

# 1 Simulação de Filtro Ativo Shunt Aplicado em um Sistema Elétrico Aeronáutico

Analisar  
se esse  
título  
está ade-  
quado

## 1.1 Características de Filtros Ativos em Sistemas Reais

### 1.1.1 Inversores Estáticos

Idealmente considera-se que filtros ativos são compostos por fontes de tensão/correntes controladas, a qual podem fornecer tensão/corrente de maneira a acompanhar uma dada referência. A concepção dessa fonte é realizada no âmbito da realidade por meio de inversores estáticos, as quais são sistemas compostos por elementos semicondutores que por meio de um controle de comutação de alta frequência consegue criar formas de onda/corrente para uma dada referência.

#### 1.1.1.1 Tipo de Conversores

Na aplicação de um filtro ativo do tipo shunt a topologia do conversor pode ser resumida em dois tipos: Conversores baseados em fonte de tensão (VSC - *Voltage-source Converter*) e Conversores baseados em fonte de corrente (CSC - *Current-source Converter*) [1]. Para ambos os casos, o arranjo dos semicondutores é o mesmo, todavia a diferença recai no lado DC do conversor. Enquanto o VSC possui uma fonte de tensão disposta no lado DC, o CSC dispõe de uma fonte de corrente em tal posição. As figuras 1a e 1b mostram circuitos comumente empregados para sistemas VSC e CSC respectivamente.

As chaves representadas nas figura 1a e 1b são realizadas por comutadores estáticos controlados, tal como MosFets, IGBTs, GTOs e etc. Cada uma destas tecnologias possuem características distintas de modo que seu emprego depende do comportamento esperado para cada tipo de aplicações. Observa-se também a presença de diodos em antiparalelo aos semicondutores para o caso VSC. Estas estão presentes de maneira a criar um caminho de roda livre para permitir a passagem de corrente induzida por indutâncias intrínsecas das linhas de transmissão e dos filtros. A presença deste não é aplicada em CSC, entretanto este tem presente diodos de bloqueio em série às chaves semicondutoras como forma proteção [2, 3]

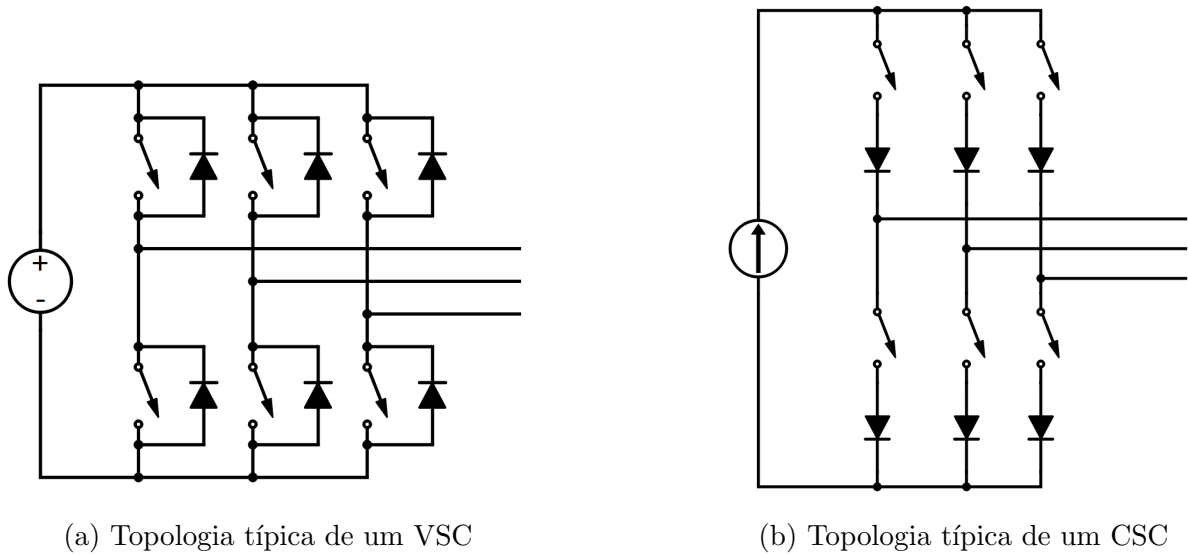


FIGURA 1 – Inversores de tensão e corrente

#### 1.1.1.2 Controle do PWM

Em ambos os casos o controle de tensão/corrente do lado AC é realizado por PWM. Este sinal é comumente gerado por um microcontrolador programado de maneira a operar a comutação dos semicondutores a fim de obter uma saída específica no lado AC. Existem dois principais tipos de controle por PWM para o comando de conversores: o de frequência fixa e variável. O primeiro tipo opera comparando um sinal de referência com um sinal periódico triangular com frequência fixa e de valor elevado para determinar a razão cíclica dos pulsos. Nesta operação a saída apresenta em seu espectro de frequência uma componente fundamental de baixo valor seguido de componentes de alta frequência provenientes da onda triangular. Com isso, o emprego de filtros com frequência de corte elevada torna a saída composta apenas pela fundamental, que corresponde ao sinal de referência da entrada do comparador. Já a operação com frequência variável tem como principal característica o controle por histerese. Nesta operação o sinal de referência é envolto por uma banda de histerese que faz com que a operação da comutação dos semicondutores mantenha o sinal de saída contido dentro desta banda. Para o melhor entendimento, a operação de controle por histerese é mostrado na Figura 2 [4].

A implementação de ambos os tipos VSC e CSC mostram-se adequadas para a aplicação em filtros ativos do tipo shunt. Todavia para o uso em sistemas aeronáuticos o conversor do tipo VSC apresenta maiores vantagens devido à maior eficiência, menor custo, menor tamanho e peso comparativamente ao CSC [1]. Já o controle PWM mais adequado e comumente encontrado na aplicação deste tipo de filtro é feito por frequência variável por histerese. Este controle no PWM faz com que o VSC se comporte com o fonte de corrente pela comparação da saída do inversor com a referência advinda do

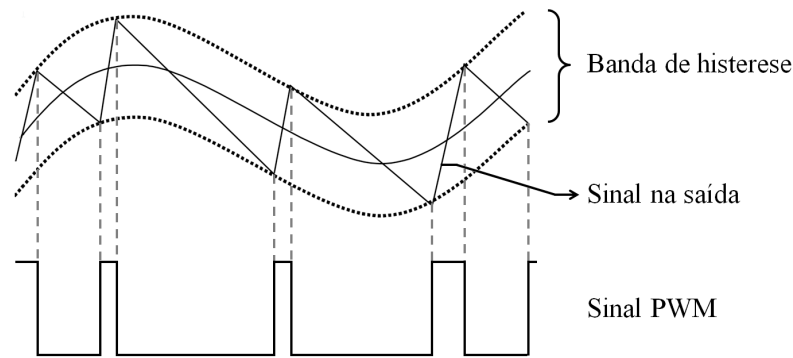


FIGURA 2 – Controle por histerese [4]

controlador. O comportamento de fonte de corrente ocorre pela adição de indutores de acoplamento na saída do conversor, de modo que o controle dos semicondutores aplique pulsos de tensão advindas do capacitor do lado DC tornando a corrente crescente ou decrescente proporcionalmente à indutância e a tensão aplicada em seus terminais. Este sinal é medido e comparado com as bandas de histerese do sinal de referência, fazendo com que a operação dos semicondutores se estabeleçam de forma a manter o sinal de saída entorno à referência.

Como forma de obter uma resposta rápida às variações do sinal de referência, a aplicação de uma alta indutância impede que a saída do conversor acompanhe adequadamente a referência caso esta apresente alta  $di/dt$ . Deste modo é desejável um valor de indutância com baixo valor na saída do conversor de modo a não limitar uma rápida variação de corrente no tempo. Todavia essa aplicação traz a implicação de tornar a corrente de saída ruidosa, trazendo o aparecimento de componentes de alta frequência nas tensões de fase do sistema. Para contornar esse problema, capacitâncias são aplicadas entre as fases como forma de de criar um caminho de baixa impedância para as componentes de alta frequência, filtrando o sinal ruidoso de alta variação no tempo. O valor dessa capacitância deve ser escolhido de maneira a atender a filtragem de corrente do conversor mas também não pode ser elevada o suficiente para aumentar a potência reativa do sistema e consequentemente diminuir o fator de potência.

O esquema do filtro com a implementação da indutância de acoplamento e das capacitâncias de filtragem de componentes de alta frequência da corrente é mostrado na Figura 3.

#### 1.1.1.3 Controle de Tensão no Lado DC

No capítulo ?? foi estudado extensivamente as propriedades e significados físicos das potências instantâneas em circuitos trifásicos. Uma importante consideração acerca da potência  $q$  é que está não contribui com a transferência de potência entre subsistemas

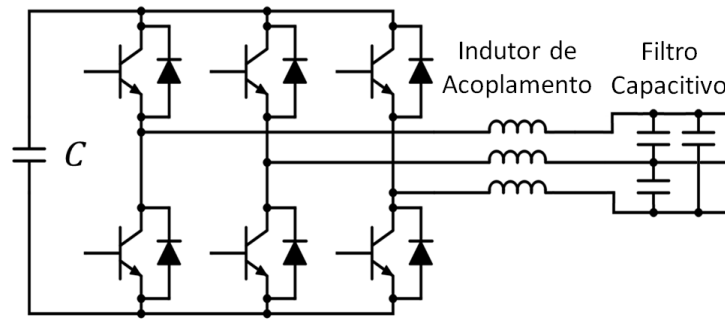


FIGURA 3 – Esquema do inversor com indutor de acoplamento e filtro capacitivo

de um circuito, sendo que esta é presente apenas sendo trocada entre as fases constituintes do sistema. Sendo assim, tem-se que tanto nos terminais da fonte, da carga e do filtro ativo o fluxo de potência reativa é nulo. A implicação que isso trás é a ausência, teoricamente, da necessidade de elementos armazenadores de energia presentes no filtro shunt. Todavia, há a necessidade de compensação da potência  $\tilde{p}$  realizada pelo filtro. Por esta apresentar-se como uma potência média, os elementos armazenadores de energia devem lidar apenas com essa parcela da potência. Sendo assim o dimensionamento do capacitor (indutor para o CSC) leva-se em consideração apenas a potência ativa oscilante [1, 5, 6].

Não confundir os elementos armazenadores de energia explanados anteriormente com os indutores de acoplamento e filtro capacitivo. Os elementos armazenadores de energia é o capacitor/indutor dispostos no lado DC do inversor.

Em se tratando de circuitos reais, os semicondutores, as linhas de transmissão e os componentes do filtro possuem resistências intrínsecas que causam a dissipação de potência ativa. Ainda existe perdas de comutação causadas pelas não idealidades de chaveamento dos elementos semicondutores. Essas perdas têm efeito na eficiência da capacidade de filtragem do compensador, visto que correspondem com a queda de tensão do capacitor dado ao valor médio de potência que este processa. Dessa maneira, existe a necessidade de controlar o fluxo de potência do filtro de modo a manter o capacitor devidamente carregado e operando com tensão específica. Para se ter essa realização, uma malha de controle é embutida no sistema do filtro de modo que a potência dissipada no filtro é determinada em função do valor da tensão do capacitor. Com isso é adicionado uma parcela de potência, denominada  $p_{loss}$ , que deve ser contabilizado no cálculo das correntes de referência de modo a manter a tensão no capacitor constante. Ainda, pelo fato de haver um atraso na resposta do compensador devido ao filtro passa baixa na separação de  $\tilde{p}$  da potência ativa  $p$ , esta malha de controle visa também compensar os efeitos que este atraso causa na tensão do capacitor. A Figura 4 mostra o esquemático do compensador com a presença da malha de controle como parte da operação do filtro ativo.

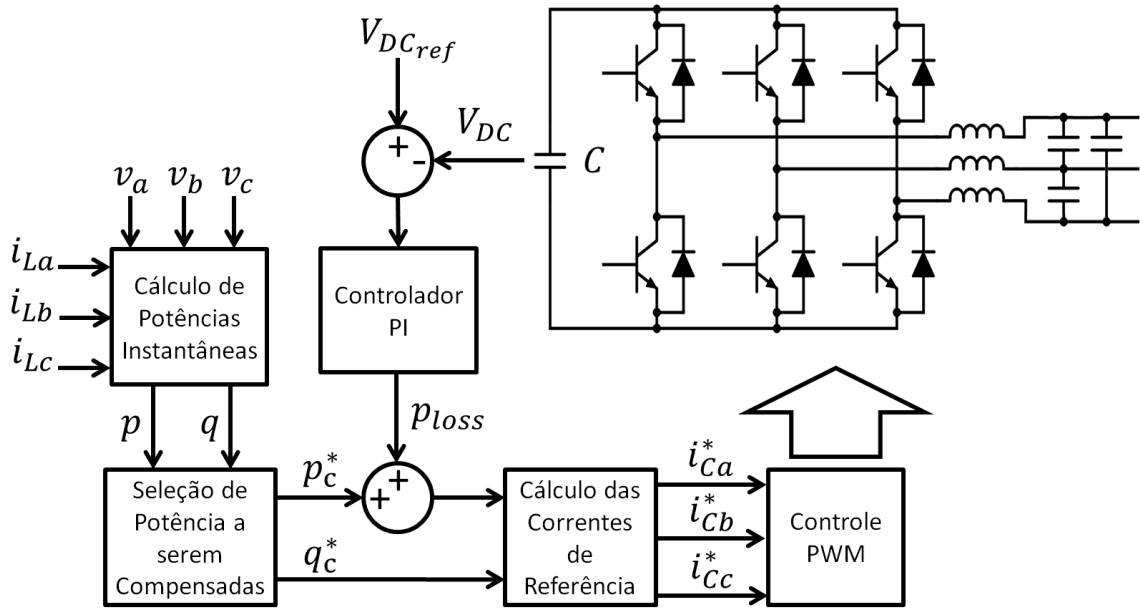


FIGURA 4 – Controle por histerese [1]

### 1.1.2 Controlador

O controlador empregado em um sistema de filtragem ativa é constituído pela unidade de processamento que opera os interruptores estáticos de maneira a propiciar a filtragem ativa das componentes harmônicas de corrente. Tais controladores são comumente formados por circuitos integrados programáveis que operam no domínio discreto. O tipo mais comum deste tipo de controlador é realizado por processador digital de sinais (DSP). Juntamente com os controladores são necessários sensores de tensão e corrente para alimentar a unidade de processamento com dados do sistema de maneira a utilizar os conceitos de potência instantânea para calcular as referências de corrente a serem aplicadas no inversor. Assim o comando por PWM dos semicondutores do inversor é realizado pelo DSP e a compensação das componentes harmônicas das correntes são eliminadas.

#### 1.1.2.1 Tipos de Controle

Em sistemas reais a concepção da filtragem ativa é proferida em redes cuja as tensões não são necessariamente senoidais puras ou balanceadas. A base teórica apresentada na seção ?? é baseada na premissa em que o sistema é realizado sem que haja distorções de tensão ou desbalanceamento entre as fases. Os sistemas elétricos reais apresentam em sua operação cargas que não contribuem de forma expressiva na distorção harmônica, sendo desnecessário a aplicação de filtros ativos para esses casos. Além disso, não há como garantir o balanceamento em todo espectro de operação. Sendo assim, algumas considerações devem ser aplicadas para contornar os efeitos das tensões das linhas previamente distor-

cidas. Segundo [1], a teoria pq mostra-se insuficiente para atender a filtragem de cargas não lineares em sistemas com tensões previamente distorcidas e satisfazer as condições de otimalidade do sistema. Tais condições são descritas por:

- Extrair apenas potência ativa constante da fonte de alimentação;
- Extrair uma corrente sinusoidal da fonte de alimentação;
- Extrair uma quantidade mínima de corrente eficaz que transportaria uma mesma potência para a carga com um mínimo de energia dissipada na rede.

Tais condições podem ser realizadas ao mesmo tempo em um sistema ideal sem que haja distorções na rede, porém esse caso não é realizável. Portanto, métodos de filtragem ativa shunt são propostas para atender pelo menos uma das condições de otimalidade.

O foco deste trabalho é exatamente a determinação de um filtro ativo para garantir a qualidade de energia em um sistema aeronáutico. Este quesito é realizado com a inserção de filtros ativos do tipo shunt para a conformização da corrente visando a ausência de distorção harmônica que traria efeitos nas tensões devido as quedas de tensão nas impedâncias da rede.

falar que o método 1 é ins-tável e que será tratado apenas o método 2

#### 1.1.2.1.1 Corrente Constante

#### 1.1.2.1.2 Detector de Sequência Positiva

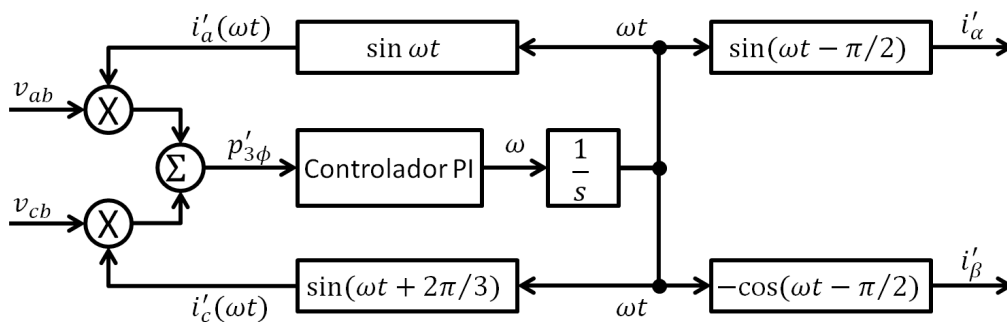


FIGURA 5 – Controle por histerese [1]

PLL

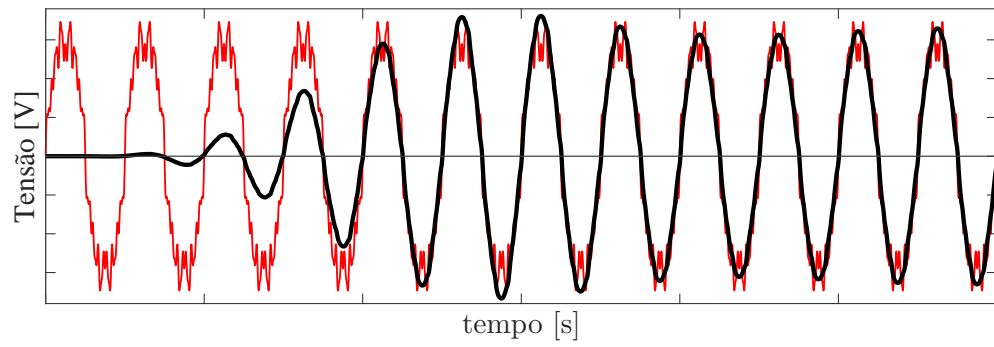


FIGURA 6 – Controle por histerese [1]

## 1.2 Simulação

### 1.2.1 Modelo do sistema

### 1.2.2 Modelo do Conversor

### 1.2.3 Resultados

## Referências Bibliográficas

- [1] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- [2] HABERBERGER, M.; FUCHS, F. W. Novel protection strategy for current interruptions in igbt current source inverters. In: IEEE. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. PESC 04*. [S.l.], 2004. v. 1, p. 558–564.
- [3] TRZYNADLOWSKI, A. M. *Introduction to Modern Power Electronics*. Third edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [4] THEKKEVALAPPIL, S. N. Master Thesis, *Hysteretic Pulse Width Modulation with Internally Generated Carrier for a Boost Dc-dc Converter*. Gainesville: University of Florida, 2005.
- [5] PENG, F. Z.; LAI, J.-S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 45, n. 1, p. 293–297, 1996.
- [6] WATANABE, E. H.; STEPHAN, R. M.; AREDES, M. New concepts of instantaneous active and reactive power in electrical systems with generic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 697–703, 1993.