



V SBQEE
Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica
17 a 20 de Agosto de 2003
Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 12 198
Tópico: Aplicações de Novas Tecnologias

APLICAÇÃO DO STATCOM NA DISTRIBUIÇÃO: REGULAÇÃO DE TENSÃO E CONTROLE DE FATOR DE POTÊNCIA

C. A. C. Cavaliere* COPPE/UFRJ E.H. Watanabe COPPE/UFRJ M. Aredes COPPE/UFRJ P.G. Barbosa UFJF F. D. Jesus COPPE/UFRJ
J. R. de Carvalho CERJ A. C. C. Moreira CERJ F. E. R. Fraga CERJ M. J. Leal CERJ

RESUMO

Neste artigo a aplicação do STATCOM (*STATIC synchronous COMPensator*) em sistemas de distribuição é apresentada através da implementação de controles de regulação de tensão e de fator de potência. O STATCOM é apresentado através da descrição de seu funcionamento básico e de suas topologias. Um sistema de distribuição com problemas de regulação de tensão e problemas de fator de potência é modelado no programa de transitórios eletromagnéticos ATP/EMTP e este sistema é utilizado para os estudos seguintes. O controle de tensão e de fator de potência realizados através do STATCOM são apresentados e implementados no sistema exemplo.

PALAVRAS-CHAVE

STATCOM, Custom Power, FACTS, Voltage Sag, Voltage Regulation.

1.0 - INTRODUÇÃO

O STATCOM é um equipamento FACTS (*Flexible AC Transmission System*) utilizado para o controle de potência reativa. Os elementos básicos deste equipamento são o transformador de acoplamento e o transformador de redução de harmônicos, os inversores e o capacitor do lado cc, conforme mostrado na Figura 1.

Este equipamento foi, inicialmente, proposto para aplicação em sistemas de transmissão [1]. Porém, em 1995 a aplicação deste equipamento em

sistemas de distribuição foi proposta, seguindo o conceito de *Custom Power* [2]. Neste tipo de aplicação, o controle de potência reativa para aumentar a capacidade de transmissão de energia em uma linha de transmissão é substituído pelo controle de potência reativa para a correção do fator de potência ou da tensão. A primeira aplicação tem por objetivo a melhoria da eficiência do sistema e a segunda a melhoria da qualidade da tensão.

As vantagens do uso do STATCOM em sistemas de transmissão são conhecidas, porém, é necessária a verificação do uso deste equipamento em redes de sub-transmissão e distribuição de energia elétrica, ou mesmo, o seu uso para consumidores ou grupos de consumidores específicos.

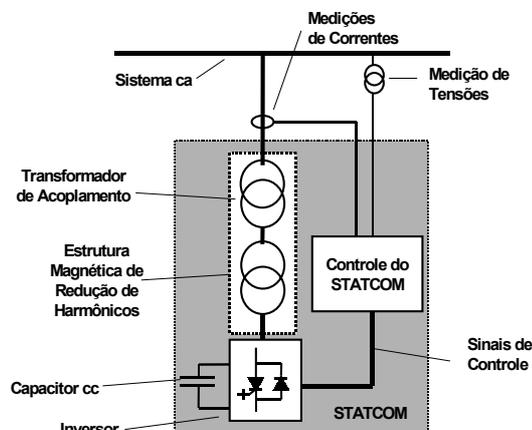


Figura 1 - Diagrama em blocos simplificado do STATCOM - partes básicas.

2.0 - O STATCOM

2.1 Princípio de Operação do STATCOM

O princípio de funcionamento do STATCOM pode ser descrito através do diagrama mostrado na Figura 2, o qual é uma simplificação do STATCOM e do sistema elétrico [3].

No esquema simplificado, mostrado na Figura 2, o sistema elétrico e o STATCOM são representados, respectivamente, pelas fontes de tensão V_s e V_i . A fonte de tensão V_i foi representada sem os componentes harmônicos presentes na saída do conversor. A reatância indicada por X_L representa as reatâncias somadas dos circuitos equivalentes Thévenin considerando o sistema e o transformador de conexão do STATCOM. Também, na Figura 2 é mostrado o diagrama fasorial das tensões. Neste diagrama, δ é o ângulo de defasagem entre as tensões do sistema e do STATCOM.

As potência ativa e reativa entre as duas fontes de tensão, em regime permanente, podem ser descritos através de:

$$P_S = \frac{V_S V_I}{X_L} \cdot \sin \delta, \quad (1)$$

$$Q_S = \frac{V_S^2}{X_L} - \frac{V_S V_I}{X_L} \cdot \cos \delta \quad (2)$$

Considerando as equações de potência anteriores, e os diagramas fasoriais na Figura 2, destacam-se algumas situações:

(1) Quando a tensão V_i está adiantada da tensão V_s , $-90^\circ < \delta < 0$, existe potência ativa saindo do STATCOM na direção da rede, $P_S < 0$, Figura 3.(a).

(2) Quando a tensão V_i está atrasada da tensão V_s , $0 < \delta < 90^\circ$, existe potência ativa indo da rede para o STATCOM, $P_S > 0$, Figura 3.(b).

(3) Quando a tensão V_i está em fase com a tensão V_s , $\delta = 0$, e $|V_i| = |V_s|$, não existe potência ativa ou reativa, $P_S = 0$ e $Q_S = 0$, Figura 3.(c).

(4) Quando a tensão V_i está em fase com a tensão V_s , $\delta = 0$, e $|V_i| < |V_s|$, não existe potência ativa, $P_S = 0$, porém existe potência reativa indutiva, $Q_S > 0$, Figura 3.(d).

(5) Quando a tensão V_i está em fase com a tensão V_s , $\delta = 0$, e $|V_i| > |V_s|$, não existe potência ativa, $P_S = 0$, porém existe potência reativa capacitiva, $Q_S < 0$, Figura 3.(e).

As situações apresentadas mostram como o STATCOM opera em relação ao sistema elétrico ao qual está conectado.

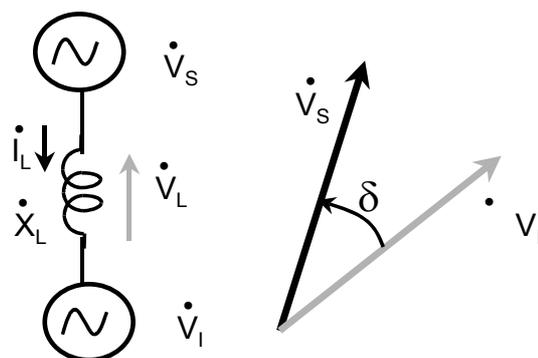


Figura 2 - Diagrama em blocos simplificado do STATCOM – partes básicas.

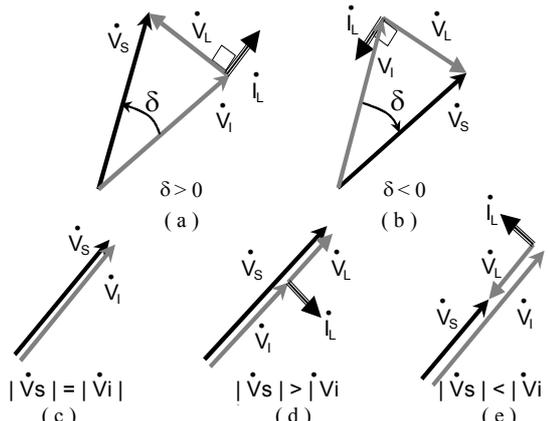


Figura 3 - Diagramas fasoriais das tensões e correntes do sistema elétrico e do STATCOM.

Através destes resultados verifica-se que caso as tensões do sistema CA e do STATCOM estejam sincronizadas e em fase, não há potência ativa em nenhum sentido; porém, se a amplitude das tensões forem diferentes, observa-se a existência de potência reativa.

Desta forma o STATCOM pode operar como um banco trifásico de indutores variáveis gerando correntes atrasadas de 90° em relação à tensão do sistema elétrico ou como um banco de capacitores trifásicos variáveis, gerando correntes adiantadas de 90° . Realizando para isto, o controle contínuo de amplitude de tensão do inversor, através de pequenas defasagens entre as tensões da rede e do inversor.

3.0 - O SISTEMA EXEMPLO

Para demonstrar o STATCOM atuando como equipamento controlador da tensão e de fator de potência, um sistema exemplo foi implementado. O sistema exemplo utilizado nos testes com o STATCOM está esquematizado na Figura 4. Detalhes dos componentes do sistema exemplo são fornecidos a seguir. A geração do sistema é representada pelo equivalente Thévenin obtido através de fontes de tensão em série com uma

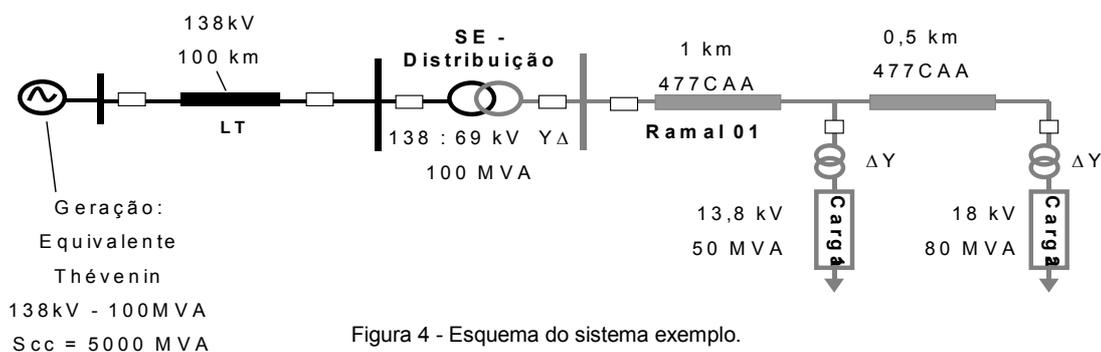


Figura 4 - Esquema do sistema exemplo.

reatância.

Para este sistema foram consideradas a tensão de 138 kV e a potência de curto circuito de 5000 MVA.

A linha de transmissão que conecta a geração à subestação é uma linha de 100 km com o perfil mostrado na Figura 4 [5]. Nesta linha os condutores são do tipo 397,500 CM, 26/7 Strand ACSR e os cabos pára-raios são do tipo 2/0 ACSR. Considerou-se neste caso a resistividade do solo, $\rho = 100 \Omega/\text{m.}$, e foi utilizado o modelo de circuito RL com acoplamentos apresentado no programa ATP/EMTP [6].

A subestação é composta por um único transformador cujas características são a ligação $Y\Delta$, fazendo o abaixamento da tensão do valor de 138 kV para 69 kV. Este transformador tem a potência de 100 MVA, e a reatância de dispersão de 5%. O ramal de distribuição é composto por cabos tipo 477 CAA. Conforme mostrado no esquema da Figura 4, o ramal do caso exemplo é constituído por duas seções, sendo a primeira com 1 km, e a segunda com 0,5 km. O caso exemplo contém duas cargas que são alimentadas pelo ramal de distribuição.

A carga 1 possui a potência máxima de demanda de 50 MVA e localiza-se ao final do trecho de 1 km do ramal de distribuição. A tensão de operação desta carga é de 13,8 kV. Para isto utiliza-se um transformador abaixador de 50 MVA, 69 : 13,8 kV, ΔY , e $X_t = 5\%$. A variação da potência ativa e reativa da carga 1 ao longo do tempo é mostrada na Figura 5. Nesta figura, 1 p.u. = 50 MVA e a representação o período de um dia foi resumido para 5 segundos.

O baixo fator de potência observado em alguns intervalos de operação da Carga 1 é corrigido através da inserção de bancos de capacitores chaveados. Cada banco é composto por capacitores totalizando 200 μF em cada fase, totalizando 14,36 Mvar.

A carga 2 possui a potência máxima de demanda de 80 MVA e localiza-se ao final do ramal de distribuição, sendo a distância do início do ramal

1,5 km. A tensão de operação desta carga é de 18 kV. Para isto é utilizado um transformador de 80 MVA, 69 : 18 kV, ΔY , e $X_t = 4\%$.

A variação da potência ativa e reativa da carga 2 ao longo do tempo é mostrada na Figura 6.

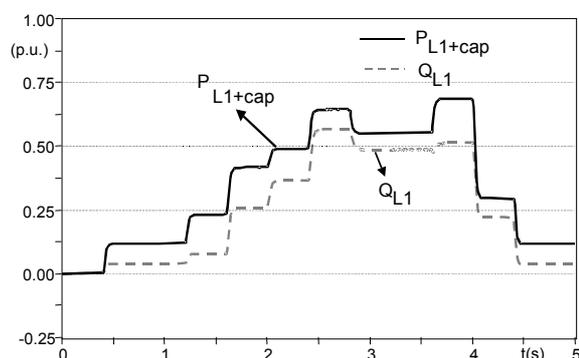


Figura 5 – Variação de potência ativa e reativa na carga 1.

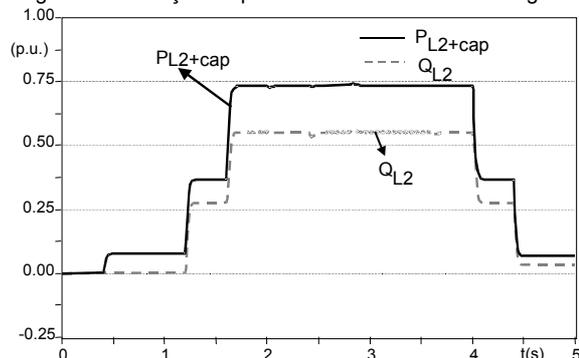


Figura 6 – Variação de potência ativa e reativa na carga 2.

Nesta figura 1 p.u. = 80 MVA e a representação o período de um dia foi resumido para 5 segundos. Para a carga 2, existe um banco de capacitores fixo, com o valor de capacitância de 5 μF , ligados em estrela aterrada. Este banco fixo corresponde a uma potência de compensação de - 611 kvar. Também são utilizados dois bancos de capacitores chaveados. Cada banco é composto por capacitores totalizando 150 μF em cada fase e representando, no total, 18,32 Mvar de potência reativa.

3.1 Simulação do Sistema Exemplo

O sistema apresentado foi implementado no programa de transientes eletromagnéticos

ATP/EMTP [6].

Os resultados mostrados a seguir foram considerando as variações de potência nas cargas 1 e 2 e o chaveamento dos bancos de capacitores visando a correção do fator de potência nas cargas. Alguns pontos de medição, mostrados na Figura 7, foram destacados no esquema do ramal de distribuição para auxiliar a discussão dos resultados.

Nos resultados mostrados na Figura 8, verifica-se que para os instantes de máxima carga a tensão ao longo do ramal de distribuição encontra-se abaixo do valor mínimo desejado (0,95 p.u.). No entanto, o resultado mostrado na Figura 9, mostra que o chaveamento dos bancos de capacitores controla o fator de potência nas cargas 1 e 2, mantendo o valor de fator de potência acima do limite de 0,92.

Nos resultados apresentados verifica-se que o sistema exemplo possui problemas de afundamento de tensão durante as condições de picos de demanda de potência nas cargas 1 e 2. E nestes sistema, a correção de fator de potência é eficaz, porém a variação em valores discretos dos bancos de capacitores provoca perturbações ao longo do ramal de distribuição podendo afetar cargas sensíveis distribuídas ao longo deste.

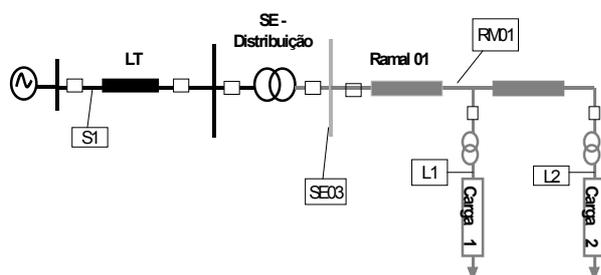


Figura 7 – Pontos de medição no sistema exemplo.

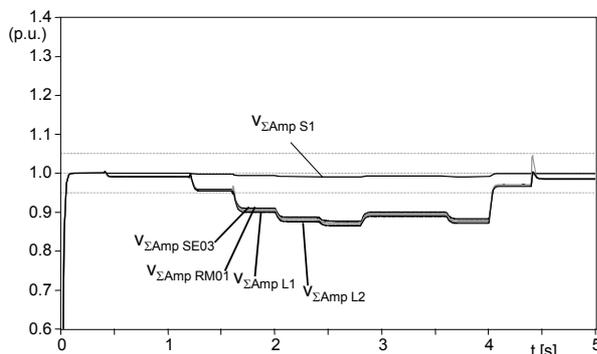


Figura 8 – Amplitude das tensões nos pontos de medição do ramal.

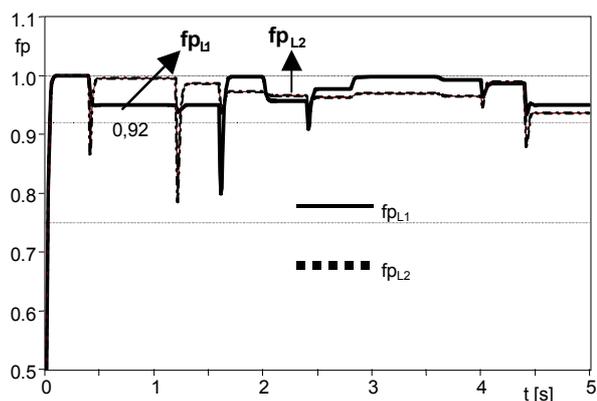


Figura 9 – Fator de potência nas cargas 1 e 2 medidos nos pontos L1 e L2.

4.0 - APLICAÇÃO DO STATCOM PARA O CONTROLE DE TENSÃO

4.1 O controle de tensão

O esquema do controle de tensão proposto é mostrado na Figura 10. Neste esquema, o valor de amplitude de tensão é calculado através do valor coletivo de tensão ($v_{\Sigma Amp}$) [7] calculado por:

$$v_{\Sigma Amp} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2}} \quad (3)$$

e este valor é comparado com uma referência, V^* , calculada através de:

$$V^* = \alpha \cdot I + V_o^* \quad (4)$$

onde α é a taxa de regulação e, V_o^* é o valor de referência nominal de tensão, sendo estes calculados por:

$$\alpha = \frac{V_{Max} - V_{Min}}{I_{IndMax} - I_{CapMax}} \quad (5)$$

$$V_o = \frac{V_{Min} \cdot I_{IndMax} - V_{Max} \cdot I_{CapMax}}{I_{IndMax} - I_{CapMax}} \quad (6)$$

a partir dos valores de tensão máximo, V_{Max} , e mínimo, V_{Min} , permitidos na regulação, e os valores disponíveis dos máximos de corrente indutiva e capacitiva, I_{IndMax} , e I_{CapMax} .

No cálculo da referência de tensão, mostrado na Figura 11, a potência imaginária instantânea [8] [9] faz a relação da potência reativa com a corrente de compensação determinado se a compensação é do tipo indutiva (+) ou capacitiva (-). Este sinal é então utilizado em (4) para indicar o valor de tensão desejada.

O erro entre o valor de amplitude de tensão medida e o valor calculado como referência é utilizado por um controlador proporcional e integral para gerar um sinal de controle. Este sinal de controle faz o ajuste da potência reativa de compensação sendo gerada pelo STATCOM de forma a resultar no valor de tensão desejado pela referência.

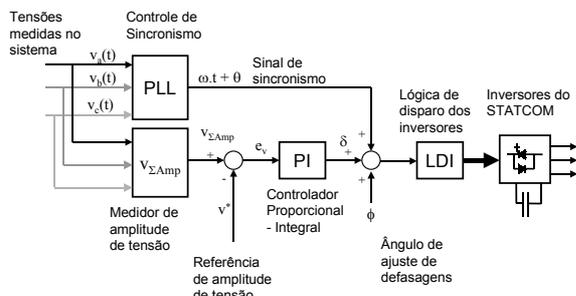


Figura 10 – Controle de tensão do STATCOM.

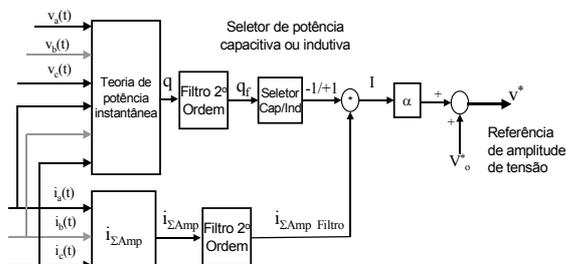


Figura 11 – Cálculo da referência de tensão para o controle.

Implementando este controle de tensão através de um STATCOM de *quasi* 48 pulsos [3] [10] [11] e 50 MVA conectado ao ponto de entrada do ramal de distribuição, indicado como ponto de medição SE03, conforme mostrado no esquema da Figura 12, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 13 a Figura 15.

Nestes resultados verifica-se que a tensão no ponto SE03 e dos outros pontos do ramal (RM01 e L2) de distribuição ficam dentro da margem desejada (0,95 a 1,05 p.u.) durante todo o período analisado.

O STATCOM de 50 MVA conectado ao ponto SE03 garantiu que a tensão ao longo do ramal fosse regulada dentro das margens desejadas para todos os eventos de variação de carga simulados.

5.0 - APLICAÇÃO DO STATCOM PARA O CONTROLE DE FATOR DE POTÊNCIA

Nesta seção é proposta a aplicação de um STATCOM *quasi* 24 pulsos [3] [10] [11] e 25 MVA, para fazer o controle de fator de potência dinâmico na carga 2 substituindo o banco de capacitor chaveado.

O controle proposto, cujo esquema é mostrado na Figura 16, funciona através do cálculo da potência reativa existente na carga e a potência reativa produzida pelo STATCOM. Uma vez calculada a potência reativa na carga, este valor é comparado com o valor de potência reativa necessário para a obtenção do fator de potência desejado. A dife-

rença destes valores de potência reativa é o valor da potência reativa de compensação que será fornecida pelo STATCOM. Neste esquema de controle, a comparação entre o valor de potência reativa de compensação gerada pelo STATCOM e a potência de referência é o sinal utilizado pelo controlador proporcional e integral gerar o sinal de controle.

O resultado obtido para este controle é mostrado na Figura 17. Nesta figura o resultado é comparado com os resultados obtidos na situação sem a compensação e com os bancos de capacitores chaveados.

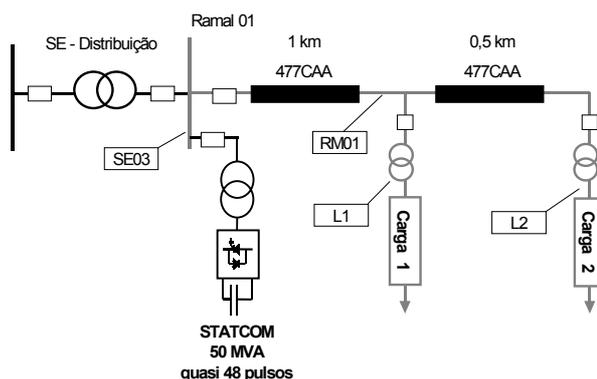


Figura 12 – Localização do STATCOM no sistema exemplo.

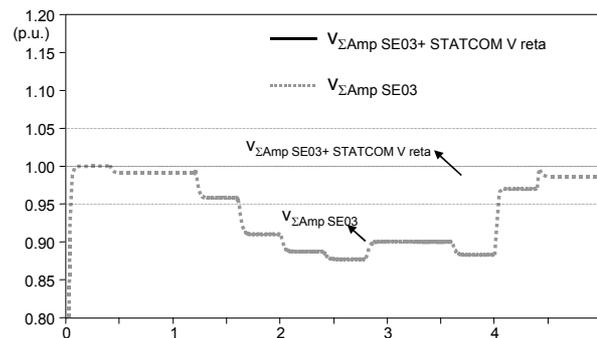


Figura 13 - Amplitudes de tensão no ponto SE03 sem e com o STATCOM.

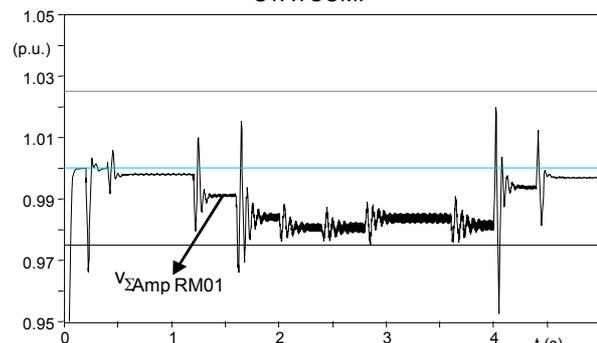


Figura 14 - Amplitude de tensão no ponto do ramal de distribuição RM01.

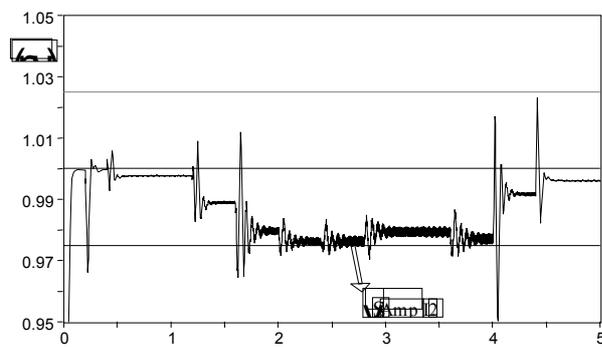


Figura 15 - Amplitude de tensão no ponto do ramal de distribuição L2.

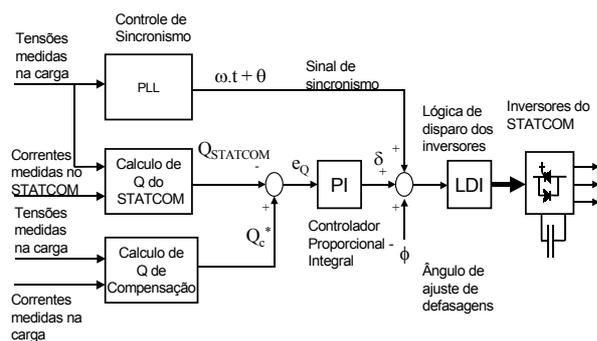


Figura 16 - Controle de fator de potência.

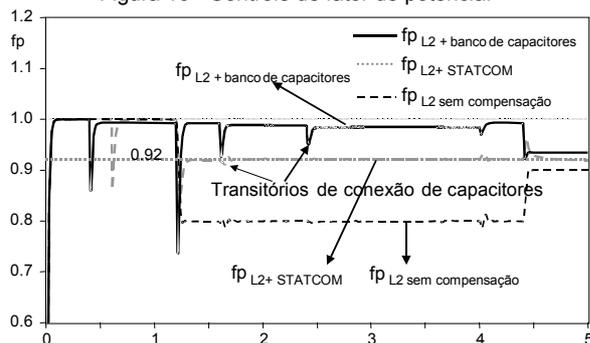


Figura 17 - Fator de potência na carga 2, (a) sem compensação, (b) com bancos de capacitores chaveados, (c) com o controle de fator de potência do STATCOM.

Verifica-se nestes resultados que o controle de fator de potência realizado através do STATCOM mantém o fator de potência no ponto de medição L2 no valor mínimo necessário (0,92) através da compensação dinâmica dos reativos gerados por esta carga. Este resultado é bem melhor do que o resultado onde não há compensação.

No entanto, o resultado obtido através dos bancos de capacitores, devido a um excesso de potência reativa de compensação que é resultante da variação discreta dos valores dos bancos de capacitores, é melhor do que o obtido pelo STATCOM. Porém, estes resultados introduzem variações bruscas, transitórios e ressonâncias e não podem ser ajustados às variações dinâmicas de potência reativa na forma precisa como foi obtida pelo STATCOM.

6.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho a aplicação do STATCOM em sistema de distribuição foi apresentada através de proposta de controles para a tensão e para o fator de potência.

Num sistema exemplo apresentado mostrou-se a eficácia do STATCOM fazendo a regulação da tensão num ponto deste sistema de forma dinâmica e contínua.

Neste mesmo sistema exemplo também foi apresentado a aplicação do STATCOM fazendo o controle de fator de potência. Nesta aplicação verifica-se que o controle dinâmico de fator de potência realizado pelo STATCOM mantém o fator de potência no valor de referência e evita a existência de transitórios de tensão e corrente.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Este projeto foi desenvolvido pela COPPE/UFRJ através de convênio entre a Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos - COPPETEC com a CERJ - Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro Referências, dentro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento aprovado pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

8.0 - REFERÊNCIAS

- [1] N. G. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, April 1988.
- [2] N. G. Hingorani, "Introducing Custom Power", IEEE Spectrum, pp. 41-48, June 1995.
- [3] C. A. C. Cavaliere, "Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados," Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Julho.
- [4] W. D. Stevenson Jr., Elementos de Análise de Sistemas de Potência, Editora McGraw Hill do Brasil LTDA., 1975.
- [5] P. M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", IEEE Press Power Systems, Engineering Series, New York, 1995.
- [6] Alternative Transients Program Rule Book, Leuven EMTF Center, Belgium, July, 1987.
- [7] M. Aredes, "Active Power Line Conditioners", Ph. D. Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, 1996.
- [8] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, A., "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", IEEE Trans. Industry Applications, vol. IA-20, May-Jun. 1984.
- [9] M. Aredes, E. H. Watanabe, "New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, No. 3, July. 1995, pp. 1649-1656.
- [10] C. A. C. Cavaliere, E. H. Watanabe, M. Aredes, "Analysis and Operation of STATCOM in Unbalanced Systems," International Conference on Power Systems Transients - IPST 2001, Rio de Janeiro, Brasil, junho 2001.