



GRUPO IV
ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)

RESOLVENDO PROBLEMAS DE RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA ATRAVÉS DO TCSC E DO
DISPOSITIVO NGH – ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Antonio Ricardo de Mattos Tenório*
CHESF

Carlos A. Gama
ELETRONORTE

RESUMO: Este Informe Técnico descreve os princípios de funcionamento e estratégias de controle do TCSC e do dispositivo NGH para a mitigação dos fenômenos de oscilações subsíncronas, notadamente torque transitório e interação torcional. Foram desenvolvidos modelos detalhados desses controladores FACTS no programa ATP-EMTP e uma comparação entre o TCSC e o dispositivo NGH é feita utilizando a primeira benchmark para estudos de ressonância subsíncrona do IEEE.

PALAVRAS-CHAVE: Ressonância Subsíncrona, Interação Torcional, Torque Transitório, TCSC, NGH.

1.0 INTRODUÇÃO

A desregulamentação do Setor Elétrico Brasileiro, através da privatização da geração e da distribuição de energia elétrica exigirá das empresas de transmissão competência e eficiência para solucionar problemas causados em parte pela perda da capacidade de escolher a localização da geração e a sua programação no tempo.

Neste cenário, poderá haver um aumento significativo na geração termelétrica devido à sua atratividade econômica e rápido tempo de construção da planta. Espera-se também uma crescente pressão nas empresas de transmissão para aumentar sua eficiência, ou seja, aumentar as potências transportadas por corredor. Esta eficiência poderá ser atingida através do uso da eletrônica de potência aliada à tecnologia convencional. Assim sendo, é esperado que em breve o uso de equipamentos passivos, tais como compensação série convencional, e/ou equipamentos ativos, tais como os controladores FACTS (Flexible AC Transmission System) venha a desempenhar papel primordial neste cenário. Neste sentido, este trabalho

se propõe a estudar as interações subsíncronas entre a compensação série convencional e os turbogeradores, além de apontar os principais meios para mitigá-las com o uso do TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) e do Dispositivo NGH, quantificando as vantagens e desvantagens de cada um.

2.0 HISTÓRICO

A compensação série de linhas de transmissão longas e médias tem se mostrado um meio eficiente, econômico e poderoso para aumentar a capacidade de transmissão. Seu uso, no entanto, tem sido limitado devido aos problemas relativos à interação entre sistemas compensados por capacitores série e eixos turbina-gerador de máquinas térmicas. Os incidentes acontecidos nos Estados Unidos, na subestação de Mohave, mostraram à indústria de energia elétrica que os sistemas mecânicos dos turbogeradores podem interagir destrutivamente com os sistemas elétricos compensados por capacitores série. Esses incidentes, acontecidos em 1970 e 1971, serviram para que se estudasse o fenômeno de acoplamento bilateral entre eixos mecânicos e sistemas de potência de forma detalhada por diferentes pessoas e entidades [1, 3]. Dessa forma, o fenômeno das oscilações subsíncronas e particularmente da ressonância subsíncrona (RSS) passaram a ser melhor entendidos e evitados, através de um grande número de medidas mitigadoras e técnicas especiais, sucintamente descritas na seção 3.0.

3.0 RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA

Quando um sistema de potência tem uma de suas ressonâncias excitadas, isto causa correntes oscilantes na frequência elétrica f_e no estator, que dá origem a correntes no rotor nas frequências subsíncronas ($f_m = f_o -$

f_e) e supersíncronas ($f_m=f_o + f_e$). Se a frequência subsíncrona está próxima a um modo torcional de oscilação do eixo mecânico, problemas de RSS podem ocorrer. Observa-se que existem diferentes formas de se identificar interações entre eixos turbina-gerador e sistemas de potência. Estes fenômenos podem ser divididos em auto-excitação e torques transitórios [3, 4]. Os fenômenos de auto-excitação podem ser divididos ainda em dois tipos: efeito gerador de indução e interação torcional.

Dentre os principais avanços tecnológicos rumo à mitigação das interações torcionais e torques transitórios, tem-se [2]:

- Controle de Excitação: foi proposto para agir como controle suplementar da excitação do gerador. A corrente ou tensão subsíncrona é detectada e com um alto ganho de realimentação a corrente de excitação é modulada variando a tensão terminal do gerador, que por sua vez combate as oscilações subsíncronas. Este tipo de controle pode também ser considerado um controle acessório a outros dispositivos de controle mais sofisticados como dispositivos NGH e TCSC.
- Filtro Estático: constitui-se na inserção de filtros paralelos sintonizados para cada frequência subsíncrona de interesse no lado do neutro do transformador elevador. Este filtro junto com o controle de excitação podem resolver os problemas de interação torcional bem como obter alguma redução nos torques transitórios.
- Filtro Dinâmico: constitui-se na injeção de uma tensão série na linha de transmissão através de um ciclo-conversor a tiristores. Esta tensão série tende a combater as oscilações subsíncronas. Este sistema é de alguma forma similar ao controle de excitação de geradores e só deve ser usado como complemento para outros meios de supressão de interações torcionais e torques transitórios.
- “Bypass” do capacitor série: a operação completa ou parcial de bypass pode ser usada para a limitação do aumento do torque transitório. O uso de pára-raios de óxido de zinco também ajuda a diminuir os torques transitórios.
- Outros meios avançados: como por exemplo o dispositivo NGH e o TCSC, que serão objeto das próximas seções deste Informe Técnico.

4.0 DISPOSITIVO NGH – PRINCÍPIOS E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

O dispositivo proposto por Narain G. Hingorani para suprimir interações torcionais; reduzir torques transitórios; suprimir o “DC offset” dos bancos série foi chamado de Dispositivo de Amortecimento NGH-SSR, ou simplesmente Dispositivo NGH (iniciais do nome do seu inventor) [2].

O dispositivo NGH consiste basicamente de uma válvula de tiristores em anti-paralelo conectada em

série com um pequeno resistor, sendo este arranjo posto em paralelo com o banco de capacitores série. Um pára-raios (MOV) é usado para proteção do capacitor série. O diagrama unifilar simplificado do dispositivo NGH pode ser visto na Figura 1. O valor do resistor deve ser aproximadamente 5%-10% do valor da reatância do banco de capacitores [2].

Hingorani [2] observou que quando uma tensão puramente senoidal de 60 Hz (V_c) é superposta por uma componente CC (V_d), alguns semi-ciclos são maiores que o semi-período de 60 Hz (8,33 ms) e outros são menores que 8,33 ms, conforme mostra a Figura 2-(a). Da mesma forma, quando combinamos uma tensão puramente senoidal de 60 Hz (V_c) com uma componente senoidal subsíncrona (V_{ss}), obtemos uma tensão que possui alguns semi-ciclos maiores que 8,33 ms e outros menores que 8,33 ms (Figura 2-(b)). Se não houvesse nem componentes CC, nem componentes subsíncronas, cada semi-ciclo teria exatamente 8,33 ms. Então, admitindo que a tensão da qual estamos falando trata-se da tensão do capacitor série, a razão pela qual os semi-ciclos são maiores que 8,33 ms (ou seja têm um semi-ciclo estendido) é a carga desbalanceada no banco de capacitores que interage com a indutância do sistema produzindo oscilações. Logo, o princípio físico por trás do dispositivo NGH é a redução desta carga desbalanceada, através do disparo dos tiristores em 8,33 ms e conseqüente dissipação de energia pelo resistor na extensão do semi-ciclo, agindo assim como um dispositivo demodulador; isto é, eliminando todas as frequências abaixo de 60 Hz. A estratégia principal de controle do dispositivo NGH é o disparo dos tiristores em 8,33 (180°) toda vez que o semi-ciclo se estendesse mais que 8,33 ms. Quando o semi-ciclo da tensão do capacitor for menor que 8,33 ms não haverá disparo dos tiristores. Esta estratégia é bastante robusta pois atua em malha aberta e utiliza somente grandezas locais (tensão no banco de capacitores) e está apta, em teoria, a suprimir qualquer frequência subsíncrona, com um sistema de controle extremamente simples.

Existem outras estratégias de controle baseadas no disparo antecipado ou retardado em relação a 180° [2]. O disparo antecipado, chamado de pré-disparo, é o disparo antes do 180°, digamos algo em torno de 170°

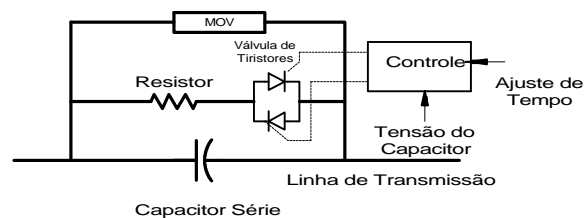


FIGURA 1 – Diagrama simplificado do dispositivo NGH

(7,87 ms). O pré-disparo torna o dispositivo NGH bastante efetivo na redução do torque transitório [5] e

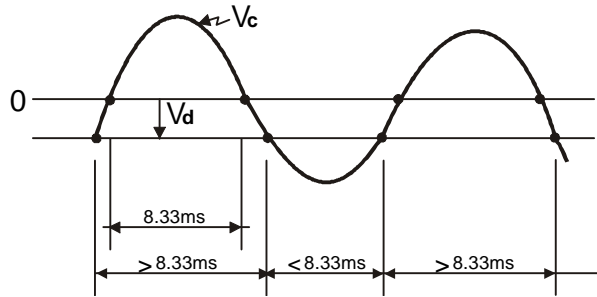


FIGURA 2-(a) – Senóide de 60 Hz combinada com tensão CC

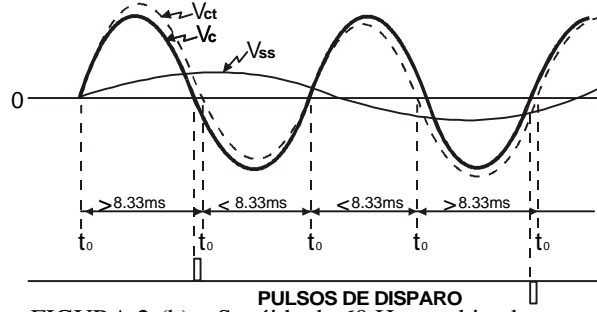


FIGURA 2-(b) – Senóide de 60 Hz combinada com tensão subsíncrona

também nos casos de interação torcional onde a condução na fase final do semi-ciclo fornece um efeito de dessintonização contra o aumento gradual das oscilações subsíncronas [2]. O disparo retardado seria útil numa situação onde não houvesse problemas de interação torcional e somente o torque transitório fosse uma preocupação [2]. Assim, seria possível o disparo dos tiristores em por exemplo 8,5 ms, para a situação particular descrita, o que também ocasionaria a supressão do “DC offset” em grandes distúrbios. Enfim, é possível usar muitas outras estratégias dependendo dos requisitos do sistema. Uma outra estratégia é o disparo contínuo dos tiristores em situação de sobretensões no banco ou quando uma quantidade grande de energia precisa ser absorvida para suprimir o crescimento gradual das oscilações subsíncronas.

5.0 TCSC - PRINCÍPIOS E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

O TCSC é um dispositivo não linear, composto de um banco de capacitores série em paralelo com um reator controlado por tiristores (RCT). A Figura 3 apresenta uma diagrama simplificado do TCSC. Na verdade, este circuito 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, conforme mostra a Figura 4 para a característica de impedância (fundamental) do TCSC simulado neste trabalho.

É importante salientar que o dispositivo NHG foi um precursor do TCSC, em que a resistência foi substituída por um reator, podendo então este equipamento controlar, através do ajuste do ângulo de disparo, sua reatância continuamente nas faixas

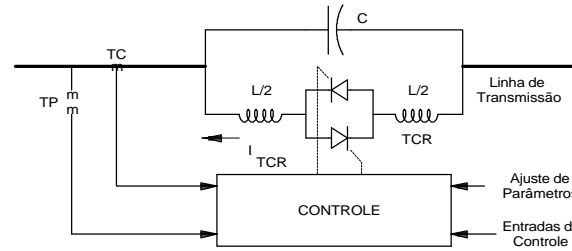


FIGURA 3 – Diagrama unifilar simplificado do TCSC capacitivas e indutivas. O valor da reatância do indutor está numa faixa de 13%-17% do valor da reatância do banco de capacitores série, nos equipamentos existentes [3]. Os valores máximos de amplificação da reatância capacitiva estão numa faixa de 3-4 pu (1pu=reatância do banco série), dependendo do tipo de projeto [3]. O TCSC é um equipamento fundamentalmente dependente da corrente de linha, uma vez que sua amplificação de reatância, se dá as custas dos pulsos de corrente que circulam no RCT em direção ao capacitor série (que é um caminho de baixa impedância em relação a reatância indutiva do sistema de transmissão), fornecendo assim uma fonte adicional de tensão ao banco de capacitores e possibilitando um aumento virtual da reatância do capacitor série [3].

Em termos de estratégias de controle, pode-se afirmar que este equipamento tem um modo de controle de reatância em malha aberta e um modo de controle de corrente/potência em malha fechada. Um modo especial de controle/operação é o disparo contínuo dos tiristores (modo TSR – “Thyristor Switched Reactor”), onde o RCT “bypassa” o banco de capacitor série, apresentando então o TCSC uma reatância indutiva num ponto de operação extremamente estável (Figura 4, para $\alpha=90^\circ$).

Basicamente o TCSC pode estabilizar um caso de RSS utilizando as seguintes estratégias de controle:

- Mudança da reatância do TCSC de forma a dessintonizar a ressonância, desde que normalmente os sistemas de transmissão apresentam altos fatores de qualidades (Q) para frequências subsíncronas. Assim uma pequena variação na impedância da linha pode surtir o efeito de dessintonização [5];
- Agindo como um demodulador de 60 Hz, de

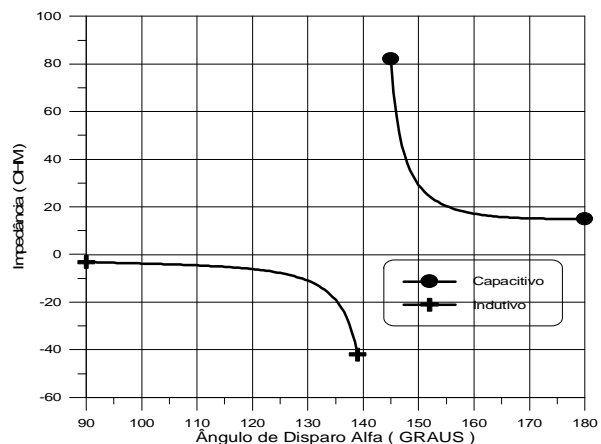


FIGURA 4 – Impedância fundamental do TCSC

forma semelhante ao dispositivo NGH [5].

➤ 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 [3];

➤ Levando o TCSC a operar num ponto capacitivo a 60 Hz, mas que tem um comportamento indutivo-resistivo em determinadas faixas de frequências subsíncronas [1, 3];

➤ Estratégia especial de controle usando um malha de “feedback” baseada na derivada da corrente de linha [6].

➤ O TCSC pode ser projetado de forma a se apresentar neutro (indutivo-resistivo) numa determinada faixa de frequência subsíncronas, não provocando assim nenhum risco quanto a RSS, utilizando o disparo pela reversão da tensão síncrona no capacitor série [8].

Como pode-se observar existe uma maior diversidade de maneiras para se combater as oscilações subsíncronas usando o TCSC do que no dispositivo NGH. Obviamente este trabalho não pretende demonstrar todas as estratégias existentes, mas apenas ilustrar o uso de algumas mais comuns e robustas para a supressão da RSS.

6.0 MODELAGEM E SISTEMA ESTUDADO

Foi desenvolvido um modelo de TCSC para o programa EMTP-ATP, usando as linguagens TACS e MODELS, de forma que todos os detalhes do circuito de potência desse equipamento bem como dos controles foram fielmente representados [1, 3]. A modelagem do dispositivo NGH foi derivada da modelagem do TCSC.

O sistema de potência considerado neste trabalho foi a primeira “benchmark” para estudos de ressonância subsíncrona do IEEE [9]. A Figura 5 mostra o diagrama unifilar deste sistema. Ele consiste basicamente de um único gerador de 892,4 MVA conectado a uma barra infinita por uma linha de transmissão em 500 kV e um equivalente de sistema. O grau de compensação série é variado de forma a avaliar os problemas de RSS. Os dados dos sistemas elétricos e mecânicos do eixo da máquina são encontrados em [9].

É importante salientar que o amortecimento mecânico no eixo turbina-gerador varia significativamente com a condição de carga. Desta forma, por ser difícil sua correta representação e ainda por ser conservador, o amortecimento mecânico foi desprezado, sendo todo o amortecimento observado nas simulações proveniente do sistema de potência.

A análise por autovalores no eixo turbina-gerador mostra as seguintes frequências modais (f_n): 15,7; 20,2; 25,5; 32,3 e 47,4 Hz [9]. Portanto, as frequências

elétricas de interesse, vistas do estator, são os complementos ($60-f_n$): 44,3; 39,8; 34,5; 27,7 e 12,6 Hz.

7.0 OSCILAÇÕES SUBSÍNCRONAS: TCSC X DISPOSITIVO NGH

Os fenômenos de torques transitórios e interação torcional serão explorados nesta seção. Para efeito de comparação será aplicada uma falta trifásica na barra 4 (Figura 5) em 500 ms e removida 4,5 ciclos depois. A falta trifásica representa um distúrbio de grandes proporções que permite o estudo de torque transitórios nos eixos mecânicos e também as interações torcionais, quando o grau de compensação do sistema é ajustado para que o complemento da frequência elétrica ($60-f_e$) esteja suficientemente próximo a um dos modos torcionais do eixo turbina-gerador.

7.1 Torque transitório

Observa-se que na aplicação e eliminação de curtos-circuitos surgem elevados torques transitórios nos eixos mecânicos das máquinas conectadas ao sistema devido a repentina variação do torque elétrico, que se contrapõe ao torque mecânico fornecido pela máquina primária. Os torques transitórios são importantes pois eles podem abreviar a vida útil de um eixo, devido a fenômeno de fadiga mecânica. Mantê-los a níveis aceitáveis ajuda a prolongar a vida útil do eixo mecânico.

Para comparar o TCSC com o dispositivo NGH, vamos admitir um grau de compensação no entorno de 21% ($X_c = 30 \Omega$) da linha 2-3 (Figura 5). Com o objetivo de avaliar a performance dos vários meios de diminuir os torques transitórios foram considerados os casos mostrados na Figura 6.

Os torques mostrados na Figura 6 são todos referentes ao torque mecânico aplicado entre as seções 3-4 (torque mecânico 4). O Torque mecânico 4 é o maior torque desenvolvido pelo eixo. Como pode ser

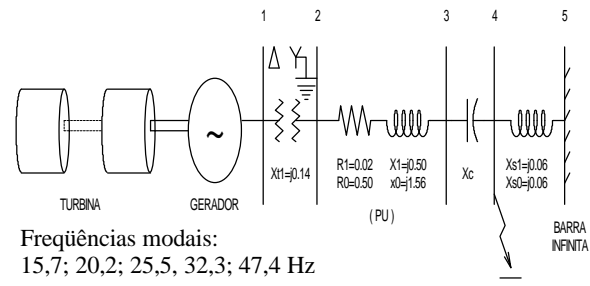


FIGURA 5 – Diagrama unifilar do benchmark do IEEE observado, o capacitor série sozinho (Figura 6-(a)) apresenta o maior torque transitório máximo (1,59 pu) e uma envoltória média de torque sustentado de aproximadamente 1,20 pu. Com a aplicação do dispositivo NGH no mesmo capacitor série, o torque transitório máximo passa para 0,74 pu (redução de

53%) com uma envoltória média de torque sustentado de 0,70 pu (redução de 42%). Portanto o dispositivo NGH operando em pré-disparo de 170° apresenta-se como uma excelente maneira de reduzir os torques transitórios e sustentados.

A Figura 6-(c) apresenta o mesmo caso, mas agora considerando o TCSC com sua reatância capacitiva ajustada em 30Ω . O torque transitório máximo foi de 0,84 pu, com uma envoltória média de torque sustentado de aproximadamente 0,75 pu. O TCSC operando em modo de controle de impedância apresenta neste caso um performance inferior ao dispositivo NGH. De forma a melhorar a performance do TCSC foi considerado um controle suplementar de amortecimento subsíncrono – CSAS [1, 3] (Figura 6-(d)). Neste caso, o torque transitório máximo foi reduzido para 0,72 pu (o menor de todas as simulações) e a envoltória média de torque sustentado de aproximadamente 0,64 pu (também o menor valor entre todas simulações). É possível concluir que tanto o TCSC quanto o dispositivo NGH são excelentes

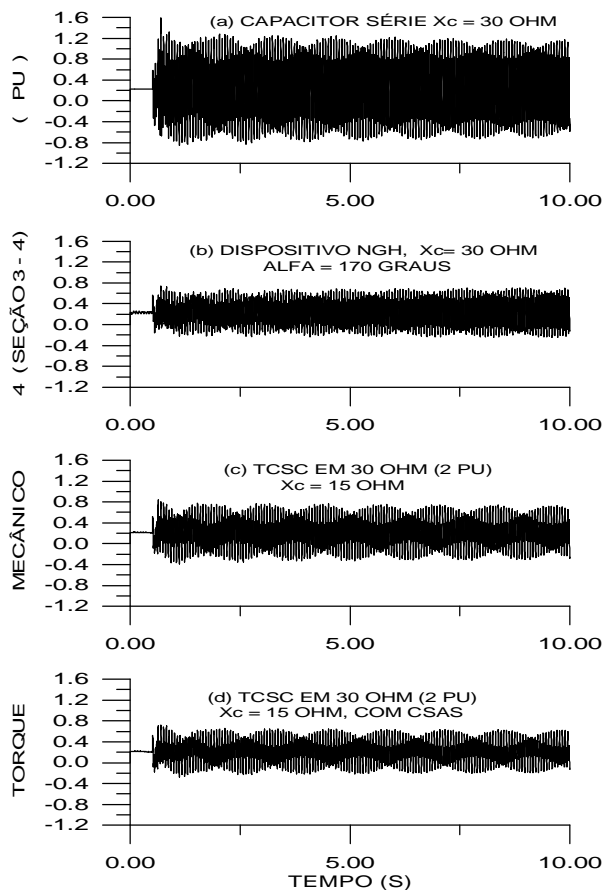


FIGURA 6 – Torques transitórios : TCSC x NGH

alternativas para a redução de torques transitórios/sustentados devido a eles absorverem energia resultante da interação entre o sistema elétrico e o sistema mecânico da máquina síncrona. Entretanto

o TCSC apresenta um performance superior ao dispositivo NGH.

7.2 Interação Torcional

Para avaliar a interação torcional, foi considerado um grau de compensação de 35% ($X_c = 50 \Omega$, Figura 5). A frequência elétrica de ressonância excitada pelo curto-circuito é 27,7 Hz [1, 3]. Logo, o complemento desta frequência que é visto pelo rotor é 32,3 Hz ($60 - 27,7$) que coincide exatamente com o quarto modo torcional do eixo mecânico ($f_n = 32,3$ Hz). Portanto, uma forte interação torcional, com uma desestabilização do quarto modo, é mostrada na Figura 7. Observe o enorme aumento dos maiores torques mecânicos (3 e 4) que chegam a 35,4 e 50,7 pu no fim de 10 segundos de simulação. Este é um caso típico onde haveria a ruptura do eixo mecânico, se nenhuma medida corretiva fosse tomada.

Considerando agora um dispositivo NGH com o mesmo capacitor série em um estratégia de pré-disparo a 170° , podemos ver o resultado dos maiores torques mecânicos na Figura 8. Observa-se que embora os torques 3 e 4 tenham sido enormemente reduzidos, o dispositivo NGH não conseguiu absorver a energia necessária para a supressão completa das oscilações subsíncronas e uma discreta tendência de amplificação dos torques é percebida. Uma solução para estabilizar esta tendência de crescimento dos torques é a utilização de uma estratégia em que o dispositivo NGH é mantido em pré-disparo (170°) até a remoção da falta, a partir daí o dispositivo NGH passa para disparo contínuo por 4 segundos, depois voltando para o pré-disparo. A Figura 9 mostra os torques mecânicos e elétrico, sem nenhuma interação de RSS. Alternativamente uma excursão num ângulo de disparo de 140° por 7 segundos teria um efeito similar de dessintonia dessa ressonância.

Com o TCSC em modo de controle de impedância em 50Ω , os torques mecânicos e elétrico são

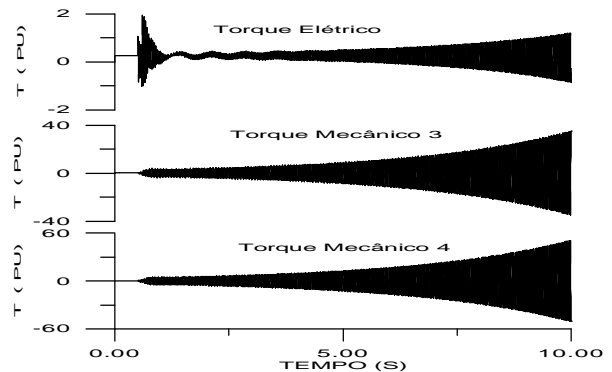


FIGURA 7 – Interação torcional do 4º modo, $X_c=50\Omega$ mostrados na Figura 10. Como pode ser observado não existe nenhuma tendência de amplificação de torques. Isto acontece porque para a frequência de 27,7 Hz e

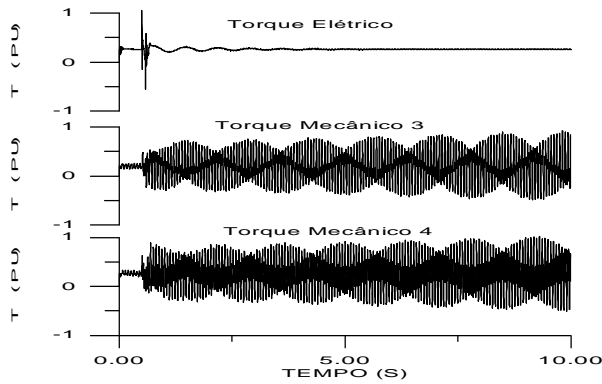


FIGURA 8 – Interação torcional – aumento gradual dos torques – NHG com pré-disparo em 170°

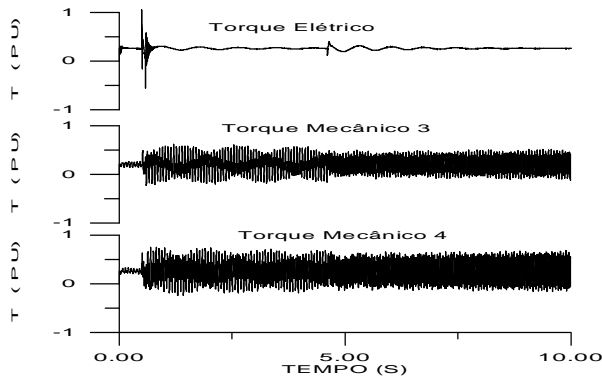


FIGURA 9 – NHG com disparo contínuo por 4 s

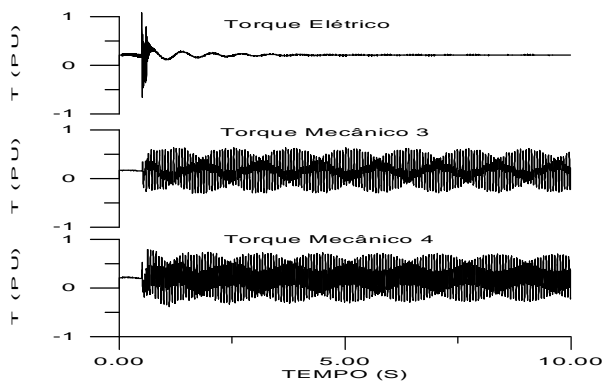


FIGURA 10 – TCSC com reatância ajustada em 50Ω com o ângulo de disparo do TCR próximo a ressonância (Figura 4), o TCSC exibe uma impedância indutiva-resistiva e portanto não impacta troca de energia entre o capacitor e a indutância equivalente do sistema. A análise espectral da corrente de linha confirma a não existência de ressonância abaixo de 60 Hz neste caso [1, 3].

8.0 CONCLUSÕES

Tanto o TCSC como o dispositivo NHG oferece uma solução técnica eficiente para combater os problemas de interação torcional e torque transitório. No entanto, o TCSC apresenta-se como uma alternativa mais robusta e versátil para amortecimento/dessintonização de interações

torcionais, podendo usar diferentes estratégias de controle para isso. O TCSC pode usar um controle especial para se tornar neutro do ponto de vista de RSS para uma determinada faixa de frequência subsíncrona, desenvolvendo uma impedância indutiva-resistiva.

O dispositivo NHG apresenta-se como uma solução mais robusta para diminuição dos torques transitórios do que para o amortecimento de interações torcionais, embora ele também possa ser usado eficientemente com estratégias especiais (por exemplo disparo contínuo) e em conjunto com outras soluções complementares descritas no item 3.0.

9.0 REFERÊNCIAS

- [1] ANTONIO RICARDO M. TENÓRIO, Comparação entre o TCSC e o Capacitor Série Convencional: O Problema Ressonância Subsíncrona, VI ERLAC, CE-38, Puerto Iguazú, Argentina, 1996.
- [2] NARAIN G. HINGORANI, A New Scheme for Subsynchronous Resonance Damping of Torsional Oscillations and Transient torque – Part I, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, April 1981.
- [3] ANTONIO RICARDO M. TENÓRIO, A Thyristor Controlled Series Capacitor Model for Electromagnetic Transient Studies, Tese de Mestrado, UMIST, Manchester, Inglaterra, 1995.
- [4] P. M. ANDERSON et al., Subsynchronous Resonance in Power Systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE press, New York, 1990.
- [5] BHARAT BHARGAVA, Effectiveness of Thyristor Controlled Series Capacitors in Damping SSR on Mohave Generators and its Comparison with the NHG Device, anais de eletrônica de potência do Stockholm Power Tech, Estocolmo, Suécia, 1995.
- [6] LUIZ PILOTTO et al., The Impact of different TCSC control Methodologies on the Subsynchronous Resonance Problem, Proc. of The Future of Power Delivery, Washington, Abril 9-11, 1996.
- [7] ANTONIO RICARDO M. TENÓRIO et al., Model for Electromagnetic Transient Studies, anais de Eletrônica de Potência do Stockholm Power Tech, Estocolmo, Suécia, 1995.
- [8] LENNART ÄNGQUIST et al., Synchronous Voltage Reversal (SVR) Scheme – A new Method for Thyristor Controlled Series Capacitor, Flexible AC Transmission System (FACTS 3): The Future in High-Voltage Transmission, October 5-7, Baltimore, 1994.
- [9] IEEE SUBSYNCHRONOUS RESONANCE WORKING GROUP, First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems; vol. PAS-96; n° 5; pp 1565-1572; 1977.