcta o seleccionando la relación de transformación del transformador mediante devanados intermedios para normalizarla. Esta última opción es preferible ya que evita que el transformador funcione en un estado sobre-excitado con pérdidas consecuentemente mayores. La idea puede resultar ser un falso ahorro porque, aunque el coste de la instalación se reduce, los costes de funcionamiento aumentan. La corriente reactiva de la instalación es transformada dos veces —de la baja tensión de la instalación a la media tensión del sistema, y de la media tensión del sistema a la baja tensión del condensador— con dos pérdidas de carga que deben ser pagadas por el usuario.

Las otras desventajas de la potencia reactiva: demanda de capacidad de transmisión y caída de tensión, también se producen dentro de la instalación en cualquier línea y en cualquier transformador entre la carga inductiva y el compensador. Es mejor gastar el 100% del presupuesto en el 100% del empleo que el 75% del presupuesto para sólo el 50% del uso.

En un esquema descentralizado, todas y cada una de las cargas resistivo-inductivas —incluso las pequeñas— pueden compensarse integrando un condensador en ellas. Esto se ha hecho con bastante éxito, por ejemplo, en los dispositivos de iluminación con una o dos lámparas fluorescentes y balastos magnéticos. En Alemania y Suiza esto suele colocarse como una compensación en serie, donde uno de cada dos circuitos de lámpara-balasto se deja sin compensar y el otro se (sobre-) compensa por medio de un condensador en serie dimensionado de forma que tome precisamente la misma amplitud de corriente que el ramal no compensado, pero con el ángulo de fase inverso.

Sin embargo la descentralización tiene sus límites en las situaciones en las que se instala una compensación local e individual en una máquina de inducción asíncrona. Si el condensador se sitúa delante del conmutador del motor, puede permanecer fácilmente conectado cuando el motor está desconectado, dejando al sistema sobrecompensado. Si el condensador se sitúa después del conmutador del motor, también se desconecta con el motor, pero existe el riesgo de autoexcitación al desacelerar la máquina. Se genera tensión aunque el dispositivo haya sido aislado de la fuente de alimentación, incluso sobretensión en el caso de que la capacitancia se haya dimensionado incorrectamente.

En este punto debe ser evidente que la potencia reactiva no siempre es indeseada. Antes bien, es necesario generar la cantidad adecuada de potencia reactiva capacitiva para compensar la potencia reactiva inductiva y viceversa en los casos en que predominen las cargas resistivo-capacitivas. La potencia reactiva capacitiva tiene también bastantes ventajas y reduce pérdidas, por ejemplo para excitar generadores asíncronos como turbinas eólicas e instalaciones de cogeneración si están conectadas directamente al sistema sin un inversor. Incluso se convierte en una necesidad absoluta en situaciones en que esos generadores deban alimentar una red aislada, ya que de lo contrario no hay excitación, no hay tensión y no hay alimentación, aunque la máquina este funcionando.

Desintonización

La desintonización se refiere a la práctica de conectar cada condensador de compensación en serie con una bobina de reactancia. Ya se ha mencionado una razón para llevar a cabo la desintonización, la atenuación de las corrientes de entrada. Sin embargo la razón fundamental por la que se recomienda la desintonización por

Condensadores en medios ricos en armónicos

todos los proveedores de compensadores y por la mayoría de las compañías distribuidoras de electricidad, y por la que muchos usuarios ya la han adoptado, es el problema de las perturbaciones de tensión en la red. Las modernas cargas electrónicas provocan corrientes armónicas, causan perturbaciones de tensión armónicas (véase la Sección 3.1 de esta Guía) e incorporan ruido de alta frecuencia en la red. Como la reactancia de un condensador es inversamente proporcional a la frecuencia, estas altas frecuencias pueden hacer que se supere la corriente nominal del condensador. Esto se evita mediante la presencia de un inductor de desintonización. La potencia reactiva nominal de la bobina de desintonización es normalmente el 5%, 7%, o el 11% de la potencia reactiva del condensador de compensación. Este porcentaje se denomina también “coeficiente de desintonización”.

Cuando se habla de valores nominales, se plantea una confusión importante sobre si la potencia reactiva indicada en la placa de datos de un compensador se refiere a la tensión nominal de la red o a la tensión nominal del condensador (que es mayor), y sobre si se ha tenido en cuenta, o no, el coeficiente de desintonización. De hecho, la potencia reactiva especificada debe referirse siempre a la unidad combinada —compensador y bobina de desintonización— a la tensión de alimentación y a la frecuencia fundamental.

Como la reactancia de una bobina aumenta proporcionalmente con la frecuencia mientras que la de un condensador disminuye, un coeficiente de desintonización del 11% a 50 Hz se convierte en $\approx 100\%$ a 150 Hz¹, lo que significa que las reactancias inductiva y capacitiva son iguales (en resonancia entre si) y se anulan. Esto proporciona una opción para diseñar coeficientes de desintonización de forma que “absorban” de la red un armónico determinado, al mismo tiempo que desempeñan su función básica de compensación. Esto se describe con mayor detalle en la sección 3.3.1. No obstante, generalmente para evitar la sobrecarga del condensador (y de la bobina) es preferible evitar coeficientes de desintonización que sitúen la frecuencia resonante en una de las frecuencias armónicas predominantes. En lugar de ello, se escoge el coeficiente de desintonización de forma que la combinación condensador/bobina se haga inductiva para frecuencias que están inmediatamente por debajo y por encima de la más baja en la que se produce el armónico (Figura 9). Esto evita resonancias (Figura 10) que de otro modo se producirían entre el condensador y otros elementos del sistema, especialmente con la inductancia parásita del transformador más cercano, que sería excitada por un armónico u otro. En las figuras se muestran las curvas de coeficientes de amplificación con respecto a la frecuencia. Aquí debe entenderse el coeficiente de amplificación como la relación del comportamiento del sistema en su estado presente, comparado con el comportamiento del mismo sistema en ausencia del compensador.

Pero esta no es la única razón para llevar a cabo la desintonización. Actualmente los condensadores pueden estar también sobrecargados por frecuencias más altas que están siempre presentes en las redes, más altas que los armónicos más comunes. Incluso pequeñas tensiones de alta frecuencia superpuestas a la tensión de alimentación —tan pequeñas que no son visibles en los registros de tensión de un analizador de red de alta gama (Figura 11)— pueden generar corrientes elevadas a través de los condensadores.

¹ X_L a 50 Hz = 11%, por lo tanto X_L a 150 Hz = 33% (con respecto a X_C a 50 Hz). X_C a 150 Hz = 33%. Ambos son iguales en magnitud, por que el coeficiente de desintonización es del 100%.

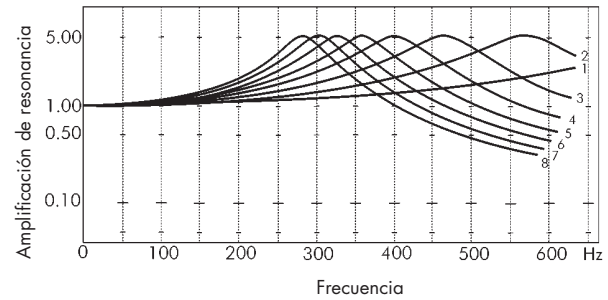


Figura 9 - Curvas de resonancia de diferentes compensadores desde 50 kvar (curva 1) hasta 400 kvar (curva 8), funcionando sobre un transformador de 1.250 kVA (Frako)

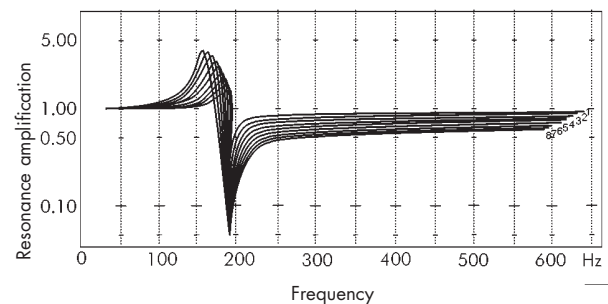


Figura 10 - Curvas de resonancia de diferentes compensadores desintonizados desde 50 kva (curva 1) hasta 400 kvar (curva 8) funcionando sobre un transformador de 1.250 kVA (Frako)

Condensadores en medios ricos en armónicos

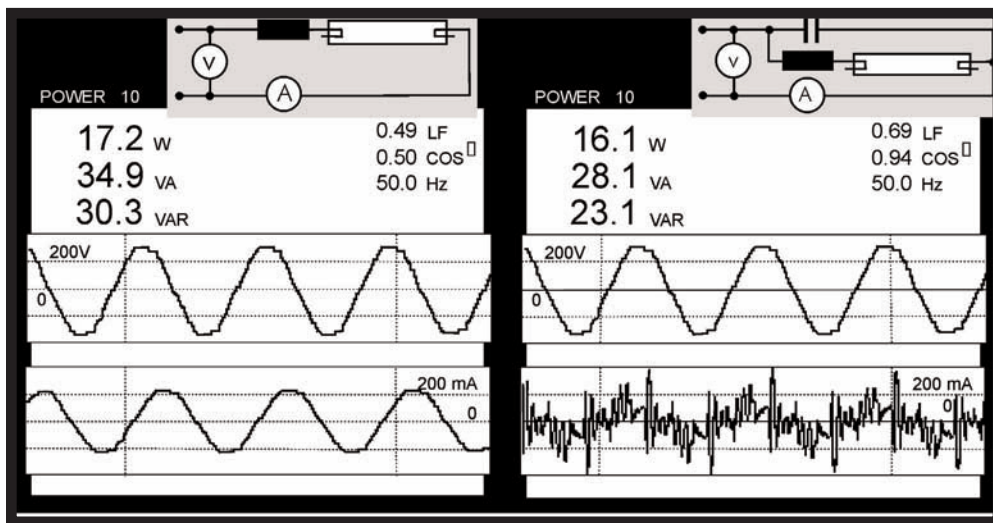


Figura 11 - Lámpara fluorescente de 11W sin (izquierda) y con compensación paralela (derecha)

A la izquierda está representada una lámpara fluorescente de 11 W con un balasto magnético pero sin compensación. Sin embargo, la elevada cantidad de potencia reactiva requiere la compensación por medio de condensadores. A la derecha, la onda de corriente del sistema de la lámpara, (la lámpara y el balasto conectados en serie, en paralelo con el condensador adecuado) tiene una forma quebrada peculiar en lugar de aproximarse a una onda senoidal. Esta combinación adicional de corrientes de alta frecuencia debe fluir a través del condensador, ya que no ha cambiado nada más en el circuito. Las mediciones lo confirman. Como la corriente es casi senoidal en la gráfica de la izquierda, la diferencia entre el factor de potencia (también denominado factor de carga LF) y el $\cos \varphi$ (llamado también factor de desplazamiento) es pequeña, mientras que en la derecha toma un valor significativo. La razón es que el factor de potencia es la relación entre la potencia real (50 Hz) y la potencia aparente, que incluye la potencia reactiva fundamental, la potencia armónica y la potencia del ruido, mientras que el $\cos \varphi$ —el factor de desplazamiento— sólo incluye la potencia reactiva fundamental producida por el desplazamiento de fase entre la tensión y la corriente fundamental. El condensador está para llevar corriente reactiva (izquierda), pero también es un colector para las corrientes armónicas (derecha) si no se desintoniza. Esta es la segunda razón de porque actualmente está tan extendido el empleo de la desintonización y revela lo importante que puede ser para la vida de un condensador diseñado para 50 Hz. El experimento puede repetirse con resultados similares en casi todas las instalaciones modernas. Simplemente conectar un condensador a la tensión de la línea y registrar la corriente dará lecturas similares en cualquier parte. Hacer pasar la corriente del condensador a través de un altavoz adecuadamente dimensionado puede resultar una experiencia bastante impresionante. El ruido es verdaderamente horrible, pero se convierte en un suave zumbido de 50 Hz tan pronto como el condensador se “desintoniza” con una bobina.

El presente ejemplo también hace que la compensación en serie para lámparas fluorescentes que hemos mencionado sea bastante ventajosa, ya que representa una capacitancia compensadora con un coeficiente de desintonización del 50% y esto incluso considerando la presencia de una bobina que ya está allí y que no necesita añadirse.

Resumen

En primer lugar es importante entender el comportamiento complementario de los elementos L y C para comprender el mecanismo de la compensación. Los condensadores de compensación deberán estar siempre desintonizados para evitar la resonancia con armónicos y la sobrecarga por corrientes de alta frecuencia. Las unidades de compensación variable deben diseñarse con una capacidad de conmutación rápida mediante conmutadores electrónicos y algoritmos de control inteligentes. También se ha tratado la ubicación óptima de la compensación y si esta debe ser centralizada o distribuida.

Referencias y Bibliografía

[1] Wolfgang Hofmann, Wolfgang Just: *Blindleistungs-Kompensation in der Betriebspraxis*, VDE Verlag, Offenbach, Germany, 4th edition, 2003

Socios Fundadores* y de Referencia

European Copper Institute* (ECI) www.eurocopper.org	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid www.etsii.upm.es	LEM Instruments www.lem.com
Akademia Gorniczo-Hutnicza (AGH) www.agh.edu.pl	Fluke Europe www.fluke.com	MGE UPS Systems www.mgeups.com
Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA) www.citcea.upc.es	Hochschule für Technik und Wirtschaft* (HTW) www.htw-saarland.de	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg www.uni-magdeburg.de
Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) www.ceiuni.it	Hogeschool West-Vlaanderen Departement PIH www.pih.be	Polish Copper Promotion Centre* (PCPC) www.miedz.org.pl
Copper Benelux* www.copperbenelux.org	International Union for Electricity Applications (UIE) www.uie.org	Università di Bergamo* www.unibg.it
Copper Development Association* (CDA UK) www.cda.org.uk	ISR - Universidade de Coimbra www.isr.uc.pt	University of Bath www.bath.ac.uk
Deutsches Kupferinstitut* (DKI) www.kupferinstitut.de	Istituto Italiano del Rame* (IIR) www.iir.it	University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) www.umist.ac.uk
Engineering Consulting & Design* (ECD) www.ecd.it	Katholieke Universiteit Leuven* (KU Leuven) www.kuleuven.ac.be	Wroclaw University of Technology* www.pwr.wroc.pl
EPRI PEAC Corporation www.epri-peac.com	Laborelec www.laborelec.com	

Consejo Editorial

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Dr Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Jean-Francois Christin	MGE UPS Systems	jean-francois.christin@mgeups.com
Prof Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	adealmeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Prof Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@howest.be
Dr ir Marcel Didden	Laborelec	marcel.didden@laborelec.com
Dr Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczo-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Stephanie Horton	LEM Instruments	sho@lem.com
Dr Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Prof Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	jonathanm@gorham.org
Prof Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Mark McGranaghan	EPRI PEAC Corporation	mmcgranaghan@epri-peac.com
Dr Jovica Milanovic	UMIST	jovica.milanovic@umist.ac.uk
Dr Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Dr ir Tom Sels	KU Leuven	tom.sels@esat.kuleuven.ac.be
Prof Dr-Ing Zbigniew Styczynski	Universität Magdeburg	Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de
Andreas Sumper	CITCEA	sumper@citcea.upc.es
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl
Hans van den Brink	Fluke Europe	hans.van.den.brink@fluke.nl



Stefan Fassbinder



Deutsches Kupferinstitut
Am Bonnhof 5
D-40474 Düsseldorf
Germany

Tel: 00 49 211 4796300
Fax: 00 49 211 4796310
Email: Sfassbinder@kupferinstitut.de
Web: www.kupferinstitut.de



Princesa, 79
28008 Madrid
Tel: 91 544 84 51
Fax: 91 544 88 84
e-mail: cedic@pasanet.es
web: www.infocobre.org.es



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org