



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



Código: AJU 03 051
Tópico: Modelagens e Simulações

CONTROLE DO PERFIL DE TENSÃO ATRAVÉS DO STATCOM UTILIZANDO O SIMULADOR “SABER”

Walkyria K. A. Gonçalves Martins* Adeon Cecilio. Pinto Geraldo Caixeta Guimarães
José Carlos de Oliveira Ricardo N. Magalhães

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU
Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT

RESUMO

Este artigo objetiva apresentar o desempenho do modelo do STATCOM, implementado no SABER, durante o controle de tensão de um barramento. Para tanto, primeiramente, é descrito o princípio básico de funcionamento de tal equipamento, o qual rege seus objetivos de controle. Ainda, a modelagem matemática deste compensador é abordada utilizando a teoria vetorial, uma vez que nela se baseia toda sua malha de controle, a qual também é descrita na seqüência. Finalmente, são efetuadas as análises de desempenho das referidas implementações do equipamento através de estudos de casos

PALAVRAS-CHAVE

FACTS, STATCOM, e controle de tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

As interconexões de sistemas elétricos têm sido feitas objetivando minimizar o número de unidades geradoras, para atender a maior quantidade de cargas com um certo grau de confiabilidade. Todavia, controles inadequados podem impedir a utilização de todo o potencial das linhas de transmissão existentes. Face a isto e buscando soluções para o problema de suprimento elétrico, surge o conceito de FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), que é uma filosofia de transporte de energia elétrica por Sistemas de Transmissão CA Flexíveis [1,2]. Já que esta técnica emprega equipamentos da eletrônica de potência em sistema de transmissão

para controle do fluxo de potência e suporte de tensão, deve-se observar que, com o avanço de tais dispositivos (GTO), o emprego dos FACTS se torna cada vez mais atrativo. Dentre tais equipamentos, destaca-se o STATCOM o qual consiste de um compensador estático avançado de reativos, cuja principal função é regular a tensão nas linhas de transmissão.

De um modo geral, a implantação destes compensadores em um sistema de potência é necessariamente antecedida por estudos computacionais, para que o equipamento seja dimensionado e ajustado corretamente. Para tanto, são requeridos *softwares* dedicados a simulações específicas, tais como: fluxo de carga, harmônicos, transitórios eletromagnéticos, etc.. Assim, diante da crescente necessidade de tais análises, é extremamente interessante que uma única ferramenta computacional seja capaz de realizar os mais diferentes estudos associados à engenharia elétrica. Neste particular, destaca-se o simulador SABER que, além de uma variada biblioteca, propicia, através de uma linguagem própria (*Mast*), a modelagem de qualquer componente eletro-eletrônico, mecânico, etc., no domínio do tempo. Além disso, o SABER possui características como grande versatilidade gráfica, capacidade de interconexão com rotinas elaboradas em outras linguagens de programação (C e Fortran) e manipulação dos resultados de saída, que permitem a execução de estudos mais complexos e análises mais ricas.

Diante do exposto, este artigo apresenta o desempenho do modelo do STATCOM,

* Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica - Uberlândia - MG - BRASIL
Tel./FAX: +55 (034) 3239-4166

E-mail: walkyria@ufu.br, adeonpinto@bol.com.br, gcaixeta@ufu.br, jcoliveira@ufu.br

implementado no SABER pelas referências [3] e [4], durante o controle de tensão em um barramento. Para tanto, primeiramente, faz-se necessário uma descrição do princípio básico de funcionamento de tal equipamento, para que os objetivos do controle possam ser determinados. Além disso, é abordada a modelagem matemática do STATCOM, utilizando a teoria vetorial, uma vez que nela se baseia toda a malha de controle empregada na sua operação. Ressalta-se que, tal malha de controle, definida e implementada computacionalmente no SABER pela referência [3], também é descrita na seqüência. Finalmente, as análises de desempenho das referidas implementações do equipamento são efetuadas através de estudos de casos.

2.0 - PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO STATCOM

O STATCOM, consiste de um inversor, alimentado por um capacitor e conectado ao barramento do sistema a ser compensado através de um transformador de acoplamento, cujo modelo funcional é mostrado na Fig.1.

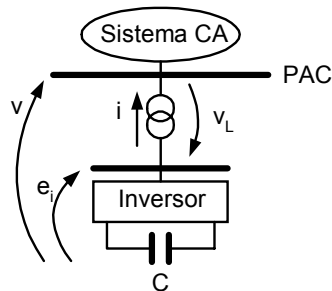
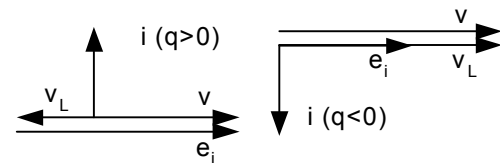


Figura 1 – Controle da tensão v através do STATCOM

A tensão trifásica gerada pelo STATCOM define a troca de potência reativa e/ou ativa entre o mesmo e o sistema CA. Dessa forma, não haverá fluxo de corrente para o inversor se a tensão gerada e_i tiver o mesmo módulo e ângulo de fase daquela no ponto de acoplamento comum (PAC) v . Se as perdas forem desprezadas e não havendo um dispositivo armazenador de energia, resulta que ambas as tensões, citadas acima, estão em fase. Assim, se a amplitude da tensão e_i for maior que aquela do sistema v , uma corrente capacitiva (adiantada) i fluirá da barra PAC para o STATCOM (Fig. 2a). Por outro lado, se e_i for menor que v , então haverá circulação de uma corrente indutiva (atrasada) (Fig. 2b) [1].

As formas de se controlar a tensão e_i na saída do inversor do STATCOM variam desde o chaveamento tipo onda retangular 120° , com possíveis associações entre eles para o propósito de redução dos harmônicos de baixa ordem, até o chaveamento tipo PWM.



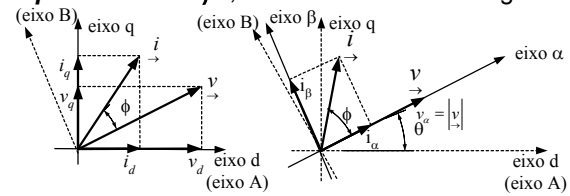
(a) Modo capacitivo (b) Modo indutivo

Figura 2 – Diagrama fasorial

3.0 - REPRESENTAÇÃO VETORIAL

A representação do STATCOM é baseada na teoria vetorial, uma vez que esta simplifica tanto a análise como o controle das suas grandezas.

De acordo com tal teoria [5], tensões e correntes são representadas por vetores, cujas componentes podem ser trifásicas, no sistema abc , ou ortogonais, nos sistemas estacionário $dq0$ e síncrono $\alpha\beta0$, como é mostrado na Fig. 3.



(a) Sistema estacionário (dq0) (b) Sistema síncrono ($\alpha\beta0$)

Figura 3 – Decomposição dos vetores de tensão e corrente

A Fig. 4 ilustra a decomposição dos vetores envolvidos no controle do STATCOM.

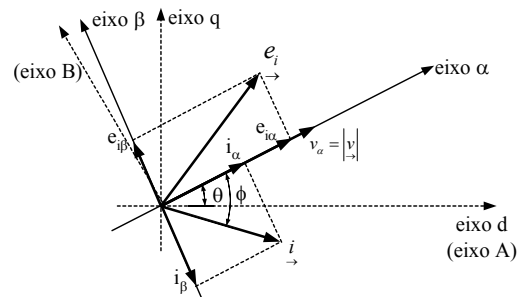


Figura 4 – Decomposição vetorial das tensões e correntes do STATCOM nos sistemas referência estacionário e síncrono

A transformação das coordenadas do sistema de referência abc para $dq0$ é feita através da Eq. (1):

$$\begin{bmatrix} z_d \\ z_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde:

Z_{abc} - componentes trifásicas de i , e_i e v .

Z_{dq} - componentes ortogonais dos vetores i , e_i e v no sistema de eixos estacionários.

[C] - matriz de transformação do sistema trifásico para o de eixos ortogonais estacionários dada pela Eq. (2)

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

A transformação das coordenadas do sistema abc para $\alpha\beta$ é feita através das Eqs. (3) e (4).

$$\begin{bmatrix} z_\alpha \\ z_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} z_a \\ z_b \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:

$z_{\alpha\beta}$ - componentes ortogonais de i , e e_i no sistema de referência síncrono.

$|v|$ - Módulo de v ($|v| = \sqrt{v_d^2 + v_q^2}$).

$[C_1]$ - matriz de transformação para o sistema de referência síncrono dada pela Eq. (5).

$$[C_1] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde:

$$\theta = \tan^{-1}(v_q/v_d) \quad (6)$$

Assim, de acordo a teoria vetorial, as potências ativa e reativa, que fluem entre o STATCOM e o sistema sob compensação, são dadas pelas eqs. (7) e (8), respectivamente:

$$p = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) = \frac{3}{2} |v| |i| \cos \phi \quad (7)$$

$$q = \frac{3}{2}(v_d i_q - v_q i_d) = \frac{3}{2} |v| |i| \sin \phi \quad (8)$$

onde:

ϕ - ângulo entre os vetores v e i .

A partir da Fig.4, verifica-se que:

$$i_\alpha = |i| \cos \phi \quad (9)$$

$$i_\beta = |i| \sin \phi \quad (10)$$

Com isso, substituindo (9) em (7) e (10) em (8), pode-se dizer que para se controlar o fluxo de potência ativa e reativa do STATCOM, deve-se controlar as correntes i_α e i_β , respectivamente, como mostram as eqs. (11) e (12).

$$p = \frac{3}{2} |v| i_\alpha \quad (11)$$

$$q = \frac{3}{2} |v| i_\beta \quad (12)$$

4.0 - SISTEMA DE CONTROLE DO STATCOM

O principal objetivo do sistema de controle do STATCOM implementado, consiste em controlar o módulo da tensão v do barramento CA, ao qual o equipamento está conectado, mantendo-se a tensão v_c no capacitor constante. Isto pode ser alcançado alterando-se os fluxos das potências ativa e reativa, entre o equipamento e o sistema CA, através das componentes i_α e i_β do vetor de corrente i , respectivamente. Isto pode ser confirmado, aplicando-se a análise feita na seção anterior, ou seja: "Se uma determinada corrente, denominada i , flui entre o sistema elétrico de potência CA e o STATCOM e, se a direção do vetor da tensão no ponto de conexão do equipamento for coincidente com a direção do eixo α , do sistema de referência síncrono, a componente i_β da referida corrente carrega a potência reativa instantânea e a componente i_α é a responsável pelo fluxo da potência ativa".

Assim, as equações (11) e (12) podem ser empregadas, e de acordo com as análises efetuadas na seção anterior, são feitas as seguintes afirmativas:

- $p > 0$ STATCOM absorve potência ativa
- $p < 0$ STATCOM fornece potência ativa
- $q > 0$ STATCOM fornece potência reativa
- $q < 0$ STATCOM absorve potência reativa

As correntes i_α e i_β , podem ser alteradas, operando-se apropriadamente o inversor, de modo que nos seus terminais trifásicos seja entregue uma tensão e_i , cujas componentes $e_{i\alpha}$ e $e_{i\beta}$ sejam apropriadas, para que i_α e i_β , se estabeleçam em valores adequados à compensação desejada.

Para tanto, a malha de controle utilizada neste trabalho (Fig. 5), definida e implementada pela referência [3], atua sobre o ângulo de fase e na magnitude do vetor de tensão nos terminais trifásicos do inversor, uma vez que uma tensão constante nos terminais do capacitor é requerida.

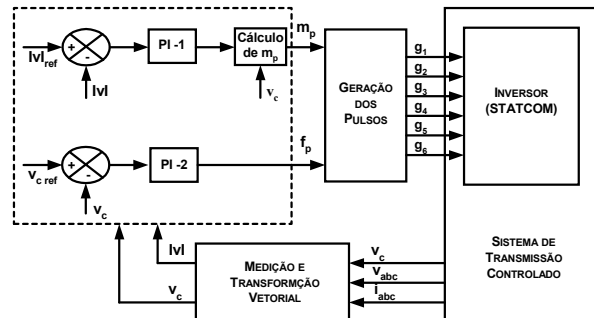


Figura 5 - Diagrama de blocos do controle do STATCOM

A figura anterior mostra que, uma vez medido o módulo $|v|$ da tensão do barramento controlado pelo STATCOM, este é comparada com um determinado valor de referência. O sinal de erro proveniente de tal comparação alimenta o controlador PI-1, o qual define o fator de modulação adequado para prover nos terminais trifásicos do inversor uma tensão e_i , cuja magnitude define o novo fluxo de reativo necessário para que o módulo da tensão no barramento CA seja equiparado com o valor de referência.

À medida que $|v|$ é corrigida, a tensão v_c nos terminais do capacitor é alterada, devido a uma tendência deste dispositivo de carregar ou descarregar durante tal processo. Assim, uma vez verificado algum sinal de erro entre esta última tensão e o seu valor de referência, o controlador PI-2 define um novo ângulo para a tensão e_i no lado trifásico do inversor. O defasamento entre as tensões e_i e v é responsável pelo fluxo de potência ativa necessária para a descarga ou recarga do capacitor, até que a tensão nos seus terminais atinja o valor de referência estipulado.

5.0 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Esta seção é voltada para os estudos de desempenho operacional do STATCOM no sentido de compensar condições diversas na rede de suprimento, tais como afundamentos e elevações momentâneos e equilibrados de tensão e, ainda, prover a regulação desta grandeza no barramento CA ao qual encontra-se conectado. Para tanto, são feitas simulações computacionais de um sistema elétrico (Fig. 6) que representa um complexo típico para o emprego do compensador em questão.

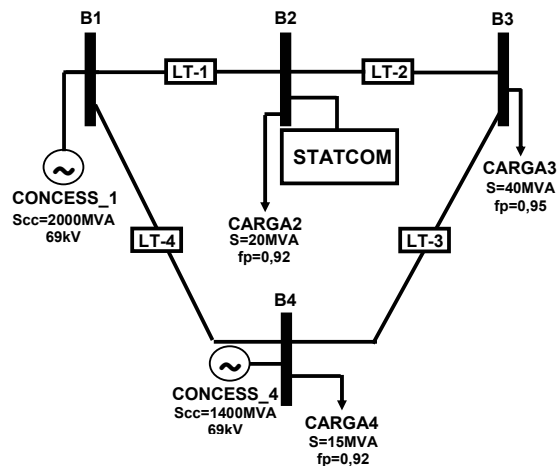


Figura 6 - Diagrama unifilar simplificado do sistema simulado

As chaves do inversor utilizado na representação do STATCOM são acionadas por um controle PWM senoidal a uma frequência de chaveamento de 1,8 kHz. A tensão no capacitor é de 15 kV, de acordo com o nível de regulação desejado da tensão no barramento do sistema elétrico. Para o sistema apresentado, foram estudados 5 casos, os quais encontram-se resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Síntese dos casos estudados

Caso	Descrição		
	1,8 – 2 s	2 – 3 s	3 – 4 s
1	Sistema em condições normais $V_{ref}=0,91pu$	Tensão CA de referência do STATCOM é alterada $V_{ref}=1,0 pu$	Tensão CA de referência do STATCOM retorna ao valor original $V_{ref}=0,91 pu$
2	Sistema em condições normais sem STATCOM	Sag de 10% na barra B2 sem STATCOM	Retira-se o Sag de 10% na barra B2 sem STATCOM
3	Sistema em condições normais com STATCOM	Sag de 10% na barra B2 com STATCOM	Retira-se o Sag de 10% na barra B2 com STATCOM
4	Sistema em condições normais sem STATCOM	Swell de 10% na barra B2 sem STATCOM	Retira-se o Swell de 10% na barra B2 sem STATCOM
5	Sistema em condições normais com STATCOM	Swell de 10% na barra B2 com STATCOM	Retira-se o Swell de 10% na barra B2 com STATCOM

6.0 - RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir são agrupados, também, em cinco conjuntos de acordo com os casos simulados.

6.1 Caso 1 – Regulação de tensão

Da Fig. 7 verifica-se que, a tensão eficaz na barra B2 encontra-se em níveis relativamente baixos (0,91pu) até que, a partir de 2s, acompanhando a referência do STATCOM, tal grandeza controlada passa a apresentar o valor de 1pu da tensão nominal do barramento. Uma redução nesse valor eficaz é observada a partir de 3s devido, mais uma vez, a alteração do patamar de referência do compensador.

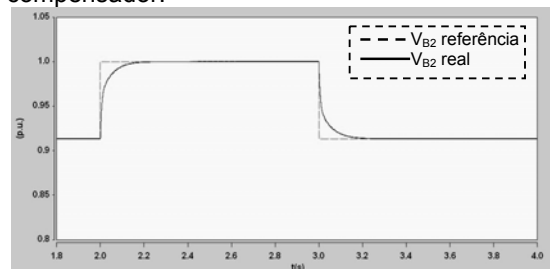


Figura 7 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69 kV$) – regulação de tensão

A Fig. 8 mostra a injeção de 24,5 Mvar por parte do STATCOM para que a presente regulação de tensão seja efetuada.

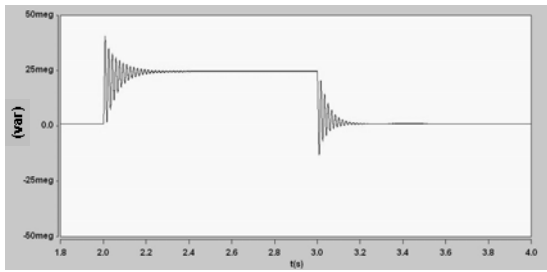


Figura 8 – Potência reativa entre o STATCOM e o sistema CA – regulação de tensão

A Fig. 9 evidencia que, apesar da ocorrência de algumas oscilações ($\pm 0,01$ pu) nos instantes em que a referência de tensão CA é alterada, o controle utilizado é eficaz na manutenção da tensão nos terminais do capacitor do STATCOM em 1,0 pu

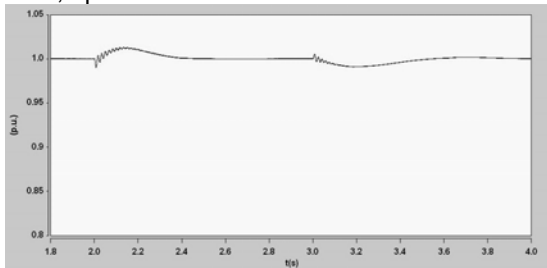


Figura 9 – Tensão nos terminais do capacitor do STATCOM ($V_{base}=15$ kV) – regulação de tensão

6.2 Caso 2 – Sag de 10% sem STATCOM

Da Fig. 10 observa-se que, como não há um controle da tensão barra B2, tal valor, que já se encontrava em 0,91pu, cai para 0,82 pu durante a aplicação do afundamento. Esta tensão retorna o seu valor original, apenas, quando o referido distúrbio é eliminado em $t = 3$ s.

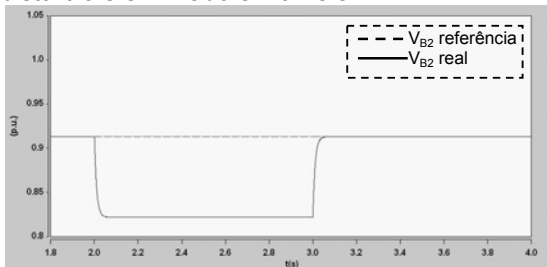


Figura 10 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69$ kV) – Sag 10% sem STATCOM

6.3 Caso 3 – Sag de 10% com STATCOM

A Fig. 11 exibe a nítida eficácia do STATCOM em manter a tensão na barra B2 em um valor constante (0,91pu), mesmo durante a imposição de um sag sobre a mesma. Apenas de uma forma transitória, tal grandeza experimenta um valor de 0,9p.u. em $t = 2$ s, que pode ser considerado irrisório se comparado com seu valor original e com a magnitude do afundamento de tensão. Quando o distúrbio é eliminado em $t = 3$ s, é possível observar uma pequena elevação (0,93

pu) na tensão monitorada, o que não representa maiores inconvenientes.

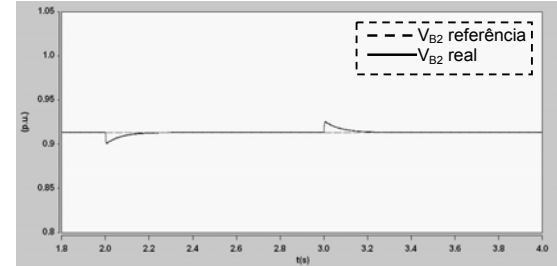


Figura 11 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69$ kV) – Sag 10% com STATCOM

Para que o controle da tensão na barra B2 seja bem sucedido, é necessária uma injeção de 24 Mvar, por parte do STATCOM, durante os instantes de duração da perturbação (Fig. 12).

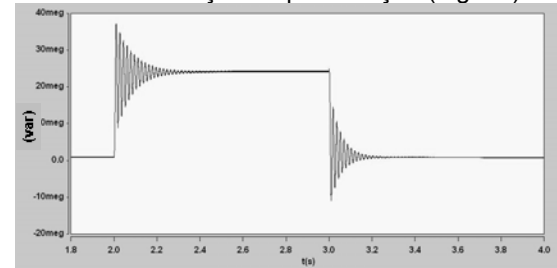


Figura 12 – Potência reativa entre o STATCOM e o sistema CA – Sag 10% com STATCOM

A Fig. 13 mostra a tensão V_c nos terminais do capacitor do STATCOM a qual, também neste caso, foi mantida praticamente constante, a despeito da ocorrência de picos transitórios irrelevantes ($\pm 0,008$ pu) nos instantes de aplicação e eliminação do distúrbio em questão.

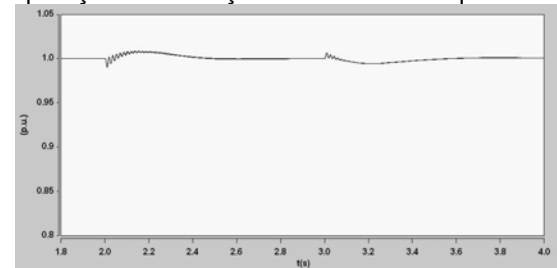


Figura 13 – Tensão nos terminais do capacitor do STATCOM ($V_{base}=15$ kV) – Sag 10% com STATCOM

6.4 Caso 4 – Swell de 10% sem STATCOM

Uma vez que não existe qualquer controle sobre a tensão da barra B2, da Fig. 14 verifica-se que, durante a ocorrência do evento, a grandeza em questão acompanha tal distúrbio na mesma proporção (10%). Vale ressaltar que, para o presente sistema em que a tensão no barramento encontra-se baixa, a magnitude da perturbação imposta não implica em maiores problemas, haja visto os níveis de tensão eficaz atingidos (69,4 kV). Todavia, em sistemas cujas tensões de operação estejam com valores apropriados ($\approx 1,0$

pu), as conseqüências deste tipo de sobre-tensão podem ser agravadas já que, como mencionado, tais níveis se elevam na mesma proporção.

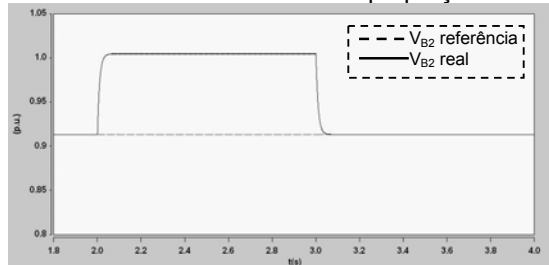


Figura 14 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69$ kV) – Swell 10% sem STATCOM

6.5 Caso 5 – Swell de 10% com STATCOM

Baseando-se na Fig. 15 pode se constatar, mais uma vez, a eficácia do STATCOM em manter a tensão na barra B2 em um patamar constante 0,91 pu, mesmo durante a imposição de um swell de 10% na tensão do sistema. De uma forma transitória tal grandeza experimenta um pico de 0,93pu em $t = 2$ s, que pode ser considerado pequeno se comparado com seu valor original (0,91pu) e com a magnitude do distúrbio.

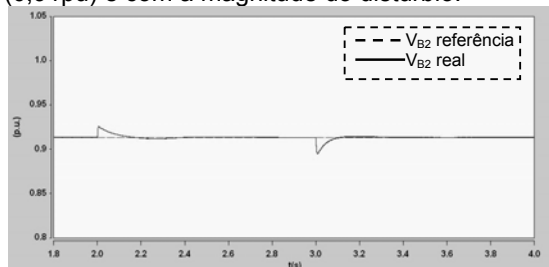


Figura 15 – Tensão eficaz na barra B2 ($V_{base}=69$ kV) – Swell 10% com STATCOM

O procedimento empregado pela malha de controle para reduzir a tensão do barramento diante da manobra efetuada consiste da absorção de reativos por parte do STATCOM, enquanto tal distúrbio perdure. Neste caso, a potência reativa absorvida em regime permanente equivaleu a 18,3 Mvar, o que pode ser visualizado na Fig. 16.

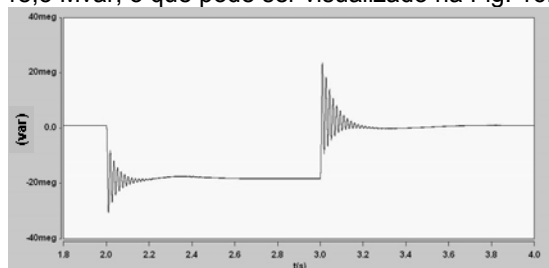


Figura 16 – Potência reativa entre o STATCOM e o sistema CA – Swell 10% com STATCOM

A Fig. 17 mostra a tensão V_c nos terminais do capacitor do STATCOM que, desta vez, experimentou oscilações transitórias maiores ($\pm 0,1$ pu) nos instantes de aplicação e eliminação

do distúrbio em questão. Não obstante estes fatos, tal grandeza foi conduzida ao seu valor de referência (1,0 pu) e nesse patamar foi mantida durante o regime permanente.

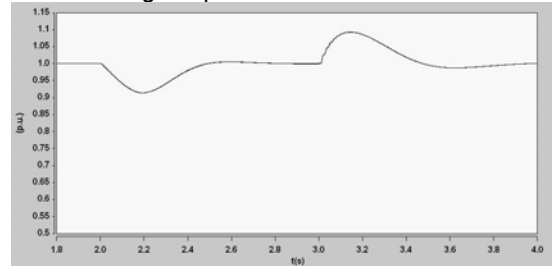


Figura 17 – Tensão nos terminais do capacitor do STATCOM ($V_{base}=15$ kV) – Swell 10% com STATCOM

7.0 - CONCLUSÕES

Este artigo abordou os fundamentos teóricos que regem o funcionamento do STATCOM, seguidos das equações utilizadas para a monitoração e controle de suas grandezas através da teoria vetorial. Com a implementação das unidade de potência e controle do STATCOM no simulador SABER, foram feitas simulações para avaliar o seu desempenho sob várias condições da rede de suprimento. Foi verificada a nítida eficácia deste equipamento no controle da tensão de um barramento CA, durante a ocorrência de distúrbios de qualidade da energia relacionado com o valor eficaz de tal grandeza. Tal controle de tensão se torna possível através da troca de potência reativa entre o STATCOM e o sistema CA.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Gyugyi, *Advanced Static VAR Compensator Using Gate Turn-Off Thyristors for Utility Applications*, CIGRE Paper No. 23-203, 1990.
- [2] N. G. Hingorani, *High Power Electronics and Flexible AC Transmission System*, IEEE Spectrum, April 1993, pp. 40-45, 1988.
- [3] W. G. Martins, *Modelagem e Análise de Desempenho de Compensadores Estáticos Avançados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2002.
- [4] W. Gonçalves, J. C. Oliveira, V. L. Franco, *Harmônicos Produzidos por Compensadores Estáticos de Última Geração sob Condições de Suprimento com Perda de Qualidade*, III SBQEE, Brasília, 1999.
- [5] C. Schauder, H. Mehta, *Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensator*, Conference Publication 345 - IEE, Londres, Set. 1991.