

PEA2503 Laboratório de Qualidade de Energia

Filtros Passivos de Harmônicos

Prof. Lourenço Matakas Jr Versão 29-10-2014

1. Objetivos

- Aprender a estratégia de filtragem passiva de harmônicos de corrente, utilizando filtros LC sintonizados;
- Equacionamento do filtro LC;
- Verificar sua operação e influência dos parâmetros através de simulações utilizando o programa PSIM;
- Verificar que o filtro LC pode absorver harmônicos de outras fontes ligadas à rede elétrica.

1. Filtro Passivo de Corrente

1.1 Princípio de Funcionamento

Uma carga não linear, alimentada com tensão $v_{rede}(t)$ absorve uma corrente deformada $i_{carga}(t)$, conforme mostrado na figura 1

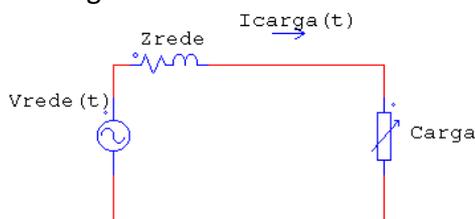


Figura 1 Carga não linear conectada à rede

Inserir-se uma impedância Z_{filtro} em paralelo com a carga, conforme mostrado na figura 2a, com o objetivo de absorver parte dos harmônicos da carga (i_{filtro}), evitando que estes fluam pela rede.

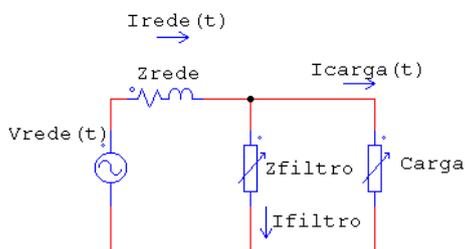


Figura 2a. Filtro em paralelo com a carga

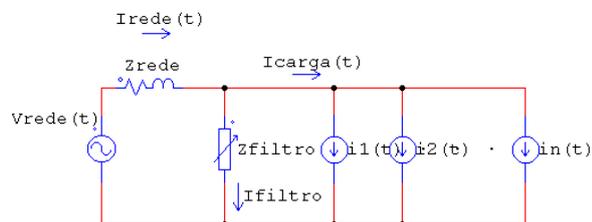


Fig. 2b. Representando a carga por fontes de corrente ideais

Para efeito de modelamento será considerado que o espectro da corrente de carga não se altera com a inserção do filtro, o que não é completamente verdadeiro em casos práticos, particularmente quando a carga for um retificador com filtro capacitivo. Neste caso a forma de onda da corrente é muito dependente da tensão da rede.

Considerando-se o espectro da carga independente da inserção do filtro, e da forma de onda da tensão, representa-se a carga como uma associação paralela de fontes de corrente, uma para cada harmônico, conforme indicado na figura 2b. Pode-se calcular a atenuação imposta pelo filtro ao componente de ordem h, considerando-se o divisor de corrente formado por Z_{filtro} e Z_{rede} (equação 1). Adotou-se tensão $v_{\text{rede}}(t)$ senoidal, de modo que ela possa ser considerada como um curto circuito para os harmônicos diferentes da fundamental.

$$k = \left| \frac{\dot{I}_{\text{rede}}(h\omega)}{\dot{I}_{\text{carga}}(h\omega)} \right| = \left| \frac{\dot{Z}_{\text{filtro}}(h\omega)}{\dot{Z}_{\text{filtro}}(h\omega) + \dot{Z}_{\text{rede}}(h\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left| \dot{Z}_{\text{rede}}(h\omega) / \dot{Z}_{\text{filtro}}(h\omega) \right|^2}} \right| \quad (1)$$

Para que se obtenha baixo valor para o fator k será necessário que $\dot{Z}_{\text{rede}}(h\omega) / \dot{Z}_{\text{filtro}}(h\omega) \gg 1$, ou seja que a impedância do filtro, na frequência do harmônico em questão seja bem menor que a da rede. Esta condição é conseguida com um circuito LC série, que apresenta ressonância na frequência do harmônico de ordem h. Nesta condição a impedância do filtro será mínima, com valor igual à resistência série do indutor (R_f) (fig.3).

1.2 Equacionamento do ramo do Filtro de ordem h.

Neste equacionamento simplificado, a impedância de rede será aproximada por $\dot{Z}_{\text{rede}} = jX_{L_rede}$, na frequência fundamental. A figura 3a mostra o filtro de ordem h para a frequência fundamental. A figura 3b mostra os valores das reatâncias para a frequência $h\omega$.

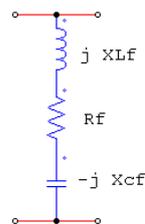


Fig. 3a. Parâmetros do filtro na frequência fundamental

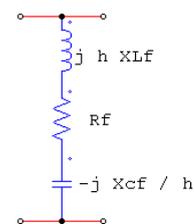


Fig. 3b. Parâmetros na frequência hω

A equação 2 mostra o valor da atenuação, a partir da equação 1, substituindo-se os valores acima adotados para os parâmetros. Como o filtro está em ressonância série para a frequência $h\omega$, tem-se $hX_{Lf} = X_{Cf} / h$, resultando em $\dot{Z}_{\text{filtro}}(h\omega) = jhX_{Lf} - jX_{Cf} / h + R_f = R_f$.

$$k = \left| \frac{\dot{I}_{\text{rede}}(h\omega)}{\dot{I}_{\text{carga}}(h\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(hX_{L_rede} / \dot{Z}_{\text{filtro}}(h\omega) \right)^2}} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + \left(hX_{L_rede} / R_f \right)^2}} \right| \quad (2)$$

Nota-se que existem infinitos pares de indutor e capacitor de filtro que apresentam ressonância série em $h\omega$. Apresentam-se a seguir algumas restrições que definem o valor do capacitor C_f do filtro. Calculando-se a impedância do filtro para a frequência fundamental obtém-se:

$$\dot{Z}_{\text{filtro}}(\omega) = jX_{L_f} - jX_{C_f} + R_f \quad (3)$$

Da condição de ressonância para a frequência $h\omega$ obtém-se:

$$hX_{L_f} = X_{C_f} / h \longrightarrow X_{L_f} = X_{C_f} / h^2 \quad (4)$$

De 3 e 4:

$$\dot{Z}_{\text{filtro}}(\omega) = jX_{C_f} / h^2 - jX_{C_f} + R_f = j(1/h^2 - 1)X_{C_f} + R_f = jX + R_f \cong jX \quad (5)$$

Como a parcela X (reatância equivalente) é muito maior que R_f , e como $(1/h^2 - 1) < 0$ pode-se afirmar que para a frequência fundamental o filtro tem comportamento capacitivo. Se a carga não linear tiver fator de defasagem menor que a unidade (comportamento indutivo), pode-se utilizar a característica capacitiva do filtro para compensar o fator de defasagem. Se a carga for formada por retificadores com filtro capacitivo, com fator de defasagem próximo da unidade, devem-se evitar baixos valores de X_{C_f} que resultariam em baixos valores para o fator de defasagem e para o fator de potência do conjunto filtro mais carga.

Assumindo-se uma corrente no filtro de I_{f_pu} para a frequência fundamental obtém-se X por:

$$|X| = V_{\text{no_minal}} / I_f = V_{\text{no_minal}} / (I_{f_pu} I_{\text{no_minal}}) = Z_{\text{base}} / I_{f_pu} \quad (6)$$

(onde $Z_{\text{base}} = V_{\text{base}} / I_{\text{base}} = V_{\text{no_minal}} / I_{\text{no_minal}}$) (6^a)

Da equação 5, a reatância equivalente X é dada por:

$$X = X_{C_f} \left(\frac{1}{h^2} - 1 \right) = X_{C_f} \frac{1 - h^2}{h^2} \quad (7)$$

Das equações 4, 6 e 7 obtém-se X_{L_f} em função da corrente I_{f_pu} :

$$X_{L_f} = \frac{X_{C_f}}{h^2} = \frac{|X|}{(h^2 - 1)} = \frac{Z_{\text{base}}}{I_{f_pu} (h^2 - 1)} \quad (8)$$

As perdas de um indutor são quantificadas pelo índice de mérito definido na eq. 9:

$$Q_f = X_{L_f} / R_f \quad (9)$$

De 8 e 9 obtém-se a resistência de perdas R_f :

$$R_f = \frac{X_{L_f}}{Q_f} = \frac{Z_{\text{base}}}{I_{f_pu} (h^2 - 1) Q_f} \quad (10)$$

A impedância de rede X_{L_rede} pode ser escrita em função da impedância de base:

$$X_{L_rede} = X_{L_rede_pu} Z_{\text{base}} \quad (11)$$

Volta-se agora ao coeficiente de atenuação k da eq. 2, substituindo-se os valores de R_f e X_{L_rede} obtidos nas eqs. 10 e 11.

$$k = \left| \frac{\dot{I}_{rede}(h\omega)}{\dot{I}_{carga}(h\omega)} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + (hX_{L_rede}/R_f)^2}} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + (h(h^2 - 1)X_{L_rede_pu} Q_f I_{f_pu})^2}} \right| \quad (12)$$

A equação 12 quantifica a atenuação do filtro de ordem h em função do índice de mérito do filtro Q_f , da impedância da rede em pu $X_{L_rede_pu}$ e da corrente fundamental no filtro I_{f_pu} . A utilização de valores de parâmetros relativos facilita a análise do filtro.

Consegue-se boa atenuação para:

- valores elevados de $X_{L_rede_pu}$, o que é inviável, por piorar a regulação da tensão no ponto de acoplamento da carga;
- valores elevados de Q_f , o que exige um indutor com baixas perdas e com custo elevado;
- valores elevados de I_{f_pu} , o que pode piorar o fator de deslocamento e consequentemente o fator de potência.

2. Atividades

2.1 Supondo uma rede com regulação de tensão de 3% ($X_{L_rede_pu} = 0.03pu$); indutor com fator de mérito de $Q_f = 10$; alimentando um retificador com filtro capacitivo com componente fundamental de corrente de 1pu (valor de pico) e alimentado por tensão de rede senoidal com valor de pico de 1pu (60Hz). Como o fator de defasagem do retificador é quase unitário, a corrente fundamental no filtro I_{f_pu} deve ser baixa. Sugere-se $I_{f_pu} = 0.1pu$.

- calcular o fator de defasagem devido à corrente de filtro adotada $I_{f_pu} = 0.1pu$. É adequado?
- Calcular o acréscimo na corrente fundamental (valor de pico) devido à inclusão do filtro. É adequado?
- Projete um filtro de 3ª harmônica, obtendo os valores do capacitor C_f , do indutor L_f e do resistor R_f (fig. 4).
- Calcular a atenuação para um filtro de terceira harmônica ($h=3$). É adequada?

2.2 Devido ao péssimo resultado obtido em 2.1 sugere-se que se repitam os itens de 2.1 utilizando-se $X_{L_rede_pu} = 0.05pu$; $Q_f = 20$; $I_{f_pu} = 0.2pu$. Notar que os 3 parâmetros foram alterados de modo a melhorar a atenuação da terceira harmônica.

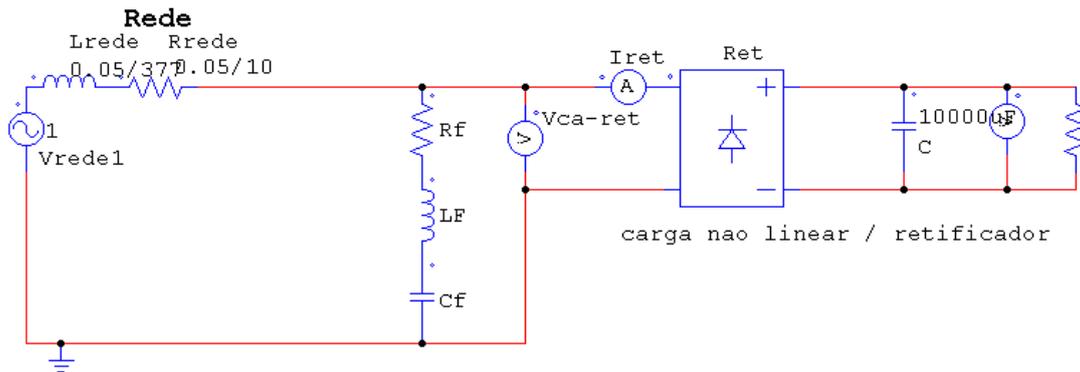


Fig. 5. Retificador com filtro capacitivo com filtro passivo

2.3 Carga sem filtro - Simular o circuito da figura 5, arquivo exp10a, que corresponde a um retificador com filtro capacitivo com componente fundamental de corrente de aproximadamente 1pu de pico. A impedância de rede é de 0.05pu (confirmar). Obtenha os espectros da corrente e tensão na entrada do retificador, preenchendo a tabela abaixo. Sugere-se utilizar a função de localização dos picos do gráfico. Se não encontrar pergunte ao professor.

I1 (pico)	I3(pico)	I5(pico)	I7(pico)	I9(pico)
V1 (pico)	V3(pico)	V5(pico)	V7(pico)	V9(pico)

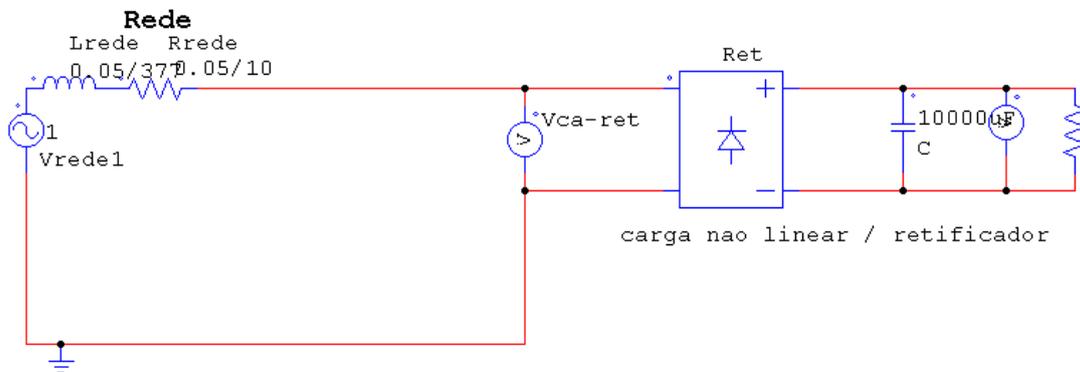


Fig. 5. Retificador com filtro capacitivo sem filtro

2.4 Carga com filtro - Simular o circuito da figura 4 , arquivo exp10b, que corresponde ao retificador com filtro de terceira harmônica. Insira os valores calculados e obtenha os espectros da corrente no filtro, corrente no retificador, corrente na rede e tensão no retificador, anotando os valores na tabela abaixo:

	N=1	N=3	N=5	N=7
Iretificador				
Ifiltro				
Irede				
V retificador CA				
Iretificador sem filtro				

- 2.5 Para o ítem 2.5 anotar em uma única página três gráficos: o primeiro com a tensão no retificador e corrente na rede, o segundo com a corrente no filtro, e o terceiro com a tensão e corrente no retificador. Aproveitando a página mostrada, exiba os espectros dos sinais acima listados.
- 2.6 Comentar o espectro da corrente no retificador, com e sem filtro. A hipótese feita, de espectro invariante com a inserção do filtro ainda é válida? O que aconteceu? Porque?
- 2.7 Comparar os valores da atenuação k obtidos via equação 12 e via simulação.
- 2.8 Simular o arquivo exp10c, onde uma carga sem filtro foi adicionada ao ramal 2. O que acontece com a corrente no filtro ao se inserir o ramal 2.

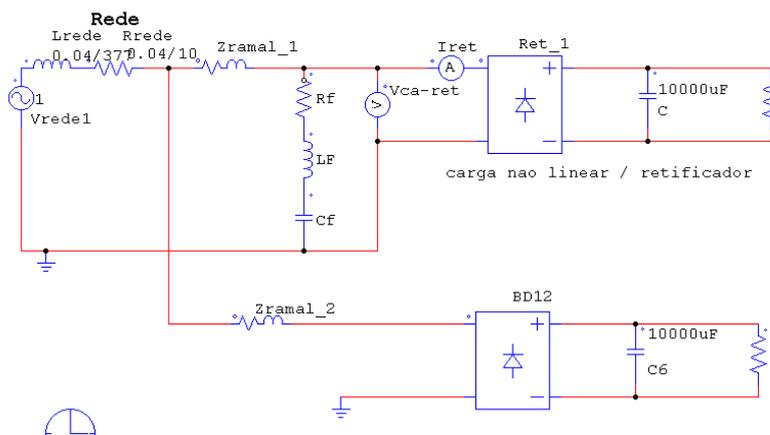


Fig. 6. Influência de outras cargas no filtro do ramal 1

2.9 Filtro de 3a e 5a harmônicas

- Projete um filtro de 3a e 5a harmônicas. Considere $X_{L_rede_pu} = 0.05pu$; $Q_f = 20$ para cada um dos indutores; $I_{f_pu} = 0.2pu$ para o filtro de terceira e $0.1pu$ para o de quinta.
- Mostre as formas de onda das correntes na rede e na carga.
- Mostre os espectros das correntes na rede e na carga.
- Calcule os valores esperados de atenuação para as duas harmônicas e compare com os valores obtidos via simulação. Funcionou?

3. Bibliografia

- [1] Thorborg K; "Power Electronics
- [2] Mohan; Undeland; "Power Electronics", 1995
- [3] Kaiser, W; "Compensador Estático de Reativos", apostila do Laboratório de Eletrônica de Potência, PEA-2502, EPUSP, 2003