



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 12 149

Tópico: Aplicações de Novas Tecnologias

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DINÂMICA DO TCSC UTILIZANDO O PROGRAMA DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS MICROTRAN PARA ESTUDOS DE QUALIDADE DE ENERGIA

Nelson C. de Jesus*
Armando Ortiz Torres
João A. M. Neto
UNIUI

Hermes R.P.M. de Oliveira
Carlos E.C. Figueiredo
AES Sul

Fausto B. Líbano
Rodrigo A. M. Braga
PUC/RS

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados de simulações dinâmicas da compensação série avançada, incluindo o modelo do capacitor série controlado a tiristores (TCSC). A modelagem foi realizada no programa de transitórios eletromagnéticos Microtran, utilizando a subrotina de controle Alpha. O modelo inclui tanto o sistema de potência quanto o de controle, o qual foi inserido em um sistema típico de distribuição para análise dos possíveis benefícios quanto à melhoria da qualidade do fornecimento da energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE

Capacitor Série Controlado a Tiristor. Oscilações subsíncronas. Qualidade de Energia. Microtran.

1.0 - INTRODUÇÃO

A compensação série é o método que apresenta as maiores vantagens técnico-econômicas quando utilizada no controle do fluxo de potência e aumento da potência transmitida. Deste modo, é amplamente utilizada em sistemas de transmissão visando a melhoria e estabilidade do sistema tanto em regime permanente como transitório. A aplicação em sistemas de distribuição ficou mais restrita devido à maior possibilidade da ocorrência de fenômenos oscilatórios em função da necessidade de um grau maior de compensação. Os problemas relacionados na literatura técnica à compensação série são ressonância subsíncrona e auto-exitação, ferromagnetismos e a variação periódica da velocidade síncrona do rotor (*hunting*) de motores durante a operação em regime permanente. Atualmente, a utilização da compensação série em sistemas de subtransmissão e distribuição é uma

filosofia que se apresenta como alternativa para a melhoria da qualidade da energia elétrica, principalmente devido à evolução dos sistemas de proteção. O desenvolvimento de sistemas flexíveis para interligações e aumento da margem de estabilidade tornou-se tecnicamente possível em função da evolução dos dispositivos a base de eletrônica de potência aplicados em sistemas de alta tensão. Neste sentido, vários tipos de sistemas e dispositivos FACTS - *Flexible AC Transmission System* se encontram em operação [1]. Por diversos motivos, atualmente esta tecnologia só é viabilizada para grandes sistemas, mas como tendência histórica, equipamentos destinados à melhoria do desempenho de sistemas elétricos tendem a ser também aplicados em sistemas com classes de tensão inferiores. Um exemplo disso se refere a emergente aplicação de compensadores avançados na distribuição, como o STATCOM. Em função dos resultados obtidos durante o comissionamento do projeto de compensação série convencional no alimentador 110 de Uruguaiana/RS [2], que durante a energização do primeiro banco de capacitores série apresentou oscilações e flutuações significativas de tensão e conseqüente inviabilidade técnica desta aplicação, analisa-se os possíveis benefícios utilizando a compensação série avançada. Deste modo, este trabalho apresenta os resultados de simulações através da modelagem do TCSC no programa Microtran, para análise de estudos de qualidade de energia e, mais especificamente neste caso, avaliar inicialmente seu potencial no amortecimento de oscilações subsíncronas, em função da necessidade de níveis elevados de compensação. No geral, avaliou-se três casos, ou seja, regulação de tensão, redução da severidade de afundamentos e partida de motores de indução. Em todos os casos analisados, os resultados foram satisfatórios com boa resposta.

* Rua São Francisco, 501 - CEP 98700-000 - IJUÍ - RS - BRASIL

Tel.: +55 (0XX) 55-3332-0200 - FAX: +55 (0XX) 3332-9100 - E-mail: nelson@detec.unijui.tche.br

2.0 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CAPACITOR SÉRIE CONTROLADO A TIRISTORES (TCSC)

Uma nova tecnologia que se apresenta com características atraentes também para aplicação em sistemas de subtransmissão e distribuição é a utilização dos equipamentos e dispositivos a base de eletrônica de potência, como os equipamentos aplicados em sistemas de potência, assim denominados FACTS - *Flexible AC Transmission System*. Dentre os diversos sistemas propostos, tem-se o TCSC - *Thyristor Controlled Series Capacitor*. Em sistemas de transmissão este equipamento é destinado ao controle do fluxo de potência, melhoria da estabilidade dinâmica e transitória, amortecimento de ressonâncias subsíncronas, limitação das correntes de falta, fornecendo um controle rápido e contínuo dos níveis de compensação [1]. O Capacitor Série Controlado a Tiristores (TCSC) é um dispositivo não-linear composto por um banco de capacitores série em paralelo com um reator controlado por tiristores (RCT). Na verdade, o circuito paralelo LC é ressonante para um determinado ângulo de disparo do RCT, o que permite ao TCSC uma amplificação de sua reatância tanto na faixa capacitiva quanto na faixa indutiva, resultando em controle contínuo e instantâneo da impedância efetiva vista pelo sistema [1], [3], [4], [5]. Por este motivo, o TCSC é classificado como um equipamento de impedância variável. A figura 1 mostra o diagrama simplificado de um TCSC.

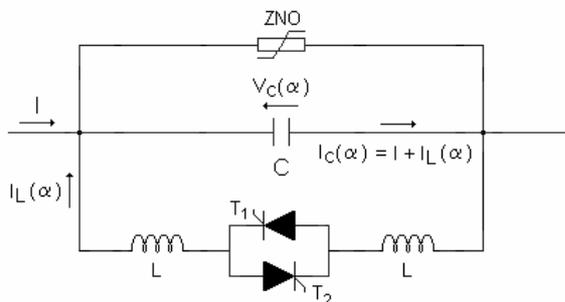


Figura 1 - Capacitor série controlado por tiristor (TCSC)

A impedância resultante na frequência fundamental do circuito paralelo LC, que consiste de uma reatância capacitiva fixa X_C e uma reatância indutiva variável $X_L(\alpha)$, pode ser determinada como mostrado na equação (1).

$$X_{TCSC}(\alpha) = -j \frac{X_C \cdot X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (1)$$

A reatância indutiva é variável em função do ângulo de disparo, conforme a equação (2).

$$X_L(\alpha) = X_L \left(\frac{\pi}{\pi - 2(\alpha - 90) - \sin(\alpha - 90)} \right) \quad (2)$$

Onde: $[X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty]$

Observa-se que $X_L(\alpha)$ varia em função do ângulo de disparo desde um valor máximo (teoricamente infinito) até um valor mínimo X_L . A figura 2 mostra o comportamento da reatância efetiva do TCSC (X_{TCSC}) em função da variação do ângulo de disparo. A reatância virtual equivalente pode resultar em valores indutivos ou capacitivos. Salienta-se que quando $X_L(\alpha)$ tende a X_C , a reatância virtual fica na faixa de ressonância, a qual deve ser inibida na operação real em função do valor teoricamente infinito.

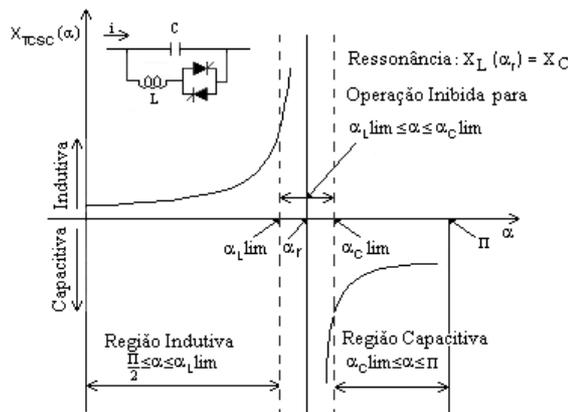


Figura 2 - Reatância do TCSC em função do ângulo de disparo (α)

Na prática, existe a possibilidade de operação em três modos de controle do TCSC, ou seja, modo de tiristor bloqueado (TBM - *Thyristor Blocked Mode*), reator plenamente inserido (TSR - *Thyristor Switched Reactor*) e tiristor operando no modo de controle de fase/controle do ângulo de disparo (TPC - *Thyristor Phase Controlled*) [6].

Na operação do modo TBM não são emitidos pulsos de disparo aos tiristores e o TCSC se comporta como um simples banco de capacitores série. A corrente de linha circula através do capacitor série e nenhuma corrente circula no RCT.

No modo TSR, os tiristores são continuamente disparados ($\alpha = 90^\circ$), de tal forma que a maioria da corrente de linha flui através do RCT e o TCSC apresenta uma reatância virtual indutiva, uma vez que tipicamente a reatância do indutor (X_L) é menor que a do banco de capacitores série (X_C). Já no modo TPC, os dispositivos semicondutores operam com controle de fase e ajuste do ângulo de disparo, desta forma, a condução parcial nos tiristores é estabelecida. Através do controle do ângulo de disparo é possível alterar efetivamente a corrente fundamental que flui nos tiristores e, dependendo da magnitude desta corrente, o TCSC pode apresentar uma reatância líquida capacitiva ou indutiva, como verificado na figura 2. A operação normal do equipamento é realizada de tal forma que normalmente o controle atua na faixa capacitiva, entretanto, conforme literatura técnica, para frequências inferiores à fundamental, o TCSC apresenta uma característica indutiva, o que intrinsecamente faz com que este sistema apresente certa imunidade a ressonâncias subsíncronas.

Basicamente, o TCSC pode estabilizar um caso de oscilação subsíncrona utilizando as seguintes estratégias de controle [7]:

↗ Mudança da reatância do TCSC de forma a dessintonizar a ressonância, desde que normalmente os sistemas de potência apresentam altos fatores de qualidade para frequências subsíncronas. Assim, uma pequena variação na impedância da linha pode surtir o efeito de dessintonização.

↗ Modulação ativa de sua reatância de forma a combater as oscilações subsíncronas, mantendo esta modulação com a fase controlada para se obter o máximo efeito de supressão das correntes subsíncronas;

↗ Levando o TCSC a operar num ponto capacitivo a 60 Hz, mas que tem um comportamento resistivo-indutivo em determinadas faixas de frequências subsíncronas.

2.1 Características Típicas

Inicialmente, avaliou-se o comportamento do modelo do TCSC implementado no programa de transientes eletromagnéticos Microtran junto a subrotina Alpha [8], utilizando-se ângulos de disparos fixos. As figuras 3 e 4 apresentam os resultados das simulações iniciais com as formas de ondas típicas das correntes e tensões do TCSC operando na região capacitiva, enquanto que as figuras 5 e 6 mostram os resultados da operação na faixa indutiva.

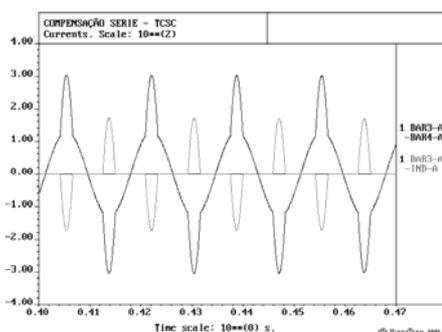


Figura 3 - Correntes típicas do TCSC operando na região capacitiva $\alpha=153^\circ$

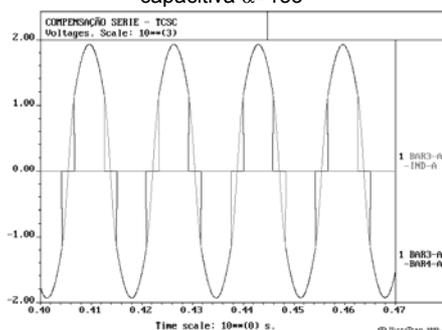


Figura 4 - Tensões típicas do TCSC operando na região capacitiva $\alpha=153^\circ$

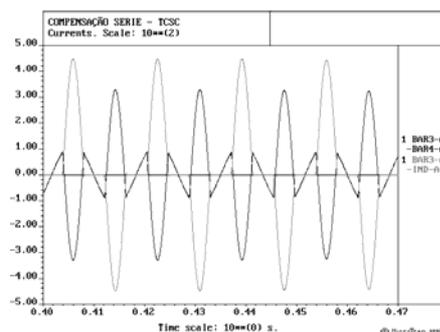


Figura 5 - Correntes típicas do TCSC operando na região Indutiva $\alpha=125^\circ$

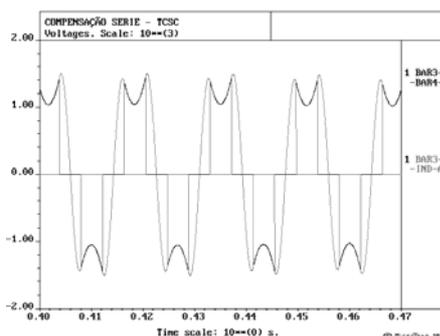


Figura 6 - Tensões típicas do TCSC operando na região Indutiva $\alpha=125^\circ$

3.0 - RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Com o objetivo de verificar as respostas do modelo do TCSC, apresentam-se os resultados de simulações dinâmicas frente a diferentes condições de operação do sistema. Neste sentido, três casos distintos foram analisados, ou seja, regulação de tensão, limitação da corrente de falta e operação durante a partida de motores de indução, sendo que neste caso específico, a operação com capacitor série convencional resultou em oscilações de tensão decorrentes do fenômeno da auto-excitação (efeito gerador) [2]. Para análise dos casos, o modelo do TCSC foi incluso no sistema de distribuição em 23 kV, equivalente a um dos alimentadores típicos dos sistemas da fronteira (Uruguaiana/RS), cuja demanda máxima é decorrente principalmente de levantes hidráulicos por meio de acionamentos de motores de indução de grande porte. O diagrama unifilar simplificado do sistema base adotado nas simulações é dado na figura 7. A utilização de um capacitor série fixo ou controlado (TCSC) na condição nominal, tem por objetivo de reduzir as quedas de tensão em regime permanente e manter a tensão em níveis adequados, determinando um grau de compensação próximo a 180%, ou seja, a relação equivalente entre a reatância indutiva do sistema até o ponto de instalação do capacitor série.

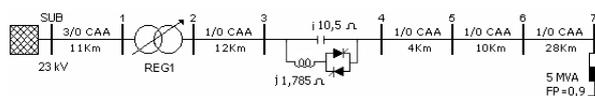


Figura 7 - Diagrama unifilar simplificado do sistema de compensação série

1.1 Controle da Tensão

Para este caso, utilizou-se a configuração do modelo do TCSC apresentado na figura 8. Desta forma, objetiva-se controlar a tensão a jusante do banco série através da variação do ângulo de disparo dos tiristores. Além dos estágios de medição e sincronização, existe um módulo de limitação do ângulo de disparo para inibir a faixa de ressonância paralela.

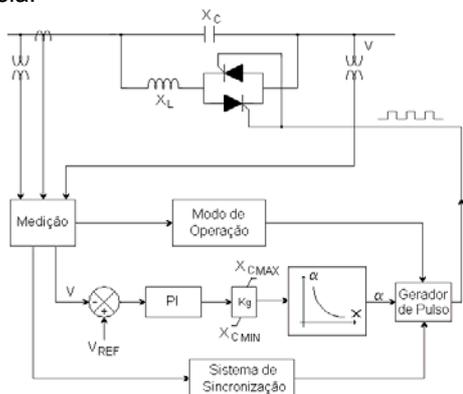


Figura 8 - Modelo do TCSC

O TCSC na sua condição nominal apresenta uma reatância capacitiva virtual de 21Ω, que corresponde ao mesmo grau de 180% com compensação fixa. A reatância relativa X_{ORDER} , é dada pela equação (3), sendo a relação entre a reatância virtual pela reatância própria do capacitor, com valores normalmente na faixa de 1 a 3 pu [1], [5].

$$X_{ORDER} = \frac{X_{TCSC}}{X_C} \quad (3)$$

Neste caso, o valor de X_{ORDER} adotado foi de 2 pu, em relação ao valor base da reatância do capacitor, sendo de 10,5 Ω. O valor da reatância indutiva foi escolhido utilizando um valor típico de projeto, $X_L/X_C=17\%$, portanto, $X_L=1,785 \Omega$. Com a utilização do TCSC é possível um controle da impedância tanto na faixa capacitiva como na indutiva, obtendo-se uma regulação efetiva da tensão. A figura 9 mostra a variação da impedância virtual do TCSC (X_{TCSC}), em função do ângulo de disparo para valores de X_L/X_C de 15%, 17% e 19%.

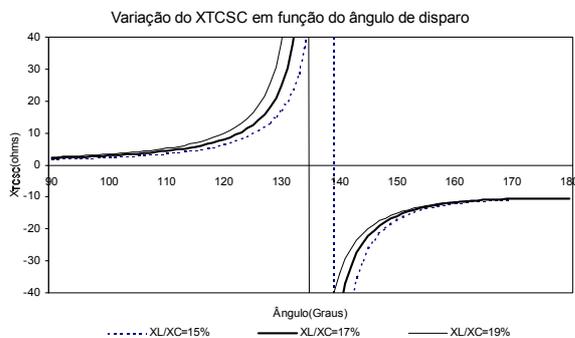


Figura 9 - Reatância do TCSC em função do ângulo de disparo (α) para o sistema em análise

Através da inclusão de um controle do tipo proporcional-integral (PI) é possível o ajuste do ângulo de disparo para que a tensão na barra 4, a jusante do banco de capacitores série, fique em valores especificados como referência. Neste caso, como mostra a figura 10, especificou-se uma tensão de referência de 1,0 pu (13,28 kV). Para um tempo de simulação de 0,7 seg., inclui-se um degrau positivo de carga de 1 MVA com FP=0,9 e do tipo impedância constante, com posterior degrau negativo após 0,65 seg. do primeiro acréscimo de carga.

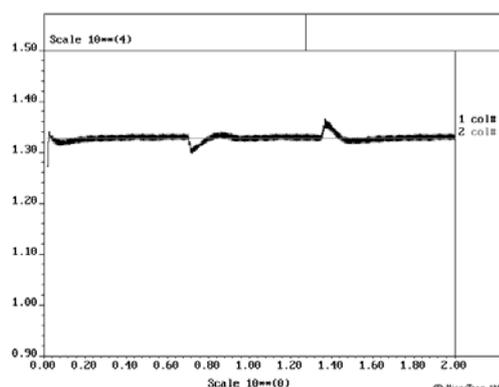


Figura 10 - Tensão controlada na barra 4

A figura 11 apresenta o comportamento geral da corrente RMS de linha.

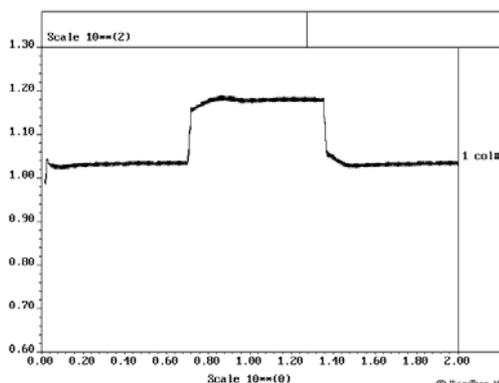


Figura 11 - Corrente RMS de linha na fase A

A figura 12 ilustra o comportamento das correntes de linha, do indutor e do capacitor durante a entrada de carga (1 MVA) e posterior regulação de tensão.

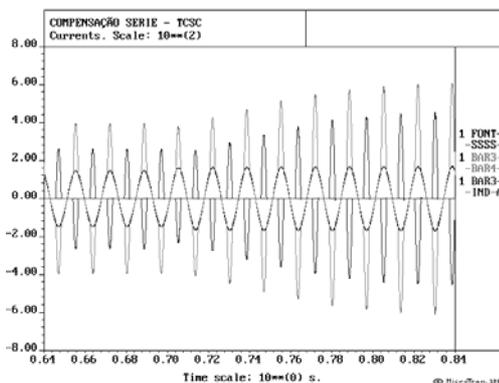


Figura 12 - Correntes no TCSC

1.2 TCSC com Capacitor Série Distribuído

Com o objetivo de manter a regulação e avaliar a possibilidade de minimizar os custos com o indutor, analisou-se um arranjo em que o capacitor série original foi subdividido em duas partes, ou seja, uma fixa (BCS) e uma controlada (TCSC), mantendo a reatância virtual nominal de 21Ω (figura 13). A relação X_L/X_C adotada neste caso é de 25% com o objetivo de estender a faixa de variação do X_{TCSC} e delimitar uma faixa de ressonância, compatível com as condições normais de operação em regime permanente. As tensões de referência e controlada são mostradas na figura 14, enquanto a figura 15 ilustra as correntes do TCSC após a entrada de carga e resposta do controle.

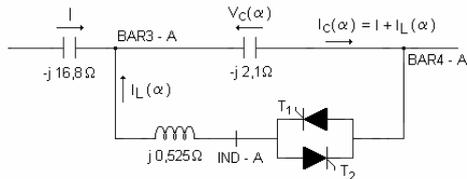


Figura 13 - Configuração do TCSC

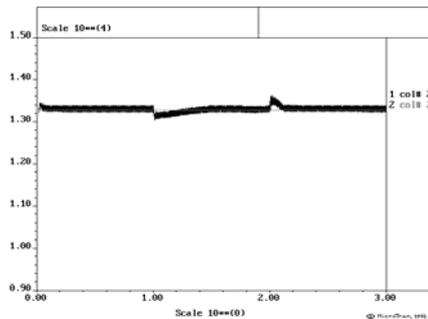


Figura 14 - Tensão controlada na barra 4

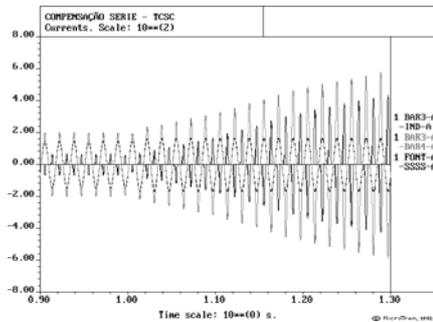


Figura 15 - Correntes no TCSC

1.3 Mitigação de Afundamentos de Tensão

Os afundamentos de tensão se caracterizam como um dos eventos mais importantes no contexto da qualidade de energia em função do grande impacto em cargas sensíveis. Para este caso, tem-se o seguinte diagrama unifilar utilizado na análise, objetivando a redução da severidade dos afundamentos pela utilização do TCSC.

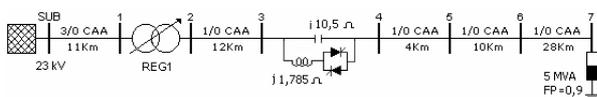


Figura 16 - Diagrama unifilar simplificado do sistema

Utilizando o sistema da figura 16, simulou-se um curto-circuito trifásico na barra 4 com o TCSC operando no modo TPC, com um ângulo fixo de 124° , representando uma impedância de $j11\Omega$ (indutiva), a qual praticamente dobra a impedância da linha nesta condição, limitando a corrente de falta. A figura 17 apresenta a tensão resultante na barra 3 onde estaria conectada uma carga sensível. Os resultados mostram a potencialidade do equipamento para este fim, sendo que demais análises devem ser verificadas junto às implicações de projeto [6].

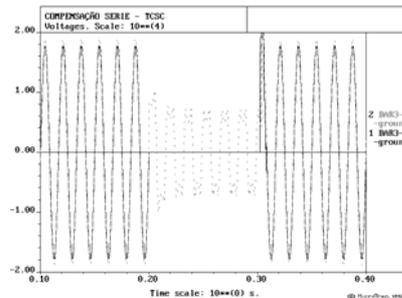


Fig 17- Tensões na barra 3 durante o curto-circuito
--- Com TCSC — Sem TCSC

1.4 Análise de Oscilações Subsíncronas

Neste caso, analisa-se a operação do sistema com banco de capacitores série fixo (BCS) durante o acionamento de um motor de indução, como mostra a figura 18. Para estas condições, verificou-se o fenômeno de auto-excitação do motor com correntes subsíncronas sustentadas (efeito gerador de indução), como mostram as figuras 19 e 20.

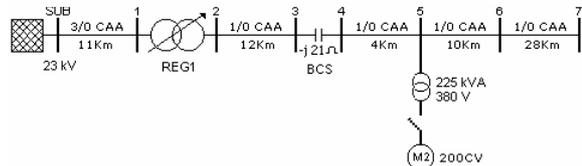


Figura 18 - Diagrama unifilar simplificado do sistema

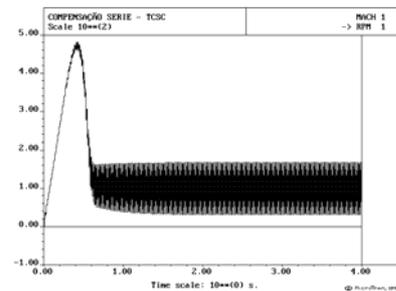


Figura 19 - Velocidade do motor (BCS)

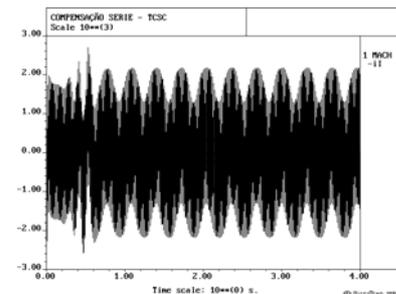


Figura 20 - Corrente do motor (BCS)

Na operação do TCSC com um ângulo de disparo mínimo, para evitar sobretensões, sempre atuando na região capacitiva, podemos observar o amortecimento das oscilações subsíncronas neste sistema, devido à mudança da reatância equivalente do TCSC de forma a dessintonizar o ponto de ressonância, resultando na partida normal do motor de indução. As figuras 21 e 22 mostram a velocidade e corrente do motor para o caso descrito.

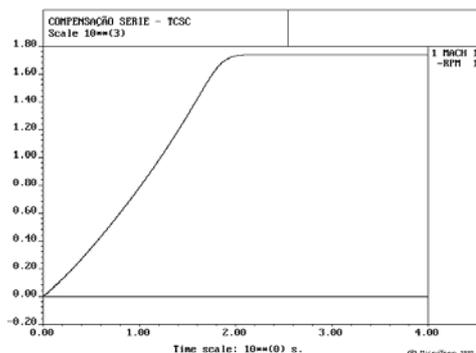


Figura 21 - Velocidade do motor (TCSC)

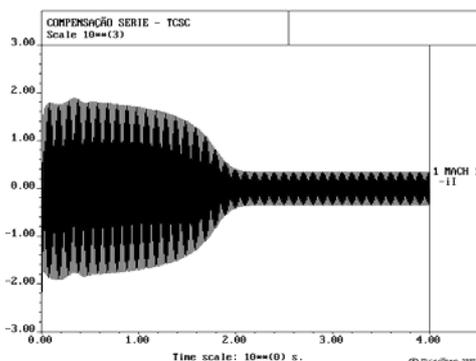


Figura 22 - Corrente do motor (TCSC)

4.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os resultados de simulações dinâmicas do Capacitor Série Controlado a Tiristores (TCSC), visando tanto a regulação e controle de tensão como o amortecimento de eventuais oscilações subsíncronas. Descreveu-se inicialmente um breve relato do princípio de operação do TCSC, apresentando as formas de onda típicas quando da operação nas faixas capacitivas e indutivas. Para análise do desempenho e características de operação representou-se o sistema equivalente de distribuição do Alimentador 110 de Uruguaiana/RS, sob configuração na qual foram realizados os primeiros testes de energização do projeto original de compensação série, resultando em flutuações significativas de tensão e instabilidade do sistema devido à interação do banco de capacitores série com motores de indução de grande porte, utilizados nos levantamentos hidráulicos característicos da região da fronteira. Em relação ao comportamento dinâmico do equipamento, realizaram-se simulações em que o TCSC atuou como regulador de tensão operando na região capacitiva com uma estratégia de controle do tipo PI, a qual manteve a tensão constante

depois do banco de capacitores série durante a entrada de carga, podendo assim variar-se o ganho e o respectivo ajuste de tensão para valores referenciados. Neste caso, o ângulo de disparo é relativo e sincronizado com a tensão do capacitor, mas em futuras análises se pretende comparar as respostas dinâmicas quando sincronizado pela corrente de linha. Apresentou-se também de forma básica a operação na região indutiva, visando reduzir a severidade de afundamentos de tensão por meio do aumento momentâneo da reatância da linha. Este tipo de operação deverá ser melhor avaliada, pois normalmente em situações práticas, opta-se por inserção plena (modo TSR: $\alpha = 90^\circ$). Na simulação da partida de um motor de indução trifásico (200 CV) foram observadas oscilações subsíncronas quando da operação de um banco de capacitores série fixo (BCS), enquanto foi comprovado que a inclusão do TCSC oferece uma solução eficiente para o amortecimento de oscilações subsíncronas, especificamente neste caso, eliminando a auto-exitação do motor de indução através da variação da reatância virtual do TCSC, de modo a dessintonizar o ponto de ressonância do sistema, resultando na operação normal do motor de indução. Desta forma, verificou-se através de simulações a característica de imunidade do TCSC em relação às oscilações subsíncronas, pois o mesmo apresenta característica predominantemente indutiva nas frequências abaixo da industrial.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hingorani, N. G., Gyugyi, L., "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press, New York, NY, 2000.
- [2] Oliveira, H.R.P.M., Figueiredo, C.E., Jesus, N. C., Papaléo, G., "AES SUL'S Experiences Using Series Compensation on Medium-Voltage Distribution Systems", VIII SEPOPE, Brasília, DF, Brasil, 2002.
- [3] Dommel, H. W. "Electromagnetic Transients Program Reference Manual", Vancouver: Department of Electrical Engineering, The University of British Columbia, 1996.
- [4] Anderson, P. M., Farmer, R. G., "Series Compensation of Power Systems", Encinitas, CA, PBLSH! Inc., 1996.
- [5] Mohan, R., Varma, R. K., "Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems", IEEE Press, New York, NY, 2002.
- [6] Tenório, A. R., Daconti, J., "Melhoria da Qualidade de Energia Elétrica Através do Uso de TCSC", III SBQEE, Brasília, DF, Brasil, 1999.
- [7] Tenório, A. R., Gama, C. A., "Resolvendo Problemas de Ressonância Subsíncrona Através do TCSC e do Dispositivo NGH - Análise de Estratégia de Controle", XV SNPTTE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 1999.
- [8] Microtran Power System Analysis Corporation, MICROTRAN - Transients Analysis Program Reference Manual, Vancouver, 1992.