

CONTROLE DIGITAL SIMPLIFICADO PARA UM COMPENSADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA

JOSUÉ DIAS, MARCELLO MEZAROA, CASSIANO RECH, LEANDRO MICHELS, TIAGO D. C. BUSARELLO

Núcleo de Processamento de Energia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina

Caixa Postal 89223-100 Joinville, SC, Brasil

E-mails: josuebdias@yahoo.com.br; mezaroba@joinville.udesc.br; cassiano@ieee.org; michels@ieee.org; tiago_curi@yahoo.com.br

Abstract— This paper presents a digitally controlled unified power quality conditioner (UPQC). Such conditioner is composed of shunt and series active power filters for simultaneous compensation of current and voltage waveforms, respectively. This paper proposes a simple control strategy to compensate the input line current and load voltage waveforms through feedback this signals directly, using sinusoidal references. In this paper is presented the modeling, the proposed control strategy and some experimental results of the developed prototype.

Keywords— Unified conditioner, digital control, active filters, power quality.

Resumo— Este artigo apresenta a implementação de um condicionador unificado de qualidade de energia (UPQC) controlado digitalmente. Tal condicionador é composto de um filtro ativo paralelo e um série para compensação simultânea das formas de ondas da corrente e tensão, respectivamente. Este artigo propõe uma estratégia de controle simplificada para compensar as correntes na rede e tensões na carga através da realimentação direta destes sinais, utilizando referências senoidais. Neste artigo é apresentada a modelagem, a estratégia de controle proposta e os resultados experimentais para o protótipo elaborado.

Palavras-chave— Condicionador unificado, controle digital, filtros ativos, qualidade de energia.

1 Introdução

Até o surgimento dos interruptores estáticos as cargas eram essencialmente lineares, sendo os reativos na fundamental as distorções mais relevantes na rede. O desenvolvimento da eletrônica de potência, e conseqüentemente dos sistemas de processamento de energia elétrica, proporcionaram um aumento de carga não linear dos sistemas elétricos. Esta crescente demanda traz sérios problemas de qualidade de energia, principalmente pela circulação de harmônicos na rede, devido a não-linearidades nas tensões e correntes dos sistemas de transmissão e distribuição. As soluções mais comuns para compensação de harmônicos em pontos de conexão de carga foram as aplicações de filtros passivos. São soluções largamente usadas pela simplicidade e baixo custo, quando comparadas às correções ativas, porém são altamente sensíveis a variações de cargas (IZHAR, *et al* 2004)

Uma solução mais abrangente que, além da compensação de harmônicos independentes das variações de cargas, pode também ser usada para reduzir as demais perturbações presentes na rede são as aplicações de filtros ativos de potência. São estruturas que utilizam conversores estáticos controlados com o objetivo de compensar as distorções presentes na corrente da rede (filtro ativo paralelo – FAP) e nas tensões da carga (filtro ativo série – FAS). O filtro paralelo opera como uma fonte de corrente controlada, fornecendo os harmônicos exigidos pela carga, já o filtro série se comporta como uma fonte de harmô-

nicos de tensão controlada (AKAGI, 1994, MORÁN *et al*, 1999, SINGH *et al*, 1999, PAL *et al*, 2008).

Uma estrutura que combina as características dos filtros ativos paralelo e série é usualmente denominada condicionador unificado de qualidade de energia (UPQC – Unified Power Quality Conditioner) (FUJITA e AKAGI, 1998, KHADKIKAR *et al*, 2006), que é capaz de compensar tanto a corrente na rede quanto a tensão na carga simultaneamente. Trata-se de uma estrutura mais completa em termos de qualidade de energia, porém tem maior complexidade e custo que as soluções citadas anteriormente.

Nas aplicações de filtros ativos uma etapa de suma importância é a geração dos sinais de referência para o controle dos conversores. Os métodos mais conhecidos empregam técnicas complexas e de elevado processamento, baseando-se nas componentes harmônicas dos sinais, seja da corrente na carga ou da tensão na rede. Alguns dos métodos que empregam esta técnica são: controle por valores instantâneos da potência ativa e reativa (Teoria *pq*) (AREDES, 1998), correntes senoidais de Fryze (MONTEIRO, 2003), referência síncrona (BHATTACHARYA, 1998), transformada discreta de Fourier, dentre outras (MARIUM *et al*, 2004).

Dada esta dificuldade de geração de referência, propõe-se neste artigo a aplicação de uma técnica de controle simplificada para um UPQC, onde a geração de referência, tanto para o controle do FAP quanto para o FAS, é baseada na medição direta da corrente na rede e da tensão na carga, respectivamente. Com o emprego de um processador digital de sinais (DSP – Digital Signal Processor), os sinais de referência senoidais são gerados internamente e, depois de sincronizados com a tensão da rede, via PLL para o

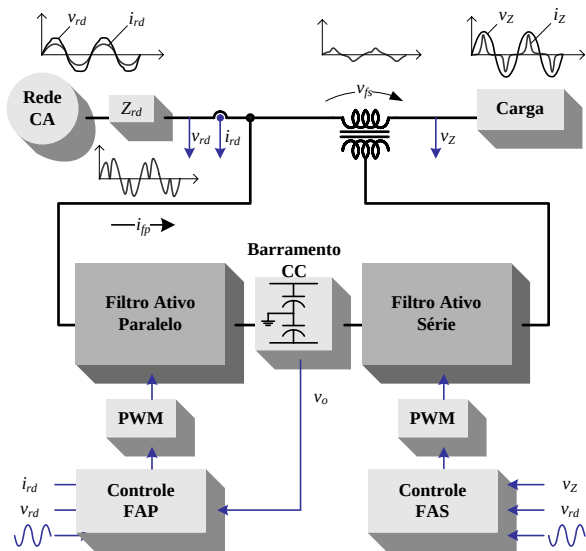


Figura 1 Diagrama funcional básico do UPQC.

FAP e via detector de cruzamento por zero para o FAS, são comparados com as amostras da corrente na rede e da tensão na carga, respectivamente. Esta técnica permite atuar na compensação de reativos na fundamental, distorções harmônicas e desequilíbrio entre fases.

2 UPQC proposto

O UPQC proposto é apresentado na Figura 1 pelo seu diagrama funcional básico. A estrutura é definida por um filtro ativo paralelo e série conectados ao mesmo sistema. Cada filtro ativo compreende um conversor trifásico a quatro fios e são interligados por um barramento capacitivo com derivação central, como mostra a Figura 2. Observa-se nesta figura a presença de filtros passivos na saída do conversor, os resistores tem a função de aumentar o fator de qualidade do filtro, reduzindo as oscilações que possam ocorrer entre as impedâncias reativas do sistema. O FAP deve compensar os harmônicos de corrente produzidos por cargas não lineares e, segundo a estratégia de controle proposta, garantir que a corrente na rede apresente uma forma de onda tipicamente senoidal. Já o FAS deve atuar como uma fonte de tensão controlada e é conectada em série com a rede por um transformador de acoplamento. O filtro atua de forma a proporcionar uma tensão tipicamente senoidal e com valor eficaz adequado na carga. A estratégia de controle do FAP utiliza a realimentação das correntes na rede e das tensões no barramento, enquanto que o controle do FAS necessita da realimentação das tensões na carga. A amostra da tensão da rede para ambos os filtros ativos é utilizada para realizar o sincronismo dos sinais de referências senoidais. As características do UPQC são apresentadas na Tabela 1.

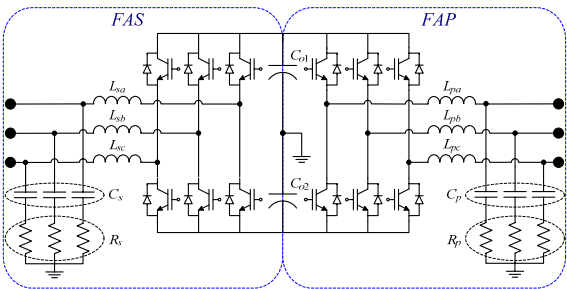


Figura 2 Estrutura de potência utilizada no UPQC.

Tabela 1 Parâmetros do protótipo do UPQC

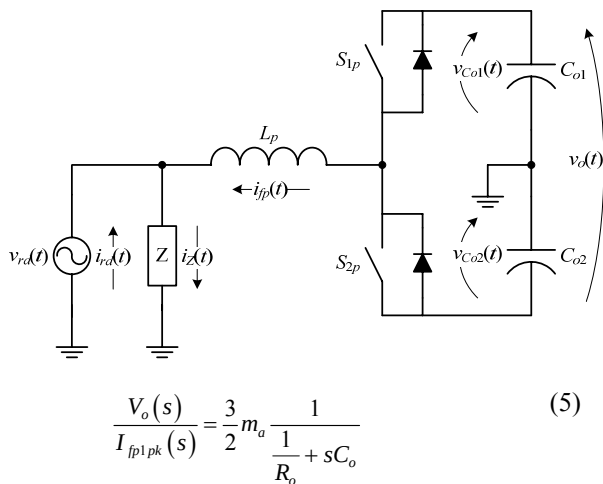
Parâmetro	Valor
Tensão eficaz por fase	$V_{rd} = 127\text{ V}$
Potência ativa do sistema	$P_T = 2500\text{ W}$
Indutância do FAP	$L_p = 690\text{ }\mu\text{H}$
Indutância do FAS	$L_s = 650\text{ }\mu\text{H}$
Tensão do barramento CC	$V_o = 400\text{ V}$
Capacitância do barramento	$C_o = 3000\text{ }\mu\text{F}$
Capacitância do filtro passivo do FAP	$C_p = 2\text{ }\mu\text{F}$
Capacitância do filtro passivo do FAS	$C_s = 20\text{ }\mu\text{F}$
Resistências dos filtros passivos	$R_p = R_s = 2\text{ }\Omega$

2.1 Sistema de Controle do FAP

O diagrama de blocos do controle do filtro ativo paralelo é mostrado na Figura 4, sendo composto por três malha idênticas de corrente, uma para cada fase, uma malha para regular a tensão total do barramento e uma malha para manter as tensões dos capacitores equilibradas. A malha de tensão do barramento é responsável por determinar a amplitude do sinal de referência, sendo uma malha de dinâmica lenta, enquanto que a malha de desequilíbrio, tida como uma malha de nível CC, atua no valor médio da referência para manter as tensões dos bancos capacitivos equilibradas. Assim, a malha de tensão determinará a amplitude e a malha de desequilíbrio o valor médio do sinal de referência para as três malhas de corrente. Por sua vez, através da realimentação da corrente da rede, estas malhas proporcionarão a corrente de compensação necessária para que as correntes nas três fases da rede sejam equilibradas e com característica senoidal. Dinamicamente esta malha é mais rápida, possibilitando o desacoplamento desta com as malhas de tensão.

2.2 Sistema de Controle do FAS

O sistema de controle é composto por três malhas de tensão idênticas, uma para cada fase, atuando no sinal de erro gerado pela comparação do sinal da tensão na carga com um sinal de referência senoidal. A Figura 3 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle do FAS.



Onde m_a é o índice de modulação de amplitude dado por:

$$m_a = \frac{V_{rd(pico)}}{V_o} \quad (6)$$

O inversor aplicado como filtro ativo é modelado para a situação mais crítica, que é a vazia, isto equivale a fazer $R_o \rightarrow \infty$ na equação. Assim, o modelo da planta de tensão é dado por:

$$G_{vb}(s) = \frac{3}{2} m_a \frac{1}{sC_o} \quad (7)$$

3.3 Modelagem do FAS

Desconsiderando a impedância da rede, pode-se modelar a tensão da rede e a corrente da carga como distúrbios. O circuito equivalente para obter o modelo da planta de tensão do FAS é apresentado na Figura 6. A fonte de corrente i'_z e a tensão v'_z representam a corrente na carga e a tensão da rede no primário do transformador (lado do conversor), respectivamente.

Semelhante ao filtro ativo paralelo, o modelo da planta de tensão é obtido através do modelo médio por espaços de estados. Em (8) e (9) representam matematicamente o circuito equivalente do conversor, com D_s sendo o valor médio da razão cíclica do FAS para um período de comutação.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fs} \\ v_{fs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{n}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fs} \\ v_{fs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{(2\bar{D}_s - 1)}{2L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_s n} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_o \\ i_z \\ v_{rd} \end{bmatrix} \quad (8)$$

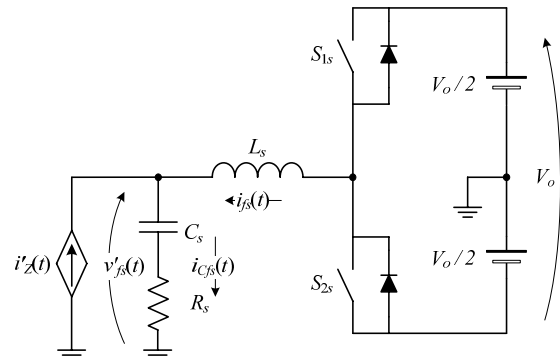


Figura 6 Circuito equivalente do inversor trifásico do FAS.

Tabela 2 - Parâmetros para o projeto dos controladores

Parâmetro	Valor
Frequência de amostragem FAP	$f_{ap} = 20$ kHz
Frequência de amostragem FAS	$f_{as} = 40$ kHz
Ganho sensor de corrente	$K_{ip} = 0,1$
Ganho sensores de tensão	$K_{vs} = K_{vb} = K_{des} = 0,01$
Ganho multiplicador	$K_{mp} = 1$
Ganho PWM	$K_{PWM} = 1/3750$
Ganho conversor A/D	$K_{AD} = 2^{12}/3$
Índice de modulação	$m_a = 180/400$
Relação de transformação	$n = \sqrt{3}$

$$v_z = \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fp} \\ v_{fs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -Z_d & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_o \\ i_z \\ v_{rd} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde,

$$n = \frac{i_z}{i'_z} = \frac{v'_z}{v_{fs}} \quad (10)$$

As variáveis de estados não dependem da tensão da rede, o que prova ser válida a modelagem desta variável como distúrbio. Aplicando pequenos sinais e linearizando em torno de um ponto quiescente, chega-se a planta de tensão do FAS:

$$G_{sv}(s) = \frac{V_o}{n(s^2 L_s C_s + s R_s C_s + 1)} \quad (11)$$

4 Projeto dos controladores

O projeto dos controladores é feito no domínio da frequência no plano w , isto é, o sistema é discretizado (domínio s para o domínio z) e após é aplicada a transformação bilinear para transformar o sistema para o domínio w . Neste plano os controladores poderão ser projetados aos moldes da teoria clássica para sistemas contínuos (domínio s) (LINDEKE, 2003).

4.4 Projeto dos controladores do FAP

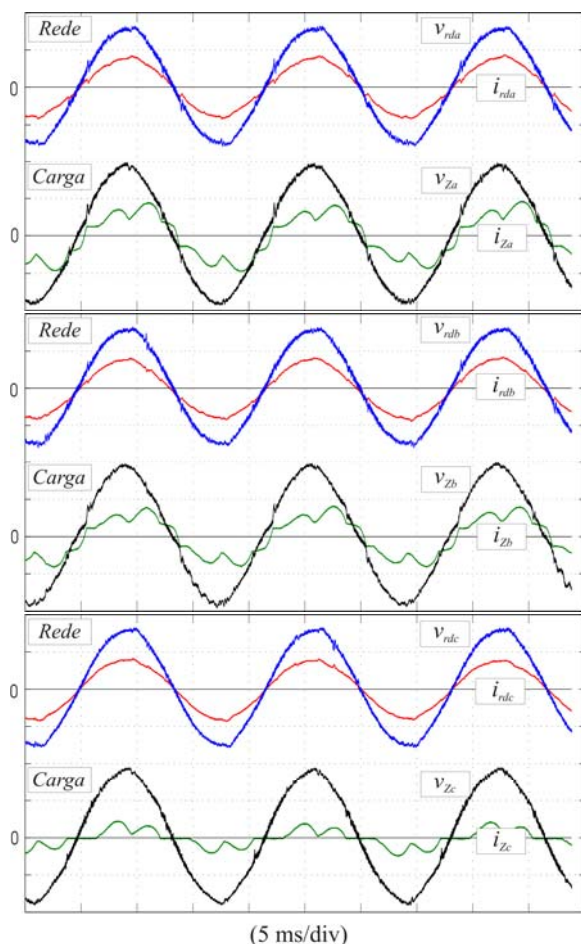


Figura 8 – Tensões (100 V/div) e correntes (10 A/div) na carga e na rede.

uma potência de 1700 W. As formas de ondas foram obtidas por um osciloscópio digital e editadas no software MatLab®. Embora o projeto fora desenvolvido para uma potência de 2500 W, os resultados foram obtidos para uma potência menor devido à limitação da capacidade de corrente dos transformadores utilizados. A Figura 7 ilustra o sistema de controle digital do UPQC implementado, compreendendo os dois processadores digitais empregados.

O filtro para eliminar o valor CC da corrente no primário do transformador de acoplamento, inserido no sistema de controle do FAS, tem a função de evitar a saturação deste. É um filtro média móvel, cujo objetivo é obter o valor médio da corrente que circula pelo primário do transformador (lado do conversor) (BIN, 2006). Os erros inerentes no processo de digitalização, somados aos ganhos CC que o condicionamento impõe, fazem com que o controlador atue em um valor médio inexistente no sinal monitorado (tensão na carga).

Para ensaiar uma corrente distorcida com harmônicos empregou-se como carga um retificador capacitivo trifásico, um retificador monofásico com carga RL conectado à fase A e outro conectado à fase B, todos os retificadores são não controlados.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos com o protótipo, quando se utilizou como rede um variômetro. Nota-se que há elevado percentual de harmônicos na corrente de carga enquanto a corrente na rede está

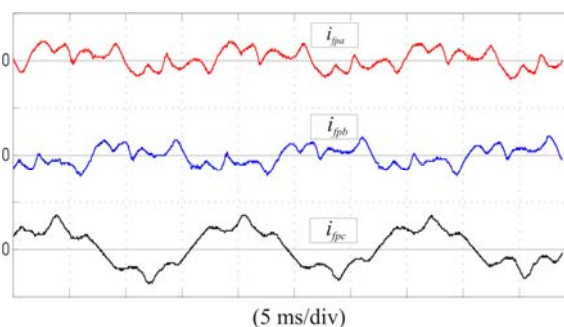


Figura 9 – Correntes (10 A/div) geradas pelo UPQC.

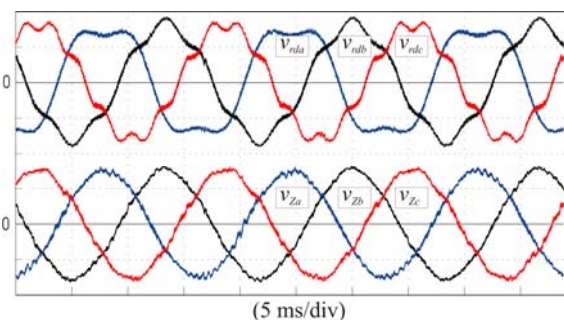


Figura 10 – Tensões (100 V/div) na fonte e na carga.

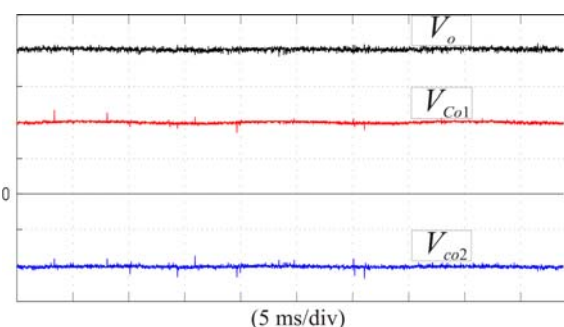


Figura 11 – Tensões (100 V/div) no barramento total e em cada um dos bancos capacitivos.

com característica típica de uma senóide. Observa-se, boa distribuição de potência entre as fases, com cerca de 600 W para cada uma. O fator de potência, que antes era de 0,90, agora está com 0,99. Já a tensão na rede apresenta pequena distorção, não permitindo obter conclusões a respeito da compensação de distorções na tensão da rede.

A Figura 9 apresenta as correntes geradas pelo UPQC. A compensação do desequilíbrio que havia entre as correntes das fases é visivelmente observada pela corrente na fase C do UPQC.

Para obter um resultado satisfatório para o compensação das distorções em tensão ensaiou-se o UPQC utilizando uma fonte capaz de proporcionar harmônicos de tensão. A fonte representou uma rede distorcida com 20 % de 3º harmônico na fase A, 10 % de 5º harmônico na fase B e 10 % de 7º harmônico na fase C. A Figura 10 mostra as tensões distorcidas na rede e as tensões já compensadas na carga.

A fonte utilizada compreende um conversor controlado com impedância de saída capacitiva. O fato desta característica diferir de uma rede típica, não per-

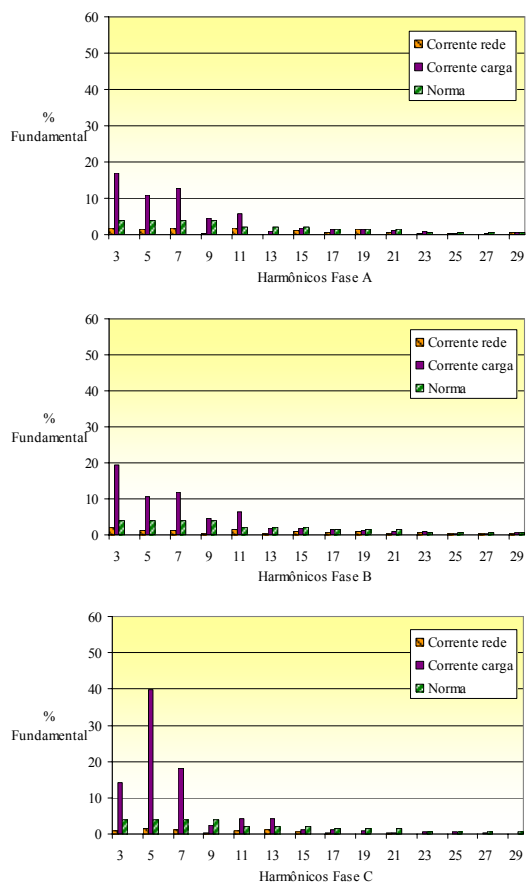


Figura 12 – Harmônicos das correntes na rede, na carga e norma IEC-519.

mite avaliar adequadamente o comportamento do FAP, restringindo a análise à compensação série.

Na Figura 11 são apresentadas as tensões do barramento, observa-se que as tensões estão controladas em 200 V e -200 V para cada um dos bancos capacitivos.

A Figura 12 apresenta os gráficos do espectro harmônico da corrente na rede e na carga, bem como a porcentagem permitida pela norma IEEE – 519 (IEEE Std. 519, 1992), para cada fase. Verifica-se que todas as componentes harmônicas estão em conformidade à norma. O gráfico dos componentes harmônicos de tensão na carga e na rede, referente às formas de ondas da Figura 10 (ensaios com a fonte de harmônicos), é mostrado na Figura 13. Verifica-se que a distorção na tensão na carga atenda a recomendação da IEEE – 519, que é de 5 % para a distorção harmônica total.

6 Conclusões

As distorções harmônicas na corrente de rede foram significativamente reduzidas, enquanto que na carga estavam acima de 25 %, na rede a distorção se manteve abaixo de 5 %, atendendo à norma IEEE – 519. Quanto à tensão, o resultado também se mostrou satisfatório com uma distorção total menor que 4 %, também atendendo a mesma norma. Esta técnica permite que sejam compensados reativos, distor-

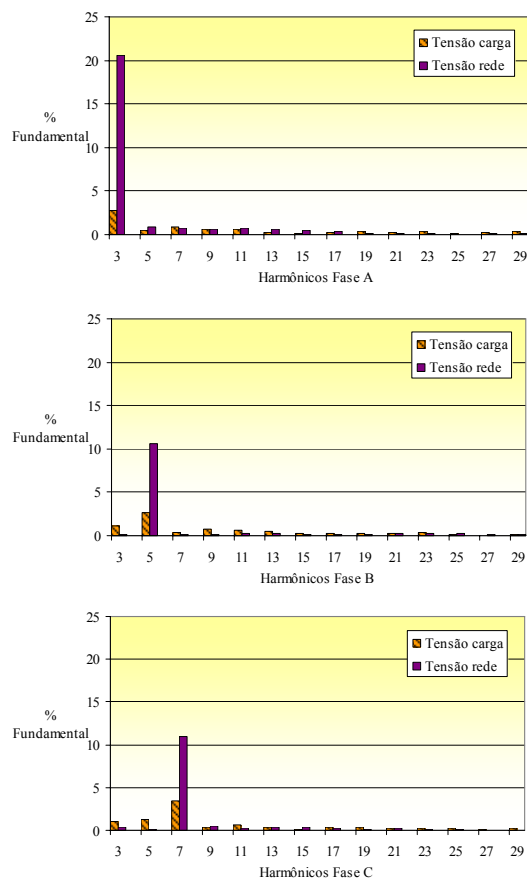


Figura 13 – Harmônicos na tensão na rede, na carga.

ções de harmônicos, desequilíbrio de fase e valor eficaz da tensão de carga.

Os resultados validam os modelos matemáticos obtidos e a técnica de controle proposta, mostrando que a qualidade da energia elétrica pode ser significativamente melhorada com um método de controle simples frente às técnicas mais conhecidas.

Referências Bibliográficas

- Akagi, H. (1994). New Trends in Active Filters for Power Conditioning. IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 32, Nº 6, pp. 1312-1322.
- Morán, L., Dixon, J., Espinoza, J., Wallace, R. (1999). Using Active Power Filters to Improve Power Quality. 5th Brazilian Power Electronics Conference, COBEP'99. pp. 1-11.
- Aredes, M., Heumann, K., Watanabe, E. H. (1998). An Universal Active Power Line Conditioner. IEEE Transaction on Power Delivery. vol. 13, Nº 2, pp. 545-551.
- Bhattacharya, S., Frank, T. M., Divan, D. M., Banerjee, B. (1998). Active Filter System implementation. IEEE Industrial Applications Magazine. pp 47-63.
- Erickson, R. W., Maksimovic, D. (2001). Fundamentals of Power Electronic. 2 Ed. p. 912, New York: Publisher.

- Fujita, H., Akagi, H. (1998). The Unified Power Quality Conditioner: The Integrations of Series- and Active Filters. *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 13, N° 2, pp. 315-322
- Monteiro, L. F. C., Aredes, M., Neto, J. A. M. (2003). A Control Strategy For Unified Power Quality Conditioner. *Industrial Electronic, 2003, ISIE'03. IEEE International Symposium*. pp. 391-396
- Izhar, M., et al. (2004). Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in The Distribution Systems. *National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia*. pp. 104-108.
- Singh, B., et al. (1999). A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, N° 5, pp. 260-271.
- Khadkikar, V. *et al.* (2006). Conceptual Study of Unified Power Quality Conditioner (UPQC). *IEEE ISIE 2006, Canadá*, vol. 2, pp. 1088-1093.
- Pal, Y., A. Swarup, A., Singh, B. (2008). A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement.. *Power System Technology and IEEE Power India Conference, (POWERCON 2008)*. pp. 1-8.
- Marium, N., *et al.* (2004). Review of Control Strategies for Power Quality Conditioners. *National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia*. pp. 109-115.
- Lindeke, D.(2003). Projeto de Um Filtro Ativo Paralelo de 1 kVA Usando Técnicas de Controle Analógica e Digital. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina - INEP, Florianópolis – SC*. 169 p.
- Bin, Xie *et al.* (2006). Application of Moving Average Algorithm for Shunt Active Power Filter. *Industrial Technology, ICIT 2006. IEEE International Conference on*. pp. 1043-1047.
- IEEE Std. 519-1992, .IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.