



TÍTULO: Modelagem e Controle de um Filtro Ativo de Potência Shunt (FAP)

Alunos: Krislene Ferreira Badico, Lucas Bonifácio Firmino, Matheus Lessa Monteiro Cunha; Prof. Orientador: Dalmo Cardoso da Silva Júnior

Linha de pesquisa: Eletrônica de Potência e Sistemas de Energia Elétrica

RESUMO

Este artigo trata da integração de um Filtro Ativo de Potência Shunt (SAPF) à rede de energia elétrica e uma carga não linear (normalmente retificador). A intenção é testar o sistema de controle em condições mais próximas da realidade do SAPF e da rede elétrica. Os resultados mostram a capacidade de compensação de carga (corrente harmônica e compensação de potência reativa), por meio do conversor de interface. A metodologia de controle proposta torna o sistema capaz de compensar potência reativa e correntes harmônicas consumidas pela carga, tornando o nível de distorção no Ponto de Acoplamento Comum (PCC) aceitável, conforme IEEE 519. O sistema de controle foi implementado em simulação no software MatLab, juntamente com o sistema elétrico.

Palavras-chave: Filtro ativo de potência, Conversor fonte de tensão, modelagem e controle de conversores, eletrônica de potência.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de produção e a globalização fizeram com que os consumidores industriais e residenciais aumentassem o número de cargas não lineares conectadas ao sistema elétrico de distribuição (GHETTI, 2010). Esses consumidores são, em sua grande maioria, os responsáveis por injetar potência

reativa e harmônicos na rede. Na maioria das vezes a injeção de potência reativa e harmônicas ocorre devido às características das cargas que estão presentes no sistema elétrico de distribuição, tipicamente cargas não lineares, conforme comentado (FURTADO, 2015). A dinâmica dessas cargas pode causar contingências na rede elétrica, como redução do fluxo de potência ativa, ressonância no banco de capacitores, redução do fator de potência, entre outros, causando problemas em dispositivos eletrônicos (RANAWEERA, 2015).

Nesse contexto, um Filtro Ativo de Energia Shunt (SAPF) pode contribuir para a melhoria da qualidade de energia no Ponto de Acoplamento Comum (PCC), resolvendo alguns dos problemas mais comuns, como regulação de frequência, balanceamento de carga, redução de demanda de pico e mitigação correntes harmônicas. A conexão de um SAPF à rede elétrica geralmente é feita na rede de distribuição, onde se encontram os consumidores industriais e residenciais. De acordo com o Akagi, Watanabe e Aredes (2017), este dispositivo eletrônico é uma realidade e existem vários tipos de SAPFs em operação ao redor do mundo.

O SAPF é um conversor estático controlado para sintetizar correntes harmônicas e cancelar as correntes da carga não linear (GHETTI, 2010). Neste trabalho, o sistema de controle determina em tempo real a referência da corrente de compensação necessária para que o conversor sintetize (AKAGI et al, 2017). Assim, a filtragem ativa pode ser seletiva e adaptativa. Em outras palavras, um SAPF pode compensar a corrente harmônica de uma carga não linear e pode rastrear, continuamente, mudanças em seu conteúdo harmônico (MONTEIRO, 2003).

Neste cenário, os filtros ativos de potência têm ganhado destaque devido aos contínuos avanços na tecnologia de semicondutores e a disponibilidade de interruptores de alta potência e alta frequência, que têm proporcionado um cenário promissor para a utilização de conversores estáticos na conversão de energia elétrica e na interface com o sistema elétrico de potência.

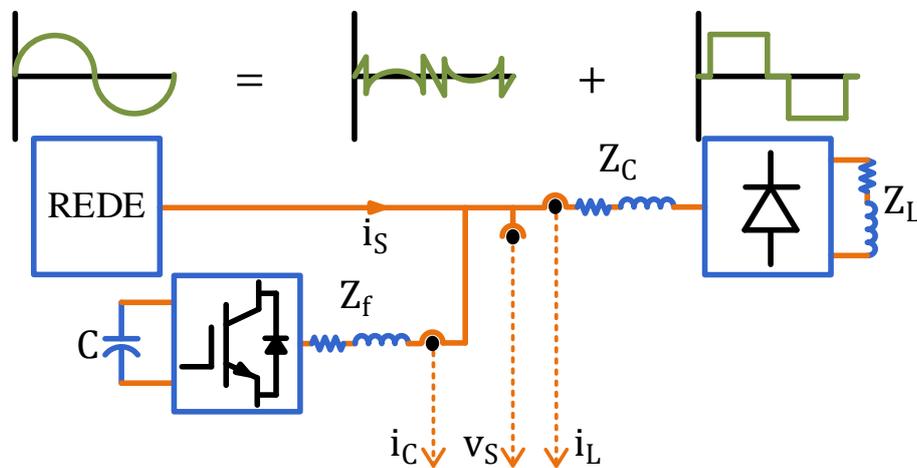
Finalmente, este artigo tem como objetivo mostrar uma compensação dinâmica (mudanças não lineares de carga) de potência reativa e correntes harmônicas no PCC. Este artigo está organizado da seguinte forma: A seção 2 descreve o referencial teórico. A seção 3 apresenta os esquemas de modelagem e controle. Na seção 4, os resultados e discussões da simulação podem ser observados. Finalmente, a seção 5 aborda as conclusões deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA (FAP)

O sistema estudado é visto na Figura 1, constituído por uma carga não linear que é alimentada por uma rede elétrica trifásica. Conforme mencionado, esta carga causa um fluxo de corrente harmônico. Assim, um conversor de interface CC-CA é inserido em paralelo com o modelo da rede para fazer uma compensação de potência reativa e corrente harmônica. Este conversor CC-CA atua como o filtro ativo shunt.

Figura 1: Esquema de conexão do FAP à rede elétrica com conversor estático.



FONTE: O autor

Para a conexão do FAP à rede elétrica foi utilizado o conversor CC-CA, também conhecido como inversor. O esquema de conexão de um FAP à rede elétrica é observado na Figura 1. O conversor CC-CA utilizado foi a topologia trifásica, três fio, dois níveis e a sua estrutura será abordada na Seção 2.2.

2.2 CONVERSORES FONTE DE TENSÃO CC-CA

Os conversores CC-CA, também conhecidos como inversores, têm como função, converter a tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA, com amplitude e frequência desejada (RASHID, 2014). De acordo com AHMED (2000, p. 350), “Os inversores são circuitos estáticos (isto é, não têm partes móveis) que convertem

potência CC em potência CA com a frequência e tensão ou corrente de saída desejada”.

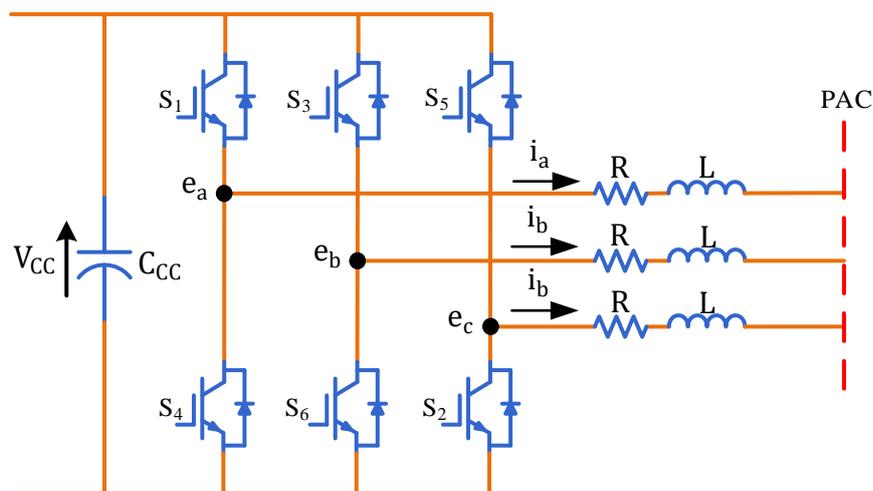
Os inversores podem ser monofásicos ou trifásicos. O último é o objetivo do presente trabalho. “A maioria das aplicações de inversores requerem algum modo de controle, seja por tensão e/ou por corrente da saída CA. Vários métodos usados para isso podem ser classificados em três grandes categorias” (AHMED, 2000, p. 363).

- Controle da tensão de entrada CC, fornecida para o inversor;
- Controle da tensão de saída CA do inversor;
- Controle da corrente de saída do inversor. (objetivo do trabalho)

“O circuito do inversor trifásico muda a tensão de entrada CC para uma tensão de saída variável trifásica de frequência desejável. A tensão CC pode ser obtida de uma fonte CC (renovável em sua grande maioria) ou de uma tensão CA retificada” (AHMED, 2000, p. 376). No presente trabalho, o inversor trifásico recebe tensão CC retificada (retificador trifásico) do grupo motor gerador.

Em aplicações de alta potência, como as redes de distribuição, normalmente, utilizam-se os inversores trifásicos. O presente trabalho utilizou um inversor trifásico estático controlado no modo de corrente, constituído de seis dispositivos chaveados, sendo dois desses para cada braço ou dois por cada fase (Figura 2).

Figura 2: Conversor CC-CA trifásico, três fios e dois níveis.



FONTE: O autor

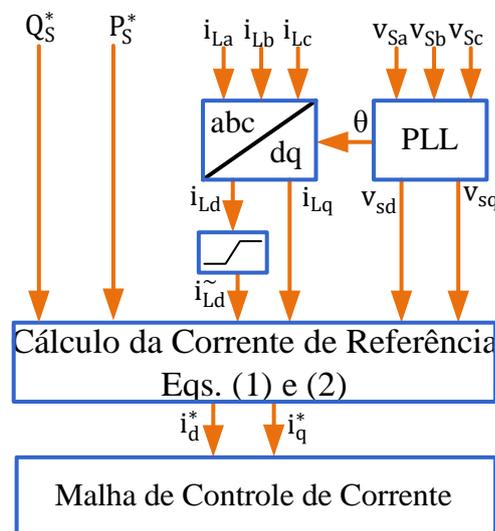
“A modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*, PWM) é o método mais comum para controlar a tensão e ou a corrente de saída do conversor. Nela, a tensão de saída é uma onda modulada por largura de pulso, controlada pela variação da duração dos pulsos” (AHMED, 2000, p. 365).

O presente trabalho utilizou a modulação por largura de pulso. O objetivo da modulação, além de controlar a corrente de saída, é eliminar ou reduzir os conteúdos harmônicos.

2.2 CÁLCULO DAS CORRENTES DE REFERÊNCIA

Várias teorias e técnicas de potência foram desenvolvidas para a Técnica de Extração de Corrente Harmônica (TECH). Os mais importantes e comuns são a Teoria P-Q, Teoria de Vetor Cruzado, Teoria de Potência Instantânea Usando o Quadro de Referência Rotativo P-Q-R, SRF, Técnica de Cancelamento de Interferência Adaptativa e Controle de Tensão do Capacitor (KAMAL et al, 2014). Neste trabalho, foi utilizada a técnica SRF, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3: Cálculo das correntes de referência



FONTE: O autor

Nesta técnica, as correntes de carga são transformadas do referencial estacionário trifásico para o referencial rotativo síncrono dq, por uma transformação de Park. Os componentes das correntes i_{Ld} e i_{Lq} representam os componentes de

potência ativa e reativa da corrente de carga, respectivamente. O componente atual i_{Ld} pode ser decomposto em:

$$i_{Ld} = \overline{i_{Ld}} + \widetilde{i_{Ld}} \quad (1)$$

onde i_{Ld} médio é o componente fundamental da corrente ativa, enquanto i_{Ld} oscilante é o componente da corrente ativa dos harmônicos. Um filtro passa-alta é usado para extrair o componente oscilante. Finalmente, para o cálculo das correntes de referência, (2) e (3) são usados.

$$i_d^* = \frac{3v_{sd}}{2P_s^*} + \widetilde{i_{Ld}} \quad (2)$$

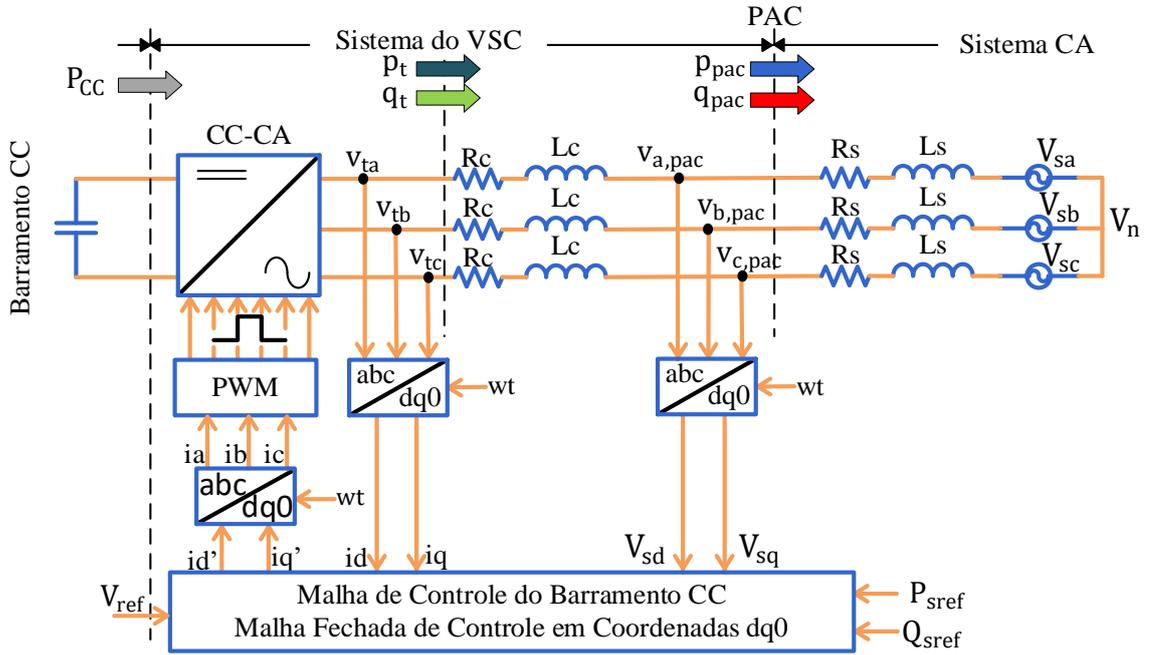
$$i_q^* = \frac{-3v_{sd}}{2Q_s^*} + i_{Lq} \quad (3)$$

onde Q_s é a referência de potência reativa, P_s é a referência de potência ativa e v_{sd} é um componente de tensão "d" no PCC.

3 METODOLOGIA

Na operação do conversor fonte de tensão, (do inglês, *Voltage-Sourced Converter*, VSC) existe a possibilidade de controle da potência ativa e reativa que fluem pelo VSC. Uma das estratégias utilizadas é conhecida como controle no modo de corrente (do inglês, *Current-Mode Control*, CMC). Neste modo, as potências injetadas na rede elétrica são controladas pela amplitude e fase das correntes sintetizadas em relação à tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Este modo de controle será estudado nesta seção. A modelagem foi baseada em Yazdani e Iravani (2010).

Figura 4: Visão geral do controlador de corrente associado à rede elétrica



FONTE: O autor

De acordo com a Figura 4, observa-se que a dinâmica do lado CA é determinada conforme as equações abaixo:

$$L_f \frac{di_a}{dt} = -R_f i_a + V_{ta} - V_{sa} \quad (4)$$

$$L_f \frac{di_b}{dt} = -R_f i_b + V_{tb} - V_{sb} \quad (5)$$

$$L_f \frac{di_c}{dt} = -R_f i_c + V_{tc} - V_{sc} \quad (6)$$

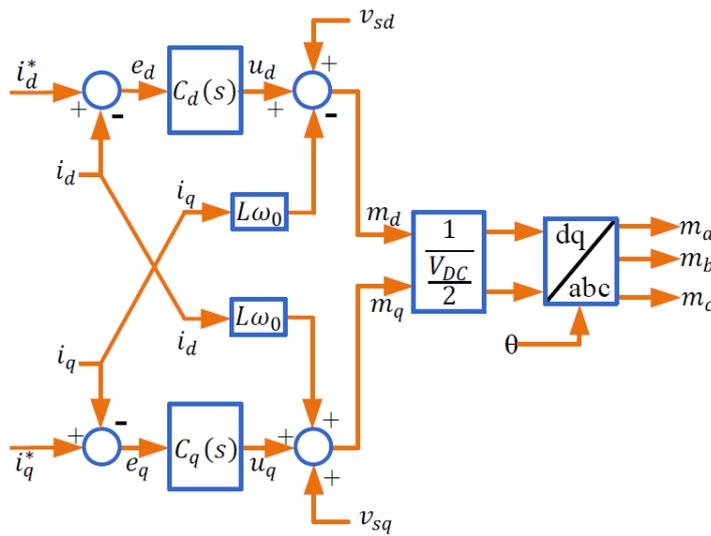
Aplicando a transformada de Park em (4), (5) e (6) e assumindo condições de estado permanente, tem-se em (7) e (8) a dinâmica do lado CA no sistema de coordenadas dq .

$$L_f \frac{di_d}{dt} = L_f \omega_0 i_q - R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (7)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = L_f \omega_0 i_d - R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (8)$$

A Figura 5 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle da corrente no sistema de coordenadas síncrono. Pode-se observar que o acoplamento entre i_{sd} e i_{sq} é eliminado pela compensação *feed-forward* de desacoplamento.

Figura 5: Diagrama de blocos do sistema de controle de corrente



FONTE: O autor

Após aplicar o desacoplamento das dinâmicas dos eixos d e q , pode-se considerar o sistema expresso por:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (9)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (10)$$

Conforme (9) e (10), observa-se que há uma relação entre as tensões de saída do inversor e da rede elétrica. A primeira, (V_t) é modelada como a entrada de controle, já a segunda, (V_s), como um distúrbio. A fim de simplificar o equacionamento, essa relação pode ser modelada como uma única ação de controle, u_d para (11) e u_q para (12), resultando em:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + u_d \quad (11)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + u_q \quad (12)$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace em (11) e (12), tem-se

$$L_f i_d s = -R_f i_d + u_d \quad (13)$$

$$L_f i_q s = -R_f i_q + u_q \quad (14)$$

Nesse caso, a função de transferência do sistema pode ser expressa por:

$$\frac{i_d}{u_d} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (15)$$

$$\frac{i_q}{u_q} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (16)$$

Para esse sistema, tem-se a malha simplificada de controle no sistema de coordenadas síncrono dq . Pode-se perceber que o comportamento das componentes dq é idêntico, possibilitando, portanto, o projeto do controlador em apenas um eixo, mas os mesmos ganhos serão aplicados em ambas as malhas de controle.

Sabe-se também que quando se utiliza a transformada de Park, suas componentes passam a possuir um comportamento estacionário no tempo, vez que esse sistema é de coordenadas girantes. Com isso, as correntes i_d e i_q nas respectivas malhas de controle devem seguir referências constantes, o que permite o uso de um controlador PI, de acordo com o princípio do modelo interno.

A função de transferência característica do controlador PI pode ser escrita como:

$$C(s) = \frac{K_{p,i} s + K_{i,i}}{s} \quad (17)$$

em que $K_{p,i}$ e $K_{i,i}$ são os ganhos proporcional e integral do controlador PI da malha de controle da corrente.

Sendo assim, considerando apenas a dinâmica em componente d , a multiplicação de (15) por (17) fornece a função de transferência em malha aberta do controle de corrente, conforme a seguir:

$$M_{a,i}(s) = \left(\frac{K_{p,i}}{L_f s} \right) \frac{s + \frac{K_{i,i}}{K_{p,i}}}{s + \frac{R_f}{L_f}} \quad (18)$$

É possível observar em (18) que o sistema possui um polo em $s = -R_f/L_f$. Pela técnica de cancelamento de polos e zeros, o zero do controlador PI, ou seja, $s = -K_{i,i}/K_{p,i}$ deve estar situado em cima do polo da função de transferência. Assim, estabelece-se a relação:

$$\frac{K_{i,i}}{K_{p,i}} = \frac{R_f}{L_f} \quad (19)$$

Com isso, é fácil perceber que a função de transferência em malha aberta da planta de controle se transforma em:

$$M_{a,i}(s) = \frac{K_{p,i}}{L_f s} \quad (20)$$

E a função de transferência em malha fechada é dada por:

$$M_{f,i}(s) = \frac{1}{\frac{L_f}{K_{p,i}} s + 1} \quad (21)$$

Como observado em (21), a função de transferência é de primeira ordem. Sabe-se que função de transferência de um sistema de primeira ordem é apresentada conforme a seguir:

$$M_f(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (22)$$

em que τ_i é a constante de tempo do sistema em (s).

Sendo assim, comparando (21) e (22), pode-se determinar o valor de $K_{p,i}$:

$$K_{p,i} = \frac{L_f}{\tau_i} \quad (23)$$

E substituindo (23) em (19), é possível determinar o valor de $K_{i,i}$:

$$K_{i,i} = \frac{R_f}{\tau_i} \quad (24)$$

Yazdani e Iravani (2010) sugerem que a constante de tempo deve ser $0,5 \text{ ms} \leq \tau_i \leq 5 \text{ ms}$ para sistemas cuja frequência fundamental é $f = 60 \text{ Hz}$. Assumindo, então, uma constante de tempo $\tau_i = 1 \text{ ms}$ e, conforme já mencionado, $R_f = 0,5 \Omega$ e $L_f = 1 \text{ mH}$, tem-se os seguintes parâmetros do controlador de corrente:

Tabela 1: Parâmetros

Parâmetro	Valor
$K_{p,i}$	1 H/s
$K_{i,i}$	$50 \Omega/s$

Fonte: O autor

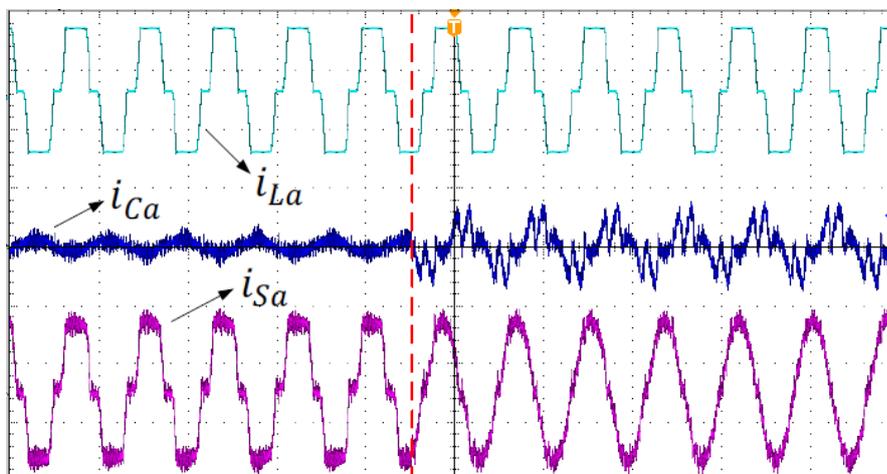
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos para dois cenários diferentes. Primeiramente, mostra a compensação da corrente harmônica, a partir de um determinado tempo. Em segundo lugar, os resultados mostram a etapa de carregamento e como o SAPF se comporta nesta situação.

4.1 COMPENSAÇÃO DA CORRENTE

Pode-se observar na Figura 6 a corrente da fase "a" consumida pela carga (i_{La}), a corrente da fase "a" injetada pelo SAPF (i_{Ca}), a corrente da fase "a" no PCC (i_{Sa}) e, por fim, a linha vermelha que representa o início da compensação realizada pelo filtro ativo. Desta forma, verifica-se que antes da compensação, a corrente no PCC tem a mesma dinâmica da corrente de carga (não senoidal), e imediatamente após o início da compensação (i_{Sa}) torna-se senoidal e em fase com a tensão de rede (v_{Sa}).

Figura 6: Formas de onda: carga, filtro ativo e corrente de rede para a compensação de carga.

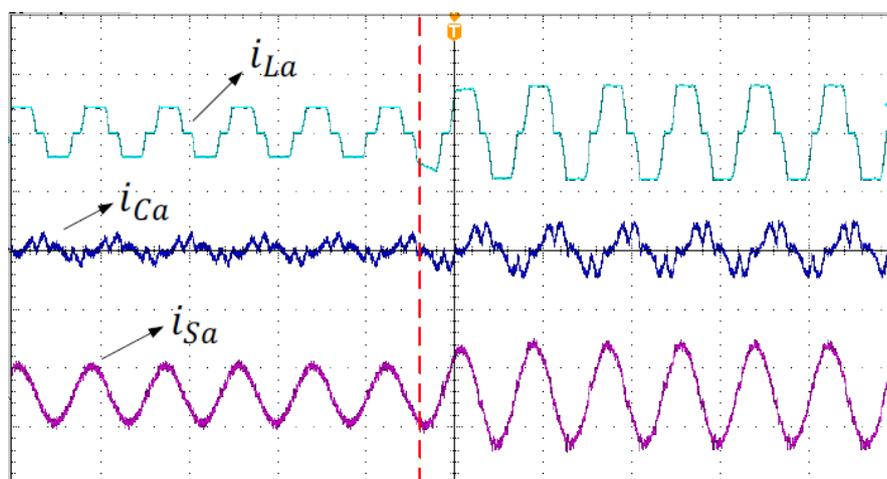


FONTE: O autor

4.2 DEGRAU DE CARGA

Conforme comentado, o segundo cenário simulado foi com a inserção de uma etapa de carga e posterior observação de sua implicação na dinâmica do SAPF. Como no caso anterior, na Figura 7 observam-se as mesmas curvas da Fig. 6. Porém, neste caso, a linha vermelha representa o início da etapa da carga.

Figura 7: Formas de onda: carga, filtro ativo e corrente de rede para a etapa da carga.



FONTE: O autor

Portanto, como pode ser visto na Figura 7, mesmo com uma variação repentina e programada de carga, tanto o sistema de controle quanto a dinâmica do SAPF não foram afetados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo trata da simulação em loop de filtros de potência ativos shunt utilizando o MatLab. No controle, seção do esquema foi observado como são feitas as compensações de carga. Conforme observado na seção de resultados da simulação, os objetivos foram alcançados, tais como compensação de potência reativa e harmônicas da carga, tornando a distorção de corrente no PCC aceitável. Simulações foram utilizadas com sucesso para validar os esquemas de controle propostos.

Com esses esquemas de controle implementados, é possível migrar para um sistema de rede mais complexo e maior, como uma microrrede, por exemplo. Foi demonstrado que este sistema permite, de forma interessante, mitigar problemas de qualidade de energia devido a harmônicos de corrente no PCC. De fato, para dois casos, compensação de corrente e passo de carga, o SAPF se comporta de forma correta, com resposta rápida.

ABSTRACT

This article deals with the integration of an Active Power Shunt Filter (SAPF) to the power grid and a non-linear load (usually rectifier). The intention is to test the control system in conditions closer to the reality of the SAPF and the electrical network. The results show the load compensation capability (harmonic current and reactive power compensation) through the interface converter. The proposed control methodology makes the system capable of compensating reactive power and harmonic currents consumed by the load, making the distortion level in the Common Coupling Point (PCC) acceptable, according to IEEE 519. The control system was implemented in simulation in MatLab software, along with the electrical system.

Key words: Active power filter, Voltage source converter, modeling and control of converters, power electronics.

REFERÊNCIAS

- CHAKRABORTY, S.; SIMÕES, M. G.; KRAMER, W. E. **Power electronics for renewable and distributed energy systems**. A Sourcebook of Topologies, Control and Integration, Springer, p. 235-265, 2013.
- FOGLI, G. A. et al. **Integração de um grupo motor gerador diesel em uma rede secundária de distribuição através de um conversor estático fonte de tensão**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2014.
- FERREIRA, R. A. F. et al. **Controle de microrredes cc baseado em droop adaptativo de tensão - simulação em tempo real com control-hardware-in-loop**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2015.
- ALMEIDA, P. M. d. et al. **Contribuições ao estudo de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica sem filtros passivos: projeto de controladores digitais para redução do conteúdo harmônico**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2013.
- MUSSE, B. F. et al. **Real time simulation of pv system integration to the distribution grid using dynamic load model**. In: IEEE. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2017 IEEE 8th International Symposium on. 2017. p. 1-6.
- RANAWEERA, I.; SANCHEZ, S.; MIDTGARD, O.-M. **Residential photovoltaic and battery energy system with grid support functionalities**. In: IEEE. 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). 2015. p. 1-7.
- ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. **Power electronics for renewable energy systems, transportation, and industrial applications**.: John Wiley & Sons, 2014.
- SHUVRA, M. A.; CHOWDHURY, B. H. **Autonomous control of smart inverters in grid connected and islanded mode**. In: IEEE. Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2017 IEEE. 2017. p. 1-5.
- MALEKPOUR, A. R.; PAHWA, A. **A dynamic operational scheme for residential pv smart inverters**. IEEE Transactions on Smart Grid, IEEE, 2017.
- BELL, F. et al. **Secondary voltage and reactive power support via smart inverters on a high penetration distributed photovoltaic circuit**. In: IEEE. Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2016 IEEE Power & Energy Society. 2016. p. 1-6.
- Frederico T Ghetti, Pedro G Barbosa, Henrique AC Braga, and André A Ferreira. **Estudo comparativo de técnicas de controle de corrente aplicadas a filtros ativos shunt**. In XVIII Congresso Brasileiro de Automática, pages 12–16, 2010.

Pablo C de S Furtado, Gabriel A Fogli, Pedro M de Almeida, Pedro G Barbosa, and Janaína G de Oliveira. **Topology and control of a two-phase residential pv system with load compensation capability**. In 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pages 1127–1132. IEEE, 2015.

Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, and Mauricio Aredes. **Instantaneous power theory and applications to power conditioning**. John Wiley & Sons, 2017.

Amirnaser Yazdani and Reza Iravani. **Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications**. John Wiley & Sons, 2010.