

Guia de Aplicação de Qualidade de Energia

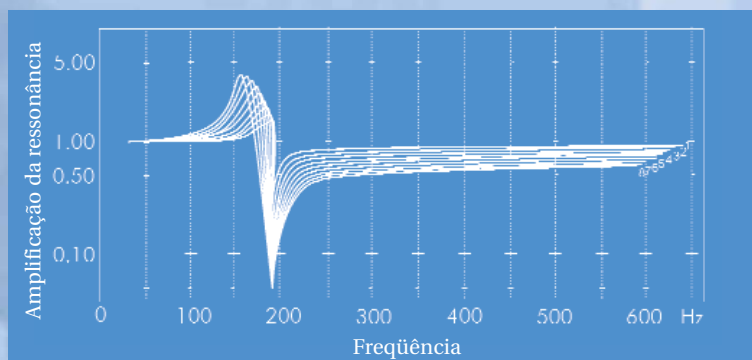


Leonardo da Vinci

Harmônicas

Capacitores em ambientes ricos em harmônicas

3.1.2



Harmônicas

Análise de investimentos para soluções de Qualidade de Energia

Angelo Bagгинi & Franco Bua

Università di Bergamo & Engineering Consulting and Design

Julho de 2004



Este Guia foi produzido como parte do Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), um programa de educação e treinamento europeu apoiado pela Comissão Europeia (sob o Programa Leonardo da Vinci) e pelo International Copper Association (ICA). Para informação adicional sobre o LPQI visite www.lpqi.org.



European Copper Institute (ECI)

O European Copper Institute (ECI) (Instituto de Cobre Europeu) é uma joint venture entre o ICA (International Copper Association) e os fabricantes europeus. O ECI representa os maiores produtores de cobre do mundo e os fabricantes europeus mais importantes para promover o cobre na Europa. Criado em janeiro de 1996, o ECI é apoiado por uma rede de onze Associações de Desenvolvimento do Cobre ('CDAs') em Benelux, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Itália, Polónia, Rússia, Escandinávia, Espanha e Reino Unido.



Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE

É uma instituição sem fins lucrativos, constituída por empresas produtoras e transformadoras de cobre no Brasil com a missão de estimular o uso técnico e econômico do metal, promovendo sua utilização correta e eficiente. Desenvolve projetos nas várias áreas de aplicação do metal, divulgando as vantagens da utilização do cobre na energia elétrica, nas instalações hidráulicas e de gás, na arquitetura, no design e decoração de interiores, na saúde e muitas outras.

Aviso de Isenção de Responsabilidades

O conteúdo deste documento não necessariamente reflete a posição da Comunidade Europeia, nem implica nenhuma responsabilidade por parte da Comunidade Europeia. O European Copper Institute, Hogeschool West-Vlaanderen, Labo Lemcko e Copper Development Association negam qualquer responsabilidade por qualquer dano direto, indireto, conseqüente ou incidental que possa resultar pelo uso da informação, ou pela impossibilidade do uso da informação ou dos dados contidos nesta publicação.

Copyright® European Copper Institute, Hogeschool West-Vlaanderen, Labo Lemcko and Copper Development Association.

Reprodução autorizada desde que o material esteja completo e a fonte mencionada.

Capacitores em ambientes ricos em harmônicas

Uma planta antiga em um novo ambiente

Bancos de capacitores, usados para a compensação de energia reativa fundamental, são essenciais para a operação econômica de sistemas que incluem cargas resistivas e indutivas. De fato, as cargas resistivas e indutivas têm sido onipresentes desde o começo da engenharia elétrica de potência. No entanto, uma vez que agora as cargas não lineares estão ficando similarmente onipresentes, há dois novos riscos que surgem externa e internamente aos bancos de capacitores:

- Sobrecarga de corrente dos capacitores;
- Ressonância paralela de capacitâncias com indutâncias em suas proximidades elétricas.

Capacitores de compensação continuam sendo indispensáveis, e é bastante fácil projetá-los ou modificá-los para atender aos novos desafios. Este Guia identifica a abordagem ótima para selecionar bancos de capacitores novos ou melhorar os existentes de forma a prevenir os problemas causados por harmônicas.

Fundamentos: Características de indutâncias e capacitâncias

Eletricamente, a indutância é análoga à inércia de uma massa em um sistema mecânico. Um reator, ou seja, um componente com um valor de indutância definido e intencional, representa o equivalente elétrico de um volante, que teria uma inércia definida. Claro que, qualquer coisa que tem uma massa também tem inércia e, do mesmo modo, qualquer parte de um condutor tem uma indutância parasita.

A indutância L e a capacitância C representam componentes reativos com uma reatância e uma energia reativa, considerando que a energia reativa capacitiva de entrada é o equivalente de energia reativa indutiva de saída e vice-versa. A energia reativa tem, efetivamente, nenhuma direção de fluxo claramente definida. As reatâncias são calculadas como segue:

$$X_L = 2\pi fL \text{ e } X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Assim, a reatância indutiva X_L é proporcional à frequência f , enquanto que a reatância capacitiva X_C é inversamente proporcional à frequência f . Para qualquer combinação paralela de L e C haverá uma frequência f_0 , na qual as reatâncias são iguais - esta é a frequência de ressonância. Esta frequência, na qual a combinação LC oscila, é calculada por:

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

Em relação às correntes adiantadas, pode parecer um pouco difícil imaginar como uma corrente capacitiva pode ser inteligente o bastante para saber, com antecedência, o que a tensão que a provoca fará um quarto de um período depois, mas, de certo modo, isto acontece de fato. Para ser preciso, é qualquer variação de corrente que está se atrasando ou está se adiantando em relação à correspondente variação de tensão, por exemplo, a passagem pelo zero. Isso tem origem na energia que está sendo armazenada na capacitância e nas características especiais da forma de onda.

A capacitância elétrica corresponde à resiliência (elasticidade) de um componente mecânico. Um capacitor pode ser fabricado com uma capacitância definida, correspondendo a uma mola em um sistema mecânico, mas, da mesma forma que qualquer material é resiliente (elástico) até certo ponto, assim há uma certa quantidade de capacitância parasita entre duas partes de um material condutor.

A pergunta é se estas reatâncias parasitas são grandes o bastante para desempenhar um papel na prática. Em tensões ou frequências mais altas, elas são frequentes, mas este normalmente não é o caso nos níveis de baixa tensão e frequência das redes.

Capacitores em ambientes ricos em harmônicas

O conteúdo de energia em cada um dos armazenamentos de energia é determinado por:

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

Onde:

D = constante de elasticidade (alongamento por força, a Lei de Hooke);

s = alongamento (distância instantânea do ponto de estado relaxado);

m = massa;

v = velocidade de movimento desta massa.

na qual s e v poderiam ser, e deveriam ser, escritos como funções do tempo $s(t)$ e $v(t)$.

A combinação da massa inercial com a mola resiliente resulta em um sistema com dois armazenamentos de energia. A energia que é liberada de um dos componentes pode fluir direito para o outro. Se a mola é estendida e liberada, a massa será acelerada, com a força para realizar isso vindo da mola relaxada. No cruzamento pelo zero da força, a mola está em seu estado relaxado e a massa está se movendo na velocidade máxima. Uma vez que a massa tem inércia, ela continuará se movendo, comprimindo agora a mola de forma que a energia é transferida da massa móvel de volta para a mola. Quando os armazenamentos de energia são um capacitor e um indutor, a tensão na mola estendida/comprimida relaciona-se com a tensão positiva/negativa no capacitor e a velocidade da massa é a corrente, que também troca de polaridade em intervalos regulares. Todas as trocas de polaridade acontecem alternadamente e em intervalos constantes, primeiro a tensão, então a corrente, a cada um quarto do período (ou a cada 90° , porque todas as variações das duas dimensões, tensão e velocidade no modelo mecânico, tensão e corrente no modelo elétrico, seguem uma função senoidal). Por conta do deslocamento de fase de 90° , também pode ser dito que uma das dimensões segue uma função co-senoidal e, uma vez assumido componentes lineares e a ausência de perdas, em qualquer tempo dentro da oscilação

$$\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1$$

então, a energia interna

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

em qualquer tempo. Com perdas reais nos componentes e com o deslocamento de fase da corrente em relação à tensão em um componente indutivo/capacitivo, torna-se um pouco menor do que $\pm 90^\circ$, mas, se operado dentro da faixa especificada, as perdas são baixas, e a influência da não linearidade em materiais de núcleos de reatores é largamente desprezível para propósitos técnicos se o reator é adequadamente projetado.

O que há de especial sobre as ondas senoidais?

Tensões senoidais resultam em correntes senoidais, e correntes senoidais produzem quedas de tensão senoidais. Isso é verdade para as formas de onda senoidais apenas ou para qualquer função?

A resposta direta é que isto é uma peculiaridade apenas das ondas senoidais. Veja os exemplos para outras formas de onda nas Figuras 1 e 2. Somente para elementos resistivos é que os valores instantâneos de tensão são proporcionais aos valores instantâneos de corrente, de forma que qualquer curva de tensão produz uma curva de corrente da mesma forma e vice-versa. Para cargas reativas (por exemplo, no caso de uma indutância L), a tensão instantânea é proporcional à taxa de variação da corrente em relação ao tempo (di/dt), ou (no caso de uma capacitância C) corrente é proporcional à taxa de variação da tensão instantânea em relação a tempo (du/dt). O mesmo vale para uma onda senoidal e uma onda co-senoidal.

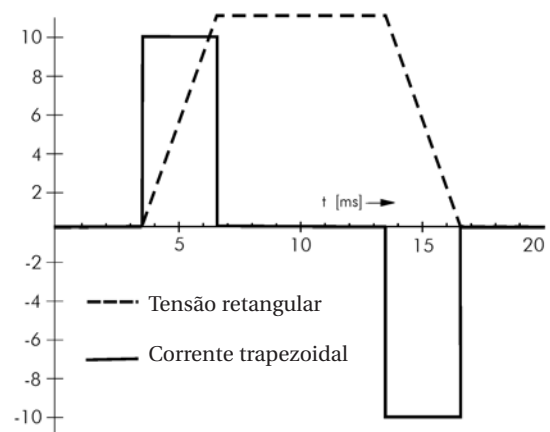


Figura 1 - Tensão retangular causa corrente trapezoidal em um reator ideal (sem perdas).

Capacitores em ambientes ricos em harmônicas

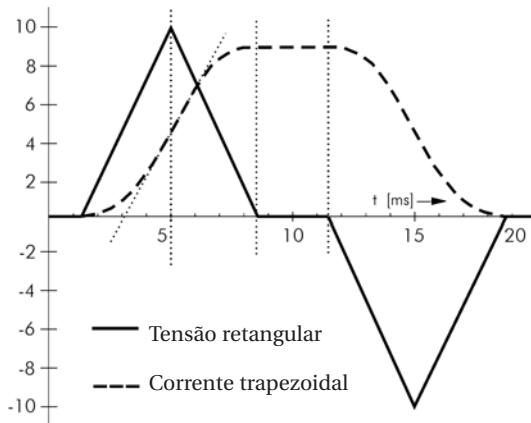


Figura 2 - Corrente triangular circulando em um capacitor.

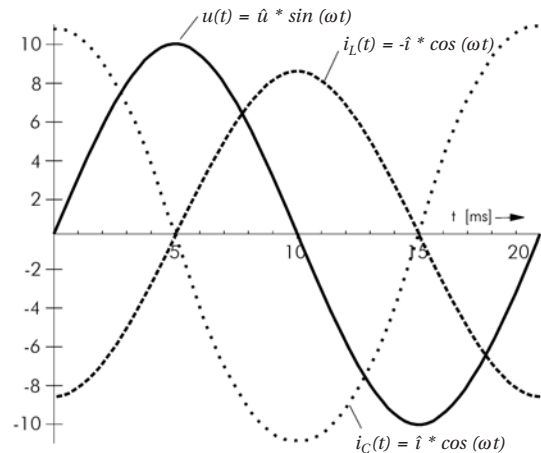


Figura 3 - Tensões senoidais resultam em correntes co-senoidais em componentes reativos.

As curvas senoidais de tensão e corrente têm a mesma forma para componentes resistivos e reativos, mas com deslocamento de fase. Para componentes reativos, a tensão é proporcional à taxa de variação da corrente. Mas a taxa de variação de uma senoide é descrita por um co-senóide, que tem a mesma forma e somente um ponto de início diferente. Como os pontos de partida de tensões e correntes da rede de alimentação estão em algum lugar no passado, onde não há mais nenhum interesse, resulta como se tensões senoidais dessem origem a correntes senoidais e correntes senoidais causassem quedas de tensão senoidais com apenas um deslocamento de fase entre eles.

O que é energia reativa?

Em cargas resistivas, os valores instantâneos de tensão e corrente são proporcionais a um ao outro (Figura 4), enquanto que em componentes reativos isto não acontece (Figura 6). No primeiro caso, se uma das dimensões tem uma forma de onda senoidal, então a outra também terá, mas com um deslocamento de fase entre as duas; conseqüentemente, durante duas seções de todos os períodos da onda alternada, elas têm o mesmo sinal, mas, durante outras duas seções, os sinais são diferentes. Durante estes períodos de tensão e corrente com polaridades opostas, o produto entre eles, a energia, é negativa, de modo que, temporariamente, um consumidor de energia se transforma, de fato, em um “fornecedor” de energia. A energia elétrica absorvida em um quarto de período anterior não foi consumida (por exemplo, convertida em uma outra forma de energia, tal como calor), mas foi armazenada, recuperada e injetada de volta na rede de alimentação. A energia “ativa” real transferida durante cada período completo é igual à integral da energia, a qual corresponde à área situada abaixo curva de tensão multiplicada pela corrente (áreas sombreadas nas figuras), com as partes sob o eixo das abscissas sendo subtraídas das partes sobre este eixo. Assim, a energia reativa fundamental é uma oscilação de energia.

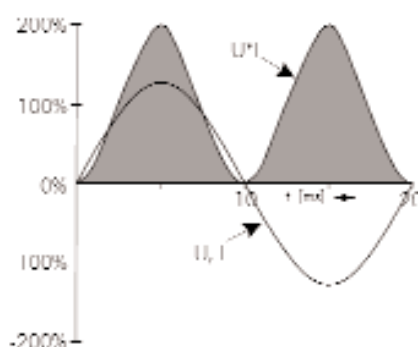


Figura 4 - Carga resistiva.

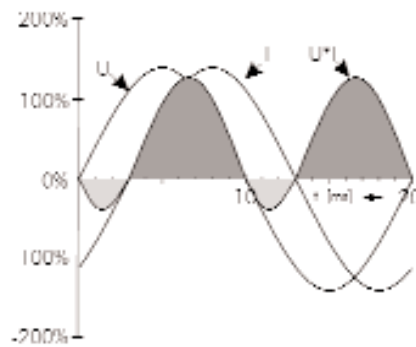


Figura 5 - Carga resistiva-indutiva.

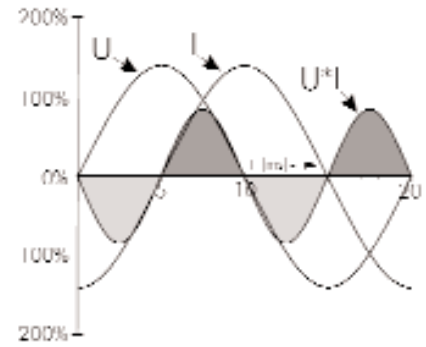


Figura 6 - Carga indutiva.

Até aqui, a definição de energia reativa, relacionada às tensões senoidais e cargas reativas, ainda é relativamente simples. Porém, a energia reativa também está presente em cargas resistivas controladas por ângulo de fase. Em um jornal alemão de engenharia elétrica, um autor inicialmente defendeu que tal carga (por exemplo, uma lâmpada incandescente controlada por um dimmer) não causa energia reativa fundamental, uma vez que não há períodos de tempo dentro de uma onda completa onde tensão e corrente têm polaridades opostas. Porém, ele provocou uma inundação de discordância entre os leitores ao destacar que, na análise de Fourier de tal corrente controlada por ângulo de fase, a onda fundamental teve, de fato,

Capacitores em ambientes ricos em harmônicas

um deslocamento de fase atrasado em relação à tensão, tornando assim evidente que havia energia reativa fundamental. Ambos os pontos de vista soam lógicos, mas qual está correto?

A Figura 7 fornece uma explicação. Olhando-se o assunto sob o ponto de vista simples da carga (parte de cima da Figura 7), não há nenhuma energia reativa - a corrente está em fase com a tensão (apesar da forma de onda torcida) e o fator de potência de deslocamento é igual à unidade. Mas, todas as cargas existem em um sistema comum, e o assunto deveria também ser examinado sob a perspectiva do sistema, mostrada na parte de baixo da Figura 7. Neste caso, a forma de onda da tensão é novamente senoidal e o fator de potência de deslocamento é agora 0,8 atrasado (veja as medições de W, VA e VAR).

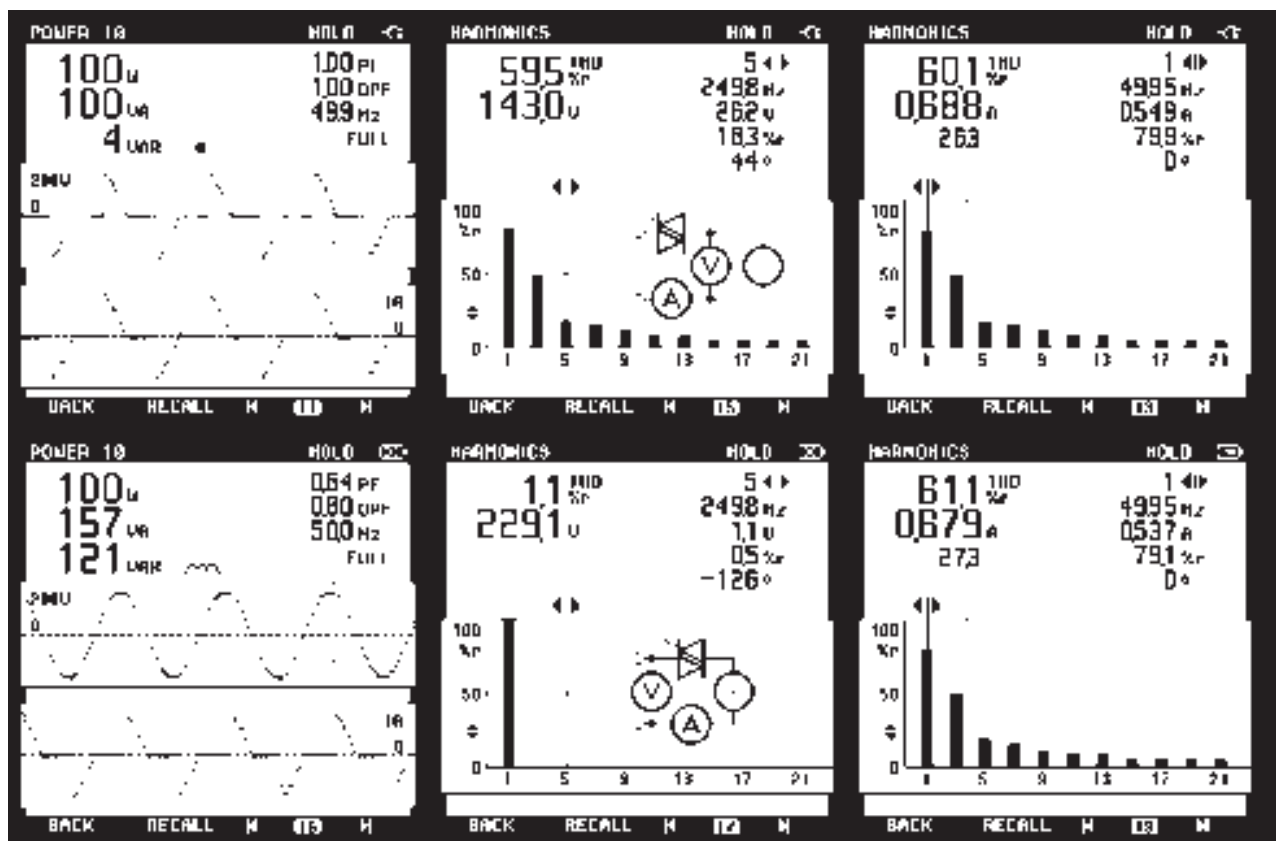


Figura 7 - Uma carga resistiva controlada por ângulo de fase provoca energia reativa fundamental ou não? Sob o ponto de vista da concessionária, o impacto adicional de energia na rede está realmente lá, enquanto que a oscilação de energia, a qual alguns especialistas vêem como um pré-requisito para a existência de energia reativa, não acontece.

Por que compensar?

Em uma rede normal há muitas cargas ativas funcionando simultaneamente. Muitas serão resistivas, enquanto algumas terão uma componente capacitiva, onde a curva de corrente estará um pouco à frente da curva de tensão (adiantada), e outras terão uma componente indutiva, onde as correntes estão atrasadas em relação à tensão aplicada. Na maioria das redes, as cargas resistivas-indutivas prevalecem, de forma que a corrente total terá uma natureza resistiva-indutiva (Figura 5). Esta incessante e indesejada oscilação da energia significa um fluxo adicional de corrente nos cabos e transformadores, a qual se soma às suas cargas, causa perdas resistivas adicionais e utiliza uma parte potencialmente grande de suas capacidades. Portanto, as razões básicas para se fazer a compensação são:

- Evitar a demanda indesejada que afeta a capacidade de transmissão;
- Evitar as perdas de energia;
- Evitar as quedas de tensão adicionais no sistema de distribuição causadas pelas correntes adicionais.

Estas quedas de tensão extras no sistema são importantes; uma corrente reativa circulando por uma perda de energia real. Mesmo nos casos em que a impedância é em grande parte reativa, as variações rápidas na corrente reativa podem causar cintilamento (flicker). Um bom exemplo neste caso é um guindaste de construção ligado a um transformador de distribuição relativamente pequeno quando uma nova casa é erguida em uma área residencial. Os guindastes normalmente são acionados por motores de indução trifásicos controlados por relés, que são frequentemente chaveados entre as posições “parado” e “em movimento”, “lento” e “rápido” e “para cima” e “para baixo”. As correntes de partida destes motores são muito altas, várias vezes a corrente nominal, mas elas têm uma componente indutiva muito alta, com fator de potência ao redor de $\cos \phi \sim 0,3$, ou até menor nas grandes máquinas.

A queda de tensão no transformador também é grandemente indutiva, de modo que esta queda de tensão tem mais ou menos o mesmo ângulo de fase da corrente de partida do motor, e soma-se muito mais com o cintilamento do que a mesma corrente solicitada por uma carga resistiva (Figura 8). Porém, isto também significa que esse cintilamento pode ser mitigado facilmente pela adição de um capacitor para compensar a componente indutiva da corrente de partida do motor.

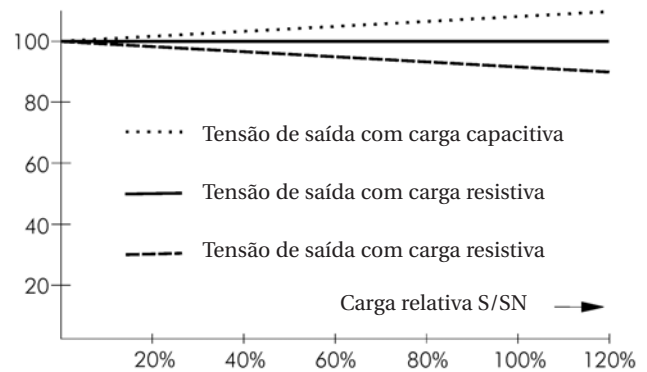


Figura 8 - Queda de tensão em um transformador (630 kVA de acordo com HD 428 lista C) é menor com uma carga resistiva, maior com uma carga indutiva e negativa com uma carga capacitiva.

Como compensar sob as condições atuais

Controle e regulação da energia reativa

Normalmente é desejável compensar a energia reativa. Isto é bastante fácil de obter colocando-se uma carga capacitiva em paralelo com as cargas resistivas-indutivas de forma que a componente indutiva seja compensada. Assim, enquanto o elemento capacitivo está fornecendo sua energia armazenada de volta para a rede, o componente indutivo está solicitando tal energia, e vice-versa, porque as correntes adiantadas e atrasadas circulam em direções opostas em todos os instantes. Deste modo, a corrente total é reduzida ao se adicionar uma carga. Isto é conhecido por compensação paralela.

Para se fazer isto corretamente, é necessário um conhecimento de quanta carga indutiva há na instalação, pois, caso contrário, pode ocorrer uma sobre-compensação. Nesta situação, a instalação se tornaria uma carga resistiva-capacitiva que, em casos extremos, poderia ser pior do que não ter nenhuma compensação. Se a carga - mais precisamente sua componente indutiva - varia, então um compensador variável é requerido. Normalmente isto é alcançado pela formação de grupos de capacitores que serão chaveados adequadamente por meio de relés. Isto, naturalmente, causa picos de correntes, com o conseqüente desgaste dos contatos, risco de soldagem entre dos contatos e tensões induzidas em linhas de dados instaladas em paralelo com a rede. Devem ser tomados cuidados específicos com o tempo de ligação; quando é aplicada uma tensão em um capacitor completamente descarregado no instante de um pico de tensão de linha, o pico da corrente de partida (inrush) é igual ao de um curto-circuito. Ainda pior, ao ligar um capacitor num curto tempo logo após desligá-lo, pode ser que o capacitor esteja quase completamente carregado com uma polaridade inversa, causando assim um pico na corrente de carga quase duas vezes maior do que a corrente de curto-circuito da planta! Se há muitas cargas alimentadas por fontes chaveadas (SMPS) sendo operadas no mesmo sistema, então um capacitor de compensação, reconectado à alimentação, pode alimentar diretamente um número grande de capacitores de descargas suaves, mais ou menos diretamente de capacitância para capacitância com quase nenhuma impedância entre eles. A corrente de pico resultante é extremamente rápida, mas extremamente alta, muito mais alta do que em um curto-circuito! Há freqüentes relatos sobre falhas de dispositivos, especialmente os contatos dos relés que controlam os grupos de capacitores, devido às breves interrupções na rede, que são restauradas automaticamente, por exemplo, pelos auto-religadores, para extinguir um arco em uma rede aérea de alta ou média tensão. Sugere-se freqüentemente que esta multiplicação por dois do valor de pico não pode acontecer com capacitores que são equipados com resistores de descarga de acordo com a IEC 831. Porém, a norma requer que a tensão caia abaixo de 75 V após 3 minutos, de forma que tenham um pequeno efeito durante uma interrupção curta de algumas dezenas de mili-segundos até alguns poucos segundos.

Capacitores em ambientes ricos em harmônicas

Se, no instante de reconectar o capacitor com a tensão de linha, a tensão residual no capacitor for igual à tensão de alimentação, nenhum pico corrente acontece. Isto é verdade pelo menos se o compensador é visto como uma capacitância pura e a tensão de entrada como uma fonte de tensão ideal, ou seja, com impedância da fonte igual a zero. Mas, se a auto-indutância do sistema é levada em conta, certas ressonâncias entre ela e as capacitâncias podem acontecer. Assuma o seguinte caso: a tensão residual do capacitor é metade do valor de pico e igual à tensão de linha instantânea, o que poderia ser o caso 45° após a última passagem da tensão pelo zero, ou seja,

$$u_C = u \frac{\pi}{4} = 400 V \frac{\sqrt{2}}{2}, = 283 V$$

Neste momento, a corrente esperada no capacitor seria:

$$i_C = \frac{m}{2}$$

mas não é, porque o capacitor foi desconectado da alimentação neste instante. No momento da conexão, desprezando a indutância do sistema, a corrente aumentaria para este valor imediatamente, e nada aconteceria neste instante que não teria acontecido de qualquer maneira no regime estacionário. Mas um sistema real não está livre de indutância, e, então, a corrente assumirá indecisamente este valor no princípio, em seguida aumentará a velocidade e, novamente devido à indutância - sua “inércia” - atingirá o alvo esperado, quase dobrando o valor. Então descenderá novamente e assim por diante, executando um curto período de oscilação que pode ser atenuado até zero bem dentro do primeiro ciclo da rede após a conexão. A frequência de tal oscilação pode ser bastante alta, desde que a indutância da rede seja baixa, e pode causar interferência nos equipamentos da instalação. Somente se as tensões de linha instantâneas e as tensões residuais dos capacitores estiverem ambas em seus picos positivos ou negativos, nos quais a corrente instantânea seria zero de qualquer maneira, a corrente resistiva-indutiva iniciará sem oscilação.

Mais precisamente, há duas condições a serem cumpridas. Primeiramente, a soma das tensões através da capacitância e sua reatância em série (seja ela parasita ou intencional para de-sintonização) deve ser igual à tensão de linha. Em segundo lugar, a suposta corrente instantânea, assumindo que a conexão já tenha acontecido bem antes, tem que igualar a corrente real, que obviamente é zero até o momento do chaveamento. Esta segunda condição é atendida somente na tensão de pico da linha, que, então, tem que se igualar à tensão do capacitor. Para se alcançar esta condição, o capacitor é pré-carregado por uma fonte de energia suplementar. Esta prática tem uma pequena vantagem adicional que é a certeza de que sempre há a máxima quantidade possível de energia armazenada no capacitor enquanto ele não está em uso, de forma que, no momento de liga-lo, isso pode ajudar a mitigar algum rápido afundamento de tensão e o subsequente cintilamento que, caso contrário, poderia acontecer.

Porém, relés são muito lentos e não operam precisamente o suficiente para acertar um ponto determinado da onda. Quando relés são usados, medidas têm que ser tomadas para atenuar o pico das correntes de partida (inrush), tais como o emprego de resistores limitadores ou reatores de de-sintonização. De qualquer forma, os reatores são utilizados frequentemente por outras razões (ver Fascículo 3.3.1 desta Coleção), e às vezes são exigidos pelas concessionárias. Apesar deste reator em série substituir o pico de corrente de partida ao ligar pelo pico de tensão (surto) ao desligar, ainda é o menor mal, uma vez que a potência reativa nominal do reator é apenas uma fração da potência nominal do capacitor e, assim, a energia disponível é menor.

Chaves eletrônicas, como tiristores, podem ser facilmente controladas para alcançarem um ponto bem preciso de chaveamento na onda. Também é possível controlar o chaveamento para mitigar um cintilamento rápido causado por uma grande carga indutiva instável, como, por exemplo, o motor do guindaste mencionado previamente, um forno ao arco ou uma máquina de soldar.

Uma opção frequentemente utilizada em algumas partes de Europa é a compensação CF/RCT, que é a instalação em paralelo de um Capacitor Fixo com um Reator Controlado por Tiristor.

Centralizada ou distribuída?

A razão pela qual os usuários de eletricidade do setor comercial normalmente fazem a compensação é porque algumas concessionárias cobram pela energia reativa – uma tarifa não tão alta como a da energia ativa, mas ainda assim uma tarifa significativa - de forma que elas são compensadas para “uso inútil” do sistema de distribuição. Em alguns países, a prática de cobrar pela energia reativa está diminuindo e a correção do fator de potência está se tornando menos comum. Usuários de eletricidade vêem isto como uma vantagem, mas, de fato, isto aumenta a carga no sistema, o qual acaba trabalhando frequentemente próximo do seu limite.

A abordagem tradicional é instalar um grande compensador estático no ponto de entrega, a entrada da concessionária, e corrigir aí o fator de potência para o nível exigido, evitando assim as multas

Capacitores em ambientes ricos em harmônicas

multas (normalmente $\cos\phi = 0,90$ ou $\cos\phi = 0,95$). A abordagem alternativa é dispersar as compensações perto das cargas resistivas-indutivas e, no extremo, compensar individualmente junto aos equipamentos que consomem correntes reativas.

Acredita-se freqüentemente que a compensação centralizada é mais barata porque a compra de uma unidade central é menos custosa do que distribuir a mesma energia reativa pela planta em pequenas unidades dispersas. A capacidade instalada de compensação também pode ser menor porque pode ser assumido que nem todo consumidor de corrente reativa estará simultaneamente ativo. No entanto, deve ser lembrado que correntes reativas causam perdas reais dentro da instalação - a queda de tensão em um elemento resistivo, como um cabo, está em fase com a corrente e, assim, o produto, a perda de energia, sempre é positivo. A compensação central não faz nada para reduzir estas perdas, e meramente reduz a multa da concessionária devida ao baixo fator de potência. Por outro lado, quando a compensação é distribuída, o custo total das unidades individuais será maior do que o custo de uma única grande unidade centralizada e o a capacidade total de compensação instalada normalmente será maior - todo dispositivo tem compensação, esteja em funcionamento ou não. As perdas são reduzidas porque a corrente reativa circula somente entre a compensação e o equipamento, ao invés de retornar para um compensador centralizado instalado no ponto de entrega.

Exceto pela eficiência, há argumentos técnicos contra e a favor da compensação centralizada. Por exemplo, se a carga agregada em um transformador é capacitiva, a tensão de saída fica acima da nominal. Este efeito às vezes é utilizado para compensar a queda de tensão em um transformador fortemente carregado. A carga simplesmente é sobre-compensada de forma que a carga total aparece capacitiva para o transformador, reduzindo assim a queda de tensão indutiva no transformador [1]. Em casos onde cargas pesadas são freqüentemente chaveadas e causam problemas de cintilamento, esta pode ser uma solução mais robusta e confiável do que compensadores eletrônicos de cintilamento e também pode ser consideravelmente mais eficiente em custo nos casos onde um grau de compensação seria necessário de qualquer forma.

Porém, de um modo geral, a sobretensão de um transformador sob carga capacitiva é um risco que deveria ser evitado ou deveria ser tratada adequadamente, por exemplo, usando-se uma tensão nominal ligeiramente mais elevada (~6%). Às vezes é necessário ou desejável aplicar uma compensação no nível da média tensão e é atrativo conectar capacitores de baixa tensão por meio de um transformador MT/BT ao invés de pagar o preço mais alto por capacitores de média tensão. Nestes casos, a carga do transformador é capacitiva e a tensão de saída maior do que a esperada. Pode-se lidar com isto pela seleção apropriada de componentes com uma tensão nominal adequada ou selecionando-se a relação de transformação por meio das derivações (taps). Esta última é preferível uma vez que evita operar o transformador em um estado super excitado com perdas conseqüentemente mais altas. A idéia pode parecer que resulta numa falsa economia porque, embora o custo de instalação seja reduzido, os custos operacionais são elevados. A corrente reativa na instalação é transformada duas vezes - da instalação BT para o sistema MT e do sistema MT para o capacitor BT - com duas perdas de carga a serem pagas pelo cliente.

As outras desvantagens da energia reativa, demanda por capacidade de transmissão e queda de tensão, também acontecem dentro da planta em qualquer linha e em qualquer transformador entre a carga indutiva e o compensador. É melhor gastar 100% do orçamento em 100% da utilização do que 75% do orçamento em apenas 50% do uso. Em um esquema descentralizado, cada uma e todas - mesmo que pequena - carga resistiva-indutiva pode ser compensada integrando-se nela um capacitor. Isto vem sendo feito, por exemplo, em luminárias com uma ou duas lâmpadas fluorescentes e reatores magnéticos.

Entretanto, a descentralização tem seus limites em situações onde uma máquina de indução assíncrona é individualmente localmente compensada. Se o capacitor é localizado antes da chave do motor, então ele pode facilmente permanecer ligado quando o motor está desligado, deixando o sistema sobre-compensado. Se o capacitor está localizado depois da chave do motor, então é desconectado com o motor, e então há um risco de auto-excitação da máquina na medida em que ela desacelera. Uma tensão é gerada embora o dispositivo tenha sido isolado da alimentação, e até mesmo pode ser gerada uma sobretensão no caso de a capacitância ser incorretamente dimensionada.

Deveria estar evidente neste ponto que a energia reativa nem sempre é indesejável. De fato, uma quantidade apropriada de energia reativa capacitiva precisa ser gerada para compensar a energia reativa indutiva e, vice-versa nos casos onde cargas resistivas-capacitivas prevalecerem. A energia reativa capacitiva também é bastante vantajosa, por exemplo, para excitar geradores assíncronos tais como em turbinas eólicas e plantas de co-geração, se estiverem conectados diretamente ao sistema sem um inversor. Torna-se até uma necessidade absoluta nas situações onde tais geradores supostamente alimentam uma rede isolada, caso contrário não haverá nenhuma excitação, nenhuma tensão e nenhuma alimentação, mesmo enquanto a máquina está funcionando.

De-sintonização

A de-sintonização se refere à prática de ligar cada capacitor de compensação em série com um reator. Uma razão para a de-sintonização, a atenuação de correntes de partida, já foi mencionada. Porém, a razão básica pela qual a de-sintonização é recomendada por todos os fornecedores de compensadores e pela maioria das concessionárias - e porque muitos consumidores já a adotaram - é o problema de perturbações de tensão na rede. Cargas eletrônicas modernas solicitam correntes harmônicas, causam perturbação de tensão harmônica (veja Fascículo 3.1 desta Coleção) e impõem ruído de alta frequência na rede. Como a reatância de um capacitor é inversamente proporcional à frequência, estas altas frequências podem causar uma corrente no capacitor acima da nominal. Isto é prevenido pela presença de um indutor de de-sintonização. A energia reativa nominal do reator de de-sintonização normalmente é 5%, 7% ou 11% da energia reativa do capacitor de compensação. Este percentual também é chamado o “fator de de-sintonização.”

Quando se fala de valores nominais, há espaço para uma confusão significativa sobre se a energia reativa indicada na placa de um compensador se refere à tensão nominal da rede ou à tensão nominal do capacitor (que é mais alta), e se o fator de de-sintonização foi levado em conta ou não. De fato, a energia reativa declarada sempre deveria se referir à unidade combinada - compensador mais o reator de de-sintonização - na tensão de alimentação e na frequência fundamental.

Como a reatância de um reator aumenta proporcionalmente com a frequência enquanto que a de um capacitor diminui, um fator de de-sintonização de 11% em 50 Hz se torna ~100% em 150 Hz [X_L em 50 Hz = 11%, X_L em 150 Hz = 33% (wrt X_C em 50 Hz). X_C em 150 Hz = 33%. Ambos são iguais em amplitude, conseqüentemente um fator de de-sintonização de 100%], significando que as reatâncias indutivas e capacitivas são iguais e se cancelam. Isto oferece uma opção de projeto para os fatores de de-sintonização de tal modo a retirar da rede uma harmônica em particular, enquanto executa a função de compensação básica também. Isto é descrito em mais detalhe no Fascículo 3.3.1. Geralmente, porém, com o objetivo de prevenir a sobrecarga do capacitor (e do reator), é preferível evitar os fatores de de-sintonização que colocam a frequência de ressonância em uma das frequências harmônicas predominantes. De fato, o fator de de-sintonização é escolhido de forma que a combinação capacitor/indutor torna-se indutiva para frequências imediatamente abaixo da menor harmônica presente (Figura 9). Isto evita ressonâncias (Figura 10) que podem acontecer entre o capacitor e outros elementos do sistema, especialmente a indutância parasita do transformador mais próximo, sendo excitado por uma ou outra harmônica. Nas figuras, os fatores de amplificação são plotados em relação à frequência. O fator de amplificação aqui deve ser entendido como a relação do comportamento do sistema como é, comparado ao mesmo comportamento do sistema na ausência do compensador.

Mas esta não é a única razão para a de-sintonização. Hoje em dia capacitores também podem ser sobrecarregados facilmente pelas frequências mais altas onipresentes nas redes, mais elevadas que as harmônicas mais comuns. Mesmo pequenas tensões de altas frequências sobrepostas à tensão de alimentação - tão pequenas que nem são visíveis nos registros de tensão de analisador de rede de classe elevada (Figura 11), pode resultar em altas correntes nos capacitores.

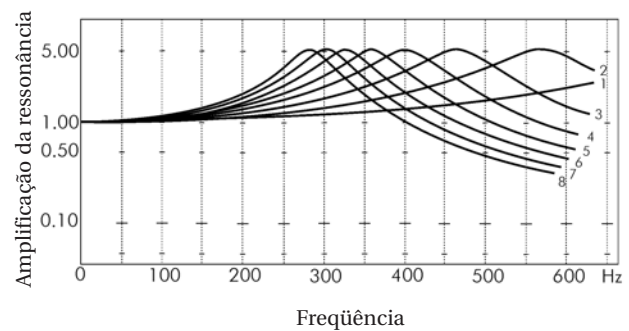


Figura 9 - Curvas de ressonância de diferentes compensadores que variam de 50 kvar (curva 1) até 400 kvar (curva 8), operados em um transformador de 1250 kVA (Frako).

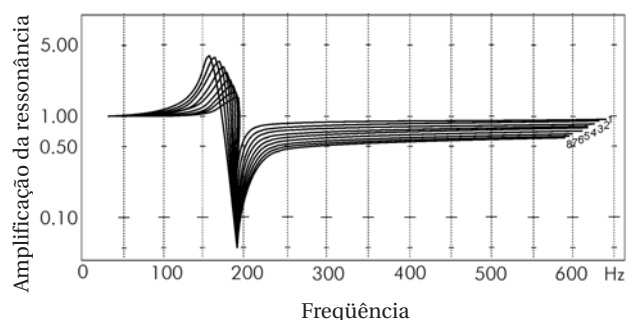


Figura 10- Curvas de ressonância de diferentes compensadores de-sintonizados que variam de 50 kvar (curva 1) até 400 kvar (curva 8), operados em um transformador de 1250 kVA (Frako)

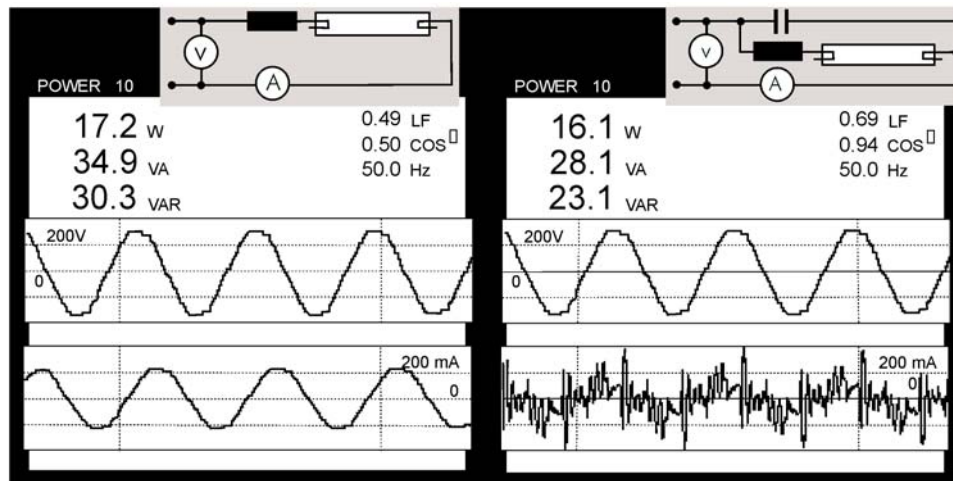


Figura 11 - Lâmpada fluorescente de 11W sem (esquerda) e com compensação paralela (direita).

À esquerda é uma lâmpada fluorescente de 11W operada com um reator magnético, mas sem compensação. Porém, a quantidade muito alta de energia reativa requer compensação através de capacitor. À direita, a corrente do sistema da lâmpada, (a ligação série da lâmpada e reator, em paralelo com o capacitor apropriado) é um estranho zigue-zague ao invés de uma onda senoidal aproximada. Esta mistura adicional de correntes de frequências mais elevadas tem que estar circulando pelo capacitor, uma vez que nada mais mudou na instalação elétrica. As medições confirmam isto. Como a corrente é quase senoidal na esquerda, a diferença entre o fator de potência (também chamado de fator de carga FC) e o $\cos \phi$ (também chamado de fator de deslocamento) é pequeno, enquanto que, na direita, é significativo. A razão é que o fator de potência é a relação entre a energia real (50 Hz) e a energia aparente, incluindo a energia reativa fundamental, a energia harmônica e a energia de ruído, enquanto que o bom e velho $\cos \phi$ - fator de deslocamento - somente inclui a energia reativa fundamental causado pelo deslocamento de fase entre tensão e corrente fundamentais. O capacitor conduz corrente reativa (esquerda), mas também é um tanque para correntes harmônicas (direita) se não de-sintonizado. Esta é a segunda razão para a prática disseminada da de-sintonização atualmente e revela como importante isso pode ser para a vida de um capacitor projetado para 50 Hz.

A experiência pode ser repetida com resultados semelhantes em quase todas as redes modernas. Simplesmente conectando um capacitor para a tensão de linha e registrando a corrente, leituras semelhantes acontecerão em todos os lugares. Pode ser muito impressionante fazer a corrente do capacitor circular por um alto-falante apropriadamente dimensionado. O ruído é verdadeiramente terrível, mas retorna à calma e ao sossego de um zumbido em 50 Hz assim que o capacitor é de-sintonizado por um reator.

O presente exemplo também faz com que a prática de compensação em série para lâmpadas fluorescentes anteriormente mencionada pareça bastante vantajosa, na medida em que representa uma capacitância de compensação com um fator de de-sintonização de 50%, e isso ocorre até mesmo com um reator que já está lá e não precisa ser acrescentado.

Resumo

Em primeiro lugar, é importante entender o comportamento complementar dos elementos L e C a fim de entender o assunto de compensação. Os capacitores de compensação sempre deveriam ser de-sintonizados com o objetivo de evitar ressonância com harmônicas e sobrecarga por correntes de altas frequências. Unidades de compensação variáveis deveriam ser projetadas para rápidos chaveamentos usando chaves semicondutoras e algoritmos de controle inteligentes. A localização ótima da compensação, se deveria ser centralizada ou deveria ser distribuído, também foi discutida.

Referências e bibliografia

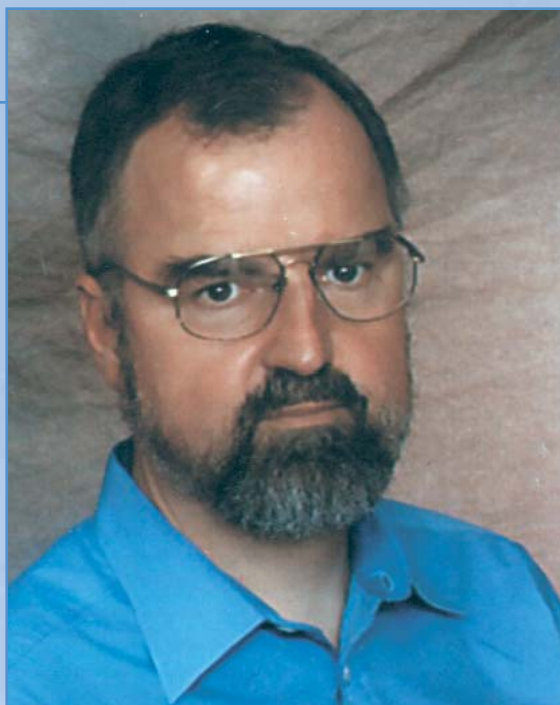
[1] Wolfgang Hofmann, Wolfgang Just: *Blindleistungs-Kompensation in der Betriebspraxis*, VDE Verlag, Offenbach, Germany, 4th edition, 2003.

Referências & Membros Fundadores

European Copper Institute* (ECI) www.eurocopper.org	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid www.etsii.upm.es	LEM Instruments www.lem.com
Akademia Gornicz-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 Solutions Inc www.epri.com/eprisolutions	Laborelec www.laborelec.com	

Conselho 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 Gornicz-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
Kees Kokee	Fluke Europe BV	kees.kokee@fluke.nl
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 Solutions	mmcgranaghan@eprisolutions.com
Dr. Jovica Milanovic	The University of Manchester	jovica.milanovic@manchester.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-UPC	sumper@citcea.upc.edu
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl



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



Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128-cj.203
Cep 01451-903
São Paulo - SP
Brasil

Tel./Fax: 55 11 3816-6383
e-mail: procobrebrasil@copper.org
Internet: www.procobre.org



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