

Filtro Ativo de Potência Sintetizando Cargas Resistivas

Teresa E. Nuñez Zuñiga, Marcus Vinicius Ataíde e José Antenor Pomilio

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Universidade Estadual de Campinas

C.P. 6101 13081-970 Campinas – Brasil

Fone: +55.19.7883710 Fax.: +55.19.2891395

Abstract — *The paper discusses the use of a shunt Active Power Filter to compensate for the line current distortion and to improve the power factor. The advantages of the Resistive Load Synthesis over the Sinusoidal Current Synthesis when the filter is used in a system in which the voltage is not perfectly sinusoidal are presented. The control circuit is based on multipliers, and the currents follow the same waveforms of the respective line voltages. Experimental results of a three-phase active power filter connected to a non-sinusoidal grid are presented.*

Resumo — *Este artigo discute o uso dos Filtros Ativos de Potência para compensar correntes distorcidas na rede e melhorar o fator de potência. Apresentam-se as vantagens da Síntese de Carga Resistiva em relação à Síntese de Correntes Senoidais quando o filtro é usado em um sistema onde a tensão não é perfeitamente senoidal. O circuito de controle é baseado em multiplicadores, como nos circuitos corretores do fator de potência, permitindo que a corrente siga a mesma forma da onda da tensão. Apresentam-se resultados de um Filtro Ativo de Potência conectado a uma rede trifásica com tensões distorcidas.*

I. INTRODUÇÃO

O uso de Filtro Ativo de Potência (FAP) para compensar correntes distorcidas da rede e melhorar o fator de potência tem sido amplamente estudado nos últimos anos [1-5]. O interesse deve-se a muitos fatores como, por exemplo, as normas internacionais a respeito dos limites da distorção das correntes [6], e regulamentações nacionais sobre fator de potência [7], além do interesse sócio-econômico no uso da energia de uma maneira mais eficiente [8].

É bastante conhecido o fato de se ter um elevado nível de distorção da tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) em redes que apresentam cargas que absorvam correntes com alta distorção harmônica. A distorção na tensão depende fortemente da corrente de carga, associada à impedância da linha, além, obviamente, da distorção já presente na alimentação. O efeito da distorção da tensão no PAC pode ser significativo, afetando equipamentos conectados nesse mesmo ponto.

A recomendação IEEE-519 [9] estabelece para redes de baixa tensão uma Distorção Harmônica Total (DHT) aceitável de 5%, limitando cada harmônica a 3% do valor

da componente fundamental. Este valor pode facilmente ser superado, especialmente se a corrente da rede estiver altamente distorcida como, por exemplo, na presença de cargas não lineares, como são os retificadores com filtro capacitivo, tipicamente usados em aparelhos eletrônicos.

A ação de filtros conectados em derivação não muda a corrente na carga, pois praticamente não modifica a tensão no PAC. A ação do FAP permite suprir à carga toda a potência não ativa, incluindo os componentes harmônicos e a potência reativa. Da rede se consome apenas a corrente associada à potência ativa. Este fato maximiza o Fator de Potência (FP), já que implica no mínimo valor de corrente pelo sistema, liberando capacidade de transmissão para as linhas, mantida constante a potência ativa na carga. Fator de Potência é aqui entendido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente, uma vez que são consideradas formas de onda distorcidas.

Neste artigo discutem-se as vantagens de usar o método da Síntese de Carga Resistiva (SCR) em relação ao método da Síntese de Correntes Senoidais (SCS) quando se aplica um FAP em sistemas nos quais a tensão está distorcida. Adicionalmente, apresentam-se algumas orientações para o projeto e resultados experimentais de um FAP trifásico.

II. CORRENTE SENOIDAL VS. CARGA RESISTIVA

São conhecidos os méritos da Teoria da Potência Instantânea (TPI) [1] para tratar cargas distorcidas e desbalanceadas, e gerar sinais para o controle adequado de um FAP.

Contudo esta teoria não dá bons resultados se as tensões da rede não são senoidais. A teoria determina correntes de compensação que, depois de injetadas na rede, resultam em uma potência instantânea constante absorvida da fonte. Se as tensões são senoidais e balanceadas, resultarão correntes finais senoidais e balanceadas. Caso contrário, as correntes finais estarão distorcidas, com um conteúdo harmônico diferente do da tensão da rede. O fator de potência, portanto, não será unitário.

A Fig.1 mostra algumas formas de ondas que exibem esta situação. Na tensão da rede está presente uma 5ª harmônica com 10% da amplitude da fundamental. A corrente final (depois da compensação) tem uma forma de onda diferente, produzindo um fator de potência de 0,99.

Podem ser feitas modificações na TPI [10] para gerar de uma maneira diferente a corrente produzida pelo FAP, resultando em correntes senoidais. Porém, se a tensão da rede estiver distorcida, esta solução também não permite ter um fator de potência unitário, uma vez que o conteúdo harmônico da tensão não contribui para a potência ativa, enquanto aumenta a potência aparente. No entanto esta solução melhora o fator de potência com respeito à TPI. A Fig.2 mostra algumas formas de

Esta pesquisa foi realizada com o apoio da FAPESP (proc. 96/06422-7) e da Fundação CAPES.

O processo de revisão deste artigo foi encaminhado pelo Editor Associado, Prof. Dr. Marcelo Godoy Simões.

onda que para esta situação. O fator de potência resultante é 0,995.

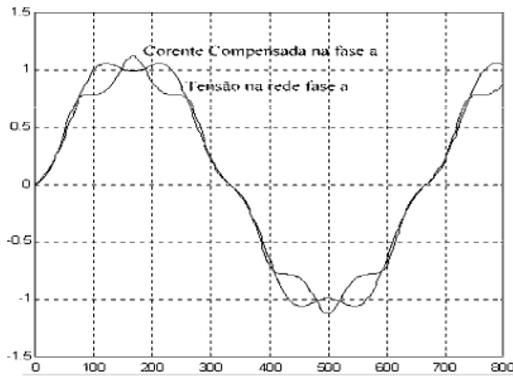


Fig. 1 Corrente de linha resultante usando TPI com tensões não-senoidais.

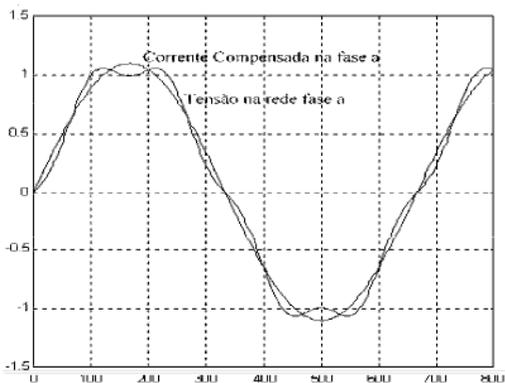


Fig. 2 Corrente de linha resultante usando TPI-estendida com tensões não-senoidais.

Há muito tempo são conhecidos os fenômenos de ressonância nas redes com tensões distorcidas [11]. Em tais situações o amortecimento das oscilações é devido à parte resistiva do circuito, incluindo não só a resistência física (cabo, enrolamentos, etc.), mas também a carga resistiva equivalente, a qual está associada à potência ativa consumida. Uma vez que a resistência física usualmente é baixa, o amortecimento existente é essencialmente devido à carga.

Se o FAP atua sintetizando uma corrente senoidal em um sistema distorcido, isto significa que, analisando no domínio da frequência, a fonte de alimentação observará uma carga resistiva somente na frequência fundamental. Nas frequências harmônicas, a carga estará aberta, já que não haverá fluxo de corrente.

Levando em conta o papel de amortecimento imposto pela carga, isto significa que o sistema perderá a sua capacidade para atenuar as oscilações decorrentes de uma eventual ressonância, o que poderia produzir uma significativa distorção da tensão no PAC.

De outra maneira, se o FAP trabalha sintetizando uma carga resistiva, ou seja, a corrente tendo a mesma forma da onda da tensão, o efeito de amortecimento permanece invariante e o fator de potência é unitário, o que implica na minimização da corrente eficaz, mantendo constante a potência ativa na carga.

A Fig. 3 mostra uma situação comparativa onde o mesmo sistema (com 1% de 7ª harmônica na tensão) é conectado a um FAP operando com SCR ou SCS. A perda do efeito de amortecimento é clara na segunda situação. No primeiro caso, a forma de onda no PAC praticamente não é afetada pelo funcionamento do filtro. É importante observar que 1% DHT na fonte implica em mais do 10% no PAC quando se perde o amortecimento realizado pela carga. Isto demonstra que não é necessariamente verdade o argumento de que a imposição de correntes senoidais venha melhorar as formas de onda das tensões.

Por outro lado, se todas as cargas conectadas ao sistema fossem resistivas, a distorção na tensão produzida pelas cargas desapareceria, e a tensão no PAC seria praticamente senoidal.

O fato das cargas puramente resistivas, para um dado valor de potência ativa, serem aquelas que minimizam a potência aparente e, conseqüentemente, as correntes absorvidas, foi identificado por Fryze [12].

Sejam $u(t)$ e $i(t)$ grandezas periódicas (associadas, por exemplo, à tensão e à corrente em um circuito). Seus respectivos valores eficazes são dados por:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2)$$

A potência ativa e a potência aparente são definidas, respectivamente, como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt \quad (3)$$

$$S = U \cdot I \quad (4)$$

Utilizando a desigualdade de Schwartz,

$$\left[\int_a^b f(x) \cdot g(x) \cdot dx \right]^2 \leq \int_a^b f^2(x) \cdot dx \cdot \int_a^b g^2(x) \cdot dx \quad (5)$$

Fryze demonstra que:

$$S \geq P = \lambda \cdot U \cdot I \quad (6)$$

A igualdade em (6) só ocorre se a relação $f(x)/g(x)$ for constante. Isto significa ter-se uma carga com característica resistiva.

Rossetto e Tenti [13] generalizam este conceito para sistemas polifásicos, utilizando-se do conceito de norma, o que permite escrever uma relação instantânea entre corrente e tensão, como função apenas da potência instantânea.

$$i_p(t) = \frac{p(t)}{\|v(t)\|^2} \cdot v(t) \quad (7)$$

onde $p(t)$ é a potência instantânea dada pelo produto escalar entre as tensões e correntes de cada fase do sistema; $\|v(t)\|$ é a norma Euclidiana do vetor de tensões e $i_p(t)$ é a componente da corrente relacionada com a potência ativa transferida à carga. Note que sempre que a potência e a norma (ao quadrado) tiverem o mesmo comportamento dinâmico, a relação entre tensão e corrente é algébrica, ou seja, tem-se o equivalente a uma carga resistiva.

Mais contemporaneamente, Marafão e Deckmann [14] generalizaram este enfoque para formas de onda quaisquer, uma vez que abolem a definição da norma considerando um período do sinal (como fizeram Fryze e Rossetto & Tenti), e aplicam a mesma definição de norma para um intervalo entre duas amostragens realizadas em um sistema digital de aquisição de dados. Neste sentido, a norma tende a um valor instantâneo.

A aplicação deste último procedimento para tensões distorcidas, desde que o sistema seja equilibrado, leva a obter-se uma corrente $i_p(t)$ com a mesma forma de onda da respectiva tensão, o que representa um fator de potência unitário.

Assim, em comparação com a TPI, o uso da SCR é melhor para o controle do FAP nas redes com tensões distorcidas e não traz inconvenientes nas redes em que a distorção for desprezível. O obstáculo desta solução é que um tratamento analítico simples e rápido para produzir instantaneamente a corrente de referência, mantendo a balanço de potência do sistema ainda não está completamente definido.

Poucas referências comparam o comportamento das duas estratégias [15], indicando uma resposta transitória mais lenta da SCR. Porém, usando técnicas modernas de controle não-linear, como por modos deslizantes, pode-se melhorar tal resposta.

Este artigo apresenta uma estrutura de controle baseada em multiplicadores, como nos corretores de FP, para gerar as corrente de compensação necessárias.

III. IMPLEMENTAÇÃO DE UM FAP USANDO A TÉCNICA SCR

O diagrama de blocos do FAP trifásico, incluindo o sistema de controle proposto, é mostrado na Fig. 4. O FAP é conectado a uma rede trifásica a três fios, na qual as tensões são distorcidas.

A estrutura permite realizar o controle do sistema trifásico, amostrando duas tensões da rede e a tensão do barramento CC do inversor. A corrente de referência para as fases a e b (i_{sa}^* e i_{sb}^*) são obtidas por amostragem da tensão da rede (fase-neutro). Este sinal é multiplicado por um sinal CC, dando como resultado a forma de onda e a amplitude para as referências. A referência da fase c é obtida pela soma invertida das outras duas referências.

A outra entrada dos multiplicadores recebe um sinal vindo do controle da tensão do barramento CC. Se esta tensão está no nível desejado, a saída do compensador PI não se altera, ficando constantes as amplitudes das referências. De outra forma, tais referências são alteradas, em função do eventual erro na tensão CC.

A tensão do barramento CC deve ser maior do que a tensão pico da rede para permitir injetar a corrente desejada através do filtro passivo, que conecta o inversor à rede. Este filtro passa-baixas é composto, no mínimo, por indutores mas, para melhorar sua capacidade de filtragem, pode ser feito de ordem superior, contribuindo para minimizar a ondulação de alta frequência que seria injetada na rede.

Tais tensões CC elevadas são obtidas devido a um funcionamento tipo "boost" que é possível obter deste conversor.

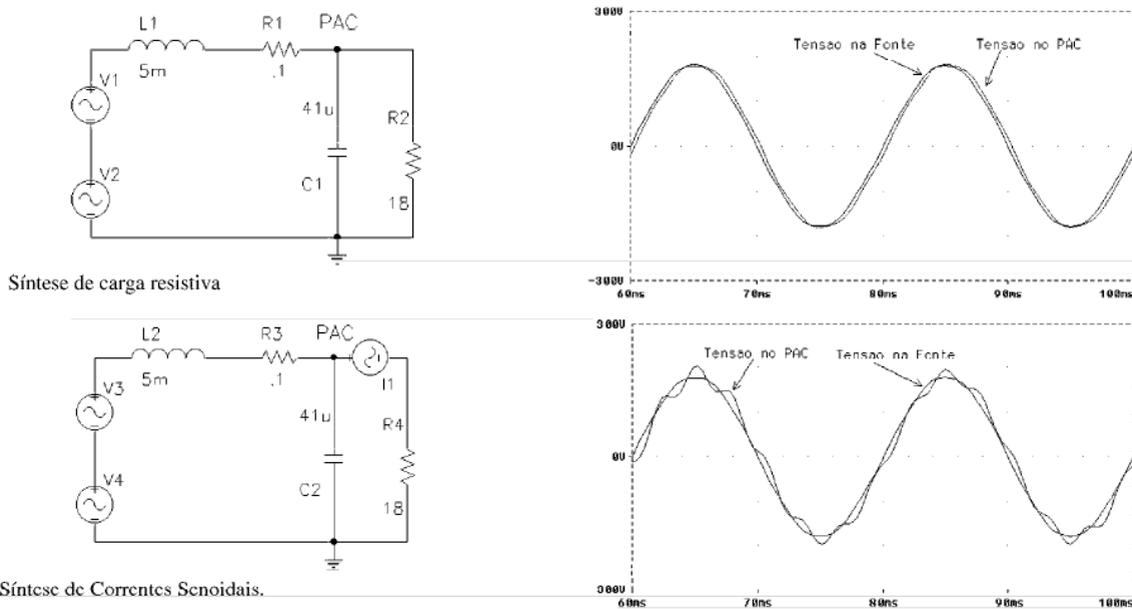


Fig. 3 Comparação do efeito da SCR e SCS em sistema com tensão distorcida.

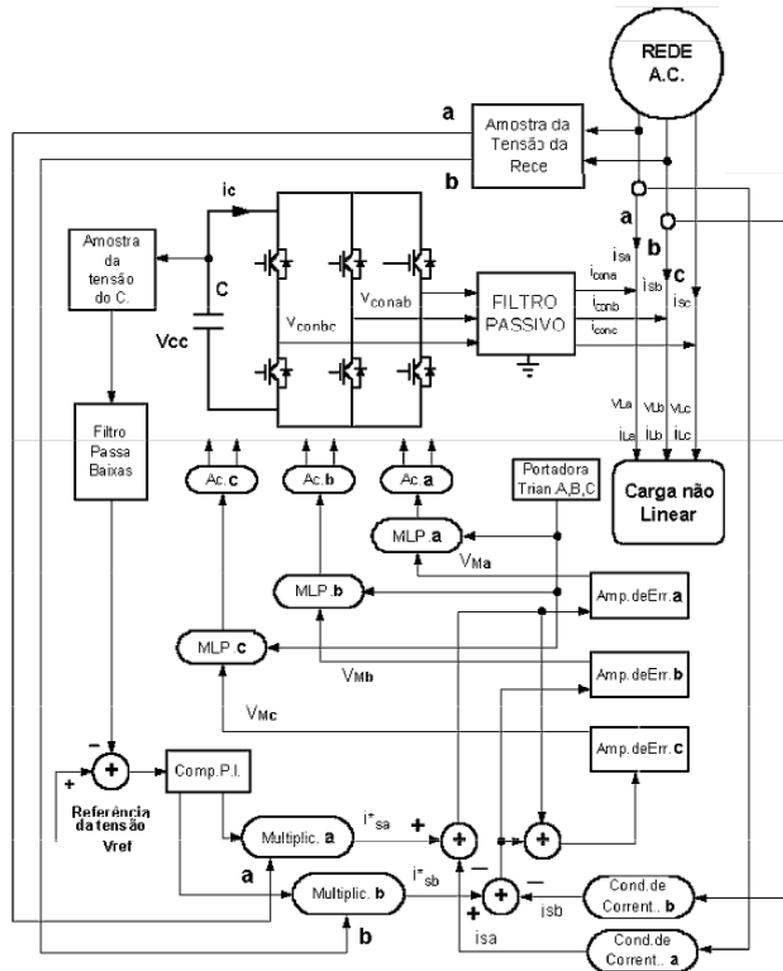


Fig. 4 Diagrama de Blocos de Filtro Ativo de Potência trifásico usando o controle por Síntese de Carga Resistiva.

Quando o FAP é ligado, estando a tensão CC abaixo de seu valor de trabalho, consome-se da rede uma corrente maior que a exigida pela carga. A energia adicional é armazenada no capacitor CC, até atingir o nível desejado. Neste ponto, o controlador PI reduz a amplitude da corrente de referência e a corrente na rede se torna aquela necessária para prover a potência ativa à carga, mais as perdas no FAP.

O inversor utiliza Modulação por Largura de Pulso (MLP). Uma onda triangular simétrica é usada como portadora para produzir o sinal MLP, enquanto o sinal de controle é proveniente dos amplificadores de erro da corrente (blocos "Amp. de Err. "). Os sinais de comando são enviados ao inversor adequadamente isolados por meio de circuitos de acionamento (blocos "Ac")

O uso de MLP é conveniente devido ao conhecimento do espectro harmônico produzido por esta técnica de modulação, o que permite o adequado projeto do filtro passivo de saída, a fim de evitar instabilidades na operação do sistema [16]. Este filtro pode ser dimensionado tomando por base a atenuação necessária para que sejam respeitadas as limitações de interferência eletromagnética conduzida estabelecidas em normas internacionais [17].

O filtro passivo utilizado não deve ser do tipo amortecido, uma vez que isto afetaria a capacidade do sistema elevar a tensão no barramento CC [16]. Esta

ausência de amortecimento, por outro lado, pode provocar instabilidades no sistemas, precisamente na frequência de ressonância do filtro passivo. Este fato pode ser evitado por meio de um adequado projeto da malha de controle da corrente.

O circuito que faz a amostragem da corrente da rede (bloco "Cond. de Corrente") deve ter uma característica passa-baixa, a fim de amortecer efetivamente as ressonâncias do filtro passivo. Adicionalmente, deve ter uma resposta plana (em ganho e fase), na faixa dos harmônicos (aproximadamente 2500 Hz), a fim de permitir sua correta compensação. Isto significa que se a corrente na rede apresentar um conteúdo harmônico fora desta faixa, não será possível uma compensação total.

IV. COMPORTAMENTO DINÂMICO DA MALHA DE CORRENTE

Os sinais que são comparados com a portadora são proporcionais (ganho K) ao erro entre as referências de corrente e os valores medidos (e processados). Em cada fase, tais sinais podem ser descritos por:

$$v_M(t) = K \cdot [i_s^*(t) - i_s(t)] \quad (8)$$

Como é sabido, o ganho introduzido pelo inversor é dado pela razão entre a tensão CC do barramento (V_{CC}) e a amplitude da portadora triangular (V_{tri}).

A corrente injetada pelo FAP no sistema, em cada fase, após a atuação do filtro passivo é, no domínio da frequência, dada por:

$$I_{con}(s) = \frac{V_{con}(s) - V_s(s)}{Z_{eq}(s)} \quad (9)$$

onde V_{com} é a tensão imposta na saída do inversor, V_s é a tensão da rede e Z_{eq} é a impedância do filtro passivo. A relação entre a tensão da rede (que determina a forma desejada para a corrente) e a referência da corrente é algébrica, sendo dada pelo ganho $1/R$.

Tal funcionamento pode ser descrito por meio do diagrama de blocos mostrado na Fig. 5. Neste diagrama não foi incluída a malha de controle da tensão do barramento CC (que alteraria o valor de $1/R$), uma vez que seu comportamento dinâmico é muito mais lento que o da malha da corrente.

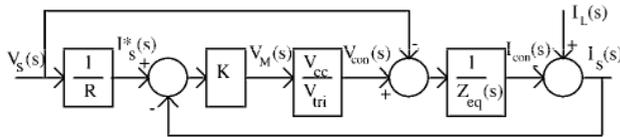


Fig. 5 Diagrama de blocos da malha de controle da corrente

São características desejáveis para a operação do FAP que a corrente da rede, $I_s(s)$, seja capaz de seguir a sua respectiva referência, $I_s^*(s)$ e, além disso, tenha a mesma forma da tensão, $V_s(s)$. Adicionalmente, havendo uma alteração na corrente de carga, $I_L(s)$, que não represente alteração na potência ativa demandada, não deve existir mudança na corrente da rede. Tais condições podem ser expressas, a partir do diagrama da Fig. 5, pelas seguintes relações, respectivamente:

$$\frac{I_s(s)}{I_s^*(s)} = \frac{K \cdot V_{CC}}{K \cdot V_{CC} - V_{tri} \cdot Z_{eq}(s)} \quad (10)$$

$$\frac{I_s(s)}{V_s(s)} = \frac{R \cdot V_{tri} - K \cdot V_{CC}}{R(V_{tri} \cdot Z_{eq}(s) - K \cdot V_{CC})} \quad (11)$$

$$\frac{I_s(s)}{I_L(s)} = \frac{V_{tri} \cdot Z_{eq}(s)}{V_{tri} \cdot Z_{eq}(s) - K \cdot V_{CC}} \quad (12)$$

De todas estas três últimas equações pode-se verificar que, para que os comportamentos desejados sejam obtidos, deve-se ter um valor suficientemente elevado do ganho multiplicativo do erro de corrente, K e um valor suficientemente baixo para a impedância do filtro passivo, $Z_{eq}(s)$.

Considerando que o filtro passivo é composto por células LC (indutor em série e capacitor em derivação), esta condição de baixa impedância (vista pelo inversor) significa que o indutor deve ter valor reduzido. Adicionalmente, para que seja garantida a atenuação necessária em alta frequência [17], não é possível utilizar um filtro de baixa ordem, pois isso implicaria em uma indutância elevada, o que compromete a exigência de ter

um baixo $Z_{eq}(s)$. Assim, o filtro passivo deve ser de ordem quatro ou superior (duas ou mais células LC). Considerando duas células LC idênticas, em cascata, os valores dos componentes podem ser obtidos de:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{f_x}{10^{A1/A2}} \quad (13)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{4V_{CC}}{\pi I_{max}} \quad (14)$$

onde f_x é a frequência na qual a atenuação necessária ($A1$) para o filtro é especificada. No caso da referência [17], o pior caso é em 150 kHz. $A2$ é a atenuação do filtro (80 dB/dec para filtro de quarta ordem). I_{max} é a máxima corrente de saída do inversor, na frequência de comutação, especificada em função dos componentes utilizados (IGBTs e diodos).

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi construído um protótipo de 1 kVA, para tensão de linha de 220 V. O acoplamento do inversor com a rede foi feito com transformadores com relação 1:2, de modo que o barramento CC pode operar com tensão de 250 V.

O filtro passivo foi implementado com duas células LC em cascata utilizando indutores de 1mH e capacitores de 115nF.

A realimentação da corrente foi feita por meio de compensador tipo filtro passa-baixas ao qual foi adicionado um zero em sua função de transferência, garantindo a atenuação em alta frequência, suficiente para evitar instabilidades produzidas pelas ressonâncias do filtro passivo e, ao mesmo tempo, mantendo uma resposta plana (em ganho e em fase) dentro da faixa de interesse na compensação de harmônicos. Tal circuito, e também o circuito analógico que implementa o compensador PI da malha da tensão V_{CC} , estão mostrados na Fig. 6.

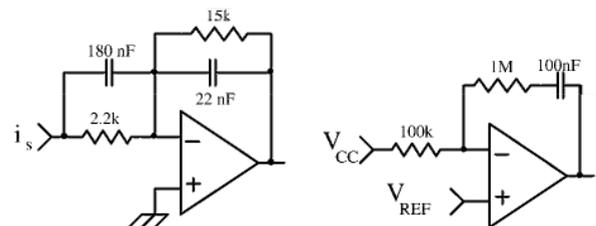


Fig. 6 Circuitos do condicionador do sinal de corrente (esq.) e do controlador da tensão do barramento CC (dir.)

A tensão na rede local é tipicamente distorcida com significativos componentes de 5ª e 7ª harmônicas. A DHT, no entanto, é menor que 3%, como é mostrado na Fig. 7.

A Fig. 8 mostra o caso de uma carga não-linear balanceada (retificador de 6 pulsos). Depois da compensação, as corrente na rede são similares às respectivas tensões, incluindo as distorções. As transições rápidas não são completamente compensadas devido à limitação da resposta em frequência da malha de corrente.

O espectro da corrente de carga é mostrado na Fig. 9. A DHT é 25%. Depois da atuação do FAP a distorção na corrente da rede diminui significativamente, produzindo uma DHT de

5,2%, como mostrado na Fig. 10. Note que o filtro ativo não é capaz de atenuar as harmônicas na faixa acima dos 2 kHz.

A Fig. 11 mostra a resposta do FAP trabalhando com uma carga não-linear desbalanceada (retificador monofásico). Também neste caso o FAP é capaz de compensar a carga, refletindo na rede uma carga linear balanceada.

A Fig. 12 mostra o espectro da tensão antes da atuação do FAP. Neste caso a DHT é significativamente alta (4,2%) e a distorção na tensão é evidente, incluindo uma importante 3ª harmônica.

Depois da compensação, a DHT é reduzida a 2,8%, que é aproximadamente o valor normal da tensão de alimentação local., como mostrado na Fig. 13.

O Fator de Potência medido foi de 0.995. A eficiência do FAP foi 96,5%, para uma frequência de comutação de 20 kHz.

A Fig. 14 mostra a resposta transitória da malha de tensão CC. Depois de uma variação da carga de 50%, a tensão CC inicialmente diminui, uma vez que o inversor entrega energia à carga. Depois que se detecta a variação da tensão CC, a corrente de referência aumenta, permitindo absorver da rede a quantidade de potência necessária para alimentar a carga. Quando a carga diminui, acontece a situação inversa. Esta resposta mostrou-se relativamente lenta devido ao fato de ter sido utilizado um valor excessivamente grande de capacitância no elo CC, para a potência da carga, o que torna lenta a variação de sua tensão, atrasando a correção dos sinais de referência.

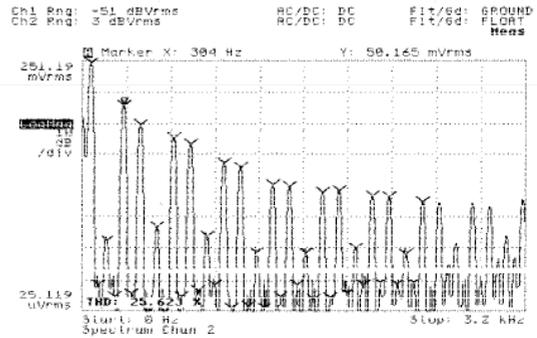


Fig. 9 Espectro da corrente da fase a, antes da atuação do FAP.

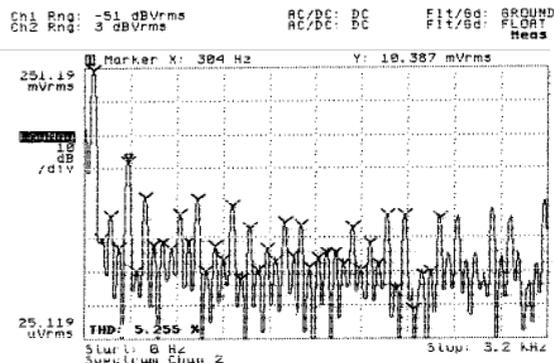


Fig. 10 Espectro da corrente pela carga fase a, depois da atuação do FAP.

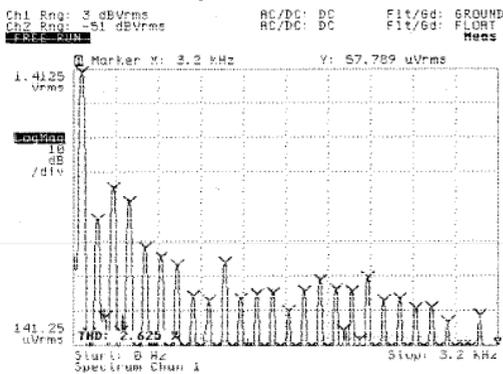


Fig. 7 Espectro da tensão da rede em vazio

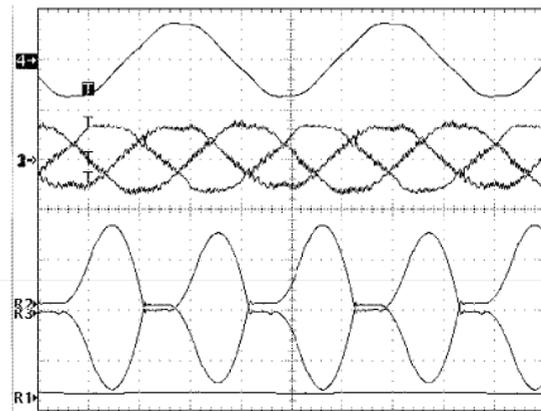


Fig. 11 Carga não-linear monofásica:
Acima: Tensão (500V/div.); Meio: Correntes de linha (1 A/div.);
Abaixo: Corrente de carga (1 A/div)

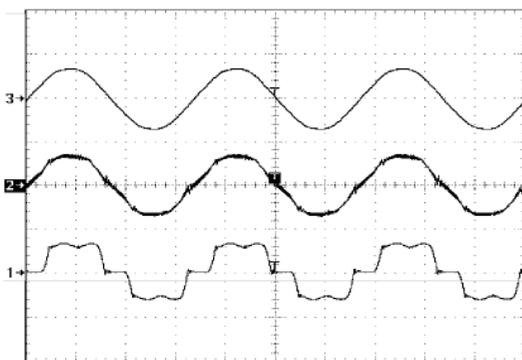


Fig. 8 Carga trifásica não linear balanceada:
Acima : Tensão (500V/div.);
Meio : Corrente de linha (5 A/div.);
Abaixo : Corrente de carga (5 A/div).

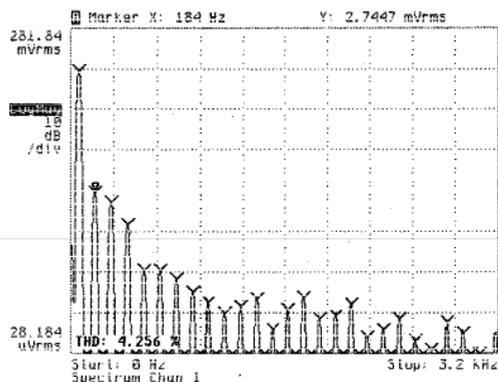


Fig. 12 Espectro da tensão da rede com carga não-linear monofásica.

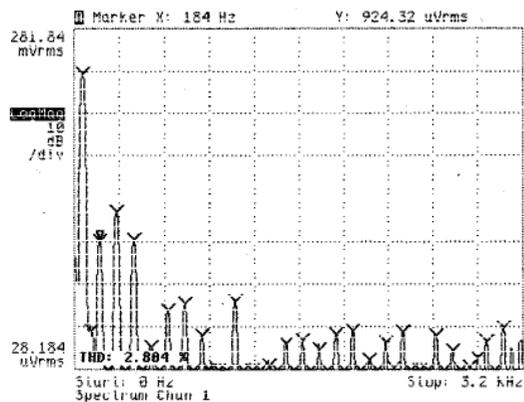


Fig. 13 Espectro da tensão da rede depois da atuação do FAP

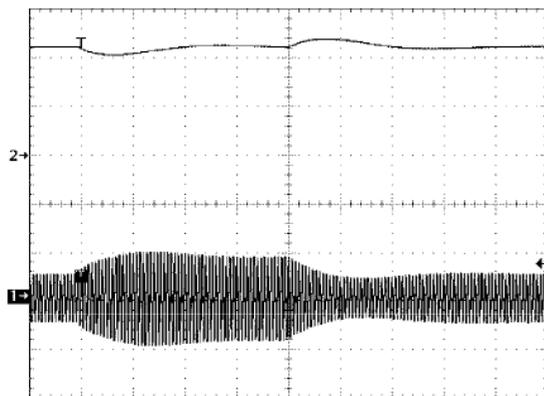


Fig. 14 Variação da tensão no barramento CC.

Acima: Tensão CC (100V/div); Abaixo: Corrente na linha (2A/div)

VI. CONCLUSÕES

O presente artigo mostra que em sistemas com tensões distorcidas, o uso de um Filtro Ativo de Potência baseado no método da Síntese de Cargas Resistivas para gerar correntes de referência, é melhor que a Síntese de Correntes Senoidais. A razão principal para tal é a manutenção da capacidade do amortecimento que as cargas apresentam frente a ressonâncias induzidas no sistema. Esta característica perde-se quando usada a SCS.

Foi construído um FAP e se apresentam resultados da atuação do mesmo com diferentes cargas. Os resultados confirmam a expectativa teórica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Thorton-Inpec pela doação de núcleos de ferrite e à FAPESP e CAPES pelo financiamento do projeto e das bolsas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-20 Nº 3, Maio/Junho 1984, pp. 625-630
- [2] L. Malesani, L. Rosseto, P. Tenti, "Active Power Filter With Hybrid Energy Storage", *IEEE Transactions on Power Electronics* Vol. 6 Nº 3, Julho 1991

- [3] L. F. Penello, E. H. Watanabe, "Filtro Ativo de Potência Tipo "Shunt" com Seleção da Potência a ser Compensada". *S.B.A Controle & Automação* Vol. 4, Nº 1, Agosto-Setembro 1993.
- [4] F. Pöttker, I. Barbi "Power Factor Correction of Non Linear loads Employing a Single Phase Active Power Filter: Control Strategy, Designing Methodology and Experimentation", *IEEE Power Electronics Specialist Conference*, St. Louis, EUA, Junho 22-27, 1997, pp. 412-417
- [5] J.A. Lambert, E.A.A. Coelho, J.B. Vieira Jr, L.C. Freitas, V.J. Farias. "A Control strategy for Imposition of Senoidal Input Current in a Parallel Active Power Filter", *Proceedings of The IEEE International Symposium on Industrial Electronics* Vol.2, Guimarães-Portugal, Julho 7-11, 1997.
- [6] IEC 1000-3-2, "Electromagnetic Compatibility Part3: Limits – Section 2: Limits for harmonics current emissions (Equipment Input Current $\leq 16A$ per phase)", *International Electrotechnical Committee*, Março 1995.
- [7] Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, Portaria # 85, 25 de março de 1992.
- [8] T. Key, J-S. Lai, "Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch – Mode Power Supplies In A Commercial Office Building", *IEEE – Industry Applications Society Annual Meeting*, 1995.
- [9] IEEE Std.-519, "IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters", 1981.
- [10] Y. Komatsu, T. Kawabata, "A Control Method of Active Power Filter in Unsymmetrical an Distorted Voltage System", *Proceedings of the Power Conversion Conference*, Nagaoka, Japão, Vol. 1, Agosto 1997, pp. 904-907.
- [11] E. L. Owen "A History of Harmonic in Power Systems" *IEEE Industry Applications Magazine*, Jan./Fev. 1998, pp. 6 –12.
- [12] S. Fryze "Wirk-, Blind, Scheinleistung in Elektrische Stromkreisen in nicht sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung", *Elektrotechnische Zeitschrift*, Bd. 53, 1932, pp. 596-599.
- [13] L. Rosseto, P. Tenti "Evaluation of Instantaneous Power Terms in Multi-phase Systems: Techniques and Applications to Power-Conditioning Equipment". *European Transactions on Power Electronics*, Vol. 4, no. 6, 1994.
- [14] F. P. Marafão, S. M. Deckmann, E. P. de Paiva "Instantaneous Evaluation of Power Quality Indexes", *5º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, Foz do Iguaçu, Brasil, 1999, pp. 117-122
- [15] D. González, J. Balcells, S. Lovera, R. Lima "Comparison Between Unity Power Factor and Instantaneous Power Theory Control Strategies Applied to a Three Phase Active Power Filter", *Proceedings of the 24th Annual Conference of IEEE Industry Electronics Society*, Vol. 2, Aachen -Alemanha, 1998.
- [16] M. V. Ataíde, J. A. Pomilio "Single-phase shunt active filter: A Desing Procedure Considering Harmonics and EMI Standards", *4º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, Belo Horizonte, Brasil 1997.
- [17] *International Electrotechnical Commission - IEC - International Special Committee on Radio Interference - CISPR 11*: "Limits and methods of measurement of electro-magnetic disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment" 1990.

DADOS BIOGRÁFICOS

Teresa Esther Núñez Zúñiga, é graduada em Engenharia Eletrônica (1981) na Universidade Nacional de Engenharia de Lima-Perú, e Mestre em Engenharia Elétrica (1999) pela Universidade Estadual de Campinas. Desde 1985 é docente na Universidade Nacional de Engenharia de Lima-Perú. Atualmente está realizando estudos de Doutorado junto ao Departamento de Sistemas e Controle de Energia da UNICAMP. Suas áreas de interesse são Filtros Ativos de Potência, Eletrônica de Potência.

Marcus Vinícius Ataíde, nasceu em Ipatinga - Minas Gerais, em 08 de Julho de 1966. Formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - M.G., em 1993. Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de

Campinas, Campinas - SP, em 1997. Atualmente é estudante de Doutorado na mesma universidade. Sua área de interesse compreende conversores estáticos e filtros ativos de potência.

José Antenor Pomílio formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), em 1983. Realizou Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela mesma universidade em 1986 e 1991, respectivamente. Entre 1988 e 1991, foi chefe do grupo de Eletrônica de Potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou um estágio de pós-doutoramento junto ao Departamento de Eng. Elétrica da Universidade de Pádua, Itália em 1993/94. É professor Livre-Docente do Departamento de Sistemas e Controle de Energia da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação UNICAMP. É membro da SOBRAEP, do IEEE e da SBA. É membro do Comitê Administrativo da IEEE Power Electronics Society e vice-presidente da SOBRAEP.