

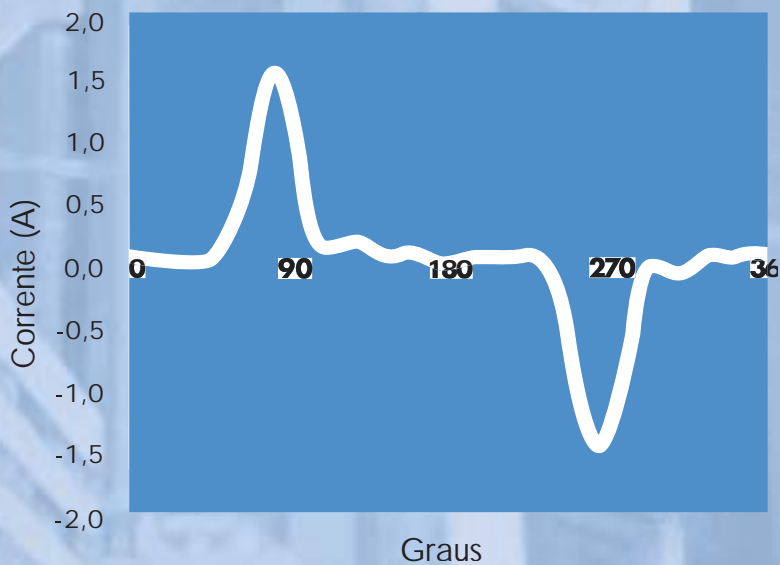
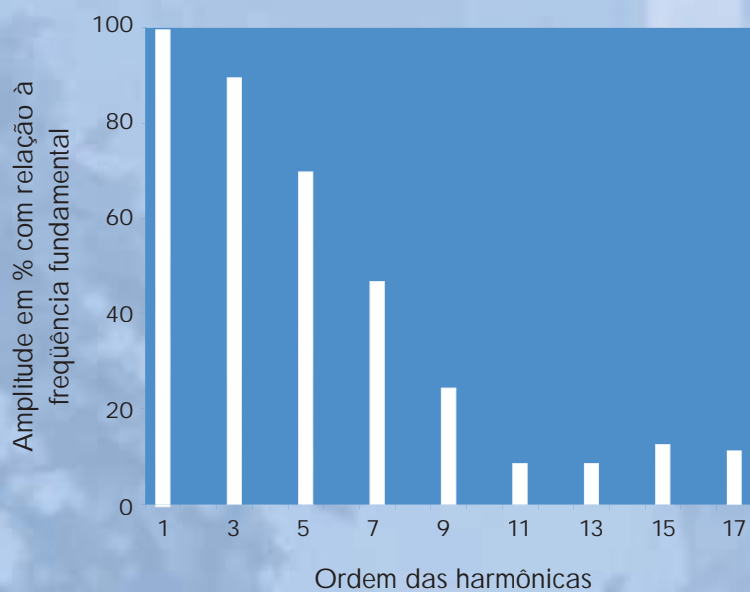
Guia de Aplicação de Qualidade de Energia



Leonardo da Vinci

Harmônicas *Causas e Efeitos*

3.1



Harmônicas

Causas e Efeitos

David Chapman
Copper Development Association
Julho de 2002

European Copper Institute (ECI)

O Instituto Europeu do Cobre é uma joint venture entre a ICA (Associação Internacional do Cobre) e o IWCC (Conselho Internacional do Cobre Forjado). Por sua qualidade de membro, o ECI age em nome dos maiores produtores de cobre do mundo e dos fabricantes líderes da Europa, na promoção do cobre na Europa. Formado em janeiro de 1996, o ECI é apoiado por uma rede de dez Associações de Desenvolvimento do Cobre (CDAs) no Benelux, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Itália, Polônia, Escandinávia, Espanha e o Reino Unido. Fomenta os esforços empreendidos inicialmente pela Associação de Desenvolvimento de Produtos de Cobre, criada em 1959, e a INCRA (Associação Internacional de Pesquisa do Cobre) formada em 1961.

Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE

É uma instituição sem fins lucrativos, constituída por empresas produtoras e transformadoras de cobre 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.

Reconhecimentos

Este projeto foi realizado com o apoio da Comunidade Européia e da International Copper Association, Ltd.

Advertência

O European Copper Institute, a Copper Development Association e o Instituto Brasileiro do Cobre, negam responsabilidade por qualquer dano direto, indireto, conseqüente ou incidental que possa resultar do uso da informação, ou da inabilidade para usar as informações ou dados contidos nesta publicação.

Copyright© European Copper Institute and Copper Development Association.

A reprodução é autorizada com a condição de que o material não seja abreviado e a fonte seja reconhecida.



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

Harmônicas

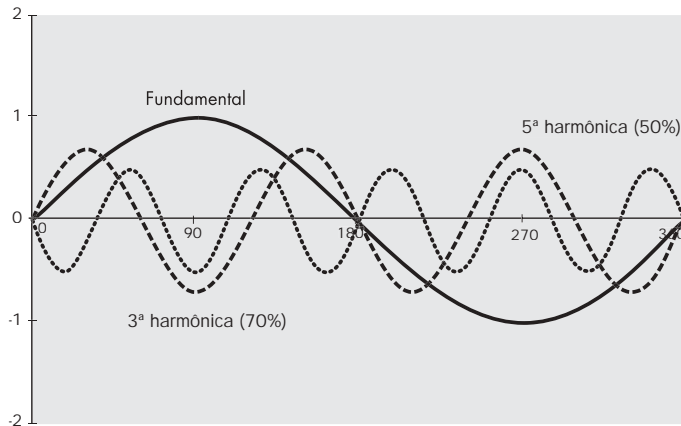


Figura 1 - Onda fundamental com a terceira e a quinta harmônicas.

A Figura 2 mostra o resultado da soma da frequência fundamental com a terceira harmônica com amplitude de 70% e a quinta harmônica com amplitude de 50%. Deve-se levar em conta que, na prática, a forma de onda resultante ou forma de onda distorcida será muito mais complexa que a deste exemplo, já que conterá mais harmônicas com uma relação de fase mais complexa.

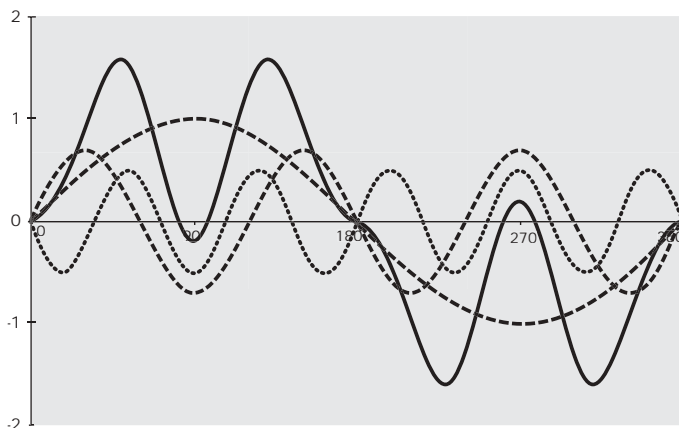


Figura 2 - Forma de onda de corrente distorcida.

relacionados a essas correntes. Não é possível estabelecer conclusões sem conhecer o espectro das correntes harmônicas presentes, porém é comum trabalhar apenas com valores correspondentes à distorção harmônica total (DHT). Quando as harmônicas se propagam em um sistema de distribuição, incluindo partes de circuito que não transportam correntes harmônicas, o fazem na forma de tensão. É muito importante medir ao mesmo tempo os valores das distorções de corrente e de tensão, e que tais valores sejam indicados claramente como valores de corrente e de tensão. Normalmente, as medições de distorção da corrente são identificadas com o sufixo “i”, por exemplo, 35% de DHTi, e as de distorções de tensão com o sufixo “v”, por exemplo, 4% de DHTv.

As correntes harmônicas estão presentes nos sistemas elétricos há muitos anos. No início, eram geradas pelos retificadores a arco de mercúrio, utilizados para converter a corrente alternada em corrente contínua para a eletrificação de ferrovias e pelos variadores de velocidade para motores de corrente contínua usados na indústria. Atualmente, os tipos e o número de equipamentos que geram harmônicas aumentaram muito rapidamente, e vão continuar aumentando, de forma que os projetistas deverão levar cada vez mais em consideração a existência das harmônicas e os seus efeitos.

Esta seção descreve como e por que as harmônicas são geradas, como elas afetam a instalação elétrica e os equipamentos, e como minimizar seus efeitos.

Causas e Efeitos

Esta seção trata da origem das correntes harmônicas e seus efeitos nos sistemas elétricos. Os métodos de mitigação são tratados nas seções relativas a “Soluções para as Harmônicas”.

As frequências harmônicas são múltiplos inteiros da frequência fundamental da fonte de alimentação. Por exemplo, para uma frequência fundamental de 60Hz, a terceira harmônica terá uma frequência de 180Hz e a quinta de 300Hz. A Figura 1 mostra uma onda senoidal fundamental com suas terceira e quinta harmônicas.

É evidente que esta onda distorcida não é senoidal, o que significa que um equipamento de medição convencional, tal como um multímetro ajustado para fornecer leituras de valores médios, fornecerá resultados incorretos. Note-se também que, em cada ciclo, existem seis passagens por zero no lugar de duas, com o que um equipamento que utilize como referência a passagem por zero não funcionará corretamente. Esta onda contém frequências não fundamentais, e deverá ser tratada em conseqüência.

Quando se fala de harmônicas nas instalações de potência, são as correntes harmônicas as que provocam mais problemas, já que as harmônicas são geradas como correntes e a maior parte dos seus efeitos negativos estão

Tipos de equipamentos que geram harmônicas

Todas as cargas não lineares geram correntes harmônicas. Entre elas incluem-se:

Cargas monofásicas, por exemplo:

- ♦ fontes chaveadas;
- ♦ reatores eletrônicos para iluminação fluorescente;
- ♦ pequenas unidades de alimentação ininterrupta (UPSs).

Cargas trifásicas, por exemplo:

- ♦ variadores de velocidade (inversores de frequência) para acionamento de motores;
- ♦ grandes unidades UPSs.

Cargas monofásicas

Fontes chaveadas

A maior parte dos equipamentos elétricos modernos utilizam fontes chaveadas (SMPS, do inglês Switched Mode Power Supply). Estas fontes de alimentação são diferentes dos sistemas antigos. O transformador e o retificador tradicionais foram substituídos por uma unidade de retificação de controle direto da fonte, para carregar um capacitor de armazenamento que fornece a corrente contínua requerida pela carga em função da tensão e da corrente de saída. A vantagem para o fabricante do equipamento é que as dimensões, o peso e o custo foram notavelmente reduzidos e que a unidade de potência pode adaptar-se a praticamente qualquer fator de forma que for requerido. O inconveniente é que

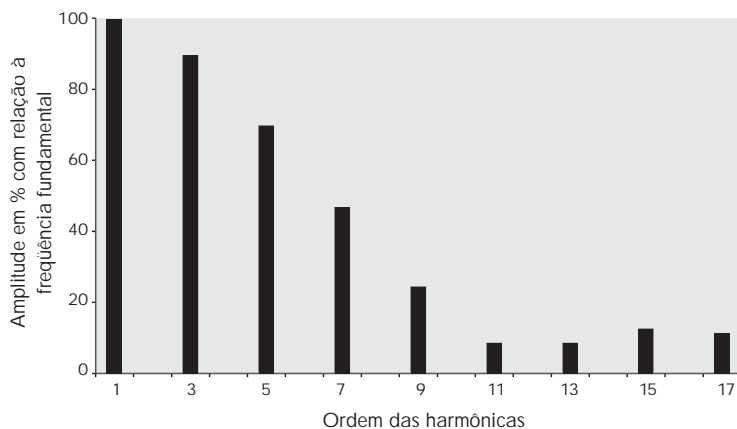


Figura 3 - Espectro harmônico de um PC típico.

no lugar de obter uma corrente contínua da fonte de alimentação, a unidade gera pulsos de corrente contendo grande quantidade de harmônicas de ordem 3 e superiores, e componentes de alta frequência importantes (ver Figura 3). Na entrada da fonte é instalado um filtro para derivar as componentes de alta frequência das fases e do neutro para terra, o qual, porém, não tem nenhum efeito sobre as correntes harmônicas que retornam para a fonte. Os efeitos das fugas à terra destes filtros são explicados na seção 6.

Os UPSs monofásicos apresentam umas características muito semelhantes às fontes chaveadas.

Para as fontes chaveadas de grande potência utiliza-se o método denominado “correção do

fator de potência”. O objetivo é tornar o perfil da carga de alimentação equivalente ao de uma carga resistiva, de maneira que a corrente de entrada apresente uma forma de onda senoidal e em fase com a tensão aplicada. Isto é conseguido aplicando uma corrente de entrada com forma de onda triangular de alta frequência que é transformada em senoidal pelo filtro de entrada. Este nível adicional de sofisticação ainda não é aplicável às unidades de baixo custo que alimentam a maior parte da carga nas instalações comerciais e industriais.

Reatores para iluminação fluorescente

Os reatores eletrônicos têm se popularizado nos últimos anos devido à otimização do rendimento das instalações fluorescentes. Na realidade, têm um rendimento apenas um pouco superior ao dos reatores eletromagnéticos, e na verdade a maior parte da vantagem obtida é atribuível ao aumento do rendimento da lâmpada quando trabalha a altas frequências. A principal vantagem é que o nível de iluminação pode ser mantido durante uma vida útil mais longa mediante o controle por realimentação da corrente de funcionamento. Entretanto, esta prática conduz a uma diminuição

Causas e Efeitos

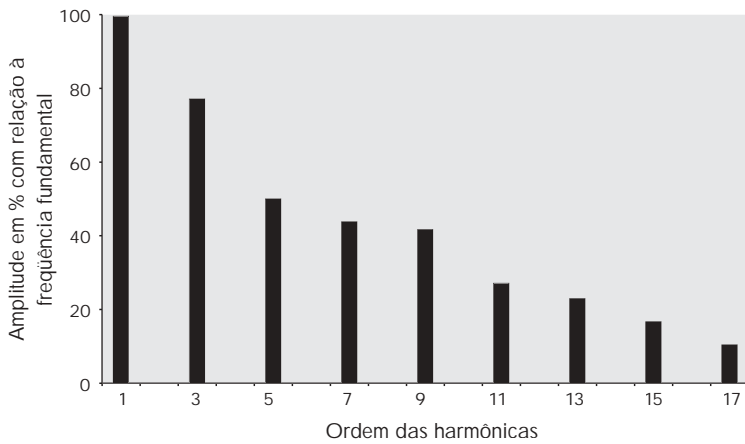


Figura 4 - Espectro harmônico de uma lâmpada fluorescente compacta.

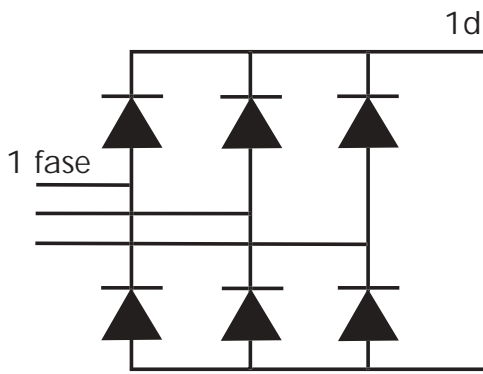


Figura 5 - Ponte trifásica (de 6 pulsos).

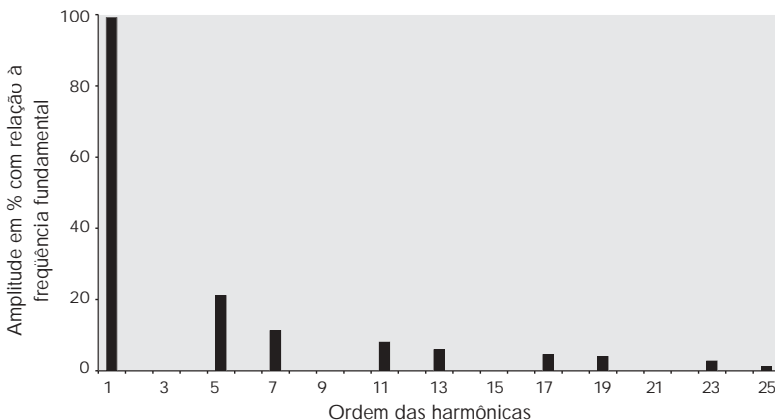


Figura 6 - Espectro harmônico de uma ponte trifásica de seis pulsos.

do rendimento global. Sua principal desvantagem é que geram harmônicas na corrente de alimentação. Os modelos equipados com correção de fator de potência e tendo um rendimento superior são encontrados no mercado, porém a um custo maior. As unidades menores normalmente não dispõem de correção.

As lâmpadas fluorescentes compactas são comercializadas atualmente em substituição das lâmpadas incandescentes clássicas com filamento de tungstênio. Um reator eletrônico miniaturizado, alojado no corpo de conexão, controla um tubo fluorescente curvado de 8mm de diâmetro. As lâmpadas fluorescentes compactas de 11W de potência nominal são vendidas substituindo as lâmpadas incandescentes de 60W, apresentando uma vida esperada de 8000h. O espectro das correntes harmônicas geradas por estas lâmpadas é mostrado na Figura 4. Estas lâmpadas são cada vez mais utilizadas em substituição das lâmpadas incandescentes nos setores residencial e terciário, e principalmente em hotéis, onde têm originado sérios problemas de harmônicas.

Cargas trifásicas

Os variadores de velocidade, os UPSs e, de forma geral, os inversores de corrente, são normalmente alimentados por uma ponte trifásica de 6 pulsos por ciclo (um para cada meio ciclo de cada fase), na saída de corrente contínua.

Uma ponte trifásica de 6 pulsos produz harmônicas de ordem $6n \pm 1$, isto é, um a mais ou um a menos de cada múltiplo de seis. Em teoria, a amplitude de cada harmônica é proporcional à sua ordem. Por exemplo, haveria uma quinta harmônica com amplitude de 20% e uma 11ª harmônica com amplitude de 9%, etc.

A Figura 6 mostra um exemplo do espectro típico de uma ponte trifásica de 6 pulsos.

A amplitude das harmônicas é significativamente reduzida utilizando uma ponte de 12 pulsos. Na realidade, trata-se de duas pontes de 6 pulsos, alimentadas por um transformador estrela-triângulo, o que produz um deslocamento de fase de 30° entre ambas. As harmônicas de ordem 6 e múltiplas são

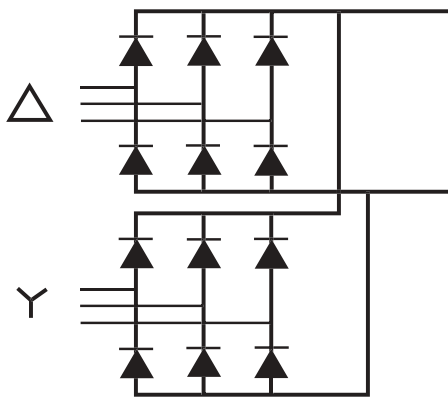


Figura 7 - Ponte de 12 pulsos.

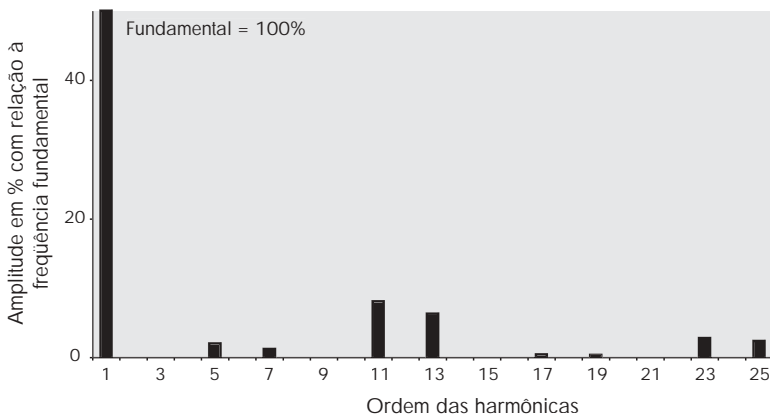


Figura 8 - Espectro harmônico típico de uma ponte trifásica de 12 pulsos.

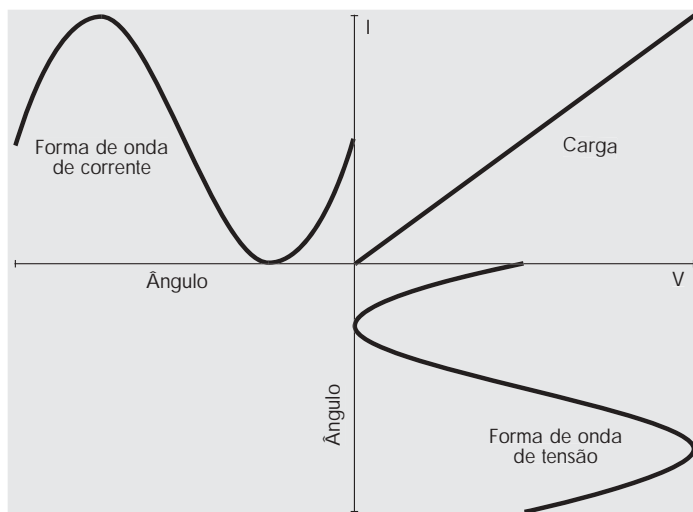


Figura 9 - Forma de onda em uma carga linear.

teoricamente suprimidas, mas na prática a redução depende do rendimento do inversor e o fator de redução médio é da ordem de 20 a 50. As harmônicas múltiplas de 12 permanecem inalteradas. Desta forma, a corrente harmônica total é reduzida, e as harmônicas residuais são de ordem superior, o que facilita o projeto do filtro.

Os fabricantes de equipamentos adotam em geral certas medidas para reduzir a importância das correntes harmônicas, como, por exemplo, o acréscimo de um filtro ou indutores em série. No passado, isto levou alguns fabricantes a afirmar que seus equipamentos atendiam a norma “G5/3”. Porém, dado que a “G5/3” é uma norma de planejamento aplicável a uma instalação inteira, é impossível afirmar que uma instalação a obedece sem conhecer as especificações de cada equipamento.

Um aumento do número de pulsos até 24, utilizando duas unidades de 12 pulsos em paralelo com uma defasagem de 15°, reduz a corrente harmônica total até aproximadamente 4,5%. Entretanto, a sofisticação adicional dos equipamentos é tal que o custo se torna proibitivo, de forma que estes equipamentos são utilizados apenas quando é absolutamente necessário adaptar-se às especificações das concessionárias de energia.

Como as harmônicas são geradas

Em um sistema de potência ideal, limpo de harmônicas, as formas de onda da corrente e da tensão são senoidais puras. Na prática, se produzem correntes não senoidais quando a corrente que circula pela carga não tem uma relação linear com a tensão aplicada. Em um circuito simples que possua apenas cargas lineares resistivas, indutivas e capacitivas, a corrente que circula é proporcional à tensão aplicada para uma frequência determinada. Se uma tensão senoidal é aplicada a este sistema, se produz uma corrente senoidal, como ilustrado na Figura 9. A curva de carga é a relação entre a tensão aplicada e a corrente que circula pela carga, tal como mostrado na Figura 9 correspondente a uma carga linear. Note-se que se está presente um elemento reativo, haverá uma defasagem entre as formas de onda da tensão e da corrente, e o fator de potência se reduz, mas o circuito continua sendo linear.

Causas e Efeitos

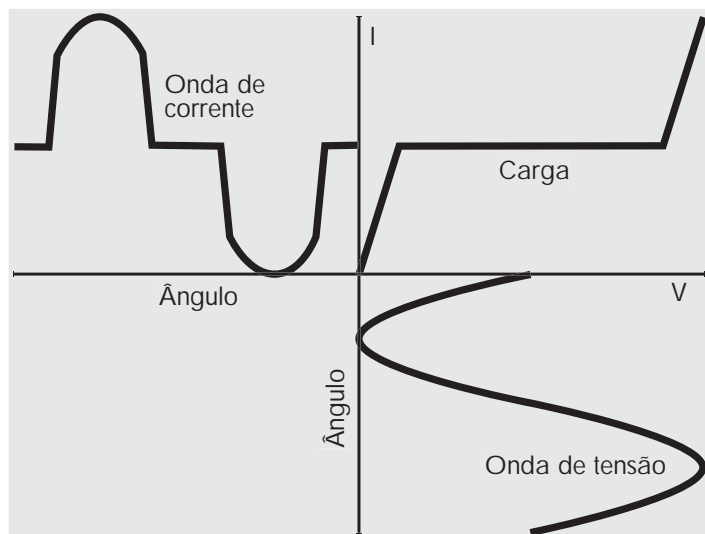


Figura 10 - Forma de onda de uma carga não linear.

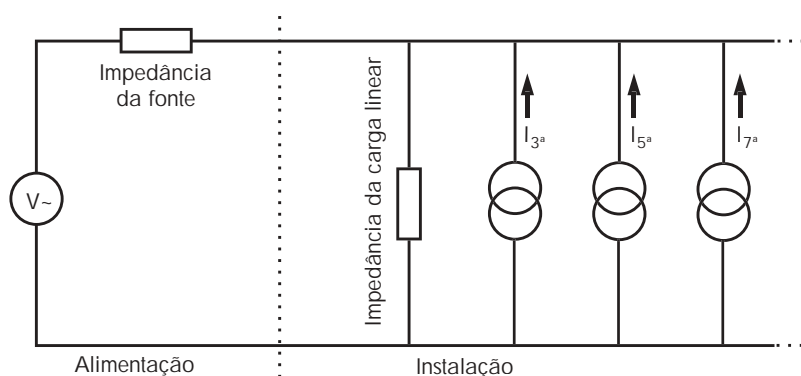


Figura 11 - Circuito equivalente de uma carga não linear.

As correntes harmônicas geradas pela carga circulam pelo circuito através da impedância da fonte e por todos os outros caminhos em paralelo. Como consequência, aparecem tensões harmônicas através da impedância da fonte e estão presentes em toda a instalação. Os geradores de harmônicas são considerados às vezes como geradores de tensão, embora se assim fosse a impedância da fonte não teria nenhuma influência sobre a amplitude da tensão harmônica através da fonte. Na realidade, a amplitude desta tensão é proporcional, até certo limite, ao valor da impedância da fonte, o que indica que o gerador se comporta como uma fonte de corrente.

Como a impedância da fonte geralmente é baixa, a tensão harmônica resultante de uma corrente harmônica também é baixa, e freqüentemente muito inferior aos valores da corrente que circula na rede. Isto pode induzir a erro, porque dá a impressão de que não existem problemas produzidos pelas harmônicas, quando na realidade estão presentes correntes harmônicas consideráveis. Esta é uma situação similar à tentativa de medir uma corrente de terra com um voltímetro. Sempre que há suspeitas da existência de harmônicas, ou quando se tenta verificar a sua ausência, deve-se medir a corrente.

A Figura 10 mostra a situação em que a carga é constituída por um retificador de onda completa e um capacitor, como na entrada de uma fonte chaveada típica. Neste caso, a corrente circula apenas quando a tensão de alimentação ultrapassa a que está armazenada no capacitor, isto é, próximo ao valor de pico da onda senoidal de tensão, como mostra a forma da curva de carga.

Na prática, a curva de carga e a forma de onda da corrente serão provavelmente muito mais complexas que as mostradas neste exemplo, podendo apresentar certas assimetrias e histereses, e os pontos de inflexão e as inclinações podem variar com a evolução da carga. Todas as ondas cíclicas podem ser decompostas em uma onda senoidal na freqüência fundamental mais uma série de senóides para as freqüências harmônicas. Portanto, a forma de onda distorcida representada na Figura 10 pode ser decomposta em uma onda fundamental, mais uma percentagem da segunda harmônica, mais uma percentagem da terceira harmônica, e assim sucessivamente, possivelmente até a décima terceira harmônica. Para as ondas simétricas, isto é, aquelas em que os ciclos positivo e negativo têm a mesma forma e amplitude, todas as harmônicas pares são iguais a zero. As harmônicas pares são, atualmente, relativamente raras, mas eram muito comuns quando se utilizavam os antigos retificadores de meia onda.

O circuito equivalente de uma carga não-linear é mostrado na Figura 11. Este circuito pode ser representado como uma carga linear em paralelo com várias fontes de corrente, uma para cada freqüência harmônica.

Problemas causados pelas harmônicas

As correntes harmônicas causam problemas tanto no sistema de distribuição de energia como na instalação. Os efeitos e as soluções são muito diferentes em cada caso e devem ser tratados separadamente. É possível que medidas adequadas para controlar os efeitos das harmônicas dentro da instalação não reduzam necessariamente a distorção produzida na alimentação e vice-versa.

Problemas produzidos pelas harmônicas no nível da instalação

- ◆ Problemas causados pelas correntes harmônicas:
 - ◆ sobreaquecimento dos condutores neutros;
 - ◆ sobreaquecimento dos transformadores;
 - ◆ disparos intempestivos dos dispositivos automáticos de proteção;
 - ◆ sobrecarga dos capacitores para correção do fator de potência;
 - ◆ efeito pelicular nos condutores.
- ◆ Problemas causados pelas tensões harmônicas:
 - ◆ distorção da tensão;
 - ◆ motores de indução;
 - ◆ ruído na passagem por zero.
- ◆ Problemas causados quando as correntes harmônicas chegam à fonte de alimentação.

Problemas causados pelas correntes harmônicas

Sobreaquecimento dos condutores neutros

Num sistema trifásico, a forma de onda da tensão de cada fase, entre fase e neutro, está defasada 120° , de forma que quando cada uma das fases tem a mesma carga, a soma das correntes no neutro é zero. Quando as cargas não estão

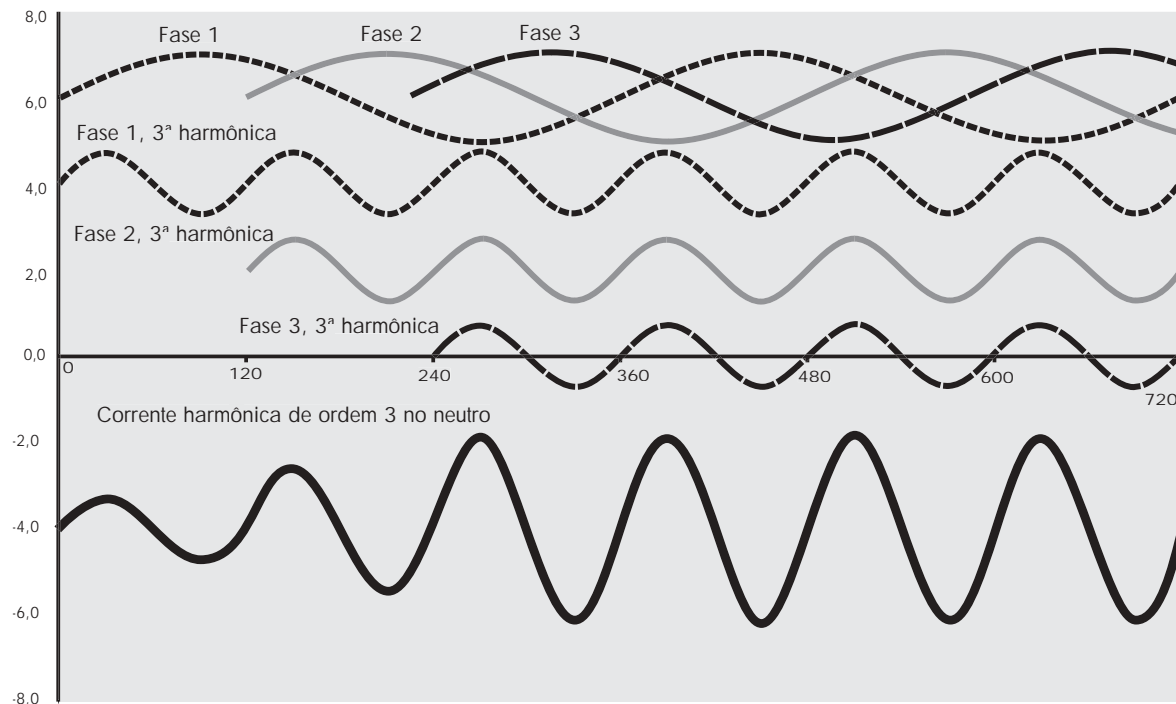


Figura 12 - Soma das correntes harmônicas de ordem 3 no neutro.

equilibradas, pelo neutro circulará apenas a resultante da soma das correntes de retorno. No passado, os projetistas de instalações costumavam diminuir a seção dos condutores neutros para a metade dos condutores das fases. No entanto, embora as correntes fundamentais se anulem entre si, não ocorre o mesmo com as correntes harmônicas. De fato, aquelas que são múltiplos ímpares do triplo da fundamental, as denominadas harmônicas “triple n”, somam-se no condutor neutro. A Figura 12 mostra este efeito. As correntes de cada fase, representadas na parte superior da figura, estão defasadas 120°. As terceiras harmônicas das fases são idênticas, sendo sua frequência o triplo da fundamental e, portanto, seu ciclo é um terço do da onda fundamental. A figura mostra a corrente resultante das três terceiras harmônicas. Neste caso, uma corrente da terceira harmônica de uma amplitude de 70% da fundamental em cada fase dá como resultado uma corrente no neutro com uma amplitude de 210%

Os casos encontrados em edifícios comerciais mostram geralmente correntes no neutro de amplitudes compreendidas entre 150 e 210% das correntes de fase, e em muitos casos com um condutor com metade da seção dos condutores fase!

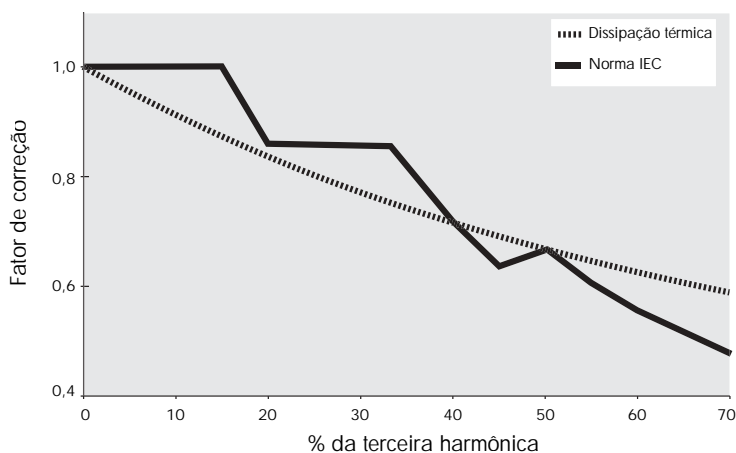


Figura 13 - Diminuição da capacidade de um cabo em função da proporção do conteúdo de harmônicas de ordem 3.

não o condutor de proteção além do neutro. Como a capacidade de condução de corrente dos cabos é determinada unicamente pela quantidade de calor que são capazes de dissipar na máxima temperatura de serviço permanente admissível, a conclusão é que no caso dos cabos submetidos a correntes harmônicas de ordem 3 e múltiplos (triple n) será necessário diminuir a sua capacidade admissível. No exemplo da figura, o cabo transporta cinco unidades de corrente, uma para cada fase e duas para o condutor neutro, sendo que o cabo foi dimensionado para transportar três unidades, uma para cada condutor fase e nada no neutro. Neste caso, deveria ter sido prevista uma redução da carga admissível de cerca de 60%.

A norma IEC 60364-5-523, anexo C sugere, a título de informação, uma série de fatores de correção da carga em função da porcentagem de correntes harmônicas de ordem 3 e múltiplos presentes na instalação. A Figura 13 compara o fator de redução de carga, em função do conteúdo de harmônicas de ordem 3 presentes na instalação conforme a norma IEC 60364-5-523, anexo C, e de acordo com o método térmico citado anteriormente. Esta norma está passando por revisão, e é provável que novos requisitos sejam introduzidos num futuro próximo.

Efeitos sobre os transformadores

Os transformadores são afetados pelas harmônicas de duas maneiras. Em primeiro lugar, as perdas por correntes de Foucault, que normalmente representam aproximadamente 10% das perdas a plena carga, aumentam em função do quadrado da ordem das harmônicas. Na prática, para um transformador trabalhando a plena carga e alimentando equipamentos de informática, as perdas totais serão o dobro que no caso de uma carga linear equivalente. O resultado é uma temperatura muito mais elevada e, como consequência, uma redução da vida útil do equipamento. De fato, nestas condições extremas a vida útil do transformador seria reduzida de uns 40 anos para algo em torno de 40 dias! Felizmente, são poucos os transformadores que trabalham a plena carga, mas este efeito tem que ser levado em consideração ao selecionar o equipamento para uma instalação.

O segundo efeito está relacionado com as harmônicas de ordem 3. Elas estão em fase no enrolamento de um transformador conectado em triângulo. Assim, estas correntes harmônicas serão absorvidas pelo enrolamento e não serão distribuídas para a linha de alimentação, de forma que os transformadores com enrolamento em triângulo são úteis como

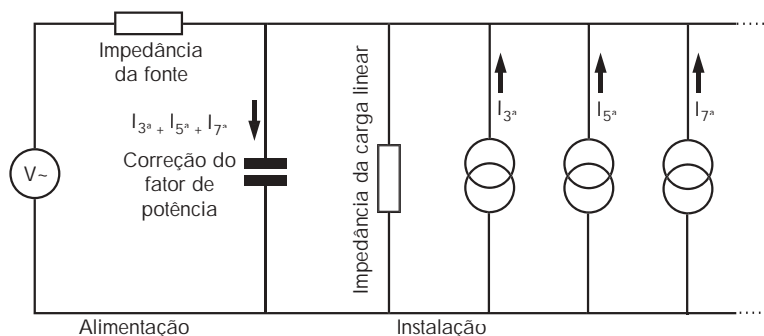


Figura 14 - Circuito equivalente de uma carga não linear com capacitor para correção do fator de potência.

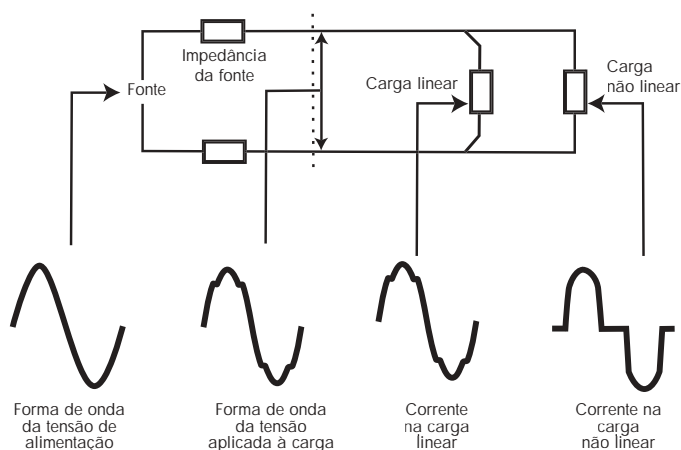


Figura 15 - Distorção da forma de onda da tensão devida a uma carga não linear.

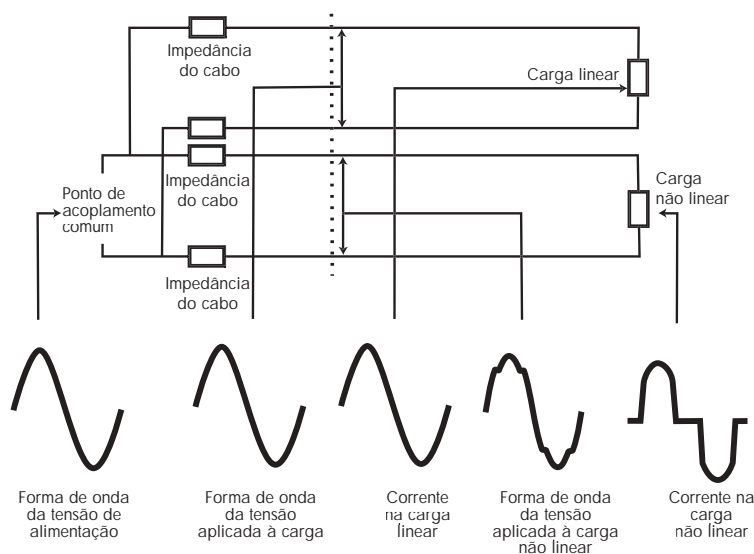


Figura 16 - Separação das cargas lineares e não lineares.

transformadores de isolamento. É importante notar que as harmônicas ímpares que não são múltiplas de 3 passam através do transformador para a rede de alimentação. As correntes destas harmônicas que circulam pelo transformador deverão ser consideradas no dimensionamento do mesmo.

O dimensionamento dos transformadores segundo as correntes harmônicas previstas será tratado numa seção posterior deste Guia.

Disparo intempestivo dos dispositivos automáticos

Os dispositivos a corrente diferencial-residual (dispositivos DR) somam a corrente que circula nos condutores fase e neutro, e se o resultado não está dentro do limiar especificado, desconectam a carga. Pode ocorrer um desligamento intempestivo na presença de harmônicas por duas razões. Em primeiro lugar, como o dispositivo DR é um dispositivo eletromecânico, pode ocorrer que não some corretamente as componentes de alta frequência e provoque erroneamente um desligamento. Em segundo lugar, os equipamentos que geram harmônicas, também geram ruído de manobra que deve ser filtrado no ponto de conexão da energia ao equipamento. Os filtros habitualmente utilizados têm um capacitor entre a fase e o neutro aterrado, pelo qual se derivam pequenas correntes de fuga à terra. Estas correntes são limitadas pelas normas a valores inferiores a 3,5mA, e normalmente são muito menores. Porém, quando vários equipamentos estão conectados a um único circuito, a corrente de fuga pode ser suficiente para provocar o disparo do dispositivo DR. Esta situação pode ser resolvida facilmente prevendo mais circuitos, cada um deles alimentando um número menor de cargas. Numa seção posterior deste Guia é tratado com mais detalhe o problema das correntes de fuga à terra de valor elevado.

A desconexão anômala de disjuntores acontece normalmente porque a corrente que circula no circuito é superior ao valor calculado ou medido, devido à presença de correntes harmônicas. A maior parte dos instrumentos de medição portáteis não medem os valores RMS (valores eficazes) reais, e podem subestimar as correntes não senoidais em um 40%. A medição real de valores eficazes é tratada na seção 3.2.2.

Sobrecarga dos capacitores para correção do fator de potência

Os capacitores para correção do fator de potência são utilizados para obter uma corrente com ângulo de fase adiantado, para compensar correntes atrasadas produzidas por uma carga indutiva, tal como um motor de indução. A Figura 14 mostra o circuito equivalente de um capacitor para correção do fator de potência com uma carga não linear. A impedância do capacitor diminui ao aumentar a frequência, enquanto a impedância da fonte é normalmente indutiva e aumenta com a frequência. É provável, portanto, que o capacitor deixe passar fortes correntes harmônicas de ordem alta, o que pode danificar o capacitor a não ser que tenha sido projetado especificamente para suportá-las.

Um problema potencialmente mais grave é que o capacitor entre em ressonância com a indutância parasita da fonte de alimentação a uma das frequências harmônicas, ou a uma frequência próxima. Quando isto acontece, podem ser geradas tensões e correntes muito elevadas, que frequentemente provocam avarias catastróficas no banco de capacitores. É possível evitar a ressonância acrescentando uma indutância em série com o capacitor, de forma que o conjunto seja indutivo na frequência da harmônica significativa de ordem mais baixa. Esta solução limita também a corrente harmônica que pode circular através do capacitor. Porém, o tamanho físico da indutância pode constituir um problema sério, sobretudo na presença de harmônicas de ordem baixa.

Efeito pelicular

A corrente alternada tende a circular pela superfície externa dos condutores. Este fenômeno é conhecido como efeito pelicular ou efeito skin, e é mais pronunciado nas altas frequências. Este efeito é habitualmente ignorado porque tem pequena influência na frequência fundamental. Entretanto, para frequências acima de 350Hz, isto é, para as harmônicas de ordem 7 e superiores, o efeito pelicular pode alcançar valores importantes, produzindo perdas e aquecimentos adicionais. Na presença de correntes harmônicas, os projetistas devem levar em conta este efeito, diminuindo o carregamento dos cabos e redimensionando-os adequadamente. A utilização de cabos (com almas constituídas de múltiplos fios) ou de barras coletoras laminadas podem contribuir a resolver este problema. Além disso, a montagem dos sistemas de barras deve ser projetada de modo a evitar a ressonância mecânica nas frequências harmônicas. A publicação 22 da CDA, intitulada “Copper for Busbar”, fornece orientações adicionais sobre estes dois assuntos.

Problemas causados pelas tensões harmônicas

Devido à impedância da fonte, as correntes harmônicas da carga produzem uma distorção harmônica da forma de onda da tensão, que é a causa das zonas planas da onda (Figura 15). A impedância da fonte consta de dois elementos: a impedância da instalação interna, a partir do ponto de acoplamento comum (PCC) até as cargas, e a correspondente à impedância interna dos geradores ou dos transformadores da rede de distribuição, até o PCC.

A corrente que é deformada pela carga não linear provoca uma queda de tensão distorcida na impedância do cabo. A forma de onda da tensão distorcida resultante é aplicada a todas as outras cargas conectadas ao mesmo circuito, fazendo com que circulem por elas correntes harmônicas, mesmo se as outras cargas são lineares.

A solução consiste em separar os circuitos que alimentam as cargas geradoras de harmônicas dos que alimentam as cargas sensíveis às harmônicas, como mostrado na Figura 16. Neste caso, circuitos separados alimentam as cargas lineares e as não lineares a partir do PCC, de modo que a distorção de tensão causada pelas cargas não lineares não afeta as cargas lineares. Ao analisar a amplitude da tensão harmônica distorcida, deve-se lembrar que quando a carga é transferida para um UPS ou gerador de emergência durante uma interrupção do fornecimento de energia, a impedância da fonte e a distorção de tensão resultante serão muito mais elevadas.

Na instalação de transformadores, devem ser selecionados aqueles que apresentem uma impedância de saída suficientemente baixa e uma capacidade térmica que permita suportar o aquecimento adicional, em outras palavras, transformadores adequadamente sobredimensionados. Não é conveniente escolher um tipo de transformador cuja capacidade de resfriamento é aumentada por meio de ventilação forçada, porque serão mantidas temperaturas internas muito elevadas, diminuindo assim sua vida útil. O resfriamento forçado deve ser reservado apenas para casos de emergência e nunca para funcionamento normal.

Motores de indução

As tensões harmônicas provocam um aumento das perdas por correntes de Foucault nos motores, como no caso dos transformadores. Além disso, aparecem perdas adicionais devidas a campos magnéticos harmônicos gerados no estator, cada um dos quais tenta fazer girar o motor a uma velocidade diferente ou mesmo inverter o sentido de rotação, conforme

Causas e Efeitos

se trate de harmônicas de seqüência positiva ou negativa. As correntes de alta freqüência induzidas no rotor aumentam ainda mais as perdas. Na presença de distorção harmônica de tensão, os motores devem ser redimensionados levando em conta essas perdas adicionais.

Ruído na passagem por zero

Muitos controladores eletrônicos detectam o momento no qual a tensão de alimentação passa por zero, para determinar quando devem ser ativadas as cargas. É adotado este procedimento porque a manobra das cargas indutivas a uma tensão zero não gera perturbações transitórias, reduzindo assim as interferências eletromagnéticas e as sobrecargas dos dispositivos de chaveamento semicondutores. Quando na fonte de alimentação estão presentes harmônicas ou perturbações transitórias, aumenta o número de passagens por zero, tornando-se mais difíceis de identificar e conduzindo a disfunções. De fato, existem vários pontos de passagem por zero em cada meio ciclo.

Problemas causados pelas harmônicas que afetam a fonte de alimentação

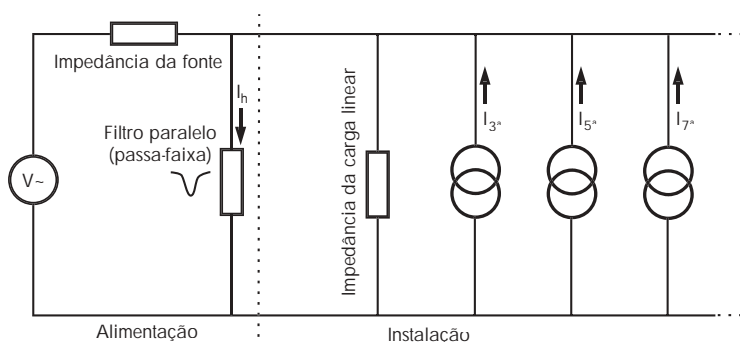


Figura 17 - Filtro passivo de harmônicas em paralelo com a carga.

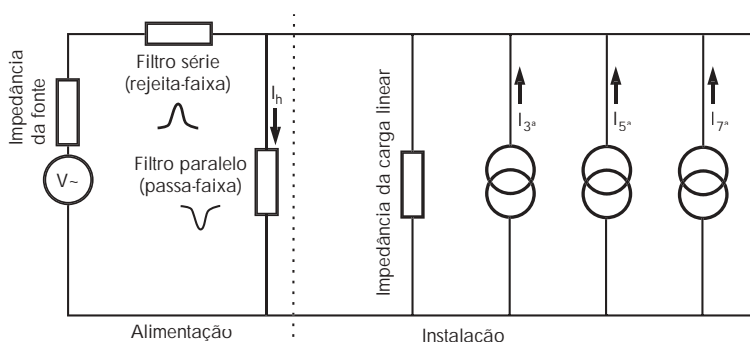


Figura 18 - Filtro passivo de harmônicas em série e paralelo com a carga.

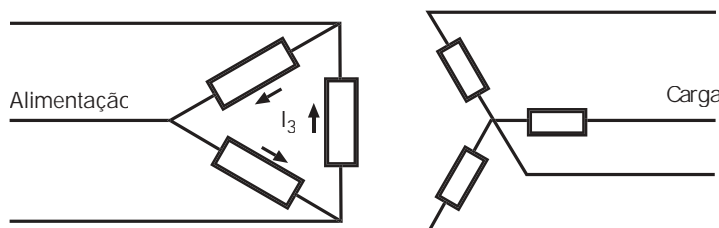


Figura 19 - Transformador de isolamento triângulo/estrela.

Quando uma corrente harmônica é gerada na fonte de alimentação, provoca uma queda de tensão harmônica proporcional à impedância da fonte no ponto de acoplamento comum, e à corrente. Como a rede de alimentação é geralmente indutiva, sua impedância aumentará em função da freqüência. A tensão no PCC é distorcida por causa das correntes harmônicas geradas por outros consumidores e pela distorção inerente aos transformadores.

Os consumidores não estão autorizados a acrescentar mais poluição à rede em detrimento de outros usuários, motivo pelo qual, na maioria dos países, as concessionárias de distribuição de energia elétrica têm estabelecido regulamentos que limitam a magnitude das correntes harmônicas que podem ser geradas pelos usuários. Muitos desses regulamentos são baseados na G5/3 da UK Electricity Association, publicada em 1975 e recentemente substituída pela G5/4 (2001). Esta norma é descrita em outra seção deste Guia.

Medidas para reduzir as harmônicas

As medidas disponíveis para controlar a magnitude das correntes harmônicas geradas serão descritas em outras seções deste Guia. Nesta seção, é apresentado um breve resumo geral. Os métodos para reduzir as harmônicas podem ser classificados em três grupos: os filtros passivos, os transformadores de isolamento e os filtros ativos. Cada uma destas opções tem suas vantagens e inconvenientes, o que significa que não existe uma solução única que possa ser considerada a melhor. Um estudo aprofundado do problema permitirá evitar a implementação de uma solução inadequada e ineficaz, assim como investimentos inúteis.

Filtros passivos

Os filtros passivos são usados para estabelecer um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, de forma que circulem pelo filtro e não pela fonte de alimentação (Figura 17).

O filtro pode ser projetado para uma única harmônica ou para uma faixa ampla de harmônicas, dependendo das exigências do sistema. Às vezes pode ser necessário desenvolver um filtro mais complexo, para aumentar as impedâncias em série nas frequências harmônicas diminuindo assim a parcela da corrente que retorna à fonte de alimentação, como mostrado na Figura 18.

Filtros rejeita-faixa em série são utilizados às vezes, instalados na fase ou no neutro. Um filtro em série é instalado mais para bloquear a passagem das correntes harmônicas do que para estabelecer um

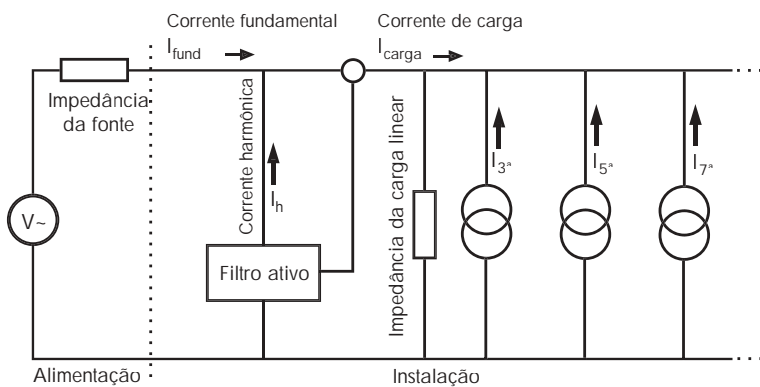


Figura 20 - Filtro ativo de harmônicas.

caminho controlado para elas. Isto provoca uma queda de tensão harmônica elevada através dos filtros. Esta queda de tensão harmônica aparece através da fonte de alimentação no lado da carga. A tensão de alimentação será fortemente distorcida e não responderá mais aos limites para os quais os equipamentos foram projetados e garantidos. Certos equipamentos são pouco sensíveis a esta distorção, mas alguns são muito sensíveis. Os filtros em série podem ser muito úteis em certas circunstâncias, mas devem ser utilizados com cuidado, motivo pelo qual não podem ser recomendados como solução de aplicação geral.

Transformadores de isolamento

Como mencionado acima, as correntes harmônicas de ordem 3 circulam pelos enrolamentos em triângulo dos transformadores. Embora isto seja um problema para os fabricantes e projetistas de transformadores, que devem levar em conta a carga adicional, trata-se de uma vantagem para os projetistas das redes de alimentação porque as harmônicas de ordem 3 são isoladas do sistema. O mesmo efeito pode ser conseguido utilizando transformadores com enrolamento em ziguezague. Na verdade, estes transformadores ziguezague são autotransformadores com configuração em estrela, com uma relação de fase particular entre seus enrolamentos, que estão conectados em paralelo com a fonte de alimentação.

Filtros ativos

As soluções apresentadas até aqui são adequadas apenas para determinadas harmônicas: o transformador de isolamento para as harmônicas de ordem 3, e os filtros passivos para as frequências harmônicas para as que foram projetados. Em algumas instalações, o conteúdo de harmônicas é difícil de prever. Em muitas instalações para equipamentos de informática, por exemplo, a combinação de equipamentos e sua localização mudam continuamente, de forma que as harmônicas também estão em mudança contínua. Uma solução adequada para estes casos é o filtro ativo, ou compensador ativo de harmônicas.

Como mostrado na Figura 20, o filtro ativo é um dispositivo conectado em derivação. Um transformador de corrente mede o conteúdo de harmônicas da corrente de carga e controla um gerador de corrente que produz uma réplica exata das harmônicas de sinal oposto, que é enviada à fonte de alimentação no ciclo seguinte. Como a corrente harmônica é compensada pelo filtro ativo, apenas a corrente fundamental chega da fonte de alimentação. Na prática, a magnitude das correntes harmônicas é reduzida em até 90%, e como a impedância da fonte é baixa nas frequências harmônicas, a distorção de tensão também é reduzida.

Conclusão

Praticamente todos os equipamentos elétricos e eletrônicos modernos possuem uma fonte chaveada de alimentação ou algum sistema de controle, o que as torna cargas não lineares. As cargas lineares são relativamente raras.

Causas e Efeitos

Em outras seções deste Guia serão descritas as futuras normas para os equipamentos. Porém, elas não são ainda suficientemente severas para obter um impacto sobre a poluição produzida pela geração de harmônicas nos equipamentos eletrônicos, como por exemplo os PCs. São os equipamentos desse tipo que produzem muitos dos problemas de harmônicas detectados hoje nas instalações industriais e comerciais, sobretudo devido ao grande número já instalados, e porque geram as harmônicas de ordem 3 que provocam numerosos problemas.

Com o aumento da quantidade de equipamentos eletrônicos instalados, e sem dispor ainda de normas severas apoiadas por rígidas medidas de controle, é provável que a poluição harmônica continue aumentando. Isto supõe um risco para as empresas, que por causa disso devem investir desde o início em bons procedimentos de projeto, equipamentos elétricos adequados e bons programas de manutenção.

Rede de Parceiros

Copper Benelux
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 7090
Fax: 00 32 2 777 7099
Email: mail@copperbenelux.org
Web: www.copperbenelux.org

Contact: Mr B Dôme

Copper Development Association
Verulam Industrial Estate
224 London Road
St Albans AL1 1AQ
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731205
Fax: 00 44 1727 731216
Email: copperdev@compuserve.com
Web: www.cda.org.uk & www.brass.org

Contact: Mrs A Vessey

Deutsches Kupferinstitut e.V
Am Bonnhof 5
D-40474 Duesseldorf
Germany

Tel: 00 49 211 4796 323
Fax: 00 49 211 4796 310
Email: sfassbinder@kupferinstitut.de
Web: www.kupferinstitut.de

Contact: Mr S Fassbinder

ECD Services
Via Cardinal Maffi 21
I-27100 Pavia
Italy

Tel: 00 39 0382 538934
Fax: 00 39 0382 308028
Email: info@ecd.it
Web: www.ecd.it

Contact: Dr A Baggini

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
Web: www.eurocopper.org

Contact: Mr H De Keulenaer

Hevrox
Schoebroekstraat 62
B-3583 Beringen
Belgium

Tel: 00 32 11 454 420
Fax: 00 32 11 454 423
Email: info@hevrox.be

Contact: Mr I Hendriks

HTW
Goebenstrasse 40
D-66117 Saarbruecken
Germany

Tel: 00 49 681 5867 279
Fax: 00 49 681 5867 302
Email: wlang@htw-saarland.de

Contact: Prof Dr W Langguth

Istituto Italiano del Rame
Via Corradino d'Ascanio 4
I-20142 Milano
Italy

Tel: 00 39 02 89301330
Fax: 00 39 02 89301513
Email: ist-rame@wirednet.it
Web: www.iir.it

Contact: Mr V Loconsolo

KU Leuven
Kasteelpark Arenberg 10
B-3001 Leuven-Heverlee
Belgium

Tel: 00 32 16 32 10 20
Fax: 00 32 16 32 19 85
Email: ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be

Contact: Prof Dr R Belmans

Polish Copper Promotion Centre SA
Pl.1 Maja 1-2
PL-50-136 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 78 12 502
Fax: 00 48 71 78 12 504
Email: pcpm@miedz.org.pl

Contact: Mr P Jurasz

TU Bergamo
Viale G Marconi 5
I-24044 Dalmine (BG)
Italy

Tel: 00 39 035 27 73 07
Fax: 00 39 035 56 27 79
Email: graziana@unibg.it

Contact: Prof R Colombi


TU Wroclaw
Wybrzeze Wyspianskiego 27
PL-50-370 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 32 80 192
Fax: 00 48 71 32 03 596
Email: i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl

Contact: Prof Dr H Markiewicz



David Chapman

 Copper Development Association

Copper Development Association
Verulam Industrial Estate
224 London Road
St Albans AL1 1AQ
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731205
Fax: 00 44 1727 731216
Email: copperdev@compuserve.com
Webs: www.cda.org.uk & www.brass.org

PROCOBRE
Connects Life.™

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

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