

Desenvolvimento de um Condicionador Unificado de Energia – UPQC

M. Aredes COPPE/UFRJ, R. M. Fernandes COPPE/UFRJ, J. A. Moor Neto – COPPE/UFRJ
M. J. Villela Siqueira – Bandeirante Energias do Brasil

Resumo - Este artigo apresenta um protótipo “cabeça de série” de 90kVA em 440V de um Condicionador Unificado de Energia UPQC (Unified Power Quality Conditioner) desenvolvido para ser utilizado em sistemas a três fios. Este equipamento permite a compensação em tempo real de harmônicos e desbalanços tanto na tensão como na corrente, além de compensar a parcela reativa da corrente. Serão apresentados, o histórico do estudo relacionado com o desenvolvimento do protótipo, os aspectos gerais relacionados à operação do equipamento, bem como os resultados experimentais obtidos junto ao equipamento em questão.

Palavras-chave—Desbalanços, Fator de Potência, Filtros Ativos, Harmônicos, Qualidade de Energia.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia dos semicondutores, foi possível inserir o seu uso em equipamentos eletro-eletrônicos presentes nos diferentes tipos de consumidores atendidos pelas concessionárias. Estes semicondutores, apesar de propiciarem o desenvolvimento de equipamentos eletro-eletrônicos cada vez mais sofisticados, apresentam características não-lineares em sua funcionalidade. Estas características não-lineares, presentes nos semicondutores, são responsáveis pela injeção de harmônicos no sistema elétrico. Diante deste contexto, fica estabelecida uma situação paradoxal, pois ao mesmo tempo em que injetam harmônicos no sistema, necessitam de uma energia de boa qualidade para operarem de forma adequada.

No Brasil, a ANEEL, responsável por regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica vem, em conjunto com importantes agentes do setor elétrico e a comunidade científica, elaborando uma série de documentos denominados Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [1]. Com relação ao tema QEE, destaca-se o módulo 8 deste documento que define os conceitos e as terminologias, caracteriza os fenômenos, estabelece os parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão. Os aspectos da QEE, em regime permanente ou transitório, considerados pelo PRODIST são: tensão em

regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e VTCD.

Com as mudanças nas características dos problemas de QEE atuais são necessários novos critérios, metodologias e tecnologias para a escolha adequada da melhor solução para o condicionamento da energia, levando-se em consideração os tipos de distúrbios de QEE que se deseja compensar.

Neste sentido, grupos de pesquisas empresas ligadas à distribuição de energia vêm pesquisando e desenvolvendo equipamentos relacionados com o conceito de *Custom Power* aplicado com sistemas de distribuição que foi introduzido por Hingorani [3]. Entre estes tipos de equipamentos, destaca-se o condicionador *UPQC*, que é uma combinação de filtros ativos série e paralelo. Este condicionador unificado tem a capacidade de realizar tanto a compensação dos distúrbios de tensão provenientes do sistema, evitando que estes afetem uma carga sensível, quanto à compensação das correntes produzidas por cargas não lineares, evitando que elas introduzam problemas de QEE no sistema elétrico como: distorções harmônicas, flutuações de tensão, baixo fator de potência.

Deste modo, por intermédio do uso deste tipo de condicionador, as tensões disponibilizadas para a carga e as correntes drenadas da fonte serão mantidas senoidais e balanceadas, além de propiciar a compensação da parcela reativa da corrente de carga. A Figura 1 ilustra o princípio da compensação ativa estabelecida pelo condicionador *UPQC*.

Este artigo apresentará um protótipo “cabeça de série” de 90 kVA do Condicionador Unificado de Energia – *UPQC* para sistemas trifásicos a três fios de forma a compensar os seguintes distúrbios:

- distorções nas tensões de suprimento;
- desbalanços nas tensões de suprimento;
- distorções nas correntes da carga;
- desbalanços das correntes da carga;
- fator de potência.

Serão apresentados os resultados experimentais obtidos a partir da atuação deste protótipo na compensação de harmônicos e parcela reativa de corrente de uma carga não-linear e na compensação de desbalanços de tensão da fonte suprimento.

Este trabalho foi financiado pela concessionária de energia Bandeirante Energias do Brasil.

M. Aredes é o coordenador do projeto e professor da COPPE/UFRJ (e-mail: aredes@coe.ufrj.br).

R. M. Fernandes e J. A. Moor Neto são doutorandos da COPPE/UFRJ (e-mails: rodrigo@eneltec.com.br, moor@coe.ufrj.br).

M. J. Villela Siqueira é a gerente do projeto e trabalha na Bandeirantes Energias do Brasil (e-mail: jovita@enbr.com.br)

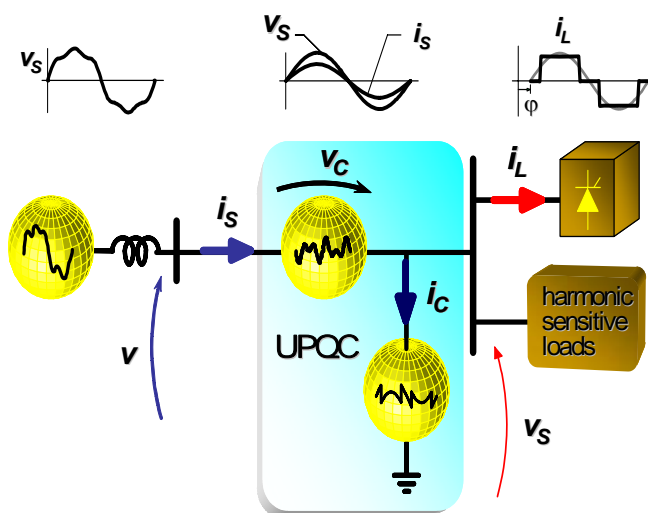


Figura 1: Princípio da compensação série e paralela combinadas.

II. OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa em questão pode ser caracterizada pelos objetivos elencados a seguir:

- Desenvolvimento de uma estratégia de controle otimizada para implementação em *DSP (Digital Signal Processor)* de ponto fixo;
- Desenvolvimento de um protótipo em escala reduzida de um Condicionador Unificado de Energia – *UPQC* para realização de testes preliminares em laboratório;
- Desenvolvimento de um protótipo “cabeça de série” de um Condicionador Unificado de Energia – *UPQC* a quatro fios para ser avaliado em um cliente especial da Bandeirantes Energias do Brasil;
- Desenvolvimento de novos protótipos considerando modificações que porventura foram consideradas necessárias após os testes em campo.

III. HISTÓRICO DA PESQUISA

O desenvolvimento do equipamento apresentado neste artigo tem as suas origens em um projeto de P&D realizado através da parceria entre a concessionária de energia Bandeirantes Energias do Brasil e o Laboratório de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ, iniciado no ano de 2002. A motivação original do trabalho encontra-se na solução de problemas de qualidade de energia elétrica enfrentados por alguns clientes especiais da concessionária.

As pesquisas realizadas resultaram no desenvolvimento de um protótipo “cabeça de série” de um Condicionador Unificado de Energia – *UPQC* que realiza a compensação em tempo real de distúrbios na tensão e corrente. Diversos estudos técnicos foram realizados durante o projeto de forma a possibilitar que os resultados apresentados neste artigo fossem alcançados.

As pesquisas basearam-se inicialmente na literatura técnica-científica acerca das teorias de filtragem ativa de energia.

Em 1976, L. Gyugyi e E. C. Strycula [13] introduziram os conceitos básicos dos filtros ativos de potência.

O desempenho de um filtro ativo depende em grande parte da estratégia de controle adotada. As principais teorias que são utilizadas no desenvolvimento desses controles são: a teoria das potências ativa e reativa instantâneas, desenvolvida inicialmente por Akagi et al. [2][14], a teoria da transformada síncrona d-q [15][16][5] e o método das minimizações de correntes de Firze [6][7][8][9].

A experiência do coordenador do projeto com condicionadores ativos de energia [10] foi importante para o desenvolvimento da pesquisa. Destaca-se aqui o desenvolvimento de um *UPQC* aplicado em sistemas trifásicos a quatro fios [4] e a publicação de um livro sobre aplicações de condicionamento de energia utilizando-se a teoria das potências instantâneas [12].

Diante do exposto, os esforços iniciais deste trabalho foram direcionados em estudos sobre as diferentes estratégias de controle, com o objetivo de avaliar e comprovar a aplicação de cada uma delas neste projeto de forma a permitir a escolha de uma ou outra de acordo com as necessidades do projeto.

Logo no início do projeto, foi apresentada uma nova estratégia de controle para o filtro ativo paralelo denominada “Controle das Correntes Senoidais de Frize” [17][18]. De forma dual, o mesmo princípio foi utilizado em [19] para desenvolver um novo controle para o filtro ativo série, denominado “Controle das Tensões Senoidais de Frize”, além de apresentar a integração desta estratégia com aquela desenvolvida em [17][18] para a aplicação no controle do *UPQC*.

Em seqüência aos estudos acerca das estratégias de controle, em [21][20] são comparados dois algoritmos de compensação: o primeiro baseados nas potências instantâneas definidas nas coordenadas $\alpha\beta 0$ (teoria pq); e segundo nas coordenadas de fase abc (teoria abc).

Em [22] são apresentados três algoritmos para aplicações em filtros ativos: Correntes Senoidais de Fryze e Tensões Senoidais de Fryze, já apresentados anteriormente, e um Controle de Amortecimento para auxiliar na estabilidade do filtro ativo oferecendo uma resistência adicional para as correntes harmônicas. Ainda na linha de pesquisa das correntes generalizadas de Fryze, foi desenvolvida uma estratégia de controle para inversores de três níveis [23], com o objetivo de propiciar uma alternativa para a melhoria futura do desempenho do *UPQC* utilizando este tipo de conversor.

O algoritmo de controle simplificado utilizado na implementação do protótipo laboratorial do *UPQC* permitiu a minimização das medições e dos cálculos [24].

Em 2005, apresentaram-se os aspectos gerais relativos ao desenvolvimento e implementação do protótipo laboratorial de 4,5 kVA do *UPQC*, bem como os resultados experimentais obtidos [25]. A experiência adquirida no desenvolvimento deste protótipo em laboratório forneceu embasamento

para a implementação do protótipo industrial “cabeça-de-série” do condicionador UPQC, cujos resultados experimentais serão apresentados neste artigo.

Após a realização das diversas pesquisas mencionadas optou-se pela estratégia de controle simplificada baseada na teoria pq para a implementação do protótipo “cabeça-de-série” do UPQC.

IV. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A estratégia de controle do UPQC é constituída de três controles, conforme mostra a Figura 2.

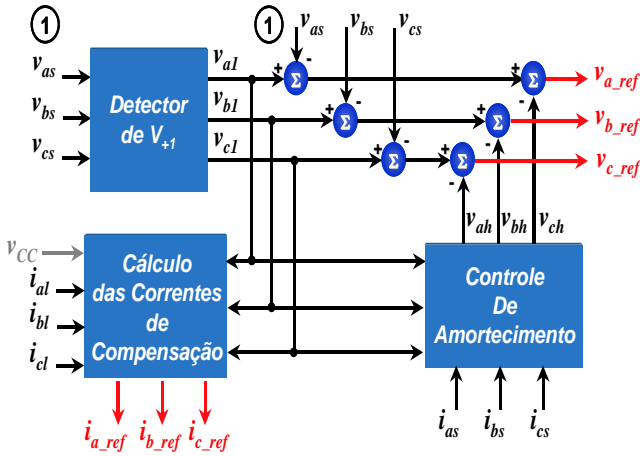


Figura 2: Diagrama de blocos para o controle do condicionador UPQC

O bloco “Detector de V+1” apresenta como entradas as tensões de suprimento v_{as} , v_{bs} , v_{cs} e fornece as tensões ideais v_{al} , v_{bl} e v_{cl} (que contém apenas a componente fundamental de seqüência positiva das tensões de suprimento). De posse destas tensões, juntamente com as correntes da carga i_{al} , i_{bl} , i_{cl} e da tensão do elo CC v_{cc} , o bloco de controle “Cálculo das correntes de Compensação”, determina as correntes de referência i_{a_ref} , i_{b_ref} , i_{c_ref} .

Por fim, com as mesmas tensões ideais determinadas pelo bloco de controle “Detector de V+1”, junto com as correntes da fonte i_{as} , i_{bs} , i_{cs} , o “Controle de Amortecimento” irá determinar as tensões harmônicas v_{ah} , v_{bh} , v_{ch} . Estas tensões irão oferecer uma resistência adicional para as correntes harmônicas que fluem no sistema CA.

Com as tensões de amortecimento determinadas, em conjunto com as tensões do sistema e, das tensões determinadas pelo controle “Detector de V+1”, as tensões de referência v_{a_ref} , v_{b_ref} , v_{c_ref} são determinadas pelo equacionamento apresentado na Figura 2. A partir do diagrama de blocos apresentado na Figura 2, pode se observar que são então necessários fazer aquisição e condicionamento dos seguintes sinais:

- Tensões medidas no sistema: v_{as} , v_{bs} , v_{cs} ;
- Tensão medida no elo CC: v_{cc} ;
- Correntes medidas na carga: i_{al} , i_{bl} , i_{cl} ;
- Correntes medidas no sistema i_{as} , i_{bs} , i_{cs} .

Além destes sinais, os controles utilizados para a comutação das chaves dos conversores série e paralelo, estão baseados nos erros entre os sinais de referência e os sinais medidos. Isto faz com que sejam necessárias ainda a medição e aquisição das tensões e correntes nas saídas dos conversores série e paralelo, respectivamente.

Por isso foi feito um esforço com o objetivo de reduzir o número de componentes do circuito de controle, de forma a compactá-lo sem perder a versatilidade e a robustez do controle. Outro aspecto relevante com a redução do número de medições está relacionado com a redução do número de componentes necessários para a montagem do circuito de controle, facilitando assim a detecção de possíveis erros durante a implementação. Levando em conta que o sistema em estudo opera em um sistema trifásico a três fios, foi feita então uma simplificação reduzindo o número de medições de acordo com o novo diagrama de blocos do condicionador UPQC, conforme mostra a Figura 3.

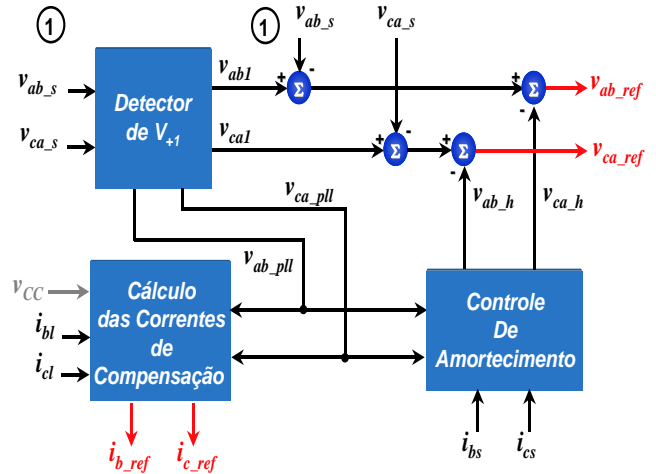


Figura 3: Diagrama de blocos do controle simplificado para o condicionador UPQC

Com este novo diagrama de blocos, o número de medições para fazer aquisição e condicionamento reduz de forma considerável. De fato, com o sistema trifásico a três fios, duas condições podem ser assumidas.

$$\begin{cases} i_a + i_b + i_c = 0 \\ v_{ab} + v_{bc} + v_{ca} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

É importante lembrar que os sinais de tensões e correntes de referência, no controle do disparo/bloqueio das IGBT's dos conversores do UPQC, devem apresentar valores fase-neutro. Sendo assim, para realizar a determinação das correntes de referência basta fazer a manipulação algébrica descrita na equação (1), pois as correntes de linha são iguais às correntes de fase. Em relação a determinação das tensões de referência, os cálculos são realizados por intermédio da expressão matricial descrita em (2).

$$\begin{bmatrix} v_{a_ref} \\ v_{b_ref} \\ v_{c_ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & -1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{ab_ref} \\ v_{ca_ref} \end{bmatrix} \quad (2)$$

De acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 3, as tensões v_{ab1} e v_{ca1} serão usadas somente para a determinação das tensões de referências a serem sintetizadas pelo inversor PWM. Para os demais controles, serão usados sinais de controles obtidos por meio do circuito PLL (*Phase Locked Loop*), denominados como v_{ab_pll} e v_{ca_pll} .

V. CARACTERIZAÇÃO DO PROTÓTIPO

O condicionador *UPQC* foi desenvolvido com o uso de dois conversores do tipo *VSC* (*Voltage Sourced Converter*) com chaveamento PWM em alta frequência (1-10kHz) acoplados em um elo de tensão CC comum aos dois conversores; e um circuito de controle para a determinação das tensões e correntes de referência a serem sintetizadas pelos seus respectivos conversores. Sendo assim, o condicionador *UPQC* implementado pode ser descrito por meio de suas duas partes distintas:

- Circuito de Potência (Conversores PWM Série e Paralelo e filtros passivos);
- Circuito de Controle (Controle integrado dos filtros ativo Série e Paralelo).

Deve ser ressaltado que também faz parte do *UPQC* o circuito de proteção, o qual é formado, principalmente, por três chaves estáticas (três pares de tiristores em anti-paralelo). Estas chaves estáticas são acionadas em caso de falhas no *UPQC* realizando o *by-pass* dos transformadores monofásicos do filtro ativo série de forma a garantir o fornecimento de energia para a carga. O algoritmo de controle responsável pelo acionamento das chaves estáticas foi implementado no mesmo microprocessador *DSP* responsável pelo controle dos conversores.

A Figura 4 mostra o digrama de blocos simplificado do condicionador *UPQC*.

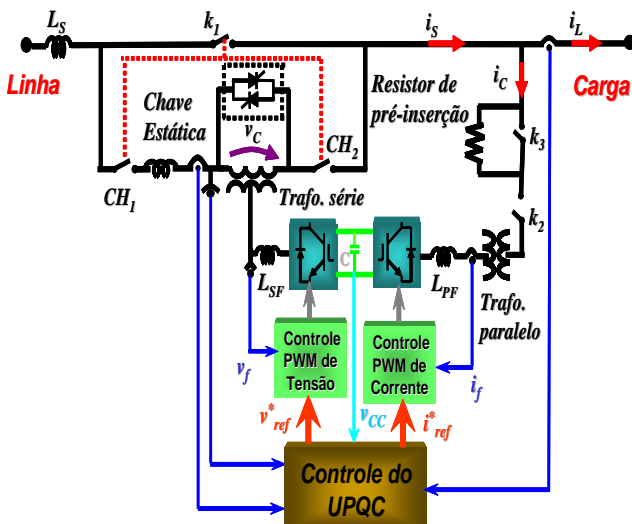


Figura 4: Configuração geral do UPQC

O conversor PWM série do UPQC comporta-se como uma fonte de tensão controlada (filtro ativo série), enquanto o conversor PWM paralelo do UPQC comporta-se como uma fonte de corrente controlada (filtro ativo paralelo). Nenhuma fonte de tensão é conectada no elo de tensão CC, mas somente um capacitor CC relativamente pequeno. O controle integrado dos filtros ativos série e paralelo (Controle do UPQC) determina, em tempo real, as tensões de compensação (referência) v_{ref}^* e as correntes de compensação (referência) i_{ref}^* .

As atribuições relacionadas com o filtro ativo série são as seguintes:

- Compensar os harmônicos presentes nas tensões de suprimento e desbalanços (seqüência negativa) na frequência fundamental;
- Promover um isolamento harmônico entre rede e carga, impedindo que correntes harmônicas fluam através dos transformadores do Filtro Ativo Série;
- Melhorar a estabilidade do sistema por meio de um controle de amortecimento.

Já as atribuições relativas ao filtro ativo paralelo são:

- Compensar os harmônicos presentes nas correntes da carga sensível e desbalanços na frequência fundamental;
- Regulação do fator de potência por meio da compensação da potência imaginária (reativa) da carga;
- Regular a tensão no elo de tensão CC.

VI. RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 5 apresenta uma vista geral do protótipo “cabeça-de-série” do condicionador *UPQC* a três fios de 90 kVA em 440V implementado para ser instalado em plantas industriais de clientes especiais da concessionária.



Figura 5: Vista geral do protótipo desenvolvido

No laboratório onde foram realizados os testes em questão não apresentava condições de realizar ensaios nas condições nominais de operação. Neste caso, a tensão de alimentação disponível foi de 220V e como carga não linear foi utilizado um retificador de seis pulsos com potência de 5.7 kVA.

Entretanto, vale lembrar que esta diferença em relação à tensão e potência nominal do equipamento desenvolvido não invalida os testes realizados. Como todo o controle é implementado digitalmente, a mudança na tensão e da corrente de carga de operação são feitas sem grande esforço, não há diferença no algoritmo utilizado em ambas as situações. Apenas foram considerados ajustes em alguns parâmetros do algoritmo de controle visando adequar a dinâmica do condicionar as condições operacionais relacionadas às condições da plataforma de testes considerada.

O resultado obtido na compensação de corrente pode ser considerado conservativo, uma vez que, com o aumento da potência, o valor da corrente na frequência fundamental aumenta, contudo os ripples presentes na corrente compensada devido ao chaveamento permanecem os mesmos, pois estes são influenciados principalmente pela frequência de chaveamento e pelos indutores de comutação (L_{PF}) utilizados. Ou seja, com o aumento da potência da carga a ser compensada o valor do THD da corrente tende a diminuir de forma considerável.

Do mesmo modo, os resultados relativos à compensação da tensão irão apresentar uma melhoria em relação aos ripples impostos pelos circuitos de chaveamentos na tensão compensada, refletindo diretamente na redução do THD da tensão.

As formas de onda da corrente da fonte são mostradas na Figura 6, e, as formas de onda das tensões de linha medidas na carga são mostradas na Figura 7. Nas figuras são apresentadas os valores RMS e THD para cada uma das fases, bem como os desequilíbrios de seqüência negativa e seqüência zero (f_2 e f_0).

A Figura 8 e a Figura 9 mostram, respectivamente, as formas de ondas das correntes na fonte e das tensões na carga após o condicionador UPQC ser colocado em operação.

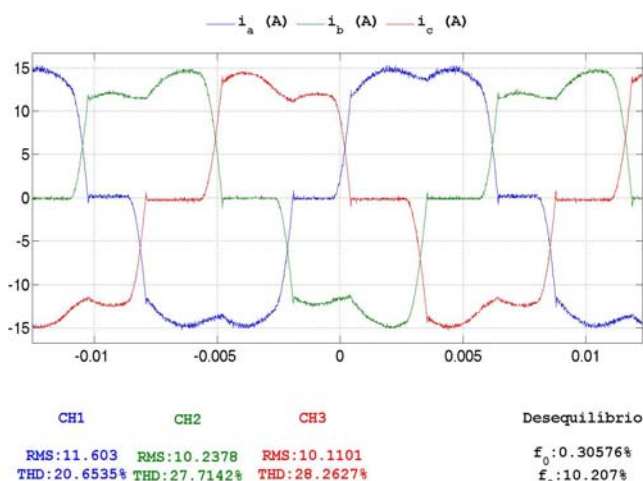


Figura 6: Formas de ondas das correntes na fonte sem compensação

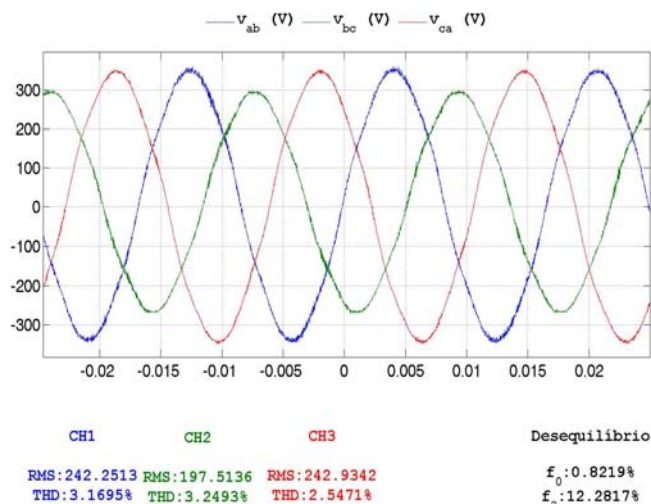


Figura 7: Formas de ondas das tensões na carga sem compensação

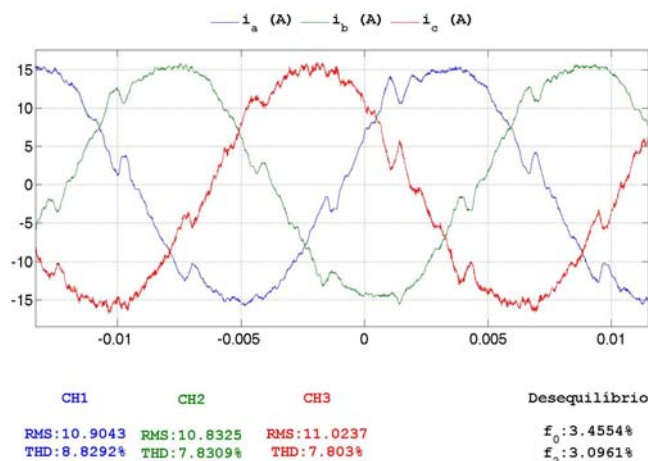


Figura 8: Formas de ondas das correntes na fonte com compensação

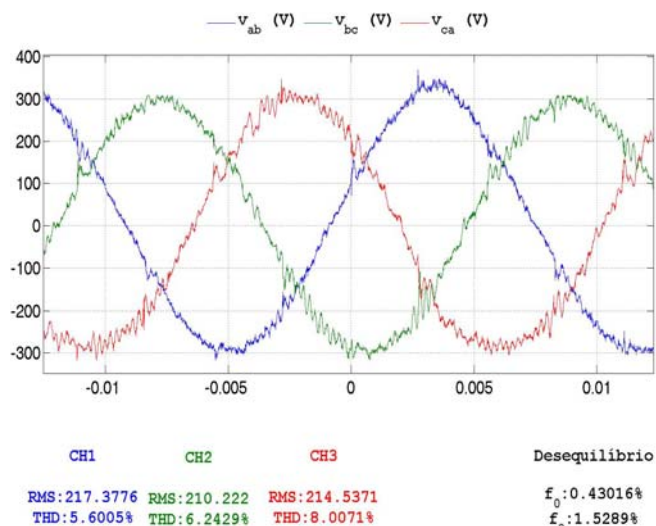


Figura 9: Formas de Ondas das Tensões na carga com compensação

Com relação à compensação das componentes harmônicas de corrente percebe-se que o UPQC foi capaz de minimizar os níveis que na carga eram acima de 20 % para valores inferiores a 9 %. Sendo que esta redução não foi mais acentuada devido ao fato do valor reduzido da corrente de carga considerada nos testes em questão.

Tendo em vista que as tensões de fornecimento mostradas na Figura 7 quase não apresentam distorções harmônicas, a atuação do UPQC não acarretou numa redução do THD das tensões, mas sim um pequeno aumento (mantendo-se ainda dentro da norma do PRODIST) devido à influência das componentes de altas frequências oriundas do chaveamento dos dois conversores, conforme mostrado na Figura 9. Entretanto, em situações em que o nível de distorção nas tensões for mais elevado a atuação do condicionador UPQC proporcionará uma redução satisfatória no seu THD.

Também pode ser ressaltado que estão sendo realizados estudos visando obter uma otimização nos ajustes dos filtros passivos, bem como dos controles PWM dos filtros série e paralelo para uma melhoria efetiva no seu desempenho. Salieta-se que as ajustes nos filtros passivos devem considerar tanto o aspecto de filtragem dos ripples oriundos dos circuitos de chaveamentos como também deve considerar as perdas nos resistores utilizados nestes filtros passivos.

Deste modo, deverão ser realizados testes mais específicos com outras configurações de filtros passivos e comparar os resultados em termos da relação custo x benefício, ou seja, melhoria da filtragem dos ripples em relação às perdas nos resistores utilizados nos diferentes tipos de filtros passivos.

Com relação ao desequilíbrio de seqüência negativa presente nas tensões do sistema, percebe-se que o filtro série foi capaz de reduzi-las de 12,3 % para 1,5 %, valor inferior aos 2% sugerido pelo PRODIST.

A Figura 10 apresenta a tensão e a corrente na carga e também a corrente compensada da fonte para a “fase a”. É possível perceber tanto a compensação das componentes harmônicas quanto da parcela reativa da corrente da carga (corrente e tensão da fonte em fase), realizada pela atuação do filtro ativo paralelo do condicionador UPQC. Deve ser ressaltado que as correntes mostradas estão em uma escala dez vezes maior.

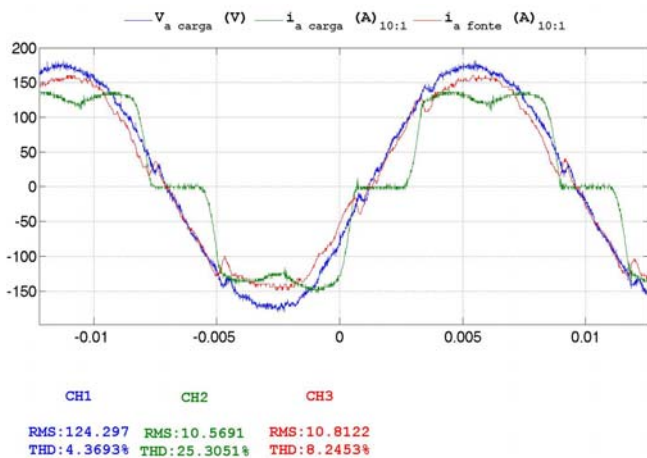


Figura 10: Formas de ondas da tensão na fonte, corrente na fonte e corrente na carga relativas à fase “a”

O transitório nas formas de ondas das correntes na fonte medidas durante a entrada em operação do filtro ativo para-

lelo do condicionador UPQC são apresentadas na Figura 11. Nesta mesma figura, é mostrada também a tensão do elo CC do condicionador UPQC em uma escala dez vezes menor. Pode ser notado que dinâmica operacional do condicionador foi satisfatória tendo em vista que em cerca de quatro ciclos o sistema já se encontrava em regime permanente.

O transitório nas formas de ondas das tensões de linha da carga durante a entrada em operação do filtro ativo série do condicionador UPQC são apresentadas na Figura 12. O início da compensação por intermédio do filtro ativo série é estabelecida a partir do marco zero ($t=0$). Pode ser verificado que a tensão de linha V_{ab} apresenta uma leve assimetria após a compensação realizada pelo filtro série, que está sendo analisada para ser solucionada pela equipe de pesquisa. Contudo, conforme já foi mencionado, deve ser salientado que mesmo diante desta situação o desbalanço na tensão foi reduzido par valores abaixo daqueles sugeridos pelas normas do PRODIST.

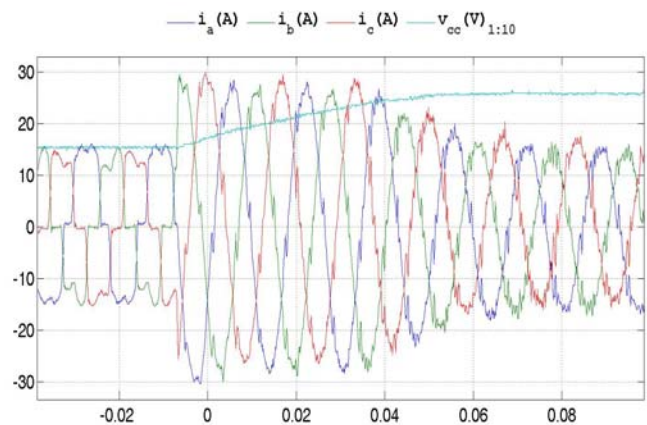


Figura 11: Formas de ondas das correntes na fonte e da tensão no elo CC relacionadas com a energização do filtro ativo paralelo

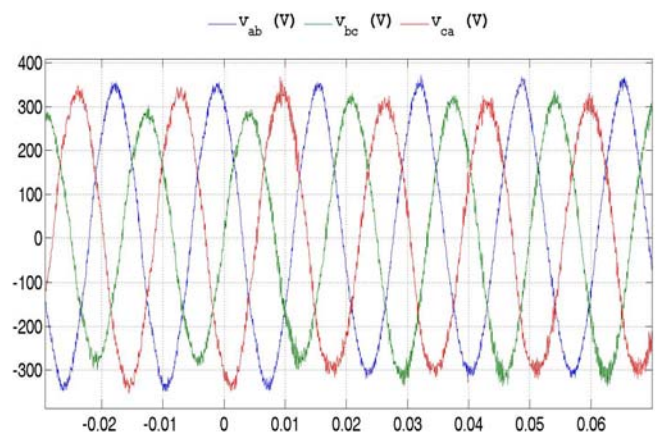


Figura 12: Formas de ondas das tensões na carga relacionadas com a energização do filtro ativo série

VII. CONCLUSÕES

O artigo apresentou o protótipo “cabeça-de-série” do UPQC desenvolvido dentro do projeto de P&D realizado entre a concessionária Bandeirante Energias do Brasil e o

Laboratório de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ. Além disso, foi apresentado um breve histórico das pesquisas realizadas até a presente data, bem como também foram esclarecidas as suas respectivas contribuições já publicadas em outros artigos técnicos.

Os resultados experimentais foram obtidos para uma operação bem inferior a capacidade nominal do protótipo. Desta forma, estima-se que quando o equipamento for testado na sua capacidade nominal o seu desempenho será superior ao apresentado neste artigo. Entretanto, mesmo sob as condições adversas apresentadas o condicionador UPQC mostrou-se eficaz na compensação das correntes harmônicas da carga e na compensação das tensões desequilibradas da fonte, de modo que a corrente drenada da rede elétrica contem apenas a parcela senoidal e a tensão fornecida à carga está com os valores de desequilíbrio dentro dos limites estabelecidos pela norma do PRODIST.

Os próximos passos do projeto consistem em: realizar alguns ajustes necessários para melhorar o desempenho do condicionador UPQC, mais acentuadamente em relação aos componentes elétricos que compõem o seu circuito de potência do que em relação as estratégias de controle; realizar testes experimentais sob condições nominais de operação; e realizar testes sob condições reais de operação numa planta industrial de um cliente da concessionária Bandeirante.

É importante ressaltar o benefício que este projeto está gerando para a sociedade brasileira a partir da cooperação entre a Concessionária-Universidade-Fabricante. Se de um lado temos a concessionária preocupada com o fornecimento de uma energia elétrica com qualidade para os seus clientes, de modo a garantir que os processos industriais destes não sejam afetados por distúrbios elétricos presentes no sistema de potência; de outro temos os pesquisadores da universidade realizando atividades de pesquisa e desenvolvimento em parceria com o fabricante que irá disponibilizar para o mercado um equipamento capaz de auxiliar a concessionária na manutenção desta energia com qualidade.

Desta forma, foi observada a conclusão de um ciclo fechado neste projeto de P&D. O aporte financeiro empregado pela concessionária Bandeirante Energias do Brasil manteve por três anos uma pesquisa com aplicação prática fornecendo como resultado final a transferência da tecnologia de um equipamento com tecnologia nacional, realizada pela universidade (UFRJ) para um fabricante nacional. Desta forma, este fabricante está introduzindo um equipamento com tecnologia de ponta no seu portfólio de produtos, disponibilizando este para as concessionárias de energia do país e seus consumidores de energia elétrica.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Bandeirante Energias do Brasil pelo financiamento aportado no projeto e a empresa Adelco pela participação na fabricação do circuito de potência do protótipo “cabeça-de-série”.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Normas:

- [1] Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - ANEEL, 20/12/2005.

Periódicos:

- [2] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, no. 3, 1984, pp. 625-630.
- [3] N.G Hingorani, “Introducing Custom Power”, IEEE Spectrum, Junho de 1995.
- [4] M. Aredes, E.H. Watanabe, "New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1649-1656, July 1995.
- [5] J. Häfner, M. Aredes, K. Heumann, "A Shunt Active Power Filter Applied to High Voltage Distribution Lines," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 1, pp. 266-272, Jan. 1997.
- [6] T. Furuhashi, S. Okuma, Y. Uchikawa, "A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 37, no. 1, pp. 86-90, Feb. 1990.
- [7] D. A. Marshall, J. D. van Wyk, "An Evaluation of the Real-Time Compensation of Fictitious Power in Electric Energy Networks," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1774-1780, Oct. 1991.
- [8] L. Rossetto, P. Tenti, "Evaluation of Instantaneous Power Terms in Multi-Phase Systems: Techniques and Application to Power-Conditioning Equipments," ETEP – Eur. Trans. Elect. Power Eng., vol. 4, no. 6, pp. 469-475, Nov./Dec. 1994.
- [9] M. Depenbrock, D. A. Marshall, J. D. van Wyk, "Formulating Requirements for a Universally Applicable Power Theory as Control Algorithm in Power Compensators," ETEP – Eur. Trans. Elect. Power Eng., vol. 4, no. 6, pp. 445-455, Nov./Dec. 1994.

Teses:

- [10] M. Aredes, “Active Power Line Conditioners”, Dr.-Ing. Thesis (magna cum laude), Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, March 1996.

Livros:

- [11] E. Clarke, *Circuit Analysis of AC Power Systems*, vol. I. New York: Wiley, 1950, p. 81.
- [12] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, New Jersey: IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007,

Artigos em Anais de Conferências (Publicados):

- [13] L. Gyugyi, E. C. Strycula, “Active ac Power Filters”, in Proc. IEEE Ind. Appl. Ann. Meeting vol. 19-C, 1976, pp. 529-535.
- [14] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits, IPEC’83 - Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.
- [15] S. Bhattacharya, D. M. Divan, B. B. Banerjee, "Control and Reduction of Terminal Voltage Total Harmonic Distortion (THD) in a Hybrid Series Active and Parallel Passive Filter System," in Proc. IEEE-PESC’ 93 – Power Electronics Spec. Conf., pp. 779-786, 1993.
- [16] S. Bhattacharya and D. Divan, Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system, in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1995, pp. 2531-2540.
- [17] Luís F.C. Monteiro, M. Aredes, “A Comparative Analysis Among Different Control Strategies for Shunt Active Filters,” Proc. (CDROM) of the V INDUSCON - Conferência de Aplicações Industriais, Salvador, Brazil, July 2002, pp.345-350.
- [18] M. Aredes and L.F.C. Monteiro, "A Control Strategy for Shunt Active Filter," in Proc. (CDROM) of the 10th ICHQP – IEEE/PES 10th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, Rio de Janeiro RJ, Brazil, 6-9 October 2002, pp. 1-6.

- [19] L. F. C. Monteiro, M. Aredes, J. A. Moor Neto, "A Control Strategy for Unified Power Quality Conditioner", in *Proc. (CDROM) of the ISIE'2003 – IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics, Rio de Janeiro, Brazil 9-11 June 2003*, pp. 1-6.
- [20] M. Aredes, L. F. C. Monteiro, J. M. Miguel, "Control Strategies for Series and Shunt Active Filters," in *Proc. (CDROM) of the IEEE Bologna Power Tech Conf., Bologna, Italy, 23-26 June 2003*, pp. 1-6.
- [21] M. Aredes, L. F. C. Monteiro, "Compensation Algorithms Based on Instantaneous Powers Defined in the Phase Mode and in the $\alpha\beta 0$ Reference Frame", in *Proc. (CDROM) of the COBEP 2003 – The 7th Brazilian Power Electronics Con., Fortaleza-CE, Brazil, 21-24 September 2003*, pp. 344-349
- [22] L. F. C. Monteiro, M. Aredes, J. L. Afonso, "Algumas Contribuições para o Controle de Filtros Ativos," in *Proc. (CDROM) of the CBA 2004- XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado- RS, Brazil, 22-24, September 2004*, pp. 1-6
- [23] L. F. C. Monteiro, J. C. C. Costa, M. Aredes, J. L. Afonso, "A Control Strategy for A Three-Level Unified Power Quality Conditioner," in *Proc. (CDROM) of the COBEP 2005 – The 8th Brazilian Power Electronics Con., Recife-PE, Brazil, 14-17 June 2005*, pp. 316-321
- [24] M. Aredes, J. A. Moor Neto, J. C. Ferreira, L. F. C. Monteiro, R. M. Fernandes, M. J. V. Siqueira, "A Simplified Control Strategy for Power a Unified Power Quality Conditioner Prototype," in *Proc. (CDROM) of the PESC'2005 – 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Recife-PE, Brazil 12-16 June 2005*, pp. 2592-2597
- [25] M. Aredes, J. A. Moor Neto, L. F. C. Monteiro, M. J. V. Siqueira, "Desenvolvimento e Implementação de um Condicionador Unificado," in *Proc. of the SBQEE 2005 – VI Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Belém-PA, Brazil, 21-24 August 2005* pp. 139-144.