

Title:

INDUSCON 2006 – Projeto de Filtro Passivo para Conexão de Conversores de Freqüência a Sistemas Elétricos de Potência

Authors:

Antonio Samuel Neto – Mestre

Francisco de Assis dos Santos Neves – Doutor

Marcelo Cabral - Doutor

Mailing address:

Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Tecnologia e Geociências

Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência

Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária

CEP: 50.740-530, Recife, PE - Brazil.

Phone:

+55 (81) 2126.8255 / 2126.8984

Fax:

+55 (81) 2126.8256

E-mail: asneto01@yahoo.com.br, fneves@ufpe.br,

Contact author:

Antonio Samuel Neto

Topic area:

4. Eletrônica de Potência e Acionamento de Máquinas

Abstract – The authors should use these guidelines for preparing the final version of their accepted paper. Additional information about procedures and guidelines for publication can be obtained directly with the chairman. The papers must be submitted to INDUSCON 2006 in Portuguese, English or Spanish. This text was written according to these guidelines.

INDUSCON 2006 - PROJETO DE FILTRO PASSIVO PARA CONEXÃO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA A SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Abstract – The authors should use these guidelines for preparing the digest of their papers. Additional information about procedures and guidelines for publication can be obtained directly with the chairman. The papers must be submitted to INDUSCON 2006 in Portuguese, English or Spanish. This text was written according to these guidelines.

Keywords - The author shall provide a maximum of 6 keywords (in alphabetical order) to help identify the major topics of the paper.

I. INTRODUÇÃO

Diversas são as possibilidades do uso de conversores de frequência para conectar um equipamento elétrico a uma fonte de energia, possibilitando o controle da tensão ou da corrente. Turbinas eólicas e painéis solares com o objetivo de geração de energia empregando conversores de frequência para a conexão à rede elétrica permite otimizar, sob diversos aspectos, o sistema de geração. A fim de possibilitar que os padrões de conformidade, confiabilidade e continuidade sejam garantidos, um filtro de harmônicos entre o conversor e a rede elétrica é necessário. A troca de energia deve ser realizada adequadamente, com o mínimo de perdas, a baixo custo e com a menor interferência possível sobre as formas de onda de tensão e corrente da rede.

Neste trabalho, são apresentadas metodologias de projeto de filtros para a conexão de conversores a sistemas de potência, sendo contempladas as topologias RL série, LCL e ressonante, de tal forma que o conteúdo harmônico das correntes permaneça em níveis aceitáveis pelas normas internacionais.

II. TOPOLOGIAS DE FILTRO ESTUDADAS

A. Filtro RL

A Figura 1 apresenta o esquema de um conversor tipo fonte de tensão (Voltage Source Converter - VSC) conectado à rede elétrica através de um filtro RL. A fim de reduzir os conteúdos harmônicos de tensão e corrente e atender aos requisitos estabelecidos por norma [1], considerando a solução mais simples, utiliza-se um filtro puramente indutivo, representado por uma indutância em série com uma resistência de baixo valor (do próprio indutor), para levar em consideração as perdas totais no filtro. Um resistor em derivação pode ser empregado para melhorar a resposta dinâmica do filtro.

Na prática, para manter uma boa dinâmica e razoável custo, volume e perdas, a indutância deve ter um valor que cause no máximo 10% de queda de tensão. Para a determinação do valor da indutância é assumindo as limitações impostas por norma e considera-se que o valor de pico do ripple da corrente, não deva exceder 40 A (cerca de

6% do pico da componente fundamental de corrente) do lado do conversor.

B. Filtro LCL

O filtro LR necessário para reduzir os conteúdos harmônicos aos valores especificados em norma para sispode se tornar bastante caro. Uma solução é utilizar um filtro LCL [4], [5], através de um criterioso projeto para a escolha dos parâmetros, devendo-se levar em conta, além dos requisitos já mencionados a frequência de ressonância do filtro, de modo a não amplificar sinais indesejáveis. A Figura 2 apresenta a topologia do filtro LCL.

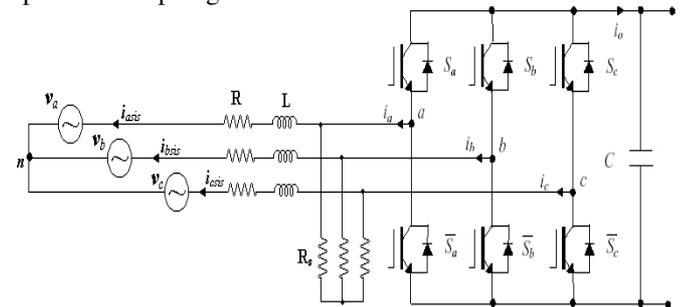


Fig. 1 - Filtro RL

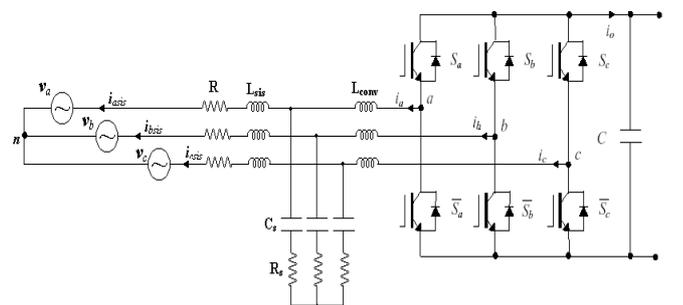


Fig. 2 - Filtro LCL

C. Filtro ressonante

O filtro LCL apresenta dois indutores em série, levando geralmente a um aumento nas perdas do sistema. Mesmo quando se considera a indutância de dispersão do lado de baixa do transformador de conexão como parte integrante do filtro, o indutor do lado do conversor pode ter alto valor, tornando o filtro volumoso, utilizando mais material para sua confecção e conseqüentemente aumentando as perdas nos elementos séries. Como alternativa para solução deste problema, pode-se usar o filtro ressonante. Sua configuração caracteriza-se pelo uso de indutores e capacitores em derivação com relação à conexão entre o conversor e o sistema elétrico. A Figura 3 apresenta a topologia do filtro ressonante com dois ramos em paralelo

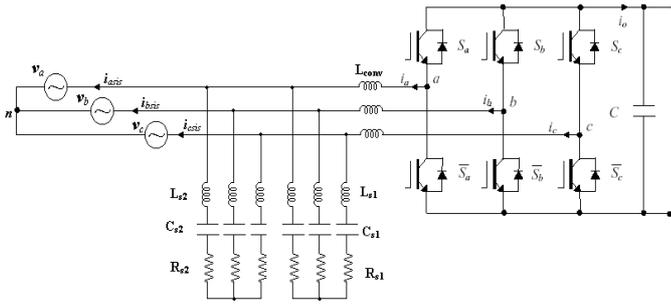


Fig. 3 - Filtro Ressonante

III. PROJETO DOS FILTROS

Para o dimensionamento dos elementos dos filtros, alguns limites devem ser impostos a fim de garantir-lhes eficiência e bom desempenho dinâmico [6].

a) O valor do capacitor, para o filtro LCL e para o filtro ressonante, é limitado por uma baixa tolerância no fator de potência;

b) A frequência de ressonância, deve ficar entre dez vezes a frequência da rede e metade da frequência de chaveamento.

c) O amortecimento deve ser dimensionado para evitar oscilações e não proporcionar altas perdas e reduzir a eficiência.

A. Projeto do filtro RL

O projeto do filtro RL baseia-se em encontrar o valor da resistência de derivação e da indutância série de tal forma a satisfazer os limites estabelecidos em normas, diminuindo o nível de THD verificado no sistema.

A indutância série de todas as topologias pode ser obtida a partir da equação 1.

$$L = \frac{E_g}{2\sqrt{6}f_s i_{ripple, peak}} \quad (1)$$

O valor da resistência em série normalmente tem baixo valor, podendo ser desprezado no projeto do filtro.

A frequência de corte do filtro deve ser escolhida pelo menos uma década abaixo da frequência de chaveamento e uma década acima da frequência da rede. Esta escolha nem sempre é possível, principalmente em aplicações de potência elevada, em que as frequências de chaveamento tendem a ser menores. A resistência shunt pode, então, ser obtida a partir da equação:

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \quad (2)$$

B. Projeto do filtro LCL

O procedimento para a escolha dos parâmetros do filtro tem como entradas a potência do conversor, a frequência da linha e a frequência de chaveamento. Assim, os valores do filtro serão consultados em % dos valores representados pelas equações 3 e 4.

$$Z_b = \frac{E_n^2}{P_n} \quad (3)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_n Z_b} \quad (4)$$

Considerando o equivalente monofásico para o filtro de harmônico h e desprezando as resistências, pode-se chegar a uma função entre a corrente do sistema elétrico e do conversor que fornece a atenuação do ripple, como pode ser visto pela equação 10.

$$\frac{i_g(h_{sw})}{i(h_{sw})} = \frac{Z_{LC}^2}{|\omega_{res}^2 - \omega_{sw}^2|} \quad (5)$$

onde: ω_{res} é frequência angular de ressonância, ω_{sw} é

frequência angular de chaveamento e $Z_{LC}^2 = \frac{1}{L_{sis} C_f}$

A atenuação introduzida pelo filtro é afetada unicamente pelo amortecimento, que tem como objetivo evitar com que o sistema entre em ressonância.

Desta forma, levando-se em consideração aos fatos exposto no presente artigo, pode-se chegar a uma metodologia de projeto para o filtro LCL, ao qual é mostrada seguir [6]:

1- Calcula-se o valor da indutância do lado do conversor, através da equação 1.

2 – Calcula-se o valor máximo do capacitor do filtro LCL.

3 – Defini-se o percentual do valor da capacitância máxima, calculada no tópico anterior, e que será usada no filtro.

4 – Relaciona-se a indutância L_{sis} com a indutância L_{conv} através do parâmetro r na equação 6 e a capacitância utilizada com a capacitância base através do parâmetro x através da equação 7.

$$L_{sis} = rL_{conv} \quad (6)$$

$$C_f = xC_b \quad (7)$$

Assim pela equação 5, utilizando as equações 6 e 7 chega-se a:

$$\frac{i_g(h_{sw})}{i(h_{sw})} = \frac{1}{|1 + r(1 - a.x)|} \quad (8)$$

Onde $a = L_{conv} C_b \omega_{sw}^2$ que é um parâmetro constante

Utiliza-se a equação 7 para obter o valor desejado da atenuação (normalmente escolhe-se 20%) e por fim é encontrado o valor de r .

5 – Pela equação 6 encontra-se o valor da indutância do lado da rede

6- Através dos dados encontrados até o momento, verifica-se a frequência de ressonância e em seguida testa-se se a mesma se encontra dentro dos limites.

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_r}{LL_g C_f}} \quad (9)$$

7 – Introduzir o amortecimento preservando as características abordadas no item “c” da seção III e verifica-se o desempenho. Se o resultado não for bom a etapa 3 deve

ser repetida considerando uma nova ação de filtragem. Se não for suficiente, a etapa 2 deve ser repetida aceitando uma potência reativa maior. No nosso caso utilizamos o valor do amortecimento como sendo igual a um terço da impedância do filtro capacitivo

C. Projeto do filtro ressonante

A seleção dos componentes e a metodologia para se avaliar os resultados da especificação do nível de THD é um processo complexo.

Na configuração ressonante os elementos do primeiro ramo de derivação L_{s1} , C_{s1} e R_{s1} e do segundo ramo de derivação L_{s2} , C_{s2} e R_{s2} são dimensionados para minimizar o efeito dos harmônicos na corrente através do filtro. Os elementos são selecionados através da frequência de ressonância do circuito através da equação 10

$$f_{ressonância} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (10)$$

Para o primeiro circuito é considerado a frequência de ressonância igual a frequência de chaveamento do conversor. No segundo circuito a frequência de ressonância é considerado o dobro da frequência de chaveamento.

Os valores máximos dos indutores L_{s1} e L_{s2} são determinados em torno de 15 a 20 % do valor de L_{conv} . Desta forma, os valores dos capacitores podem ser obtidos através da equação 10.

Os valores dos resistores são para atenuar a resposta do circuito LC. Além do mais deve-se levar em consideração as perdas incrementais e a redução na performance. Normalmente são adotados baixos valores de resistência para os dois ramos de derivação.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A partir das metodologias de projeto apresentadas, foi simulado em um sistema de geração eólico, de 1MW, as três topologias de filtro. Foi considerado uma frequência de chaveamento de 4 kHz e uma tensão fase-fase de 690 V.

A. Simulação do filtro RL

Através da metodologia adota, foi encontrado o valor da indutância de 0.51 mH e 5 Ω para o resistor de derivação.

A Figura 4 apresenta a corrente para o caso estudado, onde verificou-se o nível de THD de 3,9367 %.

B. Simulação do filtro LCL

Considerando o filtro LCL, o projeto forneceu os seguintes valores: $L_{sis} = 0.3$ mH, $L_{conv} = 0.84$ mH, $R_s = 1.5$ Ω e $C_s = 35$ μ F. Considerando uma atenuação de 20 %. A Figura 5 apresenta a forma de onda da corrente. Verificou-se que o nível de THD foi de 1,4079 %.

C. 4.2 Simulação do filtro ressonante

Para o filtro ressonante, os dados encontrados foram: $L_{conv} = 0.84$ mH, $R_{s1} = R_{s2} = 0.6$ Ω mH, $C_{s1} = 9.4$ μ F e $C_{s2} = 2.34$ μ F. A característica de segunda ordem do filtro ressonante, introduz um zero na função de transferência, a qual se cancela com o pólo.

A Figura 6 apresenta a forma de onda da corrente considerando o filtro ressonante. Verificou-se que o nível de THD foi de 1,7426 %.

V. CONCLUSÃO

Através dos resultados apresentados, pode-se observar que todas as três topologias apresentaram resultados satisfatórios. O filtro RL apresentou o maior conteúdo harmônico. Porém, esse representa a configuração mais simples e mais econômica, podendo atender aos objetivos de determinadas aplicações, onde é feita a conexão em um sistema eletricamente forte.

As topologias de filtro LCL e filtro ressonante apresentaram um nível de THD bem próximos. Deve ser destacado que a configuração de filtro LCL apresenta dois indutores em série, aumentando as perdas em série. Por outro lado, o filtro ressonante apresenta uma quantidade de elementos maior, apesar de serem de baixos valores.

Na versão final do artigo será detalhado o projeto das três topologias, exemplificando através de uma aplicação e estudo de resposta dinâmica. As funções de transferência para cada filtro serão apresentadas, passo esse, de fundamental importância para o projeto e análise dinâmica do sistema.

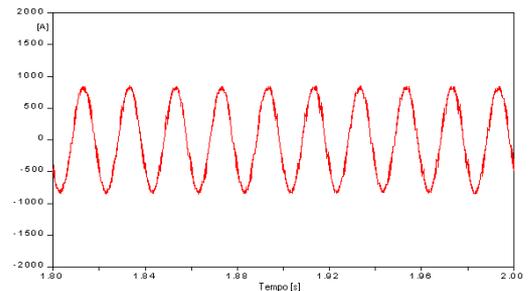


Fig. 4 - Corrente de saída do filtro RL

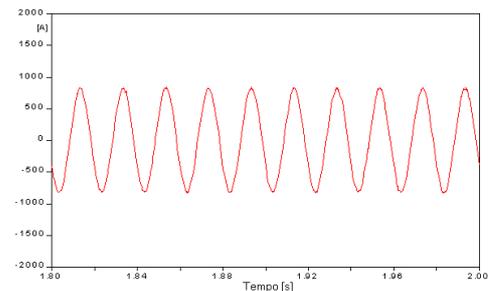


Fig. 5 - Corrente de saída do filtro LCL

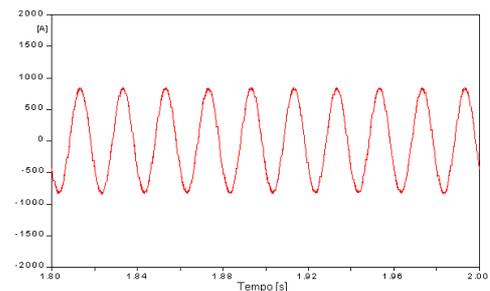


Fig. 6 - Corrente de saída do filtro ressonante