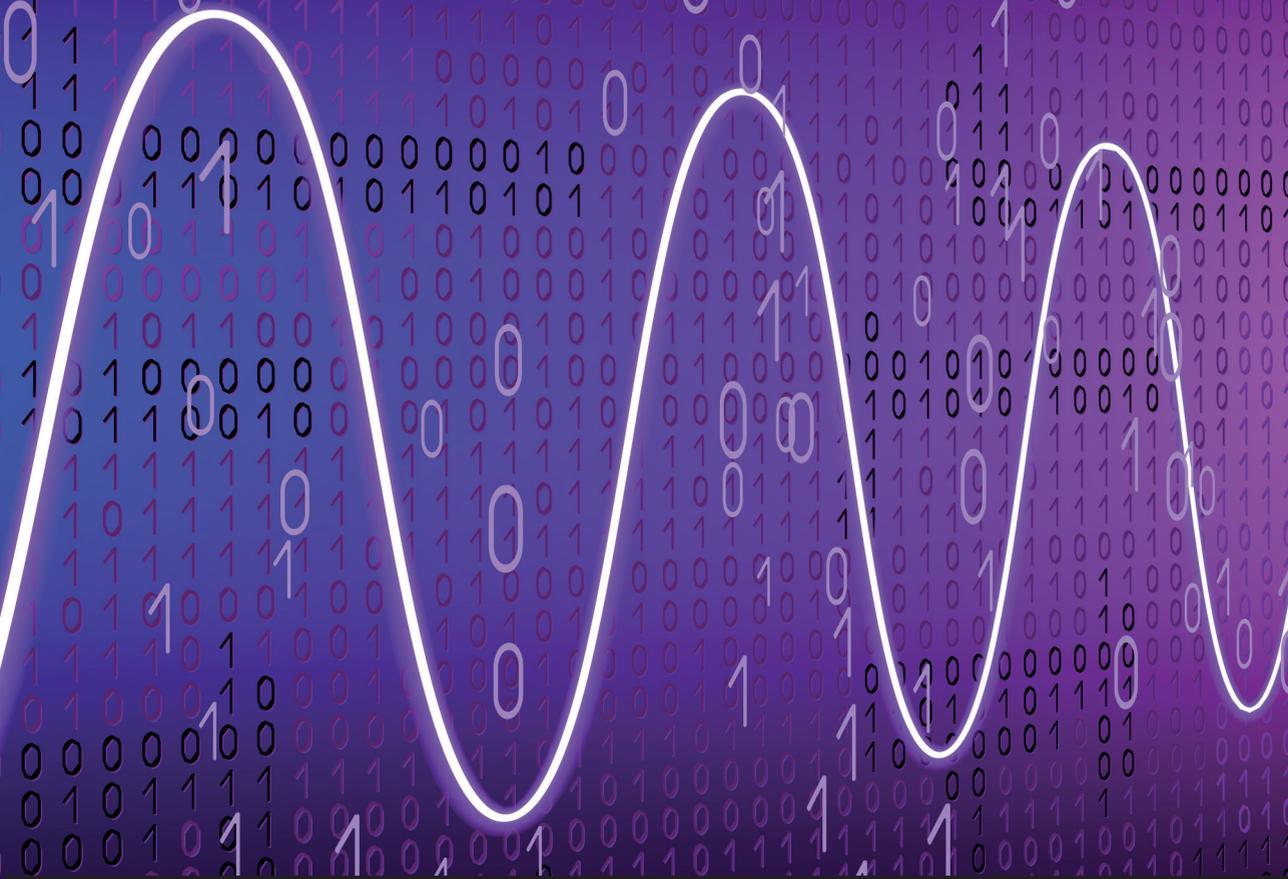


Como calcular filtros passivos de harmônicas

2ª EDIÇÃO



potência
Educação

AUTOR: HILTON MORENO



SOBRE O AUTOR HILTON MORENO

- ✘ Engenheiro eletricista pela Escola Politécnica da USP
- ✘ Membro de Comissões de Estudos da ABNT (Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Média Tensão, Fotovoltaicas, Eficiência Energética etc.)
- ✘ Professor universitário, cocriador de pós-graduação de instalações elétricas e palestrante profissional em cursos, eventos, congressos, seminários nacionais e internacionais
- ✘ Autor de livros, manuais e artigos, dentre eles os livros "Cabos elétricos conforme a NBR 5410" e "Cabos elétricos fotovoltaicos conforme a NBR 16690"
- ✘ Revisor da 5ª edição do livro "Instalações Elétricas" de Ademaro Cotrim
- ✘ Sócio-Diretor da Potência Comunicação Multiplataforma e Potência Educação



Telegram
<https://t.me/joinchat/AAAAAE4gwpme7mhjffzhmg>



LinkedIn
<https://www.instagram.com/in.com/hiltonmoreno/>

ÍNDICE

CAPÍTULO 1		CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS HARMÔNICOS	04
CAPÍTULO 2		CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS	10
CAPÍTULO 3		EFEITOS E CONSEQUÊNCIAS DAS HARMÔNICAS	12
CAPÍTULO 4		FILTROS PASSIVOS DE HARMÔNICAS	15

Apresentação

Controlar a presença das correntes e tensões harmônicas é tarefa fundamental e cada vez mais necessária para que seja garantida a distribuição de energia elétrica “limpa”, com valores de THDi e THDu em níveis aceitáveis pela normalização e regulamentação vigentes.

As diminuições dos valores de THDi e THDu estão interligadas e dependem da redução ou eliminação das correntes harmônicas predominantes numa instalação elétrica.

Em geral, o modo mais comum para atenuação de harmônicas é a utilização de filtros passivos, pois têm fácil montagem, custo relativamente baixo comparado com outras soluções e resultados bastante aceitáveis.

O objetivo desse e-book é apresentar os principais conceitos sobre harmônicas e o método de cálculo de um filtro passivo de harmônicas, que permite especificar as características do capacitor e bobina utilizados no filtro.

Para finalizar, agradeço as contribuições técnicas realizadas pelo amigo e engenheiro José Starosta, diretor da Ação Engenharia, na elaboração deste e-book.

Boa leitura.

Abraços, Prof. Hilton Moreno

IMPORTANTE: O conteúdo deste e-book deve ser utilizado exclusivamente para fins didáticos. Não nos responsabilizamos pelos resultados obtidos pela sua aplicação em projetos executivos, tendo em vista que existem diversos detalhes construtivos e práticos a serem considerados na fabricação e instalação dos componentes de um filtro passivo que não foram objeto deste trabalho, os quais devem ser confirmados e eventualmente complementados pelos fornecedores dos produtos.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS HARMÔNICOS

1. Definição de harmônicas

Uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal senoidal cuja frequência é múltipla inteira da frequência fundamental do sinal de alimentação.

A forma de onda de tensão ou de corrente em um dado ponto de uma instalação pode ter o aspecto do sinal T que está mostrado na Figura 1 (onda deformada). Observando essa situação, vemos que o sinal T é a soma ponto a ponto dos sinais 1 e 5 formados por senóides perfeitas de amplitudes e frequências diferentes, chamadas de harmônicas. Com efeito, é possível construir o sinal T a partir dos valores dos sinais 1 e 5 indicados na Tabela 1.

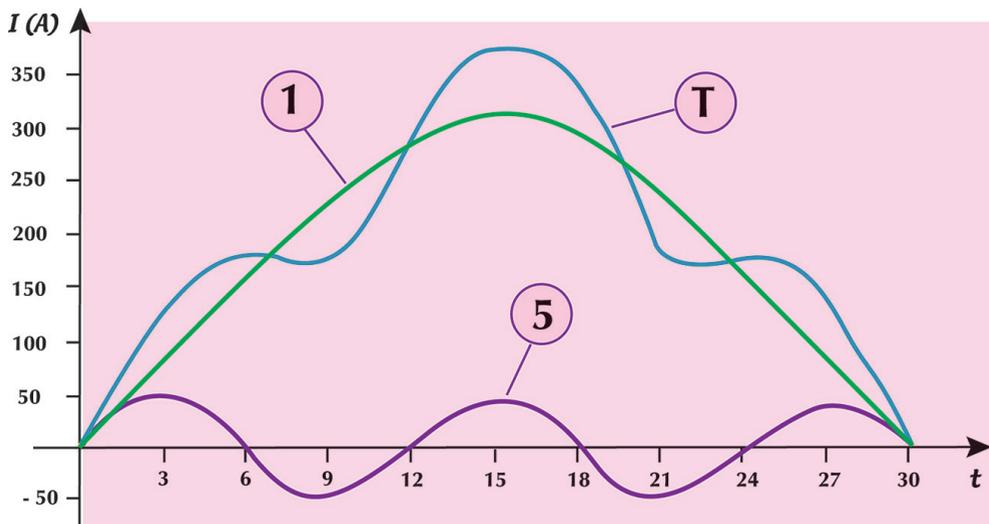


Figura 1: Onda deformada e suas componentes harmônicas

TABELA 1: VALORES PARA OS SINAIS 1, 5 E T DA FIGURA 1

t	Sinal 1 (A)	Sinal 5 (A)	Sinal T (A) = sinal 1 + sinal 5
0	0	0	0
3	90	50	140
6	190	0	190
9	230	-50	180
12	300	0	300
15	310	50	360
18	300	0	300
21	230	-50	180
24	190	0	190
27	90	50	140
30	0	0	0

Assim, podemos dizer que um sinal periódico contém harmônicas quando a forma de onda desse sinal não é senoidal, ou seja, um sinal contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal senoidal.

2. Ordem, frequência e sequência das harmônicas

Os sinais harmônicos são classificados quanto à sua ordem, frequência e sequência, conforme indicado na Tabela 2:

TABELA 2: ORDEM, FREQUÊNCIA E SEQUÊNCIA DAS HARMÔNICAS

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n * 60	

Em uma situação ideal, onde somente existisse um sinal de frequência 60 Hz, apenas existiria a harmônica de ordem 1, chamada de fundamental.

Observando-se a Tabela 2, vemos que há dois tipos de harmônicas: ímpares e pares. As ímpares são mais comuns nas instalações elétricas em geral e as pares existem quando ocorrem assimetrias do sinal devido à presença de componente contínua, como nas instalações de fornos a arco e outras cargas especiais.

A sequência pode ser positiva, negativa ou nula (zero).

Tomando-se como exemplo um motor assíncrono trifásico alimentado por quatro condutores (3F + N), as harmônicas de sequência positiva tenderiam a fazer o motor girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando, assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos, que provocaria um aumento de temperatura, reduzindo a vida útil e permitindo a ocorrência de danos ao motor. Essas harmônicas de sequência positiva provocam, geralmente, aquecimentos indesejados em condutores, motores, transformadores etc.

As harmônicas de sequência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor, também causando aquecimento indesejado.

As harmônicas de sequência nula, zero ou também conhecidas como homopolares, não provocam efeitos no sentido de rotação do motor, porém, somam-se algebricamente no condutor neutro. Isso implica que podem ocorrer situações em que pelo condutor neutro pode circular uma corrente de terceira ordem (e suas múltiplas inteiras) que é três vezes maior do que a corrente de terceira ordem que percorre cada condutor fase. Com isso, ocorrem aquecimentos excessivos do condutor neutro, destruição de bancos de capacitores etc.

3. Espectro harmônico

O chamado “espectro harmônico” permite decompor um sinal em suas componentes harmônicas, que passa a ser representado na forma de um gráfico de

barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência, valor eficaz ou percentual em relação à fundamental e defasagem.

A Figura 2 mostra a forma de onda e o espectro harmônico de uma forma de onda bastante distorcida, repleta de harmônicas, sobretudo as de ordem 3, 5, 7 e 9.

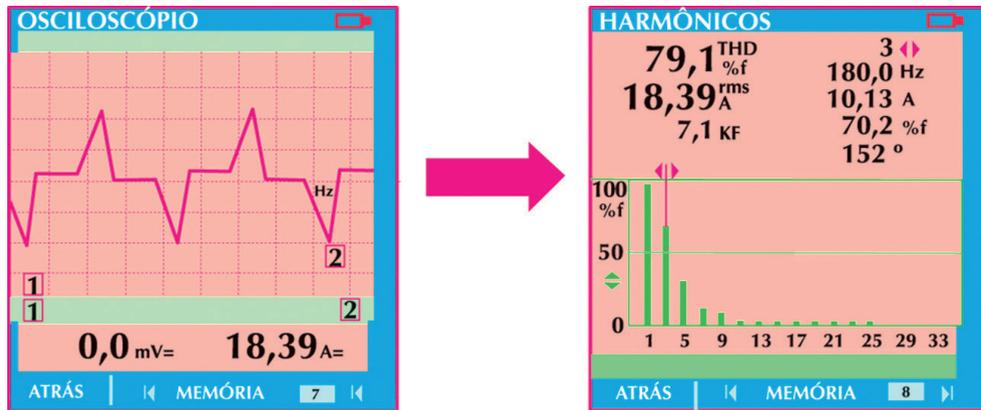


Figura 2: Forma de onda e espectro de um sinal fortemente distorcido

4. Taxa de distorção harmônica total (THD)

A THD é definida em consequência da necessidade de se determinar numericamente as harmônicas presentes em um dado ponto da instalação.

A forma mais comum de se quantificar a THD é a seguinte:

$$THD = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \times 100\%$$

Onde h_1, h_2, \dots, h_n representam o valor eficaz das harmônicas de ordem 1, 2, ..., n.

É possível verificar que, na ausência de componentes harmônicas ($h_2, h_3, \dots, h_n = 0$), THD = 0. Dessa forma, devemos buscar nas instalações elétricas os valores de THD mais próximos possíveis de zero.

São definidos dois valores para THD, sendo um para tensão (THDv) e outro para corrente (THDi), que indicam, respectivamente, o grau de distorção das ondas de tensão e corrente, quando comparadas com as respectivas senóides puras.

É importante lembrar que a distorção de corrente, indicada pela THDi, é provocada pela carga, ao passo que a distorção de tensão (THDv) é produzida pela fonte geradora como consequência da circulação de correntes distorcidas pela instalação. Isso significa que, quanto mais cargas que provocam distorção de corrente uma instalação possuir, maiores as possibilidades de distorção na forma de onda de tensão. Isso provoca uma espécie de “efeito de bola de neve” uma vez que, se a tensão é deformada, as correntes nas cargas também se deformam e, se as correntes se deformam, as tensões se deformam mais ainda, e assim por diante, uma vez que $U = Z \times I$.

Para exemplificar, vamos determinar o valor de THDi para um sinal de corrente que possua as características medidas em um dado ponto do circuito indicadas na Tabela 3:

TABELA 3: EXEMPLO DE CORRENTES HARMÔNICAS EM UM DADO SINAL

Ordem	Intensidade (A)
h_1	3,63
h_3	2,33
h_5	0,94
h_7	0,69
h_9	0,50
h_{11}	0,41
h_{13}	0,33

Da Tabela 3, temos:

$$\text{THDi} = \frac{\sqrt{(2,33)^2 + (0,94)^2 + (0,69)^2 + (0,50)^2 + (0,41)^2 + (0,33)^2}}{3,63} \times 100\% = 74,5\%$$

5. Valor eficaz de um sinal harmônico

A determinação do valor eficaz de qualquer sinal é de fundamental importância para que se possam escolher os componentes de um circuito, como condutores, transformadores, dispositivos de proteção, filtros etc.

No caso de ondas de corrente distorcidas, o valor eficaz resultante em um circuito percorrido por correntes harmônicas de ordem 1, 2, 3, 4, ... , n é dado por:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}$$

Analogamente, no caso de ondas de tensão distorcidas, o valor eficaz resultante em um circuito onde são aplicadas tensões harmônicas de ordem 1, 2, 3, 4, ... , n é dado por:

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}$$

Como exemplo, vamos determinar o valor eficaz do sinal de corrente cujos valores das componentes harmônicas estão indicados na Tabela 3. Nesse caso, temos:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{3,63^2 + 2,33^2 + 0,94^2 + 0,69^2 + 0,50^2 + 0,41^2 + 0,33^2}$$

$$I_{\text{rms}} = 4,53 \text{ A}$$

CAPÍTULO 2

CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS

As harmônicas de corrente e tensão são geradas por cargas não lineares, como aquelas que possuem dispositivos semicondutores e/ou que utilizam materiais ferromagnéticos que podem trabalhar em regime de saturação.

São exemplos de cargas que geram harmônicas:

▶ **Variador de velocidade:** é uma carga muito poluidora, com alto conteúdo de harmônicas, alcançando valores de distorção de corrente superiores a 100%, o que significa que a soma das harmônicas supera o valor da fundamental, conforme Figura 3.

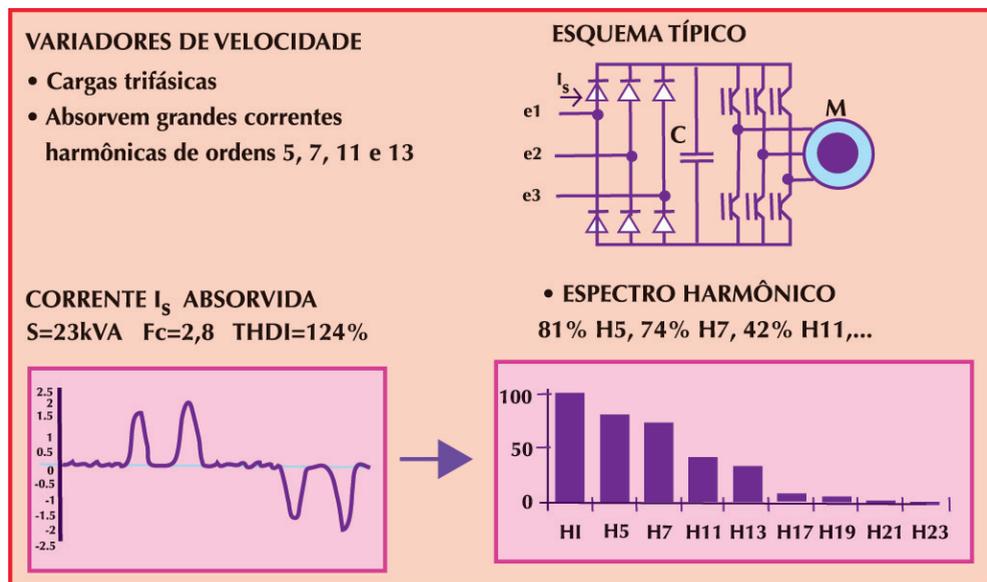


Figura 3: Circuito típico de um variador de velocidade

► **Fonte de alimentação monofásica:** é o tipo de carga não linear mais disseminado nas instalações elétricas, uma vez que qualquer equipamento eletrônico possui sua própria fonte de alimentação. São fontes comutadas, de baixo custo, que integram computadores pessoais, aparelhos de TV, impressoras, carregadores de celulares etc. (Figura 4).

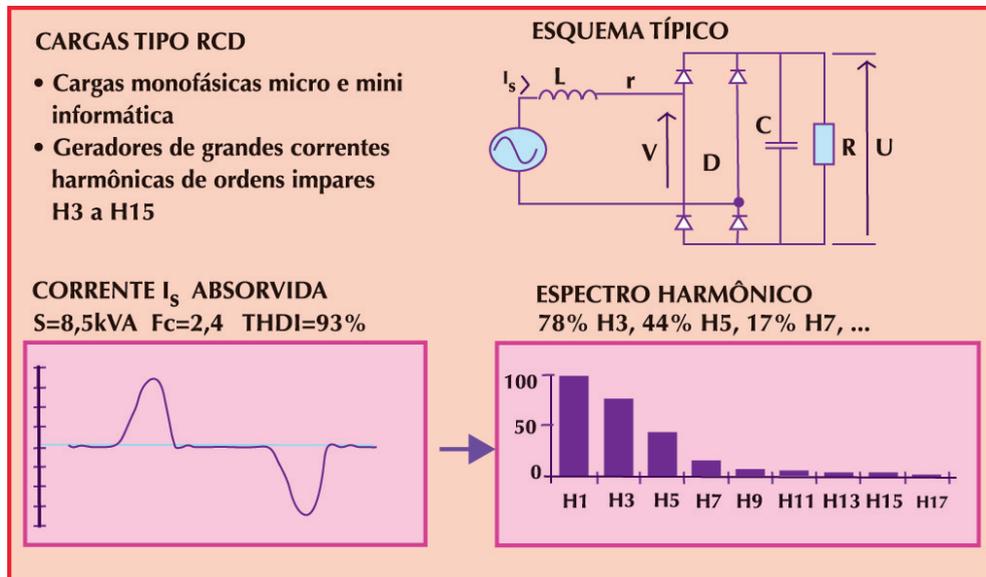


Figura 4: Circuito típico de uma fonte de alimentação monofásica

CAPÍTULO 3

EFEITOS E CONSEQUÊNCIAS DAS HARMÔNICAS

Qualquer sinal de corrente ou de tensão, cuja forma de onda não seja senoidal, pode provocar danos na instalação elétrica em que está presente e/ou em seus componentes e aparelhos a ela conectados.

Há vários efeitos provocados pelas harmônicas, sendo que alguns podem ser notados visualmente, outros podem ser ouvidos, outros são registrados por medidores de temperatura e ainda há os casos em que se necessitam utilizar equipamentos especiais para detectá-los.

Os principais efeitos observados em instalações e componentes submetidos à presença de harmônicas são: aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, ressonância, vibrações e acoplamentos, achatamento da forma de onda da tensão, tensão elevada entre neutro e terra, aumento da queda de tensão e do fator de potência da instalação.

Em consequência dos efeitos mencionados, podem existir ainda problemas associados ao funcionamento e desempenho de motores, fios e cabos, capacitores, computadores, transformadores etc.

1. Aquecimentos excessivos

O aquecimento é um dos efeitos mais importantes das correntes harmônicas. Pode estar presente em fios e cabos da instalação elétrica, nos enrolamentos dos transformadores, motores e geradores etc.

2. Disparos de dispositivos de proteção

Os sinais harmônicos podem apresentar correntes com valores eficazes pequenos, porém, com elevados valores de pico (elevado fator de crista), o que pode

fazer com que alguns dispositivos de proteção termomagnéticos e diferenciais (como DR, por exemplo) disparem indevidamente. Isto ocorre porque as correntes harmônicas provocam um aquecimento ou um campo magnético acima daquele que haveria sem a sua presença.

3. Ressonância

Uma capacitância em paralelo com uma indutância forma um circuito ressonante capaz de amplificar o sinal de uma dada frequência. Quando é utilizado um banco de capacitores, é formado um circuito ressonante entre o banco e a indutância natural da própria instalação elétrica. Com isto, certas harmônicas podem ser amplificadas, provocando danos principalmente nos próprios capacitores, levando-os à queima ou explosões.

4. Vibrações e acoplamentos

As altas frequências das harmônicas podem provocar interferências eletromagnéticas irradiadas ou conduzidas que, por sua vez, provocam vibrações em quadros elétricos, transformadores e/ou acoplamentos em redes de comunicação, prejudicando a qualidade da conversação ou da troca de dados e sinais.

5. Aumento da queda de tensão

Com o aumento do valor eficaz da corrente em um circuito que contém harmônicas, conseqüentemente aumenta a queda de tensão nesse circuito, uma vez que $U = Z \cdot I$.

6. Redução do fator de potência

Como geralmente as harmônicas mais importantes têm frequências maiores do que a fundamental, suas presenças aumentam o valor da reatância indutiva da instalação, uma vez que $X_L = 2 \pi f L$, onde “f” é a frequência da harmônica e “L” é a indutância natural da instalação. Com o aumento de X_L , aumenta a potência reativa (kvar), reduzindo assim o fator de potência da instalação.

7. Tensão elevada entre neutro e terra

A circulação de correntes harmônicas pelo condutor neutro provoca uma queda de tensão entre esse condutor e a terra, uma vez que a impedância do cabo não é zero. Em alguns equipamentos eletroeletrônicos, a presença de uma certa tensão entre neutro e terra pode prejudicar a sua correta operação.

CAPÍTULO 4

FILTROS PASSIVOS DE HARMÔNICAS

Controlar a presença das correntes e tensões harmônicas é tarefa fundamental e cada vez mais necessária para que seja garantida a distribuição de energia elétrica “limpa”, com valores de THDi e THDu em níveis aceitáveis pela normalização e regulamentação vigentes.

Além disso, o controle das harmônicas possibilita a redução da demanda total em kVA de uma instalação, evitando assim um sobredimensionamento das fontes de alimentação (transformadores e grupos geradores) em projetos novos e o sobreaquecimento das fontes em instalações existentes.

As diminuições dos valores de THDi e THDu estão interligadas e dependem da redução ou eliminação das correntes harmônicas predominantes numa instalação elétrica.

Em geral, o modo mais comum para atenuação de harmônicas é a utilização de filtros passivos, pois têm fácil montagem, custo relativamente baixo comparado com outras soluções e resultados bastante aceitáveis.

Os filtros passivos de harmônicas possuem as versões em “série” e “paralelo”, sendo a última a mais utilizada, que será descrita a seguir.

Filtro passivo LC em série ligado em paralelo com a carga

Essa solução consiste na inclusão de um filtro LC em paralelo com a fonte poluidora. A Figura 5 mostra uma ligação típica desse filtro, onde a indutância LP e a capacitância CP do filtro são escolhidas de modo que exista ressonância entre o filtro e carga. Quando isso ocorre, a impedância do filtro é praticamente nula para a corrente harmônica que se deseja capturar, que fica então circulando somente entre a carga e o filtro, sem fluir para outras partes da instalação.

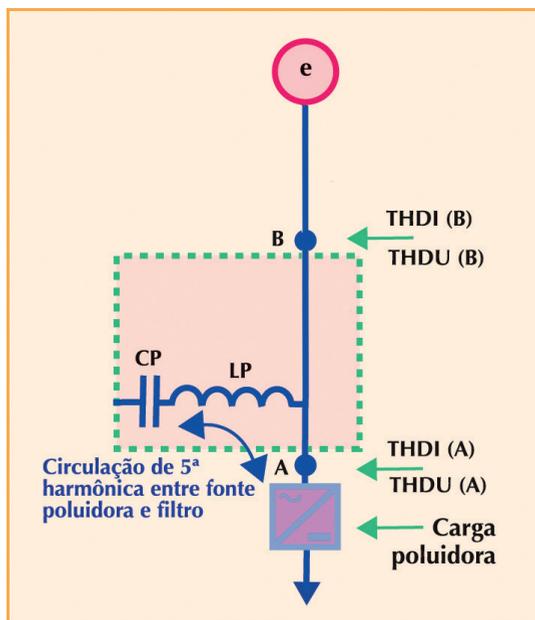


Figura 5: Exemplo de filtro de harmônicas passivo LC não compensado monofásico

O dimensionamento de um filtro passivo LC em série ligado em paralelo com a carga é realizado a partir da medição ou estimativa do valor eficaz verdadeiro da corrente no ponto onde o filtro será instalado. Esse ponto pode ser junto ao secundário de um transformador, na saída de um gerador, no barramento de um quadro geral ou de distribuição, ou ainda nos terminais de uma carga.

Independentemente da localização do filtro, devem ser medidos, pelo menos, os valores de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e fator de potência.

Fator de qualidade de um filtro (Q)

O fator de qualidade de um filtro (Q) é a medida do seu grau de captura com precisão das frequências harmônicas. Assim, quanto maior o fator Q, mais o filtro será capaz de absorver somente as correntes harmônicas de frequências desejadas, aumentando assim a eficiência do filtro.

O fator de qualidade Q é calculado por:

$$Q = \frac{Z_0}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad [1]$$

Sendo:

Q = Fator de qualidade do filtro

Z_0 = Impedância natural do sistema

L, C e R = Elementos do filtro

Valores usuais de Q situam-se entre 20 e 80 nas instalações de baixa tensão, sendo que maiores valores de Q resultam em menores distorções harmônicas no sistema. Caso seja possível, devem ser feitos dimensionamentos para diferentes valores de Q, avaliando-se então qual opção é a mais adequada técnica e economicamente em cada situação. No caso de decidir por um único valor, então Q = 50 pode resultar, em geral, em um compromisso satisfatório entre o desempenho e o custo do filtro.

Fator de dessintonia de um filtro

Embora um filtro de harmônicas seja escolhido para capturar uma determinada harmônica (h), na prática, a frequência de sintonia utilizada no cálculo dos seus componentes é escolhida na faixa de 3% a 15% abaixo da desejada. A esse percentual de redução dá-se o nome de “fator de dessintonia” (d), conforme IEEE Std. 1531. Por exemplo, para um filtro de h = 5ª harmônica, sendo a fundamental 60 Hz e o fator de dessintonia escolhido igual a 10%, a frequência de sintonia utilizada no cálculo será igual a $hd = 5 \cdot 60 \cdot 0,90 = 270$ Hz, ao invés de 300 Hz que é a frequência da 5ª harmônica.

Esse fator de dessintonia visa a compensação de variações na frequência do circuito, que podem ser devidas a variações normais de frequência em um sistema,

ou alterações nos valores nominais dos componentes do filtro por envelhecimento, temperatura etc.

Dimensionamento da capacitância e indutância do filtro

Quando incorporados aos filtros passivos, os capacitores acabam por fornecer energia reativa capacitiva que contribui para o aumento do fator de potência da instalação, mesmo que essa não seja a intenção. Por outro lado, as bobinas fornecem energia reativa indutiva em sentido contrário que contribui para a redução do fator de potência.

Assim, o cálculo da capacitância e da indutância do filtro é feito a partir da escolha da sua potência reativa (Q_F), que deverá levar em conta a medição ou estimativa da potência reativa existente no ponto onde o filtro será ligado.

Na Figura 5, vamos considerar que, no ponto de ligação do filtro situado entre a fonte e a carga poluidora, a potência reativa é igual a 51 kvar e o fator de potência é 0.96, escolhendo-se, então, um filtro com potência de 55 kvar.

Admitindo-se que se deseja dimensionar um **filtro para a 5ª harmônica**, com tensão nominal da instalação de 220/380 V, e potência reativa do filtro igual a 55 kvar, temos:

$$a) \quad Q_F = (U)^2 / (X_C - X_L) \quad [2]$$

Sendo:

Q_F = potência reativa do filtro (kvar) = potência reativa do capacitor – potência reativa da bobina

U = tensão de linha (fase-fase) ou tensão fase-neutro (V)

X_C = reatância capacitiva do filtro na frequência fundamental (Ω)

X_L = reatância indutiva do filtro na frequência fundamental (Ω)

No exemplo, aplicando a equação [2]:

$$55.000 = (380)^2 / (X_C - X_L) \Downarrow (X_C - X_L) = 2,625 \Omega$$

b) Na frequência de ressonância (sintonia) do filtro:

$$h_d^2 = (h - d)^2 = X_C - X_L \quad [3]$$

Sendo:

h_d = ordem da harmônica de dessintonia

h = ordem da harmônica a ser filtrada

d = fator de dessintonia

No exemplo, admitindo-se $d = 10\%$, pela equação [3]:

$$h_d = (5 - 0,10 \cdot 5)^2 = 20,3$$

E, conseqüentemente, pela equação [3]:

$$X_L = X_C / 20,3 = 0,0493 \cdot X_C \quad [4]$$

Portanto:

$$\text{Pela equação [2] : } 55.000 = (380)^2 / (X_C - 0,0493 X_C)$$

$$X_C = 2,761 \Omega$$

Daí:

$$X_C = 1 / 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad [5]$$

$$2,761 = 1 / 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot C$$

$$C = 961 \mu\text{F}$$

Então:

$$X_L = 0,0493 \cdot X_C$$

$$X_L = 0,136 \Omega$$

Daí:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad [6]$$

$$0,136 = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot L$$

$$L = 361 \mu\text{H}$$

A partir dos valores calculados de C e L, admitindo-se $Q = 50$, pela equação [1]:

$$50 = \sqrt{361 \cdot 10^{-6} \cdot 961 \cdot 10^{-6} / R} \Rightarrow R = 12,25 \text{ m}\Omega$$

Na prática, a ordem de grandeza obtida para o valor da resistência R indica que ele pode ser obtido a partir da resistência elétrica dos condutores que fazem parte

do circuito do filtro, não sendo necessária a instalação de um resistor específico no circuito.

Tensão e corrente nos componentes do filtro

Deve-se considerar que o filtro passivo monofásico utilizado neste exemplo é composto pela ligação série da bobina com o capacitor (Figura 5).

No caso do exemplo apresentado, em função dos valores obtidos para R , X_L e X_C , as tensões fundamentais aplicadas sobre o capacitor e a bobina podem ser calculadas conforme a seguir:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{(0,01225)^2 + (0,136 - 2,761)^2} = 2,63 \Omega$$

$$I = U / Z = 380 / 2,63 = 144,8 \text{ A}$$

$$U_L = X_L \cdot I = 0,136 \cdot 144,8 = 20 \text{ V}$$

$$U_C = X_C \cdot I = 2,761 \cdot 144,8 = 400 \text{ V}$$

Por outro lado, além da corrente fundamental calculada acima, haverá circulação pelo filtro de outras correntes harmônicas (notadamente a 5ª harmônica), cujas ordens e intensidades dependem do espectro harmônico da carga e da impedância do filtro “enxergada” por essas correntes no ponto de ligação do filtro à rede. Essas correntes harmônicas que circulam pelos componentes do filtro L e C ligados em série devem ser determinadas por medição ou estimativa. Portanto, **a corrente nominal dos componentes do filtro deve levar em consideração a corrente fundamental e todas as harmônicas presentes no ramo do filtro.**

Cada corrente harmônica que circula pelo filtro provoca uma queda de tensão sobre a bobina e o capacitor, que é proporcional à reatância indutiva ou capacitiva na respectiva frequência da harmônica. Assim, no final, a tensão total aplicada

sobre o capacitor e a bobina, considerando todas as harmônicas presentes no filtro, deve ser calculada conforme indicado no item 5 do Capítulo 1. **A partir dessa tensão total calculada é que se determina a tensão nominal do capacitor e da bobina do filtro.**

No caso do capacitor, como a tensão aplicada sobre ele será maior do que a tensão da rede (vide cálculo anterior), ele deverá ter uma tensão nominal maior do que a tensão nominal da instalação. Como a potência reativa depende da tensão aplicada, então deve-se recalcular a potência reativa para a nova tensão nominal mais elevada (U'_{nom}), utilizando-se a seguinte relação:

$$Q'_C = Q_C / (U_{rede} / U'_{nom})^2 \quad [7]$$

Onde Q'_C é a potência reativa do capacitor na tensão nominal mais elevada.

No exemplo, $Q_C = X_C \cdot I_F^2 = 2,761 \cdot 144,8^2 = 57,9 \text{ kvar em } 380 \text{ V } (U_{rede})$.

Caso seja escolhido um capacitor para $U'_{nom} = 440 \text{ V}$, conforme [7], a sua nova potência reativa nessa tensão mais elevada é dada por:

$$Q'_C = 57,9 / (380/440)^2 = 77,6 \text{ kvar.}$$