

Controle do fluxo de potência entre os filtros do UPQC

Saimon M. Fagundes, Flávio Furlan e Marcello Mezaroba

Centro de Ciências Tecnológicas - CCT - Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC – Joinville – SC – Brasil

Resumo — Este trabalho apresenta duas maneiras de equilibrar a potência reativa processada pelo Condicionador Universal (ou unificado) de Qualidade de Energia - UPQC entre os filtros série e paralelo que compõem este através do controle do ângulo da tensão na carga. A primeira forma é estipulando um valor fixo de limite de potência reativa que o filtro paralelo pode processar e a segunda forma é dividindo igualmente a potência reativa entre os filtros independentemente da demanda da carga. Será apresentada uma revisão a respeito do UPQC, a dedução matemática do controle do ângulo da tensão na carga e simulações para validar este tipo de controle.

Palavras-chaves — UPQC, Eficiência Energética, Filtro Ativo Série, Filtro Ativo Paralelo.

I. INTRODUÇÃO

O filtro ativo universal, também conhecido como UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*) é um dispositivo empregado na melhoria da qualidade de energia, formada pela junção dos filtros ativos série e paralelo. Este condicionador de energia é capaz de compensar os componentes harmônicos de cargas não-lineares, tornar o fator de potência da fonte próximo da unidade, equilibrar as tensões de um circuito trifásico através do processamento de energia ativa e, simultaneamente, realizar compensações de componentes harmônicas oriundas da fonte de alimentação, fornecendo com isso uma tensão senoidal equilibrada para a carga [1]. Sendo possível, também, adicionar a função de controle do fluxo de potência tornando-o um dispositivo bastante abrangente, explicando a denominação de UPQC.

Este trabalho tem como objetivo implementar uma nova topologia de controle do UPQC de maneira a equilibrar a potência reativa processada pelos filtros ativos que compõem este equipamento, sendo que no funcionamento padrão a maioria da energia processada passa pelo Filtro Ativo Paralelo – FAP, que trata da correção dos distúrbios da carga, e uma menor parcela no Filtro Ativo Série – FAZ, que trata dos distúrbios da rede. Geralmente estes dois filtros são modulares, o que facilita sua fabricação e de mesma potência nominal, desta forma a divisão igualitária da potência do conjunto irá acrescentar melhorias significativas no custo e na eficiência energética deste condicionador de energia.

Neste estudo, o filtro em série será analisado comportando-se como uma fonte de tensão controlada e o filtro em paralelo com uma fonte de corrente controlada, assim, esta topologia é conhecida com UPQC [2].

A. Revisão Bibliográfica

A atuação dos filtros do UPQC é feita de forma distinta. Usualmente, o FAP é controlado em corrente, responsável por compensar os harmônicos da corrente da carga, e o FAS é controlado em tensão, para compensar as distorções na tensão de rede [3].

Esta estrutura do condicionador é bastante estudada internacionalmente, só em artigos da IEEE existem mais de 150 publicações conforme [1], dentre estes estudos destacam-se alguns com funcionalidades semelhantes pelo controle da tensão no filtro série.

Um método proposto por [4] visa minimizar a quantidade de energia ativa injetada por um UPQC-Q, o qual minimiza afundamentos de tensão (*sags*) por energia reativa, a proposta de [5] visa à redução da potência aparente processada pelo UPQC, [6] visa minimizar as perdas nas chaves semicondutoras, já [7] propõem a redução de perdas do conversor e que o FAS controle a corrente do sistema e o FAP a tensão na carga e por último [8] propõem a divisão da energia reativa pelos filtros e correção de variações na tensão. Sendo que todos estes estudos utilizam o controle de tensão na carga.

Porém a maioria destes estudos no intuito de compensar componentes harmônicos geram referências de controle também compostas por harmônicos, as quais são geradas através de métodos com certo grau de complexidade [4-8] ou utilizam controles que poderiam ser simples, como transformada *dq*.

Buscando reduzir a complexidade da geração de referências para estes condicionadores alguns trabalhos apresentam técnicas de controle com referências senoidais, através da mudança da variável de controle e do posicionamento de sensores da realimentação [9]-[10], sendo que esta metodologia será usada neste estudo.

Além disso, neste estudo também será implementado o controle de fluxo de potência entre os filtros do UPQC usando a mesma metodologia proposta por Khadkikar et al [11] e com alguns adendos visando a divisão igualitária de energia reativa.

II. UPQC PADRÃO

No UPQC padrão o FAP é responsável por compensar a corrente entregue pela rede, enquanto que o FAS é responsável por compensar a tensão vista pela carga. Esta será a configuração utilizada.

A. Diagrama de blocos do UPQC

O FAP é composto por um inversor de tensão (*Voltage Source Inverter, VSI*) e seu filtro passivo, responsável pela redução dos efeitos causados pela comutação em alta frequência do inversor na rede elétrica.

A principal função do FAP é minimizar as distorções de corrente proveniente das cargas ligadas a um alimentador, de modo a não deixar que elas circulem pela rede de alimentação, desta forma as distorções harmônicas de corrente não serão medidas no PAC.

Já o objetivo do FAS é geralmente compensar as distorções harmônicas da tensão da rede. Além disso, o FAS também pode ser empregado para corrigir desequilíbrios de tensão, *sags*, *swells*, etc. Neste estudo, utilizou-se um FAS com a configuração VSI, que possui um barramento CC de tensão.

A união destes dois filtros ativos, através do compartilhamento de um barramento CC, forma o UPQC padrão como pode ser visto na Fig. 1.

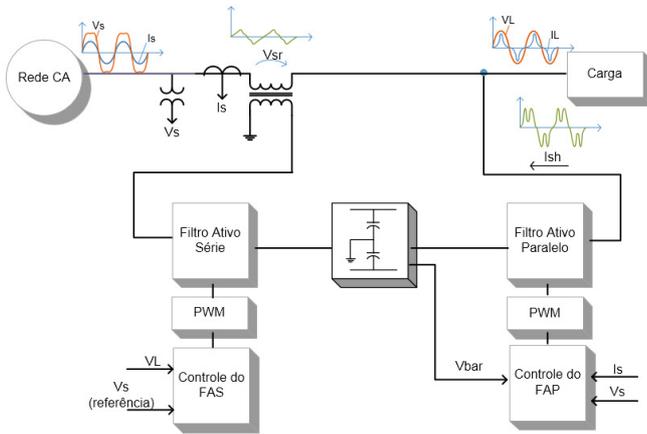


Fig. 1 – Representação da estrutura do UPQC.

III. MODELAGEM DO UPQC

A modelagem do UPQC é feita de forma separada e em função de cada filtro. Na configuração escolhida para este estudo, o FAP além do controle de corrente, será responsável pelo controle do barramento CC compartilhado entre os filtros, controlando a tensão deste e o equilíbrio de tensão entre os capacitores que alimentam este barramento. Já o FAS somente possuirá o controle de tensão no Ponto de Acoplamento da Carga – PAC.

Dada a abrangente bibliografia a respeito deste condicionador [1], as equações das plantas utilizadas no controle do UPQC são as mesmas de [10].

IV. CONTROLE DO ÂNGULO DA TENSÃO DE CARGA.

A queda de tensão na rede de distribuição pode ser efetivamente compensada por energia reativa [12], assim como ativa [13] através de um UPQC. Com o controle da potência reativa pode-se compensar uma certa porcentagem de energia reativa bem como *sags* e *swells* da rede. Para isto, a tensão em

série é injetada de tal maneira que mantém a relação de quadratura com a corrente da fonte, isto é, sem a utilização de potência ativa. Mas esta abordagem é efetiva apenas durante afundamento de tensão no sistema. Caso a tensão injetada não esteja em quadratura com a fonte de corrente, isso geraria uma diferença de ângulo entre a tensão da fonte e da carga, mas sem alterar a magnitude da tensão de carga resultante, assim, uma certa quantidade energia, reativa ou ativa, fluiria através de inversor em série. Este estudo prova que com o controle adequado do ângulo entre a tensão na fonte e a tensão na carga, doravante chamado Controle do Ângulo da Tensão de Carga – CATC, o FAS também pode auxiliar na compensação de energia reativa de carga sem retirar energia ativa da fonte em condições normais de operação.

A representação fasorial do funcionamento do CATC está na Fig. 2. Considerando que a tensão da fonte V_s em condições normais de trabalho e a tensão de carga V_L terão a mesma amplitude (a impedância da linha é desconsiderada) e supondo que o UPQC seja instalado muito próximo as cargas, e por simplicidade assumindo equilíbrio de carga, e tensão perfeitamente senoidal e sem distúrbios quaisquer. Agora, visando diferença angular entre V_s e V_L , o FAS deve injetar uma tensão V_{sr} de tal modo que a tensão resultante na carga V'_L tenha a amplitude da tensão na fonte e tenha o ângulo δ , o ângulo entre a tensão da fonte e a nova tensão na carga.

Isso causa um avanço no fasor de corrente I_L para I'_L mantendo o mesmo ângulo entre tensão e corrente φ_L . Portanto, o ângulo efetivo entre a corrente da carga e a tensão da fonte passa de φ_L para β , resultando na redução da potência reativa trabalhada no FAP. Em outras palavras, gerando o δ , o ângulo entre a tensão na fonte e a tensão na carga, o FAS também processa energia reativa e ativa.

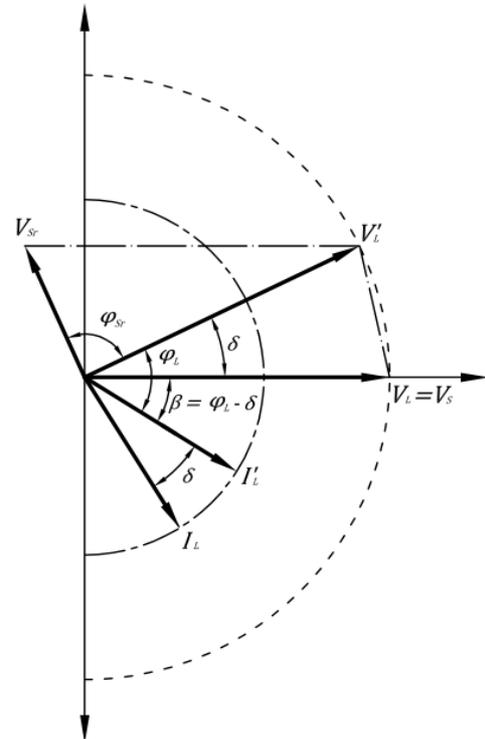


Fig. 2 – Diagrama fasorial do CATC.

V. COMPUTAÇÃO MATEMÁTICA

A fim de implementar o CATC faz-se necessário a estimativa de δ baseado na demanda reativa da carga e de maneira instantânea. Este estudo propõem uma determinação instantânea de δ baseado em medições da demanda reativa e ativa da carga. Segundo [11] deve-se estabelecer um $\delta_{m\acute{a}x}$ em função da capacidade do FAS, para não haver uma sobrecarga. Porém neste estudo será utilizada esta metodologia e também uma nova que irá dividir a potência entre os filtros automaticamente, independente da potência consumida pela carga.

No estudo feito por Khadkikar et al [11], há uma extensa dedução trigonométrica feita a partir do diagrama fasorial exposta na Fig. 2, porém neste estudo serão apresentadas as principais equações necessárias para a validação deste método.

A. Parâmetros do FAS

Para este filtro é necessário saber a amplitude da tensão e o ângulo desta que será injetada pelo FAS. A equação (1) mostra o módulo de V_{sr} , já (2) e (3) o ângulo da tensão, onde k é a amplitude da tensão fornecida pela fonte.

$$|V_{sr}| = k \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \cos(\delta)} \quad (1)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\delta)}{1 - \cos(\delta)} \right) \quad (2)$$

$$\varphi_{sr} = 180^\circ - \gamma \quad (3)$$

Para um valor pré-definido de k , a tensão injetada pelo filtro em série fica somente em função de δ .

B. Parâmetros do FAP

A Fig. 3 apresenta o diagrama fasorial para as diferentes correntes geradas em função da inserção de δ . Sem o CATC, a carga reativa é completamente trabalhada pelo FAP através da injeção da corrente de compensação I_{sh} . Com o CATC, o fasor da corrente de carga torna-se I'_L . O efetivo ângulo entre a tensão da fonte e a corrente de carga agora é β , o que gera uma redução de demanda reativa do lado da fonte.

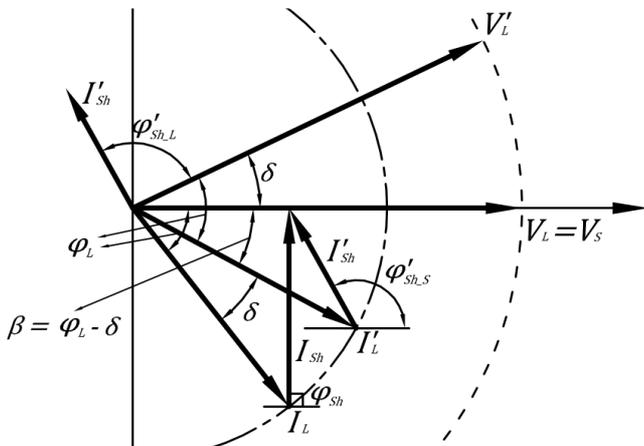


Fig. 3 – Representação da corrente do CATC.

O filtro em paralelo agora injeta a corrente I'_{sh} de maneira que não haja energia ativa retirada da fonte durante a operação

em regime, a corrente da fonte I_S deve ser a mesma da atuação sem o CATC. O módulo da corrente injetada pelo FAP está em (4) o ângulo desta em relação à V_L está em (5) e em relação à V'_L em (6), ambos em função de α que é deduzido em (7).

$$|I'_{sh}| = |I_L| \cdot \sqrt{1 + \cos^2(\varphi_L) - 2 \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi_L)} \quad (4)$$

$$\varphi'_{shL} = \alpha + 90^\circ - \delta \quad (5)$$

$$\varphi'_{shS} = \alpha + 90^\circ \quad (6)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\cos(\beta) - \cos(\varphi_L)}{\sin(\beta)} \right) \quad (7)$$

Para uma condição particular da carga, os parâmetros I_L e φ_L são constantes, assim, estas equações mostram que a aproximação pelo CATC é independente de outros parâmetros do sistema, resultando em uma aproximação robusta e eficaz para a compensação de energia reativa por ambos os filtros do UPQC.

C. Determinação do ângulo δ

Na metodologia proposta por Khadkikar et al [11], a potência máxima do FAS é em função da porcentagem de *sag* e *swells* que este processa. Neste estudo será considerado que as potências nominais dos filtros são conhecidas. Sendo $Q_{L,max}$ a máxima demanda reativa que o UPQC suporta, esta carga será dividida entre os filtros ativos. Desta forma define-se a demanda reativa máxima que o FAP irá suportar como $Q_{sh,max}$ baseado na potência máxima que o FAS irá trabalhar, Q_{sr} . Desta forma defini-se que:

$$Q_{sr} = Q_{L,max} - Q_{sh,max} \quad (8)$$

$$Q_{sh,max} = Q_{L,max} - Q_{sr} \quad (9)$$

Assim, com (8) e (9), a máxima potência que o FAP irá suportar pode ser reduzida e fixada baseado na potência do FAS. Caso a demanda reativa seja menor que $Q_{sh,max}$, o FAP irá compensar esta demanda sozinho. Caso a demanda reativa seja maior que $Q_{sh,max}$, o FAS irá assumir a sobrecarga. Em qualquer condição, $Q_{sr} = Q_{L,max} - Q_{sh,max}$, desta forma:

$$Q_{sr} = k \cdot I_S \cdot \sin(\delta) \quad (10)$$

Como $Q_{sh,max}$ é uma constante conhecida e $Q_{L,max}$ é calculada instantaneamente, desprezando as perdas e considerando $S_s = P_s$, pois toda demanda reativa será fornecida pelo UPQC.

$$\sin(\delta) = \frac{Q_{sr}}{k \cdot I_S} \quad (11)$$

$$\sin(\delta) = \frac{Q_{sr}}{P_s} \quad (12)$$

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{Q_{sr}}{P_s} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{Q_{sr}}{P_L} \right) \quad (13)$$

Como a energia reativa vai ser dividida entre os filtros do UPQC, a fonte deve suprir somente demanda ativa. Desta forma, através de (11) – (13), caso seja possível a medição da

energia ativa e reativa da carga instantaneamente, δ pode ser estimado.

Esta metodologia de trabalho, de usar o FAS para processar energia reativa somente quando o valor de $Q_{Sh,max}$ for ultrapassado, foi escolhida por [11], o que, efetivamente, tem suas vantagens, porém neste estudo este método foi aprimorado.

Com o objetivo de reduzir as perdas no processamento de energia do UPQC, é necessário que a energia reativa seja dividida igualmente entre os filtros. Para isto basta mudar a referência da energia reativa de (13). Sendo que esta referência foi definida de um valor fixo [12], mais precisamente o valor máximo que o FAP suporta e a variação de Q_L . Porém neste estudo esta referência será somente em função da variação da carga. Assim se Q_{Sr} for substituída pela metade de Q_L , é obtido o novo valor de δ :

$$\delta_{0.5} = \sin^{-1}\left(\frac{0,5 \cdot Q_L}{P_L}\right) \quad (14)$$

Assim, a referência será metade da energia reativa da carga, sendo que esta referência simplesmente define o máximo de energia reativa que o FAP iria processar, no caso metade de Q_L , o restante da carga irá fluir pelo FAS. O que irá garantir a divisão da potência entre os filtros de forma igualitária e somente em função da carga e não de valores fixos.

A Fig. 4 apresenta um diagrama de blocos de como este novo ângulo é obtido através de medições instantâneas das potências (S_L , P_L e Q_L) da carga, maiores detalhes da implementação dos blocos podem ser vistos na Fig. 5.

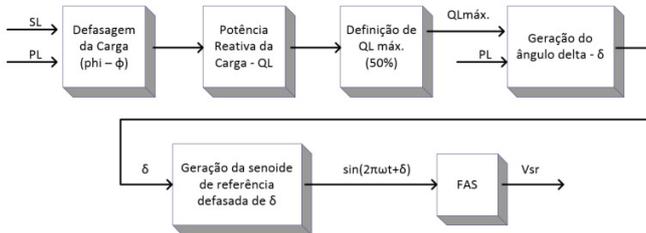


Fig. 4 – Implementação do CATC com $\delta_{0,5}$.

VI. IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO.

Os dados do UPQC utilizado estão na Tabela I. A carga utilizada foi uma impedância RL variável, projetada para atuar em três tempos variando sua potência aparente, S_L , e o Fator de Potência – FP. No primeiro tempo S_L terá o mesmo valor da potência nominal do UPQC e FP de 0,8, no segundo tempo metade da potência aparente e FP de 0,75 e por último o dobro da potência e FP de 0,92. Os filtros do UPQC foram dimensionados para atender 5kVA cada, desta forma seus componentes passivos possuem os mesmos valores.

A. Implementação do CATC.

Seguindo a metodologia explicada na Fig. 4 foi montado o circuito responsável pela geração da nova tensão de referência para o FAS já com a defasagem necessária para a divisão igualitária da potência reativa entre os filtros. O circuito implementado está na Fig. 5.

TABELA I

DADOS DO UPQC SIMULADO	
Potência do UPQC	10kVA
Ondulação de Corrente do Indutor	20%
Ondulação da Tensão no Barramento	3%
Tensão de Barramento	400V
Frequência de Chaveamento	50kHz
Capacitor de Barramento	5,2 μ F
Indutor do Filtro Passivo	160 μ H
Capacitor do Filtro Passivo	6,3 μ F
Resistor do Filtro Passivo	1 Ω

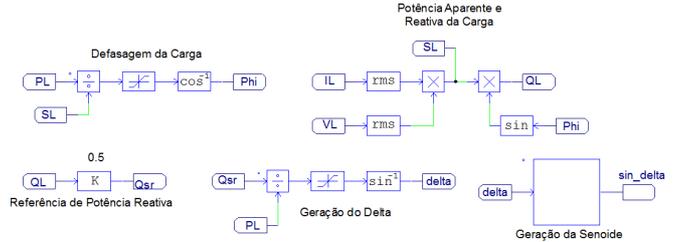


Fig. 5 – Implementação do CATC na simulação.

B. Resultados sem divisão igualitária de potência reativa.

Com o sistema montado e o UPQC funcionando perfeitamente pode-se introduzir o CATC. Primeiramente conforme [11], onde a potência limite escolhida para o FAP foi de 3kVar, que será a referência fixa, para uma potência nominal do UPQC de 10kVA e uma potência reativa total de 6kVar, ou seja, 50% de energia reativa para cada filtro. As cargas variaram conforme explicado no início do item VI. Da Fig. 6 a 8 são mostradas as principais formas de onda do UPQC, a tensão na fonte, V_S , a tensão na carga, V_L , a corrente de entrada I_S e a variação instantânea das potências reativas entre os filtros conforme varia a carga. Quando o CATC atua, ele defasa V_L em relação V_S que está em fase com I_S .

Nota-se que, nos três tempos da simulação, as formas de onda de V_L e I_S possuem formas senoidais independente da potência da carga, o que comprova o funcionamento do UPQC. Analisando a Fig. 6 verifica-se que a potência reativa do FAP – Q_{Sh} , estabiliza muito próximo ao valor de 3kVar, com um erro menor de 1%, e a potência reativa do FAS – Q_{Sr} fica oscilando em torno de 3,04kVar, valor muito próximo de Q_{Sh} o que valida a simulação do CATC.

Analisando o funcionamento do sistema com metade da carga nominal, 5kVA e FP de 0,75, visto na Fig. 7, nota-se que o FAP processa quase toda a potência reativa, o restante da energia reativa é processada pelo FAS. E também há um defasamento muito pequeno entre V_S e V_L , pois o CATC gera um ângulo δ pequeno, como mostra Fig. 9.

Já para o UPQC operando com sobrecarga de 100% o mesmo mantém as principais formas de onda conformes, com uma pequena deformidade na forma de onda da corrente, e o CATC estabiliza Q_{Sh} perto do valor nominal e a sobrecarga reativa é toda processada pelo FAS. Por último a Fig. 9 mostra a variação do ângulo δ e ϕ no decorrer da simulação conforme variação da carga.

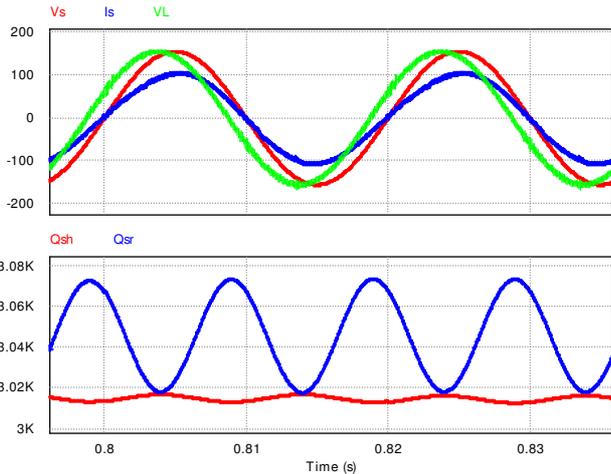


Fig. 6 – Resultados com carga nominal e referência fixa.

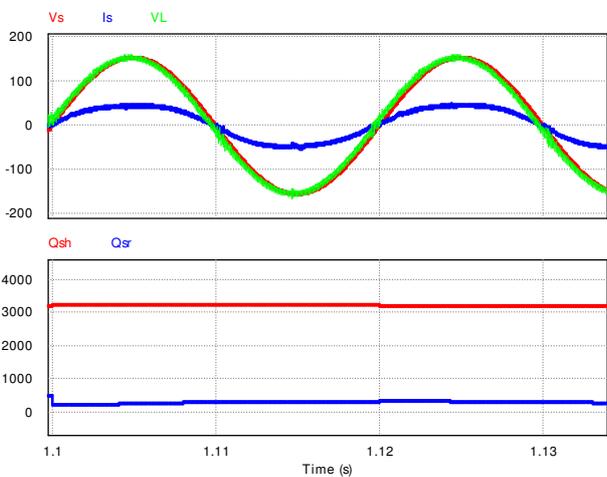


Fig. 7 – Resultados com metade da carga nominal e referência fixa.

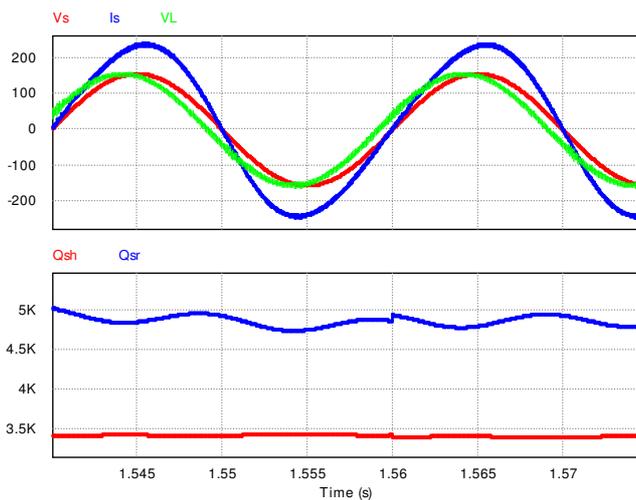


Fig. 8 – Resultados com sobrecarga de 100% e referência fixa.

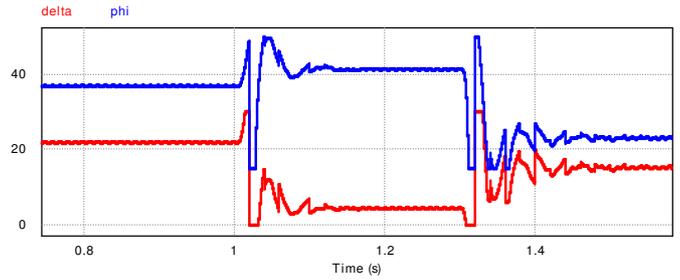


Fig. 9 – Ângulos δ e φ com referência fixa.

C. Resultados com divisão igualitária de potência reativa

Para as mesmas configurações simuladas anteriormente agora foi introduzido o CATC com divisão de 50% de demanda reativa para ambos os filtros do UPQC.

A primeira análise está na Fig. 10, com a carga nominal, novamente as principais formas de onda estão conformes e as potências reativas são divididas entre os filtros com diferença de aproximadamente 0,3%. Comparando este resultado com o do método proposto por [11], visto na Fig. 6, verifica-se que tanto Q_{Sh} quanto Q_{Sr} possuem menor variação e a diferença entre as potências processadas é praticamente a mesma.

O acréscimo deste novo método de controle da tensão de carga pode ser verificado na segunda etapa da simulação, onde a potência da carga cai pela metade. Mas a potência reativa continua sendo distribuída igualmente, ou próximo disso, entre os filtros, como mostra Fig. 11. Onde a diferença entre Q_{Sh} e Q_{Sr} fica em torno de 60VAr o que implica em um erro de aproximadamente 3%.

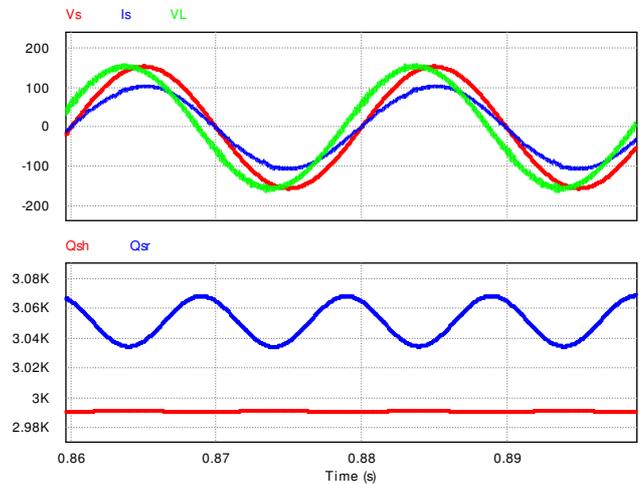


Fig. 10 – Resultados com carga nominal e referência variável.

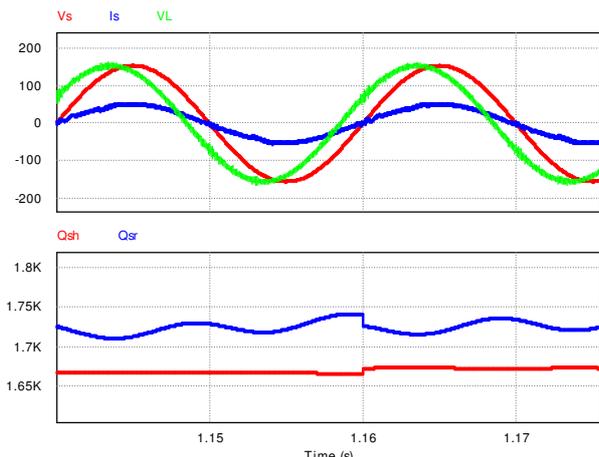


Fig. 11 – Resultados com metade da carga nominal e referência variável.

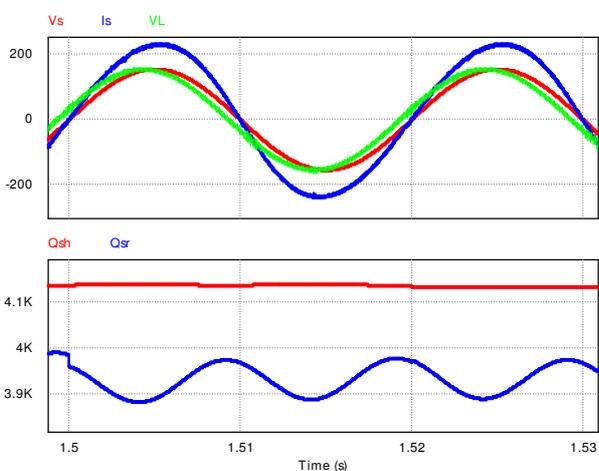


Fig. 12 – Resultados com sobrecarga de 100% e referência variável.

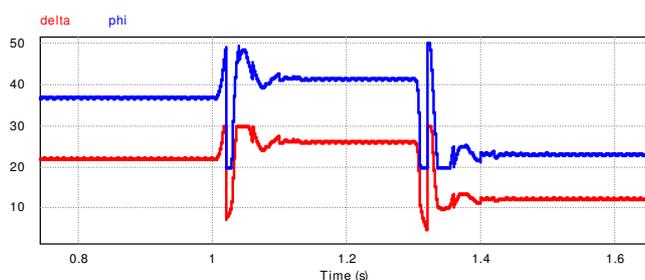


Fig. 13 – Ângulos δ e φ com referência variável.

Na análise da última etapa da simulação, exposta na Fig. 12, mesmo com sobrecarga de 100% o UPQC mantém as principais formas de onda conformes e o CATC continua dividindo a potência reativa entre os filtros.

E por último a Fig. 13 mostra a variação de δ e φ ao decorrer da simulação, comprovando a atuação do CATC na geração da referência de tensão para o FAS.

VII. CONCLUSÕES

Após a revisão bibliográfica foi verificado que o controle de tensão na carga já é utilizado em outros estudos sobre o UPQC, mas cada um com um foco diferente. Dentre as propostas

expostas por estes foi escolhida, para este estudo, a de controlar o fluxo de potência reativa entre os filtros ativos.

Foi deduzido o conceito do CATC com as principais equações para poder controlar a potência reativa entre os filtros ativos e foi proposto um método de divisão igualitária da energia reativa entre os filtros.

Este novo método foi implementado, simulado e comparado com o método anterior. Através das simulações ficou comprovada a eficácia do CATC para a equalização da energia reativa entre os filtros do UPQC.

Embora o CATC aqui estudado teve o foco na potência reativa na frequência fundamental, a utilização deste conceito no controle do UPQC mostra a clara possibilidade de equilibrar as potências reativas entre os filtros, mesmo fixando um limite para o FAP quanto dividindo de forma igualitária. Sendo este último método, o acréscimo deste estudo.

A divisão desta energia possibilita um melhor dimensionamento dos filtros do UPQC e também uma melhoria na eficiência energética deste equipamento e redução nos custos de aquisição dos componentes dos filtros.

REFERÊNCIAS

- [1] Vinod Khadkikar. Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview. IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 27, No. 5, p. 2284-2297. May 2012.
- [2] Dias, J., Condicionador Unificado de Qualidade de Energia com Controle Digital, Universidade do Estado de Santa Catarina, Dissertação, Engenharia Elétrica, Joinville, 2009.
- [3] Peng F. Z.; Adams, D. J. Harmonic Sources and Filtering Approaches. IEEE Industry Applications Magazine. vol. 7, no. 4, p. 18-25. August 2001.
- [4] W. C. Lee, T. K. Lee, "New Control Scheme for a Unified Power-Quality Compensator-Q With Minimum Active Power Injection" in IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 25, No. 2, p. 1068-1076. April 2010.
- [5] Y. Y. Kolhatkar, Shyama P. Das, "Experimental Investigation of a Single-Phase UPQC With Minimum VA Loading" in IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 22, No. 1, p. 373-380. January 2007.
- [6] R. R. Matias, C. B. Jacobina, A. C. Oliveira, W. R. N. Santos "Análise em Regime Permanente do Filtro Ativo Universal" em Eletrôn. Potên., Campo Grande, v. 18, n.4, p.1188-1196, set./nov.2013.
- [7] A.E. Leon, S.J. Amodeo, J.A. Solsona, M.I. Valla, "Non-Linear Optimal Controller for Unified Power Quality Conditioners" in IET Power Electron., 2011, Vol. 4, Iss. 4, p. 435-446.
- [8] V. Khadkikar, A. Chandra, A. O. Barry, and T. D. Nguyen, "UPQC-S: A Novel Concept of Simultaneous Voltage Sag/Swell and Load Reactive Power Compensations Utilizing Series Inverter of UPQC" in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 9, p. 2414-2425 September 2011.
- [9] R. J., Millnitz. Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Dual com Controle Simplificado, Dissertação de Mestrado, UDESC 2012.
- [10] Dias, J.; Mezaroba, M.; Rech, C.; Michels, L.; Busarello, T.D.C. Controle Digital Simplificado para um Compensador Unificado de Qualidade de Energia. CBA Congresso Brasileiro de Automática. vol. 1, p. 2549-2556. Setembro 2010.
- [11] V. Khadkikar, A. Chandra. A New Control Philosophy for a Unified Power Quality Conditioner (UPQC) to Coordinate Load-Reactive Power Demand Between Shunt and Series Inverters. IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 23, No. 4, p. 2522-2534. October 2008.
- [12] M. Basu, S. P. Das, and G. K. Dubey, "Performance study of UPQC-Q for load compensation and voltage sag mitigation," in Proc. Annu.Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., 2002, vol. 1, p. 698-703.
- [13] V. Khadkikar, A. Chandra, A. O. Barry, and T. D. Nguyen, "Conceptual analysis of unified power quality conditioner (UPQC)," in Proc. Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Symp., 2006, vol. 2, p. 1088-1093.