

FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA CONTROLADO PELA TEORIA P-Q PARA COMPENSAÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO

Rejanne Alves de Melo – remelovieira@hotmail.com

Rafael Rocha Matias – rafaelrocha@ufpi.edu.br

Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. *O presente artigo foi produzido para apresentar o modelo, a simulação e análise de um sistema de integração entre as fontes de energia alternativa, solar ou eólica, e a rede elétrica. Com o objetivo de mostrar que é possível a injeção de energia na rede ao mesmo tempo em que corrige os problemas relacionados a qualidade de energia, utilizando de um Filtro Ativo Paralelo de Potência, que tem em sua composição um inversor e um sistema de controle com base na teoria p-q.*

Palavras-chave: *Filtro Ativo, Energia Renovável, Integração com a Rede.*

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o desenvolvimento sustentável impulsionou o a busca por fontes alternativas de geração de energia elétrica. A tendência é que se torne cada vez mais crescente a quantidade de microgeração utilizando fontes de energia alternativas, tais como energia solar e eólica, entre outras.

No entanto a integração dessas fontes geradoras à rede elétrica, acarretam em alguns problemas entre eles a injeção de correntes não senoidais por parte do inversor, o que vem a contribuir com o a elevação das distorções harmônicas na rede.

Nesse sentido, o presente artigo propõe que se utilize um Filtro Ativo Paralelo (FAP) na integração da fonte de energia renovável à rede elétrica (Afonso et al., 2001). Os resultados mostraram que tal solução vai permitir que o fornecimento de energia elétrica a rede ocorra por meio de correntes senoidais, além de que o FAP irá realizar a compensação simultânea das correntes harmônicas e do fator de potência da instalação elétrica. Quando se utiliza o FAP para realizar a conexão, mesmo que em determinadas horas não ocorra o fornecimento de energia pelas fontes de energia alternativas, ele continuará sua operação de modo a compensar as harmônicas de corrente e o fator de potência da carga da instalação. Além disso, simplifica-se o controle do fornecimento de energia reativa à rede elétrica, durante ou fora do horário de produção de energia da fonte renovável, por meio do algoritmo de controle que é utilizando, ou seja, o controle baseado na teoria p-q.

O sistema de integração completo é mostrado na Fig. 1. É possível notar que a energia gerada pela fonte renovável, seja ela eólica ou solar, é transferida para o conversor, com o auxílio de um Maximum Power Point Tracker (MPPT) presente em cada sistema de geração. O MPPT busca absorver o máximo possível de energia disponível em determinado instante. Para realizar o carregamento do capacitor do FAP, utiliza-se um conversor DC-DC, esse elevará a tensão até o valor apropriado para que o inversor do filtro ativo entre em operação. Por fim a energia gerada é gerenciada pelo FAP de acordo com as necessidades do sistema, pode ser utilizada na eliminação de harmônicos, na compensação do fator de potência, para alimentar as cargas ou para injetar energia na rede elétrica.

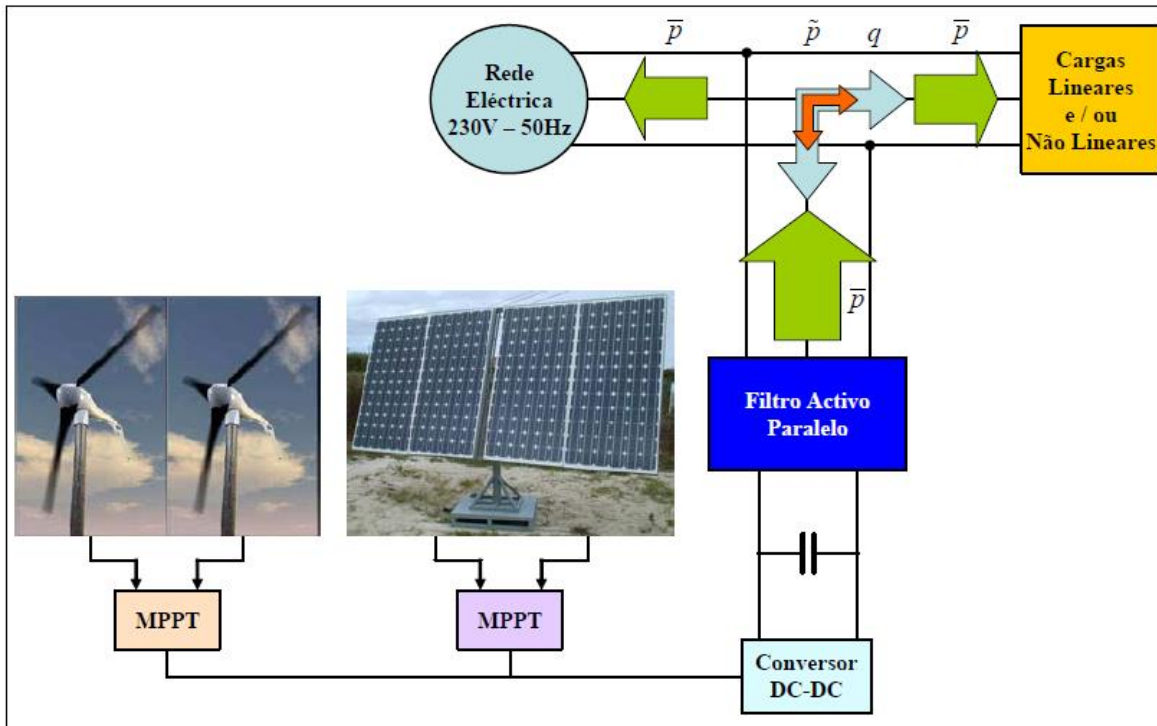


Figura 1 – Integração à rede e elementos da teoria p-q.

2. Controle aplicado ao Filtro Ativo Paralelo

A teoria utilizada no sistema de controle neste FAP denomina-se teoria p-q e pode ser aplicada a um sistema trifásico comum. Ela foi de início, proposta por Akagi et al. (1983) e posteriormente foi expandida para aplicação a um sistema trifásico a quatro fios por Watanabe et al. (1993).

Esta teoria ganhou importância por se adequar mais fortemente aos sistemas trifásicos do que a teoria convencional de potência, que primeiro foi proposta a um sistema monofásico e depois adaptada a um sistema trifásico (considera-se um sistema trifásico como três sistemas monofásicos). A teoria convencional refere-se somente a indutores e capacitores como componentes que defasam a corrente da tensão (elementos lineares). Não são consideradas as chaves eletrônicas que hoje estão cada vez mais presentes no sistema, na forma de circuitos retificadores, inversores etc.

Sendo assim, no caso de produção de filtros ativos de potência, a teoria convencional hoje, deixa a desejar quando se quer obter a compensação de desequilíbrios e harmônicos presentes na rede. A teoria p-q consiste na realização da transformação de Clarke, na qual um sistema de coordenadas estacionário a-b-c é transformado em um sistema de coordenadas α - β , e isso ocorre com tensão e corrente simultaneamente.

Observa-se na Fig. 1 as potências da teoria p-q de um sistema trifásico. Em sistemas trifásicos sem neutro, divide-se a potência instantânea em dois componentes, conforme Eq. 1.

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

Onde:

- \bar{p} – É o valor médio da potência real instantânea, é a energia por unidade de tempo transferida da fonte de alimentação para a carga;
- \tilde{p} – É o valor de sequência zero da potência real instantânea, diz respeito à energia por unidade de tempo trocada entre a fonte de alimentação e a carga;
- q – É a potência imaginária instantânea, relativo à potência que circula entre as fases, sem que exista transferência ou troca de energia entre a carga e a fonte.

2.1 Fornecimento de Energia à Rede Elétrica

Nesse trabalho, tem-se que as fontes de energia alternativa funcionam de modo a carregar um capacitor que está presente no lado que corresponde a corrente contínua do inversor do FAP. Assim, introduz-se uma outra potência, \bar{p}_{At} ,

correspondente à energia por unidade de tempo produzida pelas fontes. Envia-se esta energia para a rede elétrica, e reduz-se a potência \bar{p} que a fonte injetará no sistema onde o FAP está integrado. Quando \bar{p}_{Alt} for suficientemente elevado, é possível injetar energia na rede elétrica.

2.2 Ajuste da Tensão do Capacitor

Para garantir que o inversor do FAP funcione corretamente, a tensão (V_{cap}) dos terminais do capacitor deve estar dentro de níveis apropriados. Com esse intuito, utiliza-se então um controlador proporcional que irá definir a componente p_{reg} , de potência conforme descrita por:

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

Sendo: A = ganho do controlador

V_{ref} = tensão de referência do capacitor (V)

p_{reg} = troca de energia entre a fonte e o FAP (W)

A partir do momento em que as fontes de energia renovável cheguem ao fornecimento de energia suficiente, esses parâmetros podem ser anulados, pois nesse caso, não é mais necessário que se recorra à rede elétrica para realizar a regulação da tensão do capacitor do barramento de corrente contínua.

2.3 Compensação das potências reativas

Representa-se por p_x e q_x as potências injetadas pelo FAP, observando que por convenção, os valores de potência positivos dizem respeito a potências fornecidas enquanto que os valores negativos à potência recebidas.

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

$$q_x = \bar{q}_G + q \quad (4)$$

Na Eq. 4 o termo \bar{q}_G é relativo à energia reativa capacitiva que legalmente tem que ser fornecida quando do período de geração de energia da fonte alternativa. De acordo com a Resolução 414/2010 de 9 de setembro da ANEEL, os geradores de energia elétrica devem fornecer ao sistema uma quantidade de energia reativa que não pode ser inferior a 0,92 capacitivo. Destaca-se também que de acordo com parágrafo único do Art. 95 da referida Resolução, “aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativos que excederem o limite permitido, aplicam-se as cobranças estabelecidas nos arts. 96 e 97, a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A, incluídas aquelas que optarem por faturamento com aplicação da tarifa do grupo B nos termos do art. 100”.

De posse dos valores das tensões e das potências do sistema e no elo DC, torna-se possível então especificar os valores de correntes de referência que têm que ser injetadas na rede, de maneira que, teoricamente, na fonte as correntes sejam sinusoidais (Afonso et al., 2003).

3. SIMULAÇÕES

Com o auxílio do software Matlab, através das ferramentas Simulink e SimPower System, simulou-se o circuito e se confirmou a concordância da estratégia anteriormente apresentada, ou seja, de que é possível realizar o controle simultâneo da filtragem dos harmônicos, realizar a correção do fator de potência e ainda regular o fornecimento de energia elétrica. Destaca-se que nessa etapa, utilizou-se um controlador digital nas simulações, podendo assim o mesmo ser transposto para um microcontrolador, desde que se realize os devidos ajustes para potencialização da eficiência computacional (Afonso, 2000). Utilizou-se como frequência de amostragem o valor de 15kHz que, em uma rede que possui frequência de 60Hz, corresponde a obter 250 amostras por ciclo. Na parte de potência do FAP, utilizou-se um inversor tipo fonte de tensão de dois níveis com IGBTs de máxima frequência de operação de 20 kHz. Aplicou-se um filtro RC passa baixa, com o intuito de realizar a atenuação do harmônico resultado da comutação dos componentes semicondutores. Adicionou-se também uma indutância de 5 mH em série com o inversor a fim de realizar a limitação do ripple de corrente gerado por ele. No lado DC do inversor, tem-se um capacitor de 1 mF inserido no conversor DC-DC do sistema da fonte de geração de energia renovável. Por fim, o lado DC possui o valor de 900V, que corresponde a V_{ref} (tensão de referência).

A Fig. 2 mostra a representação do diagrama de blocos do circuito usado para realizar as simulações do FAP em um sistema elétrico trifásico com presença de geração de energia renovável.

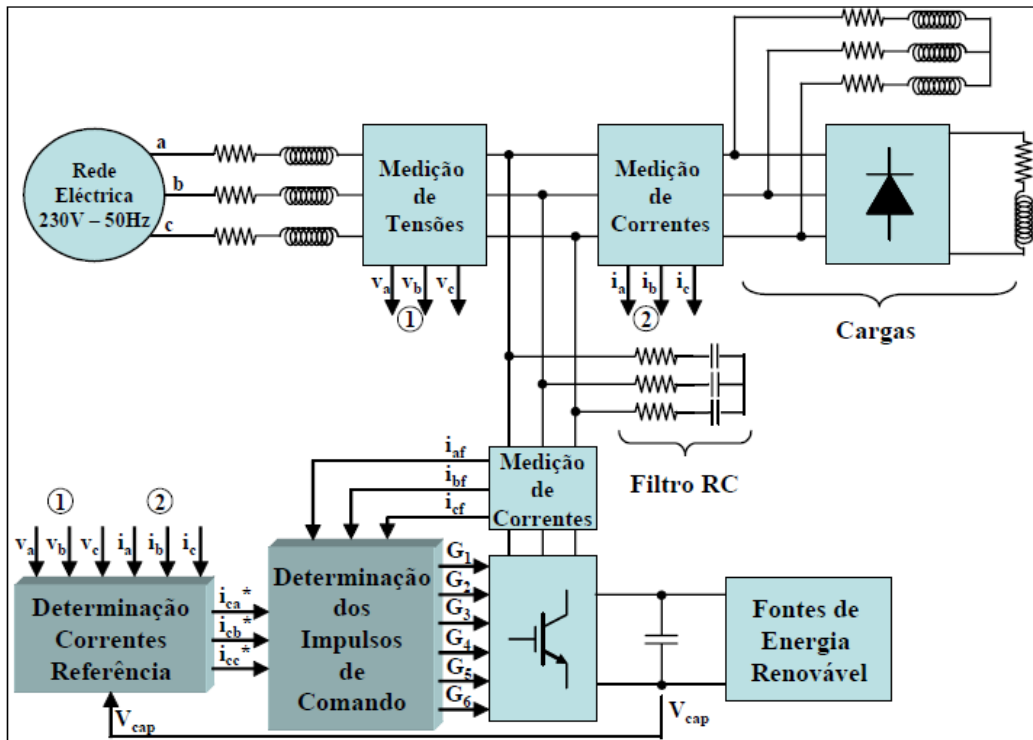


Figura 2 – Representação em blocos do sistema FAP simulado.

A fim de se realizar a análise do funcionamento do FAP, diferentes cenários foram simulados, com o intuito de verificar como se comporta o filtro ativo em regime permanente, estando o mesmo com a função de correção dos problemas referentes à qualidade de energia, ou ainda quando está injetando potência ativa na rede simultaneamente.

Para realização das simulações utilizou-se as seguintes cargas:

- Uma carga não linear RL, com um resistor de 5,85 Ω e um indutor de 32,25mH, consumindo uma potência ativa de valor 6,8kW e com fator de potência indutivo de 0,5;
- Um retificador trifásico de ponte completa, com uma carga RL em série com um resistor de 28 Ω e um indutor de 146mH. O consumo de potência ativa do retificador é de aproximadamente 10,2 kW. As correntes de fase apresentam uma Distorção Harmônica Total (THD) de 29,4%.

O circuito apresenta um fator de potência indutivo de 0,827 e um consumo de potência ativa de 17kW. A THD das correntes de fase é 14,4%. A THD nas tensões é de 3,2% e é resultante da queda de tensão das impedâncias de linhas. Na Fig. 3 mostra-se as representações das formas de onda das tensões e das correntes, ambas na fonte.

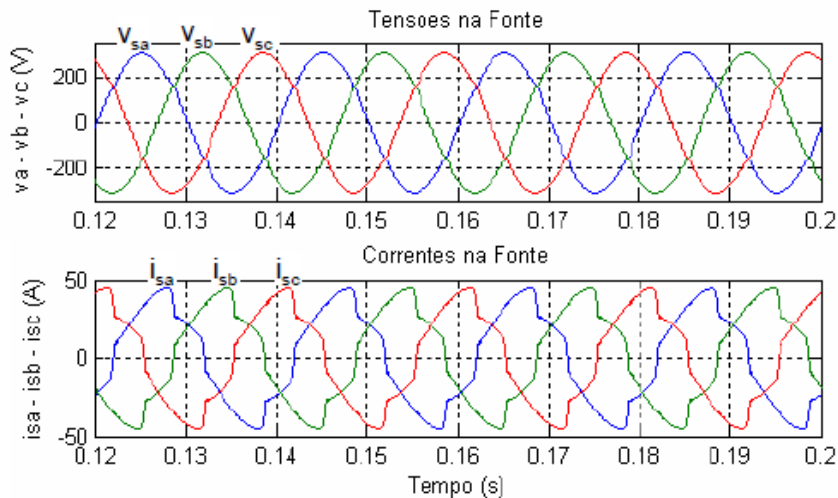


Figura 3 – Formas de ondas decorrente e tensão fornecidos pela fonte

3.1 Correção de fator de potência e de harmônicos

Como citado anteriormente, no primeiro caso simulado, o FAP é utilizado somente para correção de problemas relacionados à qualidade energia, resultantes ao sistema de geração de energia renovável. Na Fig. 4 observa-se os resultados adquiridos quando o filtro ativo está em operação.

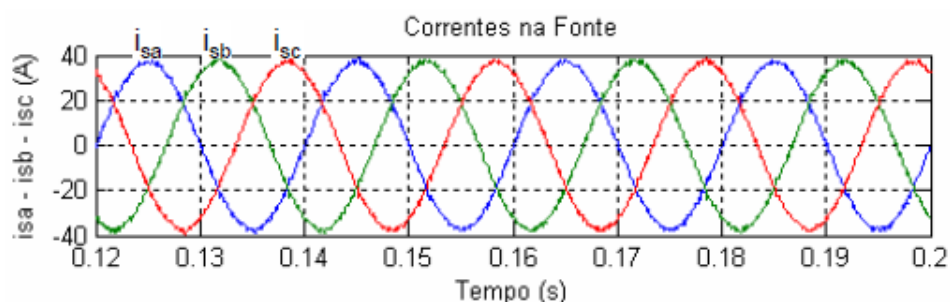


Figura 4 – Forma de onda das correntes na fonte com FAP em funcionamento realizando a compensação.

Com base nas formas de ondas da Fig. 4, constata-se que quando o FAP está em funcionamento, a THD das correntes na fonte diminuiu significativamente, passando a ser de 3,5%, além de verificar que o fator de potência passou a ser unitário. Verifica-se ainda que a THD das tensões elevou seu valor para 3,9%.

3.2 Injeção de energia nos horários de não geração de energia da fonte alternativa

A potência que pode ser fornecida pelo filtro nesse caso é 1,5 vezes maior que a potência ativa consumida pelas cargas, atingindo-se assim, um valor de 26kW. Nesse caso, necessita-se realizar a compensação da energia reativa que é injetada pelo filtro RC do FAP, de modo que as correntes na fonte estejam com fase invertidas em relação às tensões do sistema. Na Fig. 5 tem-se a forma de onda das correntes na fonte, quando o FAP está em operação.

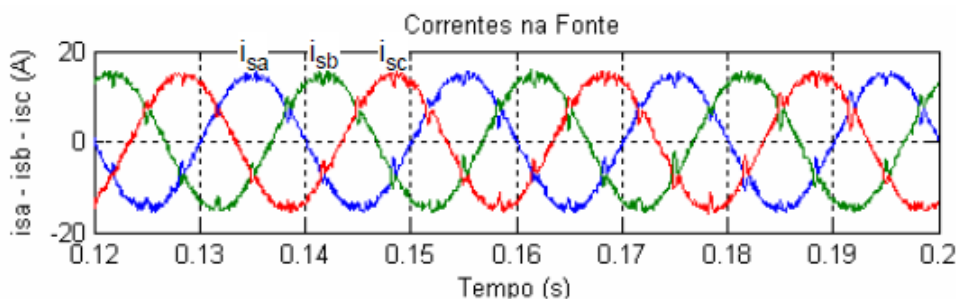


Figura 5 – Forma de onda das correntes na fonte com FAP em operação no horário sem geração alternativa.

Nota-se na Fig. 5 que se atingiu o objetivo exposto acima, ou seja, no FAP obte-se um fluxo de potência para a fonte, sem a injeção de energia reativa, o que resultaria em encargos tarifários. A THD das correntes na fonte elevou-se para 7,5% em relação ao primeiro caso. Em contrapartida a THD das tensões diminuiu para 3,2%. A potência injetada efetivamente pelo FAP na rede apresenta um valor de 7,2 kW, sendo que a potência restante disponibilizada no lado DC é utilizada a fim de alimentação das cargas e compensação das perdas no próprio filtro ativo, essas correspondem a um valor de 1,8 kW.

3.3 Injeção de energia no horário de geração da fonte alternativa

Conforme resultado da simulação anterior, ou seja, uma injeção de 7,2 kW no horário de não geração de energia da fonte renovável, é necessário que se injete simultaneamente uma potência reativa que possua o valor mínimo de 3,15 kVAr, afim de se manter o nível de potência ativa. Desta maneira, é possível evitar o pagamento de tarifa imposta por lei para os geradores de energia que não injetam energia reativa durante os horários de ponta e de fora de ponta. A Fig. 6 mostra os resultados encontrados para as correntes na fonte, quando o FAP está em operação.

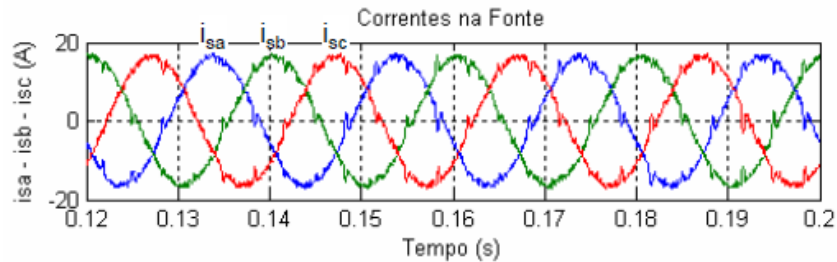


Figura 6 – Formas de ondas das correntes na fonte com FAP atuando no horário de geração da fonte alternativa.

Observa-se aqui que as correntes e tensões não possuem fases invertidas, em vista que o FAP além de realizar a injeção de potência ativa, também está injetando a potência reativa requerida por lei. A THD medida nas tensões e nas correntes da fonte permaneceu inalterada em relação ao caso anterior.

4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, sugeriu-se a utilizar um filtro ativo paralelo entre a rede elétrica e a fonte de energia renovável. Demonstrou-se que o mesmo é capaz de injetar correntes com baixa distorção harmônica na rede, com ou sem energia reativa, e de forma simultânea, realiza a compensação dos problemas das cargas relacionados a qualidade de energia elétrica, especialmente no que diz respeito a distorção harmônica e ao fator de potência. Em virtude de se utilizar um inversor comandado por modulação de largura de pulso, a corrente irá apresentar um ripple, porém esse é pequeno, não interferindo na eficiência do sistema. Com relação aos sinais de tensão, a distorção harmônica se mantém dentro dos limites estabelecidos pela Resolução 414/2010 da ANEEL, desde o nível da THD até o nível da amplitude individual dos harmônicos.

REFERÊNCIAS

- Afonso, João L., Freitas, M.J., Sepúlveda, and Martins, Júlio S. p-q Theory Power Components Calculations, ISIE'2003 - IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Janeiro, 2003.
- Afonso João, Aredes Maurício, Watanabe Edson, Martins Júlio, Shunt Active Filter for Power Quality Improvement, International Conference UIE 2000 - Electricity for a Sustainable Urban Development, Lisboa, 2000, pp. 683- 691.
- Afonso João, Martins Júlio, Aredes M. e Watanabe E., Filtro Activo Paralelo com Controle Digital de Baixo Custo, IV SBQEE, , Porto Alegre, 2001.
- Akagi, H., Kanazawa, Y. e Nabae, A. "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits," Proceedings of the IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf., Tokyo, 1983, pp. 1375-1386.
- Brasília. Resolução normativa ANEEL. nº 414/2010 de 09 de setembro de 2010. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acessado em 26/09/2017.
- Watanabe, E.H., Stephan, R.M. e Aredes, M. "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads, " IEEE Trans. Power Delivery, 1993, 8(2): 697-703.

ACTIVE POWER FILTER CONTROLLED BY THE P-Q THEORY FOR HARMONIC COMPENSATION IN MICROGENERATION SYSTEMS

Abstract. The present article presents the model, the simulation and analysis of an integration system between the alternative energy sources, solar or wind, and the electric grid. The objective is to show that it is possible to inject energy into the network while correcting problems related to energy quality, using a Parallel Active Power Filter, which has in its composition an inverter and a control system based on the pq theory.

Key words: Active Filter, Renewable Energy, Integration with the Network.