



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 02 7612
Tópico: Aplicação de Novas Tecnologias

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA DE FILTRAGEM ATIVA PARA MELHORIA DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

CARLOS
GABRIEL
BIANCHIN

LACTEC

ANDERSON
HIDEKI DE
OLIVEIRA

LACTEC

ROGERS
DEMONTI

LACTEC

JOÃO
RICARDO
PASQUALIN

LACTEC

BRUNO
MOELLER

LACTEC

GIORDANO
WOLANIUK

LACTEC

RESUMO

Este trabalho apresenta um problema comum em sistemas de distribuição: harmônicas de corrente, que provocam a deterioração do fator de potência, podendo inclusive elevar a taxa de distorção harmônica. É comum a utilização de bancos capacitivos para solucionar este problema, no entanto, os mesmos não têm a capacidade de corrigir o problema quando a carga é não-linear. Uma possível solução é via controle digital, através de processadores digitais de sinais, que controlam o nível de potência reativa a ser disponibilizada para a carga, sendo esta linear ou não-linear. Serão apresentados resultados de protótipo de 5 kVAR.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de energia, processamento digital de sinal, fator de potência, distorção harmônica, carga linear e não-linear.

1.0 INTRODUÇÃO

A necessidade de um controle efetivo do fluxo de potência entre os sistemas elétricos fez surgir um ramo da eletrônica específico para tal finalidade onde, inicialmente, acionamentos de máquinas elétricas e controles industriais apareceram como principais setores que exigiam esforços no desenvolvimento da eletrônica de potência. No entanto, os sistemas de distribuição de energia elétrica de baixa tensão estão atualmente cada vez mais sujeitos a cargas de tipos muitos específicos: não-lineares e lineares com deslocamento entre as fundamentais de tensão e

corrente. As não-lineares podem ser representadas, dentre outras, por retificadores, tanto monofásicos quanto trifásicos, seguidos por filtros capacitivos. Já as cargas lineares com deslocamento, podem ser representadas por elementos indutivos ou capacitivos predominantemente, como por exemplo, um reator eletromagnético para iluminação pública, sem o capacitor de correção de fator de potência. Tais tipos de cargas possuem algo em comum: drenam da rede de alimentação grandes quantidades de potência reativa, fazendo com que o fluxo de correntes harmônicas aumente drasticamente [1]. Dentre os problemas para a rede de distribuição de energia elétrica, pode-se destacar:

- ✓ Interferência eletromagnética pode afetar a operação de cargas sensíveis;
- ✓ Elevada taxa de distorção harmônica da corrente;
- ✓ Pode provocar altos níveis de distorção na tensão de alimentação;
- ✓ Baixo fator de potência e, conseqüentemente, altos níveis de energia reativa circulante, exigindo sobre-dimensionamento dos condutores elétricos;
- ✓ Surgimento de corrente de neutro, o que provoca elevação do potencial de neutro em relação ao potencial de terra [2];
- ✓ Problemas com bancos capacitivos, que na presença de freqüências harmônicas, podem vir a se danificar por completo;
- ✓ Aumento das perdas dos transformadores, por trabalharem em situações fora de sua condição nominal de operação.

A solução vinda da eletrônica de potência: filtro ativo paralelo [3], representa um grande avanço para a compensação de harmônicas de corrente, para qualquer tipo de carga. É capaz de aliar estratégias de atuação, melhorando o fator de potência e corrigindo deslocamento e distorções ao mesmo tempo [4].

2.0 TECNOLOGIA DE FILTRAGEM ATIVA

2.1 Filtro ativo paralelo

O conceito do filtro ativo paralelo pode ser apresentado através de analogia com as técnicas de cancelamento de ruído [5], ou seja, interferir no sinal indesejado de modo a atenuá-lo. Isso é possível se for gerada uma interferência destrutiva, ou seja, um sinal de mesma amplitude e fase oposta. A extensão deste princípio aos sistemas de distribuição de energia elétrica de baixa tensão, gera o diagrama simplificado representado pela Figura 1.

A rede de distribuição de energia elétrica, representada pela fonte de tensão V_s , está alimentando cargas não-lineares com alto conteúdo harmônico (alta taxa de distorção), representado pela corrente I_2 .

A estratégia de controle adotada faz com que o controlador observe a corrente de entrada (provida pela fonte de alimentação), representada pela corrente I_1 , e a partir daí, a corrente que o filtro ativo paralelo suprira é representada pela corrente I_3 .

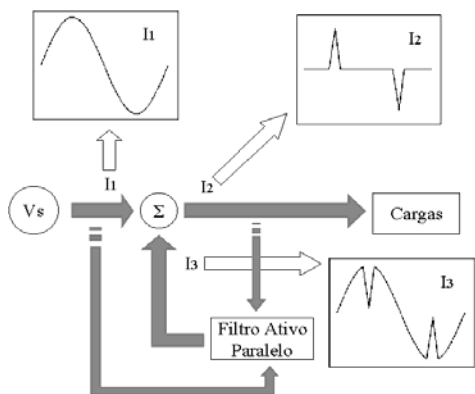


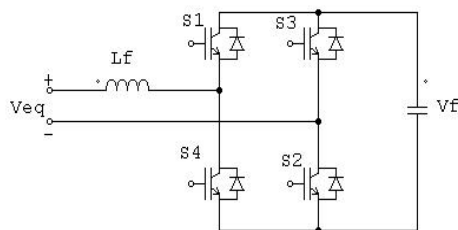
FIGURA 1

Diagrama simplificado da atuação do filtro ativo paralelo

Apesar do filtro ativo paralelo ser mais indicado para compensação de reativos, redução da taxa de distorção harmônica de corrente e correção do fator de potência, ele contribui também para a melhoria das taxas de distorção harmônica de tensão, provocadas por correntes com características altamente não-lineares; situação muito comum em retificadores monofásicos e trifásicos com filtro capacitivo.

2.2 Estrutura de potência

Para entender a operação do filtro ativo paralelo como gerador de harmônicas de corrente pode-se implementar uma fonte de tensão equivalente V_{eq} de tal forma que o controle da amplitude e forma de onda desta tensão, conectada através de uma impedância à rede de distribuição de energia elétrica de baixa tensão, consiga impor a forma de corrente desejada; de tal forma que a rede forneça apenas a componente fundamental da corrente e em fase com a tensão gerada. Isso é possível utilizando-se uma estrutura bidirecional em tensão e em corrente, conforme Figura 2.



VSI - Bidirecional (tensão e corrente)

FIGURA 2

Inversor de tensão monofásico

Na Figura 2 tem-se um inversor de tensão monofásico bidirecional em tensão e em corrente, que é a base de controle de potência para a operação do filtro ativo paralelo.

2.3 Projeto do controlador

Para controle do filtro ativo paralelo, através de uma estrutura de inversor monofásico bidirecional, pode-se optar por diversos caminhos: inversor a dois níveis, três níveis, cinco níveis, etc. Vale ressaltar que a estrutura também se altera. Percebe-se claramente, que o aumento do número de níveis permite melhor definição na estratégia e nos resultados do controlador, porém, o mesmo aumento cria alguns empecilhos: complexidade de controle, aumento dos esforços de tensão nos semicondutores de potência, etc.

Desta forma optou-se por um inversor monofásico a três níveis, onde o número de componentes é reduzido (Figura 2), não há complexidade de acionamento e os esforços de tensão sobre os elementos semicondutores de potência são reduzidos.

Para determinação dos ganhos dos controladores, ressalta-se que o ambiente de controle é digital, pois os cálculos e processamento de informações são feitos através de um processador digital de sinais, modelo TMS320C2407A.

Como mencionado anteriormente, a estratégia de controle observará a corrente de entrada,

somando-se a corrente do filtro ativo paralelo e da carga; a tensão de entrada da rede de alimentação e a tensão no barramento contínuo, representada na Figura 2 por V_f .

A estratégia de controle da corrente a ser adotada é a por valores médios instantâneos. Esta estratégia de controle apresenta uma série de vantagens:

- ✦ Utiliza apenas um sensor de corrente;
- ✦ Não necessita de cálculos complexos para sintonia de filtros e harmônicas de corrente drenada pela carga;
- ✦ Implementação prática e mais simples, em comparação a outras técnicas.

Para a estratégia de controle da tensão do barramento, V_f , será utilizado o controlador proporcional-integral clássico, visto que a tensão contínua do barramento necessita apenas de comparação com uma referência fixa (controlada por software).

Desta forma, o controle do filtro ativo paralelo terá duas malhas, uma interna à outra, e que também se diferenciam entre si pela velocidade de atuação no controle. No caso, a malha de tensão é externa à da corrente, como mostra a Figura 3.

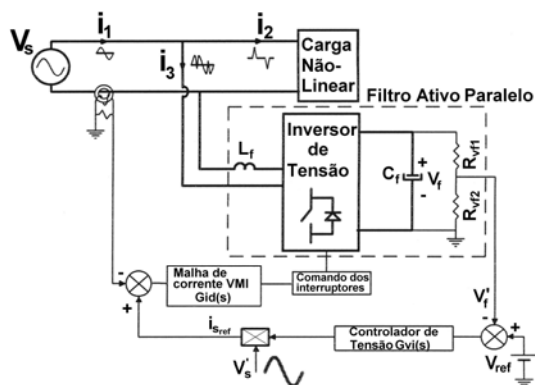


FIGURA 3

Filtro ativo paralelo - malhas de controle.

Pela modelagem por valores médios instantâneos (VMI), considerando o barramento de tensão contínua isento de ondulação, a função de transferência em s para pequenos sinais da corrente pelo indutor L_f será:

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_3(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_f}{s \cdot L_f} \quad (1)$$

onde d representa o ciclo de trabalho para acionamento das chaves semicondutoras de potência.

Para projeto do controlador da malha de corrente, foi utilizado o compensador de avanço-atraso de fase, cuja função de transferência em s é:

$$R_i(s) = K_{Ri} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{(s + \omega_z)}{(s + \omega_p)} \quad (2)$$

onde K_{Ri} é o ganho estático, ω_z é a frequência do zero introduzido pelo controlador e ω_p é a frequência do pólo.

Como mencionado anteriormente, foi utilizado para controlar o filtro ativo paralelo, um processador digital de sinais, o que implica que o compensador deve ter sua função de transferência discretizada. Para tanto, foi utilizado o método da transformada bilinear, que traz a seguinte função de transferência para o compensador no plano z :

$$R_i(z) = a \cdot \left[\frac{1 + b \cdot z^{-1}}{(1 - z^{-1})} \right] \quad (3)$$

onde a representa o ganho estático, e é dependente da frequência do zero e do período de amostragem; e b representa a posição do zero.

Considerando que a frequência de chaveamento é de 30 kHz, o cálculo pelo método do lugar das raízes resultou nos seguintes parâmetros para o controlador da malha de corrente (Tabela 1).

TABELA 1

| Parâmetros do controlador de corrente | |
|---------------------------------------|--|
| Parâmetro | Valor com o método do Lugar das Raízes |
| Frequência de cruzamento | 4,46 kHz |
| Margem de fase | 62,1° |
| Frequência do pólo | 30 kHz |
| Frequência do zero | 500 Hz |
| Ganho estático | 75 |

Traduzindo os valores obtidos para o controlador de corrente, a equação (3) pode ser então reescrita como:

$$R_i(z) = 75 \cdot \left[\frac{1 + 0,95 \cdot z^{-1}}{(1 - z^{-1})} \right] \quad (4)$$

e o gráfico do lugar das raízes para esse controlador mostra que o mesmo ficou dentro da região desejada (Figura 4).

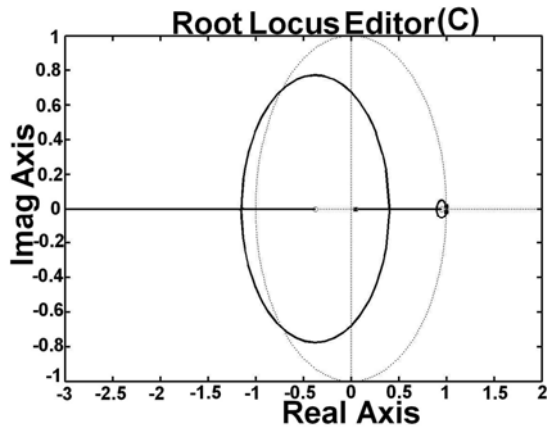


FIGURA 4

Lugar das raízes para o controlador da malha de corrente com controle digital

Utilizando os mesmos métodos para obtenção da função de transferência da malha de tensão, tem-se:

$$G_{vi}(s) = \frac{\hat{v}_f(s)}{\hat{i}_3(s)} \Big|_{v_s(s)=0/\hat{d}(s)=0} = \frac{1-d}{s.C_f} \quad (5)$$

onde d representa o ciclo de trabalho das chaves semicondutoras. Os parâmetros obtidos para o compensador estão mostrados na Tabela 2.

TABELA 2

| Parâmetros do controlador de tensão | |
|-------------------------------------|--|
| Parâmetro | Valor com o método do Lugar das Raízes |
| Frequência de cruzamento | 2 Hz |
| Margem de fase | 75,6° |
| Frequência do pólo | 60 Hz |
| Frequência do zero | 4 Hz |
| Ganho estático | 0,1 |

A partir dos valores obtidos pelo método do lugar das raízes, o controlador de tensão tem a sua função de transferência descrita por (6).

$$R_v(z) = 0,1 \cdot \left[\frac{1 + 0,995 \cdot z^{-1}}{(1 - z^{-1})} \right] \quad (6)$$

e o gráfico do lugar das raízes para esse controlador, mostra que o mesmo ficou dentro da área desejada (Figura 5).

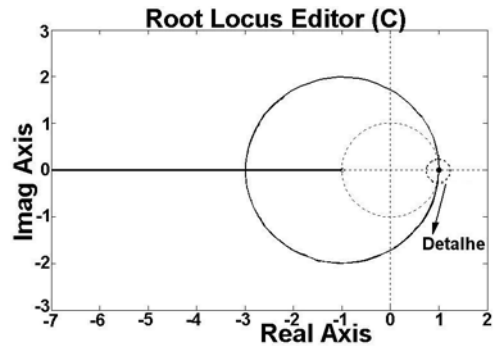


FIGURA 5

Lugar das raízes para o controlador da malha de tensão com controle digital

A Figura 6 permite melhor visualização em um ponto particular da Figura 5 (Detalhe), onde é mostrada a borda da circunferência de raio unitário.

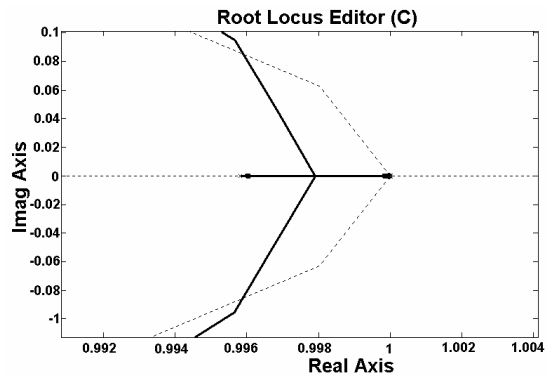


FIGURA 6

Detalhe do lugar das raízes para o controlador da malha de tensão com controle digital

3.0 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com a implementação das técnicas de controle demonstradas até o momento, através de um programa para processador digital de sinais, é possível então avaliar o comportamento do filtro ativo paralelo em diversas situações de cargas: resistiva, linear com deslocamento e não-linear. Inicialmente foi avaliado o comportamento do filtro ativo paralelo, operando com uma carga não-linear, sendo a mesma composta por um sistema retificador com filtro capacitivo de saída, alimentando um conjunto de resistências. A carga, assim como o protótipo de filtro ativo paralelo de 5 kVAr, estão conectados ao mesmo ponto de acoplamento comum, um ramal de 127 volts rms. A potência da carga atinge cerca de 3,7 kW. Como a mesma é uma carga não-linear, com baixo fator de potência, o seu consumo de reativos é pouco maior que 5 kVAr (motivo da escolha da carga).

A Figura 7 mostra o comportamento da tensão de alimentação AC em comparação com a corrente de carga (não-linear) e a corrente que o sistema

de alimentação provê para o conjunto carga e filtro ativo paralelo.

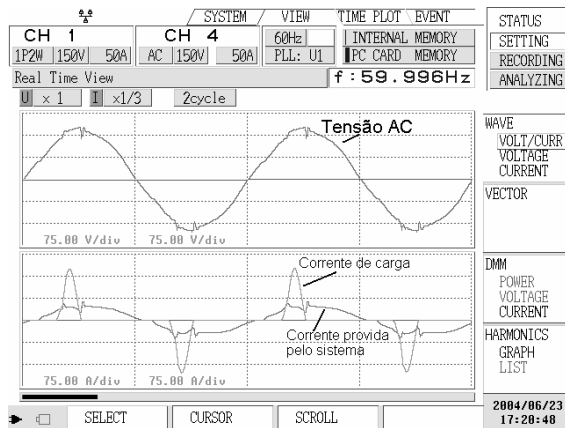


FIGURA 7

Comportamento dos sinais de entrada: tensão AC (75 V/div), corrente de carga (75 A/div) e corrente provida pelo sistema (75 A/div)

Percebe-se claramente a proximidade do sinal da corrente provida pelo sistema e do sinal da tensão AC, mostrando que o fator de potência está próximo da unidade. Além deste fato, também é mostrado na Figura 8 o comportamento dos parâmetros de entrada (de forma numérica), como corrente, tensão, fator de potência e taxa de distorção harmônica das correntes.

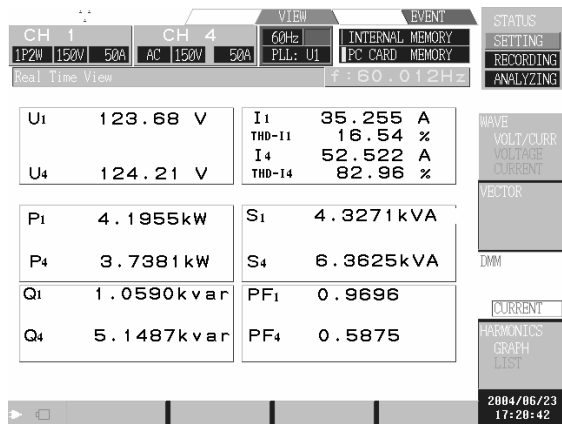


FIGURA 8

Parâmetros de entrada do conjunto carga e filtro ativo paralelo (canal 1) e carga não-linear (canal 4)

Na Figura 8 acima, as variáveis são assim definidas: U_1 e U_4 representam respectivamente a tensão de alimentação do ponto de acoplamento comum (conjunto carga e filtro ativo paralelo) e a tensão na carga; I_1 e I_4 representam respectivamente a corrente na entrada do conjunto carga e filtro ativo paralelo e a corrente na entrada da carga; P_1 e P_4 representam respectivamente a potência ativa do conjunto carga e filtro ativo paralelo e a potência ativa da

carga; Q_1 e Q_4 representam respectivamente a potência reativa do conjunto carga e filtro ativo paralelo e a potência reativa da carga; S_1 e S_4 representam respectivamente a potência aparente do conjunto carga e filtro ativo paralelo e a potência aparente da carga; e PF_1 e PF_4 representam respectivamente o fator de potência do conjunto carga e filtro ativo paralelo e o fator de potência da carga.

Ressalta-se o consumo do próprio filtro ativo paralelo, que está em cerca de 10% da potência da carga alimentada, sendo representado esse consumo, principalmente, por perdas de chaveamento nos semicondutores de potência (IGBT's). Para outros parâmetros o filtro ativo paralelo traz melhoras substanciais, como por exemplo o fator de potência, que atingiu o valor de 97% aproximadamente, enquanto que a taxa de distorção harmônica da corrente reduziu de 82,96% para cerca de 16%.

Outra carga interessante para avaliar o comportamento do filtro ativo paralelo, é a carga puramente resistiva, onde não há necessidade alguma de correção, e o mesmo deve permanecer sem fornecer ou absorver reativos.

Na Figura 9 tem-se o comportamento dos sinais de entrada: tensão de alimentação AC, corrente absorvida pela carga e corrente entregue pelo sistema para o conjunto carga e filtro ativo paralelo.

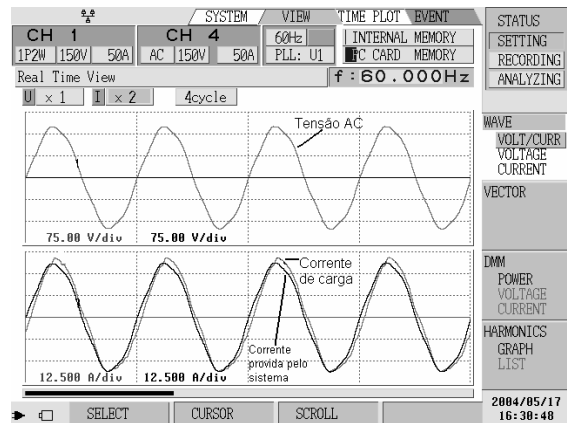


FIGURA 9

Comportamento dos sinais de entrada: tensão AC (75 V/div), corrente de carga (12,5 A/div) e corrente provida pelo sistema (12,5 A/div)

A idéia de que o filtro ativo paralelo pode se adaptar à carga e suas características elétricas, determinando o nível de reativos entregue ou absorvidos por este à mesma, é evidente na comparação entre as Figuras 7 e 9, onde na primeira, tem-se o nível máximo de reativos que o protótipo de 5 kVar pode fornecer e na outra, o nível mínimo, pois a carga é puramente resistiva.

O desempenho do protótipo de filtro ativo paralelo atende satisfatoriamente às duas situações.

Em termos numéricos, o comportamento dos parâmetros elétricos de entrada nesta situação, alimentando uma carga puramente resistiva, pode ser observado na Figura 10.

Como o sistema de detecção do nível de reativos é feito através da digitalização dos sinais analógicos de tensão e corrente, é esperado um certo erro, pois a representação digital dos sinais analógicos é realizada com 12 bits; e como o sistema opera com chaveamento em alta frequência, as chaves semicondutoras de potência apresentam perdas mesmo que não estejam em pleno processamento de potência. Isso implica que os parâmetros a serem apresentados devem mostrar diferença entre o consumo somente da carga e do conjunto carga e filtro ativo paralelo.

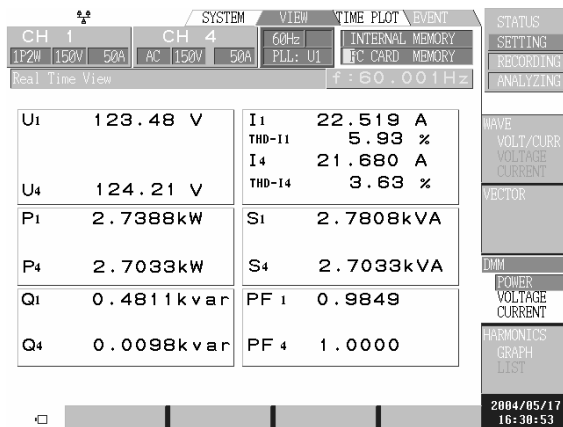


FIGURA 10

Parâmetros de entrada do conjunto carga e filtro ativo paralelo (canal 1) e carga puramente resistiva (canal 4)

As variáveis apresentadas na Figura 10 seguem a definição já dada anteriormente, na Figura 8. Claramente nota-se que o fator de potência, de fato, reduziu da unidade para 98%, em função dos fatores já comentados, apesar de ainda ser um fator de potência elevado. A taxa de distorção harmônica da corrente também sofreu pequena elevação, algo em torno de 2%.

Também foi testado o protótipo em uma situação onde a carga é linear com deslocamento entre fundamental de tensão e de corrente (indutiva), porém de baixo consumo. Isso representa detecção de baixos níveis de corrente e necessidade de pequena quantidade de reativos, em termos absolutos. Na Figura 11 tem-se o comportamento dos sinais de entrada de tensão de alimentação e das correntes, tanto da carga, quanto do conjunto carga e filtro ativo paralelo.

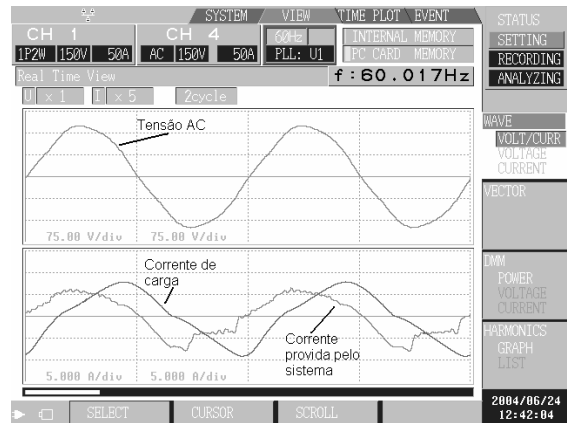


FIGURA 11

Comportamento dos sinais de entrada: tensão AC (75 V/div), corrente de carga (5 A/div) e corrente provida pelo sistema (5 A/div)

Fica evidenciado que a corrente provida pelo sistema está com maior taxa de distorção em relação à corrente somente da carga. Isso ocorre pois, como o protótipo foi projetado para atender um fornecimento de reativos da ordem de 5 kVar, seus sensores de corrente estão com o fundo de escala ajustados para esses valores de corrente, ou seja, algo em torno de 50 ampères. Quando se coloca uma carga muito menor, isso causa perda de exatidão na medição da corrente. Na Figura 12 pode-se avaliar melhor os níveis de corrente que são mencionados, incluindo outros parâmetros elétricos do conjunto carga e filtro ativo paralelo.

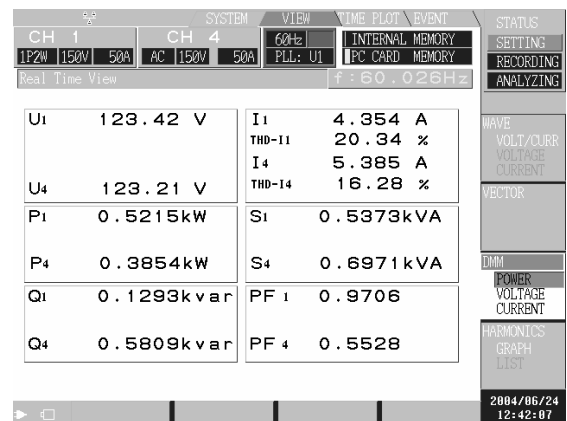


FIGURA 12

Parâmetros de entrada do conjunto carga e filtro ativo paralelo (canal 1) e carga linear indutiva (canal 4)

As variáveis apresentadas na Figura 12 seguem a definição já dada anteriormente, na Figura 8. Se as Figuras 11 e 12 forem comparadas pode-se concluir que, mesmo que o filtro ativo paralelo introduza pequena elevação na taxa de distorção harmônica da corrente, o benefício que ele traz de corrigir o deslocamento entre fundamentais de tensão e corrente, é superior, fazendo com que o

fator de potência eleve-se de 55% para cerca de 97%. Vale lembrar que a carga está em torno de 10% da nominal.

4.0 CONCLUSÕES

A inserção do filtro ativo paralelo representa uma solução viável tecnicamente para o problema de fornecimento de reativos pois se adapta a cada situação, dentro de seus limites de tensão e corrente, fornecendo sempre a quantidade necessária à carga, sem provocar danos como elevação dos níveis da tensão de alimentação.

As cargas encontradas atualmente no ambiente industrial apresentam, em sua maioria, grande nível de distorção harmônica na corrente, o que representa um grande campo de atuação para o filtro ativo paralelo, pois outras soluções como bancos capacitivos não corrigem distorções harmônicas, apenas deslocamentos entre fundamentais de tensão e corrente. Mesmo em ambientes como sistema de distribuição de média tensão de 13,8 kV, a ausência de cargas no secundário do transformador (baixa tensão)

provoca a redução do fator de potência, em função da componente de magnetização do transformador, penalizando o consumidor nessa situação, que poderia ser solucionado com a inserção do filtro ativo paralelo.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Bettega, J. N. Fiorina, *Active Harmonics Conditioners and Unity Power Factor Rectifiers*, Cahier Technique, no 183, Schneider Electric, 1999;
- [2] B. Singh, K. Al-Haddad, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 46, no 3, Oct. 1999, pp. 960-971;
- [3] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits", in *Proceedings of the 1983 International Power Electronics Conference*, pp. 1375-1386;
- [4] R. W., Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, Kluwer Academic Publishers, 1999;
- [5] S. D. Snyder, *Active Noise Control Primer*, AIP Press, 2000, p. 46;

