

FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO PARA O CONTROLE FLEXÍVEL DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.

ALESSANDRO L. DA LUZ, FLÁVIO A. S. GONÇALVES, FERNANDO P. MARAFÃO, HELMO K. M. PAREDES

GASI – GRUPO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS INTEGRÁVEIS, UNESP- UNIV. ESTADUAL PAULISTA.

Email: alessandro.luz@fit-tecnologia.org.br; flavioasg@sorocaba.unesp.br;
fmarafao@sorocaba.unesp.br; hmorales@sorocaba.unesp.br

Abstract — This paper presents the results of using a three-phase active power filter with flexible capability to unwanted currents compensation. Conservative Power Theory is used to obtain the reference signals for partial or total mitigation of disturbances such as reactive, harmonics and unbalances at point of common coupling. Through the currents decomposition and the definition of compensation factors (k_i), which ponder the reference signals of the compensation strategy, one can achieve different alternatives of compensation that will assist the financial viability for the use of active power filter in accordance with the final consumer.

Keywords — Conservative Power Theory, Active Power Filter, Flexible Reference Signals, Power Quality.

Resumo — Este artigo apresenta os resultados de um Filtro Ativo de Potência trifásico com capacidade flexível para compensar distúrbios de corrente. Os sinais de referência são obtidos através da Teoria de Potência Conservativa, para a mitigação parcial ou total dos distúrbios, tais como, reativos, harmônicos e desbalanço no ponto de acoplamento comum. Mediante a decomposição das correntes e a definição de fatores de compensação (k_i), que ponderam os sinais de referência da estratégia de compensação, diferentes alternativas de compensação podem ser obtidas, auxiliando na viabilidade financeira do emprego da Filtragem Ativa conforme a necessidade do consumidor.

Palavras-chave — Teoria de Potência Conservativa, Filtro Ativo de Potência, Sinais de Referência Flexível, Qualidade da Energia Elétrica.

1 Introdução

As energias renováveis e não poluentes vêm desempenhando um papel cada vez mais importante dentro da geração de energia elétrica no Brasil e no Mundo [1-3]. Sua inserção no sistema elétrico está diretamente ligada às preocupações no âmbito energético e ambiental. Estas preocupações fizeram com que governantes desenvolvessem medidas para incentivar o uso de fontes renováveis [2,4]. No Brasil, mediante a Resolução Normativa N° 687 da Aneel [5] vem sendo incentivado o mercado de mini e micro geração distribuída através de Fontes Renováveis de Energia (FRE). Dentre as FRE destacam-se a Eólica e a Solar, por serem as mais comumente empregadas em sistemas de geração de energia distribuída [6]. Atualmente, 2016, estas são um dos principais focos do governo brasileiro devido à política de incentivos na pesquisa e tecnologia para a implantação de Redes Inteligentes de Energia Elétrica, conhecidos como *Smart Grids* [6-7].

Embora a maioria das tecnologias voltadas para as redes inteligentes já estejam estabelecidas, a sua integração em um sistema real ainda carece de pesquisa e aprimoramento. Um dos aspectos importantes em uma rede inteligente é o impacto das fontes intermitentes (fotovoltaica e eólica) na Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Assim, o emprego de Filtros Ativos de Potência (FAP) para o controle da QEE em redes inteligentes torna-se de capital importância [8-14]. No entanto, o controle da QEE pode ser alcançado utilizando a própria interface da fonte local de energia com a rede, por meio de injeção de correntes de

compensação no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) [15-22]. Este recurso pode ser obtido mediante a implementação de um algoritmo adicional que possibilite a compensação de correntes indesejadas da carga.

Desta forma, este artigo pretende contribuir no contexto de técnicas de controle da QEE, mediante o controle flexível de um filtro ativo de potência trifásico. Os sinais de referência para o filtro ativo de potência trifásico são obtidos a partir da decomposição da corrente, através da teoria de potência conservativa, do inglês *Conservative Power Theory* (CPT) [23,24]. Mediante a definição de fatores ponderados (k_i) para compensação flexível, as componentes indesejadas da carga (corrente reativa, corrente de desbalanço e corrente residual) são ponderadas mediante os fatores de compensação de forma que o filtro ativo seja capaz de mitigar determinados distúrbios (individualmente ou totalmente) para alcançar um valor específico de fator de potência, ou distorção harmônica total de corrente ou até o fator de desequilíbrio de corrente. Possibilitando, por exemplo, atender os limites mínimos estabelecidos por normas específicas (PRODIST, IEEE ou IEC).

2 Conceitos e Definições sobre a CPT - Teoria de Potência Conservativa

A CPT, proposta em [23-24] é definida no domínio do tempo e pode ser aplicada em sistemas monofásicos e polifásicos, com ou sem condutor de retorno, com formas de onda senoidais ou não,

equilibradas ou não, de período T e frequência angular $\omega = 2\pi/T$.

Assim, duas grandezas conservativas principais são definidas, a primeira é a *potência ativa*, a qual é expressa por:

$$P = \langle \mathbf{v}, \mathbf{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt. \quad (1)$$

Em (1) a operação $\langle , \rangle$ representa o produto interno entre os vetores de tensão ($\mathbf{v}$) e corrente ($\mathbf{i}$), o que pode ser calculado por um filtro de média móvel.

A segunda grandeza é a *energia reativa* dada por:

$$W_r = \langle \hat{\mathbf{v}}, \mathbf{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T (\hat{v}_a i_a + \hat{v}_b i_b + \hat{v}_c i_c) dt \quad (2)$$

tal que, $\hat{\mathbf{v}}$ é o vetor das integrais das tensões de fase, com valor médio removido [24].

Com base nas definições de potência ativa e energia reativa, a CPT propõe uma decomposição da corrente em parcelas ortogonais que visam representar os fenômenos físicos (características do circuito) provocados pelas cargas (elementos lineares e não lineares). Tais parcelas são descritas a seguir:

- Corrente ativa balanceada: responsável pela transferência de potência ativa para a carga, conforme (3).

$$i_{am}^b = \frac{P}{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} v_m = \left(\frac{P}{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \right) v_m = G^b v_m, \quad (3)$$

Onde: G^b é a condutância equivalente balanceada (igual para cada fase), $\mathbf{V} = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}$ é o valor eficaz coletivo da tensão e $m \in \{a, b, c\}$.

- Corrente reativa balanceada: responsável pelo fluxo de energia reativa, sendo dada por (4).

$$i_{rm}^b = \frac{W_r}{\hat{V}_a^2 + \hat{V}_b^2 + \hat{V}_c^2} \hat{v}_m = \left(\frac{W_r}{\hat{V}_a^2 + \hat{V}_b^2 + \hat{V}_c^2} \right) \hat{v}_m = B^b \hat{v}_m, \quad (4)$$

Onde: B^b é a reatância equivalente balanceada (igual para cada fase) e $\hat{\mathbf{V}} = \sqrt{\hat{V}_a^2 + \hat{V}_b^2 + \hat{V}_c^2}$ é o valor eficaz coletivo da tensão sem valor médio.

- Corrente de desbalanceamento: composta por uma parte ativa e reativa que representam os diferentes valores de condutância e reatância equivalente por fase, sendo definida como (5).

$$i_m^u = (G_m - G^b) v_m + (B_m - B^b) \hat{v}_m. \quad (5)$$

Onde: $G_m = P_m/V_m^2$ e $B_m = W_{rm}/\hat{V}_m^2$ são a condutância e a reatância equivalente por fase. Observa-se que, quando $G_m = G^b$ e $B_m = B^b$, a carga resultante é balanceada ($i_m^u = 0$).

- Corrente residual (distorção): parcela de corrente que não transfere potência ativa nem energia reativa (não linearidades entre a tensão e a corrente da carga), definida conforme (6).

$$i_{vm} = i_m - i_{am}^b - i_{rm}^b - i_m^u - i_{vm}. \quad (6)$$

Assim, a corrente medida no PAC de um sistema trifásico qualquer, pode ser decomposta em (7).

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_a^b + \mathbf{i}_r^b + \mathbf{i}^u + \mathbf{i}_v = \mathbf{i}_a^b + \mathbf{i}_{na}, \quad (7)$$

tal que, $\mathbf{i}_{na}$ é o vetor das correntes não ativas de fase.

Estas parcelas da corrente, por definição, são ortogonais entre si, ou seja, o produto escalar médio entre estas é nulo. Sendo assim, é possível definir a relação entre os valores eficazes coletivos dessas parcelas e o valor eficaz coletivo da corrente total, conforme (8).

$$I^2 = I_a^{b^2} + I_r^{b^2} + I^u^2 + I_v^2 = I_a^{b^2} + I_{na}^2. \quad (8)$$

Portanto, a potência aparente da carga pode ser decomposta, em relação aos vários termos de corrente, da seguinte forma:

$$A = V \sqrt{(I_a^{b^2} + I_r^{b^2} + I^u^2 + I_v^2)} = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2}, \quad (9)$$

Onde: P é a potência ativa, Q é a potência reativa, N é a potência de desbalanceamento e D é a potência residual (distorção). Observa-se que diferentemente da potência ativa (P) todas as outras parcelas de potência caracterizam um aspecto não ideal da carga.

Assim, o fator de potência (λ), resulta em (10).

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_{na}^2}}, \quad (10)$$

Onde: P_{na} é a potência não ativa. Detalhes sobre o equacionamento e as propriedades dos operadores matemáticos associados às definições da CPT são discutidos em [24]. Note-se que, todas as equações discutidas nos parágrafos precedentes são válidas independentemente da forma de onda da tensão e corrente.

3 Aplicação da Teoria de Potência Conservativa para compensação flexível

Para demonstrar a aplicação das correntes ortogonais da CPT no sistema de controle de um filtro ativo, o sistema elétrico da Figura 1 foi simulado em software PSIM.

Neste caso, as correntes de referência para o filtro ativo são obtidas mediante (11):

$$i_m^* = i_{nam}(1 - k) = (i_{rm}^b + i_m^u + i_{vm})(1 - k) \quad (11)$$

De (11) nota-se que para $0 < k < 1$ a compensação dos distúrbios é parcial. Portanto, a estimação do valor de k para a obtenção de um valor específico do fator de potência no lado da rede pode ser realizada. Além disso, é possível estimar individualmente diferentes valores de k associadas a cada componente ortogonal de corrente e compensá-las totalmente ou parcialmente de forma seletiva conforme (12).

$$i_m^* = (1 - k_r) i_{rm}^b + (1 - k_u) i_m^u + (1 - k_v) i_{vm} \quad (12)$$

Tal que, k_r é o fator de compensação de reativos, k_u é o fator de compensação de desbalanceamento e k_v é o fator de compensação das harmônicas de corrente. Portanto, existem valores de k_r , k_u e k_v que permitem atingir um determinado valor de DHT de corrente ou um valor específico de fator de desequilíbrio no lado da rede. Desta forma, os fatores de compensação (k

ou k_r , k_u , e k_v) podem ser ponderados de forma atender os limites mínimos estabelecido para índices de qualidade da energia em normas, tais como, PRODIST, IEEE ou IEC.

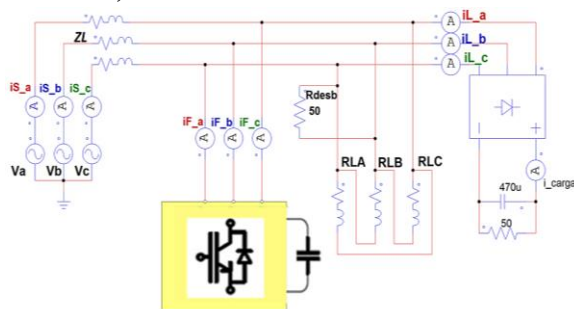


Fig. 1 – Diagrama esquemático do sistema trifásico com filtro ativo para compensação flexível de distúrbios de corrente.

Os dados do sistema trifásico são apresentados na Tabela 1. A fonte de tensão trifásica fornece forma de onda de tensão senoidal com 127V eficaz em 60Hz, tomada como componente fundamental, acrescida de 5ª e 7ª harmônicas com 5% da amplitude da fundamental, tornando-a uma fonte de tensão não senoidal que alimenta uma carga genérica (não linear desbalanceada) composta por uma carga resistiva-indutiva (RL) balanceada em conjunto com uma carga resistiva bifásica (Rdesb) e uma carga não linear tipo fonte de tensão harmônica. Os algoritmos e sub-rotinas responsáveis pelas determinações dos diferentes fatores de compensação e as componentes de corrente da CPT foram implementados de forma discreta, utilizando uma frequência de amostragem de 12kHz, em linguagem C++ e compiladas em DLLS (*Dinamic Link Library*) para serem acessados através do Software PSIM.

Tabela 1: Parâmetros do sistema elétrico simulado

Tensões na fonte de alimentação	$V_a = 127 \angle 0^\circ$ $V_b = 127 \angle -120^\circ$ $V_c = 127 \angle 120^\circ$ (+ 5% de 5ª e 7ª H)
Carga balanceada (RL)	$R_a = R_b = R_c = 2\Omega$ $L_a = L_b = L_c = 100\text{mH}$
Carga bifásica (R)	$R_{desb} = 50\Omega$
Carga não-linear	$R_{cc} = 50\Omega$; $C_{cc} = 470\mu\text{F}$

4 Resultados do FAP trifásico para compensação flexível dos distúrbios de corrente

Esta seção explora e apresenta o processo de compensação flexível proposto através de uma simulação computacional no ambiente PSIM.

Primeiramente os sinais de referência para o filtro ativo são obtidos, conforme (4), (5) e (6). Em seguida, cada componente ortogonal da corrente da carga é ponderada por fatores de compensação individuais (k_r , k_u e k_v), conforme (12).

A Figura 2 mostra a dinâmica das formas de onda das correntes da carga (iL_a , iL_b e iL_c) que permanecem sem alteração ao longo da simulação, as correntes no lado da fonte (iS_a , iS_b e iS_c) que diminuem conforme a estratégia flexível de compensação, as correntes do filtro ativo (iF_a , iF_b e iF_c) que evoluem de acordo com o nível de compensação, e, finalmente, as tensões no PAC (v_a , v_b e v_c). A sequência de execução dos tipos de compensação do sistema ocorre conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Temporização para a compensação.

Tempo	Porcentagem da compensação
$t < 0,4\text{s}$	Sem compensação.
$0,4 < t < 0,5\text{s}$	50% dos reativos.
$0,5 < t < 0,6\text{s}$	100% dos reativos.
$0,6 < t < 0,7\text{s}$	50% do desbalanço + os 100% dos reativos.
$0,7 < t < 0,8\text{s}$	100% do desbalanço + 100% dos reativos.
$0,8 < t < 0,9\text{s}$	50% dos harmônicos + 100% do desbalanço + 100% dos reativos.
$t > 0,9\text{s}$	Compensação total dos distúrbios.

Sem compensação: observa-se que quando o filtro ativo está desligado ($t < 0,4\text{s}$), as formas de onda das correntes no lado da fonte são exatamente iguais as correntes da carga. Essas correntes são distorcidas, desbalanceadas e estão defasadas em relação às tensões. Essa característica é devido à carga resistiva bifásica que faz com que as amplitudes das correntes sejam diferentes entre as fases, à demanda de correntes harmônicas da carga não linear e ao consumo de reativos da carga RL. Além disso, devido a imposição da fonte de alimentação as tensões são ligeiramente distorcidas.

Compensação parcial e total dos reativos (0,4s < t < 0,6s): para $t < 0,5\text{s}$ o filtro ativo começa a fornecer parte dos reativos demandado pela carga, resultando na redução das amplitudes das correntes no lado da fonte (iS_a, b, c). Com $t > 0,5\text{s}$, as amplitudes das correntes no filtro ativo foram incrementadas de forma a fornecer toda a demandada reativa da carga. No entanto, nota-se que as correntes no lado da fonte (iS_a, b, c) continuam sendo desequilibradas e apresentam conteúdo harmônico elevado.

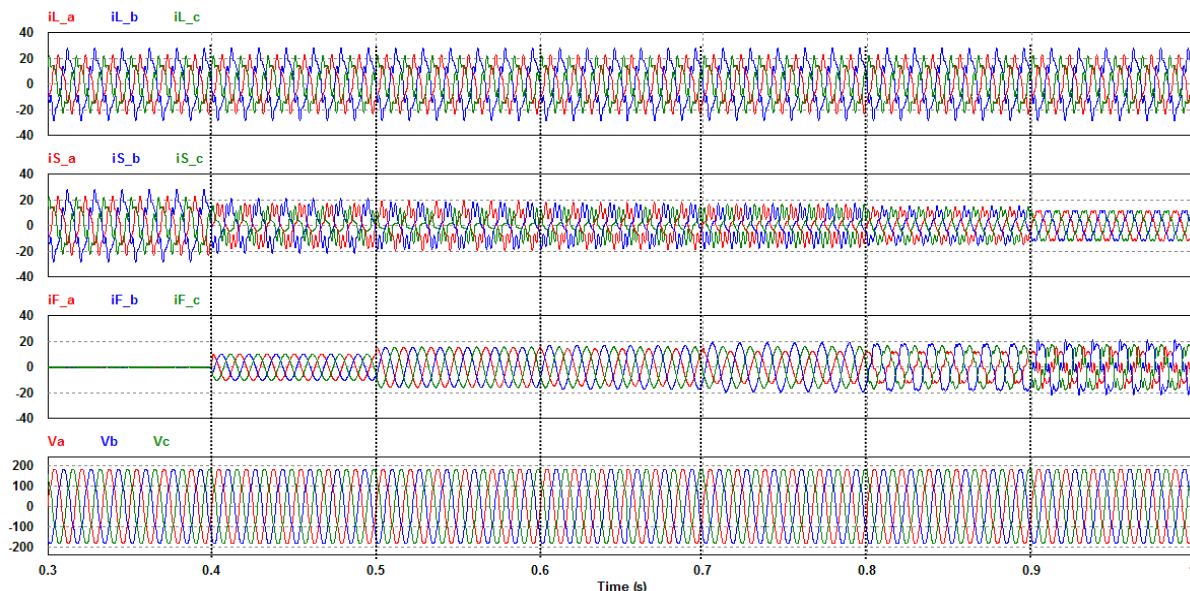


Fig. 2 – Resultados obtidos do filtro ativo para a compensação flexível de distúrbios de qualidade da energia elétrica. De cima para baixo: correntes da carga ($i_{L,a,b,c}$); correntes no lado da fonte ($i_{S,a,b,c}$); correntes pelo filtro ativo ($i_{F,a,b,c}$) e tensões no PAC ($V_{a,b,c}$), respectivamente.

Compensação total dos reativos + compensação parcial e total de desbalanço ($0,6s < t < 0,8s$): para $t > 0,6s$ o filtro ativo além de fornecer a demanda reativa total da carga, injeta correntes desbalanceadas, fazendo que as amplitudes das correntes no lado da rede sejam reduzidas. Para $t > 0,7s$ as amplitudes das correntes no lado da fonte tornam-se praticamente equilibradas, porém ainda distorcidas. Nota-se que as amplitudes das correntes do filtro ativo são diferentes devido à compensação total do desbalanço e reativos.

Compensação total de reativos e desbalanço + compensação parcial e total das correntes residuais (distorção) ($t > 0,8s$): observa-se que o filtro ativo fornece parte das correntes harmônicas requeridas pela carga (correntes parcialmente distorcidas), diminuindo o conteúdo harmônico e as amplitudes das correntes no lado da rede. Em $t > 0,9s$ o filtro ativo é configurado para compensar todos os distúrbios provocados pela carga (reativos + desbalanço + harmônicas), fazendo com que as amplitudes das correntes no lado da rede sejam ainda menores, balanceadas, em fase com as tensões e com reduzido conteúdo harmônico.

A Figura 3 mostra a decomposição das correntes ortogonais da CPT no lado da fonte. Observa-se que as formas de onda das correntes ativa balanceadas (i_{baa_f} , i_{bab_f} , i_{bac_f}), correntes reativas balanceadas (i_{bra_f} , i_{brb_f} , i_{brc_f}), corrente de desbalanço (i_{ua_f} , i_{ub_f} , i_{uc_f}) e correntes residuais (i_{va_f} , i_{vb_f} , i_{vc_f}) seguem o processo de compensação realizado conforme a tabela 2.

No intervalo final ($t > 0,9s$), as correntes residuais não são compensadas totalmente. Estas componentes harmônicas remanescentes continuam circulando no lado da rede e não podem ser compensadas, porque estão sendo impostas pela fonte de alimentação, conforme apresentado na Tabela 1.

A Figura 4 mostra a FFT das correntes ativas balanceadas e residuais, demonstrando as frequências harmônicas impostas pela fonte de tensão. Verifica-se que as correntes ativas balanceadas (proporcionais às tensões) apresentam 5ª e 7ª harmônica. Similarmente, estas componentes harmônicas aparecem nas correntes residuais. Neste caso, destaca-se que as correntes residuais refletem a presença de correntes dispersas, devido as harmônicas de tensão e harmônicas de corrente gerados pela carga não-linear [24]. As correntes dispersas representam o comportamento da carga (variação da condutância e reatividade) sobre tensão distorcida, e normalmente não podem ser compensadas pelo filtro ativo paralelo quando impostas pela fonte de alimentação. Assim, neste caso, apenas as componentes harmônicas geradas pela carga foram compensadas.

A Figura 5 mostra o resultado da compensação flexível do fator de potência e os fatores de compensação associados a cada componente ortogonal de corrente da CPT. No início, quando não há compensação, o fator de potência é baixo em torno de 0,5 e conforme o ajuste dos fatores de compensação, o fator de potência no lado da rede eleva-se proporcionalmente a ponderação das correntes reativas, de desbalanço e residuais, para finalmente atingir a unidade (situação de compensação total).

Nota-se que os fatores de compensação ($k_{r,u,v}$) podem variar entre 0 e 1. Sendo que para a condição dada por $k_{r,u,v} = 1$, não há compensação de distúrbios, e ao passo que estes valores aproximam-se de 0 o FAP compensa proporcionalmente os reativos, desbalanço e as harmônicas geradas pela carga. Para $k_{r,u,v} = 0$ o fator de potência alcança aproximadamente o valor unitário.

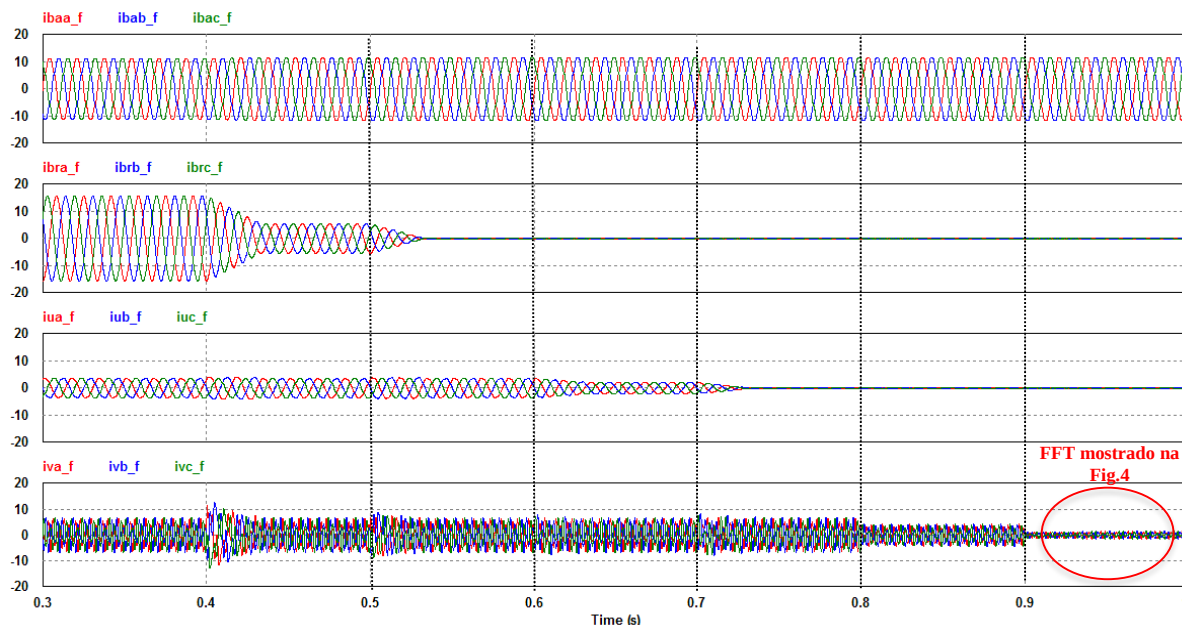


Fig 3 – Resultado da decomposição das correntes balanceadas ativas (i_{ba_n}), correntes reativas balanceada (i_{br_n}), correntes de desbalanço (i_{u_n}) e correntes residual (i_{v_n}) por fase no lado da fonte, respectivamente.

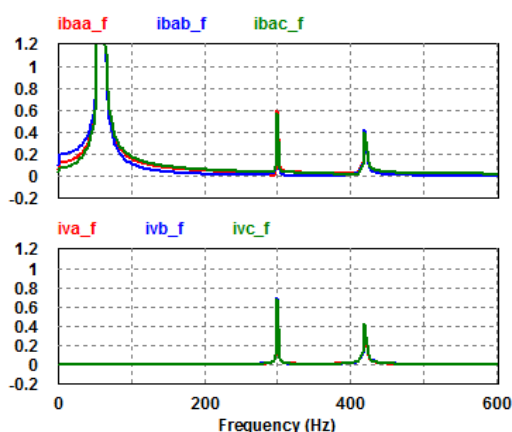


Fig. 4 – FFT das correntes ativas balanceadas e residuais.

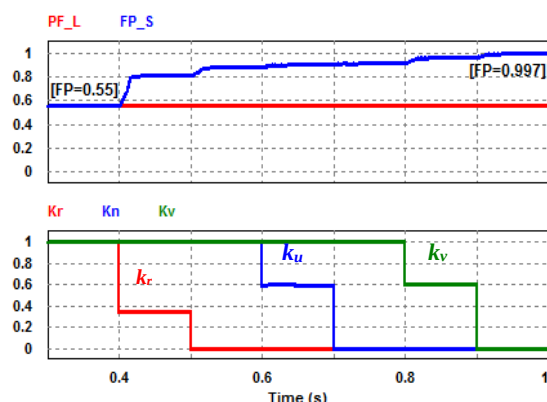


Fig. 5 – Comportamento do fator de potência (FP) considerando a variação dos fatores de compensação (k_r , k_n e k_v) para cada intervalo considerado.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma estratégia flexível para garantir limites adequados de fator de potência e QEE no lado da rede, mediante a operação de um

filtro ativo paralelo. Este objetivo pode ser alcançado através do cálculo de diferentes fatores de compensação, de forma a ponderar os sinais de referência empregados em um FAP paralelo. Para isto foram utilizadas as componentes ortogonais da CPT. Assim, os sinais de referência podem ser ajustados conforme o fator de potência desejado no lado da rede, acarretando uma compensação parcial ou total, e possibilitando flexibilidade ao projetista e ao consumidor, no sentido de otimizar os investimentos por meio da compensação através de filtros ativos de potência. Além disso, a metodologia aplicada também pode ser expandida para outros indicadores de QEE.

Por fim, a abordagem proposta foi validada através da simulação de um sistema trifásico com cargas não lineares e desbalanceadas, alimentadas com tensões distorcidas, e os resultados demonstraram a efetividade da estratégia proposta em um cenário de interesse prático, por exemplo, o controle da QEE de uma microrrede de energia elétrica.

Referências Bibliográficas

- [1] Renewable Energy News & Information. <http://www.renewableenergyworld.com/index.html>, acessado em maio de 2016.
- [2] Greenpeace Internacional, Conselho Europeu de Energia Renovável “Revolução Energética – A caminho do desenvolvimento limpo”. www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/report/2010/11/revolucaoenergeticadeslimpo.PDF, acessado em maio de 2016.
- [3] Portal de energias renováveis “ Fontes de energia renováveis”. <http://www.portal-energia.com/fontes-de-energia>, acessado em Maio de 2016.

- [4] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Joint Research Centre (JRC) "Redes Elétricas Inteligentes: Diálogo Setorial Brasil – União Europeia (2014)".
www.mcti.gov.br/documents/10179/35540/Redes+El%C3%A9tricas+Inteligentes++Di%C3%A1logos+Setoriais+Brasil-Uni%C3%A3o+Europeia/1928a060-91ff-48e2-8479-ae590f0fd9a9, acessado em Maio de 2016.
- [5] Resolução normativa N° 687, de 24 de Novembro de 2015. Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel.
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>, acessado em Maio de 2016
- [6] Redes inteligentes brasil, "Projeto Estratégico de P&D Programa Brasileiro de Redes Inteligentes".
<http://redesinteligentesbrasil.org.br/o-projeto.html>.
- [7] Relatório técnico do 9º Fórum Latino-americano de Smart Grid 2015.
<http://www.smartgrid.com.br>, acessado em Maio de 2016.
- [8] F. Peng, G. Ott and D. Adams, "Application Issues of Active Power Filter", IEEE Industry Application Magazine, vol, ED-4, PP. 21-30, 1998.
- [9] B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, October 1999.
- [10] C. Lascu, L. Asiminoaei, I. Boldea, F. Blaabjerg, "High Performance Current Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 1826-1835, 2007.
- [11] Y. Tang, P. C. Loh, P. Wang, F. H. Choo, F. Gao. "Generalized Design of High Performance Shunt Active Power Filter with Output LCL Filter", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.59, no. 3, pp. 1443-1452, 2012.
- [12] Q. N. Trinh; H. H. Lee, "An Advanced Current Control Strategy for Three-Phase Shunt Active Power Filters", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 60, no. 12, pp. 5400-5410, 2013.
- [13] F. P. Marafão, D. I. Brandão, F. A. S. Gonçalves, H. K. M. Paredes, "Decoupled reference generator for shunt active filter using the Conservative Power Theory," Journal of Control, Automation and Electrical Systems, vol. 24, pp. 522-534, 2013.
- [14] H. K. Morales-Paredes, D. I. Brandão, T. M. Terrazas, F. P. Marafão, "Shunt active compensation based on the Conservative Power Theory current's decomposition", Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), pp. 788-794, Natal, 2011.
- [15] P. G. Barbosa, L. G. B. Rolim, E. H. Watanabe, R. Hanitsch, "Control strategy for grid-connected DC-AC converters with load power factor correction", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, vol. 145, no. 5, pp. 487-491, September. 1998.
- [16] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," IEEE Trans. on Power Electron, vol. 19, no. 5, pp. 1184-1194, Sep 2004.
- [17] S.B. Kjaer, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.41, no.5, pp.1292,1306, Sept.-Oct. 2005.
- [18] J.M. Carrasco, L.G. Franquelo, J.T. Bialasiewicz, E. Galvan, R.C.P. Guisado, M.A.M. Prats, J.I. Leon, N. Moreno-Alfonso, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.53, no.4, pp.1002,1016, June 2006.
- [19] D. I. Brandão, F. P. Marafão, H. K. Morales-Paredes, A. Costabeber, "Inverter control strategy for DG systems based on the Conservative power theory" IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3283-3290, Denver. 2013.
- [20] J. P. Bonaldo, H. K. Morales-Paredes, J. A. Pomilio, "Flexible operation of grid-tied single-phase power converter" Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), pp. 987-992, Gramado. 2013.
- [21] F. P. Marafão, D.I. Brandao, A. Costabeber, and H. K. M. Paredes, "Multi-task control strategy for grid-tied inverters based on conservative power theory," IET Renewable Power Generation, vol. 9, no. 2, pp. 154-165, 2015.
- [22] J. P. Bonaldo, H. K. M. Paredes, J. A. Pomilio, "Control of Single-Phase Power Converters Connected to Low Voltage Distorted Power Systems with Variable Compensation Objectives", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, pp. 2039-2052, 2015.
- [23] P. Tenti, H. K. M Paredes, P. Mattavelli, "Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids," IEEE Trans. on Power Electronics, vol.26, no.3, pp.664-673, Mar 2011.
- [24] H. K. M. Paredes, "Teoria de Potência Conservativa: Uma Nova Abordagem para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações sobre Atribuição de Responsabilidades". Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Março de 2011.