

SENDI 2004
XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

**Análise do Comportamento do D-STATCOM frente a Afundamentos de Tensão (Sags)
no Sistema Elétrico de Distribuição Utilizando o Simulador *SABER***

GOMES, F. C. P., GUIMARÃES G. C., PINTO A. C. e OLIVEIRA J. C.
Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - FEELT

Emails: fernando@soaresoliveira.br, gcaixeta@ufu.br, adeonpinto@bol.com.br, jcoliveira@ufu.br

Palavras-chave: afundamento de tensão, D-STATCOM, qualidade da energia, sistema de distribuição.

RESUMO

Este artigo tem como objetivo investigar o comportamento do D-STATCOM (*Distribution Advanced Static Compensator*) ou Compensador Estático Avançado de Distribuição, frente a uma das chamadas VTCD (Variações de Tensão de Curta Duração), o afundamento temporário de tensão (*Voltage Sag*), empregando o simulador “*SABER*” como plataforma computacional. Para facilitar a análise utiliza-se um sistema simplificado onde a indústria é suprida pela rede principal através da impedância de curto-circuito, com o D-STATCOM conectado no barramento de entrada. Os resultados apresentados visam confirmar a eficácia deste equipamento diante do distúrbio analisado.

**D-STATCOM Behavior Analysis Under Voltage Sags in an Electric Distribution System
Using *SABER* Simulator**

ABSTRACT

This paper aims to investigate the behavior of D-STATCOM (*Distribution Advanced Static Compensator*) under a Short Duration Voltage Variation called Voltage Sag employing the simulator “*SABER*” as the computational base. To facilitate the analysis, it is used a simplified system where the industry is fed by the main grid through a short-circuit impedance, with D-STATCOM connected to the industry input busbar. Some results are presented so as to confirm the efficacy of such equipment to face the disturbance analyzed.

1. INTRODUÇÃO

O D-STATCOM é um equipamento que surgiu a partir do advento do STATCOM (*Advanced Static var Compensator*), através do conceito FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). Este foi inicialmente proposto, em meados dos anos 80, pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*) junto com algumas concessionárias americanas, através de *N. G. Hingorani* (1988, *Proceedings of IEEE*, Vol. 76, No 4). Posteriormente, o mesmo autor propôs (1995, *IEEE Spectrum*) a utilização destes equipamentos em baixa e média tensão, surgindo assim o conceito *Custom Power*. Desta forma, o D-STATCOM é uma nova geração de equipamentos e componentes forjados para serem utilizados nos sistemas elétricos de distribuição. Entre outras palavras pode-se dizer que a diferença entre o STATCOM e o D-STATCOM está no nível de tensão nas quais estes equipamentos estarão conectados.

O primeiro foi inicialmente proposto para compensar o fluxo de potência nas linhas de transmissão (alta tensão), enquanto que o último foi sugerido para controlar o nível de tensão em barramentos de distribuição (baixa tensão ou média tensão), onde geralmente se encontram cargas elétricas sensíveis. O D-STATCOM é um equipamento cujo PAC (Ponto de Acoplamento Comum) é uma barra de distribuição, na qual se deseja controlar o nível de tensão frente a algumas VTCD's, sendo que dentre estas variações destacam-se os afundamentos de tensão (*Voltage Sag*). Estes distúrbios nos sistemas elétricos de distribuição são fenômenos cujas causas principais encontram-se comumente em alguns procedimentos elétricos, dos quais citam-se: energização de transformadores, curto-circuito nas redes e partida de motores de grande porte. São inúmeros os trabalhos que relatam danos associados a estes fenômenos indesejáveis de tensão (*Voltage Sag*) conforme McGRANAGHAN & GUNTHER (2001, *The Economics Custom Power*, CIRED Round Table on Cost Aspects of Power Quality) e ARRILLAGA (2000, *Power Quality*, Ed. Richard C. Dorf). Em relação aos sistemas elétricos de distribuição citam-se: a queda de sistemas computacionais, a incorreta operação de modelos de controle, a interrupção parcial ou total de processos produtivos industriais.

2. OPERAÇÃO DO D-STATCOM

O D-STATCOM possui a função principal de prover suporte de tensão no barramento onde ele está conectado (PAC). Este dispositivo é ligado a barra a ser controlada, através de um transformador de acoplamento, sendo capaz de injetar ou absorver potência reativa no sistema. Além disso, pode também trocar potência ativa durante pequenos intervalos de tempo e, portanto, realizar uma melhoria no nível de tensão.

Pode-se descrever o funcionamento do compensador D-STATCOM de uma forma simples.

Primeiramente, o circuito de controle realiza medição das tensões na barra a ser controlada. Estes valores são então convertidos em um único sinal que é comparado no circuito de controle com um valor pré-determinado como de referência (1pu). O circuito de controle, sempre que necessário, produz um sinal de ajuste que é enviado ao circuito inversor (VSI). Este, por sua vez possui capacitor no seu lado CC que pode funcionar como uma fonte de tensão CC controlável, servindo como sistema de armazenamento de energia. Este intercâmbio de potência com a rede elétrica é justamente a grande vantagem do D-STATCOM. A fonte de tensão controlada em amplitude e fase é implementada através de inversor produzindo a corrente a ser injetada na barra de distribuição para se realizar a compensação necessária, de acordo com a comparação pré-estabelecida pelo controle. A conexão entre o equipamento e o sistema CA é realizada através do transformador de acoplamento, que serve para compatibilizar os níveis de impedância do compensador e do sistema CA. Geralmente este transformador pode também ser utilizado para amenizar o conteúdo dos harmônicos de tensão do inversor.

Na sua configuração mais simples e básica, o D-STATCOM consiste em um circuito inversor (VSI) associado a um circuito de controle, um capacitor CC e um transformador de acoplamento conectado em paralelo com o sistema CA (Figura 1).

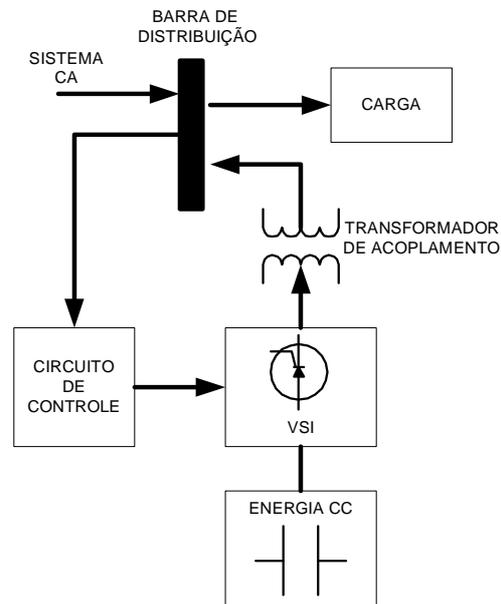


Figura 1 – Configuração básica do D-STATCOM

3. ANÁLISE VETORIAL DO SISTEMA DE CONTROLE

Há muito tempo o controle vetorial tem sido usado, principalmente, em máquinas elétricas e, atualmente, vem sendo largamente aplicado à análise e controle de sistemas de potência. Neste sentido, o uso de vetores é muito útil para representação matemática de correntes e tensões dos compensadores avançados, pois simplifica a análise e o controle dos mesmos quando conectados a uma rede trifásica conforme PINTO (2002, *Análise da Influência do STATCOM no Comportamento Dinâmico de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o Simulador “SABER”*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia).

3.1. REPRESENTAÇÃO VETORIAL DE GRANDEZAS TRIFÁSICAS

Na figura 2 a seguir, a linha a partir da origem dos eixos até o referido ponto tem magnitude e direção que podem ser unicamente definidas para aquele instante particular. Tal linha pode, então, ser considerada como sendo um vetor. Esse vetor possui uma projeção sobre cada um dos três eixos das fases dispostos simetricamente, que corresponde aos valores instantâneos da variável da fase associada (neste caso, corrente). À medida que os valores das grandezas de fase mudam, o vetor associado descreve uma trajetória, ou seja, um lugar no plano. Portanto, essa trajetória contém as informações a respeito do conjunto das variáveis trifásicas, incluindo distorções harmônicas e componentes transitórias.

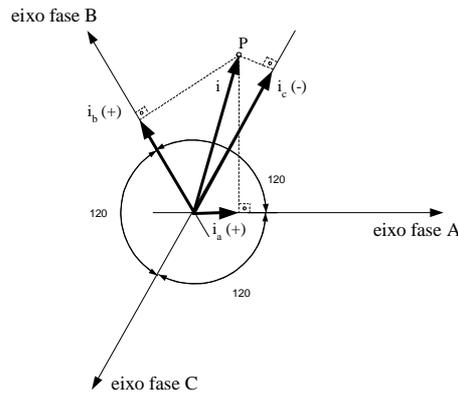


Figura 2 – Representação vetorial de uma variável trifásica

De outra forma, a representação de um determinado vetor pode ser feita através das coordenadas de um sistema ortogonal, seja ele estacionário (secção 3.2) ou síncrono (secção 3.3).

3.2.REPRESENTAÇÃO VETORIAL NO SISTEMA ORTOGONAL ESTACIONÁRIO (d-q)

No sistema ortogonal estacionário, um vetor é descrito pelas suas componentes d e q, como é o caso dos vetores de tensão e correntes mostrados na figura 3.

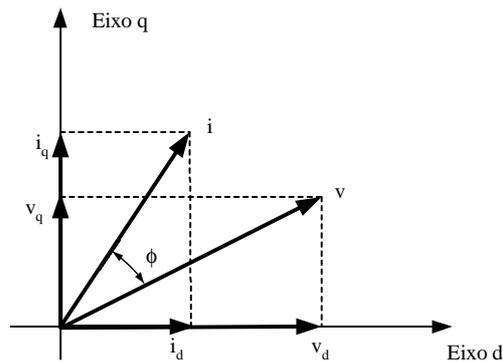


Figura 3 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal estacionário

Com isso, a transformação das variáveis de fase (tensão e corrente) para as coordenadas d e q é feita através das relações (1).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

sendo

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

onde:

- $v_{d,q}$ – componentes da tensão nos eixos estacionários d e q
- $i_{d,q}$ – componentes da corrente nos eixos estacionários d e q
- $v_{a, b, c}$ – componentes da tensão nas fases a, b e c
- $i_{a, b, c}$ – componentes da corrente nas fases a, b e c
- C – matriz de conversão

Supondo que a figura 3 represente os vetores de tensão e corrente, associados a um ponto na linha de transmissão, a potência ativa instantânea nesse ponto é dada pela equação (2):

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2)$$

Utilizando a equação (1), a mesma potência ativa instantânea dada por (2) pode ser escrita em termos das grandezas d e q, como mostra a equação (3):

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

onde:

- p – potência ativa instantânea
- v – vetor de tensão
- i – vetor de corrente
- ϕ – ângulo entre os vetores de tensão e corrente

Da equação (3) torna-se claro que, apenas a componente do vetor de corrente que está em fase com o vetor de tensão, é que contribui para o valor da potência ativa instantânea. Por outro lado, a componente do vetor de corrente que está em quadratura com o vetor de tensão pode ser removido sem que a potência varie e, por isso, é responsável pela transmissão da potência reativa instantânea conforme SCHAUDER & MEHTA (1991, *Vector Analysis and Control of Advanced Static var Compensators*. Conference Publication nº 345 of the IEE 5th International on AC and DC Power Transmission), que é dada pela equação (4) abaixo:

$$q = \frac{3}{2} (v_d i_q - v_q i_d) = \frac{3}{2} |v| |i| \sin(\phi) \quad (4)$$

3.3. REPRESENTAÇÃO VETORIAL NO SISTEMA ORTOGONAL SÍNCRONO (α - β)

Em um sistema elétrico de potência, contendo vários conjuntos de tensões e correntes trifásicas, é conveniente definir o conjunto (a, b e c) de tensões em uma barra como sendo a referência o que, conseqüentemente, determina o vetor de tensão de referência para o sistema. Tendo isso em mente, procura-se estabelecer um novo sistema de coordenadas ortogonais, com um eixo d deslocado, chamado de α , coincidindo com a direção do referido vetor de tensão de referência do sistema, e um eixo q (agora referido como β) em quadratura como o mesmo. A coincidência do vetor da tensão de referência com o eixo α ($|v| = v_\alpha$) implica na sua componente em quadratura ser nula ($v_\beta = 0$), conforme figura 4.

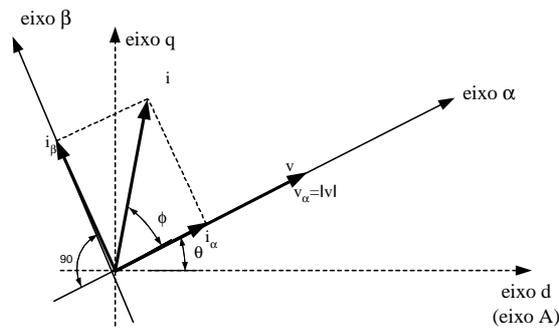


Figura 4 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal síncrono

Da figura anterior, verifica-se que a componente i_{α} responde pela potência ativa instantânea e a componente i_{β} pela potência reativa instantânea.

Os eixos α e β não são estacionários, ou seja, seguem a trajetória do vetor da tensão de referência. Assim, as componentes α e β , dentro desse sistema de referência rotativo na velocidade síncrona, são obtidas pelas seguintes transformações (5):

$$\begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ 0 \end{bmatrix} = [C_1] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

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

$$[C_1]^{-1} = \frac{3}{2} [C_1]_t \quad e \quad \theta = \arctg\left(\frac{v_q}{v_d}\right)$$

onde:

- $i_{\alpha, \beta}$ – componentes da corrente nos eixos rotativos α e β
- $|v|$ – módulo do vetor da tensão de referência ($v = v_d + jv_q$)
- C_1 – matriz de conversão

Em que as componentes v_d e v_q são obtidas pela equação (1).

Fazendo as devidas substituições, as equações (3) e (4) se transformam nas relações (6), a seguir:

$$p = \frac{3}{2} |v| i_{\alpha} \quad e \quad q = \frac{3}{2} |v| i_{\beta} \quad (6)$$

Das equações acima, observa-se que, no sistema de referência síncrono, apenas a componente de corrente i_{β} transporta a potência reativa instantânea, já a componente i_{α} é responsável pela transmissão da potência ativa instantânea conforme MARTINS (2000, *Modelagem e Análise de Desempenho de Compensadores Estáticos Avançados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia).

Sob condições balanceadas de regime permanente, as coordenadas dos vetores de tensão e corrente no sistema de referência síncrono são grandezas constantes. Isto faz com que a análise vetorial seja uma

ferramenta muito útil para o controle de sistemas trifásicos conforme MAKOMBE (1997, *An Investigation of a Unified Power Flow Controller*. PhD's Thesis, UMIST)

3.4. COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA (MODO CAPACITIVO)

Como a principal função do D-STATCOM é regular a tensão no PAC através da compensação de reativos (fornecendo ou absorvendo potência reativa), esta potência é controlada através da correlação entre a magnitude da tensão de saída do inversor (v_{dst}) e a da tensão do sistema CA (v_t). A tensão alternada de saída v_{dst} é produzida pelo inversor através do chaveamento dos tiristores, os quais são alimentados pela tensão CC do capacitor.

Caso a tensão de saída do inversor (v_{dst}) seja maior que a tensão do sistema CA (v_t), porém em fase, o D-STATCOM fornece reativos ao sistema CA - modo capacitivo, como pode ser verificado no diagrama fasorial da figura 5.

Na figura 6 a componente ativa da corrente i_p , denominada $i_{p\alpha}$, não aparece porque é nula. Assim, a partir da equação (6), reescrita na equação (7), pode-se dizer que a potência ativa que circula entre o D-STATCOM e o sistema CA, também é nula.

$$p = \frac{3}{2} |v_t| i_{p\alpha} \quad (7)$$

onde:

p – fluxo de potência ativa entre o D-STATCOM e o sistema CA
 $|v_t|$ – módulo do vetor da tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do D-STATCOM tomado como referência do sistema ortogonal síncrono.

O fluxo de potência reativa q entre o sistema CA e o D-STATCOM é obtido através da equação (6), reescrita em (8).

$$q = \frac{3}{2} |v_t| i_{p\beta} \quad (8)$$

A equação anterior mostra que, se $i_{p\beta}$ é positiva, pois está adiantada de v_t em 90° , o D-STATCOM fornece potência reativa, pois q também é positiva.

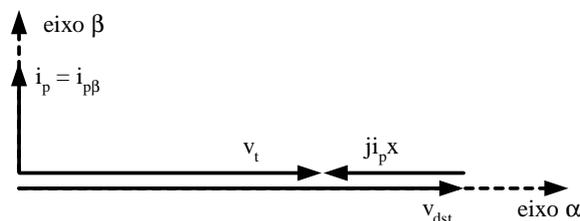


Figura 5– Diagrama fasorial do D-STATCOM fornecendo potência reativa

3.5. COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA

Uma vez que o compensador não possui capacidade própria de geração de potência ativa, o D-STATCOM possui um equipamento de armazenamento de energia (capacitor, bateria, etc.) em seu lado CC, através do qual ele consegue realizar trocas de potência ativa com sistema CA, sendo esta uma das grandes virtudes deste equipamento em relação aos compensadores convencionais. Esta troca

de potência ativa entre o inversor e o sistema CA pode ser controlada pela defasagem entre a tensão de saída do D-STATCOM (v_{dst}) e da tensão CA (v_t) que o inversor é capaz de produzir, graças ao nível CC garantido pelo capacitor.

Quando a tensão nos terminais trifásicos do inversor, v_{dst} , se encontra atrasada de v_t (em ângulos inferiores a 90°) e com a mesma magnitude da tensão do sistema CA no ponto de acoplamento, v_t , tem-se absorção de potência ativa. Pelo diagrama fasorial da figura 6, nota-se que a tensão v_{dst} está atrasada da tensão v_t de um ângulo relativamente pequeno. Nestas condições, a queda de tensão na reatância de dispersão, que é provocada pela corrente i_p , está praticamente em quadratura com a tensão v_t do sistema CA. Sabe-se que a corrente em uma reatância indutiva está atrasada 90° da queda de tensão nesta. Desta forma, nota-se que esta corrente (i_p) está praticamente em fase com a tensão v_t do sistema CA, caracterizando assim, a absorção de potência ativa.

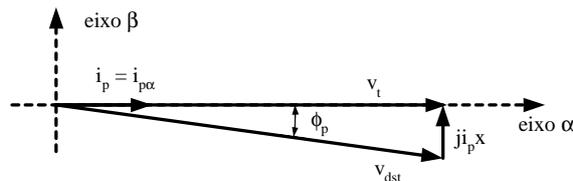


Figura 6 – Diagrama fasorial do D-STATCOM absorvendo potência ativa

Na figura:

ϕ_p – ângulo entre a tensão do sistema (v_t) no ponto de acoplamento comum do D-STATCOM e a tensão nos terminais trifásicos do inversor (v_{dst}).

De forma análoga, quando a tensão nos terminais trifásicos do inversor v_{dst} se encontra adiantada e com a mesma magnitude da tensão do sistema CA (v_t) no ponto de acoplamento, tem-se fornecimento de potência ativa. Pelo diagrama fasorial da figura 7, nota-se que a tensão v_{dst} está adiantada da tensão v_t . Desta forma, observa-se que esta corrente (i_p) que circula no inversor está em oposição à tensão v_t do sistema CA, caracterizando assim, a fornecimento de potência ativa.

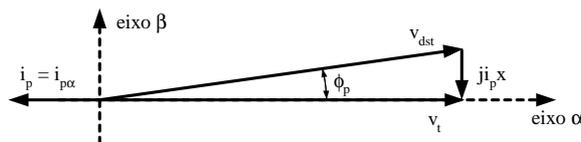


Figura 7 – Diagrama fasorial do D-STATCOM fornecendo potência ativa

4. SISTEMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

O sistema elétrico utilizado na simulação, mostrado na figura 8, é constituído por uma fonte de tensão trifásica representando a concessionária no nível de distribuição de 26,4 kV, frequência 60 Hz e potência de curto circuito 200 MVA; um transformador delta-estrela com neutro aterrado o qual possui impedância percentual de 5%, potência nominal de 25 MVA, tensões nominais de 26,4 kV/4,16 kV; para a representação do sistema industrial tem-se: uma carga estática trifásica com potencia aparente de 15 MVA, fator de potência atrasado de 0,9, uma segunda carga industrial resistiva trifásica de 4Ω ; associado à planta industrial, através do barramento de distribuição (Ponto de Acoplamento Comum), finalmente encontra-se o compensador estático avançado enfocado neste trabalho. O efeito de afundamento temporário de tensão (*Voltage Sag*) consegue-se através da conexão de uma carga com carácter indutivo com potencia reativa de 30 Mvar no PAC.

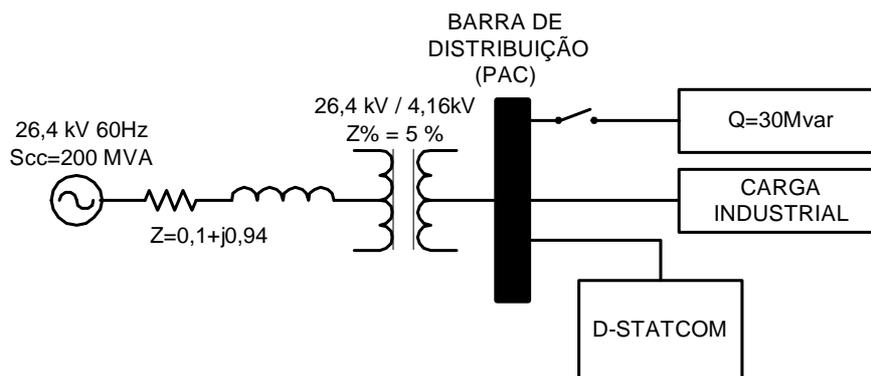


Figura 8 – Sistema elétrico simulado

Todos os estudos computacionais são realizados através do simulador “SABER”.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como mencionado, para simular o afundamento de tensão (*Voltage Sag*) na barra de distribuição (PAC), é inserida uma carga de caráter indutivo com potência de $Q=30\text{Mvar}$, no instante $t=1,5\text{s}$, como pode ser observado na figura 9 abaixo, para a tensão fase “a” do barramento.

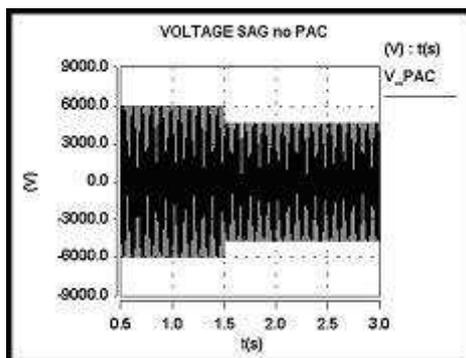


Figura 9 – Representação do efeito *Voltage Sag* no PAC

Para facilitar a visualização do afundamento de tensão é construída a figura 10. Nesta observa-se que o *Voltage Sag* produzido é da ordem de 20%, onde a tensão de 1pu é levada a 0,8pu, caracterizando assim o distúrbio de tensão conforme ANEEL (2001, Resolução N^o 505).

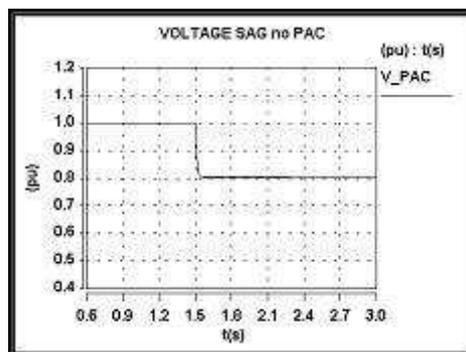


Figura 10 – Tensão no PAC (pu)

Agora, o mesmo distúrbio é provocado, mas na presença do compensador (D-STATCOM). Neste caso o nível de tensão é rapidamente restabelecido, próximo de valores considerados satisfatórios conforme ANEEL (2001, Resolução N^o 505), de acordo com a figura 11 abaixo.

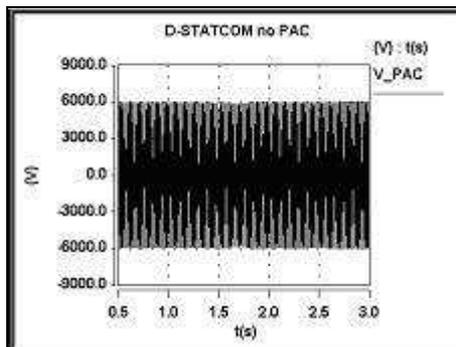


Figura 11 – Atuação do D-STATCOM no PAC

A figura 12 foi inserida para permitir uma melhor visualização da atuação rápida e eficaz do compensador estático no PAC, mostrando a tensão na barra de acoplamento em pu.

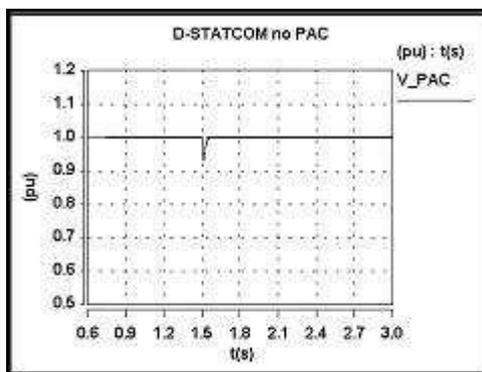


Figura 12 – Tensão no PAC em pu

A rapidez do equipamento pode ser observada melhor através das figuras abaixo. Na figura 13 destaca-se que o tempo de resposta do compensador estático, com o restabelecimento da tensão em 1 pu (referência) ficou dentro de um intervalo de tempo de aproximadamente 25 ms, ou seja, 1,5 ciclo, sendo que a tensão não chega a ficar abaixo de 0,9 pu, valor mínimo de afundamento característico do efeito *Voltage Sag* de acordo com ARRILLAGA (2000, *Power Quality*, Ed. Richard C. Dorf), já a figura 14 mostra a tensão senoidal da fase “a” do barramento sendo restabelecida.

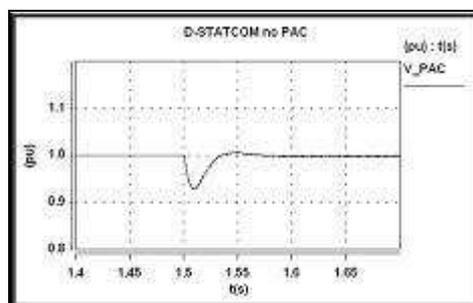


Figura 13 – Zoom na tensão no PAC em pu

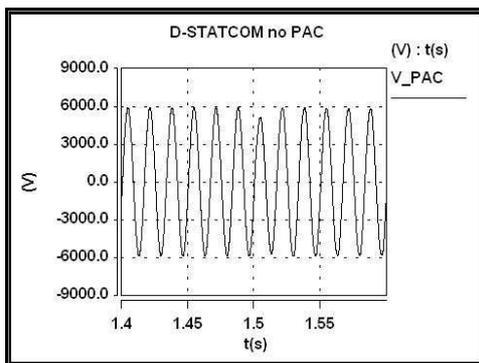


Figura 14 – Zoom na tensão senoidal fase “a” no PAC

Como citado anteriormente, para que o D-STATCOM realize a operação de compensador de reativos no surgimento do efeito *Voltage Sag*, o controlador faz com que a tensão de saída do inversor seja maior que a tensão do sistema CA, ainda em fase, o D-STATCOM fornece reativos ao sistema CA, esta característica é chamada de modo capacitivo. A corrente que circula pelo D-STATCOM está 90° adiantada com relação à queda de tensão sobre a reatância indutiva de acoplamento, caracterizando a operação do D-STATCOM fornecendo potência reativa, conforme mostra a figura 15 abaixo. A corrente na fase “a” injetada pelo compensador esta adiantada em relação à tensão da fase “a” do compensador.

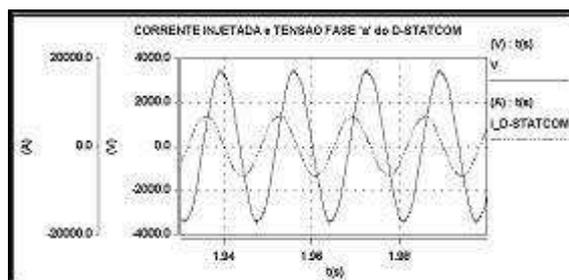


Figura 15 – Corrente de compensação no PAC

A figura 16 abaixo mostra a potência reativa instantânea injetada no PAC pelo D-STATCOM, quando ocorre a solicitação desta potência para realização da compensação. Observa-se uma potência reativa de aproximadamente 30Mvar sendo fornecida a planta industrial.

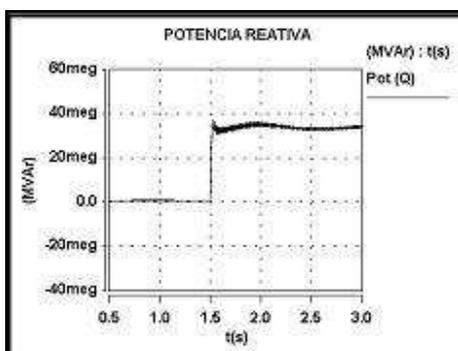


Figura 16 – Potência reativa injetada pelo D-STATCOM no PAC

6. CONCLUSÃO

Foi demonstrado, através das simulações computacionais, que o equipamento D-STATCOM, por intermédio da compensação de potência reativa, no chamado modo capacitivo, fornecendo a potência reativa necessária ao sistema, é rápido na manutenção dos níveis de tensão no ponto de acoplamento, e eficaz, já que o intuito é diminuir o impacto do distúrbio *Voltage Sag* nas redes elétricas de distribuição.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- 1 HINGORANI, N. G. *Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems*. Proceedings of IEEE, Vol. 76, No 4, April 1988.
- 2 HINGORANI, N.G. *Introducing Custom Power*. IEEE Spectrum, June 1995
- 3 McGRANAGHAN, M. & GUNTHER, E. *The Economics Custom Power*. CIRED 2001 Round Table on Cost Aspects of Power Quality, Tuesday 19 June 2001.
- 4 ARRILLAGA, J. *Power Quality*. The Electrical Engineering Handbook, Ed. Richard C. Dorf, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.
- 5 PINTO, A. C. *Análise da Influência do STATCOM no Comportamento Dinâmico de Sistemas Elétricos de Potência Utilizando o Simulador "SABER"*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Dezembro, 2002.
- 6 SCHAUDER, C. & MEHTA, H. *Vector Analysis and Control of Advanced Static Var Compensators*. Conference Publication nº 345 of the IEE 5th International on AC and DC Power Transmission, London, September, 1991, pp. 266 – 272.
- 7 MARTINS, W. K. A. G. *Modelagem e Análise de Desempenho de Compensadores Estáticos Avançados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Julho, 2002.
- 8 MAKOMBE, T. *An Investigation of a Unified Power Flow Controller*. PhD's Thesis, UMIST, 1997.
- 9 ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução N^o 505, de 26 de novembro de 2001.