COMPENSAÇÃO ATIVA PARALELA BASEADA NA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA

H. K. M. Paredes D. I. Brandão E. V. Liberado F. P. Marafão
Unesp - Univ Estadual Paulista, Grupo de Automação e Sistemas Integráveis - GASI
Av. Três de Março, 511, Sorocaba, SP, Brazil, 18087-180
hmorales@sorocaba.unesp.br; daniloiglesiasb@yahoo.com.br; eduardo.verri.liberado@gmail.com;
fmarafao@sorocaba.unesp.br

***Resumo* – Com o objetivo de avaliar a aplicação da *Teoria de Potência Conservativa* (CPT, do inglês *Conservative Power Theory*), para o controle de filtros ativos de potência, este artigo apresenta uma metodologia seletiva para a geração de sinais de referência de filtros ativos paralelos, a qual é baseada na decomposição das correntes medidas, conforme proposto pela CPT. A decomposição ortogonal das correntes resulta em várias componentes, cada qual associada com uma característica específica da carga (transferência de potência, armazenamento de energia, deslocamento de fase entre tensão e corrente, desbalanço e/ou não linearidades). Desta forma, cada componente pode ser escolhida de forma independente (ou em associação), proporcionando assim uma compensação seletiva dos distúrbios de corrente oriundos do comportamento da carga. Com o intuito de validar a metodologia proposta, um filtro ativo trifásico foi simulado e avaliado experimentalmente em um sistema trifásico de 4 condutores, com cargas desbalanceadas e não lineares.**

***Palavras-Chave* – Compensação Seletiva, Desequilíbrio, Distorção Harmônica, Filtros Ativos de Potência, Reativos, Teoria de Potência Conservativa.**

SHUNT ACTIVE COMPENSATION BASED ON THE CONSERVATIVE POWER THEORY

***Abstract* – Trying to validate the Conservative Power Theory (CPT) for active filters controlling applications, this paper proposes a selective methodology for the generation of the active filter's reference signals, which is based on the CPT decompositions. The CPT orthogonal decompositions result in several current components, which are associated to different load physical phenomena (power transfer, energy storage, phase displacement, imbalances and non linearities). These current components may be selected independently or in association in order to ensure selective compensation of the load disturbing effects. For the purpose of validating the proposed methodology, simulation and experimental results for three phase four-wire systems, with unbalanced and nonlinear loads, are presented and discussed.**

***Keywords* – Active Power Filter, Conservative Power Theory, Harmonic Compensation, Reactive Compensation, Selective Compensation, Unbalance Compensation.**

I. INTRODUÇÃO

Devido à ampla utilização de cargas não lineares e/ou desbalanceadas, a intensidade dos chamados distúrbios de qualidade de energia vem aumentando significativamente nos sistemas elétricos modernos. Particularmente, no caso de sistemas trifásicos com quatro condutores, as cargas não lineares podem causar diversas condições de distúrbios e provocar excessiva circulação de corrente no condutor de retorno. A circulação de correntes distorcidas, potência reativa e desbalanço (desequilíbrio e assimetria) reduz a eficiência dos circuitos elétricos, o que resulta em um baixo valor para o fator de potência. Os distúrbios também podem causar perturbações e/ou interferências em outras cargas locais. Portanto, soluções econômicas e eficientes para resolver estes problemas da qualidade da energia elétrica têm se tornado cada vez mais importantes, tanto para as geradoras de energia, quanto para os consumidores.

Com o propósito de compensar as correntes harmônicas, reativas e de desbalanço, diversos autores têm trabalhado na proposta de diferentes topologias de condicionadores de potência [1] e suas estratégias de compensação. Tais dispositivos são geralmente conhecidos como filtros de potência: passivos [2], ativos [3] e híbridos [4].

Com relação às estratégias de compensação, um grande número de possibilidades vem sendo discutido [5]-[24], merecendo destaque as importantes contribuições baseadas na *Teoria pq* [15],[16]. Neste contexto, visando melhorias nos resultados de compensação, bem como no custo de instalação dos filtros, as estratégias de compensação seletiva devem ser destacadas [17]-[20], uma vez que elas permitem o projeto do compensador com base na minimização de distúrbios específicos.

Assim, este artigo propõe utilizar a *Teoria de Potência Conservativa* (*CPT*), proposta em [21],[22], como uma nova alternativa para projetar e controlar filtros ativos de potência. A decomposição ortogonal das correntes através da *CPT* pode ser aplicada tanto para definir os sinais de referência para o controle do filtro ativo, bem como para projetar os componentes do filtro (semicondutores de potência, indutores, capacitores, etc.). Além disso, a estratégia de compensação pode ser flexível, uma vez que a decomposição ortogonal das correntes possibilita a identificação e minimização dos distúrbios elétricos de maneira independente (não linearidades, reativos e desbalanços).

Artigo submetido em 28/09/2011. Primeira revisão em 28/12/2011, segunda revisão em 11/02/2012. Aceito para publicação em 20/02/2012 por recomendação do editor João Onofre P. Pinto.

Em artigos recentes [23],[24], os autores têm discutido a utilização da *CPT* para compensação ativa e passiva em circuitos de potência monofásicos e trifásicos a três condutores, por meio de resultados de simulação. Resultados experimentais também foram apresentados para um sistema monofásico [23]. Assim, neste artigo um sistema trifásico com quatro condutores, formado por cargas não lineares e desbalanceadas será analisado por meio de resultados de simulação e também experimentalmente.

II. REVISÃO DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA

A Teoria de Potência Conservativa (CPT), proposta por *Tenti et al*. e recentemente reformulada em [21], é definida no domínio do tempo e pode ser aplicada em sistemas monofásicos e polifásicos com ou sem condutor de retorno. Algumas de suas definições serão resumidas nesta seção, e informações adicionais podem ser encontradas em [21],[22].

Assumindo um circuito polifásico genérico sob condições de operação periódicas (período T), onde $\underline{v}$ e $\underline{i}$ são respectivamente os vetores de tensão e corrente medidos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) do sistema (variáveis de fase são indicadas com subscrito "m"), os autores da *CPT* definiram:

- *Potência instantânea*

$$p(t) = \underline{v} \circ \underline{i} = \sum_{m=1}^{M} v_m \, i_m \tag{1}$$

sendo que o símbolo "$\circ$" representa o produto escalar entre os vetores de tensão e corrente.

- *Energia reativa instantânea*

$$w(t) = \underline{\hat{v}} \circ \underline{i} = \sum_{m=1}^{M} \hat{v}_m \, i_m \tag{2}$$

sendo que "$\underline{\hat{v}}$" representa o vetor das tensões após uma operação de integração e subtração do valor médio (*unbiased integral*) [21].

Os valores médios de (1) e (2) resultam na:

- *Potência ativa*

$$P = \bar{p} = \langle \underline{v}, \underline{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{v} \circ \underline{i} \, dt = \sum_{m=1}^{M} P_m \tag{3}$$

sendo que a operação $\langle \, , \rangle$ representa a média do produto escalar de dois vetores.

- *Energia reativa*

$$W = \overline{w} = \langle \underline{\hat{v}}, \underline{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{\hat{v}} \circ \underline{i} \, dt = \sum_{m=1}^{M} W_m \tag{4}$$

Pode ser demonstrado que, devido ao Teorema de Tellegen, as quantidades instantâneas e seus valores médios (p, w, P e W) são conservativos para qualquer sistema, independentemente da forma de onda da tensão e da corrente [22], o que geralmente não é verdade para as definições de potência reativa encontradas na literatura.

A *potência ativa* representa o fluxo constante de energia por unidade de tempo através de um corte da rede (PAC). Por outro lado, a *energia reativa* é uma nova quantidade, a qual relaciona a energia média armazenada[2] em um corte da rede (PAC). Além disso, a energia reativa instantânea é uma função do tempo e apenas requer a integração das tensões de fase.

É importante destacar que sob condições senoidais, os termos P e W correspondem com a potência ativa convencional ($P = VI\cos\varphi$) e com a potência reativa convencional ($Q = \omega W = VI\sin\varphi$), sendo φ a diferença angular entre a tensão e a corrente, e ω a frequência da rede [22].

Com base nas definições anteriores, as correntes de fase são decompostas em três componentes ortogonais básicas, a saber:

- *Correntes ativas de fase* são definidas por:

$$i_{am} = \frac{\langle v_m, i_m \rangle}{\|v_m\|^2} v_m = \frac{P_m}{V_m^2} v_m = G_m v_m \tag{5}$$

sendo que $\| \ \|$ representa a norma Euclidiana de um vetor e resulta idêntica ao valor eficaz da respectiva tensão de fase. G_m é a condutância equivalente por fase.

- *Correntes reativas de fase* são dadas por:

$$i_{rm} = \frac{\langle \hat{v}_m, i_m \rangle}{\|\hat{v}_m\|^2} \hat{v}_m = \frac{W_m}{\hat{V}_m^2} \hat{v}_m = \beta_m \hat{v}_m \tag{6}$$

sendo β_m definida como a reatividade equivalente por fase [22].

- *Correntes residuais* são os termos de correntes remanescentes:

$$i_{vm} = i_m - i_{am} - i_{rm} \Rightarrow \underline{i}_v = \underline{i} - \underline{i}_a - \underline{i}_r \tag{7}$$

as quais não transmitem potência ativa, nem energia reativa e representam as correntes harmônicas geradas pela carga e as não linearidades da corrente (carga), com relação às tensões harmônicas impostas pela fonte de alimentação (correntes harmônicas dispersas) [22].

As correntes ativas e reativas podem ser ainda decompostas em termos balanceados e desbalanceados.

- *Correntes ativas balanceadas* são definidas como:

$$i_{am}^b = \frac{\langle \underline{v}, \underline{i} \rangle}{\|\underline{v}\|^2} v_m = \frac{P}{\boldsymbol{V}^2} v_m = G^b v_m \tag{8}$$

sendo $\|\underline{v}\|$ o chamado "valor coletivo eficaz" das tensões ($\boldsymbol{V}$). Assim, G^b representa a condutância equivalente balanceada e, as parcelas i_{am}^b indicam as correntes mínimas (ou seja, com valor coletivo eficaz mínimo), necessárias para transmitir a potência ativa total (P) através de um corte da rede (PAC).

- As *correntes reativas balanceadas* são definidas como:

$$i_{rm}^b = \frac{\langle \underline{\hat{v}}, \underline{i} \rangle}{\|\underline{\hat{v}}\|^2} \hat{v}_m = \frac{W}{\hat{\boldsymbol{V}}^2} \hat{v}_m = \beta^b \hat{v}_m \tag{9}$$

[2] Destaca-se que a energia reativa não é apenas associada a elementos armazenadores de energia, também pode ser associada à defasagem entre a tensão e a corrente, provocada, por exemplo, por circuitos eletrônicos tiristorizados com carga resistiva.

sendo que β^b representa a reatividade equivalente balanceada e as parcelas i_{rm}^b indicam as correntes mínimas (ou seja, com valor coletivo eficaz mínimo), necessárias para transmitir energia reativa total (W), através de um dado corte da rede (PAC).

Os termos balanceados para as componentes de correntes ativas e reativas referem-se a um circuito equivalente balanceado, contendo toda a potência ativa e energia reativa.

- *Correntes ativas desbalanceadas* são calculadas pela diferença de (5) e (8):

$$i_{am}^u = (G_m - G^b)v_m \tag{10}$$

- Similarmente as *correntes reativas desbalanceadas* são expressas por:

$$i_{rm}^u = (\beta_m - \beta^b)\hat{v}_m \tag{11}$$

Observe que as correntes de desbalanço apenas existem se a condutância e/ou reatividade de fase equivalente são diferentes em uma ou mais fases.

Assim, a corrente de desbalanço total e seu valor coletivo eficaz são definidos por:

$$\begin{gathered} i_m^u = i_{am}^u + i_{rm}^u \\ \underline{i}^u = \underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u \Rightarrow \boldsymbol{I}^u = \sqrt{\boldsymbol{I}_a^{u\,2} + \boldsymbol{I}_r^{u\,2}} \end{gathered} \tag{12}$$

Portanto, o vetor de corrente pode ser decomposto como:

$$\underline{i} = \underline{i}_a^{\,b} + \underline{i}_r^{\,b} + \underline{i}^u + \underline{i}_v \tag{13}$$

Por definição, todas as componentes de corrente apresentadas anteriormente são ortogonais entre si. Portanto, o valor coletivo da corrente total resulta:

$$\boldsymbol{I} = \sqrt{\boldsymbol{I}_a^{b\,2} + \boldsymbol{I}_r^{b\,2} + \boldsymbol{I}^{u\,2} + \boldsymbol{I}_v^{\,2}} \tag{14}$$

Assim, a potência aparente foi definida como segue:

$$A = \boldsymbol{VI} = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2} \tag{15}$$

sendo:

- $P = \boldsymbol{VI}_a^b$ é a potência ativa;
- $Q = \boldsymbol{VI}_r^b$ é a potência reativa;
- $N = \boldsymbol{VI}^u$ é a potência de desbalanço;
- $D = \boldsymbol{VI}_v$ é a potência de distorção.

A potência reativa é devida às correntes reativas balanceadas (9) e consequentemente, a energia reativa (4). Entretanto, como discutido em [21],[22], a potência reativa é influenciada pela frequência da rede e pela distorção total de tensão. A potência de desbalanço é associada aos diferentes valores da condutância e reatividade de fase (carga desbalanceada). No caso de circuitos monofásicos, tais componentes desaparecem. E finalmente, a potência de distorção é relacionada com as não linearidades entre a tensão e a corrente (existência de elementos não lineares). Maiores detalhes podem ser encontrados em [22].

Considerando a definição de potência aparente de (15), os autores da *CPT* também definiram um *fator de potência global*, como em (16), o qual pode ser calculado para um circuito genérico, independente das distorções na forma de onda, desequilíbrios e/ou assimetrias. Ele representa a eficiência global da carga sob certa condição de tensão de alimentação.

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2}} \tag{16}$$

Esta definição de fator de potência é afetada não apenas pela diferença de fase entre tensão e corrente, mas também pelo desbalanço e por não linearidades entre a corrente da carga e a tensão da fonte de alimentação.

III. ESTRATÉGIAS DE COMPENSAÇÃO

A. Metodologia seletiva de geração dos sinais de referência

O principal objetivo deste artigo é mostrar a viabilidade de uma estratégia de geração seletiva de sinais de referência, para o controle de filtros ativos, a qual se baseia na decomposição ortogonal das correntes, como definido na seção anterior. Assim, cada componente de corrente (reativa balanceada, desbalanço e residual) pode ser aplicada para compensar distúrbios elétricos específicos.

1) Compensação das correntes reativas balanceadas: de (9) pode-se observar que as correntes reativas balanceadas (i_{rm}^b) desaparecem se a energia reativa total absorvida no PAC for nula. Isto significa que a compensação dos reativos requer a emulação de uma parcela de energia reativa que seja oposta a W da rede não compensada.

$$i_{rm}^{\;b\;C} = \frac{W^C}{\hat{\boldsymbol{V}}^2}\hat{v}_m = \frac{-W}{\hat{\boldsymbol{V}}^2}\hat{v}_m = -i_{rm}^b \tag{17}$$

No caso trifásico, tais correntes podem ser compensadas sem a necessidade de armazenadores de energia, tal como proposto na *Teoria pq* [15].

2) Compensação das correntes de desbalanço: de (12) as correntes de desbalanço ($i_m^u = i_{am}^u + i_{rm}^u$) também podem ser compensadas por meio da associação não homogênea das correntes ativas e reativas entre as fases. Isto significa:

$$i_m^{u\,C} = (i_{am} - i_{am}^b)^C + (i_{rm} - i_{rm}^b)^C = -i_\mu^u \tag{18}$$

3) Compensação das correntes residuais: com relação às correntes residuais, de (13), pode-se compensar as não linearidades da carga através de:

$$i_{vm}{}^C = -(i_m - i_{am}^b - i_{rm}^b - i_m^u) = -i_{vm} \tag{19}$$

4) Compensação das correntes não ativas: se o objetivo for a compensação de todos os distúrbios de regime permanente provocados pela carga, às correntes não ativas, conforme definido em (20), poderiam ser compensadas:

$$i_{nam}{}^C = -(i_{rm}^b + i_m^u + i_{vm}) = -(i_m - i_{am}^b) \tag{20}$$

Assumindo a utilização de condicionadores eletrônicos de potência (filtros ativos de potência), quaisquer componentes de corrente definidas anteriormente podem ser aplicadas na estratégia de controle para minimizar ou até mesmo, eliminar os distúrbios elétricos indesejáveis. No entanto, apesar dos grandes avanços da eletrônica de potência, este tipo de aplicação ainda é uma solução financeiramente cara.

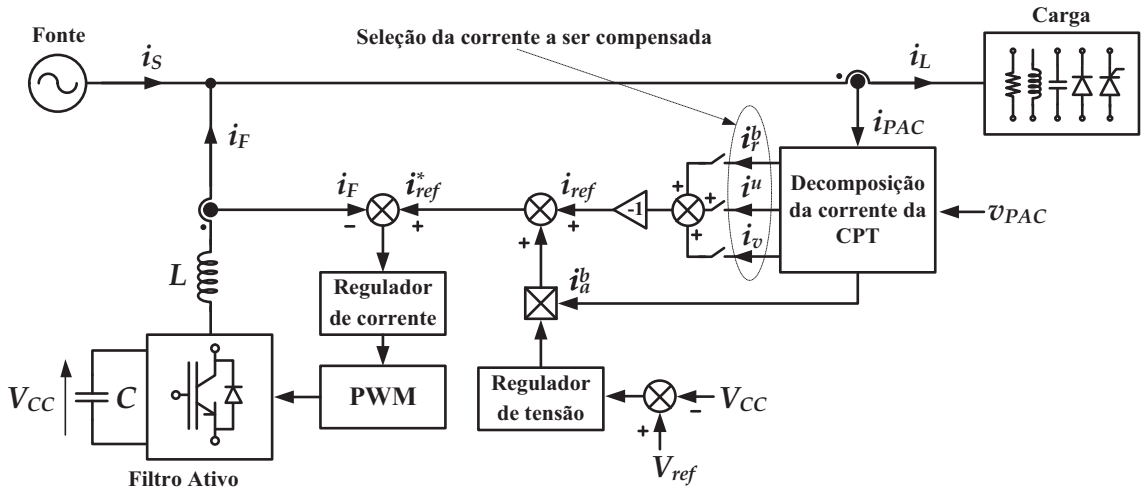


Fig. 1 Diagrama de blocos da metodologia seletiva de compensação proposta.

Assim, torna-se desejável uma estratégia de compensação que seja capaz de fornecer sinais de referência, a fim de garantir que determinados distúrbios possam ser compensados de forma independente ou em associação, permitindo a manutenção de valores aceitáveis para determinados indicadores de QEE e com uma relação de custo-benefício otimizada.

Desta forma, a Figura 1 ilustra o diagrama de controle de um filtro ativo, com base na metodologia seletiva de compensação proposta. Neste caso, quaisquer das correntes de compensação referidas anteriormente, ou quaisquer de suas combinações, podem ser aplicadas para minimizar, seletivamente, os distúrbios de corrente no PAC.

Inicialmente, todas as componentes ortogonais da corrente absorvida no PAC são determinadas de acordo com (7,8, 9,12), e as componentes indesejadas (17,18,19,20), individualmente ou suas combinações, podem ser utilizadas como sinais de referência para a compensação ($\underline{i}_{ref}$).

Para garantir tensão constante no barramento CC (V_{CC}) do filtro ativo, a saída do controlador de tensão é multiplicada pela corrente ativa balanceada ($\underline{i}_a^b$), de tal forma a definir uma referência de corrente adicional para ser somada à referência da corrente de distúrbio ($\underline{i}_{ref}$). O resultado é direcionado para o controlador de corrente do filtro ($\underline{i}_{ref}^*$). Assim, o filtro ativo deve atuar como um retificador controlado de alto fator de potência, durante condições transitórias de carga e como um compensador de corrente, sob condições de regime permanente.

Notar que não há necessidade de qualquer tipo de transformação de coordenadas ou algoritmo de sincronismo para fornecer os sinais de referência do filtro ativo.

B. Discussões adicionais

Vale destacar que se as tensões de fornecimento forem distorcidas e/ou desequilibradas, mesmo com a compensação das correntes não ativas (20), a corrente resultante (ativa balanceada) não será senoidal e equilibrada, isto porque esta depende da forma de onda das tensões (8), como no caso de uma carga resistiva balanceada. Entretanto, as não linearidades provocadas pela carga serão compensadas ou minimizadas, uma vez que são identificadas através da corrente residual (7). Portanto, neste caso não será possível a compensação dos distúrbios (harmônicas e/ou desequilíbrios) impostos pela fonte de alimentação.

Com relação à compensação das distorções de corrente, não é objetivo deste artigo comparar ou discutir se a melhor opção seria a compensação total da distorção harmônica das correntes (resultando uma corrente senoidal e equilibrada) ou a compensação das não linearidades da corrente com relação a tensão (resultando em uma corrente com a mesma forma de onda da tensão, ou seja, emulando uma carga resistiva balanceada). Este assunto foi tratado em outros artigos e discussões adicionais podem ser encontradas em [5,8,9].

De qualquer forma, se a opção fosse pela compensação de todas as distorções de corrente, a geração de sinais de referência para a compensação poderia ser feita de várias formas, independentemente de qualquer proposta de teoria de potência, assim como discutido em [9,19,25].

Com relação à resposta dinâmica do filtro ativo baseado nos sinais de referência propostos, pode-se afirmar que a resposta dinâmica do sistema em malha fechada depende basicamente da resposta do controlador de tensão CC do filtro ativo, o qual em geral, possui tempo de acomodação maior do que o tempo das decomposições propostas pela CPT (tipicamente da ordem de 1 a 2 períodos). Na próxima seção será apresentado um estudo de caso da resposta transitória do sistema de compensação proposto.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A fim de validar a estratégia de geração de referência para o controle do filtro ativo de potência, o circuito mostrado na Figura 2 foi simulado em software PSIM. O circuito é composto por um conjunto de cargas lineares (monofásicas e trifásicas) para gerar potência reativa e condições de desbalanço, e um retificador trifásico para gerar correntes não lineares. Um filtro ativo trifásico foi aplicado para demonstrar a flexibilidade das estratégias de compensação baseadas na *CPT*, não apenas para minimização de reativos e distorções, mas também para o desequilíbrio das correntes. Detalhes dos parâmetros da fonte de tensão, bem como das cargas e do filtro ativo podem ser encontrados na Tabela I.

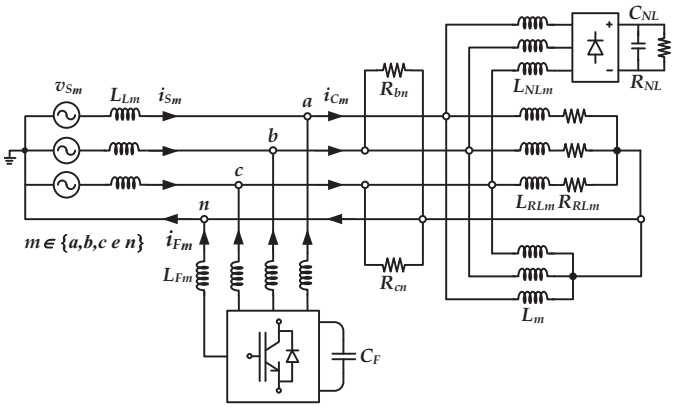


Fig. 2 Circuito para a validação das diferentes estratégias de compensação.

TABELA I
Parâmetros da carga, filtro ativo e fonte de tensão.

Parâmetros da carga		Filtro ativo de potência	
R_{bn}= 67Ω	R_{cn}= 33,5Ω	**Malha de tensão**	**Malha de corrente**
L_{RLm}= 15mH	R_{RLm}= 24,2Ω	K_P = 1,10	K_P = 1,26
L_m= 61,2mH		K_I = 10,87	K_I = 17010
L_{NLm}= 1mH		L_{Fm}= 1,5mH	
R_{NL}= 61,6Ω	C_{NL}= 2,35mF	C_F= 2,35mF	
Fonte trifásica (60Hz)			
v_{Sa} = 127∠0° V; v_{Sb} = 127∠-120° V; v_{Sc} = 127∠120° V			
L_{Lm} = 0,5mH			

Neste caso, o filtro ativo foi baseado em um conversor PWM trifásico, com quatro braços (tipo fonte de tensão), com frequência de amostragem e de chaveamento em 12,6kHz. A tensão do barramento CC foi controlada em 400V. Ambos os controladores de corrente e tensão no barramento CC foram baseados em reguladores Proporcional-Integral (PI), os quais foram projetados conforme discutido em [25].

Figura 3 mostra as tensões e correntes da carga no PAC antes da compensação. Observe que a tensão está ligeiramente distorcida e desbalanceada, por causa do impacto da carga sobre as impedâncias de linha. Além disso, há fluxo de corrente no condutor de retorno (i_n), devido principalmente às cargas lineares monofásicas (R_{bn} e R_{cn}).

As próximas seções descrevem os resultados de compensação assumindo diferentes sinais de referência ($\underline{i}_{ref}$), conforme indicado na Figura 1.

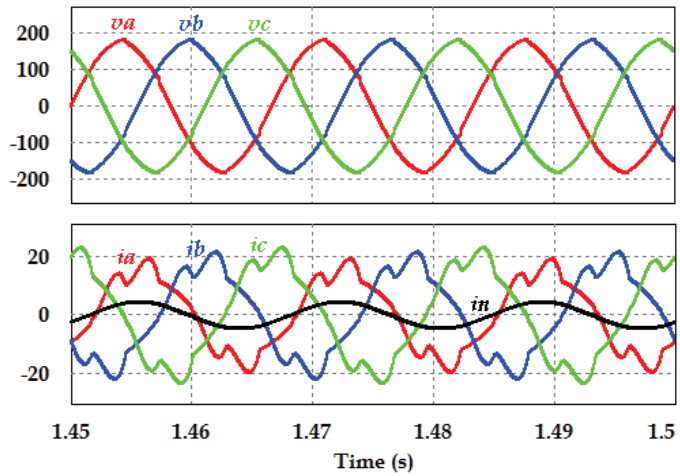


Fig. 3. Tensões e correntes no PAC antes da compensação.

1) Compensação de reativos: neste teste, o filtro ativo foi ajustado para eliminar apenas as componentes reativas balanceadas ($\underline{i}_{ref} = \underline{i}_r^b$). A Figura 4 mostra as tensões e as correntes no PAC após a compensação. Como esperado, as correntes de alimentação obtidas após a compensação estão praticamente em fase com as tensões, porém são desbalanceadas e distorcidas, já que as correntes residuais e de desbalanço não foram aplicados no controle do filtro ativo. Por isso, tanto a corrente de retorno, quanto os distúrbios das tensões não foram eliminados pela estratégia de compensação (vide Tabela II).

2) Compensação de desbalanço: neste caso o objetivo é compensar somente as componentes de desbalanço ($\underline{i}_{ref} = \underline{i}^u = \underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u$). A Figura 5 mostra as correntes no PAC após da compensação. Observar que as correntes permanecem distorcidas e defasadas com relação às tensões, mas são praticamente balanceadas. Além disso, a corrente no condutor de retorno foi praticamente eliminada. As tensões permanecem ligeiramente distorcidas, devido às distorções impostas pela carga não linear, sem a compensação da corrente residual.

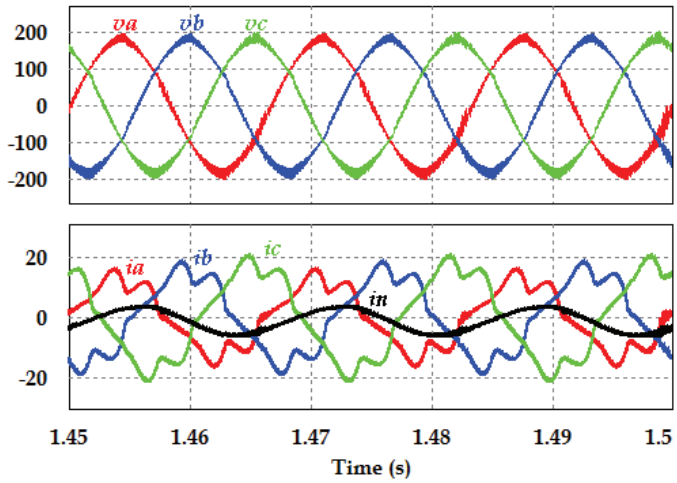


Fig. 4. Tensões e correntes no PAC após da compensação das correntes reativas balanceadas ($\underline{i}_r^b$).

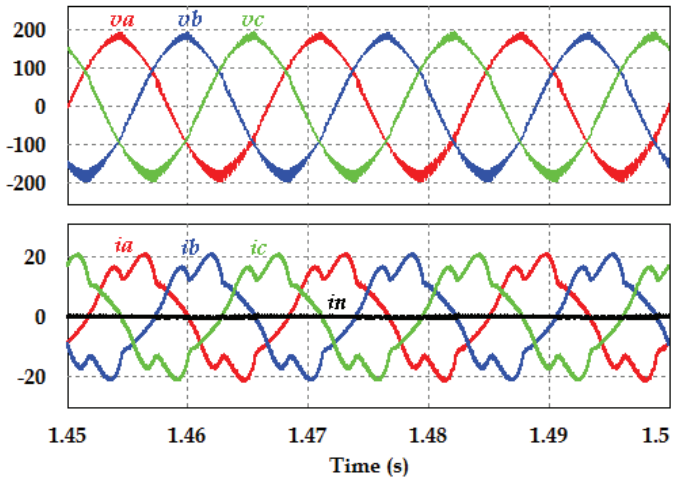


Fig. 5. Tensões e correntes no PAC após da compensação das correntes de desbalanço ($\underline{i}^u$).

3) Compensação das não linearidades: A Figura 6 mostra o caso no qual o filtro ativo foi configurado para compensar apenas as componentes residuais ($\underline{i}_{ref} = \underline{i}_v$). As correntes compensadas são praticamente senoidais, mas não são balanceadas e nem estão em fase com as tensões. Como esperado, a corrente que flui através do condutor de retorno praticamente não foi afetada pela estratégia de compensação. Porém, devido à eliminação das correntes harmônicas (não linearidades) geradas pela carga (componentes residuais), as distorções de tensão foram minimizadas.

4) Compensação total: neste caso o objetivo é compensar todas as características indesejáveis das correntes da carga ($\underline{i}_{ref} = \underline{i}_{na} = \underline{i} - \underline{i}_a^b = \underline{i}_r^b + \underline{i}^u + \underline{i}_v$), ou seja, reativos, desequilíbrios e não linearidades. O resultado das correntes no PAC após da compensação de $\underline{i}_{na}$ é apresentado na Figura 7. As correntes compensadas são praticamente senoidais e estão em fase com as tensões, tal como no caso de uma carga puramente resistiva balanceada. Notar que a corrente que flui através do condutor de retorno foi praticamente eliminada. Neste caso, a referência de corrente do quarto braço do filtro ativo foi configurada para ser $-(i_{Fa} + i_{Fb} + i_{Fc})$, onde i_F representa as correntes de saída do filtro ativo em cada fase. Além disso, pode-se observar que os distúrbios associados às tensões de fase também foram minimizados, uma vez que estes eram impostos pela carga.

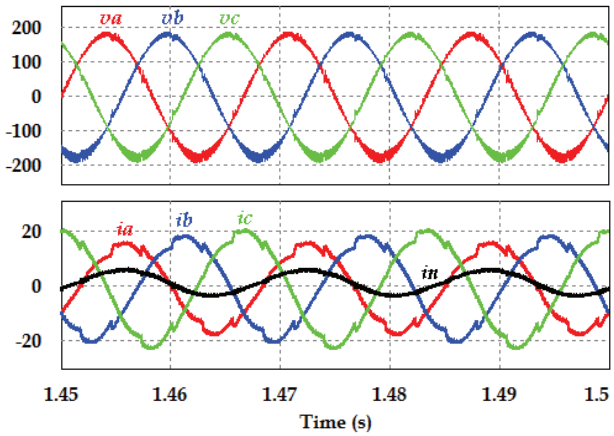


Fig. 6. Tensões e correntes no PAC após da compensação das correntes residuais ($\underline{i}_v$).

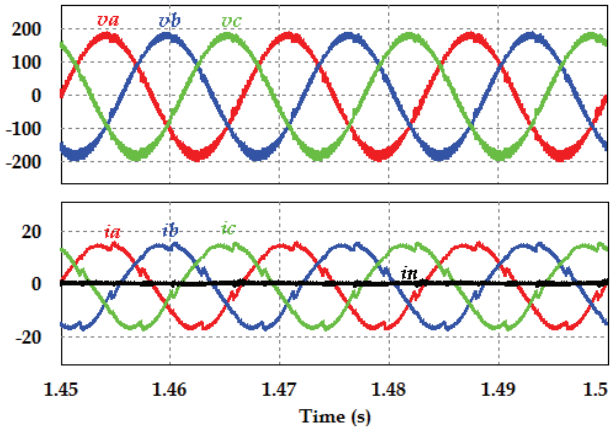


Fig. 7. Tensões e correntes no PAC após da compensação das correntes não ativas ($\underline{i}_{na}$).

Finalmente, as Tabelas II, III e IV apresentam todas as informações relativas à estratégia de compensação seletiva. Observe que o resultado da compensação seletiva pode influenciar bastante no projeto do compensador, de acordo com a escolha da corrente de distúrbio a ser compensada.

A Tabela II mostra que para cada componente de corrente indesejável compensada, a componente ativa balanceada ($\boldsymbol{I_a^b}$, responsável pela potência ativa) aumenta ligeiramente, indicando maior consumo de potência ativa, em função do aumento da tensão na rede (redução da queda de tensão na impedância de linha). Contrariamente, a corrente total ($\boldsymbol{I}$) diminui indicando uma redução das perdas e consequentemente, resultando num acréscimo no fator de potência, sendo este unitário para o caso da compensação das correntes não ativas.

Da Tabela II, podemos observar que a compensação das componentes reativas balanceadas ($\underline{i}_r^b$) resulta num fator de potência relativamente elevado ($\lambda = 0{,}9686$) se comparado, por exemplo, com a norma brasileira que limita em 0,92. No entanto, não unitário, em função da influência das não linearidades e desequilíbrios não compensados.

Por outro lado, a Tabela III mostra que a compensação das correntes residuais ($\underline{i}_v$) leva aproximadamente aos mesmos níveis de distorção harmônica que no caso de compensação total ($\underline{i}_{na}$). Isto mostra claramente a flexibilidade da estratégia de compensação proposta, a qual poderia ser utilizada para atingir limites específicos da qualidade da energia elétrica.

Vale destacar que os valores de DHT_i por fase poderiam ser ainda bastante reduzidos se fossem utilizados controladores de corrente mais sofisticados, ao invés de reguladores PI, tais como os utilizados em [19]. No entanto, optou-se por manter os controladores PI nas simulações, para validação dos resultados experimentais que serão apresentados na próxima seção, uma vez que por limitações de processamento não foi possível a implementação de controladores mais sofisticados no protótipo desenvolvido.

TABELA II

Correntes coletivas eficazes das componentes de corrente, e fator de potência no PAC, antes e após a compensação.

	Sem compensação	Após a compensação de:			
		$\underline{i}_r^b$	$\underline{i}^u$	$\underline{i}_v$	$\underline{i}_{na}$
$\boldsymbol{I}$ [A]	23,400	19,966	22,838	22,973	19,537
$\boldsymbol{I_a^b}$ [A]	19,117	19,339	19,131	19,206	19,471
$\boldsymbol{I_r^b}$ [A]	12,740	**0,888**	11,865	12,166	**0,878**
$\boldsymbol{I^u}$ [A]	2,553	2,724	**0,084**	3,029	**0,084**
$\boldsymbol{I_v}$ [A]	3,645	4,053	3,844	**1,299**	**1,323**
$\boldsymbol{\lambda}$	0,8170	0,9686	0,8377	0,8360	0,9966

TABELA III

Distorção harmônica da corrente no PAC antes e após a aplicação da estratégia de compensação.

	Sem compensação	Após a compensação de:			
		$\underline{i}_r^b$	$\underline{i}^u$	$\underline{i}_v$	$\underline{i}_{na}$
$\boldsymbol{DHT_{ia}}$ [%]	17,42	23,18	16,07	8,01	7,95
$\boldsymbol{DHT_{ib}}$ [%]	15,61	19,57	16,14	7,33	8,04
$\boldsymbol{DHT_{ic}}$ [%]	13,93	16,61	16,28	6,72	8,07

A Tabela IV indica os valores RMS das correntes através do filtro ativo. Observe que se o filtro ativo for projetado para compensar as correntes residuais ($\underline{i}_v$), o conversor de potência deve suportar uma corrente de saída aproximadamente 66% menor do que no caso de compensação das correntes não ativas ($\underline{i}_{na}$). Isto, certamente influenciaria nas especificações dos elementos passivos e ativos do filtro ativo de potência e nos custos de sua instalação.

5) Compensação da corrente não ativa durante transitório de carga: Com o objetivo de avaliar a resposta dinâmica do sistema, foi imposto um degrau de carga de 57% para 100% de potência nominal (no instante 1,2 segundos).

As formas de onda das tensões e correntes no PAC antes e após da compensação, bem como a tensão no barramento CC do filtro ativo são apresentadas na Figura 8.

Verifica-se que apesar da resposta dinâmica relativamente lenta da tensão do elo CC (em torno de 200ms), a resposta do gerador de sinais de referência e dos controladores de corrente é muito mais rápida, levando à convergência do sistema de compensação em pouco mais de 1 ciclo da tensão da rede. Observar que as correntes compensadas são praticamente senoidais mesmo durante as condições transitórias.

6) Compensação da corrente não ativa sob tensão distorcida e desequilibrada: finalmente, com o intuito de generalizar a aplicação do algoritmo gerador de sinais de referência, o circuito da Figura 2 foi submetido a condições de tensões não senoidais (5% de 3ª e 5ª harmônica em cada fase) e desequilibradas (5%), como indicado na Tabela V. A Figura 9 mostra o resultado da compensação da corrente não ativa.

Observar que neste caso o filtro ativo não compensa os distúrbios impostos pela fonte de tensão, pois seu objetivo é a compensação dos distúrbios provocados pela carga. No entanto, as correntes no PAC após a compensação ($\underline{i}_{ref} = \underline{i}_{na}$), mostram-se em fase e com as mesmas formas de onda das tensões (como no caso de uma carga resistiva balanceada, com fator de potência unitário). Neste caso, a presença da corrente de retorno é imposta pelos distúrbios na fonte de alimentação.

TABELA IV
Correntes eficazes no filtro ativo de acordo com a estratégia de compensação.

	Compensação de:			
	$\underline{i}_r^b$	$\underline{i}^u$	$\underline{i}_v$	$\underline{i}_{na}$
I_{Fa} [A]	7,954	1,962	3,010	8,839
I_{Fb} [A]	7,941	0,540	3,132	8,672
I_{Fc} [A]	7,929	1,976	3,071	8,931
I_{Fn} [A]	1.068	3,263	1,355	3,342

TABELA V
Fonte de tensão não senoidal e desequilibrada.

$V_{sa} = 134,4\angle 0^0 + 6,72\angle 0^0 + 6,72\angle 0^0$
$V_{sb} = 127\angle -120^0 + 6,35\angle 3(-120^0) + 6,35\angle 5(-120^0)$
$V_{sc} = 120,2\angle 120^0 + 6,01\angle 3(120^0) + 6,01\angle 5(120^0)$

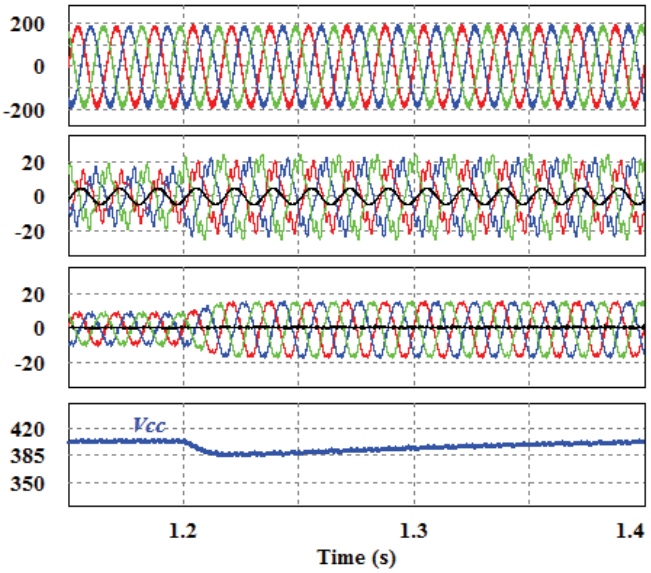


Fig. 8. Transitório de carga de 57% para 100% da potência nominal. De cima para baixo: tensões no PAC, correntes no PAC antes e após a compensação das correntes não ativas ($\underline{i}_{na}$) e tensão no barramento CC do filtro ativo.

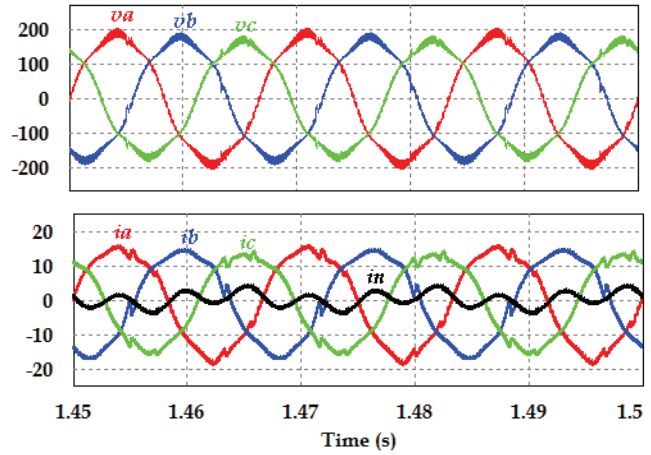
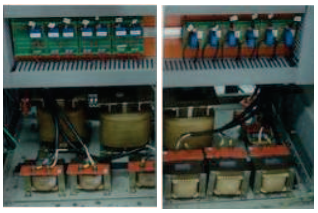


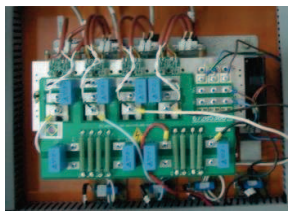
Fig. 9. Tensões e correntes no PAC após da compensação das correntes não ativas ($\underline{i}_{na}$), com tensões distorcidas e desequilibradas.

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o intuito de avaliação experimental e assumindo-se o mesmo circuito indicado na Figura 2, um protótipo de filtro ativo trifásico foi construído no laboratório do GASI/UNESP (vide Figura 10). Com exceção da capacitância do barramento CC (9,4 mF) e dos parâmetros dos controladores de tensão CC (K_p=3,66; K_i=30,18) e de corrente (K_p=1,36; K_i=9040), os outros parâmetros são idênticos aos indicados na Tabela I. A Figura 11 ilustra as correntes no PAC e a tensão da fase b antes da compensação. Similarmente ao caso simulado, a tensão se apresenta ligeiramente distorcida, por causa da queda de tensão sobre as impedâncias de linha. Além disso, há presença de corrente no condutor de retorno (Figura 12), devido às cargas lineares monofásicas (R_{bn} e R_{cn}).



a) Sensores de tensão e corrente e indutores de acoplamento.



b) Conversor de quatro braços.

Fig. 10. Protótipo de filtro ativo trifásico implementado no GASI.

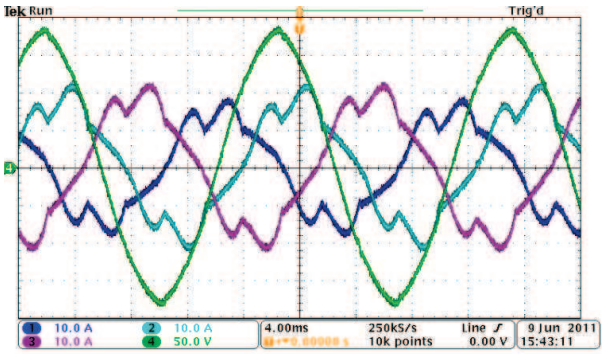


Fig. 11. Correntes e tensão na fase "b" no PAC, antes da compensação.

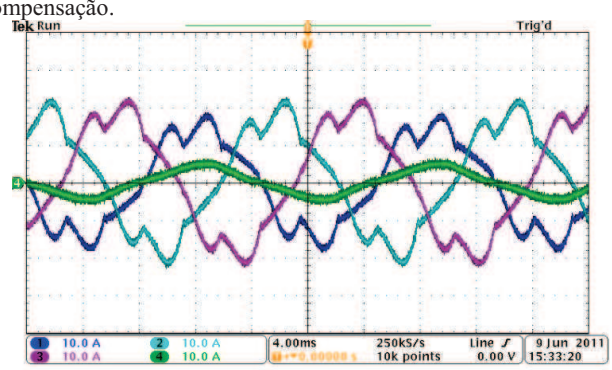


Fig. 12. Correntes de fase (canais 1, 2 e 3) e corrente no retorno (canal 4), antes da compensação.

1) Compensação total: o resultado das correntes no PAC após a compensação das correntes não ativas é mostrado na Figura 13. As correntes compensadas são praticamente senoidais, balanceadas e em fase com as tensões no PAC (veja fase b), tal como no caso de uma carga trifásica puramente resistiva e balanceada, uma vez que todos os distúrbios indesejados ($\underline{i}_{ref} = \underline{i}_{na}$) foram compensadas. Além disso, as distorções nas tensões do PAC também foram reduzidas. A Figura 14 mostra que a corrente no condutor de retorno foi minimizada.

2) Compensação das não linearidades: a Figura 15 mostra o resultado das correntes no PAC após a compensação das correntes residuais. As correntes compensadas são praticamente senoidais, porém, elas não são balanceadas e não estão em fase com as tensões (veja fase b), uma vez que apenas as não linearidades da corrente ($\underline{i}_{ref} = \underline{i}_{v}$) foram compensadas. A Figura 16 mostra que a corrente de retorno não foi compensada, uma vez que as componentes de desbalanço não foram compensadas.

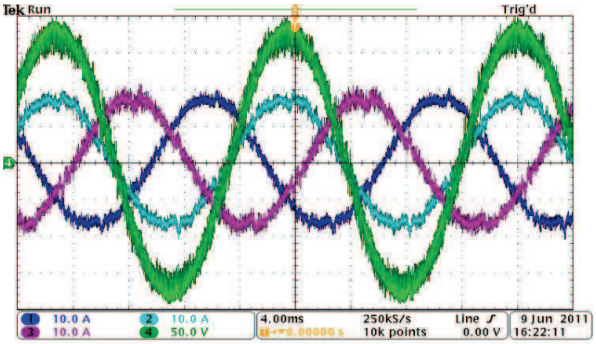


Fig. 13. Correntes e tensão da fase "b" no PAC, após da compensação das correntes não ativas ($\underline{i}_{na}$).

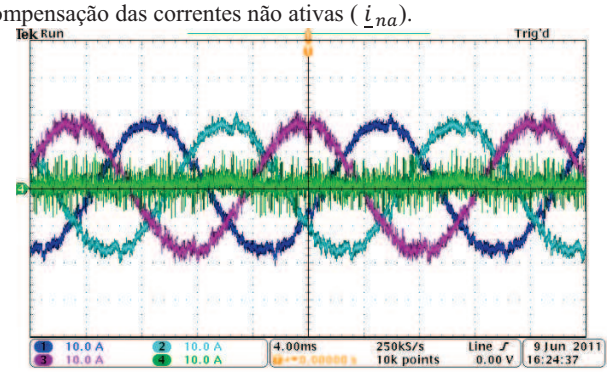


Fig. 14. Correntes de fase (canais 1, 2 e 3) e corrente no retorno (canal 4), após da compensação das correntes não ativas ($\underline{i}_{na}$).

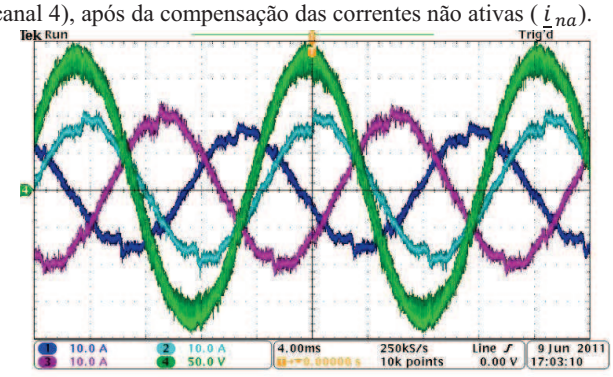


Fig. 15. Correntes e tensão da fase "b" no PAC, após a compensação das correntes residuais ($\underline{i}_{v}$).

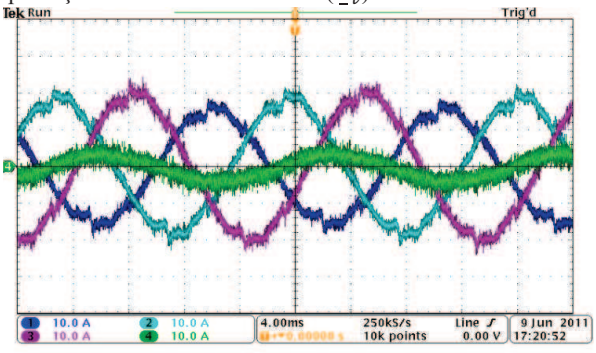


Fig. 16. Correntes de fase (canais 1, 2 e 3) e corrente no retorno (canal 4), após da compensação das correntes residuais ($\underline{i}_{v}$).

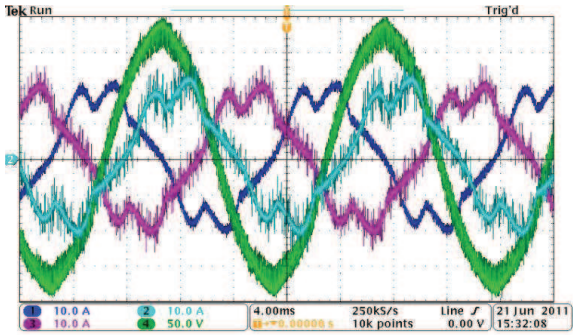


Fig. 17. Correntes e tensão da fase "b" no PAC, após da compensação das correntes de desbalanço ($\underline{i}^u$).

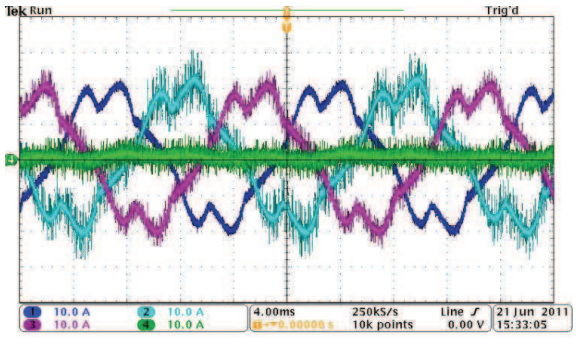


Fig. 18. Correntes de fase (canal 1, 2 e 3) e corrente no retorno (canal 4), após da compensação das correntes de desbalanço ($\underline{i}^u$).

3) Compensação de desbalanço: neste caso o objetivo é compensar apenas as componentes de corrente de desbalanço ($\underline{i}_{ref} = \underline{i}^u$). A Figura 17 mostra o resultado da compensação. Notar que as correntes compensadas permanecem distorcidas e defasadas em relação às respectivas tensões de fase, entretanto, elas estão praticamente balanceadas. Finalmente a Figura 18 indica que a corrente no condutor de retorno (neutro) foi minimizada.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia seletiva para a escolha da estratégia de compensação de distúrbios de corrente, a qual é baseada na Teoria de Potência Conservativa. Como verificado, diferentes resultados de compensação podem ser alcançados por meio da compensação das diferentes componentes das correntes, através dos filtros ativos de potência. Isto é possível em função da ortogonalidade entre as componentes das correntes decompostas pela CPT.

É importante destacar a flexibilidade e seletividade desta metodologia, a qual permite ao projetista definir qual ou quais distúrbios elétricos devem serem minimizados (reativos, desbalanço ou não linearidades) ou também qual a porcentagem destas quantidades, baseado, por exemplo, em limites específicos de normas, recomendações e padrões.

Foi demonstrado que a escolha de uma ou outra componente de corrente a ser compensada pode influenciar nas especificações (principalmente no valor de corrente eficaz) dos elementos passivos e ativos do filtro ativo e consequentemente, nos custos de sua instalação.

Também foi evidenciado que a metodologia baseada na CPT, para a geração de sinais de referência de compensação de corrente, pode ser aplicada sob condições de tensões senoidais e equilibradas, bem como com tensões distorcidas e/ou desbalanceadas. De qualquer forma, as não idealidades da corrente, de responsabilidade da carga, serão identificadas.

Considerando os resultados de compensação apresentados, ainda deve ser possível uma melhora significativa de eficiência, mediante a substituição dos controladores de corrente utilizados, por exemplo, por um controlador repetitivo, como proposto em [19]. Este será assunto para futuros trabalhos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradem o suporte financeiro da FAPESP e do CNPq no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] F. Z, Peng, "Harmonic Sources and Filtering Approaches," *IEEE Industry Application Magazine*, pp. 18-25, Jul./Aug., 2001.

[2] J. C. Das, "Passive Filters-Potentialities and limitations", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 232-241, January/February 2004.

[3] 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.

[4] B. Singh, V. Verma, A. Chandra and K. Al-Haddad, "Hybrid Filter for Power Quality Improvement", *IEE Proc.-Gener. Transmission and Distribution* vol. 152, no. 3, pp. 365-378, May 2005.

[5] A. Cavallini, G. C. Montanari, "Compensation Strategies for Shunt Active-Filter Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, no. 6, pp. 587-593, November 1994.

[6] M. Aredes, J. Häfner, K. Heumann, "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 311-318, March 1997.

[7] R. F. Pinheiro, C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, E. R. Cabral da Silva, "A Revision Of The State Of The Art In Active Filters", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, pp. 857-86*2, 1999.

[8] T. E. N. Zuñiga, M. V. Ataíde, J. A. Pomilio, "Filtro Ativo de Potência Sintetizando Cargas Resistivas", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 5, no. 1, pp. 35-42, 2000.

[9] F. P. Marafão, S. M. Deckmann, J. A. Pomilio, R. Q. Machado, "Control Strategies to Improve Power Quality", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência,* pp. 378-387, 2001.

[10] M. Aredes, L. F. C. Monteiro, "Compensation Algorithms based on Instantaneous Powers Defined in the Phase *Mode and in the αβ0 Reference Frame", Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, pp. 344-349, 2003.

[11] E. V. Salgado, M. Aredes, L. C. Monteiro, J. A. M. Moor, "Control Strategies for Active Power Line conditioners a Literature Review", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência,* pp. 990-994, 2003.

[12]J. A. M. Moor, M. Aredes, E. H. Watanabe, M. S. Ndiaye, "Evaluation of a Hybrid Control Strategy for Shunt Active Filter", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, pp. 298-303, 2005.

[13]R. F. de Camargo, H. A. Gründling e H. Pinheiro, "Filtro Ativo de Potência para Compensação de Harmônicas de Tensão em Sistemas de Distribuição Trifásica a Quatro Fios", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 12, no. 1, pp. 63-70, 2007.

[14]J. Dias, T. D. C. Busarello, L. Michels, C. Rech, M. Mezaroba, "Control Digital Simplificado para um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 16, no. 3, pp. 212-221, 2011.

[15]H Akagi Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", *IEEE Transactions on Industrial Application*, vol. 20, no. 3, pp. 625-630, May/June 1984.

[16]E. H. Watanabe, H. Akagi, and M. Aredes, "Instantaneous p-q Power Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems", *Przegląd Elektrotechniczny*, (*Electrical Review*), vol. 84, no. 6, pp. 28-37, 2008.

[17]L. F. Penello, E. H. Watanabe, "Filtro ativo de potência tipo "shunt" com seleção da potência a ser compensada", *Revista Controle & Automação*, vol. 04, no.1, pp.31-37, 1993.

[18]G. Casaravilla, A. Salvia, C. Briozzo, E. H. Watanabe, "Control Strategies of Selective Harmonic Current Shunt Active Filter", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência,* pp. 432-437, 2001.

[19]F. P. Marafão, P. Mattavelli, S. Buso, S. M. Deckmann, "Repetitive-Based Control for Selective Active Filters Using Discrete Cosine Transform", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 9, no. 1, pp. 29-36, 2004.

[20]B. Singh, V. Verma, "Selective compensation of power-quality problems through active power filter by current decomposition", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 792–799, Apr. 2008.

[21]P. Tenti, H. K. M. Paredes, P. Mattavelli, "Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 664-673, March 2011.

[22]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, UNICAMP, 2011.

[23]H. K. M. Paredes, F. P. Marafão, T. M. Terrazas and P. J. A. Serni, "Harmonic, Reactive and Unbalance Compensation by Means of CPT Framework", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência,* vol. 10, pp. 741-748, 2009.

[24]H. K. M. Paredes, L. C. P. da Silva, D. I. Brandão, F. P. Marafão. "Possible Shunt Compensation Strategies Based on Conservative Power Theory". *Przegląd Elektrotechniczny* (*Electrical Review*), vol. 87, no. 1, pp.34-39, 2011.

[25]M. G. Villalva, F. P. Marafão, M. M. Kubo, E. Ruppert F., "Practical rules for designing a shunt active power filter for non-linear unbalanced loads", *Congresso Brasileiro de Automação*, pp. 2802-2807, 2006.

DADOS BIOGRÁFICOS

Helmo Kelis Morales Paredes, nascido em Puno, Perú, é engenheiro eletricista (2002) pela Universidad Nacional San Agustin UNSA, Arequipa, Perú, mestre e doutor em Engenharia Elétrica (2006 e 2011 respectivamente) pela Universidade Estadual de Campinas. De 10/2009 a 06/2010 foi pesquisador visitante na Universidade de Padova, Itália, onde trabalhou no desenvolvimento da Teoria de Potência Conservativa e suas aplicações em redes inteligentes de energia. Atualmente, é professor assistente doutor no Campus de Sorocaba da UNESP, onde faz parte do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI). Suas principais áreas de interesse são qualidade da energia elétrica, definição de teorias de potência na presença de distorções e assimetrias, bem como sua aplicação no condicionamento de energia, atribuição de responsabilidades e tarifação.

Dr. Paredes é membro da SOBRAEP e do IEEE.

Danilo Iglesias Brandão, nasceu em São Gonçalo do Sapucaí, MG, em 22/10/1986. Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Estadual Paulista – UNESP/Sorocaba (2011) e atualmente é mestrando em engenharia elétrica pela Universidade Estadual Paulista – UNESP/Bauru. Suas áreas de interesse são: filtros eletrônicos de potência, estratégias de compensação seletiva, teoria de potência conservativa, qualidade de energia elétrica e redes inteligentes de energia.

Eduardo Verri Liberado, nasceu em São Paulo em 1986. Graduou-se pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) em Engenharia de Controle e Automação em 2009. Atualmente é mestrando da Faculdade de Engenharia de Bauru/UNESP, fazendo parte do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI) da UNESP/Sorocaba. Têm com principais temas de pesquisa: qualidade de energia elétrica, estratégias de condicionamento de energia elétrica em sistemas distribuídos, micro redes e redes inteligentes de energia.

Fernando Pinhabel Marafão, nascido em 26/09/1975 em José Bonifácio (SP) é graduado em Engenharia Elétrica pela UNESP/Bauru (1998), tem mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UNICAMP (2000 e 2004). Em 2002 foi pesquisador visitante na Universidade de Padova, Itália, onde trabalhou com técnicas de controle digital aplicadas a filtros ativos de potência. Desde 2005, é professor assistente doutor no Campus de Sorocaba da UNESP, onde liderou o Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI), de 2007 a 2011. Suas principais áreas de interesse são análise e controle da qualidade de energia, teorias de potência para circuitos polifásicos não lineares e, técnicas de processamento e controle digital aplicadas a sistemas de potência.

Dr. Marafão é membro da Sobraep, da SBA e do IEEE.