

Interface entre Fontes de Energia Renovável e a Rede Eléctrica

Ricardo L. Pregitzer, Tiago N. Sousa, Júlio S. Martins, João L. Afonso
rpregitzer@dei.uminho.pt; tsousa@dei.uminho.pt; jmartins@dei.uminho.pt; jla@dei.uminho.pt
Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

Resumo

Este artigo apresenta a modelação, simulação e análise de um sistema que realiza a interface entre fontes de energia renovável (como por exemplo, energia solar ou eólica) e a rede eléctrica. O objectivo é demonstrar que, utilizando um Filtro Activo de Potência do tipo Paralelo, composto por um andar inversor e por um sistema de controlo baseado na teoria p-q, é possível injectar energia na rede eléctrica e, simultaneamente, corrigir dinamicamente problemas de qualidade de energia eléctrica, tais como harmónicos de corrente ou factor de potência.

Palavras-chave: Filtro Activo Paralelo, Fontes de Energia Renovável, Teoria p-q, Qualidade de Energia Eléctrica, Interface com a Rede Eléctrica.

1. Introdução

A preocupação crescente a nível de aquecimento global e alterações climáticas impulsionou o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia eléctrica “amigas” do ambiente. Num futuro próximo, a rede eléctrica irá incluir uma quantidade assinalável de pequenos produtores que utilizam fontes de energia alternativa, tais como painéis solares fotovoltaicos ou unidades eólicas, entre outras.

Um dos problemas da ligação de pequenas instalações de energia renovável à rede eléctrica prende-se com a unidade de interface (inversor), que normalmente acaba por injectar correntes com forma de onda não sinusoidal, contribuindo para o aumento da poluição harmónica na rede eléctrica.

Este artigo apresenta a utilização de um Filtro Activo Paralelo (FAP) [1, 2] como interface entre fontes de energia renovável e a rede eléctrica. Esta solução permite que o fornecimento de energia eléctrica à rede seja feito através de correntes sinusoidais e, para além disso, permite a compensação dinâmica dos harmónicos de corrente e do factor de potência das cargas da instalação eléctrica a jusante do filtro. Utilizando o FAP como interface, mesmo que num determinado momento não exista energia disponível nas fontes de energia renovável, este continua a operar, compensando harmónicos de corrente e o factor de potência da carga. Para além disso, com o algoritmo de controlo utilizado, torna-se relativamente simples controlar o fornecimento de “energia” reactiva que deve ser fornecida à rede eléctrica, consoante a operação seja durante as horas de vazio ou fora das horas de vazio.

Na Figura 1 é possível observar o sistema completo em que a energia é retirada de painéis solares ou geradores eólicos recorrendo a um *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) por cada sistema gerador, de maneira a retirar o máximo de energia possível disponível num dado instante. Para carregar o condensador do FAP é utilizado um conversor DC-DC que eleva a tensão para o valor necessário à operação do inversor do filtro activo. A energia disponível é gerida pelo FAP consoante as necessidades, podendo ser utilizada para eliminar harmónicos, compensar factor de potência, alimentar as cargas ou injectar energia na rede eléctrica.

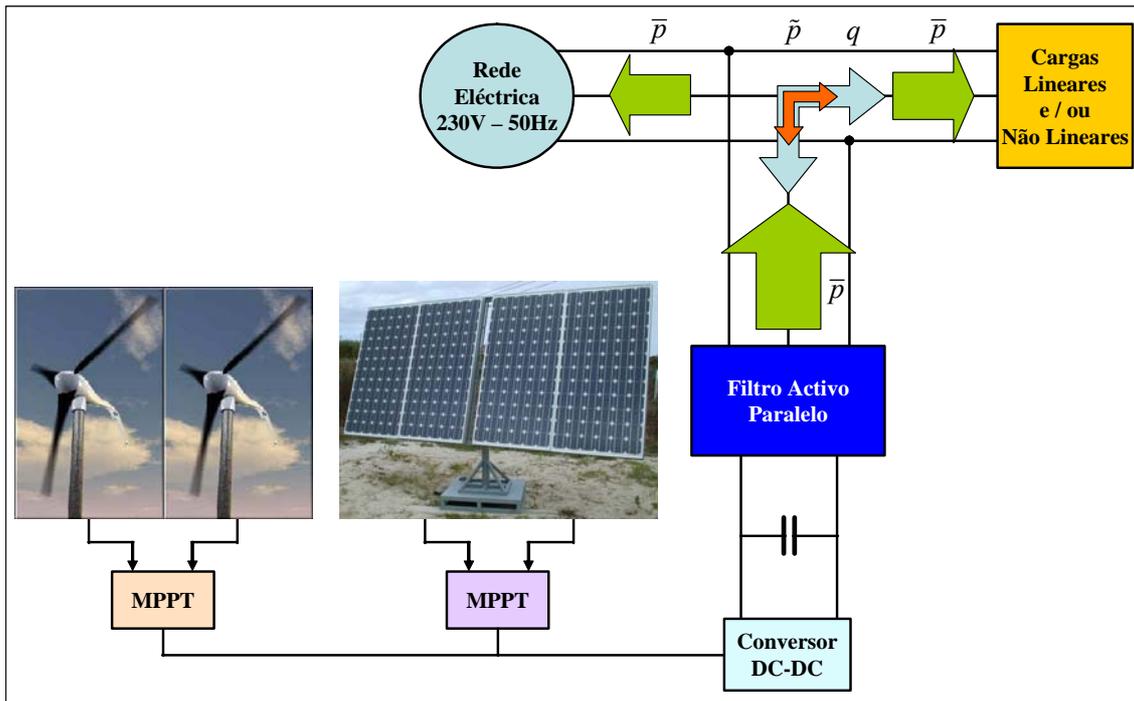


Fig. 1 – Interface e componentes da teoria p-q.

2. Teoria de Controlo a Aplicar ao Filtro Activo Paralelo

O FAP proposto utiliza a teoria p-q no seu sistema de controlo. Esta teoria foi desenvolvida por *Akagi et al.* [3], e consiste em fazer uma transformação de um sistema de referência estacionário de coordenadas *a-b-c* para um sistema de coordenadas α - β (transformação de Clarke), tanto para as tensões como para as correntes.

A potência instantânea em sistemas trifásicos sem neutro pode ser dividida em duas componentes:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na Figura 1 é possível observar as potências da teoria p-q num sistema trifásico. O significado físico de cada uma destas componentes é o seguinte:

- \bar{p} – Valor médio da potência real instantânea. Corresponde à energia por unidade de tempo transferida da fonte de alimentação para a carga;
- \tilde{p} – Valor alternado da potência real instantânea. Corresponde à energia por unidade de tempo trocada entre a fonte de alimentação e a carga;
- q – Potência imaginária instantânea. Corresponde à potência que circula entre as fases, sem que haja transferência ou troca de energia entre a carga e a fonte.

2.1 Fornecimento de Energia à Rede Eléctrica

Dado que neste caso específico as fontes de energia renovável carregam um condensador colocado no lado de corrente contínua do inversor do FAP, é introduzida uma nova potência, \bar{p}_{Att} , que corresponde à energia por unidade de tempo que essas fontes produzem. Esta energia é enviada para a rede eléctrica, reduzindo a potência \bar{p} que a fonte tem que injectar no sistema onde o FAP está inserido. No caso de \bar{p}_{Att} ser suficientemente elevado, torna-se possível injectar energia na rede eléctrica.

2.2 Regulação da Tensão no Condensador

É necessário que a tensão aos terminais do condensador (V_{cap}) se mantenha dentro de níveis adequados para garantir o funcionamento do inversor do FAP. Para tal é utilizado um controlador proporcional, que define a componente de potência p_{reg} :

$$p_{reg} = A \cdot (V_{ref} - V_{cap}) \quad (2)$$

Em (2) A corresponde ao ganho proporcional do controlador e V_{ref} à tensão de referência desejada para o condensador. A potência p_{reg} corresponde à troca de energia por unidade de tempo entre a fonte e o FAP.

Caso as fontes de energia alternativa estejam a fornecer energia suficiente, é possível anular este parâmetro, pois deixa de ser necessário recorrer à rede eléctrica para regular a tensão no condensador do barramento de corrente contínua.

2.3 Compensação das Potências

As potências injectadas pelo FAP são representadas por p_x e q_x , sendo convencionalmente que valores positivos de potência correspondem a potências fornecidas e valores negativos correspondem a potências recebidas.

$$p_x = p_{alt} - p_{reg} + \tilde{p} \quad (3)$$

$$q_x = q_G + q \quad (4)$$

Relativamente ao termo \bar{q}_G , este corresponde à “energia” reactiva capacitiva que por lei deve ser fornecida fora das horas de vazio. De acordo com a alínea d) do artigo 22º do decreto-lei n.º 313/95 de 24 de Novembro, os produtores de energia eléctrica devem fornecer uma quantidade de “energia” reactiva que corresponde a pelo menos 40 % da energia activa fornecida. Realça-se também que de acordo com a alínea e) desse mesmo artigo não deve ser fornecida à rede “energia” reactiva durante as horas de vazio. A “energia” reactiva fornecida em défice fora das horas de vazio e em excesso durante as horas de vazio será paga pelo produtor, de acordo com as tarifas fixadas pela Entidade Reguladora do Sector Energético (ERSE).

Com os valores das potências e das tensões no sistema e no elo DC, é possível determinar as correntes de referência que devem ser injectadas na rede eléctrica de maneira a que, teoricamente, as correntes na fonte sejam sinusoidais [4].

3. Simulações

Graças às simulações efectuadas em *Matlab/Simulink/SimPowerSystems* é possível confirmar a coerência da estratégia apresentada anteriormente, comprovando-se que, com o FAP, é possível controlar simultaneamente a filtragem de harmónicos, a correcção de factor de potência e o fornecimento de energia à rede. De notar que o controlador utilizado nas simulações é digital, podendo ser transferido, com pequenos ajustes para melhoria da eficácia computacional, para um microcontrolador [5]. A frequência de amostragem utilizada foi de 15 kHz, o que corresponde a adquirir 300 amostras por cada ciclo da rede (50 Hz).

Relativamente ao andar de potência do FAP, foi utilizado um inversor do tipo fonte de tensão de 2 níveis com IGBTs, cuja frequência máxima de operação é de 20 kHz. Para atenuar o ruído harmónico resultante da comutação dos semicondutores foi aplicado um filtro RC do tipo passa baixo. Foi também adicionada em série com cada braço do inversor uma indutância de 5 mH para limitar o *ripple* de corrente produzido pelo mesmo. O lado DC do inversor é composto por um condensador de 1 mF que está ligado ao conversor DC-DC do sistema de geração de energia eléctrica. A tensão de referência, V_{ref} , do elo DC é de 900 V.

O diagrama de blocos do modelo utilizado para efectuar as simulações pode ser observado na Figura 2.

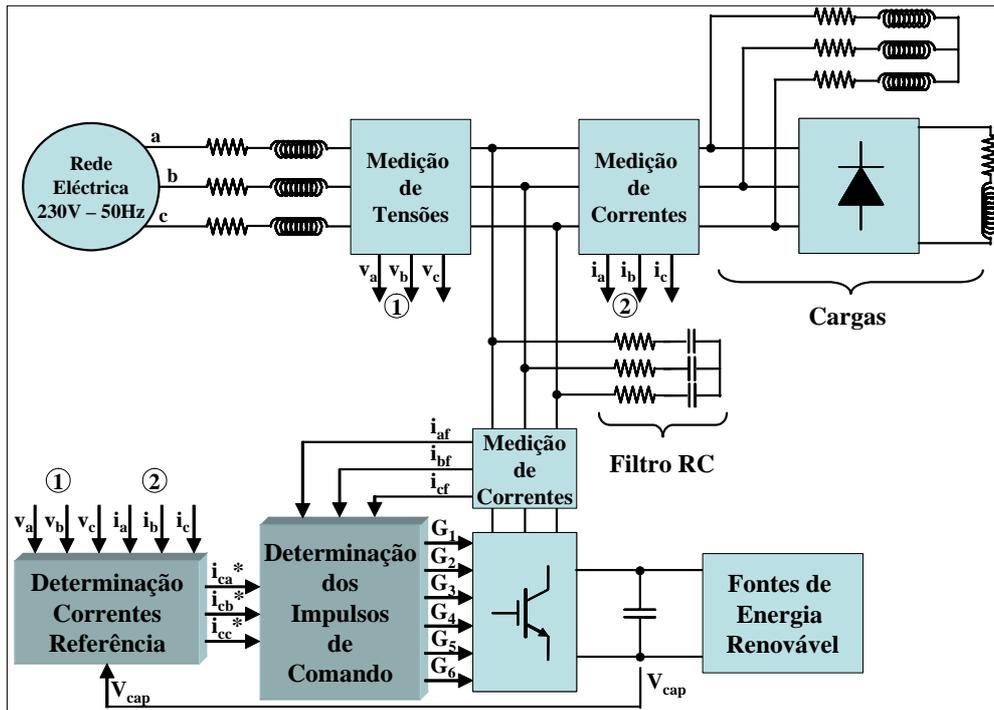


Fig. 2 – Diagrama de blocos do modelo de simulação do FAP a actuar num sistema trifásico sem neutro.

Para observar o FAP em funcionamento foram modelados cenários de simulação que visam demonstrar o comportamento do filtro activo em regime permanente, quer quando está apenas a corrigir problemas relacionados com a qualidade de energia eléctrica, quer quando está simultaneamente a injectar potência activa na rede eléctrica (nas horas de vazio e nas horas fora de vazio).

As cargas utilizadas nas diversas simulações foram as seguintes:

- Uma carga RL série trifásica ($R = 5,85 \Omega$; $L = 32,25 \text{ mH}$) que consome uma potência activa de 6,8 kW, apresentando um factor de potência de 0,5 indutivo;
- Uma ponte trifásica completa de díodos (não ideais) com uma carga RL série ($R = 28 \Omega$ e $L = 146 \text{ mH}$). A ponte consome uma potência activa de aproximadamente 10,2 kW. A corrente nas fases apresenta um conteúdo harmónico total (THD - *Total Harmonic Distortion*) de 29,4 %.

O conjunto a apresenta um factor de potência de 0,827 indutivo e consome uma potência activa aproximadamente igual a 17 kW. O THD da corrente nas fases é de 14,4 %. Já o THD das tensões, que surge devido à queda de tensão nas impedâncias das linhas ser não sinusoidal, é de 3,2 %. As formas de onda das correntes e das tensões na fonte são apresentadas na Figura 3.

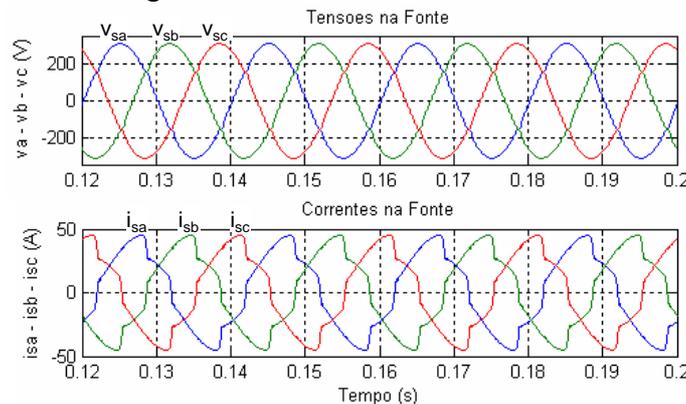


Fig. 3 – Sinais de tensão e corrente fornecidos pela fonte

3.1 Correção de harmónicos e factor de potência

O primeiro caso estudado consiste em utilizar o FAP apenas para correção dos problemas de qualidade de energia associados ao sistema eléctrico descrito anteriormente, sendo possível observar na Figura 4 os resultados obtidos com o filtro activo em operação. A partir das formas de onda desta figura observa-se que, com o FAP em funcionamento, o factor de potência se tornou unitário e que houve uma redução significativa no THD das correntes da fonte para 3,5 %. O THD das tensões, devido à operação do FAP, aumentou um pouco situando-se nos 3,9 %.

Outros casos que comprovam o funcionamento do FAP, com cargas díspares das utilizadas neste sistema, são apresentados em [6] e [7].

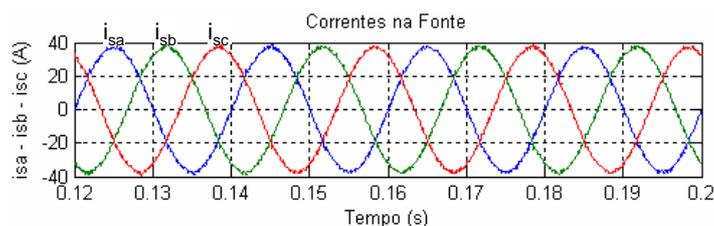


Fig. 4 – Correntes na fonte com FAP em operação (apenas compensação)

3.2 Injecção de energia durante as horas de vazio

Neste caso a potência que o filtro tem disponível para fornecer é 1,5 vezes superior à potência activa que as cargas estão a consumir, ou seja, 26 kW. É necessário fazer a compensação da “energia” reactiva injectada pelo filtro RC à saída do FAP, de maneira a que as correntes na fonte estejam em inversão de fase relativamente às tensões do sistema. Como se pode observar na Figura 5 esse objectivo foi atingido, o que se traduz num fluxo de potência do FAP para a fonte, não sendo injectada “energia” reactiva que levaria a uma penalização a nível do tarifário. O THD das correntes na fonte aumentou para 7,5 % relativamente ao caso anterior. Já a distorção harmónica das tensões baixou para 3,2 %. A potência efectivamente injectada pelo FAP na rede eléctrica é de 7,2 kW, sendo a restante potência disponível no lado DC utilizada para alimentar as cargas e compensar as perdas do próprio filtro activo que perfazem 1,8 kW.

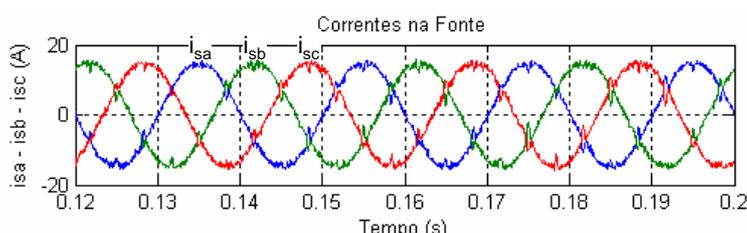


Fig. 5 – Correntes na fonte com FAP em operação (compensação e injecção de energia)

3.3 Injecção de energia fora das horas de vazio

Durante o período de horas cheias e de horas de ponta, o FAP, para além da energia activa, terá também que injectar uma componente reactiva correspondente a 40 % do total injectado na rede eléctrica. Como já se viu anteriormente o filtro injecta 7,2 kW em vazio. Assim sendo, para que se mantenha este nível de potência activa, será necessário injectar simultaneamente uma potência reactiva de pelo menos 3,15 kVAr, correspondente ao valor exigido pelo decreto-lei n.º 313/95. Desta forma evita-se o pagamento da tarifa prevista por lei para os produtores que não injectam energia reactiva durante os períodos de horas cheias e horas de ponta. Na Figura 6 são apresentadas as correntes na fonte com o filtro activo em operação.

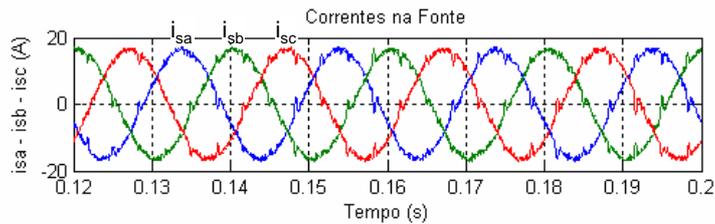


Fig. 6 – Correntes na fonte com FAP em operação (compensação, injeção de energia activa e injeção de “energia” reactiva)

Neste caso as correntes e tensões não estão em inversão de fase já que o FAP, para além de injectar a potência activa, está também a injectar a potência reactiva requerida por lei. O THD medido nas correntes da fonte e nas tensões manteve-se inalterado relativamente ao caso anterior.

4. Conclusões

Este artigo sugere a utilização de um Filtro Activo Paralelo como interface entre fontes de energia renovável e a rede eléctrica. Demonstra-se a sua capacidade em injectar correntes sinusoidais com baixo conteúdo harmónico na rede eléctrica, com ou sem “energia” reactiva, consoante a necessidade, e simultaneamente compensar problemas de qualidade de energia eléctrica das cargas, nomeadamente harmónicos de corrente e factor de potência. Devido à utilização do inversor, que é comandado por modulação de largura de impulso, a corrente apresenta algum “ripple”, no entanto, este é bastante limitado. Relativamente aos sinais de tensão a distorção harmónica está dentro dos limites estabelecidos pela norma EN 50160, quer a nível do THD quer a nível da amplitude individual dos harmónicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), financiadora do Projecto POCTI/ESE/41170/2001 e do Projecto POCTI/ESE/48242/2002.

Referências

- [1] João Afonso, Maurício Aredes, Edson Watanabe, Júlio Martins, *Shunt Active Filter for Power Quality Improvement*, International Conference UIE 2000 - Electricity for a Sustainable Urban Development, Lisboa, Portugal, 1-4 Novembro 2000, pp. 683- 691.
- [2] João Afonso, Júlio Martins, M. Aredes e E. Watanabe, *Filtro Activo Paralelo com Controlo Digital de Baixo Custo*, IV SBQEE, , Porto Alegre, Brasil, 12-17 Agosto 2001.
- [3] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, *Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits*, IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf., pp. 1375-1386, 1983, Tokyo, Japão.
- [4] João L. Afonso, M.J. Sepúlveda Freitas, and Júlio S. Martins, *p-q Theory Power Components Calculations*, ISIE'2003 - IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Janeiro, Brasil, 9-11 Junho de 2003.
- [5] João Luiz Afonso, *Filtro Activo Paralelo com Controlo Digital para melhoria da Qualidade de Energia Eléctrica*, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho - Braga, Novembro de 2000.
- [6] Emílio F. Couto, Júlio S. Martins, Joao L. Afonso, *Simulation Results of a Shunt Active Power Filter with Control Based on p-q Theory*, ICREPQ'03 – International Conference on Renewable Energies and Power Quality, paper 394, Vigo, Espanha, 9-12 de Abril de 2003.
- [7] Emílio F. Couto, Júlio S. Martins, João L. Afonso, *Resultados de Simulações de um Filtro Activo Paralelo com Controlo baseado na Teoria p-q*, 8 CLEEE – 8º Congresso Luso Espanhol de Engenharia Electrotécnica, pp. 4.159-4.164, Julho de 2003.