

Mitigação de Ressonância Subsíncrona através do TCSC

Ronei Erlacher, Lucas Frizera Encarnação e Marcelo Brunoro

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Espírito Santo

Vitória, Brasil

Resumo — Este artigo apresenta o problema de Ressonância Subsíncrona (RSS) e mostra a importância de avaliar seus efeitos nos sistemas elétricos de potência. A análise da RSS é realizada através do modelo IEEE First Benchmark utilizando a ferramenta de análise modal para verificar a interação entre os sistemas elétrico e mecânico. Este trabalho também descreve uma metodologia para o controle do TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) a fim de mitigar os efeitos da RSS no sistema citado. Todas as análises são desenvolvidas através de simulação utilizando o software PSCAD/EMTDC.

Palavras - chaves — Ressonância Subsíncrona, TCSC, Torque Subsíncrono, NGH – SSR, Mitigação de RSS.

I. INTRODUÇÃO

A compensação série capacitiva é uma alternativa economicamente viável utilizada em linhas de transmissão para o aumento do fluxo de potência, isto é, aumento da capacidade da linha, além de aumentar os limites de estabilidade do sistema elétrico. Entretanto, a inserção de capacitores série em linhas de transmissão pode trazer problemas sérios ao sistema, como o caso do fenômeno da Ressonância Subsíncrona (RSS) que é definida com a condição do sistema elétrico de potência onde a rede elétrica troca energia com o sistema mecânico (turbina-gerador) em uma ou mais frequências naturais do sistema combinado, abaixo da frequência síncrona da rede [1].

A interação entre os sistemas elétrico e mecânico pode se dar de várias formas com efeito da RSS. A literatura define três efeitos mais observados, que recebem os seguintes nomes:

- Efeito de Gerador de Indução: causado pela autoexcitação do sistema elétrico, sendo de origem puramente elétrica, ocasionando oscilações de torque no eixo das máquinas síncronas;
- Efeito de Interação Torcional: ocorre quando o torque subsíncrono induzido no gerador é igual ou próximo ao modo torcional natural do eixo da turbina-gerador, havendo uma interação entre o sistema elétrico e mecânico, fazendo com que ambos os sistemas fiquem auto-excitados;
- Efeito de Amplificação de Torque: se assemelha com o efeito de interação torcional, entretanto sua ocorrência é causada por transitórios que geram correntes e consequentemente torques subsíncronos coincidentes com uma frequência natural do sistema turbina-gerador, provocando aumento crescente de torque.

Em grandes sistemas de geração de energia é fundamental a análise do impacto do fenômeno de RSS, pois os efeitos mencionados acima podem trazer sérios danos ao sistema de geração, como ocorrido na Usina de Mohave, nos EUA, na década de 1970, provocando a destruição do eixo em dois geradores [2] e [3].

Existem várias ferramentas para análise no sistema de potência, como análise modal e resposta em frequência, a fim de avaliar o efeito da RSS. Neste trabalho empregou-se a relação entre autovalores e a estabilidade do sistema dinâmico, através da análise modal. Uma abordagem sobre o controle do dispositivo TCSC foi realizada com o auxílio do software PSCAD/EMTDC, a fim de suprimir o efeito da RSS no sistema IEEE First Benchmark [4].

II. MODELO E ANÁLISE DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema estudado neste trabalho foi o First Benchmark Model [4] para análise de RSS, descrito na Fig. 1. Esse sistema compreende um turbogerador, com seis massas rotativas, sendo quatro estágios de uma turbina à vapor e o conjunto excitador-gerador da máquina síncrona, conectado a um barramento infinito por meio de uma linha de transmissão à qual possui uma compensação série capacitiva. O conjunto mecânico da turbina à vapor é composto por uma turbina de alta pressão (HP), uma turbina de média pressão (IP) e duas turbinas de baixa pressão (LPA e LPB). Na Fig. 1 a massa do gerador é representada por Gen e a massa da excitatriz do rotor é representada por Exc. As bases adotadas no sistema são de 892,4MVA e 500kV.

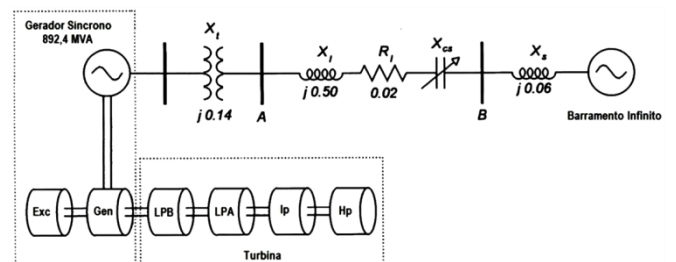


Fig. 1 – Sistema IEEE First Benchmark para análise de RSS.

Um sistema eletromecânico pode ser representado por matrizes de espaço de estado, através de um sistema linear de equações diferenciais, englobando todas as grandezas elétricas e mecânicas [5].

O sistema mecânico, apresentado na Fig. 1, é descrito por uma equação matricial diferencial de segunda ordem, definido em

$$\mathbf{T} = \mathbf{H}\ddot{\theta} + \mathbf{D}\dot{\theta} + \mathbf{K}\theta \quad (1)$$

onde $\mathbf{T}$ é a matriz de torques, $\mathbf{H}$ é a matriz de constantes de inércia, $\mathbf{D}$ é a matriz de constantes de amortecimento, $\mathbf{K}$ é a matriz de constantes de elasticidade e θ é a posição angular das massas. Todas as variáveis estão em pu, exceto θ que é expressa em radiano [6].

A Equação (1) é relacionada com o as equações que regem o sistema elétrico, formando um sistema de espaço de estados, cujas variáveis de estados são as correntes de linha, as tensões no capacitor, os deslocamentos angulares dos eixos das massas e as velocidades angulares das mesmas. Como estas equações são não lineares, o sistema é linearizado e colocado na forma descrito em

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u} \quad (2)$$

onde $\Delta \mathbf{x}$ é um vetor de dimensão n , que representa a variação das variáveis de estado, $\mathbf{A}$ é uma matriz quadrada ($n \times n$) que depende dos parâmetros do sistema e das condições iniciais, $\Delta \mathbf{u}$ é a matriz de entrada do sistema, no caso as variações de torque em cada massa do conjunto do turbogerador, e $\mathbf{B}$ é a matriz que representa os coeficientes constantes do sistema eletromecânico. As características de estabilidade descritas em (2) podem ser examinadas através dos autovalores da matriz $\mathbf{A}$. Os autovalores são obtidos na forma descrita em

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (3)$$

onde σ corresponde ao fator de amortecimento e ω corresponde a frequência de oscilação.

A análise de autovalores obtidos do equacionamento deste sistema, através da análise modal, pode mostrar como o sistema mecânico e o sistema elétrico interagem de forma oscilatória e como os mesmos reagem mediante a distúrbios, sendo uma ferramenta que pode determinar as frequências de oscilação do conjunto e o amortecimento de tais frequências [6].

Como o sistema estudado possui seis massas rotativas, ele irá possuir cinco modos torcionais, respeitando a condição N-1, pois as massas rotativas interagem aos pares de forma adjacente, determinando um modo torcional. No sistema estudado, o modo torcional 5 é puramente oscilatório para qualquer valor de compensação da linha, pois o autovalor associado a este modo possui apenas parte complexa, ou seja, não possui fator de amortecimento.

A Fig. 2 mostra como o fator de decremento de cada modo varia de acordo com a compensação série da linha. O fator de decremento representa como cada torque subsíncrono no eixo do gerador pode ser amplificado.

A análise realizada desconsiderou as constantes mecânicas de amortecimento, para representar o pior caso dos efeitos decorrentes da RSS.

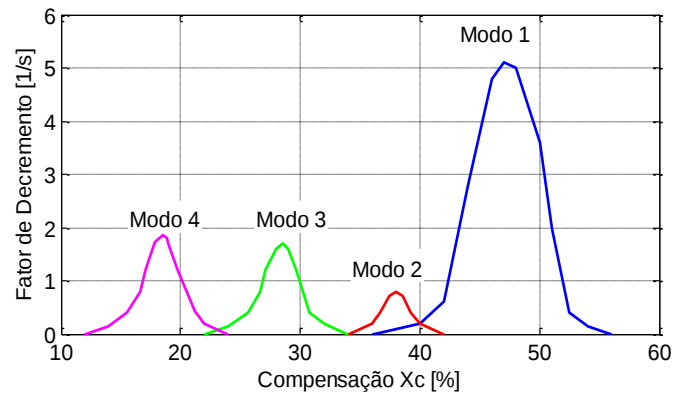


Fig. 2 – Fator de Decremento para o IEEE First Benchmark em função da compensação da linha.

A Tabela I apresenta a frequência e a compensação da linha para cada máxima interação torcional, isto é, para o máximo valor do fator de decremento.

TABELA I. FREQUÊNCIA DE OSCILAÇÃO E COMPENSAÇÃO DA LINHA PARA A MÁXIMA INTERAÇÃO TORCIONAL

Modo Torcional	Frequência [Hz]	X_{CS} [pu]
1	15,75	0,472
2	20,21	0,378
3	25,55	0,285
4	32,29	0,184

Para analisar como o efeito da RSS afeta o sistema, simulou-se uma falta trifásica no barramento B descrito na Fig. 1, no instante $t = 1,5s$, para uma compensação série $X_{CS} = 0,472pu$ correspondente ao modo torcional 1, com uma frequência natural de 15,75Hz, através do programa PSCAD/EMTDC utilizando os blocos padrões da biblioteca, como o bloco do gerador síncrono e o bloco multimassa, simulando o sistema mecânico da turbina à vapor.

Ao se aplicar este distúrbio, observou-se o comportamento do torque elétrico desenvolvido pelo gerador síncrono e a interação torcional entre as massas LPA e LPB e entre as massas do conjunto de excitação (Exc) e do eixo (Gen) do gerador, apresentado na Fig. 3.

Pode-se perceber uma amplificação de torque entre as unidades das massas citadas, decorrente do torque subsíncrono gerado no modo torcional 1 pelas correntes de falta.

Uma perturbação significativa em um sistema de compensação série capacitiva resulta em um torque eletromagnético que oscila em uma frequência igual à frequência natural do sistema mecânico, inferior a frequência do sistema elétrico (60Hz), provocando um aumento de torque. Isto é causado pela ressonância entre a frequência subsíncrona elétrica e a frequência natural mecânica, ou seja, pela interação entre os subsistemas elétricos e mecânicos.

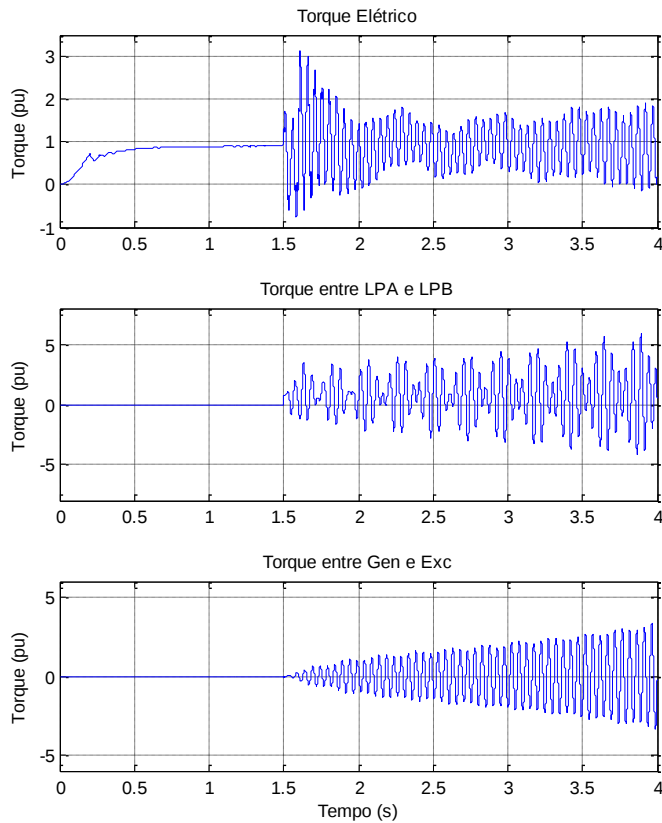


Fig. 3 – Torques elétrico e mecânicos para o Modo Torcional 1.

A oscilação em baixa frequência para o torque entre as massas Gen e Exc é apresentada na Fig. 4, à qual é possível ver dois pontos que compõem um ciclo que possui o período em torno de 0,064s, o que corresponde à frequência de 15,7Hz.

Este torque oscilatório gera um estresse no eixo do gerador, que pode evoluir para uma quebra do eixo caso a oscilação não seja amortecida, fato que não ocorreria em um sistema sem compensação série.

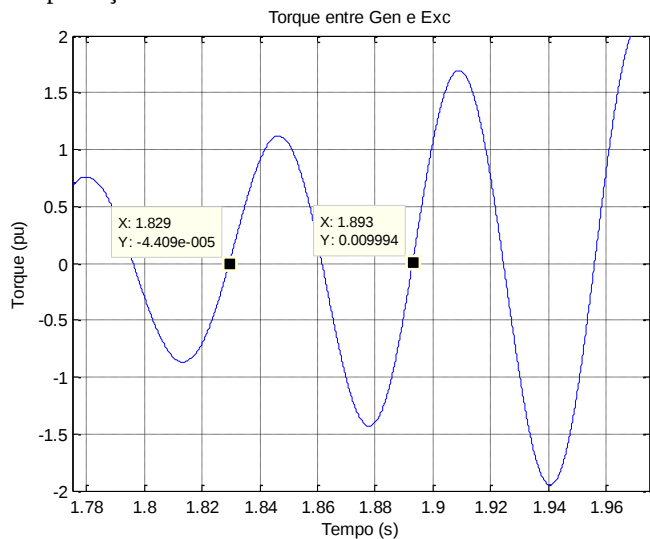


Fig. 4 – Torques entre as massas Gen e Exc para o Modo Torcional 1.

A Fig. 5 apresenta o comportamento da velocidade do rotor do gerador. Pode-se perceber que ela tem o mesmo perfil oscilatório do torque. Também é mostrado o impacto do distúrbio na tensão de saída do gerador, oscilando em torno de 1pu.

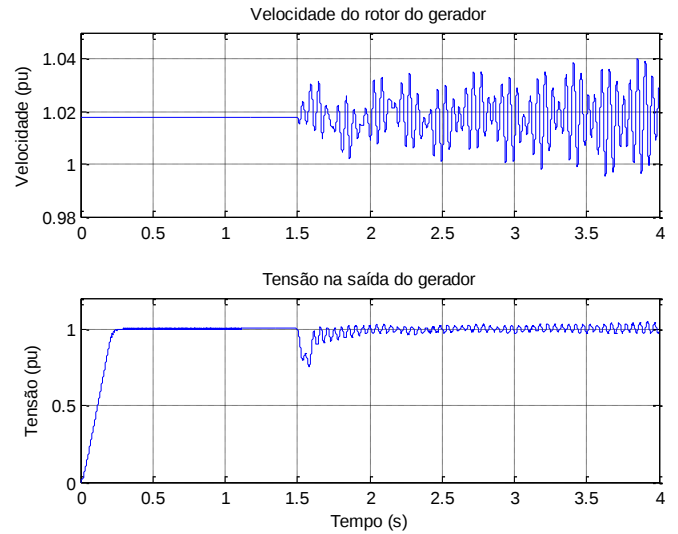


Fig. 5 – Velocidade do rotor e tensão de saída do gerador para o Modo Torcional 1.

III. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO TCSC

Vários são os mecanismos e dispositivos empregados para a mitigação da RSS, dentre estes equipamento destaca-se o TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor). O TCSC é um dispositivo formado por um reator, controlado por tiristores, em paralelo com um capacitor, apresentado na Fig. 6. O TCSC pode possuir uma reatância indutiva ou capacitiva de acordo com o ângulo de disparo dos tiristores.

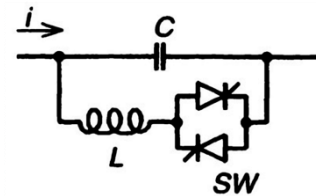


Fig. 6 – Estrutura do TCSC.

Existem várias metodologias de controle, levando em consideração a forma como as variáveis são processadas e o propósito final do controle. Utilizar uma metodologia baseada em um fluxo de corrente ou potência constante é muito eficaz, entretanto a forma de controle se torna mais complexa se o objetivo do acionamento do TCSC seja apenas a supressão da RSS [7].

A estratégia de disparo abordada neste trabalho consiste na demodulação em 60Hz do TCSC, também conhecida como esquema NGH-SSR (Narain G. Hingorani Subsynchronous Resonance), na qual é uma estratégia muito robusta e eficaz, principalmente na redução de torques transitórios e na supressão de interações torcionais. Possui como grande vantagem a utilização de apenas variáveis locais para seu

controle não necessitando assim de variáveis remotas, tais como torque e velocidade do gerador síncrono [8].

Proposta por Narain G. Hingorani, a metodologia NGH-SSR baseia-se na análise da tensão sobre o capacitor do TCSC. Quando uma tensão puramente senoidal de 60Hz é combinada com uma tensão CC, alguns semi-ciclos são maiores que o semi-ciclo de 60Hz (8,33ms) e outros são menores que 8,33ms, conforme apresentado na Fig. 7.

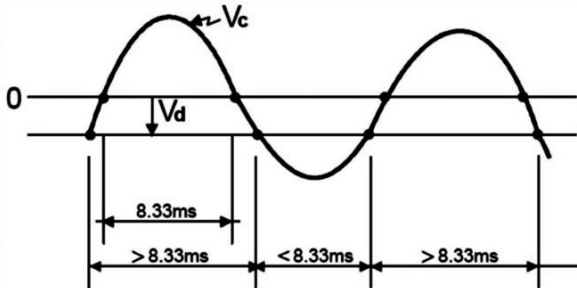


Fig. 7 – Tensão senoidal de 60 Hz combinada com uma tensão CC.

Da mesma forma, quando uma tensão senoidal de 60Hz é combinada com uma tensão senoidal com frequência inferior a 60Hz, isto é, subsíncrona, haverá semi-ciclos maiores e menores que 8,33ms, como observado na Fig. 8. Esse fenômeno de tensão no capacitor combinada com tensão CC ou tensão subsíncrona é resultado de uma interação entre a indutância do sistema e o capacitor, provocado por uma perturbação. Tal interação também pode observada no sistema mecânico turbina-gerador provocando interações torcionais e amplificação de torque oscilatório no sistema, característica do fenômeno de RSS. Se não há perturbação no sistema, a tensão no capacitor será puramente senoidal com 60Hz, possuindo sempre semi-ciclo de 8,33ms. Assim, o disparo do TCSC ocorre em 8,33ms forçando que a tensão no capacitor seja de 60Hz. Quando a tensão no capacitor cruza o zero, o disparo dos tiristores ocorrerá após 8,33ms, reduzindo a tensão V_C caso se estenda por mais de 8,33ms. Desta forma o TCSC estará funcionando como um demodulador em 60Hz. Esta estratégia é simples e consegue suprimir qualquer frequência subsíncrona no sistema.

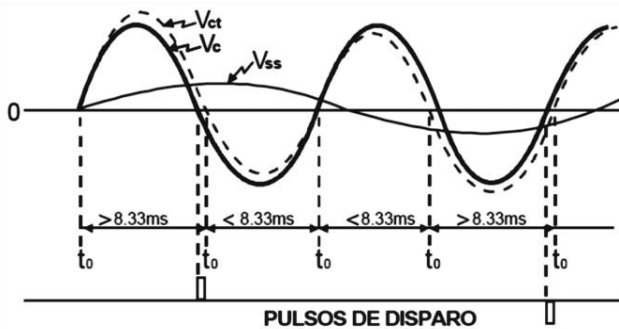


Fig. 8 – Tensão senoidal de 60 Hz combinada com uma tensão subsíncrona.

A Fig. 9 apresenta o diagrama de acionamento do TCSC utilizado na simulação, que será descrita posteriormente.

Baseado na estratégia NGH-SSR, o bloco 1 (em vermelho) recebe o sinal de tensão do capacitor (V_C) do TCSC e gera um trem de pulsos que corresponde aos instantes em que V_C cruza o zero. Este trem de pulsos é comparado com um bloco “Max” que fornece em sua saída apenas os pulsos onde V_C cruza o zero na transição de um semi-ciclo negativo para um semi-ciclo positivo, pois cada tiristor chaveia em um semi-ciclo, sendo acionado de forma independente. Ao detectar o cruzamento por zero, o bloco 2 (em azul) é acionado e funciona como um contador de tempo. Sua saída é conectada ao bloco 3 (em verde) que compara o tempo que está sendo contado com T_d , que corresponde à 8,333ms. Assim, se V_C possui um semi-ciclo inferior à 8,333ms a saída do comparador possui nível 0. No instante em que o contador de tempo atinge 8,333ms a saída do comparador passa a ter nível 1, disparando o tiristor. Um bloco mono-stable é utilizado para definir um tempo de condução para o pulso de disparo de 0,5ms.

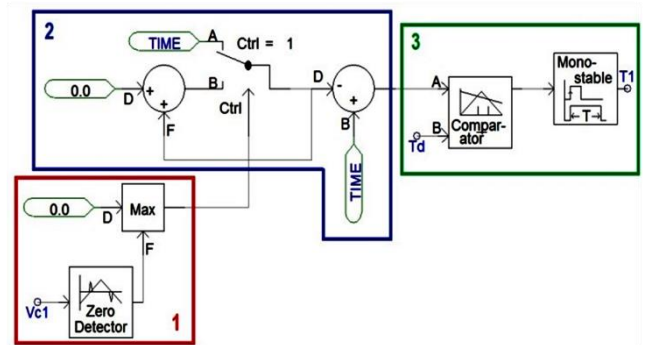


Fig. 9 – Lógica de acionamento do TCSC.

IV. SIMULAÇÃO COM O TCSC

A fim de mitigar os efeitos da RSS, o sistema da Fig. 1 foi novamente simulado nas mesmas condições iniciais, com uma falta trifásica na barra B em 1,5s com 75ms de duração na e uma compensação série capacitiva de 0,472pu (modo torcional 1 - 15,75Hz), entretanto a compensação série foi realizada através do TCSC. A Fig. 10 apresenta o circuito do TCSC implementado no PSCAD, à qual substituiu o capacitor série do sistema anterior. Cada tiristor é acionado como descrito no item anterior, de acordo com a Fig. 9.

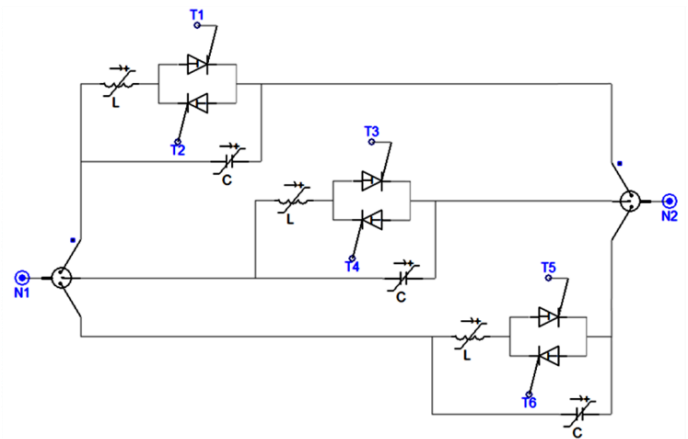


Fig. 10 – Circuito do TCSC implementado no PSCAD.

A reatância capacitiva (X_{CTCSC}) de projeto do TCSC foi exatamente o valor da reatância para a compensação de 0,472pu, visto que o TCSC atuará apenas no momento em que identificar uma frequência subsíncrona, isto é, atuará como um demodulador em 60Hz. A reatância indutiva (X_{TCR}) do TCSC possui 0,0472pu que corresponde a 10% de X_{CTCSC} , como sugerido pela literatura [2].

Novamente foi observado o comportamento do torque elétrico desenvolvido pelo gerador síncrono, a interação torcional entre as massas LPA e LPB e entre as massas do conjunto de excitação (Exc) e do eixo (Gen) do gerador, como apresentado na Fig. 11. Pode-se perceber como a atuação do TCSC é efetiva para minimizar as oscilações subsíncronas decorrentes da falta trifásica. O TCSC age forçando que a tensão sobre capacitor tenha 60Hz, alterando a dinâmica do sistema, mitigando o efeito da RSS sobre os torques oscilatórios.

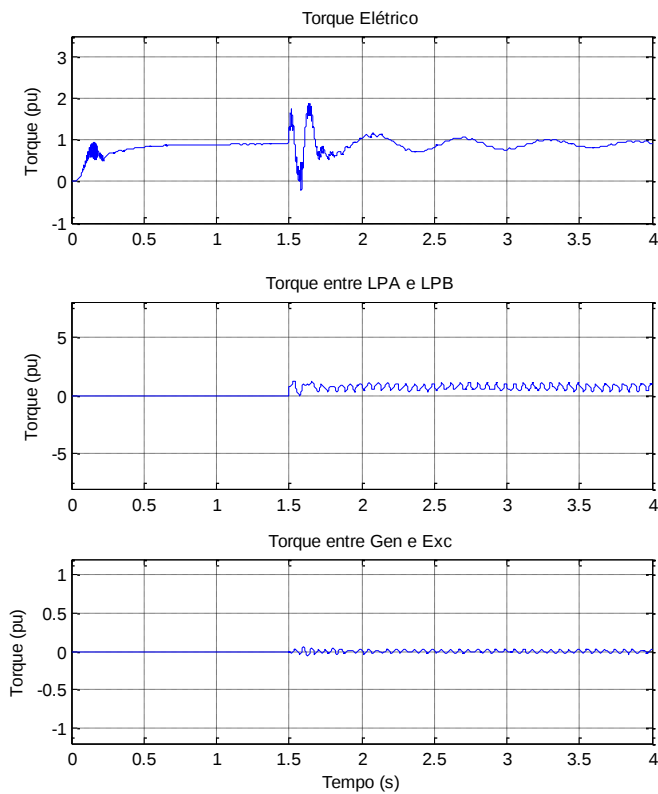


Fig. 11 – Torques elétrico e mecânicos para o Modo Torcional 1 com o TCSC.

Através da Fig. 12 é possível observar o comportamento da tensão na saída do gerador e da velocidade do rotor do mesmo. Também pode-se perceber um considerável amortecimento das oscilações neste caso. A oscilação da velocidade decresce e o perfil de tensão estabiliza em torno de 1pu.

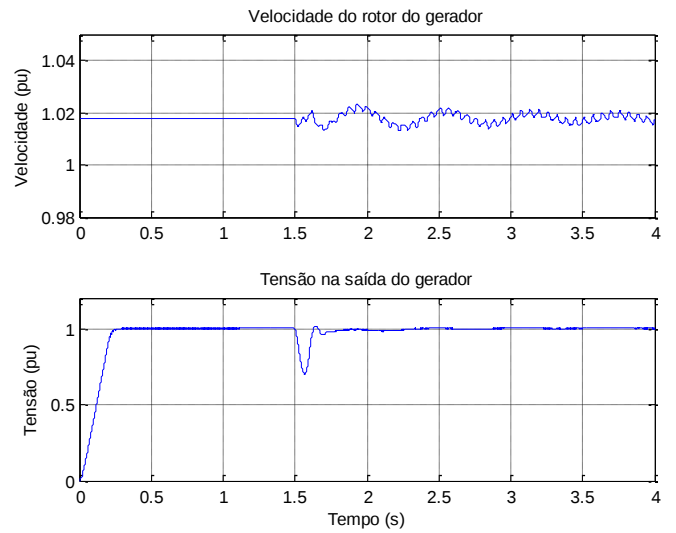


Fig. 12 – Velocidade do rotor e tensão de saída do gerador para o Modo Torcional 1 com o TCSC.

A Fig. 13 apresenta um comparativo entre a tensão do capacitor, V_c , para um sistema compensado com capacitor fixo e compensado com TCSC. É possível observar que a tensão V_c possui componentes subsíncronos para a compensação com capacitor fixo, à qual é fundamento para a estratégia de controle NGH – SSR, como discutido anteriormente. Ao se introduzir o TCSC no lugar do capacitor fixo pode-se perceber que imediatamente após a falta, em 1,5s, ele atua forçando que a tensão V_c possua 60Hz, reduzindo as componentes de frequência subsíncrona.

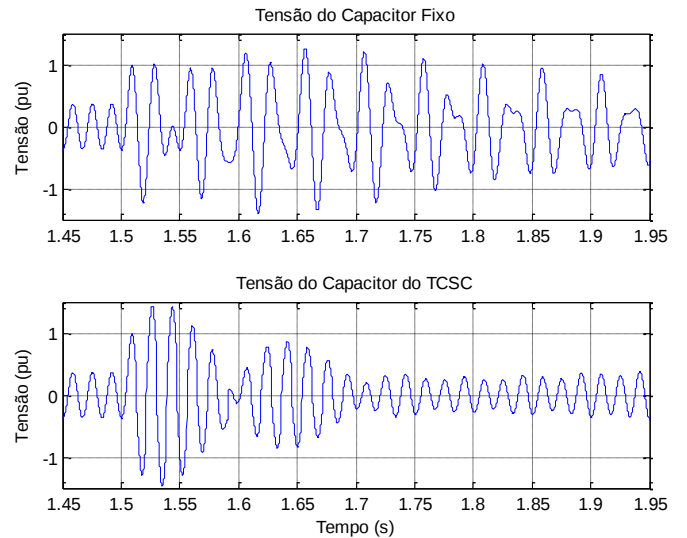


Fig. 13 – Tensões no capacitor fixo e no capacitor do TCSC.

V. CONCLUSÃO

A análise dos impactos do fenômeno de RSS é um aspecto importante de um sistema de geração/transmissão de energia elétrica, principalmente quando a matriz energética é térmica, pois o sistema mecânico desse tipo de geração possui vários conjuntos de massas rotativas, o que aumenta o número de

modos torcionais. Os efeitos da RSS devem ser mitigados, pois podem causar graves danos ao conjunto mecânico do gerador, devido ao aumento de torque decorrente de um distúrbio, ocasionando até uma destruição do eixo da máquina.

Nesse cenário, o TCSC se mostra um dispositivo muito eficaz na supressão dos efeitos da RSS em qualquer frequência abaixo da nominal da rede, reduzindo torques transitórios. Com um controle robusto e economicamente barato, ele possui como principal vantagem o uso de apenas variáveis locais podendo ser inserido em qualquer posição da linha de transmissão sem a necessidade de se comunicar com a unidade de geração para a coleta de dados do gerador como torque e velocidade, pois essas variáveis não são necessárias para o controle do TCSC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPES pelo auxílio financeiro proporcionado à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group, "Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No.6, pp. 1326-1334, June 1985.
- [2] Hingorani, Narain G., Gugyi, Laszlo, *Understanding FACTS – Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York, IEEE Press, 2000.
- [3] A. S. Luiz Pilotto, André Bianco e F. Willis Long, "Impacto f TCSC Control Methodologies on Subsynchronous Oscillations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, No. 1, Jan. 2003.
- [4] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group, "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. pas-96, no.5, pp. 1565-1572, sep/oct 1977.
- [5] Marcelo Aroca Tomim, "Análise de estabilidade em regime permanente de sistemas elétricos susceptíveis a ressonância subsíncrona," Dissertação de mestrado, IEE/DET, Universidade Federal de Itajubá, 2004.
- [6] A. A. Fouad e K. T. Khu, "Subsynchronous Resonance Zones in the IEEE 'Benchmark' Power System", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS – 97, No. 3, May/Jun 1978.
- [7] E. V. Larsen e D. H. Baker, "Series compensation operating limits – A new concept for SSR stability analysis", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS – 99, No. 5, pp. 1855-1863, Sep/Oct 1980.
- [8] Hingorani, N. G., Bhargava, B., Garrigue, G. F., Rodriguez, G. D., "Prototype NGH Subsynchronous Resonance Damping Scheme: Part 1 – Field Installation and Operating Experience", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRS-2, no. 4, November 1987, pp. 1034-1039.