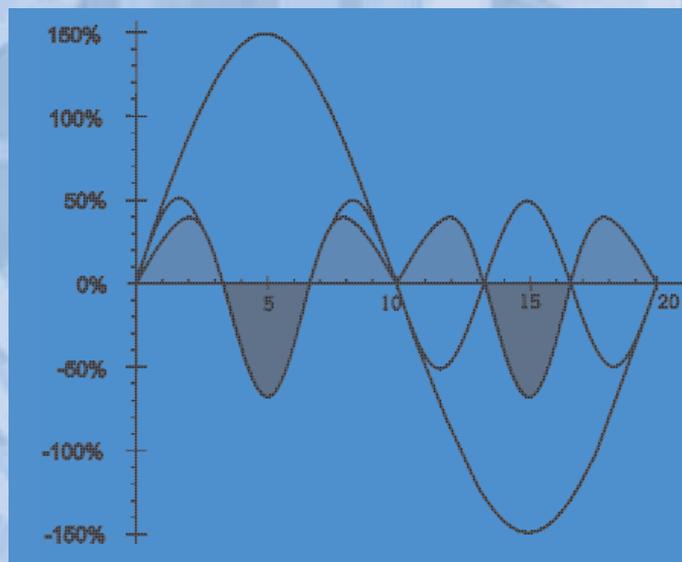


Guia de Aplicação de Qualidade de Energia



Harmônicas *Filtros Passivos*

3.3.1



Harmônicas

Filtros Passivos

Stefan Fassbinder
Deutsches Kupferinstitut
Junho de 2003



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.

Harmônicas

Filtros Passivos

Introdução

No fascículo 3.1.2 desta Coleção é explicado por que a energia reativa deveria ser compensada e como isto é feito da melhor maneira possível. Energia reativa fundamental sempre é uma oscilação de energia prejudicial. Quando correntes harmônicas são consideradas, não é tão claro que elas podem ser tratadas como um segundo tipo de energia reativa. Correntes harmônicas podem ser originadas em sistemas nos quais não há quase nenhuma energia e onde o sinal de correntes (compostas) está em fase com o de tensão ao longo do ciclo (por exemplo, um controlador de ângulo de fase para lâmpada incandescente). O termo "corrente sem potência" às vezes é aplicado às correntes harmônicas quando não há tensões harmônicas significativas de mesmas ordens para serem multiplicadas pelas correntes - o produto da corrente pela tensão para uma determinada ordem é zero. Porém, correntes harmônicas têm muito em comum com as correntes reativas:

- Ambas são indesejáveis na medida em que requerem parte da capacidade dos geradores, cabos, e transformadores, enquanto não contribuem com nada para a geração e transporte da energia elétrica.
- Ambas causam perdas adicionais - uma vez que a queda de tensão está em fase com a corrente, então o produto é real e diferente de zero.
- As harmônicas originam-se principalmente na carga consumidora de energia e fluem de volta para a fonte, no sentido contrário ao fluxo de energia normal (Figura 1). (Uma exceção é uma fonte de energia renovável conectada à rede por um conversor eletrônico de potência, onde as harmônicas fluem a partir da fonte.) A energia reativa fundamental não tem uma direção definida - a entrada de energia reativa indutiva é sinônimo de saída de energia reativa capacitiva e vice-versa. Portanto, deveria ser possível combater a energia reativa e as harmônicas através de meios similares.

Isto é realmente o caso e é também o objetivo deste artigo. Informações básicas são fornecidas a seguir com mais detalhes para que seja assegurada uma compreensão completa da informação apresentada no Fascículo 3.1.2.

- Indutâncias, L , e capacitâncias, C , têm menos pontos em comum com elementos resistivos do que poderia ser assumido. Em praticamente toda literatura de engenharia elétrica, inclusive este Guia, elas são classificadas como dispositivos lineares, ou seja, que a corrente é proporcional à tensão. De fato, isto só é válido para uma forma de onda senoidal pura. Quando se consideram os valores instantâneos, a tensão é proporcional à **variação** de corrente no tempo em L , e a corrente é proporcional à **variação** de tensão no tempo em C . Isto nos remete diretamente para o próximo ponto.

- Em um elemento resistivo, uma tensão senoidal resulta em uma corrente senoidal, e uma corrente senoidal resulta em uma queda de tensão senoidal. A proporcionalidade entre ambas é então trivial. Em um componente reativo, uma tensão senoidal também resulta em uma corrente senoidal e esta corrente resulta em uma queda de tensão senoidal, embora isto esteja longe de ser trivial. Para ser mais preciso, isto nem é mesmo verdadeiro. Uma tensão senoidal, se aplicada em um capacitor, resulta em uma corrente co-senoidal através dele, e se aplicada a um reator, resulta em uma corrente co-senoidal negativa. Isto realmente não muda muito na prática, uma vez que seno e co-seno têm a mesma forma de onda e só um ponto de início diferente, ou seja, um ângulo de fase diferente. (Na realidade, enquanto o ângulo de fase é de interesse, o ponto de início não tem nenhum interesse e influência).

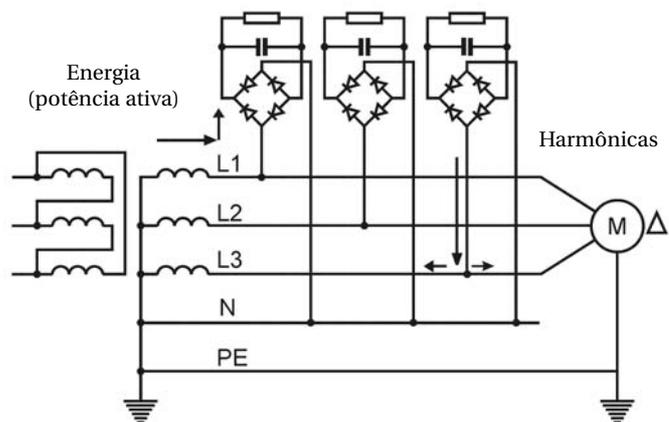


Figura 1 - Harmônicas são originadas pela da carga e fluem a montante para a fonte.

Estas considerações conduzem aos seguintes pontos:

- Formas de ondas de tensão diferentes de senoidais, quando aplicadas nos componentes reativos, não resultam em uma forma de onda de corrente similar. Retângulos se tornam triângulos, linhas retas se curvam, e rampas se tornam retas. O contrário também é verdade por causa da proporcionalidade mencionada anteriormente.
- A resistência de um elemento ôhmico, senoidal ou não, AC ou CC, é em princípio constante, se o efeito pele é desprezado. Com componentes indutivos, porém, a reatância aumenta proporcionalmente com a frequência. Em componentes capacitivos, a reatância diminui proporcionalmente com a frequência. Isto tem conseqüências para os seus comportamentos sob o impacto de formas de ondas não senoidais de tensão e corrente, as quais, como mencionado anteriormente, desviam-se um do outro. Estas formas de ondas podem ser representadas como uma infinita quantidade de frequências diferentes (chamada de Análise de Fourier). Este comportamento pode resultar em certos riscos, tais como a sobrecarga de capacitores mencionada no Fascículo 3.1.2, mas pode também resultar em vantagem pelo uso de filtros passivos.

Circuitos de filtros dedicados a frequências individuais

Um determinado L e um determinado C têm reatâncias absolutas iguais em uma frequência bem-definida, a chamada frequência de ressonância:

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

Além disso, um dos componentes tem deslocamento de fase de 90° e o outro de -90° em relação às correntes, se ambos os componentes são ligados em paralelo e em relação às quedas de tensão em cada um deles se estão ligados em série. A ligação em série de LC (circuito receptor) normalmente é usada para filtrar as harmônicas, enquanto que a ligação em paralelo (circuito de rejeição) é aplicável somente em alguns poucos casos especiais. Este artigo considera somente a ligação em série. As duas quedas de tensão (ou seja, as presentes na indutância e na capacitância) têm um deslocamento de fase de 180° , ou seja, polaridade inversa. Mesmo sem recorrer neste momento à uma geometria complexa, é óbvio que as reatâncias L e C em um filtro LC série subtraem-se uma da outra ao invés de se somarem, ou, em outras palavras, elas somam-se de fato, mas têm sinais opostos, o que dá no mesmo. Na frequência de ressonância, onde as intensidades das reatâncias são iguais, eles se subtraem a zero. Então, um circuito receptor é praticamente um curto-circuito nesta frequência específica. Só a resistência, principalmente a da bobina do reator, resta ser considerada, mas ela pode ser extremamente baixa.

O circuito série sintonizado se comporta como um receptor (ou seja, um caminho de baixa impedância) para a corrente na frequência para a qual está sintonizada. É utilizado para compensar as correntes harmônicas produzidas por um componente de um equipamento ou um grupo de componentes de modo que as correntes harmônicas não fluam de volta para a fonte. A corrente harmônica origina-se na carga e flui no sentido da fonte de alimentação e do filtro receptor, onde se divide de acordo com as *Leis de Kirchhoff* na proporção inversa das impedâncias. Uma vez que a corrente harmônica está circulando pela impedância, são geradas tensões harmônicas que aparecem como distorções na tensão de alimentação. O propósito do filtro é reduzir a intensidade da corrente harmônica que circula de volta para a rede de alimentação e, conseqüentemente, a distorção de tensão harmônica que resultaria neste caso. Note que, se é desejado reduzir a tensão harmônica potencialmente presente de uma certa ordem em mais de 50% com um circuito receptor, tem que existir uma impedância mais baixa do que a impedância de curto-circuito da rede na frequência específica.

Porque há perdas em filtros passivos e compensadores reativos, alguma energia é perdida na forma de calor. Como sempre, manter as perdas baixas requer mais material - condutor de maior seção nominal, aço magnético de melhor qualidade e mais quantidade - e, em conseqüência, aumentos de custos. Em casos extremos, usando-se elementos de baixo custo (= perdas maiores), significa dizer que o dinheiro economizado através da compensação da energia reativa é perdido na forma de perdas ativas no compensador. Afinal de contas, a tarifa da energia reativa normalmente não é tão alta quanto a da energia ativa. As perdas por correntes de magnetização e parasitas no aço e as perdas dielétricas e ôhmicas no capacitor são normalmente tão baixas que não precisam ser levadas em conta no comportamento do filtro. Entretanto, estas perdas resultam na geração de calor e são importantes parâmetros a serem considerados no projeto; elas são a causa de sobre-aquecimentos e

subseqüente falha em condições de sobrecarga. As perdas também influenciam a qualidade do filtro, quer dizer, a capacidade de separar as freqüências desejadas das indesejadas é muito melhor quando as perdas são baixas. Para avaliar a qualidade, é definido um fator de qualidade, relacionando o quociente entre a reatância e a resistência.

Compensação Reativa

Os compensadores de correntes reativas são afetados por harmônicas (como explicado no Fascículo 3.1.2 desta Coleção) e é recomendado que os capacitores para correção de fator de potência (CFP) sejam dessintonizados. De fato, algumas concessionárias de eletricidade exigem a de-sintonia.

“De-sintonia” quer dizer a ligação de um reator em série com o capacitor de CFP de forma que a combinação capacitor/reator se comporte como um capacitor na freqüência fundamental de alimentação, mas tem um comportamento definido para as freqüências harmônicas.

Um simples (não dessintonizado) CFP é, de fato, parte de um circuito receptor formado por componentes indutivos da rede, especialmente pelas indutâncias parasitas dos transformadores. A ressonância resultará em excessivas correntes harmônicas e excessivas quedas de tensão na proximidade dos transformadores afetados.

Foi explicado que, na freqüência sintonizada, a intensidade das quedas de tensão através dos elementos indutivos e capacitivos são iguais, mas com uma defasagem de 180°, resultando numa queda de tensão igual a zero. Porém, na ressonância ou próxima dela, a queda de tensão em cada elemento é muito maior do que aquela que seria esperada, por exemplo, na impedância da rede no ponto de entrega. Assim, considerando os elementos individualmente, cada um tem uma queda de tensão elevada, embora a queda de tensão resultante na combinação seja pequena. Isto explica porque circuitos receptores “acidentais” (por exemplo, um capacitor para CFP com indutância parasita) são problemáticos - a instalação está do outro lado do elemento de capacitivo e enxerga estas tensões amplificadas. As tensões excessivas permanecem dentro do cubículo do compensador, digamos através dos capacitores projetados para estes valores de tensão, mas em seus terminais externos nenhuma ressonância ou tensões amplificadas pode aparecer.

É importante lembrar que, especialmente onde cargas monofásicas não lineares são usadas, há freqüências harmônicas em intervalos de 100 Hz, desde 50 Hz até mais de 1 KHz, e, assim, há um amplo leque de ressonâncias possíveis.

Combinação de compensação e filtro

Na prática, as funções de compensação de energia reativa e filtro de harmônicas estão freqüentemente combinadas. É habitual fixar a freqüência ressonante do circuito LC numa freqüência não harmônica, para evitar que os compensadores possam ser sobrecarregados facilmente. Os valores nominais dos reatores normalmente são especificados em termos de uma porcentagem da potência reativa nominal dos capacitores a 50 Hz. Por exemplo, um valor de 5% de de-sintonia significa que 1/20 da queda de tensão em L e 21/20 da queda de tensão em C. Em 20 vezes a freqüência, digamos 1000 Hz, a relação seria invertida, de modo que a freqüência de ressonância na qual X_L e X_C são iguais situa-se no meio entre estas duas freqüências, ou, para ser mais preciso, em:

$$50 \text{ Hz} * \sqrt{20} = 224 \text{ Hz}$$

Outro valor comum, 7%, resulta em uma freqüência de ressonância de 189 Hz, evitando assim um curto-circuito para qualquer harmônica. Uma vez que a combinação LC está à jusante da rede de alimentação, harmônicas de fontes externas podem circular por ela da mesma maneira que as fontes internas para as quais foi projetada.

Então, se tal filtro é instalado por você, mas não pelo seu vizinho de rede, você pode ter que sobredimensioná-lo. Em todo caso, sobredimensionar não só evitará sobrecarga imprevista, mas também melhorará a qualidade de filtro, quer dizer, separará melhor as freqüências desejadas das indesejadas, com menores perdas de energia. Este efeito é reduzido se a instalação está isolada de outras por um transformador de distribuição com sua indutância correspondente. Condicionadores ativos de harmônicas (CAH) normalmente são ligados em paralelo. Contudo, a situação é ligeiramente diferente. Estes dispositivos eletrônicos analisam as correntes harmônicas no lado de carga, e geram exatamente estas harmônicas durante o próximo ciclo. Como resultado, correntes harmônicas são

fornecidas pelo condicionador ativo e corrente fundamental é fornecida pela alimentação. Se a exigência de corrente harmônica total é mais alta do que a capacidade do condicionador, ele somente limita, permitindo uma correção parcial e deixando algumas correntes harmônicas serem absorvidas pela alimentação.

Os CAHs só agem sobre as correntes harmônicas que estão presentes no lado de carga, ou seja, no ponto de medição da corrente. Efetivamente, isto significa que, na medida em que a potência do CAH é suficiente para a carga, a carga não vai prejudicar a qualidade da alimentação. Se aquela carga está inativa, o condicionador também estará inativo. O Fascículo 3.3.3 desta Coleção dá maiores informações sobre a utilização de CAHs.

Porém, o filtro passivo está, de certo modo, sempre ativo, na medida em que está sempre alerta à espera pelo aparecimento de “sua” harmônica. Circuitos receptores passivos sintonizados nas frequências de ressonância de, por exemplo, 150 Hz (11% da reatância de dessintonização) ou 250 Hz (4%), aceitam qualquer intensidade de terceira e quinta correntes harmônicas, bem na faixa de sobrecarga. Isto depende da quantidade de harmônicas encontradas na entrada de energia e não depende do impacto de uma carga específica. Por esta razão deveriam ser generosamente dimensionados. Esta normalmente não é uma questão de custo quando comparado aos condicionadores ativos.

Corrente sem potência

Como já mencionado, onde existe uma energia reativa em um sistema de distribuição (normalmente energia reativa indutiva), parte da energia na linha não é efetivamente transferida da fonte para a carga. De fato, ela oscila entre uma capacitância e uma reatância numa frequência de 100 Hz. Para certos intervalos de tempo, tensão e corrente têm polaridades opostas (Figura 2). Olhando para as harmônicas, a situação é bem parecida. Na Figura 3, a energia da corrente harmônica de terceira ordem foi plotada em separado. A potência transferida é o produto da corrente de terceira harmônica pela tensão de linha, assumindo que a tensão de linha ainda é uma onda senoidal pura. Pode ser demonstrado que as áreas abaixo e acima da abscissa se cancelam, significando que, em média, nenhuma energia é transmitida. A corrente de terceira harmônica é então absolutamente “sem potência”.

Mas, uma vez que as harmônicas causam perdas adicionais, deve haver alguma energia ativa associada a elas. Esta contradição aparente é originada pela suposição incorreta de que a tensão de alimentação é livre de qualquer harmônica. Isto é impossível, uma vez que, desde o momento em que há qualquer corrente de 150 Hz circulando, isso causará alguma queda de tensão ativa, e provavelmente reativa também, em 150 Hz. Isto significa que, na medida em que exista qualquer frequência adicional contida na corrente, também haverá uma certa quantidade da mesma frequência na tensão. Só quando tensão e corrente de mesma frequência estão presentes é que pode existir uma energia ativa nesta frequência. Deveria estar claro que este sempre será o caso de uma forma ou de outra. A resistência no circuito da instalação causa uma queda de tensão que está exatamente em fase com a corrente e, em consequência, resulta numa dissipação real de energia, seja a corrente real, reativa ou harmônica.

Medições por amostragem

Lâmpadas fluorescentes são os únicos dispositivos mais comuns onde é prática usual utilizar-se o modo mais eficiente de compensação diretamente no ponto de origem, dentro da luminária. Isto é mais eficiente porque somente correntes reais (ativas) circulam pela fiação da instalação, uma vez que a componente reativa foi compensada dentro do equipamento. Quando são usadas unidades centralizadas, que combinam o compensador reativo de corrente com o filtro harmônico, resolvem-se vários problemas ao mesmo tempo com o mesmo dispositivo. A vantagem de uma unidade instalada centralmente, com seu

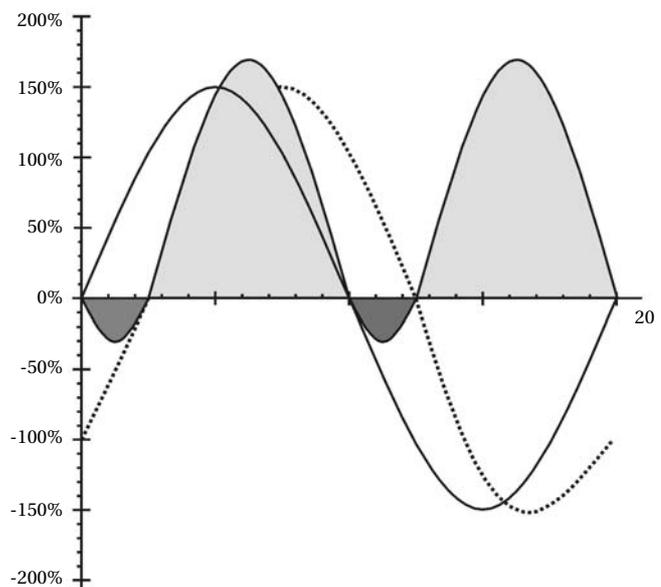


Figura 2 - Energia reativa fundamental.

respectivo controle apropriado, é que, uma vez que nem todos equipamentos operam simultaneamente, é freqüentemente possível instalar uma capacidade de compensação total menor do que seria o caso se todo o equipamento fosse compensado localmente. Isso também reduz o risco de sobrecompensação de motores. Utilizando-se um dispositivo de filtro/compensação combinado, elimina-se o risco de ressonância e assegura-se que essas harmônicas dentro da faixa do filtro sejam atenuadas.

O risco de atrair poluição da alimentação não é tão alto quanto geralmente é assumido, pelo menos não quando a instalação é alimentada por seu próprio transformador de distribuição. A queda de tensão em um transformador, descrita em termos de sua tensão de curto-circuito é, em grande parte, indutiva. Então, um transformador com uma tensão de curto-circuito nominal de 4% tem uma reatância relativa de quase 12% em 150 Hz e perto de 20% em 250 Hz. Se as instalações vizinhas também utilizam seus próprios transformadores, a impedância entre ambos dobra novamente. Porém, a impedância de um transformador para as harmônicas varia muito dependendo:

- O grupo vetorial do transformador, ou seja, se há ou não qualquer enrolamento em delta;
- Se a harmônica em questão é múltipla de três ou é de outra ordem.

Estes são assuntos do Fascículo 3.1 desta Coleção e de outras referências [1].

A série seguinte de medições monofásicas mostrará como circuitos receptores podem efetivamente e de forma barata mitigar problemas harmônicos.

Para um teste de modelo monofásico, use, por exemplo, dois reatores magnéticos para lâmpadas fluorescentes de 58 W. Sua resistência de enrolamento é 13.8 Ω , e indutância 878 mH. Ligando-os em série com capacitores, um com uma capacitância de 1.3 μF e outro com 0.46 μF , resulta em circuitos receptores com freqüências de ressonância de 150 Hz e 250 Hz, respectivamente. Quando ligadas à rede de distribuição em uma área residencial em uma noite de sábado durante um jogo de futebol, quando todos os televisores e algumas poucas lâmpadas fluorescentes compactas estão ligados e os fogões elétricos estão desligados, a tensão pode ter uma distorção harmônica total (THD) ao redor 4.7%. Este distorção consiste, principalmente, da contribuição da quinta harmônica ao redor de 10 V; as outras são insignificantes. A terceira harmônica, apesar de predominar nas correntes de entrada dos televisores e eletrodomésticos similares, tem pequeno efeito na tensão na medida que as cargas são bastante equilibradas (devido à presença de enrolamentos em delta nos transformadores). Em um fornecimento monofásico, ou se apenas uma fase está carregada, este não seria o caso. Em um sistema habitual, porém, com as cargas lineares bem equilibradas, nada de importante acontece no filtro de 150 Hz. Mas no filtro de 250 Hz, pode ser medido ~75 mA de corrente em 250 Hz. Isto é dobro da corrente encontrada em 50 Hz, embora uma tensão de aproximadamente 230 V seja aplicada ao filtro em 50 Hz e somente ~10 V em 250 Hz. Isto realça a capacidade básica de filtrar do método. Não há nenhum efeito mensurável na tensão de alimentação, por causa da característica nominal do filtro (670 mA, algo ao redor de 180 VAR) ser muito pequena e sua resistência de enrolamento muito elevada para limpar uma rede carregada com um carga estimada em 400 kVA.

Para demonstrar sua plena capacidade, o modelo de filtro teria que limpar uma rede de características adequadas, idealmente com uma distorção significativa que precisaria ser mitigada. Isto pode ser obtido se um dimmer controlado por ângulo de fase estiver controlando uma carga adequada na rede. Um exemplo seria o de reduzir a iluminação de uma lâmpada incandescente de 200 W até 100 W. O dimmer isola a carga da rede até certo ponto. Logicamente, como a carga controlada é puramente resistiva, a tensão e a corrente na lâmpada têm as mesmas distorções significativas, quantitativamente e qualitativamente. Isto pode ser mitigado por meio dos filtros mencionados? A resposta é sim (Figura 4). Ligando a carga afetada em paralelo com os dois circuitos

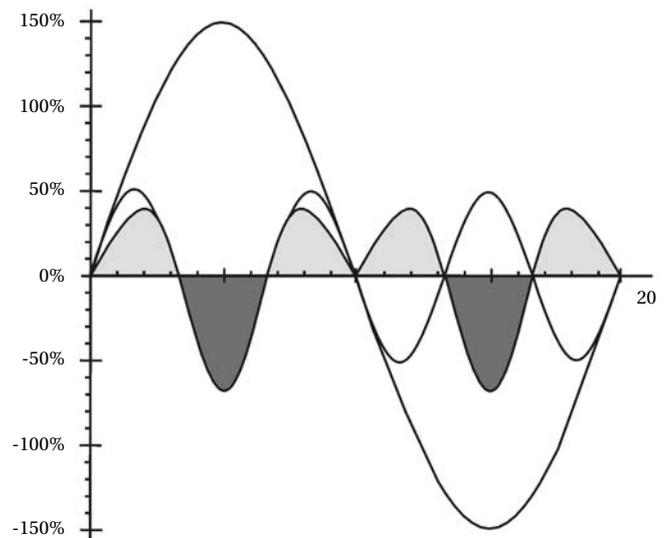


Figura 3 - Energia "sem potência".

Filtros Passivos

receptores, reduz-se o THD da tensão e da corrente para ~61% e ~37%, respectivamente. Em muitos casos, este grau de melhoria é suficiente para mover-se de um sistema perturbado para um sistema com bom funcionamento. Ninguém precisa de uma onda senoidal absolutamente limpa, exceto certos laboratórios de medição.

Os resultados também revelam que o circuito receptor em 150 Hz já não está ocioso e não é de nenhum modo supérfluo. Ao contrário, ele contribui com a maior parte da melhoria. Sua corrente é agora 395 mA em 150 Hz (em adição a 22 mA em 250 Hz que ajuda ligeiramente o outro circuito receptor). A corrente em 250 Hz no filtro de 250 Hz é 184 mA, ainda significativa, mas menor do que a corrente em 150 Hz. Isto é típico para uma carga monofásica funcionando mais ou menos isolada da rede.

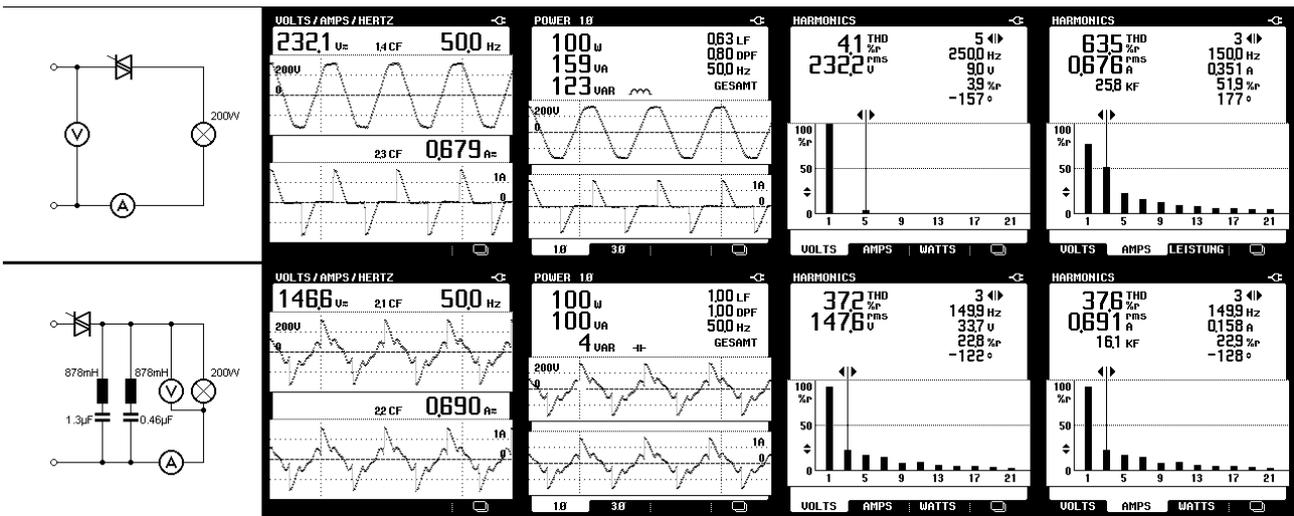


Figura 4 - Tensão e corrente em uma lâmpada incandescente de 200 W que teve sua potência reduzida até 100 W, circuito comum e circuito com receptor de harmônicas de 3ª e 5ª ordens.

Como o desempenho pode ser melhorado?

Claro que um filtro de 350 Hz poderia ser incluído, mas isso não ataca o núcleo do problema. Apesar da presença de filtros de terceira e quinta harmônicas, a terceira (34 V) e a quinta (26 V) ainda excedem a sétima (Figura 4) embora esteja faltando um filtro de 350 Hz. Os filtros testados parecem ter um problema de qualidade. Realmente 13,8 W de resistência ativa é bastante alto. Se a impedância em 150 Hz do circuito receptor de terceira harmônica for zero, como seria idealmente, a tensão em 150 Hz também teria que ser zero. O que nós encontramos na realidade foi uma tensão de 34 V que provocou uma corrente de 395 mA no filtro de 150 Hz e uma tensão de 26 V que provocou 184 mA no filtro de 250 Hz. Ambos resultaram em muito mais de 13.8 W. Deve haver então substancialmente mais perdas por correntes de parasitas e histerese devido à pobre qualidade do aço. Variações de indutâncias com a corrente, indutâncias não constantes, etc. dificultam uma sintonia precisa com uma frequência determinada. Isto mostra como é importante escolher componentes de alta qualidade, especialmente com respeito ao reator, uma vez que ele causa a maioria das perdas e imprecisões. Todas as perdas resistivas, por correntes parasitas e por histerese resultam em sintonia imprecisa do filtro, de modo que é mais importante selecionar componentes dedicados de alta qualidade do que usar reatores disponíveis para pronta entrega que podem ser baratos, mas foram projetados para um propósito diferente, onde as perdas, tolerâncias e inconsistências de valores nominais não importam tanto. Filtros passivos são um dos métodos menos custosos para lidar com harmônicas.

Centralizado ou distribuído?

Uma pergunta adicional que acompanha a seleção do modelo certo é a ligação em estrela ou em delta (triângulo). Os compensadores normalmente são fornecidos com ligação em delta. Para um filtro passivo, esta ligação será parcialmente efetiva, uma vez que as harmônicas que mais prevalecem em ambientes de escritório (a terceira) originam-se de equipamentos monofásicos e circulam entre a fase e o neutro. Também pode haver algumas soluções intermediárias com os capacitores ligados em delta, mas projetando-se os reatores de dessintonia como reatores trifásicos. O fornecedor do equipamento deveria aconselhar qual projeto é o melhor

Filtros Passivos

para o seu sistema. Como foi declarado anteriormente, receptores não permitem que as correntes harmônicas retornem para a alimentação. Deve ser lembrado que as correntes harmônicas ainda circulam pela instalação - de fato elas provocam um aumento de corrente entre a fonte de harmônicas e o filtro porque a impedância deste laço diminui. Todas as medidas que normalmente deveriam ser tomadas dentro da instalação para reduzir os efeitos das correntes harmônicas ainda são necessárias. Na presença de um filtro, a soma das correntes de carga e do filtro (ou seja, aquela necessária de ser fornecida) é mais baixa do que apenas a corrente de carga sem um filtro, mas a corrente de carga sozinha será maior do que teria sido sem qualquer filtro nas proximidades. Sob este ponto de vista, filtros distribuídos são a solução mais eficiente (uma vez que maiores correntes circulam por laços menores), embora serão mais caros.

Sob nenhuma circunstância a presença de qualquer filtro pode ser usada como um pretexto para retornar às antigas práticas de distribuições em sistemas TN-C utilizadas em alguns países ou instalar condutores neutros subdimensionados (orientações específicas sobre o dimensionamento de neutro são fornecidas no Fascículo 3.5.1 desta Coleção). Sistemas TN-C permitem que as correntes no neutro, inclusive harmônicas, circulem por partes condutivas estranhas à instalação elétrica. As desvantagens do Sistema TN-C, sob o ponto de vista de compatibilidade eletromagnética, são descritas completamente no Fascículo 6 desta Coleção.

A descentralização tem que ser empregada com cautela. Considere dois circuitos receptores de quintas harmônicas. Eles não podem ser verdadeiramente idênticos devido às tolerâncias dos componentes e às diferenças nas temperaturas de operação. Assim, para dois filtros com uma frequência de ressonância de 250 Hz, um pode entrar de fato em ressonância em 248 Hz e o outro em 252 Hz. Em 250 Hz, o primeiro aparece como capacitivo e o segundo como indutivo, e juntos formam um circuito de rejeição quase perfeito, que tem o efeito oposto ao desejado. Além disso, uma corrente em 250 Hz irá circular entre os dois e poderá sobrecarregar ambos e/ou a fiação da instalação (Figura 5). Alternativamente, se acontecer que um dos filtros entre em ressonância exatamente em 250 Hz e o outro, digamos, em 254 Hz, então a parte maior da poluição em 250 Hz usará o primeiro e poderá sobrecarregá-lo, enquanto que o segundo estará ocioso.



Figura 5 - O que uma ressonância descontrolada pode fazer.

Infelizmente este efeito será tanto maior quanto maior for o fator de qualidade. Afinal de contas, um maior fator de qualidade de um circuito receptor/de rejeição significa nada além de uma declinação/inclinação mais íngreme da impedância na medida em que se aproxima a frequência de ressonância. Então, deve haver alguma impedância entre cada filtro de forma que eles estão até certo ponto isolados um do outro e não parece que estão diretamente em paralelo. Isto implica que uma grande dispersão de um grande número de pequenos filtros não é uma solução prática e, como sempre em engenharia, deve ser buscado um bom equilíbrio.

Preste atenção na relação L/C

Para cada frequência há um número infinito de pares LC com a mesma frequência ressonante. O valor do capacitor determina a compensação reativa disponível (a qual, obviamente, não pode ser zero) enquanto que o reator a ser especificado determina o comportamento harmônico. Uma vez que tenha sido feita a escolha de L e C , ela se torna fixa para sempre. Esta pode ser uma desvantagem dos filtros passivos. Por exemplo, os filtros dos modelos em 150 Hz e 250 Hz discutidos anteriormente drenaram correntes em 50 Hz de 100 mA e 37 mA, respectivamente. Isto é muito baixo se comparado com as correntes harmônicas medidas, devido ao fato de que estes filtros foram projetados com um valor alto de L e um valor pequeno de C . Uma solução é organizar os filtros em grupos menores e chaveá-los individualmente para obter a compensação reativa requerida como é feito com compensadores controlados. Obviamente, a capacidade do filtro também aumentará na medida em que a capacidade reativa aumentar, mas isto pode ser desejável porque a corrente harmônica também será reduzida com a carga reduzida.

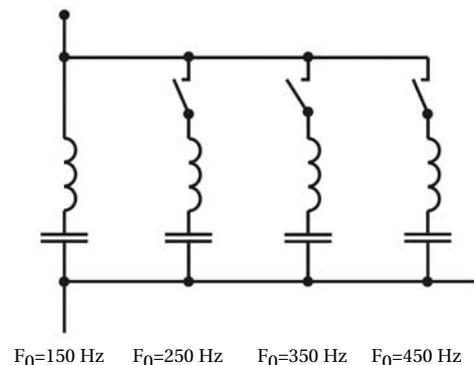


Figura 6 - Combinação de filtros de circuitos receptores.

Também devem ser feitas considerações sobre não permitir a circulação das harmônicas mais altas pelos filtros quando menos compensação é necessária, como sugerido na Figura 6. Embora esta não seja uma solução perfeita, ela é muito barata. O filtro passivo que estamos tratando nada mais é do que um projeto modificado ou uma seleção adequada de um compensador que seria necessário de qualquer maneira. No entanto, quando este método for aplicado, deve-se ter a certeza de que o desligamento é feito de cima para baixo (da direita para a esquerda na Figura 6) como descrito no Fascículo 3.1.2 desta Coleção. Caso contrário, um ou outro circuito receptor de frequência mais alta pode entrar em ressonância com um elemento indutivo da rede em uma das harmônicas mais baixas.

Não filtre sinais de frequências sãs!

Algumas concessionárias de energia elétrica usam em seus sistemas algumas frequências sãs para controlar a iluminação pública, o armazenamento noturno de calor, e outros sistemas para gerenciamento de cargas pelo lado da demanda. Devem ser tomados cuidados para não interromper estes sinais e torna-los ineficazes. Quanto mais próxima a frequência do sinal está da frequência de ressonância de um circuito receptor, menor é a impedância daquele circuito na frequência do sinal. Quando a instalação é alimentada por um transformador exclusivo, a indutância associada pode ser bem alta o bastante para assegurar que não há nenhum efeito nas frequências de sinalização. Caso contrário, pode ser necessário instalar em paralelo um filtro de rejeição LC - sintonizado nas frequências de sinalização como mostrado na Figura 7 (com uma concessionária que usa sinais em 183.3 Hz, 13/3 da frequência da rede).

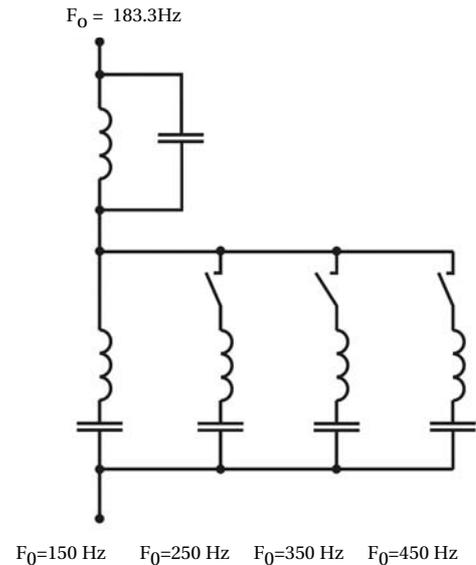


Figura 7 - Combinação de filtros com circuitos receptores com um circuito de rejeição para evitar a perda de sinais de frequências sãs.

Resumo

Incorrem pequenos esforços e custos adicionais para mitigar harmônicas dominantes simultaneamente com a compensação de energia reativa fundamental uma vez que a compensação é feita de qualquer forma e a maioria dos compensadores atuais já utiliza reatores dessintonizados. Na maioria dos casos, evita-se deliberadamente a sintonização das frequências ressonantes de tal sistema em qualquer possível frequência harmônica presente no sistema de potência. Um maior benefício pode ser percebido quando se projeta pensando na ressonância - correntes harmônicas são efetivamente reduzidas e o risco de sobrecarregar o compensador não é tão alto quanto geralmente assumido. Um certo grau de reserva, é claro, tem que ser instalado. Isso não é um problema uma vez que se obtém um efeito de limpeza melhor e uma eficiência energética melhor com um custo extra muito pequeno.

As correntes harmônicas causam mais problemas para a rede de alimentação do que as correntes reativas, de modo que é previsível que as concessionárias começarão a cobrar por perdas harmônicas assim como também pela energia reativa fundamental - não faz sentido cobrar por energia reativa fundamental enquanto não são cobradas as harmônicas.

Não há nenhum caso aonde a instalação de filtros, exceto aqueles que já vêm instalados com a carga (ou dentro delas), pode ser usada como um argumento convincente para não dimensionar os condutores neutros adequadamente ou para não considerar as harmônicas no dimensionamento de cabos e outros equipamentos.

Manter baixa a impedância do sistema é de importância vital, ainda mais com filtros instalados. Caso contrário, os efeitos do filtro podem ser adversos!

Referências

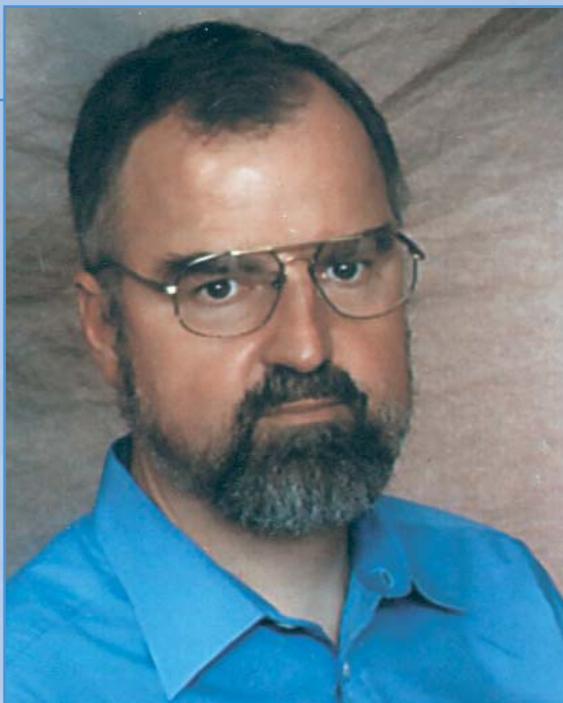
[1] Fender, Manfred: *Vergleichende Untersuchungen der Netzrückwirkungen von Umrichtern mit Zwischenkreis bei Beachtung realer industrieller Anschluss-Strukturen*, Wiesbaden 1997.

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/epriolutions | 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@epriolutions.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@eurocopper.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