



FILTROS ATIVOS SHUNT: ESTADO DA ARTE, DESAFIOS E TENDÊNCIAS

G. S. Troncha^{*1}, I. N. Santos¹, A. C. Souza¹, C. R. Azevedo. Jr¹, L. P. Moura²

¹NQEE - Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia

²FEEC – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas

Resumo – Este artigo apresenta algumas premissas e aspectos importantes relativos aos condicionadores de potência conectados em derivação, comumente conhecidos como filtros ativos *shunt*, que permitem mitigar problemas relacionados a qualidade da energia elétrica. Ao longo do texto é apresentado o princípio fundamental, uma breve contextualização do surgimento deste dispositivo, formas de classificação, aspectos da parametrização desses dispositivos e por fim as perspectivas futuras e desafios.

Palavras-Chave - Conversores eletrônicos, qualidade da energia, Filtros Ativos, princípios de operação, sistemas elétricos de potência.

SHUNT ACTIVE POWER FILTERS: STATE OF ART, CHALLENGES AND TRENDS

Abstract – This article presents some important assumptions and aspects regarding the power conditioners connected in derivation, commonly known as SAPF – Shunt Active Power Filter, that allow the mitigation of problems related to power quality. Throughout the text is presented the fundamental principles of work, a brief contextualization of the emergence of this device, forms of classification, aspects of the parametrization of this devices and finally future perspectives and challenges.

Keywords - Electronic converters, power quality, active power filters, principles of operation, Power Systems.

I. INTRODUÇÃO

Qualidade da Energia Elétrica é um conceito amplo e de suma importância para o SE - Sistema Elétrico. Dizer que um SE possui excelência no que tange ao nível da qualidade do produto que oferece, consiste em afirmar, em síntese, que a tensão de suprimento nos terminais das cargas alimentadas pelo mesmo, contém apenas a componente fundamental de tensão e com determinada faixa de magnitude e fase, sob todas as condições de operação possíveis, bem como frequência constante. Neste contexto, em virtude do crescimento da utilização de cargas de características não-lineares e/ou desequilibradas, a intensidade dos distúrbios de qualidade da

energia elétrica vem aumentando significativamente nos SEs modernos, o que causa uma preocupação, por parte dos responsáveis, em se buscar formas de mitigar os problemas correlatos [1].

Diante deste cenário e tendo em vista o avanço da eletrônica de potência, o número de condicionadores de potência eletrônicos inseridos nos sistemas elétricos vêm aumentando significativamente. Este artigo visa enfatizar os Filtros ativos *Shunt*, do inglês *SAPFs* – *Shunt Active Power Filters*. Dispositivo que evoluiu bastante nos últimos anos e chega ao contexto atual com uma eminente maturidade tecnológica.

Um SAPF tem como principal função possibilitar a compensação de correntes harmônicas, potência reativa, regulação da tensão terminal, supressão da flutuação de tensão e ainda compensação da corrente no neutro, no caso de sistemas trifásicos a quatro condutores. Esses propósitos são todos alcançados individualmente ou em combinação dependendo da aplicação, estratégia de controle e configuração do arranjo [2]. O enfoque deste documento consiste no estudo da aplicação do equipamento para redução das distorções harmônicas e compensação de reativo.

Um dos principais fatores do progresso dessa tecnologia, foi a evolução das chaves de estado sólido, que surgiram por volta de 1948 (transistor bipolar) e se popularizaram com a posterior invenção do tiristor por volta de 1958, até os dias atuais com o surgimento dos IGBTs – *Insulated Gate Bipolar Transistors*, que são considerados ideais para tal aplicação [3]. Ademais, a evolução dos *DSPs* – *Digital Signal Processors*, das ferramentas de sensoriamento por efeito *Hall* e amplificadores isolados, também contribuíram como catalisadores desse processo evolutivo [4].

Atualmente, os *SAPFs* são considerados os equipamentos mais disseminados, no âmbito da filtragem ativa. Atuam, basicamente, via injeção de correntes ditas de compensação, com a mesma magnitude e em fase oposta à corrente a ser compensada, como ilustrado nas Figuras 1 e 2. Nestas figuras, i_s é a corrente da fonte, i_c é a corrente de compensação gerada pelo dispositivo ativo e i_L é a corrente da carga. Sua eficácia depende fortemente da estratégia utilizada para cálculo e extração da corrente de referência [5-8].

O presente informe técnico compõe considerações gerais e conceituais quanto à aspectos relacionados ao tema, seguida de uma apresentação sistematizada dos princípios básicos de funcionamento de um filtro ativo em derivação. Na seção II é apresentado uma breve contextualização, a seção III descreve

*giordannitr.93@gmail.com

a classificação dos filtros ativos, a seção IV se propõe a salientar os princípios básicos de funcionamento e controle dos *SAPFs* explicitando, para tanto, a parametrização do conversor e alguns desafios práticos, e por fim, na seção V foi realizada a conclusão.

Figura 1: Diagrama Unifilar de um Filtro Ativo *Shunt* do tipo VSC [Voltage Source Converter].

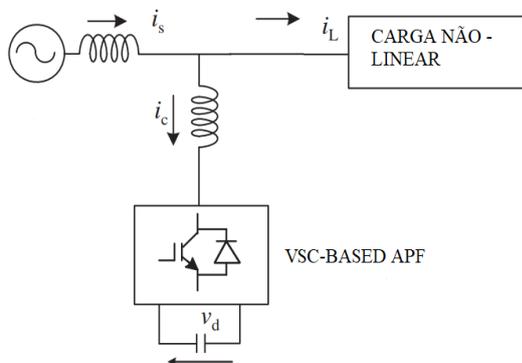
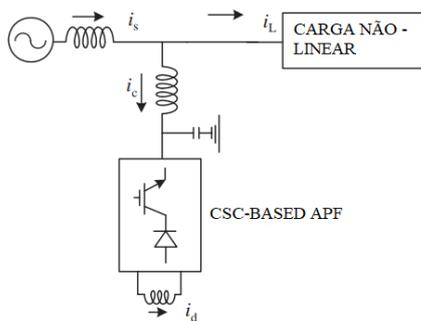


Figura 2: Diagrama Unifilar de um Filtro Ativo *Shunt* do tipo CSC [Current Source Converter].



II. CONTEXTUALIZAÇÃO

O conceito de filtragem ativa propriamente dito, foi

introduzido inicialmente por dois pesquisadores denominados Gyugyi e Striucula por volta de 1976 [9]. Atualmente, os filtros ativos não são apenas uma ficção, podem ser aplicados em diversos setores e em distintos níveis de potência. Os controles em geral permitem a determinação da corrente de referência em tempo real e forçam o conversor de potência a sintetizar a mesma, de forma eficaz [10]. Um apanhado de referências com destaque para o conhecimento da aplicabilidade, topologias, formas de controle dentre outros fatores, foi feito e ilustrado na Tabela 01, evidenciando citações de Livros, Teses, Dissertações e Artigos publicados em periódicos e anais no cenário nacional e internacional, que remetem à tecnologia sob análise.

III. CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS ATIVOS SHUNT

Quanto à classificação dos filtros ativos *shunt*, pode-se dizer que existem basicamente três categorias. A primeira remete às topologias do conversor e da fonte de suprimento. A segunda fundamenta-se nas técnicas de controle do conversor, as quais se fragmentam em técnicas no domínio do tempo e da frequência. E por fim, no que diz respeito às técnicas de modulação por largura de pulso, do inglês, *PWM - Pulse Width Modulation*, empregadas. A seguir, estas classes são expostas e comentadas.

A. Fundamentado na Topologia

Basicamente, os *SAPFs* são inversores fonte de tensão, ou seja, VSC, ou corrente, CSC, conectados em paralelo com a rede no ponto de acoplamento comum. Desta forma, a classificação via topologia pode ser subdividida em duas, no que tange ao conversor e quanto à rede ou sistema supridor.

a) Do conversor

São duas as estruturas de conversores mais utilizadas para confecção de filtros ativos conectados em paralelo. A primeira recebe o nome, do inglês, *CSC - Current Source Converter* e faz uso de um indutor (“*Buffer*”) para composição do elo CC

Tabela 1: Comparações baseadas na aplicabilidade dos Filtros Ativos Shunt.

| Topologia Usada | 1ph ou 3ph | Parâmetros de Compensação | Técnicas de Controle | Compensação da Corrente de Neutro | Problema de "Shoot-through" | Complexidade do Circuito | Complexidade do Algoritmo de Controle | Nível de Potência | Aplicações mais comuns |
|------------------------------------|------------|---------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------|--|
| VSI | Ambos | Tensão e Corrente | P-Q, SRF, Teoria do Balanço de Energia, $I_{cos\phi}$, ISCT, EPLL, 1ph P-Q, 1ph D-Q, Teoria no balanço de Energia no elo CC | Não | Sim | Baixa | Baixa | Baixo e Médio | Ponte Retificadora a Diodos / Ciclo Conversores para controle de MIs |
| CSI | Ambos | Corrente | SHE PWM | Não | Sim | Baixa | Baixa | Baixo e Médio | Drives industriais grandes / Condicionadores de ar e etc. |
| Split Capacitor | 3ph | Tensão e Corrente | P-Q, SRF, $I_{cos\phi}$, ISCT, EPLL | Sim | Sim | Média | Média | Baixo e Médio | TVs / Computador pessoal / Aparelhos comerciais |
| Inversor - 4 leg | 3ph | Tensão e Corrente | P-Q, SRF, $I_{cos\phi}$, ISCT, EPLL | Sim | Sim | Média | Média | Baixo e Médio | Fornos à arco |
| Topologia de Inversores Multinível | Ambos | Tensão e Corrente | P-Q, SRF, ISCT | Sim | Sim | Alta | Alta | Alto | Aplicações de Tração |
| IB-FB-APF | Ambos | Tensão e Corrente | P-Q, SRF | Não | Sim | Baixa | Baixa | Baixo e Médio | Fornos à arco / Drives industriais médios |

– Figura 2. Suas principais vantagens são: Tempo de vida útil elevado do dispositivo armazenador, facilidade na proteção contra faltas, possui características de um “boost” e além disso permite maior controlabilidade [11-13]. São considerados suficientemente confiáveis, no entanto possuem algumas desvantagens que causam repúdio à sua aplicação prática. Tais como, elevadas perdas de condução, exige compensação de reativo, portanto, grandes capacitores no lado CA e além disso não são indicados para aplicação em conversores multiníveis [14]. A Figura 2 elucida um SAPF desse tipo.

Já os conversores VSC – *Voltage Source Converter* – Figura 1- têm maior difusão no que diz respeito à aplicação prática e comercialização, além de serem recomendados por diversos pesquisadores [15]. Essa topologia, dispõe de um capacitor para compor o elo CC do equipamento e dentre outras vantagens, é o mais compacto, leve e passível de compor versões multiníveis [16]. A Figura 1 ilustra um SAPF dessa natureza.

Há diversas configurações de conversores avançadas sendo introduzidas pelos pesquisadores na literatura especializada. Essas configurações de inversores multiníveis, como por exemplo, os “*Inter-leaved Buck Full Bridge Inverters (IB-FB)*” vêm sendo utilizados em SAPFs para compensação de problemas de qualidade na energia em sistemas de média e alta potência. Esses conversores múltiplos elevam a confiabilidade do sistema e reduzem as perdas “*dv/dt*” nas chaves. No entanto, a complexidade dos circuitos de potência e algoritmos de controle é extremamente elevada. Existe diversas configurações multiníveis encontradas na literatura, dentre elas, tem-se: “*Flying capacitor*”, “*H-bridge*” e os multiníveis modulares [17-18].

b) Do Sistema de Potência

Geralmente, as cargas conectadas nos sistemas elétricos são comumente monofásicas e trifásicas. Estes sistemas são supridos por topologias de rede monofásica a dois condutores (1F2C), trifásica a três condutores (3F3C) e trifásica a quatro condutores (3F4C). Com isso, os filtros ativos *shunt* podem ser classificados levando-se em conta a configuração do sistema de suprimento para mitigar problemas na qualidade da energia. No caso dos APFs – *Active Power Filters* têm-se aplicação principalmente na mitigação de harmônicos de corrente e compensação de potência reativa. Além disso, elevadas correntes de neutro e tensões desequilibradas podem ser compensadas por meio de configurações trifásicas a quatro condutores (3F4C), tais como “*Split capacitor*”, “*Four-leg inverter*” e “*Three-leg H-bridge*” [19]. Desta forma, cada fase do sistema pode ser controlada independentemente em conjunto com as outras e a controlabilidade do sistema é aumentada [20].

A Figura 3 expressa um fluxograma que resume a classificação do APF baseado na estrutura do conversor e do sistema de suprimento.

B. Com base nas técnicas de Controle – Processamento de Sinal – Harmonic Extraction Technique

As técnicas de controle aplicadas em SAPFs são essenciais para o processo de compensação. A capacidade do filtro ativo em mitigar dada corrente harmônica, depende de quão preciso é o cálculo da corrente de referência. A estratégia de controle

é composta por três passos principais: A medição dos sinais de tensão e corrente, o cálculo da corrente ou tensão de referência, dependendo da estrutura física do APF e ainda o processamento desta potência via PWM, que irá gerar os pulsos gatilhando a potência do dispositivo [10]. A seguir serão enumeradas algumas técnicas em destaque na literatura para extração da corrente de referência, no domínio do tempo e da frequência.

a) Domínio do Tempo

As técnicas de controle no domínio do tempo são mais simples e fáceis de se implementar nos controladores em tempo real e possuem suas particularidades para implementação em sistemas monofásicos e trifásicos. Grande parte dos pesquisadores a nível internacional trabalham com as técnicas nesse domínio. Isto, devido à robustez, facilidade de implementação, menor número de cálculos, o que melhora o processamento computacional, entre outras vantagens. Em seguida serão elencadas algumas técnicas evidentes para o controle de SAPFs:

- *Synchronous Reference Frame (SRF) Theory*, conhecida também como Teoria d-q;
- *Unit Template Technique* ou P-I controller-based Theory;
- *Instantaneous Reactive Power Theory (IRPT)*, também conhecida como Teoria PQ ou Teoria α - β ;
- *Instantaneous Symmetrical Component (ISC) Theory*;
- *Power Balance Theory (BPT)*;
- *Neural Network Theory*;
- *Current Synchronous Detection (CSD) Method*;
- *I-Cos ϕ Algorithm*;
- *Enhanced Phase Locked Loop (EPLL)-Based Control Algorithm*;
- *Conductance-Based Control Algorithm*;
- *Adaptive Detecting Algorithm*, também conhecida como *Adaptive Interference Canceling Theory*;

b) Domínio da Frequência

No que diz respeito às técnicas no domínio da frequência, as mesmas podem ser aplicadas a sistemas monofásicos ou trifásicos. No entanto, como citado anteriormente, esse tipo de técnica requer maior tempo de cálculo e com isso maior robustez do processamento. As potências, ativa e reativa, são encontradas no domínio da frequência e posteriormente transformadas para o domínio do tempo via transformada de *wavelet*. Na sequência serão listadas algumas técnicas utilizadas para extração da corrente de referência de APFs no domínio da frequência:

- *Fourier Series theory*;
- *Discrete Fourier Transform Theory*;
- *Fast Fourier Transform Theory*;
- *Recursive Discrete Fourier Transform Theory*;
- *Kalman Filter-Based Control Algorithm*;
- *Stockwell Transformation (S-Transform) Theory*;
- *Empirical Decomposition (EMD) Transformation Theory*;

- Hilbert-Huang Transformation Theory;

Grande parte desses algoritmos de controle no domínio da frequência são usados em analisadores da qualidade da energia com bastante eficiência. Não obstante, eles são lentos para aplicações envolvendo controle em tempo real.

C. Baseado nas técnicas de Controle PWM – Processamento da Potência – Current Control Technique

A modulação por Largura de Pulso, mais conhecida como PWM influencia enormemente na eficiência do equipamento. Dado que é por meio dessa técnica que ocorre o processamento ou “desenho” da corrente a ser gerada pelo filtro. Esse processo é constituído da seguinte maneira. A técnica PWM gera pulsos, que por sua vez gatilham as chaves do conversor e com isso controlam o fluxo de corrente de compensação que deve passar pelas chaves semicondutoras.

A seguir serão apresentadas algumas técnicas que recebem maior destaque para essa finalidade:

- Sinusoidal PWM Technique (SPWM);
- Space Vector PWM Technique (SVPWM);
- Dynamic Hysteresis Band Current Controller (DHCC);
- Single Band Hysteresis Current Controller (SBHCC);
- Deadbeat Controller Technique;
- Sliding Mode PWM, etc.

IV. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DE FUNCIONAMENTO E DESAFIOS

A. Princípios fundamentais para o projeto de um Filtro Ativo Shunt Genérico

De forma a facilitar o entendimento e otimizar o espaço, são demonstrados os princípios básicos de um SAPF por intermédio de um exemplo.

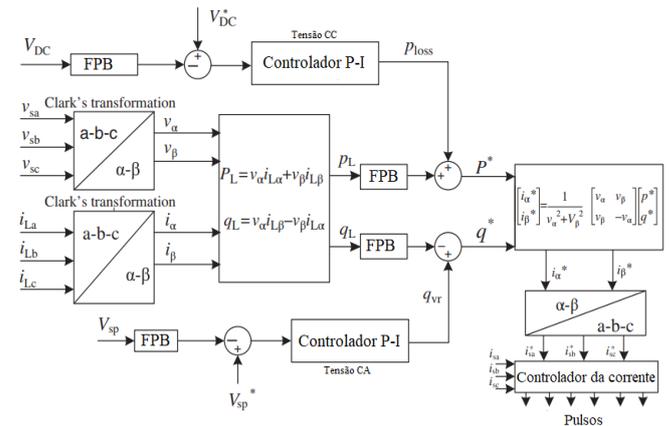
Em um primeiro momento deve-se escolher o tipo de conversor e a respectiva topologia a ser utilizada. Para esse exemplo, será utilizado um conversor VSC no modo “split-capacitor”. Em seguida, faz-se necessário definir a estratégia de controle a ser empregada. Para tanto, serão escolhidas as seguintes técnicas para comporem as duas parcelas

fundamentais do controle do APF. Para extrair a corrente harmônica ou processar o sinal, será utilizado o algoritmo de controle baseado na teoria PQ, dado que já tem bastante validação internacional e vem se destacando desde quando foi concebida no âmbito do controle de condicionadores de energia. Para o processamento da potência será utilizada uma técnica denominada HBCC – Hysteresis Band Current Controller, a qual também é bastante difundida para tal aplicação.

a) Controle do SAPF

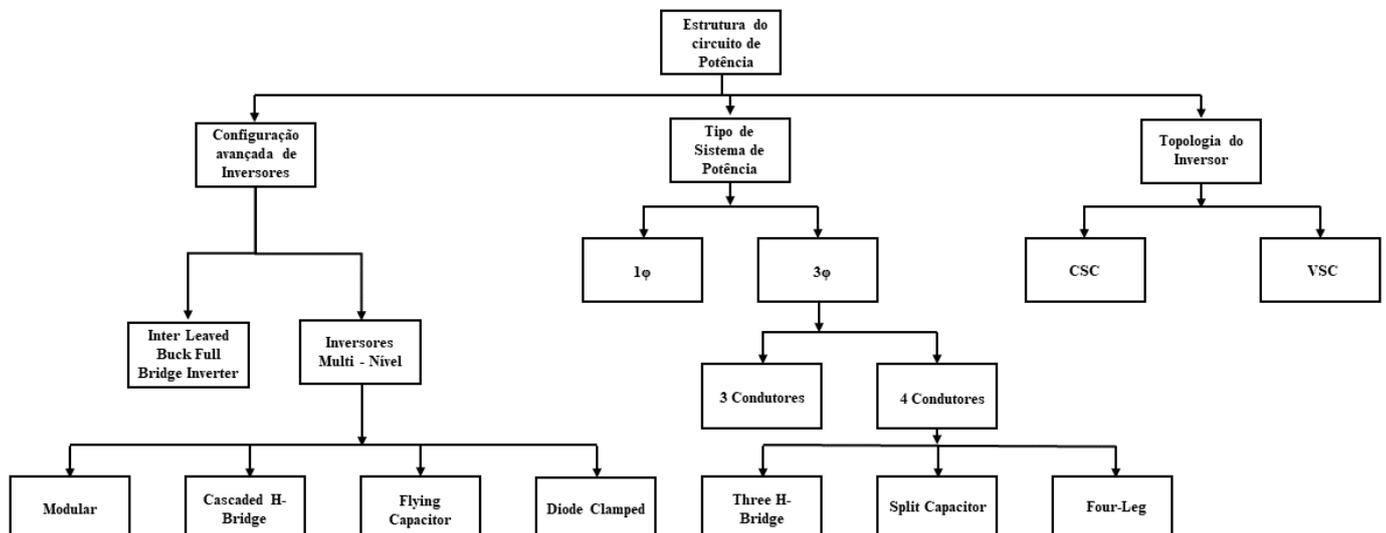
i. HCET – Harmonic Current Extraction Technique

Figura 4: Técnica para extração da corrente de referência [21].



Basicamente, a teoria PQ define duas potências, denominadas pelos idealizadores como real e imaginária. Isto se dá, a partir das tensões e correntes mensuradas no PAC – Ponto de Acoplamento Comum que são transformadas, utilizando a transformada de Clarke, para um plano de referência estacionário denominado plano α - β . Contudo, algumas nuances são realizadas no algoritmo de controle dos APFs para cálculo das correntes de referência. Isto se dá, levando em consideração quatro variáveis básicas. São elas: As tensões e correntes no plano α - β , a potência p^* (que corresponde à parcela oscilatória da potência real, distorções harmônicas, somado a uma parcela p_{loss} que representa as perdas de chaveamento e controle do elo CC) e a potência q^* (que corresponde à parcela oscilatória da potência imaginária,

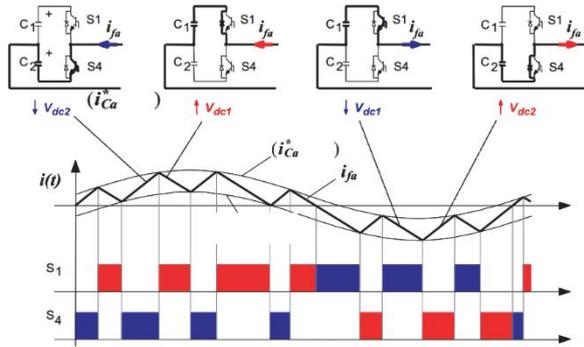
Figura 3: Classificação do SAPF com base na estrutura da rede e do conversor.



distorções harmônicas, somada a uma parcela de reativo q_{vr} a ser compensada pelo equipamento). De posse desses valores, obtém-se as correntes i_a e i_b e em consequente basta realizar a transformação inversa de Clarke para obtenção das correntes de referência I^*_{sa} , I^*_{sb} e I^*_{sc} no domínio abc [21].

ii. DHBCC – PWM

Figura 5: Dynamic Hysteresis Band Current Control [22].



O controle, *Hysteresis Band*, para conversores VSC é descrito na Figura 5 [22]. O mesmo se difere da técnica usual denominada *Fixed Hysteresis Band* devido ao fato de que é adicionado aos dois limites, superior e inferior, um nível de “offset” dinâmico ε , o qual é determinado para equalizar a tensão nos capacitores, no caso da topologia “split-capacitor”.

$$\begin{cases} \text{Limite Superior} = i_{CK} + \Delta(1 + \varepsilon) \\ \text{Limite Inferior} = i_{CK} - \Delta(1 - \varepsilon) \end{cases}$$

Onde, i_{CK} ($K = a, b, c$) são as correntes de referência instantâneas provenientes do controlador do filtro ativo e Δ corresponde a um valor fixo de meia banda da histerese. Portanto, o sinal ε ($-1 \leq \varepsilon \leq 1$) modifica dinamicamente os limites da banda de histerese de acordo com as correntes de referência, porém não altera o valor final que é 2Δ , para mudar os tempos de chaveamento da seguinte maneira:

$$\begin{cases} \varepsilon > 0 = V_{dc1} \text{ eleva e } V_{dc2} \text{ decai} \\ \varepsilon < 0 = V_{dc2} \text{ eleva e } V_{dc1} \text{ decai} \end{cases}$$

Tabela 2: Condições de variação das tensões nos capacitores C1 e C2

| | |
|---|-------------------------|
| $i_{fk} > 0$ e $\frac{di_{fk}}{dt} < 0$ | Elevação de V_{dc1} |
| $i_{fk} < 0$ e $\frac{di_{fk}}{dt} < 0$ | Decaimento de V_{dc1} |
| $i_{fk} < 0$ e $\frac{di_{fk}}{dt} > 0$ | Elevação de V_{dc2} |
| $i_{fk} > 0$ e $\frac{di_{fk}}{dt} > 0$ | Decaimento de V_{dc2} |

b) Parametrização do Conversor

Um importante aspecto, que merece destaque especial na construção de um APF é a metodologia de escolha da frequência de chaveamento. Primeiramente, é necessário conhecer a maior ordem harmônica que se deseja eliminar, denominada de “ m_h ” [23]. A capacidade de filtragem requerida do APF, pode então ser definida, como:

$$f_{af} = m_h \cdot f_s \quad (1)$$

Onde f_s constitui a frequência fundamental do sistema supridor. Se a frequência f_{af} é maior que a máxima frequência de chaveamento do filtro, é impossível se controlar as correntes de linha do APF, consequentemente as harmônicas não serão totalmente compensadas. A máxima frequência de chaveamento f_{maxAPF} determina a capacidade de filtragem do filtro ativo por meio da relação ($2 \cdot f_{af} < f_{maxAPF} \leq 10 \cdot f_{af}$). O limite inferior da equação resulta quando o aspecto limitante é o dispositivo semiconductor, enquanto que o superior é usado em APFs de baixa potência que utilizam de dispositivos, como IGBTs e MOSFETs que possuem maior “range” de frequência de chaveamento. No caso de conversores VSC, a frequência de chaveamento f_{maxAPF} depende da potência requerida ao inversor. Geralmente, essa potência claramente limita o máximo valor da frequência f_{VSC} . Para ultrapassar esse limite, os inversores típicos são substituídos por topologias avançadas de conversores multiníveis.

A seguir serão exibidas as equações para parametrização do conversor [24]:

- **Tensão no elo de corrente contínua - CC:**

$$V_{cc} = 2\sqrt{2}V_{LL}/\sqrt{3}m \quad (2)$$

Onde:

m - índice de modulação.

V_{LL} - Tensão de linha.

- **Capacitor do elo de corrente contínua - CC:**

$$0.5C_{cc}[V_{CC}^2 - V_{CC1}^2] = 3V_{LN}(aI)t \quad (3)$$

Onde:

V_{CC} - Tensão no elo CC.

V_{CC1} - Nível de tensão mínimo no barramento CC.

a - Fator de sobrecarga

V_{LN} - Tensão de fase do sistema

I - Corrente de fase do conversor

t - Tempo em que a tensão no elo CC leva para se restabelecer.

- **Indutor de Alisamento do lado de corrente alternada - CA:**

A escolha do indutor de alisamento depende do “ripple” da corrente I_{crpp} , que é uma parcela da corrente do conversor (Em torno de 15%).

$$L_f = \sqrt{3}mV_{CC}/(12af_s I_{crpp}) \quad (4)$$

- **Classe de tensão dos IGBTs:**

$$V_{sw} = V_{CC} + V_d \quad (5)$$

Onde:

V_d - 10% de “overshoot” na tensão do elo CC sob condições dinâmicas de funcionamento.

- **Classe de Corrente dos IGBTs:**

$$I_w = 1.25(I_{CR} + I_{SP}) \quad (6)$$

Onde:

I_{SP} e I_{CR} são os valores da corrente do APF e valor de ripple permissível para a corrente, respectivamente.

- **Filtro de “Ripple”**

Um filtro passa-baixa de primeira ordem é ajustado em 0.5. f_{af} é usado para filtrar ruídos de alta-frequência da corrente de compensação e da tensão do PAC.

B. Desafios Práticos e Tendências Futuras

Com a crescente inserção de Parques Eólicos e Fazendas Fotovoltaicas nos sistemas de potência, além de outras tecnologias, como por exemplo uso de elos de transmissão em corrente contínua e ASDs – *Adjustable Speed Drives*, os problemas relacionados à qualidade da energia elétrica, que antes eram mais incisivos e nocivos em baixa e média tensão, se tornam cada dia mais iminentes na rede básica. Por essa razão é necessário buscar formas de minimiza-los. Os filtros ativos estão em constante evolução juntamente com os dispositivos eletrônicos e se apresentam em um caminho promissor para aplicações desta natureza, no entanto, para tais aplicações existem alguns fatores limitantes, tais como: Necessidade de se elevar a frequência de chaveamento, o que causa maior perda nos semicondutores; Deve-se aumentar os elementos usados como “*Buffers*”, ou seja, indutores e capacitores, como elementos armazenadores; Necessidade de se aumentar a frequência de amostragem, o que acarretaria maior tempo de execução do algoritmo de controle; Além de serem indispensáveis os conversores especiais denominados multiníveis, os quais são extremamente onerosos e complexos de se projetar.

Uma possível solução para esses limitantes é utilizar os denominados filtros híbridos, que mesclam a tecnologia ativa e passiva, o que pode otimizar custos e viabiliza a aplicação de APFs na média e alta tensão.

V. CONCLUSÕES

À luz das considerações realizadas, fica evidente a importância e relevância dos SAPFs, além da riqueza de conteúdo disponível neste tocante. Entretanto, é fato que esta tecnologia ainda tem muito para evoluir e ampliar os horizontes de aplicabilidade. Em assim sendo, é necessário que surjam cada vez mais pesquisas para o oferecimento de efetivas contribuições no que diz respeito a utilização de filtros ativos nos sistemas elétricos, melhoria da tecnologia e avanços na aplicabilidade, levando à um consequente melhoramento da qualidade da energia elétrica entregue como insumo ao consumidor final.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao suporte financeiro concedido pelo CNPq, FAPEMIG e Grupo NEOENERGIA.

REFERÊNCIAS

[1] H. K.M. Paredes, D. I. Brandão, E. V. Liberado, F. P. Marafão, “Compensação ativa paralela baseada na teoria de potência conservativa”, *Eletrôn., Potên., Campo Grande*, v. 17, n. 1, p. 409-418, dez. 2011/fev. 2012

[2] ABB Power Systems (1988) Harmonic Currents and Static VAR Systems, Information NR500-015E, pp. 1-13.

[3] Ewald L. M. Mehl, “Fontes chaveadas”, *Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Curitiba, Paraná*.

[4] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, J. R. Buck, “Discrete-time signal processing”, 2nd edition, Upper Saddle River, NJ 07458.

[5] R. Guzman, L. G. de Vicuña, J. Morales, M. Castilla, and J. Miret, “Model-based control for a three-phase shunt active power filter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 7, pp. 3998-4007, July 2016.

[6] M. Badoni, A. Singh, and B. Singh, “Adaptive recursive inverse-based control algorithm for shunt active power filter,” *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 5, pp. 1053-1064, April 2016.

[7] R. Panigrahi, B. Subudhi, and P. C. Panda, “A robust LQG servo control strategy of shunt-active power filter for power quality enhancement,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 4, pp. 2860-2869, April 2016.

[8] M. B. Ketzner and C. B. Jacobina, “Virtual flux sensorless control for shunt active power filters with quasi-resonant compensators,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 7, pp. 4818-4830, July 2016.

[9] L. Gyugyi and E. C. Strycula, “Active ac Power Filters”, in *Proceedings of IEEE industry Applications Annual Meeting*, vol. 19-C 1976, pp.529-535.

[10] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007.

[11] H.F. Bilgin, M. Ermis, K.N. Kose, et al., “Reactive power compensation of coal mining excavators by using a new-generation STATCOM”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 1, pp. 97-100, 2007.

[12] H.F. Bilgin and M. Ermis, “Design and implementation of a current-source converter for use in industrial applications of DSTATCOM”, *IEEE Trans. Power. Electron.*, vol. 25, no. 8, pp. 1943-1957, 2010.

[13] H.F. Bilgin and M. Ermis, “Current source converter based STATCOM: operating principles, design and field performance”, *Electric. Power Syst. Res.*, vol 81, pp. 478-487, 2011.

[14] Bhim Singh, Ambrish Chandra and Kamal Al-Haddad, “Power Quality Problems and Mitigation Techniques”, *First Edition John Wiley & Sons, Ltd.* Published 2015 – pg. 398-399.

[15] B. Singh, P. Jayaprakash and D. P. Kothari, “Three-Leg VSC integrated with T connected transformer as three-phase four-re DSTATCOM for power quality improvement” *Int. J. Electr. Power Componen. Syst.*, vol. 37, no. 8, pp. 817-831, 2008.

[16] Bhim Singh, Ambrish Chandra and Kamal Al-Haddad, “Power Quality Problems and Mitigation Techniques”, *First Edition John Wiley & Sons, Ltd.* Published 2015 – pg. 399-400.

[17] S. Srikanth and M. K. Mishra, “DC capacitor voltage equalization in neutral clamped inverters for DSTATCOM application”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vo. 57, no. 8, pp. 2768-2775, 2010.

[18] Q. Qi, C. Yu, C. K. Wai and Y. Ni, “Modeling and simulation of a STATCOM system based on 3-level NPC inverter using dynamic phasors”, *IEEE Power Eng., Soci., Gen., Meet.*, Denver, CO, vol. 2, pp. 1559-1564, 10, 2004.

[19] O. Mahela and G. S. Abdul “Topological aspects of power quality improvement techniques: A comprehensive overview,” *Ren. And Sus. Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1129-1142, 2016.

[20] T. Zaveri, B. Bhalja and N. Zaveri, “Comparasion of control strategies for DSTATCOM in three-phase, four-wire distribution system for power quality improvement under various source voltage and load conditions”, *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, pp. 582-594, 2012.

[21] D. P. Suthar, S. N. Pandya, R. P. Keshawala, “Comparison of diferente control strategies for shunt active power filter”, *IEEE 2018*, Morbi, India.

[22] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007, pg. 184-186.

[23] X. Lu, K.L.V. Iyer, K. Mukherjee and N.C. Kar, “A wavelet/PSO based voltage regulation scheme and suitability analysis of cooper and aluminum-rotor induction machines for distributed wind power generation”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-0, no. 3, pp. 625-630, May/June 1984.

[24] Bhim Singh, Ambrish Chandra and Kamal Al-Haddad, “Power Quality Problems and Mitigation Techniques”, *First Edition John Wiley & Sons, Ltd.* Published 2015 – pg. 413-415.