

LÓGICA FUZZY APLICADA NAS MALHAS DE CONTROLE DE CORRENTE E TENSÃO DE UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO

VICTOR B. MALVEZZI¹, SÉRGIO A. O. DA SILVA¹, LEONARDO B. G. CAMPANHOL¹, BRUNO A. ANGÉLICO¹

1. *Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR*
Av. Alberto Carazzai, 1640, CEP 86.000-300. Cornélio Procopio - PR, Brasil.
E-mails: victormalvezzi@sercomtel.com.br; augus@utfpr.edu.br;
campanhol@utfpr.edu.br; bangelico@utfpr.edu.br

Abstract— This paper presents the application of fuzzy logic controller applied in the current control loop and the DC-link voltage control loop of a single-phase shunt active power filter (SAPF). The SAPF is used to suppress the harmonics current components and compensate the reactive power of nonlinear loads. The compensation reference current is obtained from the synchronous reference frame algorithm. The total harmonic distortion of the compensated source current and the utility power factor will be used as evaluation criteria to determinate the performance of the SAPF on harmonic currents suppression and reactive power compensation, the relative error of the compensation current controller will be presented to availed the dynamical performance of the controller. Simulation results will be presented in order to validate of theoretical development.

Keywords— Active Power Filter, Fuzzy Controller, Harmonics, Power Quality and SRF Algorithm.

Resumo— Este trabalho apresenta a aplicação de controladores, baseados em lógica *fuzzy*, implementados para o controle das malhas de corrente e tensão do barramento CC de um filtro ativo de potência paralelo (FAPP) monofásico. O FAPP é aplicado na supressão de componentes harmônicas e compensação de potência reativa gerados por cargas não lineares. A corrente de referência de compensação é obtida através do algoritmo de referência síncrona (SRF). A taxa de distorção harmônica da corrente da rede compensada e o fator de potência são analisados de forma a avaliar o desempenho do FAPP na supressão dos harmônicos e compensação dos reativos. Além disso, o erro relativo médio da corrente de compensação é apresentado de forma a analisar o comportamento dinâmico do controlador adotado. Resultados de simulação são apresentados no intuito de validar o desenvolvimento teórico.

Palavras-chave— Controle *Fuzzy*, Filtro Ativo de Potência, Harmônicos, Qualidade de Energia Elétrica, Algoritmo SRF.

1 Introdução

Nas últimas décadas o aumento na utilização de cargas não lineares tais como retificadores, inversores de tensão, fontes chaveadas, entre outras, pelos diferentes tipos de consumidores (residenciais, comerciais e industriais) vem contribuindo para a degradação da qualidade de energia elétrica (QEE) na rede elétrica de alimentação (Colak, 2010). O grande conteúdo de correntes harmônicas, drenadas da rede elétrica por cargas não lineares, causam distorções harmônicas na tensão de alimentação, mais especificamente no ponto de acoplamento comum (PAC), devido à interação destas correntes harmônicas com a impedância associada à rede elétrica (Akagi et al., 2007; Mikkili et al., 2012). Além disso, a circulação destas correntes podem causar outros problemas, tais como redução do fator e potência (FP), falhas em banco de capacitores, e aumento da corrente do condutor de neutro em sistemas trifásicos a quatro-fios (Colak, 2010).

Como forma de reduzir a influência de cargas não lineares no sistema elétrico de potência, filtros passivos de potência (FPP) têm sido utilizados. Os FPPs apresentam como vantagem uma estrutura simplificada e de baixo custo de implementação. Porém, algumas desvantagens podem ser destacadas, tais como a possibilidade da existência de ressonâncias série e/ou paralela, tamanho físico elevado e

desempenho na filtragem limitada (Colak, 2010; Das, 2004; Gupta et al., 2011).

Já o filtro ativo de potência paralelo (FAPP) caracteriza-se como uma alternativa para suprir tais desvantagens dos FPPs. Apesar de apresentarem maior complexidade, os FAPPs são largamente utilizados para supressão de componentes harmônicas de corrente e compensação de potência reativa. Além disso, nas aplicações em sistemas trifásicos a quatro-fios, são utilizados para reduzir a corrente harmônica que circula pelo condutor de neutro (Singh et al, 1999).

Existem várias estratégias de controle aplicadas nas malhas de corrente e tensão de FAPPs, sendo tais malhas estruturas essenciais para a correta operação de um FAPP (Singh et al, 1999). Estas malhas são responsáveis para garantir a correta imposição da corrente de compensação na rede elétrica. Para esta função, controladores proporcional-integral (PI) e controladores proporcional-integral-derivativo (PID) são amplamente utilizados nas malhas de controle de corrente e tensão do barramento CC dos FAPPs (Singh et al., 1999; Karuppanan et al., 2010).

Nos últimos anos, controladores baseados na lógica *fuzzy* estão sendo utilizados em aplicações de FAPPs, tanto para sistemas monofásicos quanto trifásicos. Na literatura a lógica *fuzzy* aplicada em FAPPs pode ser encontrada no controle da malha de tensão do barramento CC. Para o controle da corrente de compensação é utilizado controle por histerese

(Colak, 2010; Georgios et al., 2011; Gupta et al., 2011; Hamadi et al., 2004; Helal et al., 2009; Karuppanan et al., 2010; Karuppanan et al., 2012; Mikikili et al., 2012; Perumalla et al., 2009; Reddy et al., 2009;). A principal vantagem do controlador *fuzzy* é a não utilização de modelos matemáticos, o que torna o projeto deste controlador mais simples.

Neste trabalho, são utilizados dois controladores *fuzzy*, onde o primeiro é empregado no controle da malha de corrente de compensação e o segundo é empregado no controle da malha de tensão do barramento CC.

Resultados de simulação são apresentados como forma de validar a estratégia de controle adotada. Os indicadores de TDH da corrente da rede e FP são utilizados para avaliar o desempenho dos controladores na supressão das componentes harmônicas e compensação de reativos. Além disso, o erro relativo médio, calculado na malha de controle da corrente de compensação, é analisado como forma de avaliar a desempenho do controlador de corrente.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: A seção 2 descreve a topologia do FAPP utilizado e o algoritmo de geração de referência adotado. A seção 3 apresenta os controladores *fuzzy* implementados nas malhas de controle da corrente de compensação e tensão do barramento CC. Os resultados de simulação são apresentados na seção 4, e a seção 5 apresenta as conclusões.

2 Filtro Ativo de Potência Paralelo

A topologia do FAPP monofásico adotado neste trabalho está apresentado na figura 1. O FAPP utiliza um conversor monofásico *full-bridge*, conectado em paralelo com a rede elétrica através de um indutor de acoplamento L_f . Já o capacitor C forma o barramento CC. A carga não linear é composta por um retificador monofásico não controlado alimentando uma carga RL.

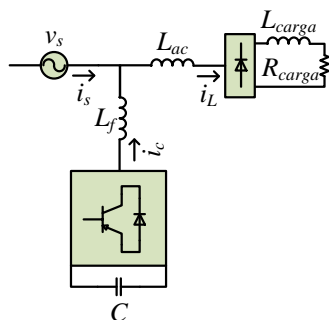


Figura 1: Diagrama em blocos do sistema de potência adotado.

O FAPP opera de modo a fornecer à rede elétrica uma corrente de compensação, com a mesma amplitude e em fase oposta à corrente harmônica da carga. Em outras palavras, o FAPP atua como fonte de corrente harmônica, promovendo a supressão das componentes harmônicas e compensando a potência

reativa (Campanhol et al., 2013). Com isso, a fonte de alimentação fornece somente a parcela ativa da corrente drenada pela carga não linear.

Para a correta operação, o FAPP necessita de duas malhas de controle. A primeira é responsável por garantir a correta imposição da corrente de compensação na rede elétrica. Já a segunda malha é responsável por manter constante a tensão no barramento CC.

2.1 Algoritmo de Referência Síncrona

Neste trabalho, a corrente de referência de compensação, a ser utilizada no FAPP, é obtida através de um algoritmo monofásico baseado no sistema de eixo de referência síncrona (SRF). A figura 2 apresenta o diagrama de blocos do algoritmo SRF monofásico (Campanhol et al., 2013).

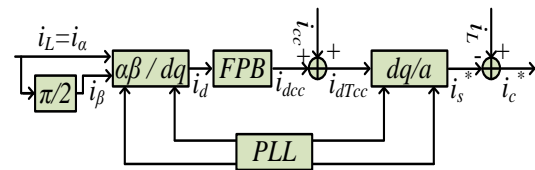


Figura 2: Diagrama de blocos para o algoritmo SRF monofásico

O algoritmo consiste em medir a corrente da carga (i_L) e introduzir um atraso de $\pi/2$ radianos. Assim a corrente medida é considerada a corrente fictícia no eixo α (i_α), enquanto a corrente defasada é considerada a corrente fictícia no eixo β (i_β) de acordo com (1). Com isso as correntes podem ser representadas no sistema de eixos estacionário bifásico fictício $\alpha\beta$.

A partir das grandezas no eixo bifásico fictício $\alpha\beta$ as grandezas são transformadas para o eixo bifásico síncrono dq através de (2) e (3), onde $\theta_{pll} = \omega t$ é o ângulo que representa a posição angular do sistema de eixos de referência síncrona, $\omega = 2\pi f$ representa a frequência angular do sistema elétrico com frequência fundamental f , e as coordenadas $\sin(\theta_{pll})$ e $\cos(\theta_{pll})$ definem o vetor síncrono unitário.

No sistema de eixos síncronos dq , a componente fundamental da corrente da carga é transformada em uma grandeza contínua no eixo d . Já as harmônicas são transformadas em grandezas oscilantes as quais são filtradas utilizando um filtro passa baixa (FPB). Portanto a corrente contínua resultante i_{dcc} representa a parcela ativa fundamental da corrente da carga.

A corrente i_{dcc} é somada a corrente i_{cc} , sendo esta responsável por controlar a tensão do barramento CC, como pode ser observado na figura 2. Esta corrente corresponde à corrente ativa a ser drenada da rede para manter constante a tensão do barramento CC.

A corrente fundamental de referência (i_s^*) pode ser obtida conforme (4). Já a corrente de referência de compensação é encontrada através da subtração de i_L por i_s^* conforme (5).

Um algoritmo de detecção de ângulo de fase da tensão da rede elétrica, denominado *Phase-Locked Loop* (PLL), sincronizado com a frequência do sistema elétrico, é utilizado para gerar as coordenadas do vetor unitário síncrono $sen(\theta_{pll})$ e $cos(\theta_{pll})$, garantindo a ortogonalidade necessária para o funcionamento ideal do sistema. O algoritmo PLL utilizado neste trabalho é baseado na teoria de potência ativa instantânea, conforme descrito em (Silva et al., 2008).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos(\theta_{pll}) + i_\beta \cdot \sin(\theta_{pll}) \quad (2)$$

$$i_q = i_\beta \cdot \cos(\theta_{pll}) - i_\alpha \cdot \sin(\theta_{pll}) \quad (3)$$

$$i_s^* = (i_{dcc} + i_{dc}) \cdot \cos(\theta_{pll}) \quad (4)$$

$$i_c^* = i_L - i_s^* \quad (5)$$

3 Lógica Fuzzy Aplicada no FAPP

A teoria de conjuntos *fuzzy*, apresentada por Zadeh em 1965 (Zadeh, 1965), pode ser utilizada para descrever em termos matemáticos as informações imprecisas de um determinado processo, através de um conjunto de regras linguísticas.

O projeto de um controlador *fuzzy* é inicialmente baseado nas informações do especialista, sendo posteriormente ajustado de forma a obter um ponto satisfatório de operação deste sistema. O controlador *fuzzy* é constituído por estágios de fuzzificação, inferência, defuzzificação e base de dados/regras (Lee, 1990), sendo:

1. Sistema de fuzzificação: Nesta etapa, as variáveis de entrada do sistema são traduzidas em valores *fuzzy* verbais. Esta parte do sistema inclui a definição das funções de pertinência e variáveis linguísticas, bem como a determinação do universo de discurso de cada uma destas variáveis.
2. Inferência: Etapa onde se utiliza regras do tipo *se/então*, de forma a produzir uma saída *fuzzy* a ser utilizada no cálculo da variável de saída do processo.
3. Sistema de defuzzificação: Nesta etapa, as variáveis *fuzzy*, obtidas na inferência, são transformadas em variáveis reais a serem enviadas ao processo.
4. Base de dados/regras: Etapa de definição das funções de pertinência dos sistemas de fuzzificação e defuzzificação, bem como de definição do conjunto de regras *fuzzy*.

A figura 3 mostra o diagrama em blocos do controlador fuzzy adotado, tanto na malha de controle de corrente, como na malha de controle de tensão do barramento CC do FAPP.

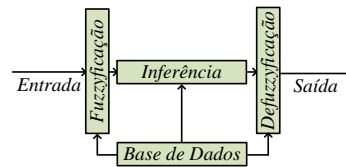


Figura 3: Diagrama em blocos do controlador fuzzy

3.1 Controlador Fuzzy da Malha de Corrente

A figura 4 apresenta a malha de controle da corrente do FAPP. Esta malha é responsável pela correta imposição da corrente de compensação na rede elétrica.

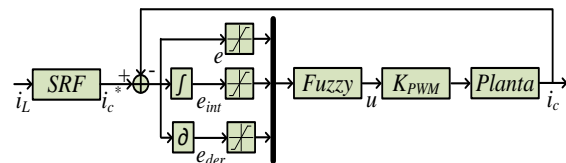


Figura 4: Diagrama em blocos da malha de controle de corrente de compensação do FAPP.

Os dados de entrada do controlador *fuzzy* são o sinal de erro ($e = i_c^* - i_c$), integral do erro (e_{int}) e a derivada do erro (e_{der}). Já a saída deste é o sinal de controle do sistema (u), sendo este o sinal a ser comparado com a portadora (triangular) da modulação PWM.

As funções de pertinências das entradas (e , e_{int} , e_{der}) do controlador *fuzzy* são mostradas na figura 5.

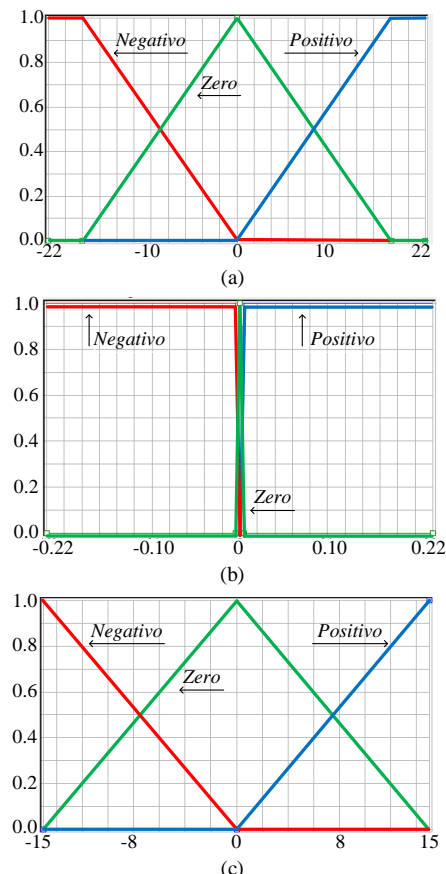


Figura 5: Funções de pertinência das entradas da malha de corrente: (a) função de pertinência do erro. (b) função de pertinência da integral do erro. (c) função de pertinência da derivada do erro

Já a figura 6 apresenta as funções de pertinência da saída (u) do controlador fuzzy da malha de controle de corrente do FAPP.

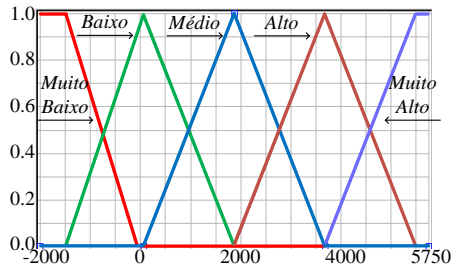


Figura 6: Função de pertinência da saída da malha de corrente

Definidas as entradas e saídas do controlador fuzzy, faz-se necessária a criação das regras de implicação. Para implementação do controlador fuzzy foram criadas vinte e sete regras de implicação, sendo estas descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Regras do Controlador Fuzzy para Malha de Corrente

Nº	e	e_{int}	e_{der}	u
1	Negativo	Negativo	Negativo	Muito Baixo
2	Negativo	Negativo	Zero	Muito Baixo
3	Negativo	Negativo	Positivo	Muito Baixo
4	Negativo	Zero	Negativo	Muito Baixo
5	Negativo	Zero	Zero	Muito Baixo
6	Negativo	Zero	Positivo	Muito Baixo
7	Negativo	Positivo	Negativo	Muito Baixo
8	Negativo	Positivo	Zero	Muito Baixo
9	Negativo	Positivo	Positivo	Muito Baixo
10	Zero	Negativo	Negativo	Médio
11	Zero	Negativo	Zero	Baixo
12	Zero	Negativo	Positivo	Baixo
13	Zero	Zero	Negativo	Alto
14	Zero	Zero	Zero	Médio
15	Zero	Zero	Positivo	Alto
16	Zero	Positivo	Negativo	Alto
17	Zero	Positivo	Zero	Alto
18	Zero	Positivo	Positivo	Médio
19	Positivo	Negativo	Negativo	Muito Alto
20	Positivo	Negativo	Zero	Muito Alto
21	Positivo	Negativo	Positivo	Muito Alto
22	Positivo	Zero	Negativo	Muito Alto
23	Positivo	Zero	Zero	Muito Alto
24	Positivo	Zero	Positivo	Muito Alto
25	Positivo	Positivo	Negativo	Muito Alto
26	Positivo	Positivo	Zero	Muito Alto
27	Positivo	Positivo	Positivo	Muito Alto

Especificamente para a malha de corrente foi adotado um sistema fuzzy com três variáveis de entrada, com o objetivo de se obter um controlador mais robusto. Em testes realizados com duas variáveis de entrada, foi verificado erros em regime e transitórios elevados. Quando adotado três entradas, consequentemente criou-se um maior número de regras, melhorando o desempenho do controlador.

3.2 Controlador Fuzzy da Malha de Tensão do Barramento CC

A figura 7 mostra o diagrama em blocos da malha de controle da tensão do barramento CC. O objetivo desta malha é manter constante a tensão no barramento CC do FAPP. O funcionamento do contro-

lador de tensão consiste em atuar na amplitude da corrente de referência do FAPP (i_c^*) de modo a determinar o fluxo de potência ativa que circula pelo FAPP.

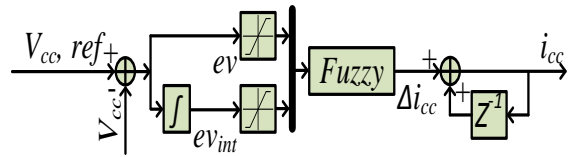


Figura 7: Diagrama em blocos da malha de controle da tensão do barramento CC

Os dados de entrada do controlador fuzzy para a malha de tensão são o sinal de erro ($ev = V_{cc}(ref) - V_{cc}$) e integral do erro (ev_{int}). A saída deste é a corrente i_{cc} que é somada a corrente i_{dcs} , conforme mostrado no algoritmo SRF monofásico.

As funções de pertinências das entradas do controlador fuzzy para a malha de controle da tensão no barramento CC são mostradas na figura 8.

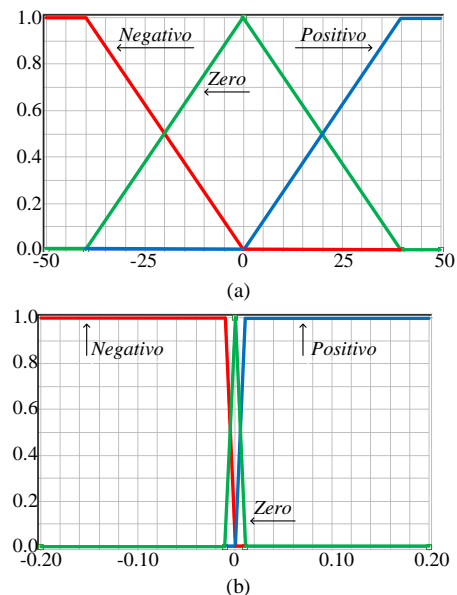


Figura 8: Funções de pertinência das entradas da malha de controle da tensão no barramento CC. (a) Função de pertinência do erro. (b) Função de pertinência da integral do erro.

A figura 9 apresenta as funções de pertinência da saída do controlador fuzzy.

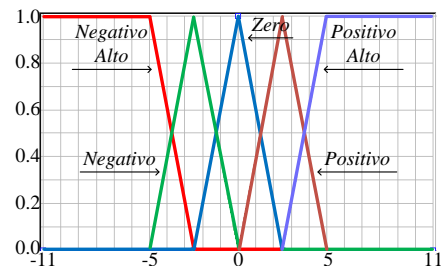


Figura 9: Função de pertinência da saída da malha de tensão

Após definidas as funções de pertinência para as variáveis de entrada e saída é definido as regras para o controlador fuzzy da malha de tensão conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Regras do Controlador Fuzzy para Malha de Controle da Tensão de Barramento CC

Nº	e	e_{int}	i_{cc}
1	Negativo	Negativo	Negativo Alto
2	Negativo	Zero	Negativo Alto
3	Negativo	Positivo	Negativo Alto
4	Zero	Negativo	Negativo
5	Zero	Zero	Zero
6	Zero	Positivo	Positivo
7	Positivo	Negativo	Positivo Alto
8	Positivo	Zero	Positivo Alto
9	Positivo	Positivo	Positivo Alto

4 Resultados de Simulação

Os resultados apresentados foram obtidos utilizando a ferramenta computacional MATLAB/Simulink, no qual foram implementados todos o algoritmo SRF e PLL, a estrutura de potência e os controladores *fuzzy*. Todo o sistema de aquisição de dados, geração das referências e controladores foram discretizados, além de acrescentados os atrasos nas aquisições de medição introduzidos pelos filtros *anti-aliasing*. Isto foi realizado no intuito de tornar as simulações mais próximas possíveis de um sistema real. No controlador *fuzzy* foi utilizado o operador de implicação de mínimo (MIN), e o método de Centro das Áreas no processo de defuzzificação. O controlador *fuzzy* foi implementado através de linguagem C possibilitando uma maior similaridade com um sistema real.

A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros utilizados para a simulação.

Tabela 3. Parâmetros Utilizados nos Ensaios do FAPP

Tensão da Rede	$V_s = 127V_{rms}$
Frequência da Rede	$f_s = 60Hz$
Frequência de chaveamento	$f_{ch} = 20kHz$
Frequência de corte do FPB	$f_c = 12Hz$
Indutância de acoplamento	$L_f = 1,629mH$
Resistência série do indutor de acoplamento	$R_{Lf} = 0,485 \Omega$
Indutância AC	$L_{AC} = 1,5mH$
Ganho do modulador PWM	$K_{PWM} = 5,3333 \times 10^{-4}$
Capacitância do barramento CC	$C = 3mF$
Tensão de referência do barramento CC	$V_{CC} = 230V$
Resistência da carga	$R_{carga} = 5,61 \Omega$
Indutância da carga	$L_{carga} = 346mH$

A figura 10 mostra a tensão da rede (v_s) e a corrente da rede (i_s). É possível observar que i_s apresenta formato senoidal, com redução de TDH de 37,71% para 5,58%, comprovando a compensação de harmônicos pelo FAPP. Também observa-se que i_s esta em fase com v_s , garantindo a compensação de reativo, com FP de 0,99.

É possível observar na figura 11 a corrente de referência de compensação i_c^* sobreposta a corrente de compensação i_c , verifica-se erros nos picos da corrente, o erro relativo médio encontrado foi de 18,33%.

A figura 12 apresenta o comportamento do FAPP durante um aumento de 50% na carga do sistema, no instante de tempo 0,3s. É possível observar

um aumento no valor das correntes i_c^* e i_c , onde o controlador *fuzzy* obteve resposta satisfatória. No instante de tempo 0,6s verifica-se que as correntes i_c^* e i_c começam a decair, onde isto ocorre devido a retirada de carga. Observa-se também satisfatória resposta do controlador.

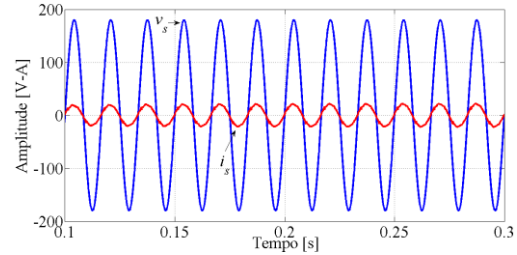


Figura 10: Tensão de alimentação (v_s) e corrente da rede (i_s)

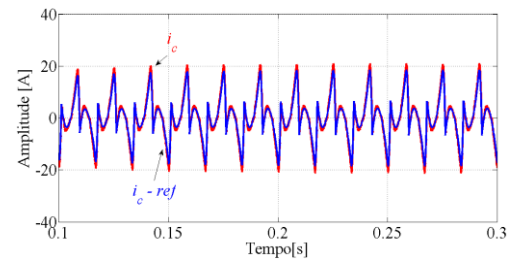


Figura 11: Corrente de referência de compensação (i_c -ref) e corrente de compensação (i_c)

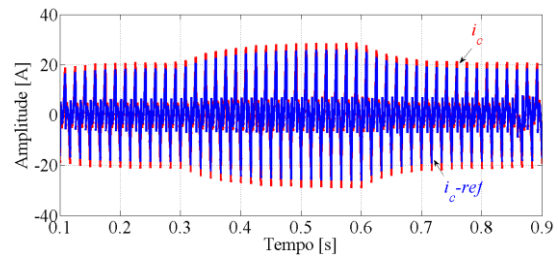


Figura 12: Corrente de referência de compensação (i_c -ref) e corrente de compensação (i_c) durante alterações na carga

A figura 13 mostra o comportamento da tensão no barramento CC, onde observa-se que o controlador *fuzzy* manteve a tensão V_{cc} constante de acordo com a referência. No instante 0,3s observa-se um decaimento da tensão ocorrido em função do aumento da carga. Já no instante 0,6s observa-se aumento da tensão decorrente da diminuição da carga. O controlador *fuzzy* apresentou resposta satisfatória no controle desta malha, pois manteve a tensão V_{cc} dentro de limites aceitáveis para o bom funcionamento do FAPP.

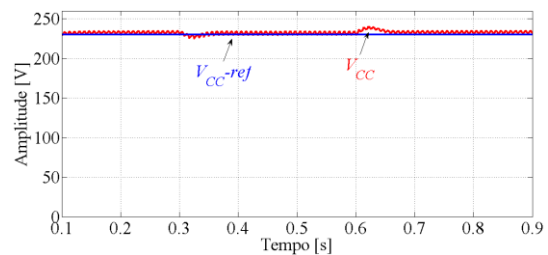


Figura 13: Tensão CC de referência (V_{CC} -ref) e tensão no barramento CC (V_{CC})

5 Conclusão

Este trabalho apresentou a aplicação de controladores, baseados na lógica *fuzzy*, nas malhas de controle da corrente e tensão no barramento CC de um FAPP monofásico. O FAPP foi utilizado para a compensação de potência reativa e para a supressão de correntes harmônicas geradas por uma carga não linear monofásica.

Para o controle do FAPP, foram utilizados dois controladores *fuzzy*, sendo o primeiro, responsável por garantir a correta imposição à rede elétrica da corrente de compensação, e o segundo controlador responsável por manter constante a tensão no barramento CC.

Resultados de simulação foram apresentados no intuito de validar o desenvolvimento teórico. Já os indicadores de TDH e FP foram utilizados como forma de avaliar a capacidade do FAPP em suprimir correntes harmônicas e compensar potência reativa, quando utilizando controladores Fuzzy. O erro relativo médio da malha de controle da corrente foi utilizado como parâmetro para analisar o comportamento dinâmico do FAPP.

Conforme os resultados apresentados é possível observar um desempenho satisfatório do FAPP na supressão de harmônicos de corrente e compensações da potência reativa da carga. Para os ensaios realizados, teve-se como resultado corrente na rede elétrica senoidal e em fase com a tensão da rede.

Referências Bibliográficas

- Akagi H., et al. (2007). Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. New Jersey, IEEE Press/Wiley-Inter-science ISBN: 978-0-470-10761-4.
- Campanhol, L.B.G. Silva, S.A.O. Goedtel, A. (2013) Filtro Ativo de Potência Paralelo Aplicado em Sistemas Trifásicos a Quatro-Fios. Eletrônica de Potência –SOBRAEP, Março de 2013.
- Colak, R. Bayindir, O. Kaplan, F. Tas, (2010). DC Bus Voltage Regulation of an Active Power Filter Using a Fuzzy Logic Controller. Ninth International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). pp. 692 – 696.
- Das, J.C. (2004). Passive filter-potentialities and limitations. IEEE Transaction on Industrial Application, vol. 40, no. 1, pp. 232-241.
- Georgios, T. Georgios. A. (2011) Shunt Active Power Filter Control Using *Fuzzy* Logic Controllers. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). pp. 365 – 371.
- Gupta, N. Singh, S.P. Dubey, S.P. (2011). Fuzzy Logic Controlled Shunt Active Power Filter For Reactive Power Compensation and Harmonic Elimination. International Conference on Computer & Communication Technology (ICCT), v. 2, pp. 82 – 87.
- Hamadi, A. Al-Haddad, K. Lagacé, P.J. Chandra, A. (2004). Indirect current control techniques of three phase APF using fuzzy logic and proportional integral controller comparative analysis. 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. pp 362 – 367.
- Helal, A.A. Zakzouk, N.E. Desouky, Y.G. (2009) Fuzzy Logic Controlled Shunt Active Power Filter for Three-phase Four-wire System with Balanced and Unbalanced Loads. World Academy of Science Engineering and Technology, v. 34, pp. 621 – 626.
- Karuppanan, P. Mahapatra, K.K. (2010). PLL with PI PID and *Fuzzy* Logic Controllers based Shunt Active Power Line Conditioners. International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. pp 1 – 6.
- Karuppanan, P. Mahapatra, K.K. (2012) PI and Fuzzy Logic Controllers for Shunt Active Power Filter – A Report. ISA Transactions, v. 51, pp. 163 – 169.
- Kirawanich, P. O’Connell, R.M. (2004). Fuzzy Logic Control of an Active Power Line Conditioner. IEEE Transaction on Power Electronics, vol 19, n 6, pp 1574 – 1585.
- Lee, C.C. (1990). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part I. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 20, n. 2, pp. 404 – 418.
- Mikkili, S. Panda, A.K. (2012). Real-time implementation of power theory using FLC based shunt active filter with different fuzzy M.F.s. 38th Annual Conference on Industrial Electronics Society (IECON) 2012. pp 702 – 707.
- Perumalla, C.S. Panda, P.C. Mishra, S. (2009) Fuzzy controlled harmonic suppressor and reactive volt ampere compensator for enhancing power quality. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, NaBIC. pp. 49 – 54.
- Singh, B. Al-Haddad, K. Chandra, A. (1999). A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 46, n. 5, pp. 960 – 971.
- Reddy, T.N. Subramanyam, M.V. (2009). Fuzzy logic controlled shunt active power filter for mitigation of harmonics with different membership functions. International Conference on Advances in Computing, Control & Telecommunication Technologies. pp 616 – 620.
- Silva, S. A. O. Novochadlo, R. Modesto, R.A. (2008) Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems. Power Electronics Specialists Conference. pp. 4706-4711.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. Information and control, v. 8. pp. 338-353