

Resultados de Simulações de um Filtro Activo Paralelo com Controlo baseado na Teoria p-q

Emílio F. Couto ⁽¹⁾, Júlio S. Martins ⁽²⁾, João L. Afonso ⁽³⁾

Departamento de Electrónica Industrial – Universidade do Minho
Campus de Azurém – 4800-058 Guimarães - Portugal

⁽¹⁾ assel.couto@clix.pt ⁽²⁾ jmartins@dei.uminho.pt ⁽³⁾ jla@dei.uminho.pt

Resumo

O presente artigo descreve um filtro activo paralelo com sistema de controlo baseado na teoria p-q, e apresenta resultados de simulações que mostram sua operação com diferentes tipos de cargas.

Primeiramente a teoria p-q, e a sua aplicação no controlo de filtros activos paralelos, é explicada de forma breve. A seguir é feita uma introdução à ferramenta de simulação *Matlab/Power System Blockset*, utilizada na avaliação do desempenho do filtro activo.

Por fim são apresentados os resultados das simulações realizadas com cargas de diferentes tipos, lineares e não lineares, em regime permanente e transitório.

O filtro activo paralelo permite compensar harmónicos de corrente, potência reactiva e cargas desequilibradas, apresentando uma boa resposta dinâmica e em regime permanente, como pode ser observado pelos resultados das simulações.

Palavras-Chave: Qualidade de Energia Eléctrica, Filtro Activo Paralelo, Teoria p-q, Simulação Computacional, Compensação de Harmónicos.

1. Introdução

O uso intensivo de conversores de potência e de cargas não lineares na indústria e por consumidores em geral tem aumentado a deterioração das formas de onda da tensão e da corrente nos sistemas de potência. A presença de harmónicos nas linhas de alimentação resulta em variados problemas, como aumento das perdas nos sistemas de distribuição, problemas de interferência electromagnética em linhas de comunicação e, por vezes, em falhas de operação em equipamentos electrónicos, traduzindo-se em alguns sectores de actividade, como indústria e edifícios de escritórios, em elevados prejuízos e perdas ao nível da produção e da informação.

Devido a este conjunto de problemas, a qualidade de energia entregue aos consumidores finais é, mais do que nunca, objecto de grande preocupação, sendo obrigatório resolver o problema dos harmónicos causados pelos equipamentos considerados “poluentes” (como exemplos: variadores de velocidade, conversores estáticos, UPS’s, PC’s, etc...).

Os filtros passivos têm sido utilizados como solução para resolver o problema dos harmónicos de corrente, mas apresentam algumas desvantagens: só filtram as frequências para as quais foram dimensionados previamente; a sua operação não pode ser limitada só a uma determinada carga; fenómenos de ressonância podem ocorrer devido à interacção entre os filtros passivos e outras cargas, com resultados inesperados.

Neste artigo é apresentado um filtro activo paralelo com sistema de controlo baseado na teoria p-q, que permite compensar os harmónicos de corrente, equilibrar as cargas pelas três fases, eliminando a componente de sequência zero, e melhorar o factor de potência da instalação, diminuindo assim as perdas e aumentando a vida útil dos equipamentos.

2. Teoria p-q

A teoria p-q, ou “Teoria da Potência Instantânea”, foi proposta por *Akagi et al.* [1] [2] em 1983, com o objectivo de se desenvolver filtros activos de potência que permitissem responder, de uma forma eficaz e dinâmica, às situações de distorção e de desequilíbrio existentes nos sistemas eléctricos. Inicialmente foi desenvolvida apenas para sistemas trifásicos sem neutro, sendo mais tarde trabalhada para sistemas trifásicos com neutro por *Watanabe e Aredes et al* [3] [4].

Esta teoria tem por base o domínio do tempo, o que a torna válida para funcionamento em regime permanente ou transitório, bem como para formas de onda genéricas de tensões e correntes, permitindo o controlo dos filtros activos de potência em tempo real. A teoria p-q procede a uma transformação de um sistema de referência estacionário de coordenadas *a-b-c* para um sistema de coordenadas $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$. Esta transformação, conhecida por transformação de Clarke, é uma transformação algébrica, obtendo-se assim um novo sistema de referência também estacionário, onde as coordenadas α e β são ortogonais, e desvinculadas da coordenada 0 .

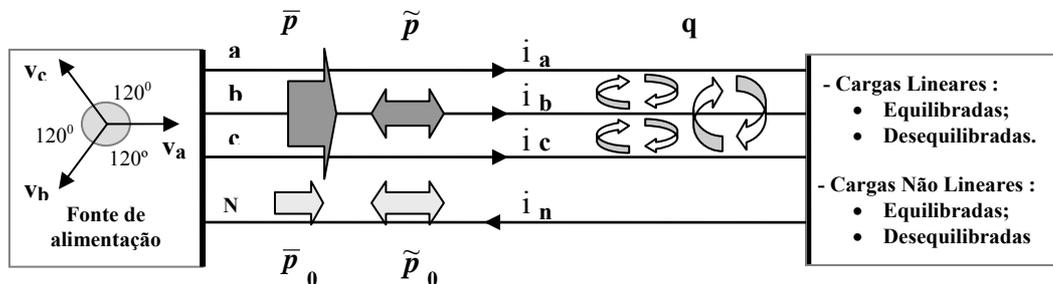


Fig. 1 –Componentes da teoria p-q num sistema de potência genérico

A Figura 1 permite observar as componentes da teoria p-q num sistema de potência genérico.

Cada uma das potências indicadas na Figura 1 tem o seguinte significado:

- \bar{p} - *Valor médio da potência real instantânea.* Corresponde à energia por unidade de tempo transferida da fonte de alimentação para a carga através das fases *a-b-c* do sistema trifásico.
- \tilde{p} - *Valor alternado da potência real instantânea.* Corresponde à energia por unidade de tempo trocada entre a fonte e a carga e vice-versa, através das fases *a-b-c*.
- \bar{p}_0 - *Valor médio da potência instantânea de sequência zero.* Corresponde à energia por unidade de tempo transferida da fonte para a carga através do neutro e de uma ou mais fases.
- \tilde{p}_0 - *Valor alternado da potência instantânea de sequência zero.* Corresponde à energia por unidade de tempo trocada entre a fonte e a carga através do neutro e de uma ou mais fases.
- q - *Potência imaginária instantânea.* Corresponde a uma potência que obrigatoriamente tem de circular entre as fases *a, b e c* do sistema trifásico, sem que com isso haja qualquer transferência de energia entre a fonte e a carga. Esta potência dá normalmente origem a correntes indesejáveis. É de salientar que a potência imaginária instantânea só existe em sistemas com mais de uma fase.

3. Filtro Activo Paralelo

De todas as potências da teoria p-q, apenas o valor médio da potência real instantânea (\bar{p}), e o valor médio da potência de sequência zero (\bar{p}_0), precisam ser fornecidos pela fonte de alimentação, pois somente estas componentes de potência efectivamente realizam trabalho junto da carga. Todas as outras potências podem ser compensadas com a utilização de um filtro activo paralelo como o apresentado na Figura 2. Ou seja, o filtro activo paralelo permite fazer a compensação das componentes de potência \tilde{p} e \tilde{p}_0 (que deixam de ser trocadas entre a carga e a fonte e passam a ser trocadas entre a carga e o filtro) e da potência q .

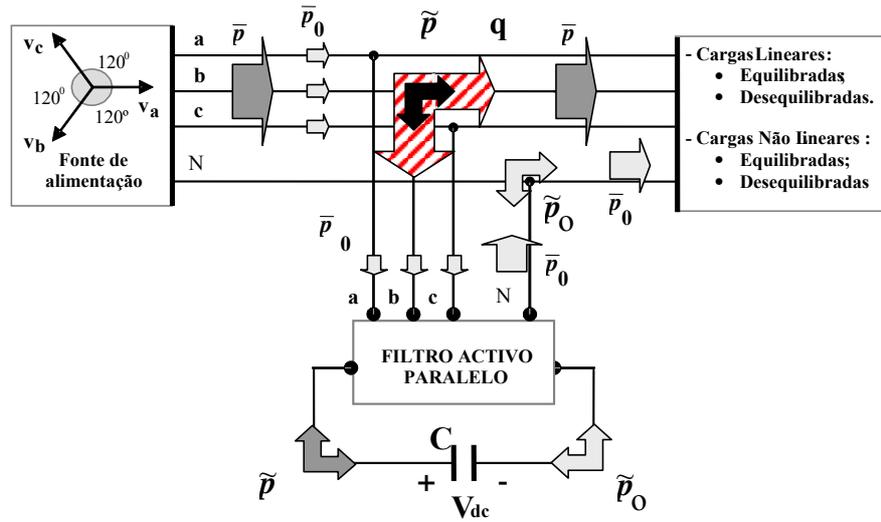


Fig. 2 – Componentes de potência da teoria p-q num sistema eléctrico genérico com aplicação de um filtro activo paralelo

Como se observa na Figura 3 o filtro activo é constituído pelo controlador (microprocessador *standard* - μP), pelo bloco inversor (constituído por IGBT's), barramento DC (condensador - C) e pelo bloco de acoplamento à rede (bobinas - L). É no controlador do filtro activo paralelo que os cálculos da teoria p-q se efectuam. Caso as tensões do sistema eléctrico sejam sinusoidais e equilibradas, a compensação de todas as potências indesejáveis levará a que as correntes na fonte se tornem também sinusoidais e equilibradas, e em fase com as tensões, sendo assim compensados os harmónicos de corrente, a potência reactiva e os desequilíbrios das cargas [5] [6].

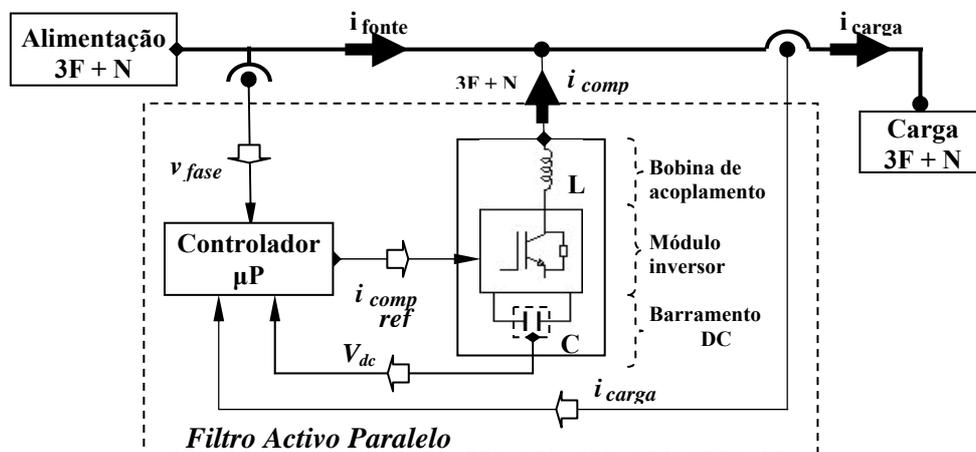


Fig. 3 – Constituição do filtro activo paralelo

4. Simulações com o *Matlab/Power System Blockset*

O *Power System Blockset* (PSB) é uma das *toolboxes* do *Matlab*, sendo uma ferramenta de projecto para modelagem e simulação de sistemas eléctricos de potência, que funciona dentro do ambiente de trabalho do *Simulink* [7]. A sua biblioteca contém blocos que representam dispositivos e componentes encontrados nos sistemas eléctricos, tais como: geradores, transformadores, linhas de transmissão, motores, disjuntores, diodos, tiristores, MOSFETs, etc. A maioria desses blocos é baseada em equações electromagnéticas e electromecânicas conhecidas, e utilizam símbolos eléctricos padronizados, tornando fácil a criação de modelos gráficos de sistemas eléctricos. A Figura 4 mostra o modelo desenvolvido no PSB para estudar o filtro activo paralelo com sistema de controlo baseado na teoria p-q em sistemas trifásicos com neutro.

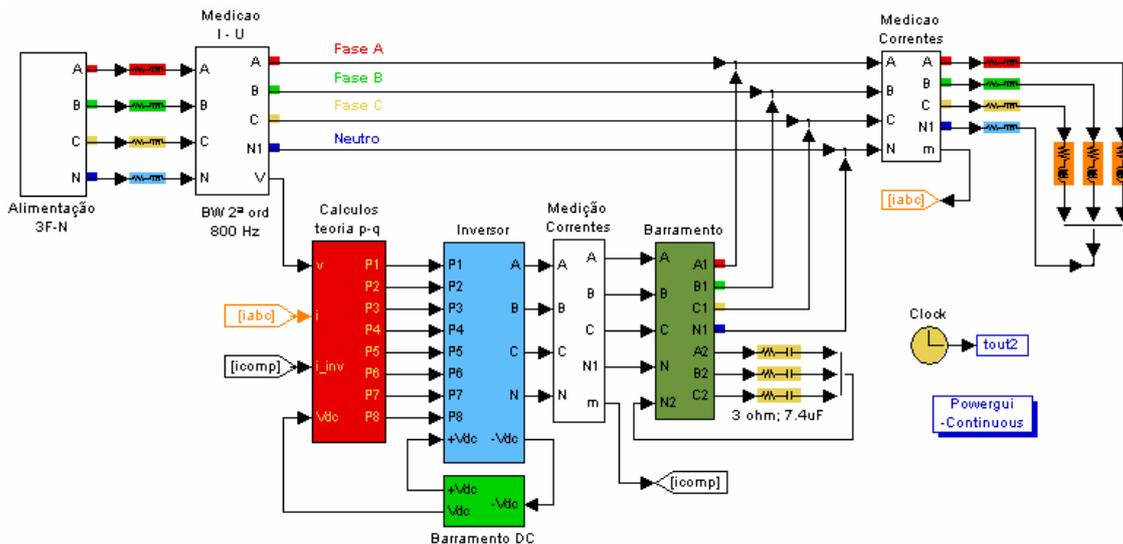


Fig. 4 – Modelo desenvolvido no *PSB* para o estudo do filtro activo paralelo

A Tabela 1 apresenta duas das várias diferentes cargas simuladas, que serviram de base ao estudo do funcionamento e análise do desempenho do filtro activo paralelo. No Caso 1 estuda-se o funcionamento em regime permanente e no Caso 2 em regime transitório.

Tabela 1 – Tipos de Cargas simuladas

	Esquema	Tipos de Cargas
Caso 1		<ul style="list-style-type: none"> • Carga não linear trifásica (Rectificador trifásico com carga RL ligada ao barramento DC – forma de onda de corrente não sinusoidal). • Carga linear monofásica RL ligada entre a fase <i>c</i> e o neutro (forma de onda de corrente sinusoidal). • Carga monofásica ligada entre as fases <i>b</i> e <i>c</i> (forma de onda de corrente sinusoidal). <p>– Funcionamento em regime permanente –</p>
Caso 2		<ul style="list-style-type: none"> • Carga linear trifásica do tipo RL (forma de onda de corrente sinusoidal). • Carga não linear trifásica (Rectificador trifásico com carga RL ligada ao barramento DC – forma de onda de corrente não sinusoidal); <p>– Funcionamento em regime transitório –</p>

Caso 1 – A Figura 5 apresenta respectivamente as correntes na carga, as correntes de compensação produzidas pelo filtro activo e as correntes na fonte, para as três fases e neutro. Observa-se que pela acção do filtro activo paralelo as correntes na fonte tornaram-se equilibradas, sinusoidais e em fase com as tensões. Além disso a corrente no neutro é eliminada. Logo são compensados os harmónicos, os desequilíbrios e a potência reactiva.

Na carga os valores eficazes das correntes são respectivamente para as fases *a*, *b*, *c* e neutro: 23 A, 42 A, 39 A e 15 A. Na fonte os valores eficazes das correntes são de 28 A para as 3 fases e zero para o neutro. Dessa forma, caso calculemos um valor eficaz equivalente para as correntes na carga e na fonte, dado por:

$$\text{Valor Eficaz Equivalente: } I_{RMS_EQ} = \sqrt{I_{RMS_a}^2 + I_{RMS_b}^2 + I_{RMS_c}^2 + I_{RMS_N}^2} \quad (1)$$

Obteremos os seguintes valores respectivamente para as correntes da carga e da fonte: 64 A e 48 A. Isto comprova a eficácia do filtro activo em reduzir as correntes nas linhas, minimizando assim as perdas nos condutores.

As simulações aqui apresentadas aproximam tanto quanto possível um sistema real, que utiliza um inversor cujos semicondutores de potência comutam a uma frequência de 20 kHz. Os atrasos inerentes ao sistema de controlo e à actuação do inversor dificultam a compensação de variações bruscas das correntes da carga, e explicam os picos que aparecem nas formas de onda das correntes da fonte.

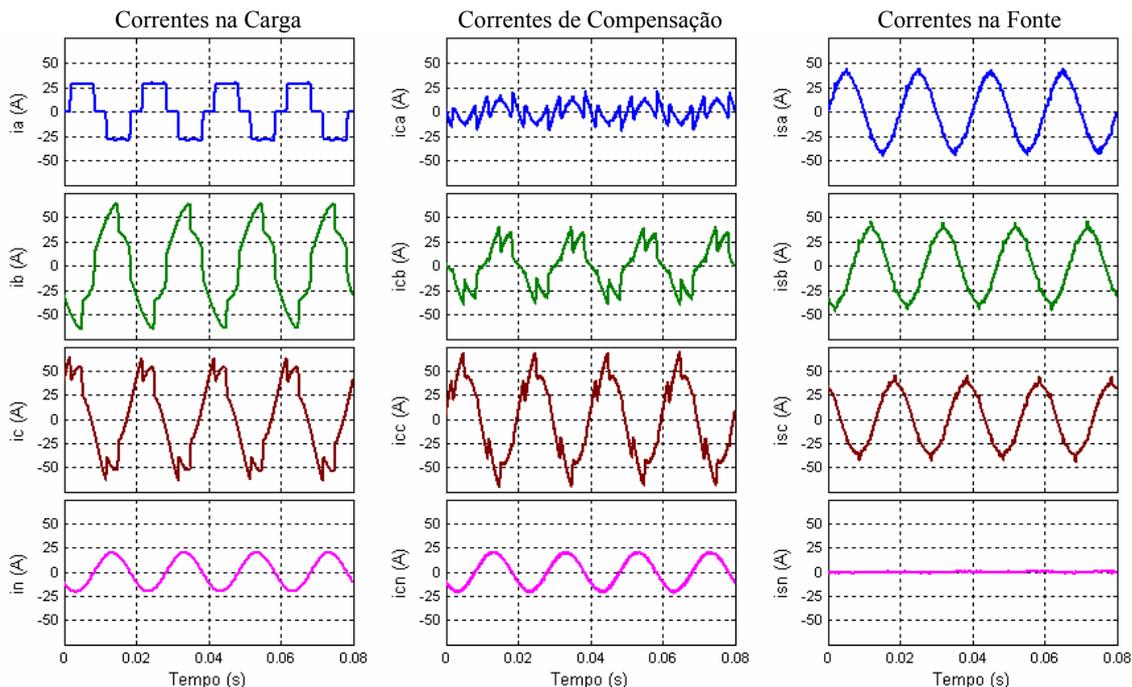


Fig. 5 – Correntes na carga, correntes de compensação e correntes na fonte para o Caso 1

Caso 2 – Na Figura 6 observa-se o comportamento transitório do filtro activo paralelo. Inicialmente a carga é constituída apenas por uma carga trifásica do tipo RL. Como as correntes consumidas são sinusoidais e equilibradas o filtro tem apenas a função de corrigir o factor de potência, reduzindo as correntes nas linhas. No instante $t = 0,1$ s um rectificador trifásico é ligado, tornando as correntes na carga distorcidas. Observa-se que num tempo de meio ciclo da frequência da rede (10 ms) após a alteração nas correntes da carga o filtro activo já produz as correntes de compensação adequadas, fazendo com que as correntes na fonte se tornem sinusoidais. Como as cargas são

equilibradas, não há corrente no neutro, e observa-se que o filtro activo não produz correntes indevidas no neutro durante o transitório de adaptação à mudança da carga.

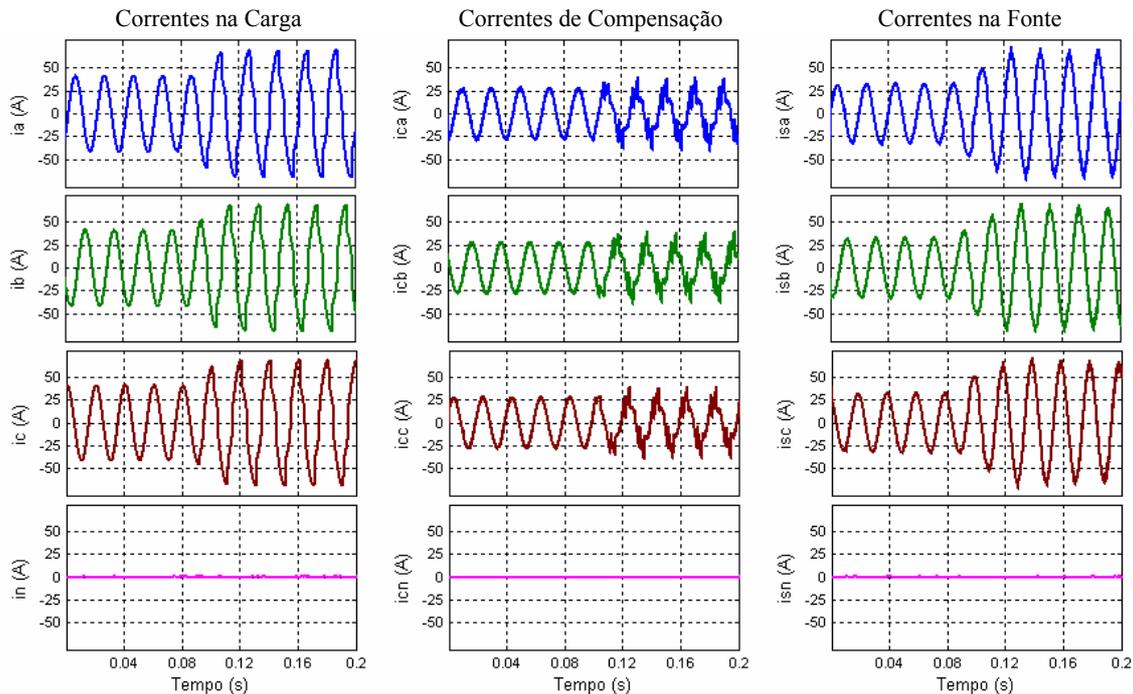


Fig. 5 – Correntes na carga, correntes de compensação e correntes na fonte para o Caso 2

5. Conclusões

Este artigo mostra através de simulações com o *Matlab/Power System Blockset* que a teoria p-q pode ser utilizada com sucesso na implementação do controlo de filtros activos paralelos, para compensar dinamicamente os harmónicos de corrente, potências reactivas e cargas desequilibradas (compensando a componente de sequência zero). O filtro activo paralelo foi testado com diferentes tipos de cargas, demonstrando um bom desempenho tanto em regime permanente quanto em regime transitório.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), financiadora do Projecto POCTI/ESE/41170/2001.

Referências

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, *Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three Phase Circuits*, IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf., Tokio, 1983, pp. 1375-1386.
- [2] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, *Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components*, IEEE Trans. Industry Applic., vol. 20, Maio/Junho 1984.
- [3] E. H. Watanabe, R. Stephan, M. Aredes, *New Concepts of Instantaneous Active and reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads*, IEEE Trans Power Delivery, vol 8, no. 2, Abril 1993, pp. 697-703.
- [4] M. Aredes, E. H. Watanabe, *New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters*, IEEE Trans. Power Delivery, vol 10, no. 3, Julho 1995, pp. 1649-1656.
- [5] João Afonso, Carlos Couto, Júlio Martins, *Active Filters with Control Based on the p-q Theory*, IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, vol 47, nº 3, Set. 2000, pp. 5-10.
- [6] J. L. Afonso, H. R. Silva e J. S. Martins, *Active Filters for Power Quality Improvement*, IEEE Power Tech'2001, Porto, Portugal, 10-13 Set. 2001.
- [7] PSB – Model-Based and System-Based Design, Modelling, Simulation, Implementation, version 5, The MathWorks, Julho 2002.