

ANÁLISE DO FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA MONOFÁSICO PARALELO UTILIZANDO CONVERSORES ESTÁTICOS CONECTADOS EM PARALELO

NADY ROCHA*, GUILHERME CIRILO LEANDRO*, WENDELL PEREIRA FARIAS*

*Departamento de Engenharia Elétrica (DEE)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
João Pessoa, Paraíba, Brasil

Emails: nadyrocha@cear.ufpb.br, guilherme.leandro@cear.ufpb.br,
wendell.pereira@cear.ufpb.br

Abstract— This paper presents two topologies for a single-phase shunt active power filter with two full bridge converters connect in parallel. Both topologies are analyzed by the description of their respective dynamic models, control systems and PWM (Pulse Width Modulation) strategies. There are also discussed methods of reducing the harmonic distortion in the grid current with the implementation of the Interleaving technique in the PWM strategy, which provides a larger number of levels for the output filter voltage. In one of the presented topologies the converters share a common DC-link, while in the other topology both converters have individual DC-links. The topology with a common DC-link has lower implementation costs, but the connection of a single DC-link for two converters causes a circulating current that must be controlled. Simulation results for both topologies and experimental results for the individual DC-links topology are presented.

Keywords— Active Power Filter (APF), Power Factor, Harmonic Distortion, Parallel converters, PWM Strategy.

Resumo— Neste artigo são apresentadas duas topologias para um filtro ativo de potência paralelo (*shunt*) monofásico utilizando dois conversores ponte completa conectados em paralelo. As topologias são analisadas através da descrição de seus modelos dinâmicos, sistemas de controle e estratégias PWM (*Pulse Width Modulation*). Também são discutidos meios para redução da distorção harmônica da corrente da rede com o uso da técnica de *Interleaved* na estratégia PWM, proporcionando um número maior de níveis de tensão na saída do filtro. Em uma das topologias apresentadas os conversores compartilham um único barramento CC, enquanto que na outra ambos os conversores utilizam barramento CC individual. A topologia com barramento CC comum exige menor custo para implementação, porém a conexão do barramento CC ocasiona uma corrente de circulação que deve ser controlada. Os resultados de simulação digital para ambas as topologias e os resultados experimentais referentes à topologia com barramentos CC individuais são apresentados.

Palavras-chave— Filtro Ativo de Potência, Correção do Fator de Potência, Distorção Harmônica, Conversores em Paralelo, Interleaved.

1 Introdução

Grande parte dos dispositivos eletrônicos utilizados diariamente, como computadores, tablets, micro-ondas, lâmpadas fluorescentes, entre outros, podem ser modelados como cargas não lineares, e podem ocasionar correntes não senoidais quando conectados à rede elétrica. Essas correntes deformadas reduzem a qualidade da energia (Miret et al., 2009; Janggi et al., 2014; Rahman et al., 2009; Izhar et al., 2004; Freitas et al., 2014). Como soluções são apresentados os filtros passivos e os filtros ativos, porém os filtros passivos são maiores em tamanho e podem causar problemas de ressonância (Janggi et al., 2014; Freitas et al., 2014).

Os filtros ativos de potência paralelo trifásicos são largamente estudados e diferentes estratégias de controle têm sido propostas. No entanto, recentemente, os filtros ativos de potência paralelo monofásicos têm chamado a atenção na compensação de harmônicos e reativos em sistemas monofásicos (Costa-Castello et al., 2009), (Ukande et al., 2015), (Cirrincione et al., 2009).

Os filtros ativos de potência paralelo (FAP) eliminam as distorções harmônicas da corrente.

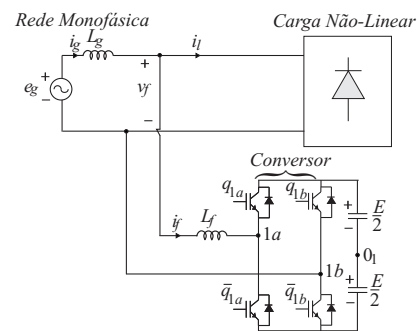


Figura 1: FAP convencional.

Para se realizar esta correção, o filtro injeta no sistema uma corrente de modo a compensar as harmônicas da corrente de carga, ocasionando em uma corrente senoidal livre de componentes harmônicas e com alto fator de potência. Neste trabalho duas topologias derivadas da topologia convencional do FAP (mostrada na Fig. 1) foram estudadas e comparadas: uma topologia formada por conversores em paralelo e com barramentos CC individuais e a outra topologia também formada com conversores em paralelo, mas compartilhando o mesmo barramento CC, conforme ilus-

tradas nas Figs. 2 e 3, respectivamente. As topologias são analisadas através da descrição de seus modelos dinâmicos, sistemas de controle e estratégias PWM (*Pulse Width Modulation*). Múltiplas portadoras PWM são utilizadas para reduzir a distorção harmônica da corrente da rede elétrica, técnica conhecida por *Interleaved*. Os resultados de simulação digital e experimentais são apresentados.

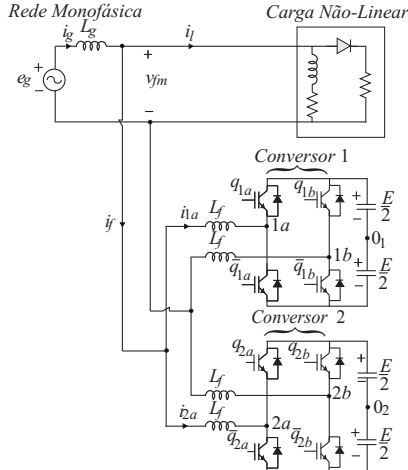


Figura 2: FAP com barramentos CC individuais.

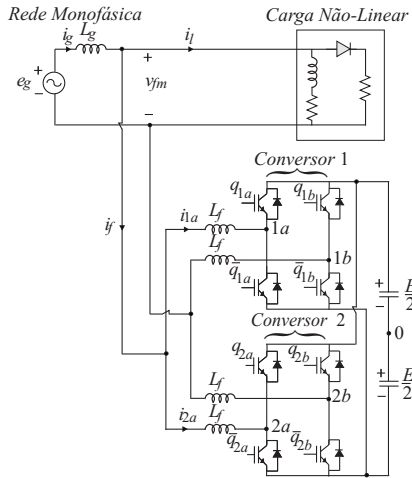


Figura 3: FAP com barramento CC comum.

2 FAP com barramentos CC individuais

2.1 Modelo dinâmico

Com base na Fig. 2 podem-se escrever as Equações (1), (2) e (4).

$$i_f = i_g - i_l = i_{1a} + i_{2a} \quad (1)$$

$$e_g = r_g i_g + l_g \frac{di_g}{dt} + v_f \quad (2)$$

$$v_{fm} = r_f i_{ka} + l_f \frac{di_{ka}}{dt} + r_f i_{kb} + l_f \frac{di_{kb}}{dt} + v_{fk} \quad (3)$$

$$v_{fk} = v_{ka0_k} - v_{kb0_k} \quad (4)$$

Com $k = 1, 2$, v_{fk} corresponde à tensão de saída do conversor k , v_{ka0_k} e v_{kb0_k} são as tensões de polo do conversor k , r_f e l_f são a resistência e a indutância dos filtros L_f , respectivamente, e r_g e l_g são a resistência e indutância da rede L_g .

A tensão média gerada pelos conversores 1 e 2 é:

$$v_{fm} = r_f i_f + l_f \frac{di_f}{dt} + v_f \quad (5)$$

$$v_f = \frac{v_{f1} + v_{f2}}{2} \quad (6)$$

2.2 Estratégia de controle

A estratégia de controle adotada realiza as seguintes funções: controle dos barramentos CC dos FAPs e o controle da corrente injetada na rede. O sistema de controle completo para a topologia de FAP com dois conversores em paralelo e barramentos CC individuais é mostrado na Fig. 4.

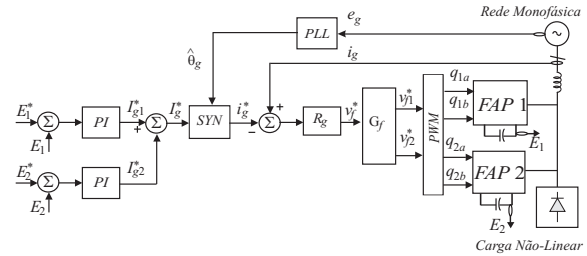


Figura 4: Diagrama de controle para FAP com dois conversores em paralelo e barramentos individuais.

Inicialmente as tensões dos barramentos CC dos conversores 1 e 2 são controladas por controladores do tipo PI convencional. A saída destes controladores fornecem a metade da amplitude da corrente da rede elétrica (I_{g1}^* e I_{g2}^*). A partir do fornecimento da amplitude da corrente da rede ($I_g^* = I_{g1}^* + I_{g2}^*$) e da fase da tensão da rede elétrica θ_g ao bloco SYN este bloco gera a referência da corrente na rede elétrica i_g^* . O controle da corrente da rede é realizado por meio de um controlador Ressonante representado pelo bloco R_g que fornece a referência de tensão v_f^* . As tensões desejadas em cada conversor são iguais a geração v_f^* sendo aplicadas no bloco PWM para geração dos estados das chaves dos conversores 1 e 2.

2.3 Estratégia PWM

Sabendo que as tensões de saída dos conversores 1 e 2 podem ser expressas através de suas tensões de polo, pode-se escrever as seguintes equações para as tensões de referência dos FAPs:

$$v_{fk}^* = v_{ka0_k}^* - v_{kb0_k}^* \quad (7)$$

onde $v_{ka0_k}^*$ e $v_{kb0_k}^*$ correspondem às tensões de polo do conversor k . Para a estratégia PWM duas tensões auxiliares v_{x1} e v_{x2} foram utilizadas, como

mostrado na Eq.(8), onde $k = 1, 2$.

$$v_{xk}^* = \frac{v_{ka0k}^* + v_{kb0k}^*}{2} \quad (8)$$

Por meio das equações (7) e (8) é possível escrever as tensões de polo de referência em função das tensões de saída e das tensões auxiliares:

$$v_{ka0k}^* = \frac{v_{fk}^*}{2} + v_{xk}^* \quad \text{e} \quad v_{kb0k}^* = -\frac{v_{fk}^*}{2} + v_{xk}^* \quad (9)$$

Respeitando os limites máximo e mínimo que as tensões de polo podem assumir, os valores máximos e mínimos para as tensões v_{xk}^* podem ser determinados:

$$v_{xk \min}^* \leq v_{xk}^* \leq v_{xk \max}^* \quad (10)$$

$$v_{xk \max}^* = \frac{E_k^*}{2} - \max\left\{\frac{v_{fk}^*}{2}, -\frac{v_{fk}^*}{2}\right\} \quad (11)$$

$$v_{xk \min}^* = -\frac{E_k^*}{2} - \min\left\{\frac{v_{fk}^*}{2}, -\frac{v_{fk}^*}{2}\right\} \quad (12)$$

onde E_k corresponde às tensões dos barramentos CC do conversor k e v_{fk} corresponde às tensões de referência expressas na Equação (7). Com o uso destes valores máximo e mínimo pode-se determinar as tensões v_{xk}^* em função do parâmetro μ , com $0 \leq \mu \leq 1$ (Fabricio et al., 2013):

$$v_{xk}^* = \mu v_{xk \max}^* + (1 - \mu) v_{xk \min}^* \quad (13)$$

Os tempos de chaveamento para cada par de chaves dos conversores 1 e 2 são determinados através dos valores de referência para as tensões de polo calculadas através da Eq. (9). Esses valores de referência podem ser comparados com uma ou duas portadoras PWM. Na topologia adotada a portadora utilizada para o segundo inversor está defasada em 180 graus da primeira, técnica conhecida como *Interleaved*, que ocasiona uma redução da distorção harmônica do sinal de corrente gerado (Asiminoaei et al., 2008).

3 FAP com barramento CC comum

3.1 Modelo dinâmico

As equações (1)-(4) são válidas na análise do FAP com um barramento CC, porém o fato dos conversores 1 e 2 dividirem o mesmo barramento CC contribui para o surgimento de correntes de circulação. Modelando duas correntes de circulação i_{o1} e i_{o2} entre os conversores 1 e 2, podem-se escrever as equações (14) e (15) para as correntes dos filtros.

$$i_{1a} = \frac{i_f}{2} + i_{o1} \quad \text{e} \quad i_{2a} = \frac{i_f}{2} - i_{o1} \quad (14)$$

$$i_{1b} = \frac{i_f}{2} + i_{o2} \quad \text{e} \quad i_{2b} = \frac{i_f}{2} - i_{o2} \quad (15)$$

A partir da Fig. 3 encontramos:

$$v_{ok} = r_f i_{ok} + l_f \frac{di_{ok}}{dt} \quad (16)$$

$$v_{o1} = \frac{v_{2a0} - v_{1a0}}{2} \quad (17)$$

$$v_{o2} = \frac{v_{2b0} - v_{1b0}}{2} \quad (18)$$

A tensão média gerada pelos conversores 1 e 2 é definida pelas equações (5) e (6). Nota-se que essas equações não dependem das correntes de circulação i_{o1} e i_{o2} .

3.2 Estratégia de controle

A estratégia de controle adotada para a topologia de FAP com barramento comum é similar à topologia anterior, entretanto como há apenas um barramento CC a ser controlado existe apenas um bloco de controle para esta finalidade, sendo a corrente da rede definida por esse controlador, conforme mostrado na Fig. 5. Adicionalmente o controle das correntes de circulação é realizado por meio de controladores ressonantes (representado pelo bloco R_o). Os valores de referência das correntes de circulação são nulos. Esses controladores definem as tensões v_{ok}^* . As tensões v_f^* e v_{ok}^* são aplicadas no bloco PWM para o cálculo dos estados das chaves de potência.

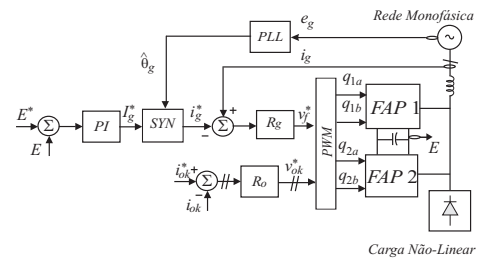


Figura 5: Circuito de controle para o FAP com dois conversores em paralelo e um barramento CC.

3.3 Estratégia PWM

Como mostrado na seção anterior, as tensões de referência v_f^* , v_{o1}^* e v_{o2}^* são fornecidas pelo sistema de controle. Essas tensões podem ser definidas em função das tensões de polo de referência desejadas no conversor de acordo com as equações (19)-(21)

$$v_f^* = \frac{v_{f1}^* + v_{f2}^*}{2} \quad (19)$$

$$v_{o1}^* = \frac{v_{2a0}^* - v_{1a0}^*}{2} \quad (20)$$

$$v_{o2}^* = \frac{v_{2b0}^* - v_{1b0}^*}{2} \quad (21)$$

com $v_{fk}^* = v_{ka0}^* - v_{kb0}^*$.

Para o cálculo adequado das tensões de polo, a tensão auxiliar v_x é adicionada ao modelo. A

tensão auxiliar pode ser definida por:

$$v_x^* = \frac{v_{1a0}^* + v_{1b0}^* + v_{2a0}^* + v_{2b0}^*}{4} \quad (22)$$

Utilizando as equações (19) - (22), as tensões de polo de referência podem ser calculadas por:

$$v_{ka0}^* = v_{ka}^* + v_x^* \quad \text{e} \quad v_{kb0}^* = v_{kb}^* + v_x^* \quad (23)$$

com

$$v_{1a}^* = \frac{v_f^*}{2} + v_{o1}^* \quad \text{e} \quad v_{1b}^* = -\frac{v_f^*}{2} - v_{o2}^* \quad (24)$$

$$v_{2a}^* = \frac{v_f^*}{2} - v_{o1}^* \quad \text{e} \quad v_{2b}^* = -\frac{v_f^*}{2} + v_{o2}^* \quad (25)$$

Respeitando os limites que as tensões de polo podem assumir, a tensão auxiliar v_x^* pode ser determinada de forma análoga as tensões v_{xk}^* a partir das equações (10)-(13).

Como na topologia anterior, os estados das chaves podem também ser obtidos com o uso de uma ou duas portadoras PWM.

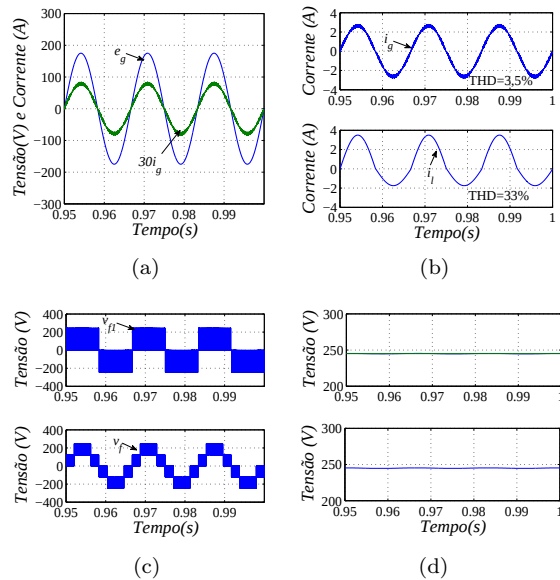


Figura 6: Resultados de simulação para a topologia com dois barramentos CC, duas portadoras PWM e $\mu = 0$. (a) Corrente e tensão na rede elétrica. (b) Correntes da rede e da carga. (c) Tensão conversor 1 e tensão média dos FAPs. (d) Tensões dos barramentos CC.

4 Resultados de simulação

Ambas as topologias apresentadas neste trabalho foram simuladas em ambiente computacional com o uso do software PSIM. Os resultados de simulação são mostrados nas Figs. 6 a 8 para as topologias com dois e um barramento CC, respectivamente. Para ambas simulações a carga não linear implementada foi: uma carga RL ($R = 100\Omega$ mais $L = 6mH$) em paralelo com um diodo em série com uma resistência de 100Ω , conforme mostrado na Fig. 2. A tensão da rede com amplitude 175V, a resistência e indutância dos filtros L_f

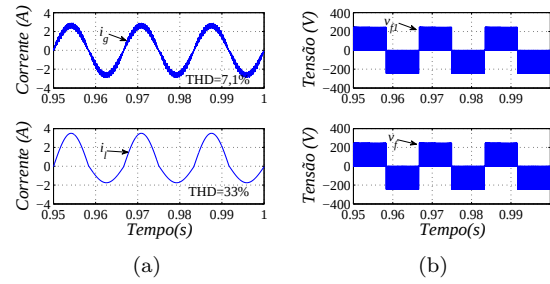


Figura 7: Resultados de simulação para a topologia com dois barramentos CC, uma portadora PWM e $\mu = 0,5$. (a) Correntes da rede e da carga. (c) Tensão do FAP1 e tensão média dos FAPs.

iguais a $0,2\Omega$ e $6mH$, respectivamente, a frequência de chaveamento igual a $10kHz$ e tensões dos barramentos CC igual a 245V.

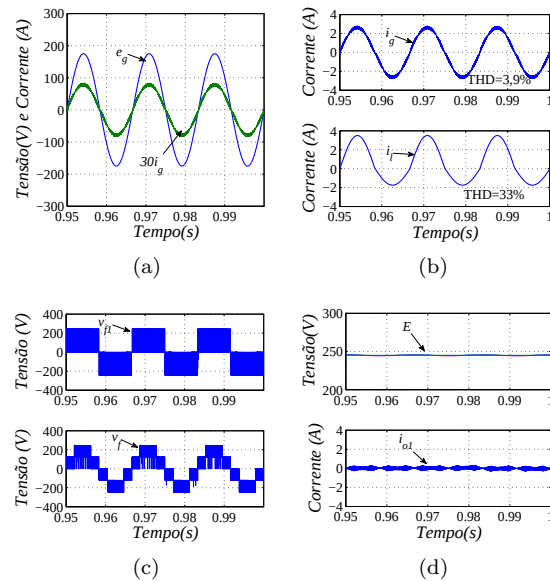


Figura 8: Resultados de simulação para a topologia com um barramento CC, duas portadoras PWM e $\mu = 0$. (a) Corrente e tensão na rede elétrica. (b) Correntes da rede e da carga. (c) Tensão do FAP1 e tensão média dos FAPs. (d) Tensão do barramento CC e corrente de circulação i_{o1} .

A partir dos resultados da Fig. 6(a) observa-se que a corrente fornecida à rede é senoidal, pois os harmônicos da corrente da carga, [ilustrada na Fig. 6(b)] são compensados pela corrente do filtro. Além disso, a corrente da rede está em fase com a tensão, ou seja o sistema apresenta elevado fator de potência [mostrado na Fig. 6(a)]. Com a utilização de duas portadoras PWM é possível reduzir a distorção harmônica da corrente da rede comparada com a configuração convencional. A taxa de distorção harmônica da corrente da rede é reduzida para 3,4% contra uma distorção harmônica da corrente da carga de 33%. A tensão média gerada pelos filtros é apresentada na Fig. 6(c). Observa-se que a forma de onda da tensão apresenta cinco níveis de tensão. Para efeito de com-

paração, os resultados com uma portadora PWM e $\mu = 0,5$ são ilustrados na Fig. 7. Neste caso nota-se o aumento da distorção harmônica devido os harmônicos de alta frequência da corrente, a THD neste caso é igual a 7,1%. O aumento da distorção harmônica pode ser explicado observando a forma de onda da tensão modulada pelos FAPs, pois neste caso a tensão não possui cinco níveis.

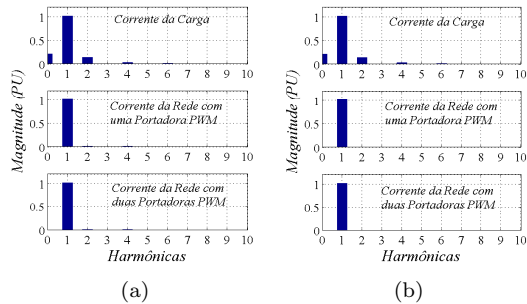


Figura 9: Resultados de Simulação - Espectro da frequência. (a) Topologia com um barramento CC. (b) Topologia com dois barramentos CC

Os resultados da topologia com um barramento CC são análogos aos resultados anteriores, no entanto neste caso, para balanceamento da corrente entre os conversores 1 e 2, as correntes de circulação (i_{o1} e i_{o2}) são reguladas em um valor de referência nulo. Fig. 8(d) mostra a corrente de circulação i_{o1} . A tensão média gerada pelo filtro também apresenta cinco níveis de tensão, conforme ilustrado na Fig. 8(c), no entanto no ciclo positivo os níveis não estão bem formados, o que contribui para o aumento da distorção harmônica (a THD da corrente da rede, neste caso é igual a 3,8%) de alta frequência comparado com o filtro ativo utilizando dois barramentos CC.

O último conjunto de resultados é mostrado na Fig. 9. Esses resultados mostram os espectros de frequência da corrente da carga e da rede (aplicando uma ou duas portadoras PWM). Nota-se o ambas as topologias minimizam as harmônicas e o nível cc da corrente da carga.

Em resumo, a topologia com dois barramentos CC não possui corrente de circulação e apresenta o menor valor de distorção harmônica da corrente da rede, o que pode reduzir o tamanho dos filtros L_f , no entanto a necessidade de dois barramentos pode aumentar o tamanho, peso e custo do filtro. Já a topologia de barramento único tem a redução de um barramento CC, contudo o controle da corrente de circulação é fundamental para seu adequado funcionamento.

5 Resultados experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos utilizando a bancada experimental ilustrada na Fig. 10. Somente os resultados da topologia de FAP com dois barramentos CC são apresentados. Os

resultados foram obtidos utilizando uma portadora PWM e $\mu = 0,5$ e com duas portadoras PWM e $\mu = 0$, conforme mostrado nas Figs. 11 e 12, respectivamente. Para obtenção desses resultados os indutores utilizados foram de $6mH$, a tensão dos barramentos CC iguais a 250V e a amplitude da tensão da rede igual a 145V.

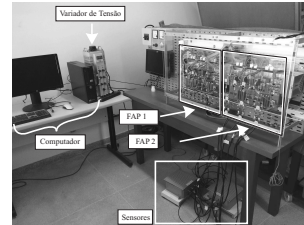


Figura 10: Foto da bancada experimental.

Na Fig. 11(a) pode-se notar que os dois barramentos CC estão controlados e a corrente na rede elétrica assumiu um formato senoidal mesmo com o comportamento não linear da corrente da carga. A Fig. 11(b) ilustra a corrente da rede em fase com a tensão. Na Fig. 11(c) pode-se perceber que a tensão de saída final do filtro v_f é análoga à do FAP convencional.

A Fig. 12 ilustra os resultados experimentais aplicando duas portadoras PWM. Percebe-se na Fig. 12(a) que a corrente na rede elétrica apresenta uma redução no *ripple* quando comparada com a corrente da rede utilizando uma portadora PWM. Essa redução na distorção harmônica da corrente é devido a tensão multinível gerada pelo FAP, conforme ilustrado na Fig. 12(c). Nota-se que os resultados experimentais são similares aos de simulação.

6 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado duas topologias para filtro ativo de potência paralelo com o objetivo de eliminar distorções harmônicas na corrente da rede elétrica injetadas por cargas não lineares em sistemas monofásicos. As topologias apresentadas foram analisadas em relação a seus modelos dinâmicos, sistemas de controle e estratégias PWM, sendo apresentados resultados de simulação referentes a cada topologia. Através dos resultados de simulação e experimentais foi possível perceber que o sistema de controle garantiu um elevado fator de potência e uma corrente da rede livre de distorções harmônicas. Embora a topologia com barramento CC comum tenha a vantagem de utilizar apenas um banco de capacitores, a topologia com dois barramentos CC possui menor distorção harmônica e também não há circulação de corrente entre os conversores.

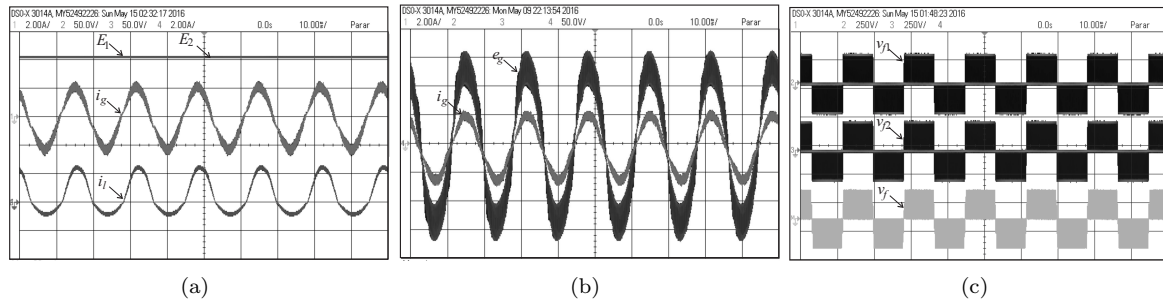


Figura 11: Resultados experimentais - topologia com dois barramentos CC, uma portadora PWM e $\mu = 0,5$. (a) Tensões dos barramentos CC, corrente na rede elétrica e corrente na carga. (b) Tensão e corrente na rede elétrica. (c) Tensões do FAP.

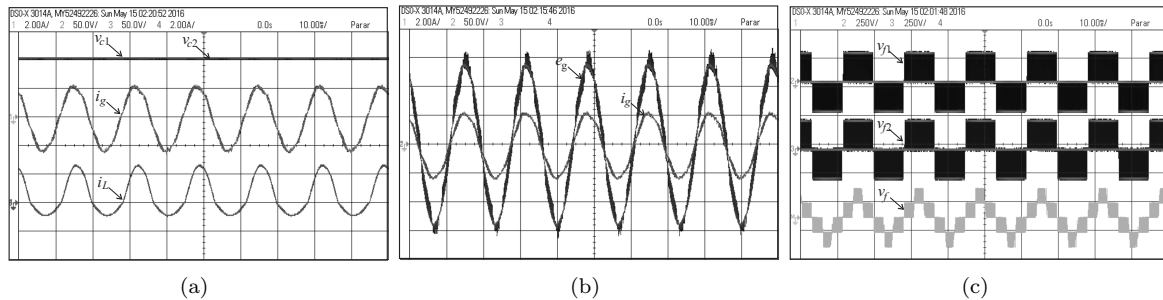


Figura 12: Resultados experimentais-topologia com dois barramentos CC, duas portadoras PWM e $\mu = 0$. (a) Tensões nos barramentos CC, corrente na rede elétrica e corrente na carga. (b) Tensão e corrente na rede elétrica. (c) Tensões do FAP.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Refer ncias

- Asiminoaei, L., Aeloiza, E., Enjeti, P. N. and Blaabjerg, F. (2008). Shunt active-power-filter topology based on parallel interleaved inverters, *IEEE Trans. on Ind. Electron.* **55**(3): 1175–1189.
- Cirrincione, M., Pucci, M., Vitale, G. and Miraoui, A. (2009). Current harmonic compensation by a single-phase shunt active power filter controlled by adaptive neural filtering, *IEEE Trans. on Ind. Electronics* **56**(8): 3128–3143.
- Costa-Castello, R., Grino, R., Parpal, R. C. and Fossas, E. (2009). High-performance control of a single-phase shunt active filter, *IEEE Trans. on Control Systems Technology* **17**(6): 1318–1329.
- Fabricio, E. L. L., Jacobina, C. B., Santos, E. C. and Rocha, N. (2013). Modelo, estrategia pwm, controle e análise de filtros ativos paralelos, *SOBRAEP, Elet nica de Potência*, pp. 1055–1063.
- Freitas, I., Gomes, Z., Meira, M., Salvadori, F., Hartmann, L., Carvalho, F., Fernandes, D. and dos Santos Junior, E. (2014). Single-phase active power filter for selective harmonic elimination based on synchronous frame control system, *APEC*, pp. 7002–1007.
- Izhar, M., Hadzer, C., Syafrudin, M., Taib, S. and Idris, S. (2004). Performance for passive and active power filter in reducing harmonics in the distribution system, *PECon*, pp. 104–108.
- Janggi, J., Utomo, W., Yusoh, M., Mahadan, M., Zulkifli, S. and Jumadri, J. (2014). Artificial neural network controller for single-phase active power filter, *CENCON*, pp. 25–30.
- Miret, J., Castilla, M., Matas, J., Guerrero, J. and Vasquez, J. (2009). Selective harmonic-compensation control for single-phase active power filter with high harmonic rejection, *IEE Trans. Ind. Electron.* **56**(8): 3117–3127.
- Rahman, N., Hamzah, M., Noor, S. and Hasim, A. (2009). Single-phase hybrid active power filter using single switch parallel active filter and simple passive filter, *PEDS*, pp. 40–45.
- Ukande, A. H., Tiwari, S. L., Kadwane, S. G. and Kadu, A. (2015). Generalise pq theory with spwm for single phase shunt active filter applications, *PCITC*, pp. 89–94.