

Desenvolvimento e Implementação de um Filtro Ativo de Potência

L.E. Borges da Silva (UNIFEI), E. H. Takauti (EDP-Bandeirante), G.Lambert Torres (UNIFEI), V.F. da Silva (UNIFEI), J. Haddad (UNIFEI) e L.E. de Oliveira (UNIFEI)

RESUMO

Atualmente o uso intensivo de cargas não-lineares, tais como conversores estáticos e equipamentos de velocidade ajustáveis, para se obter um melhor aproveitamento energético e aumento da produção, tem degradado a qualidade da energia elétrica distribuída. Estes tipos de cargas, normalmente cargas industriais de média e alta potência, constitui o maior foco de geração de harmônicos de corrente. A circulação de correntes harmônicas além de produzir o aumento das perdas nos condutores e equipamentos, pode afetar equipamentos de medidas elétricas, equipamentos de comunicação e sistemas de controle. Este artigo apresenta os desenvolvimentos realizados no Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da EDP-Bandeirante sob o mesmo título deste artigo. O objetivo deste projeto é o desenvolvimento e instalação de Filtros Ativos de Potência para compensação dos harmônicos de corrente.

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos, Eletrônica de Potência, Filtro Ativo de Potência, Qualidade de Energia, Conversores de Potência.

I. INTRODUÇÃO

A distorção harmônica constitui-se em um dos temas de grande importância e preocupação na área de engenharia elétrica sendo um dos principais tópicos na área de estudos de qualidade da energia elétrica e sua conservação, principalmente no tocante a sistemas industriais.

A energia elétrica é produzida de forma senoidal e uma grande parte das cargas conectadas a rede elétrica solicitam correntes senoidais, as quais são chamadas de cargas lineares. Com o avanço da tecnologia, principalmente na área de eletrônica de potência, muitas das atuais cargas apresentam característica de não linearidade, ou seja, necessitam de correntes não senoidais.

Devido à crescente proliferação dessas cargas não-lineares, os sistemas elétricos cada vez mais estão recebendo grandes injeções de correntes harmônicas que provocam, entre outros efeitos, distorção de tensão. Assim, as tensões e/ou correntes desses sistemas deixam de ter forma de onda senoidal.

Os circuitos elétricos operando de forma não-linear causam diversos problemas tanto para a Concessionária quanto para os consumidores em geral, como:

Operação incorreta de equipamentos de controle e proteção;

- Erros em medidores de energia ativa utilizados nas indústrias, comércios e residências;
- Aumento de perdas em equipamentos como transformadores, motores, cabos, banco de capacitores, etc. ;
- Aumento da corrente do neutro de transformadores;
- Interferência em sistemas de comunicação;
- Redução do fator de potência;
- Sobretensão devido à circulação de correntes harmônicas, entre outros.

Deve-se salientar que as correntes harmônicas podem causar distorções na tensão e estas por sua podem alterar o funcionamento de vários equipamentos eletrônicos, pois estas distorções podem criar falsas passagens por zero, produzindo assim erros que podem alterar o funcionamento de componentes e/ou dispositivos.

Nessa nova realidade, ou seja, circuitos elétricos operando em condições não-senoidais, novas definições de potência devem ser desenvolvidas, pois essas definições são utilizadas no gerenciamento da energia, na compensação de cargas ou na tarifação. Além de novas definições, a instrumentação também deve ser revista, pois os medidores de potência e energia convencionais, apresentam erros consideráveis quando em condições utilizados em condições não-senoidais.

É nesse contexto que surge uma nova componente de potência que leva em conta a distorção, a potência distorcia (D). As definições para potência ativa, reativa e aparente para condições senoidais, e seus respectivos significados, já são bastante conhecidas e compreendidas em nível de geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica. Porém, em condições não-senoidais, as definições de potência não são ainda aceitas de forma unânime, existindo acirrados debates desenvolvendo renomados pesquisadores que propõem suas definições e criticam as existentes.

L.E. Borges da Silva, G. Lambert Torres, V.F. da Silva, J. Haddad e L.E. de Lacerda são afiliados à Universidade Federal de Itajubá (e-mail: {leborges,germano, valberto, jamil, levy}@iee.efei.br).

E.H. Takauti trabalha na EDP-Bandeirante (e-mail: hideki@Bandeirante.com.br).

II. VISÃO GERAL DOS MÉTODOS DE CONTROLE

A eficiência de um filtro ativo de potência depende dentre outros fatores da qualidade do método de geração do padrão de referência que será seguido para se gerar as correntes de compensação que irão efetivamente eliminar as correntes harmônicas geradas por cargas não-lineares.

Vários métodos de obtenção dos padrões de referência foram propostos na literatura [1]-[5], dentre eles podemos citar o método de Akagi et al [1], o método de Bhattacharya et al [2] e o método de Zhou et al [3].

O método proposto por Akagi (método p-q) utiliza a Teoria das Potências Ativa e Reativa Instantâneas p-q. Nesta técnica são calculadas as potências real e imaginária, ambas com componentes CC e CA. As componentes CC's, que correspondem à frequência fundamental, são extraídas por meio de filtros. As componentes CA's, que correspondem ao conteúdo harmônico, são utilizadas para gerar o padrão de referência das correntes de compensação. Este método tem a desvantagem de ser afetado pela presença de harmônicos na tensão da rede e de usar filtros convencionais o que o torna lento. O método é muito eficiente para cargas trifásicas equilibradas.

O método proposto por Bhattacharya (método id-iq) se baseia no cálculo das componentes id-iq das correntes ativa e reativa instantâneas. Este método cria um sistema de referência constituído por dois eixos ortogonais que giram na frequência da tensão da rede (sistema d-q), isto é, uma referência síncrona. Esta referência sincronizada com a rede é conseguida por meio de uma malha de fase travada ou PLL (phase locked loop)[6]-[7]. Nesta referência girante, a fundamental das correntes se transforma em níveis CC nas componentes id-iq, que são filtrados por meio de filtros convencionais. O método é imune à presença de harmônicas na rede, uma vez que o PLL apresenta uma forte característica de rejeição a ruídos. Por usar filtros convencionais é também um método lento (em [2] é relatado um transitório de 2 ciclos). Como o método anterior, este método foi proposto para cargas trifásicas equilibradas.

O método proposto por Zhou é um método muito rápido e se baseia no princípio da mínima corrente de compensação, não usando filtros convencionais. Este método tem por base o fato de que quando a corrente fundamental é totalmente extraída, o valor RMS da corrente de compensação (I_c) é mínimo. A corrente fundamental pode ser descrita como: $I_1 = A_1 \cdot \sin(\omega t)$. O fator $\sin(\omega t)$ pode ser obtido por meio de um PLL e, portanto, A_1 é o fator que precisa ser encontrado. A determinação do valor de A_1 é feita por um circuito de controle que incrementa A_1 de um valor ΔA proporcional ao módulo de ΔI_c . Se este incremento proporcionar um aumento de I_c , o sinal de ΔA deve ser trocado, caso contrário, o sinal está correto e A_1 está convergindo para o valor da amplitude da fundamental. Este é um algoritmo bastante rápido, sendo relatado em [3] um

transitório de 1/2 ciclo. No entanto, ele apresenta a desvantagem de necessitar de um ajuste por tentativa e erro do ganho proporcional utilizado para gerar ΔA . Este método foi proposto para cargas monofásicas, podendo ser aplicado em cada fase individualmente, o que possibilita seu uso em cargas trifásicas desequilibradas.

Este artigo propõe uma modificação no método id-iq no sentido de se eliminar a causa de sua lenta resposta dinâmica, ou seja, o uso de filtragem convencional. Com isto, consegue-se um método de geração de padrão de referência com as seguintes características:

- extremamente rápido, com um transitório igual a 1/6 de ciclo (ou 1/3 de ciclo, caso haja harmônicas pares na corrente) para cargas trifásicas equilibradas;
- imune à presença de harmônicos nas tensões da rede;
- não necessita de ajustes;
- não representa um grande esforço computacional, pois não usa filtros convencionais, apenas o cálculo de médias móveis sobre pequenos períodos.
- aplicável em cargas desequilibradas, pois pode ser usado em cada fase separadamente, conservando, ainda, uma boa resposta dinâmica.

A fundamentação desta modificação, ou seja, por que a filtragem convencional pode ser substituída pelo cálculo de média móvel será apresentada. Simulações do comportamento dinâmico do método serão mostradas e comparadas com o método proposto por Bhattacharya [2] e, finalmente, resultados experimentais comprovando a estratégia serão também apresentados.

III. FUNDAMENTOS DA UTILIZAÇÃO DA MÉDIA MÓVEL

O diagrama de blocos da estratégia de retirada da fundamental do método da referência síncrona tradicional pode ser visto na Fig. 1.

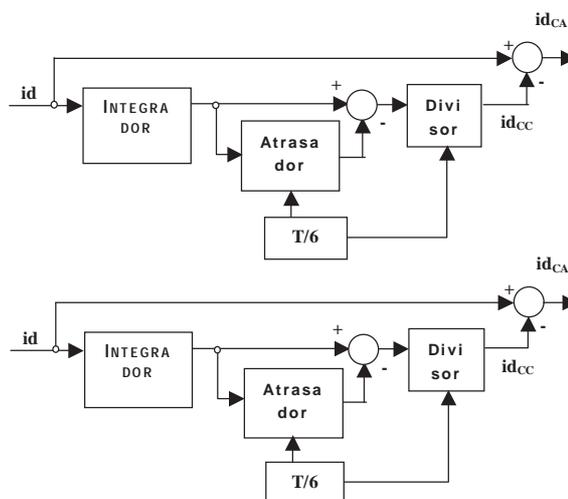


FIGURA 1 – Diagrama de blocos para retirada das componentes cc de id e iq pelo método convencional

Neste diagrama de blocos supõe-se que as correntes das fases a, b e c da carga (que vamos supor equilibradas)

já foram transformadas para o sistema de referência estacionária (transformação a-b-c para a-b-0) e depois transformadas do sistema de referência estacionária para o sistema de referência síncrona (transformação a-b para d-q). Um filtro (Butterworth, FIR etc.) é usado para a extração dos valores CC's que representam a componente fundamental das correntes trifásicas. Um PLL fornece os vetores unitários ($\sin(q)$ e $\cos(q)$) para que seja feita a transformação do sistema estacionário para o síncrono. As transformações estão mostradas nas matrizes abaixo:

Transformação a-b-c para a-b-0 (Transformação de Clark com potência invariante):

$$T_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Transformação a-b para d-q (Transformação de Park [5]):

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Na Fig.2 é apresentado o diagrama de blocos com a modificação proposta, admitindo-se que apenas as harmônicas ímpares estão presentes nas correntes da carga. O filtro é substituído pelos blocos que efetuam a média móvel, isto é, um integrador, um atraso de transporte, um subtrator e um multiplicador. Na saída do bloco de atraso tem-se o valor da integral atrasado em $1/6$ do período da fundamental, de modo que a saída da integral menos a saída do bloco de atraso represente a integral da corrente no intervalo de $t - T/6$ a t , onde T é o período da componente fundamental das correntes da carga no sistema estacionário. T é obtido através do PLL. A função do multiplicador é efetuar a divisão da integral pelo intervalo de integração, isto é, $T/6$. Portanto, o que se tem ao final são as médias móveis das componentes i_d e i_q em $1/6$ do período da fundamental:

$$\text{Média}_{\text{móvel}, id} = \frac{6}{T} \cdot \int_{t-T/6}^t id \cdot dt \quad (3.1)$$

$$\text{Média}_{\text{móvel}, iq} = \frac{6}{T} \cdot \int_{t-T/6}^t iq \cdot dt \quad (3.2)$$

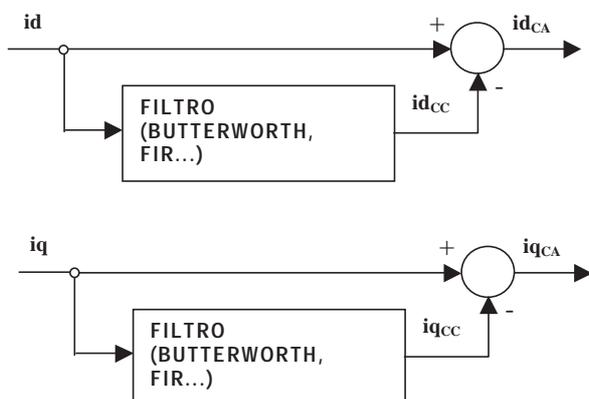


FIGURA 2 - Diagrama de blocos para retirada das componentes cc de i_d e i_q pelo método da média móvel

Tal procedimento se fundamenta no fato de que todas as harmônicas de ordem ímpar se tornam múltiplas de 6 quando observadas no sistema de referência d-q. Assim, com exceção da fundamental, que se transforma em um nível CC, todas as harmônicas ímpares têm a média, em $1/6$ do período, igual a zero.

A seguir, será feita uma descrição detalhada de como as harmônicas ímpares se tornam múltiplas de 6 quando transformadas.

Em primeiro lugar, é importante observar o tipo de seqüência de fase que cada harmônica apresenta. Se a carga é equilibrada, as correntes apresentarão um defasamento entre si de $2\pi/3$, ou seja, os defasamentos das fases a, b e c serão, respectivamente: $j_a = 0$, $j_b = -2\pi/3$ e $j_c = +2\pi/3$. Com isto, os defasamentos nas fases a, b e c para uma harmônica de ordem n qualquer serão, respectivamente:

$$\varphi_{an} = 0 \cdot n \quad (4.1)$$

$$\varphi_{bn} = -2 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot n \quad (4.2)$$

$$\varphi_{cn} = +2 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot n \quad (4.3)$$

As harmônicas múltiplas de três serão as de ordem $3i$, com $i=0,1,2,3,\dots$. Substituindo-se n por $3i$ em (4.1), (4.2) e (4.3), tem-se que $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$, ou seja, as harmônicas múltiplas de 3 apresentam seqüência de fase zero. Deste modo, as harmônicas múltiplas de 3 estarão confinadas em $i0$. Obviamente, esta análise é desnecessária quando se trata de sistemas com três fios, já que a ausência do neutro elimina as componentes de seqüência zero e, portanto, as harmônicas múltiplas de 3.

As harmônicas de ordem $6i+5$ para $i=0,1,2,3,\dots$ (ou seja, 5, 11, 17, 23...) apresentam seqüência de fase negativa, pois, substituindo-se n por $6i+5$ em (4.1), (4.2) e (4.3), tem-se que $j_a = 0$, $j_b = +2\pi/3$ e $j_c = -2\pi/3$, ou seja, a componente da fase b está adiantada em relação à componente da fase a.

As harmônicas de ordem $6i+1$ para $i=0,1,2,3,\dots$ (ou seja, 1, 13, 19, 25...) apresentam seqüência de fase positiva, pois, substituindo n por $6i+1$ em (4.1), (4.2) e (4.3), tem-se que $j_a = 0$, $j_b = -2\pi/3$ e $j_c = +2\pi/3$, ou seja, a componente da fase b está atrasada em relação à componente da fase a.

Ao passar pela transformação síncrona, harmônicas de seqüência positiva têm a sua ordem decrementada de 1 e harmônicas de seqüência negativa têm a sua ordem incrementada de 1. Portanto as harmônicas de ordem $6n+1$ se tornarão harmônicas de ordem $6n$ e as harmônicas de ordem $6n+5$ se tornarão harmônicas de ordem $6n+6 (=6(n+1))$. Assim, após a transformação síncrona todas as harmônicas serão múltiplas de 6, de maneira que somente a componente de ordem zero (a fundamental) apresentará um valor médio não nulo em $1/6$ do período.

Caso haja assimetria entre as partes positiva e negativa da forma de onda das correntes de carga, haverá a presença de harmônicas pares, que, no sistema d-q, se apresentam como harmônicas múltiplas de 3, pelas razões abaixo:

- a) As harmônicas pares múltiplas de 3, apresentam seqüência de fase zero;
- b) Já as harmônicas de ordem $6i+2$ para $i=0,1,2,3...$ (ou seja, 2, 8, 14, 20...) apresentam seqüência de fase negativa, pois, substituindo-se n por $6i+2$ em (4.1), (4.2) e (4.3), tem-se que $j_a = 0$, $\phi_b = +2\pi/3$ e $\phi_c = -2\pi/3$;

E as harmônicas de ordem $6i+4$ para $i=0,1,2,3...$ (ou seja, 4, 10, 16, 22...) apresentam seqüência de fase positiva, pois, substituindo-se n por $6i+4$ em (4.1), (4.2) e (4.3), tem-se que $j_a = 0$, $\phi_b = -2\pi/3$ e $\phi_c = +2\pi/3$;

Pelas razões já expostas, tem-se que: as harmônicas de ordem $6i+2$ e $6i+4$ se tornarão harmônicas de ordem $6i+3$ ($=3(2i+1)$), ou seja, serão múltiplas de 3.

Havendo, portanto, harmônicas de ordem par nas correntes, as médias móveis deverão ser calculadas sobre o intervalo de $t-T/3$ a t (observe-se que harmônicas múltiplas de 6 são também múltiplas de 3). O conhecimento prévio de qual intervalo de integração adotar não é, entretanto, algo necessário. A decisão pode ser tomada instantaneamente através da análise e comparação das componentes contínuas de i_d e i_q , bem como, suas respectivas variações.

IV. APLICAÇÃO DO MÉTODO DA REFERÊNCIA SÍNCRONA A CARGAS DESEQUILIBRADAS

O método da referência síncrona, em sua forma básica, está baseado no pressuposto de que as cargas trifásicas a terem suas correntes compensadas são equilibradas. No entanto, é possível contornar esta limitação, aplicando-se o método em cada fase separadamente.

A Fig. 3 mostra como isso é possível, dando como exemplo a aplicação do método na fase a.

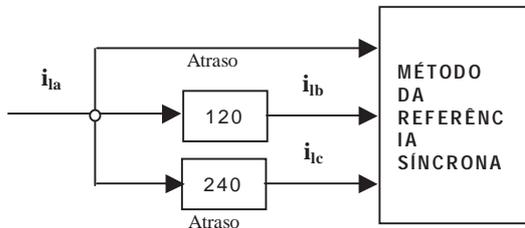


FIGURA 3 – Aplicação do método da referência síncrona apenas na fase a

A estratégia é, portanto, conseguir as três correntes a partir da aquisição de apenas uma. As duas correntes que faltam são geradas através de atrasos de 120 e 240°, facilmente implementáveis por software.

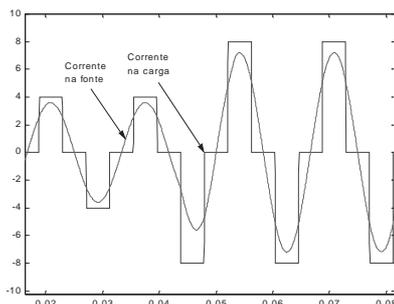


FIGURA 4 – Desempenho do método i_d - i_q modificado, aplicado a uma única fase.

Esta estratégia, no entanto, provoca um aumento no transitório em decorrência dos atrasos nas correntes geradas. Assim, na Fig. 3, pode-se notar que qualquer transitório na corrente i_a , só estará presente nas três correntes após 240°, ou seja, 2/3 de ciclo. Portanto, quando aplicado individualmente em cada fase, o método apresenta um transitório máximo de 1 e 5/6 de ciclo, para correntes com e sem harmônicos de ordens pares, respectivamente.

A Fig. 4 mostra o desempenho do método, quando aplicado a uma única fase. Nota-se, um transitório bem menor que 5/6 de ciclo, em decorrência da forma de onda da corrente.

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O método da referência síncrona com a modificação proposta foi implementado em tempo real através do Simulink® e do Real Time Workshop®. A aquisição das correntes foi efetuada por meio de sensores de efeito Hall e de uma placa de aquisição de dados PCL-812 da Advantech®. A carga não-linear utilizada no ensaio foi um retificador trifásico não-controlado.

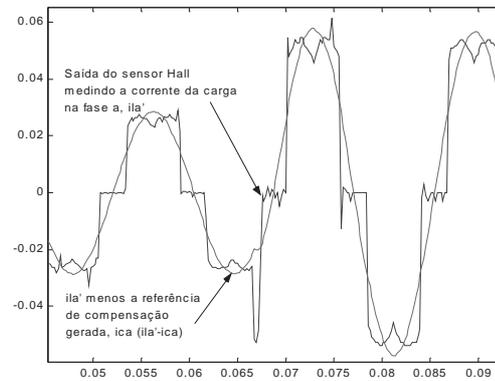


FIGURA 5 – Resposta a degrau de corrente do método modificado aplicado nas três fases de um retificador trifásico não-controlado.

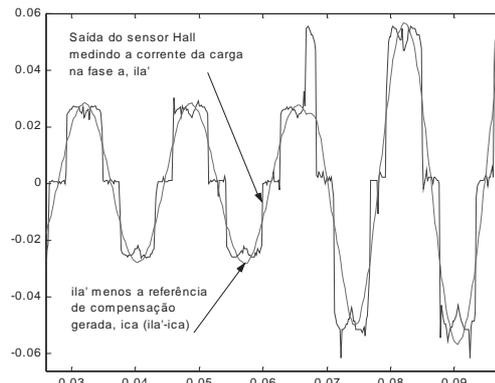


FIGURA 6 – Resposta a degrau de corrente do método modificado aplicado em uma fase de um retificador trifásico não-controlado.

A Fig. 5 mostra a resposta a degrau do método da referência síncrona com a modificação proposta, aplicado às três fases da carga. O efeito de um degrau de corrente no retificador foi implementado através de um degrau de ganho na aquisição. Na Fig. 6, tem-se o desempenho do método modificado quando aplicado somente à fase a.

VI. MONTAGEM DO PROTÓTIPO

O equipamento desenvolvido é composto de quatro blocos básicos. O diagrama em blocos do equipamento detalhando as inter-relações entre os diversos blocos está ilustrado na Figura 7. O primeiro é o bloco dos transdutores de tensão e corrente associado com os circuitos de condicionamento do sinal. O segundo bloco é o sistema de controle responsável pela adaptação dos valores medidos a realidade da estratégia de controle, cálculos das referências de corrente a serem enviadas ao conversor de potência e implementação dos algoritmos de proteção. O terceiro bloco se refere ao conversor de potência, o manipulador da energia elétrica de forma a se conseguir o efeito de filtro de harmônicos pelo equipamento. O quarto diz respeito ao sistema de interface entre o filtro ativo, mais propriamente o conversor de potência do filtro ativo, e o sistema de distribuição. Esta interface é feita através de transformadores de corrente ou de tensão. Estes transformadores, especialmente projetados para este tipo de aplicação irão garantir a compatibilidade entre as tensões do conversor e as tensões da rede de distribuição.

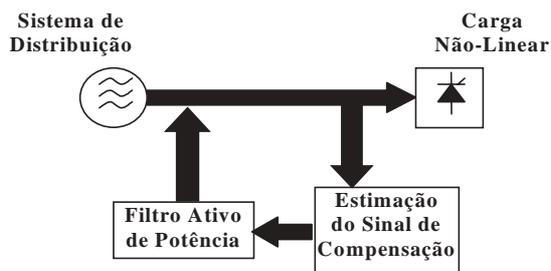


FIGURA 7 – Diagrama em Blocos do Protótipo

Este projeto teve como principal objetivo o desenvolvimento de um filtro ativo de potência de pudesse eliminar harmônicos de diversas ordens. Inicialmente, dividiu-se as tarefas em duas que foram realizadas em paralelo: o desenvolvimento dos programas computacionais de controle e a especificação e montagem do primeiro filtro. Os programas computacionais deveriam servir para todas as versões dos filtros ativos que viessem a ser construídos; enquanto o primeiro filtro serviria para testes.

Foi então montado a primeira versão do filtro ativo todos os componentes, placas e circuitos desenvolvidos pela equipe. A Fig. 8 apresenta uma foto deste primeiro protótipo teste.

Este primeiro protótipo serviu para que todas as lógicas e programas computacionais fossem testados. Esta fase foi importante para eliminar diversos problemas de especificação, pois como o filtro foi construído com componentes mais baratos (de menor potência), permitia testes em que eles eram saturados e, muitas vezes, queimados.



FIGURA 8 – Foto do Primeiro Protótipo.



FIGURA 9 – Visão Geral do Segundo Protótipo.

Esta estrutura permitiu também que parte do processo de transferência tecnológica fosse feita. Elementos do corpo técnico da EDP-Bandeirante visitaram a montagem e

puderam realizar diversos testes. Este primeiro protótipo foi montado de forma segmentar, com os seus componentes dispostos de acordo com a sua função no equipamento, ou seja, de forma didática.

Terminada a fase de testes com este primeiro protótipo foi iniciada a construção do segundo protótipo, para atuar em uma rede de 220 (V). Alguns dos circuitos e componentes, por serem de maior potência, foram adquiridos, substituindo os existentes no primeiro protótipo. Os programas computacionais continuaram praticamente os mesmos.

Nas reuniões com os profissionais da EDP-Bandeirante vislumbrou-se a possibilidade de se colocar este protótipo em uma rede de 13,8 kV. Com isto, alguns elementos do segundo protótipo foram trocados e alguns ajustes foram alterados. A Figura 9 uma foto do segundo protótipo.

Finalmente, decidiu-se instalar o protótipo na Universidade de Taubaté, um cliente da EDP-Bandeirante, que devido a seus laboratórios pode gerar os harmônicos necessários a realização de qualquer tipo de teste e que teria todas as condições para instalar e monitorar o equipamento. Clientes industriais já foram estudados e poderão ser alvo futuro da instalação do protótipo.

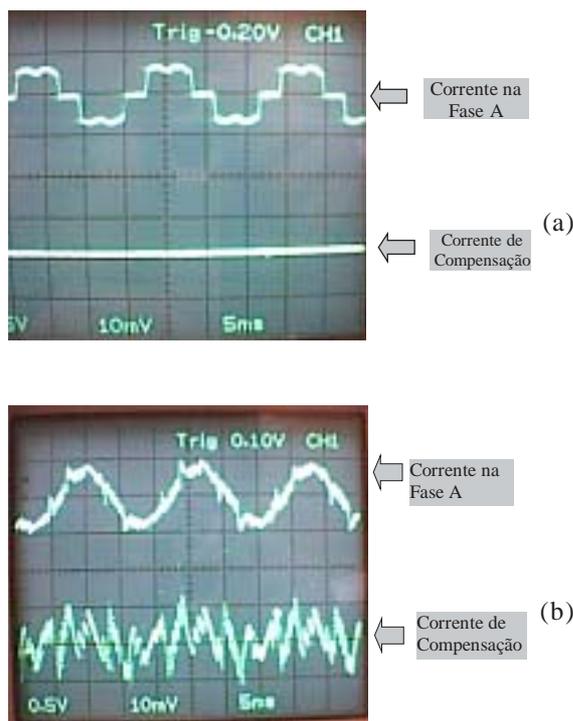


FIGURA 10 – Resultado de um Testes de Laboratório para Eliminação de Harmônicos, corrente da fase A e a corrente de compensação.

A Figura 10 mostra o resultado de um dos testes laboratoriais, onde se podia produzir uma distorção harmônica controlada e bastante grande (quando comparada a existente na prática).

A Figura 10(a) apresenta a corrente na fase A da carga sem a operação do protótipo; enquanto a Figura 10(b) mostra a corrente na fase A com a inclusão da corrente de compensação gerado pelo equipamento desenvolvido.

VII. CONCLUSÕES

A modificação realizada no método id-iq traz as seguintes vantagens decorrentes da eliminação dos filtros convencionais: redução do transitório (no pior caso para 1/3 de ciclo), simplicidade de implementação e diminuição do esforço computacional. Estes benefícios vêm se juntar à imunidade a harmônicos na tensão da rede, que o método já apresentava.

Um aspecto interessante do método apresentado é a resposta dinâmica extremamente rápida que é apresentada na ausência de harmônicas pares. Portanto, plantas com cargas não-lineares que só apresentem harmônicas ímpares poderão ter suas correntes compensadas com um transitório quase ideal de 1/6 de ciclo.

A aplicação do método em cada fase separadamente, possibilitando a compensação de harmônicos em correntes de cargas desequilibradas é também uma característica importante decorrente da modificação proposta, pois, caso contrário, a resposta dinâmica seria demasiado lenta.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., "Instantaneous reactive power compensation comprising switching devices without energy storage components", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 1A-20, pp 625-630, 1984.
- [2] Bhattacharya, S., Divan, D., "Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system", IEEE/IAS Annual Meeting, pp 2531-2540, 1995.
- [3] Zhou, L., Li, Zicheng, "A novel active power filter based on the least compensation current control method", IEEE Trans. On Power Electron., vol. 15, pp 655-659, 2000.
- [4] Dixon, J. W., García, J. J., and Mórán, L., "Control system for three-phase active power filter which simultaneously compensates power factor and unbalanced loads", IEEE Trans. Ind. Elect., vol. 42, pp 636-641, 1995.
- [5] Soares, V., Verdelho, P., and Marques, G. D., "An instantaneous active and reactive current component method for active filters", IEEE Trans. On Power Electron., vol. 15, pp 660-669, 2000.
- [6] Best, R. E., "Phase Locked Loops – Theory, Design and Applications", McGraw-Hill Book, USA, 1984.
- [7] Kaura, V., Blasko, V., "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 33, pp 58-63, 1997.