

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**O Modelo de Injeção de Potência do TCSC e sua Aplicação
no Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações**

Leandro Momenté Almada

Orientador: Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo

Ilha Solteira – SP, Junho de 2012

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“O Modelo de Injeção de Potência do TCSC e sua Aplicação
no Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações”**

LEANDRO MOMENTÉ ALMADA

Orientador: Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP
Junho/2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

A444m Almada, Leandro Momenté.
O modelo de injeção de potência do TCSC e sua aplicação no estudo da estabilidade a pequenas perturbações / Leandro Momenté Almada.
Ilha Solteira: [s.n.], 2012
74 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2012

Orientador: Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo
Inclui bibliografia

1. Estabilidade a pequenas perturbações. 2. Estabilizadores suplementares. 3. FACTS. 4. Sistemas elétricos de potência. 5. Modelo de injeção de potência. 6. TCSC.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

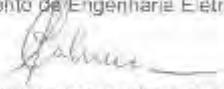
TÍTULO: O Modelo de Injeção de Potência do TCSC e sua Aplicação no Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações

AUTOR: LEANDRO MOMENTE ALMADA

ORIENTADOR: Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora


Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. GIDEON VILLAR FANDRO
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Paraná

Data da realização: 01 de junho de 2012.

À memória de meu avô Francisco Gregório Momenté, aos meus pais Vicente Alves Almada e Maria Lúcia Momenté Almada e ao meu tio Antônio Roberto Momenté.

Agradecimentos

Ao professor Percival Bueno de Araújo pela oportunidade e pela orientação, aos pesquisadores Danilo Basseto do Valle e Marcos Amorielli Furini pelo auxílio no desenvolvimento final deste trabalho.

À minha mãe Maria Lúcia Momenté Almada e ao meu tio Antônio Roberto Momenté pelo carinho e exemplo de perseverança e por compreenderem minha ausência nesta difícil etapa de suas vidas.

Ao meu pai Vicente Alves Almada e minha irmã Nayana por se tornarem pilares ainda mais fortes durante o desenvolvimento deste trabalho, compensando minha ausência.

À Luísa Balaniuc Nahas pelo suporte, carinho e compreensão, a todos os amigos de Ilha Solteira, que contribuíram indiretamente, proporcionando momentos de alegria e descontração que se tornaram injeções de animo para a conclusão deste trabalho e aos colegas de treino da MGTeam.

Aos meus alunos da Escola Técnica Estadual de Ilha Solteira com os quais aprendo mais do que ensino e ao colega de trabalho Estélio da Silva Amorim pelos conselhos profissionais pelo apoio.

Por fim, agradeço a Deus pela conclusão deste trabalho e por colocar pessoas tão especiais em meu caminho.

“O sucesso quase sempre se forma com uma parte de ideal e noventa e nove partes de suor na ação que o realiza.”

Francisco Cândido Xavier

Resumo

O principal objetivo deste trabalho é a utilização do modelo de injeção de potência do dispositivo FACTS TCSC (Thyris-tor Controlled Series Capacitor) na análise da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência. Para atingir este objetivo é deduzido o modelo de injeção de potência do TCSC, cujo equacionamento é adicionado ao Modelo de Sensibilidade de Po-tência (MSP), utilizado para representar o sistema elétrico de potência (SEP).

Para o amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência do SEP são utilizados dois modelos para os controladores, um que considera somente um ganho proporcional e outro comumente chamado na literatura de controlador suplementar de amortecimento (POD – Power Oscillation Damping) que contém também blocos de avanço-atraso de fase. Ambos os controladores devem atuar em conjunto com o TCSC para fornecer amortecimento ao SEP. Neste trabalho o sinal de entrada para os dois controladores é a variação da potência ativa na linha de transmissão de instalação do TCSC e seus parâmetros são ajustados de duas formas: pelo método dos resíduos e utilizando o toolbox rltool (SISO) do software MATLAB.

Para a validação do equacionamento desenvolvido foram realizadas simulações em um sistema de potência simétrico, de duas áreas, composto de 4 geradores e 10 barras.

Palavras-chave: Estabilidade a pequenas perturbações. Estabilizadores suplementares. FACTS. Sistemas elétricos de potência. TCSC. Modelo de injeção de potência.

Abstract

This work presents a power injection model for the Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), a Flexible AC Transmission Systems (FACTS) device, for small signal stability analysis in the electric power systems. To achieve such goal, the TCSC injection power model equations are summed up to the Power Sensitivity Model (PSM) which is used to represent the electric power system (EPS).

For the low frequency electromechanical oscillation damping, two models are used to represent the controller: 1. A proportional control and; 2. A supplementary control known as Power Oscillation Damping (POD), which also comprehends lead-lag blocks. Both controllers, previously cited, must work together with the TCSC to damp oscillations in the EPS. In this work, the input signal for both controllers is the real power flow variation in the transmission line where the TCSC is placed and the controllers parameters are adjusted using the residues method and the Matlab toolbox rltool (SISO).

Several simulations in a symmetrical, two areas power system, composed of four generators and ten busses, are provided in way to validate the power injection model and are discussed in this work.

Key-words: Small-signal stability. Supplementary stabilizers. FACTS. Electric power system. TCSC. Power injection model.

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação do TCSC	19
Figura 2: TCSC instalado entre duas barras quaisquer k e m.....	20
Figura 3: TCSC considerado como uma fonte de corrente	21
Figura 4: Injeções de corrente nas barras k e m	22
Figura 5: Modelo de injeção de potência do TCSC.....	24
Figura 6 – Potências no sistema multimáquinas considerando a atuação do TCSC	27
Figura7– Modelo Dinâmico do TCSC: Controlador de 1a Ordem	32
Figura8 Diagrama de blocos que representa a inserção do POD no MSP	36
Figura 9 Obtenção da equação de $\Delta X'_1$	37
Figura 10 Obtenção da equação de $\Delta X'_2$	37
Figura 11 Obtenção da equação de $\Delta X'_{POD}$	38
Figura 12 Representação do POD Inserido no Sistema Elétrico	46
Figura 13 Deslocamento do Autovalor de Interesse.....	47
Figura 14 Diagrama Unifilar do Sistema Simétrico de Duas Áreas.....	52
Figura 15 Desvio Angular: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$: Caso Base	53
Figura 16 Desvio Angular: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$: Compensação em 50% e 85%	56
Figura 17 Deslocamento do Modo Interárea: Controlador de 1a Ordem	58
Figura 18 Deslocamento do Modo de Oscilação Interárea: Controlador POD	61
Figura 19 Desvio Angular: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$: Método SISO e Método dos Resíduos	62
Figura 20 – Sistema Simétrico de Duas Áreas	72

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Autovalores Dominantes - Caso base	52
Tabela 2– RV-TCSC: Autovalores Dominantes	54
Tabela 3– MIP-TCSC: Autovalores Dominantes	54
Tabela 4– Autovalores Dominantes – 50% de Compensação	55
Tabela 5– Autovalores Dominantes – 85% de Compensação	55
Tabela 6– Autovalores Dominantes: Controlador de Primeira Ordem	57
Tabela 7– Parâmetros do POD	59
Tabela 8– Autovalores Dominantes: Método dos Resíduos.....	59
Tabela 9– Autovalores Dominantes: Método SISO	60
Tabela 10 – Dados dos Geradores	72
Tabela 11 – Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão.....	72
Tabela 12 – Dados das Linhas de Transmissão.....	73
Tabela 13 – Dados do Ponto de Operação Inicial - Caso Base	73

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ESP – Estabilizador de Sistema de Potência

FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems

MSP – Modelo de Sensibilidade de Potência

POD – Power Oscillation Damping

RAT – Regulador Automático de Tensão

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TCSC – Thyristor Controlled Series Compensator

\bar{x} - Fasor da variável x

X_{TCSC} – Reatância do TCSC

x_d – Reatância síncrona de eixo direto do gerador

x'_d – Reatância transitória de eixo direto do gerador

X_{km} – Reatância da linha de transmissão entre as barras k e m

x_q – Reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador

Z_{km} – Impedância da linha de transmissão entre as barras k e m

δ – Ângulo interno do gerador

θ_k – Ângulo da tensão da barra k

ω – Velocidade Angular do gerador

ω_0 – Velocidade síncrona – 377 rad/s

λ – Autovalor

φ – Autovetor direito

ψ – Autovetor esquerdo

[•] – Representa d/dt

Δ – Representa pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio

(r,m) – Sistema de coordenadas fixo, eixos real e imaginário

(d,q) – Sistema de coordenadas rotativo, eixos direto e em quadratura

Sumário

1. Introdução	12
2. Modelo de Injeção de Potência para o Dispositivo FACTS TCSC	17
2.1 Introdução	17
2.2 Dispositivos FACTS: Uma Visão Geral.....	17
2.3 O FACTS TCSC.....	19
2.4 Modelo de Injeção de Potência do TCSC.....	20
2.5 Linearização do Modelo de Injeção de Potência do TCSC	24
2.6 Balanço Nodal de Potências no MSP Considerando o TCSC	26
2.7 Representação no Espaço de Estados do MSP Considerando o TCSC.....	28
2.8 Conclusões.....	30
3. Equacionamento e Projeto dos Controladores Adicionais	32
3.1 Introdução.....	32
3.2 Modelo Dinâmico do TCSC: Controlador de Primeira Ordem.....	32
3.3 Modelo Dinâmico do TCSC: Controlador POD.....	36
3.4 Localização do TCSC e Ajuste de Parâmetros do Controlador.....	43
3.4.1 Método de Ajuste: Resíduos da Função de Transferência em Malha Aberta	45
3.4.2 Método de Ajuste: Diagrama de Nyquist e Root Locus (toolbox rltool)	47
3.5 Conclusões.....	49
4. Simulações e Resultados.....	51
4.1 Introdução.....	51
4.2 Sistema Simétrico de Duas Áreas.....	51
4.3 Validação do Modelo de Injeção de Potência do TCSC	53
4.4 Análise da Estabilidade: Compensação Estática	55
4.5 Análise da Estabilidade: Controlador de Primeira Ordem	56
4.6 Análise da Estabilidade: Controlador POD	58
4.7 Conclusões.....	62
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	64
Referências	68
Apêndice: Dados do Sistema Multimáquinas	73
Anexo: Artigo Submetido	75

1. Introdução

O sistema elétrico de potência pode ser dividido em três segmentos distintos denominados geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Mais recentemente tem-se falado em um quarto setor que é responsável pela comercialização da energia. Esta nova divisão é justificada pela forte presença da iniciativa privada nos três primeiros segmentos, fazendo necessária a criação de órgãos responsáveis por gerenciar e regular este mercado como proposto pela ANEEL (LIMA, 2007; QUIZHPI, 2011).

Entende-se por geração de energia a parte responsável pela transformação de uma determinada forma de energia em energia elétrica. No caso do Brasil a geração de energia é composta, em sua maioria, por grandes usinas hidroelétricas que, de forma geral, se encontram afastadas dos grandes centros de consumo. Sendo assim, a energia gerada precisa ser levada até os consumidores disto se encarrega o segmento da transmissão. Ao chegar ao grande centro, esta energia deve ser distribuída para as diferentes classes de consumidores e este é o papel da distribuição de energia elétrica.

Geração, transmissão e distribuição operam de forma dinâmica devido às modificações a que estão sujeitos que podem ter diversas causas, dentre elas a variação das cargas, distúrbios e até mesmo surtos inerentes de sua operação.

Estas variações ou perturbações do sistema elétrico causam na sua operação o período transitório que é caracterizado por mudanças nas suas grandezas como, por exemplo, a tensão terminal dos geradores e a velocidade angular dos rotores dos geradores.

Quando as oscilações têm amplitudes decrescentes elas tendem a desaparecer no decorrer do tempo e diz-se então que o sistema caminhou para um ponto de operação. Se esta condição de operação satisfizer os requisitos exigidos do sistema elétrico ele é denominado ponto de operação estável. Caso contrário diz-se que o sistema se tornou instável.

No estudo da estabilidade do sistema elétrico as perturbações são divididas em duas classes: grandes e pequenas perturbações.

Exemplos de grandes perturbações são o desligamento de uma linha de transmissão, perdas de grandes unidades geradoras ou entrada e saída de grandes cargas no sistema. O estudo da estabilidade a grandes perturbações é chamado de estabilidade transitória (IEEE/CIGRE JOINT TASK FORCE, 2003).

As pequenas perturbações podem ser entendidas como pequenas variações de carga na operação normal do sistema elétrico e, neste caso, o sistema opera em torno de um ponto de operação estável. O estudo da estabilidade a pequenas perturbações é chamado de estabilidade

dinâmica e, mais recentemente, estabilidade a pequenas perturbações (IEEE/CIGRE JOINT TASK FORCE, 2003).

No caso das pequenas perturbações (que é o foco de estudo deste trabalho) as equações que descrevem o sistema elétrico, de maneira geral não lineares, podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio e com isto, técnicas de análise do controle clássico podem ser utilizadas (OGATA, 2003).

Operando sob condições normais o sistema elétrico é frequentemente submetido a variações de carga, ou seja, é submetido a pequenas perturbações.

Estas pequenas perturbações, aliadas ao sistema elétrico operando com alto carregamento, sistema de transmissão fraco e reguladores de tensão de ganhos elevados e baixas constantes de tempo são capazes de introduzir oscilações de baixa frequência, de natureza eletromecânica, que podem levar o sistema à instabilidade (ANDERSON; FOUAD, 2003; DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981; KUNDUR, 1994).

As oscilações eletromecânicas podem ser classificadas em três grupos, de acordo com sua frequência de ocorrência.

As oscilações chamadas de modo local são caracterizadas por frequências entre 0,7 Hz e 2 Hz e estão associadas às oscilações das unidades de uma usina, com respeito ao restante do sistema. Geralmente ocorrem quando da existência de um sistema de transmissão fraco, entre a planta e o centro de carga.

As oscilações de modo interárea ocorrem nas frequências entre 0,2 Hz e 0,5 Hz e estão associadas às oscilações de um grupo de máquinas em uma parte do sistema contra outro grupo de máquinas em outra parte do sistema.

Também ocorrem oscilações do tipo intraplanta (frequências entre 1,5 Hz e 2,5 Hz) e são caracterizadas por oscilações que ocorrem entre os geradores de uma mesma usina. Este modo oscilatório não é detectado quando é feita a representação de uma usina por uma máquina equivalente.

No estudo da estabilidade a pequenas perturbações as oscilações de modo local e as oscilações de modo interárea são as de maior interesse.

Para o amortecimento das oscilações de modo local têm sido utilizado desde o final dos anos 60 os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs), fornecendo bons resultados para a operação do sistema elétrico (DEMELLO; CONCRDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981). Os ESPs também podem ser ajustados para o amortecimento de oscilações associadas a modos interárea. Entretanto, devido sua concepção inicial (amortecimento de modos locais) e localização (malha de controle do Regulador Automático de Tensão – RAT), podem

ocasionar situações de conflito para a operação segura dos sistemas de energia elétrica (PELLANDA et al., 2006; PESSANHA et al., 2007).

Com a crescente disseminação dos dispositivos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) (WATANABE et al., 1998; SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999) nos sistemas de energia elétrica, especialistas passaram a pesquisar o potencial destes dispositivos no amortecimento das oscilações eletromecânicas (MARTINS; LIMA, 1990; WANG et al., 1997).

Deve-se ressaltar que a aplicação inicial dos dispositivos FACTS foi concebida visando o controle dos fluxos de potência em rotas pré-estabelecidas e o aumento dos limites de transmissão dos sistemas existentes (WATANABE et al., 1998; SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 1999). Porém, estes dispositivos podem introduzir amortecimento desde que sejam equipados com controladores suplementares de amortecimento, designados POD (do inglês Power Oscillation Damping) e normalmente possuem estrutura idêntica ao ESP (WANG; SWIFT, 1998, CAI; ERLICH, 2005).

No que se refere à utilização dos dispositivos FACTS no amortecimento de oscilações eletromecânicas este trabalho possui como foco o TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) (WATANABE et al., 1998; YANG et al., 1998; SONG; JOHNS, 1999; DELROSSO et al., 2003).

O TCSC utiliza como princípio fundamental a injeção de uma reatância capacitiva variável, de forma a diminuir a queda de tensão indutiva da linha de transmissão e assim, aumentar a capacidade do sistema de transmissão e controlar o fluxo de potência. De maneira geral, trata-se de um compensador série composto por uma capacitância fixa em paralelo com um reator controlado a tiristores.

No Brasil existem dois TCSCs em operação na interligação dos sistemas elétricos Norte e Sul, um em cada extremidade da linha, para amortecer um modo interárea de baixa frequência (0,2 Hz) presente entre os sistemas (GAMA, 1999). São 1.276 quilômetros de linhas de transmissão em 500 kV ligando a subestação de Imperatriz, no Maranhão, à de Samambaia, no Distrito Federal. O Linhão, como foi apelidado o projeto, tem capacidade de transmitir até 1.300 MW em ambos os sentidos. Quando entrou em operação, a Linha Norte-Sul diminuiu o risco de corte de fornecimento no Brasil devido à sua capacidade de transmitir potência entre dois extremos do País, permitindo com isto um remanejamento na geração de acordo com os índices de chuvas em cada região.

Por intermédio das CARTAS ONS-222/300/2003 e 223/300/2003, de 30 de setembro de 2003, remetidas respectivamente para FURNAS e NOVATRANS, o Operador Nacional do

Sistema Elétrico (ONS) teceu comentários com relação às modificações necessárias no Sistema de Controle dos TCSCs de Serra da Mesa, destacando a importância estratégica dos dispositivos de forma a garantir a operação conjunta da Interligação Norte-Sul com segurança apresentando inclusive, uma proposta da estratégia de medição do fluxo global a ser utilizada pelo sistema de controle dos TCSCs.

Até o final de 2004, foram instalados três TCSCs na Ásia com a finalidade de melhorar a estabilidade das oscilações interárea (JIABO et al., 2005; YUE; BAILU, 2005). Além destas aplicações existem estudos voltados à aplicação de dispositivos FACTS no sistema elétrico europeu com o objetivo de amortecer os vários modos de oscilação interárea presentes neste sistema (NOROOZIAN; ANDERSSON, 1995).

Dos fatos apresentados fica comprovada a boa atuação do dispositivo TCSC na estabilidade dos sistemas elétricos de potência, o que torna imperativo a utilização de um modelo para se estudar a sua influência na operação dos sistemas elétricos.

Em vista disto neste trabalho é apresentado o Modelo de Injeção de Potência do TCSC (MIPTCSC), que será incorporado ao Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) (DECKMANN; DA COSTA, 1994), para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência.

Neste modelo a atuação do TCSC passa a ser considerada como injeções de potências ativa e reativa as quais são equacionadas e incorporadas ao balanço de potências do sistema elétrico. Como o objetivo é o estudo da estabilidade a pequenas perturbações, as equações de potência são linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio, resultando em um modelo linear. A dedução e implementação do Modelo de Injeção de Potência para o TCSC é uma das contribuições deste trabalho.

Os resultados são incorporados às equações do MSP original (que não considera a atuação do TCSC), resultando em um modelo modificado para o estudo de sensibilidade do sistema elétrico de potência com a presença do TCSC.

Para introduzir amortecimento adicional às oscilações do sistema elétrico são apresentadas duas estruturas de controladores suplementares para desempenhar esta função: uma estrutura de primeira ordem e outra denominada de Power Oscillation Damping (POD).

Para o ajuste de parâmetros do POD são utilizados o método dos resíduos e outro baseado no critério de estabilidade relativa de Nyquist (neste caso foram utilizados os *toolboxes* *rltool* e *nyquist* do aplicativo MATLAB®)

Com o modelo deduzido e implementado computacionalmente, foram realizadas simulações para se avaliar a estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de

potência, considerando a atuação do TCSC e seu controlador adicional.

Quanto à estrutura do trabalho, este é dividido como segue.

No Capítulo 2 é realizado o equacionamento do Modelo de Injeção de Potência do TCSC. Para isto são deduzidas as injeções de potência ativa e potência reativa provenientes do TCSC e também é feita a linearização destas equações, que são inseridas no MSP original.

O Capítulo 3 trata dos controladores suplementares (de primeira ordem e do tipo POD). O ajuste dos parâmetros do POD é obtido utilizando-se duas técnicas, o método dos resíduos da função de transferência e a partir dos toolboxes *nyquist* e *rltool* do software Matlab[®]. Neste Capítulo são mostrados os procedimentos para as duas técnicas de ajuste.

No Capítulo 4 são apresentadas as simulações e análise dos resultados obtidos a partir da implementação computacional do MIPTCSC considerando sua atuação estática (compensação reativa fixa da linha de transmissão) e em conjunto com os controladores propostos no Capítulo 3. Toda a implementação computacional é realizada utilizando-se o software MatLab[®].

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais do trabalho e também algumas propostas de trabalhos futuros. As Referências Bibliográficas utilizadas, o Apêndice e o Anexo, necessários para uma melhor compreensão do trabalho encerram o relatório.

2. Modelo de Injeção de Potência para o Dispositivo FACTS TCSC

2.1 Introdução

Neste Capítulo serão feitos alguns comentários a respeito dos dispositivos FACTS para que se tenha uma visão geral desta tecnologia e em especial para o TCSC, foco deste estudo.

Em seguida será apresentado o modelo de injeção de potência do dispositivo FACTS TCSC ligado entre duas barras quaisquer de um determinado sistema elétrico de potência (sem perda de generalidade, barra k e barra m). Nestas barras serão injetadas potências \dot{S}_k e \dot{S}_m que irão representar a atuação do dispositivo frente a variações do sistema elétrico.

Para o equacionamento das potências serão consideradas as tensões \bar{V}_k e \bar{V}_m das barras k e m , respectivamente. Será também considerada a reatância capacitiva X_{TCSC} do dispositivo.

Feito o equacionamento, as potências injetadas no sistema elétrico decorrentes da atuação do TCSC serão inseridas no balanço nodal de potências do MSP para se realizar a representação do sistema em espaço de estados.

2.2 Dispositivos FACTS: Uma Visão Geral

O aumento nos custos das instalações referentes à transmissão de energia, as restrições ambientais cada vez mais rígidas e a crescente demanda de energia elétrica tornam necessário e justificável o desenvolvimento de novas tecnologias que atuem no sentido de tornar o desempenho deste setor tão eficiente quanto possível. O desenvolvimento das tecnologias aplicadas à eletrônica de potência fez com que a indústria de componentes semicondutores fosse capaz de oferecer chaves eletrônicas que operam em alta tensão tornando possível utilizar equipamentos de compensação e condicionamento de energia em sistemas elétricos de potência.

Este desenvolvimento foi alavancado com o advento da transmissão de energia elétrica em regime contínuo em alta tensão (HVDC do inglês *High Voltage Direct Current*) durante a década de 60 onde eram e ainda são usados retificadores e inversores transistorizados e de

alta potência nos extremos de suas linhas. Em 1988 com o artigo de Hingorani, *Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems* são definidas as características físicas e operacionais dos dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) que recebem esse nome devido à sua capacidade de alterar os parâmetros que influenciam no fluxo de potência (módulo e fase de tensão e impedância) de forma rápida e contínua.

Esta atuação dinâmica que caracteriza estes dispositivos os torna capazes de atuar na regulação de tensão do sistema, reduzindo perdas nas linhas de transmissão e melhorando a capacidade de transmissão de potência das mesmas. São capazes também de atuar no amortecimento de oscilações inerentes da operação dinâmica do sistema aumentando seus limites de estabilidade. Em 1995 é introduzido o conceito “*Custom Power*” que se refere à qualidade da energia fornecida pelo sistema, levando em conta a presença de componentes harmônicas, variações e desequilíbrios de tensão no sistema onde também se verifica a atuação de tais dispositivos.

Os FACTS são divididos em quatro categorias de acordo com sua instalação nas linhas de transmissão. Segundo esta classificação existem os Controladores série, os Controladores em derivação, os Controladores combinados série-série e os Controladores combinados série-derivação.

Podem ainda ser classificados de acordo com a tecnologia da chave eletrônica utilizada. Neste caso, os de primeira geração utilizam tiristores de potência convencionais e são exemplos o SVC (*Static VAR Compensator*) e o TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*) dentre outros.

Na segunda geração são empregadas chaves eletrônicas com capacidade de controle do disparo e bloqueio como o GTO (*Gate Turn-off Thyristor*) e o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Fazem parte desta geração o SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) e o STATCOM (*Static Compensator*).

A terceira geração de equipamentos FACTS é composta pela integração dos equipamentos série e em derivação numa mesma linha de transmissão como é o caso do UPFC (*Unified Power Flow Controller*) no qual são combinados dois dispositivos, o SSSC e o STATCOM.

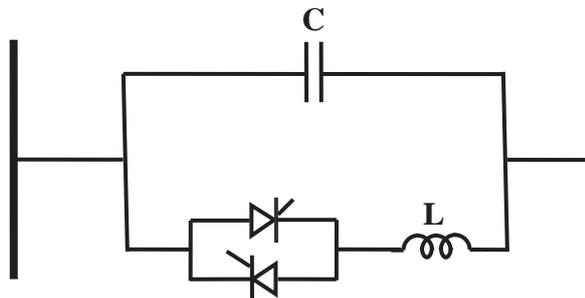
Pode-se considerar a existência de uma quarta geração de equipamentos FACTS na qual a integração dos equipamentos série e em derivação é feita em linhas diferentes. Isto resulta em equipamentos como o IPFC (*Interline Power Flow Controller*), o CSC (*Convertible Static Compensator*) e outras possibilidades.

Dentre os dispositivos citados o TCSC é o foco deste trabalho, sendo melhor analisado na sequência.

2.3 O FACTS TCSC

O TCSC consiste em um banco de capacitores ligado a um reator controlado por tiristores associados em antiparalelo (TCR), como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Representação do TCSC.



Fonte: Almada (2012)

Sua operação consiste em modificar a impedância da linha de transmissão onde é instalado, alterando o ângulo de disparo dos tiristores. Com isto consegue-se, por exemplo, ter um controle relativo do fluxo de potência ativa nesta linha para diferentes pontos de operação do sistema, assim se tornando uma ferramenta poderosa para o controle dinâmico do sistema elétrico de potência.

Os TCSCs têm três modos distintos de operação sendo o primeiro deles o modo “*Bypass*”, onde o ângulo de disparo utilizado nos tiristores é 90° . Nesta situação o reator assume toda a corrente da linha e atuando como um “*jumper*” para o banco de capacitores.

No modo tiristores bloqueados não há disparo dos tiristores e a compensação inserida pelo TCSC é representada pela reatância total de seu banco de capacitores.

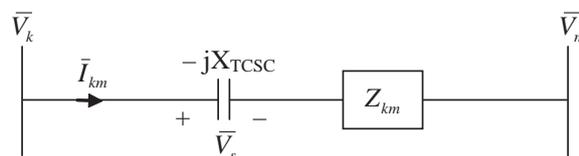
No terceiro modo de operação, chamado de controle contínuo ou modo “*Vernier*”, é possível controlar a compensação realizada através do ângulo de disparo dos tiristores, possibilitando ao TCSC fazer a compensação de reativo capacitivo ou reativo indutivo da linha de transmissão, de acordo com sua necessidade.

Tanto no primeiro como no terceiro modo de operação, não se deve operar com níveis de compensação elevados, pois há o risco da reatância do dispositivo entrar em ressonância com a reatância da linha de transmissão. São recomendados níveis entre 20% a 70% da reatância da linha (HINGORANI, 1988; SONG; JOHNS, 1999).

2.4 Modelo de Injeção de Potência do TCSC

Para a dedução do Modelo de Injeção de Potência do dispositivo FACTS TCSC localizado entre duas barras quaisquer de um determinado sistema elétrico de potência foi considerada a situação representada pela Figura 1, onde o TCSC se encontra entre duas barras genéricas denominadas k e m . Estas barras possuem, respectivamente, tensões $\bar{V}_k = V_k \angle \theta_k$ e $\bar{V}_m = V_m \angle \theta_m$. A ligação entre estas duas barras é feita através de uma linha de transmissão de impedância $Z_{km} = r + jx$, por onde circula a corrente \bar{I}_{km} . Em série com esta impedância é inserido o TCSC representado por uma reatância capacitiva X_{TCSC} submetida a uma tensão \bar{V}_s conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2: TCSC instalado entre duas barras quaisquer k e m .



Fonte: Almada (2012)

Da análise do circuito mostrado na Figura 2 pode ser escrita a equação (1).

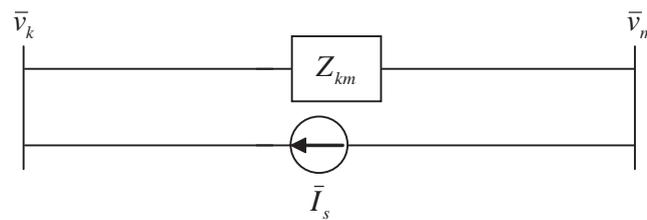
$$\bar{V}_k - j \cdot X_{TCSC} \cdot \bar{I}_{km} - (r + jx) \cdot \bar{I}_{km} - \bar{V}_m = 0 \quad (1)$$

Da equação (1) é possível obter a expressão da corrente do TCSC conforme mostrada na equação (2).

$$\bar{I}_{km} = \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r + j \cdot (x - X_{TCSC})} \quad (2)$$

Considerando a tensão \bar{V}_s aplicada à reatância X_{TCSC} como uma fonte de tensão e a transformando em uma fonte de corrente, obtém-se o sistema representado na Figura 3.

Figura 3: TCSC considerado como uma fonte de corrente.



Fonte: Almada (2012)

Analisando o circuito mostrado na Figura 3 é possível escrever a expressão da fonte de corrente \bar{I}_s como mostrada na equação (3).

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{r + j \cdot x} \quad (3)$$

Substituindo \bar{V}_s por $-j \cdot X_{TCSC} \cdot \bar{I}_{km}$ na equação (3), é obtida a equação (4), que relaciona a fonte de corrente que representa o TCSC com a corrente que circula pela linha de transmissão que liga a barra k e a barra m .

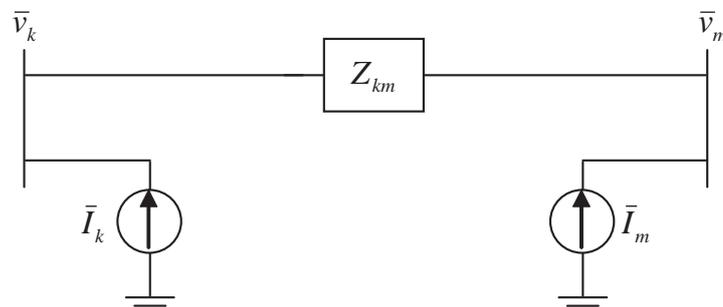
$$\bar{I}_s = \frac{-j \cdot X_{TCSC} \cdot \bar{I}_{km}}{r + j \cdot x} = \frac{-j \cdot X_{TCSC} \cdot (\bar{V}_k - \bar{V}_m)}{(r + j \cdot x) \cdot (r + j \cdot (x - X_{TCSC}))} \quad (4)$$

Considerando as injeções de corrente nas barras k e m o diagrama dado na Figura 3 é equivalente ao da Figura 4 onde \bar{I}_k e \bar{I}_m são dadas nas equações (5.a) e (5.b).

$$\bar{I}_k = \bar{I}_s \quad (5.a)$$

$$\bar{I}_m = -\bar{I}_s \quad (5.b)$$

Figura 4: Injeções de corrente nas barras k e m .



Fonte: Almada (2012)

A partir da representação mostrada na Figura 4 é possível se obter o conjunto de equações (6) que representam as injeções de potência em cada barra de instalação do TCSC.

$$\dot{S}_k = \bar{V}_k \bar{I}_k^* = P_k + jQ_k \quad (6.a)$$

$$\dot{S}_m = \bar{V}_m \bar{I}_m^* = P_m + jQ_m \quad (6.b)$$

As potências injetadas na barra k e na barra m pela atuação do TCSC podem ser obtidas substituindo-se no conjunto de equações (6) as expressões das tensões \bar{V}_k e \bar{V}_m e as equações (5) e na sequência a equação (4). Estas potências, decompostas em parcelas de potência ativa e potência reativa são mostradas nas equações (7).

$$P_k = C_1 \cdot \left\{ (V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (7.a)$$

$$Q_k = -C_1 \cdot \left\{ (V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (7.b)$$

$$P_m = C_1 \cdot \left\{ (V_m^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (r^2 \cdot X_{TCSC} + x \cdot X_{TCSC}^2 - x^2 \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (7.c)$$

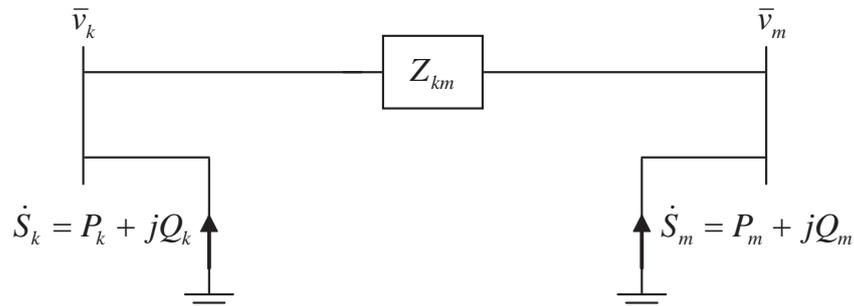
$$Q_m = -C_1 \cdot \left\{ (V_m^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC} - r \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (7.d)$$

A constante C_1 que está presente nas equações (7) é mostrada na equação (8).

$$C_1 = \frac{I}{(r^2 + x^2) [r^2 + (x - X_{TCSC})^2]} \quad (8)$$

Dessa forma os efeitos da compensação inserida pelo TCSC na linha que liga as barras k e m são analisados como potências injetadas nas barras, resultando no Modelo de Injeção de Potência para o TCSC (MIPTCSC) cujo diagrama é representado na Figura 5.

Figura 5: Modelo de injeção de potência do TCSC.



Fonte: Almada (2012)

2.5 Linearização do Modelo de Injeção de Potência do TCSC

Para a análise da estabilidade a pequenas perturbações, as equações que descrevem os componentes do sistema elétrico, geralmente não lineares, podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio. A linearização é feita expandindo as equações pela série infinita de Taylor e desprezando-se os termos de ordem maior ou igual a dois.

Aplicando este procedimento nas equações (7.a) e (7.b) são obtidas as parcelas de potências ativa (equação (9)) e reativa (equação (10)) da potência injetada na barra k .

$$\Delta P_k = A1_k \Delta \theta_{km} + A2_k \Delta V_k + A3_k \Delta V_m + A4_k \Delta X_{TCSC} \quad (9)$$

$$A1_k = C_1 \cdot \left\{ (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{cos} \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (9.a)$$

$$A2_k = C_1 \cdot \left\{ (2 \cdot V_k - V_m \cdot \text{cos} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (9.b)$$

$$A3_k = C_1 \cdot \left\{ (-V_k \cdot \text{cos} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_k \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (9.c)$$

$$A4_k = C_2 \cdot \left\{ (V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \text{cos} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \\ + C_1 \cdot \left\{ (V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \text{cos} \theta_{km}) \cdot (2 \cdot r \cdot X_{TCSC} - 2 \cdot r \cdot x) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x^2 - r^2 - 2 \cdot x \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (9.d)$$

$$\Delta Q_k = R1_k \Delta \theta_{km} + R2_k \Delta V_k + R3_k \Delta V_m + R4_k \Delta X_{TCSC} \quad (10)$$

$$R1_k = -C_1 \cdot \left\{ (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (10.a)$$

$$R2_k = -C_1 \cdot \left\{ (2 \cdot V_k - V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (10.b)$$

$$R3_k = C_1 \cdot \left\{ (V_k \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_k \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (10.c)$$

$$R4_k = C_2 \cdot \left\{ (V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) \right\} \\ - C_1 \cdot \left\{ (V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 - r^2 - 2 \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (2 \cdot r \cdot X_{TCSC} - 2 \cdot r \cdot x) \right\} \quad (10.d)$$

Nas equações (9.d) e (10.d) a constante C2 é mostrada na equação (11).

$$C2 = \frac{2(x - X_{TCSC})}{(r^2 + x^2) [r^2 + (x - X_{TCSC})^2]^2} \quad (11)$$

De maneira análoga a linearização das equações (7.c) e (7.d) fornece a parcela de potência ativa (equação (12)) e a parcela de potência reativa (equação (13)) da potência injetada na barra m em sua forma linear.

$$\Delta P_m = A1_m \Delta \theta_{km} + A2_m \Delta V_k + A3_m \Delta V_m + A4_m \Delta X_{TCSC} \quad (12)$$

$$A1_m = C_1 \cdot \left\{ (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x \cdot X_{TCSC}^2 + r^2 \cdot X_{TCSC} - x^2 \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (12.a)$$

$$A2_m = C_1 \cdot \left\{ (-V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2 \cdot r \cdot x \cdot X_{TCSC}) - (V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x \cdot X_{TCSC}^2 + r^2 \cdot X_{TCSC} - x^2 \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (12.b)$$

$$A3_m = C_1 \cdot \left\{ (2.V_m - V_k \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2.r.x.X_{TCSC}) - (V_k \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} + r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (12.c)$$

$$A4_m = C_2 \cdot \left\{ (V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (r \cdot X_{TCSC}^2 - 2.r.x.X_{TCSC}) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x \cdot X_{TCSC}^2 + r^2 \cdot X_{TCSC} - x^2 \cdot X_{TCSC}) \right\} \\ + C_1 \cdot \left\{ (V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (2.r \cdot X_{TCSC} - 2.r.x) - (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (2.x \cdot X_{TCSC} + r^2 - x^2) \right\} \quad (12.d)$$

$$\Delta Q_m = R1_m \Delta \theta_{km} + R2_m \Delta V_k + R3_m \Delta V_m + R4_m \Delta X_{TCSC} \quad (13)$$

$$R1_m = -C_1 \cdot \left\{ (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (2.r.x \cdot X_{TCSC} - r \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (13.a)$$

$$R2_m = -C_1 \cdot \left\{ (-V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (2.r.x \cdot X_{TCSC} - r \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (13.b)$$

$$R3_m = -C_1 \cdot \left\{ (2.V_m - V_k \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_k \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (2.r.x \cdot X_{TCSC} - r \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \quad (13.c)$$

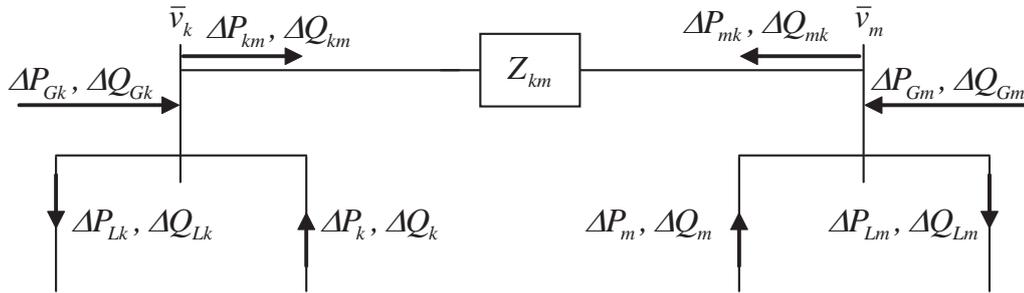
$$R4_m = C_2 \cdot \left\{ (V_m^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 \cdot X_{TCSC} - r^2 \cdot X_{TCSC} - x \cdot X_{TCSC}^2) + (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (2.r.x \cdot X_{TCSC} - r \cdot X_{TCSC}^2) \right\} \\ - C_1 \cdot \left\{ (V_m^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \cdot (x^2 - r^2 - 2.x \cdot X_{TCSC}) + (V_k \cdot V_m \cdot \text{sen} \theta_{km}) \cdot (2.r.x - 2.r \cdot X_{TCSC}) \right\} \quad (13.d)$$

Nas equações (12.d) e (13.d) a constante C2 é a mesma mostrada na equação (11).

2.6 Balanço Nodal de Potências no MSP Considerando o TCSC

Para a realização do balanço nodal de potências do sistema multimáquinas com a atuação do TCSC instalado entre as barras k e m considere o diagrama mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Potências no sistema multimáquinas considerando a atuação do TCSC.



Fonte: Almada (2012)

No diagrama da Figura 2.6 ΔP_{Gk} e ΔQ_{Gk} são as potências ativa e reativa na sua forma incremental geradas na barra k . De maneira análoga, ΔP_{Gm} e ΔQ_{Gm} são as potências ativa e reativa geradas na barra m . $(\Delta P_{Lk}, \Delta Q_{Lk})$ e $(\Delta P_{Lm}, \Delta Q_{Lm})$ são eventuais cargas ligadas nas barras k e m . O fluxo de potência da barra k para a barra m é $(\Delta P_{km}, \Delta Q_{km})$. O fluxo de potência inverso é $(\Delta P_{mk}, \Delta Q_{mk})$. Destaca-se que o TCSC instalado entre as barras k e m é representado pelas injeções de potência $(\Delta P_k, \Delta Q_k)$ e $(\Delta P_m, \Delta Q_m)$.

Com estas definições e baseado no diagrama mostrado na Figura 6, o balanço nodal de potência na barra k é dado pelas equações (14).

$$\Delta P_{Gk} + \Delta P_k - \Delta P_{km} - \Delta P_{Lk} = 0 \quad (14.a)$$

$$\Delta Q_{Gk} + \Delta Q_k - \Delta Q_{km} - \Delta Q_{Lk} = 0 \quad (14.b)$$

De maneira análoga o balanço nodal de potência para a barra m é mostrado nas equações (15).

$$\Delta P_{Gm} + \Delta P_m - \Delta P_{mk} - \Delta P_{Lm} = 0 \quad (15.a)$$

$$\Delta Q_{Gm} + \Delta Q_m - \Delta Q_{mk} - \Delta Q_{Lm} = 0 \quad (15.b)$$

2.7 Representação do MSP no Espaço de Estado Considerando o TCSC

Para a representação no espaço de estados do sistema multimáquinas representado pelo MSP e considerando a atuação de um TCSC modelado por injeções de potências, as equações (14) e (15) devem ser inseridas nas equações do MSP original (DECKMANN; COSTA, 1994; FURINI, 2008).

Esta representação é dada no conjunto de equações (16) para um sistema multimáquinas constituído de ng geradores e nb barras.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J11_{(4ng \times 4ng)} & J12_{(4ng \times 2nb)} \\ J21_{(2nb \times 4ng)} & J22_{MIP(2nb \times 2nb)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{MIP(4ng \times 2ng+2nb)} \\ B2_{MIP(2nb \times 2ng+2nb)} \end{bmatrix} \Delta u \quad (16)$$

$$\Delta x = \left[\begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \cdots \Delta \omega_{ng} \\ \Delta \delta_1 \cdots \Delta \delta_{ng} \\ \Delta E'_{q1} \cdots \Delta E'_{q_{ng}} \\ \Delta E_{fd1} \cdots \Delta E_{fd_{ng}} \end{bmatrix} \right]^t \quad (16.a)$$

$$\Delta z = \left[\begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \cdots \Delta \theta_{nb} \\ \Delta V_1 \cdots \Delta V_{nb} \end{bmatrix} \right]^t \quad (16.b)$$

$$\Delta u = \left[\begin{bmatrix} \Delta P_{m1} \cdots \Delta P_{m_{ng}} \\ \Delta V_{ref1} \cdots \Delta V_{ref_{ng}} \\ \Delta P_{L1} \cdots \Delta P_{L_{nb}} \\ \Delta Q_{L1} \cdots \Delta Q_{L_{nb}} \\ \Delta X_{TCSC} \end{bmatrix} \right]^t \quad (16.c)$$

Nas equações (16) Δx e Δz são os vetores de variáveis de estados e variáveis algébricas, respectivamente. O vetor Δu é o vetor de entradas do sistema multimáquinas representado pelo MSP considerando a atuação de um TCSC modelado por injeções de potências.

No vetor de entradas as grandezas ΔP_{Li} e ΔQ_{Li} ($i = 1, nb$) são as variações de possíveis cargas ativas e reativas ligadas à barra i . ΔX_{TCSC} se refere às variações da reatância capacitiva inserida pelo TCSC (observe que como não se está considerando nenhum controlador para o TCSC, a reatância ΔX_{TCSC} é tratada como uma entrada para o sistema MBI).

Devido à consideração das equações (14) e (15) as matrizes $J22$, $B1$ e $B2$ do MSP

original são modificadas para $J22_{MIP}$, $B1_{MIP}$ e $B2_{MIP}$, respectivamente.

Na matriz $J22_{MIP}$ são consideradas as constantes do MIPTCSC $A1_k$ (relativa à diferença entre as fases das tensões das barras k e m), $A2_k$ e $A3_k$ que se referem aos módulos destas tensões. A inserção destas constantes em $J22_{MIP}$ é feita somando-se seus valores aos elementos da matriz $J22$ original, como mostrado nas equações (17).

$$\begin{cases} J22(k, k)_{MIP} = J22(k, k) + A1_k \\ J22(k, m)_{MIP} = J22(k, m) - A1_k \end{cases} \quad (17.a)$$

$$\begin{cases} J22(k, nb + k)_{MIP} = J22(k, nb + k) + A3_k \\ J22(k, nb + m)_{MIP} = J22(k, nb + m) + A3_k \end{cases} \quad (17.b)$$

$$\begin{cases} J22(m, k)_{MIP} = J22(m, k) - A1_m \\ J22(m, m)_{MIP} = J22(m, m) + A1_m \end{cases} \quad (17.c)$$

$$\begin{cases} J22(m, nb + k)_{MIP} = J22(m, nb + k) + A2_m \\ J22(m, nb + m)_{MIP} = J22(m, nb + m) + A3_m \end{cases} \quad (17.d)$$

$$\begin{cases} J22(nb + k, k)_{MIP} = J22(nb + k, k) + R1_k \\ J22(nb + k, m)_{MIP} = J22(nb + k, m) - R1_k \end{cases} \quad (17.e)$$

$$\begin{cases} J22(nb + k, nb + k)_{MIP} = J22(nb + k, nb + k) + R2_k \\ J22(nb + k, nb + m)_{MIP} = J22(nb + k, nb + m) + R3_k \end{cases} \quad (17.f)$$

$$\begin{cases} J22(nb + m, nb + k)_{MIP} = J22(nb + m, nb + k) - R1_m \\ J22(nb + m, nb + m)_{MIP} = J22(nb + m, nb + m) + R1_m \end{cases} \quad (17.g)$$

$$\begin{cases} J22(nb + m, nb + k)_{MIP} = J22(nb + m, nb + k) + R2_m \\ J22(nb + m, nb + m)_{MIP} = J22(nb + m, nb + m) + R3_m \end{cases} \quad (17.h)$$

A matriz $B2_{MIP}$ é obtida pela soma das constantes $A4_k$, $A4_m$, $R4_k$ e $R4_m$ a determinados elementos da matriz $B2$ do MSP original, de acordo com o mostrado nas equações (18).

$$[B2(k, n_{TCSC})_{MIP}] = B2(k, n_{TCSC}) + A4_k \quad (18.a)$$

$$\left[B2(m, n_{TCSC})_{MIP} \right] = B2(k, n_{TCSC}) + A_{4m} \quad (18.b)$$

$$\left[B2(nb + k, n_{TCSC})_{MIP} \right] = B2(nb + k, n_{TCSC}) + R_{4k} \quad (18.c)$$

$$\left[B2(nb + m, n_{TCSC})_{MIP} \right] = B2(nb + m, n_{TCSC}) + R_{4m} \quad (18.d)$$

Quanto à matriz $B1_{MIP}$, esta é obtida pela introdução de uma coluna de zeros na matriz $B1$ do MSP original para se considerar a nova entrada ΔX_{TCSC} .

A representação no espaço de estados do sistema multimáquinas considerando a atuação de um TCSC é obtida pela eliminação das variáveis algébricas Δz do conjunto de equações (16). Esta operação resulta no conjunto de equações (19).

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (19)$$

$$A = J11 - J12 J22_{MIP}^{-1} J21 \quad (19.a)$$

$$B = B1 - J12 J22_{MIP}^{-1} B2_{MIP} \quad (19.b)$$

2.8 Conclusões

Neste Capítulo foi realizada a dedução do modelo de injeção de potência para o dispositivo FACTS TCSC para sua representação no Modelo de Sensibilidade de Potência.

Com a modelagem utilizada o TCSC fica representado por duas injeções de potência nas barras ligadas pela linha de transmissão onde está instalado o dispositivo (barra k e barra m , barra inicial e final de instalação, respectivamente). Estas potências fictícias são representadas por P_k e P_m (potências ativas) e Q_k e Q_m (potências reativas).

A linearização das equações que descrevem estas potências fornece quatro coeficientes de sensibilidade de potência ativa ($A1_k$, $A2_k$, $A3_k$ e $A4_k$) para P_k e quatro coeficientes de sensibilidade de potência ativa ($A1_m$, $A2_m$, $A3_m$ e $A4_m$) para P_m . Analogamente são definidos quatro coeficientes de potência reativa para Q_k ($R1_k$, $R2_k$, $R3_k$ e $R4_k$) e quatro coeficientes de potência reativa para Q_m ($R1_m$, $R2_m$, $R3_m$ e $R4_m$).

Uma vez determinado o modelo de injeção de potência para o TCSC, este foi introduzido nas equações do Modelo de Sensibilidade de Potência original (que não considera a atuação do TCSC) para sua representação no espaço de estados.

A inserção deste modelo foi realizada pela modificação de alguns elementos das matrizes do MSP original, preservando todo o equacionamento e toda a estrutura anteriores.

3. Equacionamento e Projeto dos Controladores Adicionais

3.1 Introdução

Neste Capítulo serão apresentados e equacionados dois modelos de controladores adicionais que serão acoplados ao TCSC com a função de introduzir amortecimento suplementar às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência.

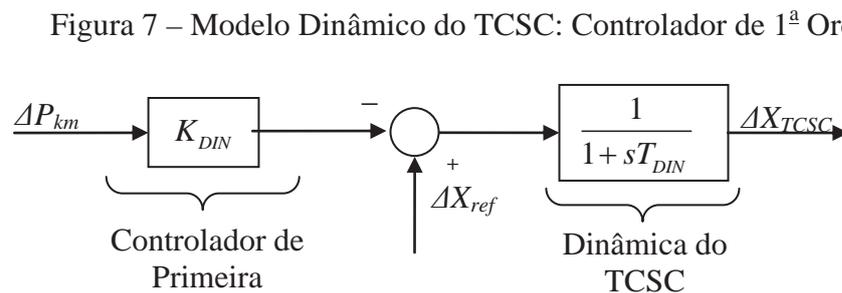
Em um primeiro momento o controlador será representado por um bloco de primeira ordem de ganho K_{DIN} e constante de tempo T_{DIN} . Na sequência é apresentado um controlador do tipo POD formado por um ganho e blocos de compensação de fase.

Em ambos os casos as equações que representam o controlador são incorporadas às equações do MSP com a consideração do TCSC cujo estudo foi realizado no Capítulo 2.

Dois técnicas de ajuste de parâmetros para o controlador POD são apresentadas, baseadas na teoria do controle clássico. Uma delas é o método dos resíduos da função de transferência de malha aberta. Outra maneira de ajustar os parâmetros do POD será através da utilização do toolbox *rltool* (SISO) do Matlab[®] que utiliza conceitos do critério de Nyquist e Lugar das Raízes (Root Locus).

3.2 Modelo Dinâmico do TCSC: Controlador de Primeira Ordem

Considere que o modelo dinâmico do TCSC seja representado por um controlador de primeira ordem de ganho K_{DIN} e constante de tempo T_{DIN} , conforme o diagrama mostrado na Figura 7.



Fonte: Furini (2008)

No controlador mostrado na Figura 7 são tomadas como sinal de entrada as variações da potência ativa da linha de instalação do TCSC (ΔP_{km}) e sua saída são as variações da reatância X_{TCSC} , que será ajustada de acordo com as necessidades do sistema elétrico.

Da análise do diagrama de blocos da Figura 7 é possível se obter a equação que rege o

comportamento dinâmico da compensação inserida pelo TCSC (ΔX_{TCSC}) como mostra a equação (20).

$$\Delta \dot{X}_{TCSC} = \frac{1}{T_{DIN}} \cdot [K_{DIN} \cdot (\Delta X_{ref} - \Delta P_{km}) - \Delta X_{TCSC}] \quad (20)$$

A expressão da variação do fluxo de potência ativa na linha de transmissão de instalação do TCSC é obtida da dedução do MSP (Deckmann e da Costa, 1994; Furini, 2008) e é mostrada na equação (21).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m \quad (21)$$

A substituição da equação (21) na equação (20) fornece a equação dinâmica da variável ΔX_{TCSC} (equação (22)).

$$\Delta \dot{X}_{TCSC} = K1 \cdot \Delta X_{TCSC} + K2 \cdot \Delta \theta_{km} + K3 \cdot \Delta V_k + K4 \cdot \Delta V_m + K5 \cdot \Delta X_{ref} \quad (22)$$

$$K1 = -\frac{1}{T_{DIN}} \quad (22.a)$$

$$K2 = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} A1_{km} \quad (22.b)$$

$$K3 = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} A2_{km} \quad (22.c)$$

$$K4 = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} A3_{km} \quad (22.d)$$

$$K5 = \frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \quad (22.d)$$

Agrupando-se a equação (22) ao conjunto de equações (16) obtém-se a representação

do sistema multimáquinas no espaço de estados com ng geradores e nb barras representado pelo MSP e considerando a atuação de um TCSC modelado por injeções de potências e com um controlador de primeira ordem, conforme as equações (23).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J11_{CI(4ng+1 \times 4ng+1)} & J12_{CI(4ng+1 \times 2nb)} \\ J21_{CI(2nb \times 4ng+1)} & J22_{MIP(2nb \times 2nb)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{CI(4ng+1 \times 2ng+2nb+1)} \\ B2_{CI(2nb \times 2ng+2nb+1)} \end{bmatrix} \Delta u \quad (23)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} [\Delta \omega_1 \cdots \Delta \omega_{ng}] & [\Delta \delta_1 \cdots \Delta \delta_{ng}] & [\Delta E'_{q1} \cdots \Delta E'_{q_{ng}}] & [\Delta E_{fd1} \cdots \Delta E_{fd_{ng}}] & \Delta X_{TCSC} \end{bmatrix}^t \quad (23.a)$$

$$\Delta z = [[\Delta \theta_1 \cdots \Delta \theta_{nb}] \quad [\Delta V_1 \cdots \Delta V_{nb}]]^t \quad (23.b)$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} [\Delta P_{m1} \cdots \Delta P_{m_{ng}}] & [\Delta V_{ref1} \cdots \Delta V_{ref_{ng}}] & [\Delta P_{L1} \cdots \Delta P_{L_{nb}}] & [\Delta Q_{L1} \cdots \Delta Q_{L_{nb}}] & \Delta X_{ref} \end{bmatrix}^t \quad (23.c)$$

Observe que nas equações (23) a grandeza ΔX_{TCSC} é uma variável de estado, diferentemente do que ocorria nas equações (16) quando era considerada uma entrada para o sistema multimáquinas. Este fato é decorrência da consideração da equação (22) que também modifica as matrizes $J11$, $J12$, $J21$, $B1_{MIP}$ e $B2_{MIP}$ para $J11_{CI}$, $J12_{CI}$, $J21_{CI}$, $B1_{CI}$ e $B2_{CI}$.

A matriz $J11_{CI}$ é definida na equação (24) e observe que a constante KI é inserida na posição referente à variável de estado ΔX_{TCSC} .

$$J11_{CI} = \begin{bmatrix} J11_{4ng \times 4ng} & [0]_{4ng \times 1} \\ [0]_{1 \times 4ng} & KI \end{bmatrix} \quad (24)$$

A matriz $J12_{CI}$ possui o mesmo número de colunas de $J12$, mas possui uma linha a mais, como mostrada na equação (25).

$$J12_{CI} = \begin{bmatrix} J12_{4ng \times 2nb} \\ [J_{A12}]_{1 \times 2nb} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$J_{A12}(k) = K2 \quad (25.a)$$

$$J_{A12}(m) = -K2 \quad (25.b)$$

$$J_{A12}(nb + k) = K3 \quad (25.c)$$

$$J_{A12}(nb + m) = K4 \quad (25.d)$$

A matriz $J21_{C1}$ (equação (26)) possui o mesmo número de linhas que $J21$ e uma coluna a mais, denominada de JA_{21} .

$$J21_{C1} = \begin{bmatrix} J21_{2nb \times 4ng} & [JA_{21}]_{2nb \times 1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$J_{A21}(k) = A4_k \quad (26.a)$$

$$J_{A21}(m) = A4_m \quad (26.b)$$

$$J_{A21}(nb + k) = R4_k \quad (26.c)$$

$$J_{A21}(nb + m) = R4_m \quad (26.d)$$

A matriz $B1_{C1}$ possui uma linha e uma coluna a mais que a matriz $B1$ do MSP original (DECKMANN; COSTA, 1994; FURINI, 2008) e é definida na equação (27).

$$B1_{C1} = \begin{bmatrix} B1_{4ng \times 2ng+2nb} & [0]_{4ng \times 1} \\ [0]_{1 \times 2ng+2nb} & K5 \end{bmatrix} \quad (27)$$

A matriz $B2_{C1}$ é obtida acrescentando uma coluna de zeros à matriz $B2$ do MSP original (Deckmann e da Costa, 1994; Furini 2008) como mostrada na equação (28).

$$B2_{C1} = \begin{bmatrix} B2 & [0]_{2nb \times 1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Com estas definições a representação em espaço de estados do sistema multimáquinas

com n_g geradores e n_b barras considerando a atuação de um TCSC equipado com um controlador suplementar de primeira ordem pode ser obtida como na equação (29).

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (29)$$

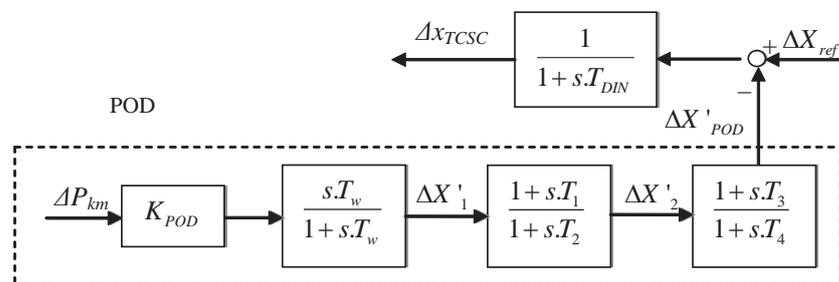
$$A = J11_{C1} - J12_{C1} J22_{MP}^{-1} J21_{C1} \quad (29.a)$$

$$B = B1_{C1} - J12_{C1} J22_{MP}^{-1} B2_{C1} \quad (29.b)$$

3.3 Modelo Dinâmico do TCSC: Controlador POD

Neste trabalho será utilizado um controlador do tipo POD que atuará em conjunto com o TCSC com a função de introduzir amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência, cuja estrutura é mostrada na Figura 8 (WANG; SWIFT, 1998; YU; E BAILU, 2003; CAI; ERLICH, 2005; FURINI; ARAUJO, 2008).

Figura 8 – Diagrama de blocos que representa a inserção do POD no MSP.



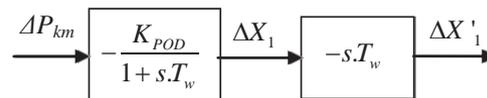
Fonte: Furini (2008)

O POD é composto basicamente de um ganho K_{POD} ajustado para fornecer a quantidade de amortecimento requerido; um bloco washout, capaz de bloquear altas frequências e zerar a atuação do controlador na condição de regime permanente, definido pela constante de tempo T_w e por fim, uma associação de blocos de avanço-atraso de fase, definidos pelas constantes de tempo $T_1=T_3$ e $T_2=T_4$, proporcionando a compensação de fase adequada para o melhor desempenho do controlador (KUNDUR et al., 1989).

O fluxo de potência ativa entre as barras de instalação do TCSC é o sinal de entrada especificado para este controlador. A escolha deste sinal se deve ao fato de que esta é uma grandeza disponível localmente, além de possuir alta observabilidade para os modos interárea de oscilação (YANG; LIU, 1998; FURINI; ARAUJO, 2008).

Para a determinação da variável auxiliar ΔX_1 considere o diagrama de blocos mostrado na Figura 9 que é, por conveniência, uma modificação do diagrama de blocos mostrado na Figura 8.

Figura 9 – Obtenção da equação de $\Delta X'_1$.



Fonte: Almada (2012)

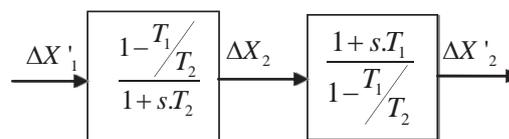
A redução do diagrama de blocos mostrado na Figura 9 fornece as equações (30) e (31).

$$\Delta \dot{X}'_1 = -\frac{1}{T_w} [K_{POD} \cdot \Delta P_{km} + \Delta X'_1] \quad (30)$$

$$\Delta X'_1 = K_{POD} \cdot \Delta P_{km} + \Delta X_1 \quad (31)$$

A equação de $\Delta X'_2$ é obtida de maneira semelhante, modificando o primeiro bloco de avanço-atraso de fase como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Obtenção da equação de $\Delta X'_2$.



Fonte: Almada (2012)

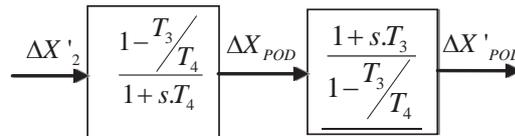
A redução do diagrama da Figura 10 fornece as equações (32) e (33).

$$\Delta \dot{X}'_2 = \frac{1}{T_2} \left[\left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) - \Delta X_2 \right] \quad (32)$$

$$\Delta X'_2 = \Delta X_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) \quad (33)$$

As equações (34) e (35) completam o equacionamento do POD (variável $\Delta X'_{POD}$), obtidas pela modificação do segundo bloco de avanço-atraso de fase como ilustra a Figura (11).

Figura 11 – Obtenção da equação de $\Delta X'_{POD}$.



Fonte: Almada (2012)

$$\Delta \dot{X}'_{POD} = \frac{1}{T_4} \left\{ \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \left[\Delta X_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) \right] - \Delta X_{POD} \right\} \quad (34)$$

$$\Delta X'_{POD} = \Delta X_{POD} + \frac{T_3}{T_4} \left[\Delta X_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) \right] \quad (35)$$

A saída ΔX_{TCSC} é obtida a partir do diagrama de blocos mostrado na Figura 8 e é mostrada na equação (36).

$$\Delta \dot{X}'_{TCSC} = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \left\{ \Delta X_{POD} + \frac{T_3}{T_4} \left[\Delta X_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) \right] \right\} - \frac{1}{T_{DIN}} \Delta X_{TCSC} + \frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \Delta X_{ref} \quad (36)$$

Substituindo-se a equação (21) nas equações (30), (32), (34) e (36) são obtidas as equações (37), (38), (39) e (40), respectivamente.

$$\Delta \dot{X}'_1 = K_{11} \Delta X_1 + K_{12} \Delta \theta_{km} + K_{13} \Delta V_k + K_{14} \Delta V_m \quad (37)$$

$$K_{11} = -\frac{1}{T_w} \quad (37.a)$$

$$K_{12} = -\frac{K_{POD}}{T_w} AI_{km} \quad (37.b)$$

$$K_{13} = -\frac{K_{POD}}{T_w} A2_{km} \quad (37.c)$$

$$K_{14} = -\frac{K_{POD}}{T_w} A3_{km} \quad (37.d)$$

$$\Delta\dot{X}_2 = K_{21}\Delta X_1 + K_{22}\Delta X_2 + K_{23}\Delta\theta_{km} + K_{24}\Delta V_k + K_{25}\Delta V_m \quad (38)$$

$$K_{21} = \frac{1}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \quad (38.a)$$

$$K_{22} = -\frac{1}{T_2} \quad (38.b)$$

$$K_{23} = \frac{K_{POD}}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) AI_{km} \quad (38.c)$$

$$K_{24} = \frac{K_{POD}}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) A2_{km} \quad (38.d)$$

$$K_{25} = \frac{K_{POD}}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) A3_{km} \quad (38.e)$$

$$\Delta\dot{X}_{POD} = K_{P1}\Delta X_1 + K_{P2}\Delta X_2 + K_{P3}\Delta X_{POD} + K_{P4}\Delta\theta_{km} + K_{P5}\Delta V_k + K_{P6}\Delta V_m \quad (39)$$

$$K_{P1} = \frac{1}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{T_1}{T_2} \quad (39.a)$$

$$K_{P2} = \frac{1}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \quad (39.b)$$

$$K_{P3} = \frac{1}{T_4} \quad (39.c)$$

$$K_{P4} = \frac{K_{POD}}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{T_1}{T_2} AI_{km} \quad (39.d)$$

$$K_{P5} = \frac{K_{POD}}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{T_1}{T_2} A2_{km} \quad (39.e)$$

$$K_{P6} = \frac{K_{POD}}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{T_1}{T_2} A3_{km} \quad (39.f)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{X}_{TCSC} = & K_{S1} \Delta X_1 + K_{S2} \Delta X_2 + K_{S3} \Delta X_{POD} + K_{S4} \Delta X_{TCSC} + K_{S5} \Delta \theta_{km} + K_{S6} \Delta V_k + \\ & + K_{S7} \Delta V_m + K_{S8} \Delta X_{ref} \end{aligned} \quad (40)$$

$$K_{S1} = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} \quad (40.a)$$

$$K_{S2} = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \frac{T_3}{T_4} \quad (40.b)$$

$$K_{S3} = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \quad (40.c)$$

$$K_{S4} = -\frac{1}{T_{DIN}} \quad (40.d)$$

$$K_{S5} = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} K_{POD} A1_{km} \quad (40.e)$$

$$K_{S6} = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} K_{POD} A2_{km} \quad (40.f)$$

$$K_{S7} = -\frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} K_{POD} A3_{km} \quad (40.g)$$

$$K_{S8} = \frac{K_{DIN}}{T_{DIN}} \quad (40.h)$$

Agrupando-se as equações (37), (38), (39) e (40) ao conjunto de equações (16) obtém-se a representação no espaço de estados do sistema multimáquinas com ng geradores e nb barras representado pelo MSP e considerando a atuação de um TCSC modelado por injeções de potências e com um controlador do tipo POD, conforme as equações (41).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J11_{POD(4ng+4x4ng+4)} & J12_{POD(4ng+4x2nb)} \\ J21_{POD(2nbx4ng+4)} & J22_{MIP(2nbx2nb)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_{POD(4ng+4x2ng+2nb+1)} \\ B2_{POD(2nbx2ng+2nb+1)} \end{bmatrix} \Delta u \quad (41)$$

$$\Delta x = \left[\begin{array}{cccccccc} \Delta\omega & \Delta\delta & \Delta e'_q & \Delta e_{fd} & \Delta X_1 & \Delta X_2 & \Delta X_{POD} & \Delta X_{TCSC} \end{array} \right]^t \quad (41.a)$$

$$\Delta z = \left[\begin{array}{cc} \Delta\theta_1 \cdots \Delta\theta_{nb} & \Delta V_1 \cdots \Delta V_{nb} \end{array} \right]^t \quad (41.b)$$

$$\Delta u = \left[\begin{array}{cccccc} \Delta P_{m1} \cdots \Delta P_{m_{ng}} & \Delta V_{ref1} \cdots \Delta V_{ref_{ng}} & \Delta P_{L1} \cdots \Delta P_{L_{nb}} & \Delta Q_{L1} \cdots \Delta Q_{L_{nb}} & \Delta X_{ref} \end{array} \right]^t \quad (41.c)$$

Observe que nas equações (41) o vetor Δx contém as quatro variáveis de estado introduzidas pelo POD e que a matriz $J_{22_{MIP}}$ permanece inalterada.

A matriz $J_{11_{POD}}$ é composta pela matriz J_{11} do MSP original e de J_{P11} como mostrada na equação (42).

$$J_{11_{POD}} = \begin{bmatrix} J_{11_{4ng \times 4ng}} & [0]_{4ng \times 4} \\ [0]_{4 \times 4ng} & J_{P11} \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$J_{P11} = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 \\ K_{21} & K_{22} & 0 & 0 \\ K_{P1} & K_{P2} & K_{P3} & 0 \\ K_{S1} & K_{S2} & K_{S3} & K_{S4} \end{bmatrix} \quad (42.a)$$

Na matriz $J_{12_{POD}}$ é composta pela matriz J_{12} do MSP original aumentada em 4 linhas referentes às equações das novas variáveis de estado do POD como mostrada na equação (43).

$$J_{12_{POD}} = \begin{bmatrix} J_{12_{4ng \times 2nb}} \\ [J_{P12}]_{4 \times 2nb} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Os elementos não nulos da matriz J_{P12} são mostrados no conjunto de equações (44) onde os índices k e m se referem à barra inicial e à barra final de instalação do conjunto TCSC/POD, respectivamente.

$$J_{P12}(1, k) = K_{12} \quad (44.a)$$

$$J_{P12}(1, m) = -K_{12} \quad (44.b)$$

$$J_{P12}(1, nb + k) = K_{13} \quad (44.c)$$

$$J_{P12}(1, nb + m) = K_{14} \quad (44.d)$$

$$J_{P12}(2, k) = K_{23} \quad (44.e)$$

$$J_{P12}(2, m) = -K_{23} \quad (44.f)$$

$$J_{P12}(2, nb + k) = K_{24} \quad (44.g)$$

$$J_{P12}(2, nb + m) = K_{25} \quad (44.h)$$

$$J_{P12}(3, k) = K_{P4} \quad (44.i)$$

$$J_{P12}(3, m) = -K_{P4} \quad (44.j)$$

$$J_{P12}(3, nb + k) = K_{P5} \quad (44.k)$$

$$J_{P12}(3, nb + m) = K_{P6} \quad (44.l)$$

$$J_{P12}(4, k) = K_{S5} \quad (44.m)$$

$$J_{P12}(4, m) = -K_{S5} \quad (44.n)$$

$$J_{P12}(4, nb + k) = K_{S6} \quad (44.o)$$

$$J_{P12}(4, nb + m) = K_{S7} \quad (44.p)$$

O balanço de potências desenvolvido para o sistema elétrico com o controlador de primeira ordem continua sendo válido quando se trata do POD. Em vista disso a matriz $J21_{POD}$ é formada pela matriz $J21_{MIP}$ acrescida de quatro colunas referentes às variáveis introduzidas pelo POD como mostrada na equação (45).

$$J21_{POD} = \left[J21_{MIP} \quad \begin{matrix} 2nb \times 4ng \\ 2nb \times 4 \end{matrix} \right] \quad (45)$$

Os elementos diferentes de zero da matriz J_{P21} são definidos pelo conjunto de equações (46).

$$J_{P21}(k, 4ng + 4) = A4_k \quad (46.a)$$

$$J_{P21}(m, 4ng + 4) = A4_m \quad (46.b)$$

$$J_{P2l}(ng + k, 4ng + 4) = R4_k \quad (46.c)$$

$$J_{P2l}(ng + m, 4ng + 4) = R4_m \quad (46.d)$$

As matrizes $B1_{POD}$ e $B2_{POD}$ são dadas pelas equações (47) e (48), respectivamente.

$$B1_{POD} = \begin{bmatrix} B1_{4ng \times 2ng+2nb} & [0]_{4ng+3 \times 1} \\ [0]_{4 \times 2ng+2nb} & K_{SS} \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$B2_{POD} = \begin{bmatrix} B2_{2nb \times 2ng+2nb} & [0]_{2nb \times 1} \end{bmatrix} \quad (48)$$

A representação no espaço de estados do sistema multimáquinas considerando a atuação de um TCSC equipado com um controlador do tipo POD é dada no conjunto de equações (49).

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (49)$$

$$A = J11_{POD} - J12_{POD} J22_{MIP}^{-1} J21_{POD} \quad (49.a)$$

$$B = B1_{POD} - J12_{POD} J22_{MIP}^{-1} B2_{POD} \quad (49.b)$$

3.4 Localização do TCSC e Ajuste de Parâmetros do Controlador

Considere a representação no espaço de estados mostrada no conjunto de equações (50) onde ΔX é o vetor de variáveis de estado, ΔY o vetor de saídas e ΔU o vetor de entradas. As matrizes A , B , C e D representam respectivamente a matriz de estados, a matriz de entradas, a matriz de saídas e a matriz de realimentação.

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U \quad (50.a)$$

$$\Delta Y = C \Delta X + D \Delta U \quad (50.b)$$

Os autovalores da matriz de estados A podem assumir valores reais (que representam modos não oscilatórios no domínio do tempo) e pares complexos conjugados (que

representam modos oscilatórios).

Para cada autovalor complexo conjugado, representado por $\lambda = \sigma \pm j\omega$, pode-se definir o coeficiente de amortecimento (ξ) que é relacionado ao tempo de duração da oscilação referente ao autovalor em questão e obtido a partir da equação (51).

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (51)$$

Uma das principais aplicações dos dispositivos FACTS equipados com controlador POD é amortecer os modos oscilatórios presentes nos sistemas elétricos de potência e neste aspecto, sua eficiência está relacionada, dentre outros fatores, com a sua localização no sistema. A melhor localização, sem considerar a influência dos zeros da função de transferência em malha aberta (FTMA) (MOURA et al., 2010; MOURA et al., 2010; MOURA et al., 2010m.), pode ser determinada a partir de sua representação no espaços de estados.

Em Furini e Araujo (2008) é feita uma análise da influência exercida pela compensação do TCSC sobre os autovalores de um sistema elétrico de potência, para diferentes localizações do dispositivo. Para isto é determinado o fator de participação através da combinação dos autovetores direito (φ_i) e esquerdo (ψ_i) referentes ao autovalor relacionado ao modo oscilatório que se deseja amortecer, calculados a partir do conjunto de equações (52) (Martins e Lima, 1990).

$$A.\varphi_i = \lambda_i.\varphi_i \quad (52.a)$$

$$\psi_i.A = \lambda_i.\psi_i \quad (52.b)$$

Cada elemento destes autovetores está relacionado à variável correspondente à sua posição no vetor ΔX de variáveis do sistema, sendo o direito um vetor coluna no qual a magnitude de seus elementos é proporcional à observabilidade desta variável enquanto no esquerdo, representado por um vetor linha, é dada a faixa de contribuição desta mesma variável no modo oscilatório referente ao autovalor para o qual ambos foram calculados

Sendo assim é possível comparar as contribuições das variáveis de estado do sistema em modos oscilatórios a partir do fator de contribuição obtido do produto dos autovetores como mostra a equação (53), sendo k o índice relativo a variável de estado que se deseja

observar e i o modo oscilatório que se deseja amortecer.

$$P_{ki} = \varphi_{ki} \psi_{ik} \quad (53)$$

3.4.1 Método de Ajuste: Resíduos da Função de Transferência em Malha Aberta

Supondo que a função de transferência $G(s)$ obtida a partir da representação em espaços de estado do sistema (equação (54)) possa ser expandida em frações parciais, os resíduos (R_i) obtidos a partir desta função expandida fornecem informações sobre a controlabilidade e a observabilidade para o modo oscilatório relacionado ao autovalor λ_i .

$$G(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)} = \sum \frac{[C] \varphi_i \psi_i [B]}{(s - \lambda_i)} = \sum \frac{R_i}{(s - \lambda_i)} \quad (54)$$

A partir da análise da equação (54) é possível relacionar a observabilidade de uma entrada C_j e a controlabilidade de uma saída B_k associado a um determinado autovalor, de acordo com o conjunto de equações (55).

$$Obser = C_j \varphi_i \quad (55.a)$$

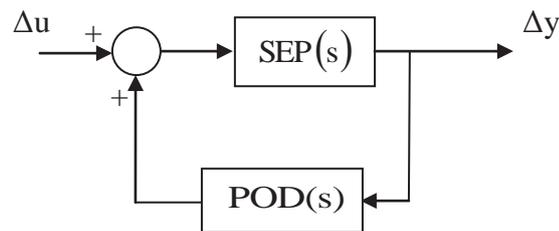
$$Cont = \psi_i B_k \quad (55.a)$$

$$R_{ijk} = Obser \cdot Cont \quad (55.c)$$

O resíduo R_{ijk} fornece informações sobre a controlabilidade e a observabilidade do conjunto entrada-saída ($C_j - B_k$) para o controlador em um determinado autovalor (λ_i) de acordo com os autovetores direito (φ_i) e esquerdo (ψ_i) obtidos da matriz de estados do sistema, conforme apresentado na equação (55) (YANG et al., 1998). Portanto, a combinação que fornece o maior resíduo fornecerá maior amortecimento ao modo de oscilação selecionado (OKOU et al., 2005; CHANG et al., 2007).

Para o ajuste dos parâmetros do controlador POD seja o sistema elétrico representado por uma função de transferência SEP(s) e que POD(s) seja a função de transferência do controlador, conforme o diagrama de blocos mostrado na Figura 12 (FURINI, 2008).

Figura 12 – Representação do POD Inserido no Sistema Elétrico.



Fonte: Furini (2008)

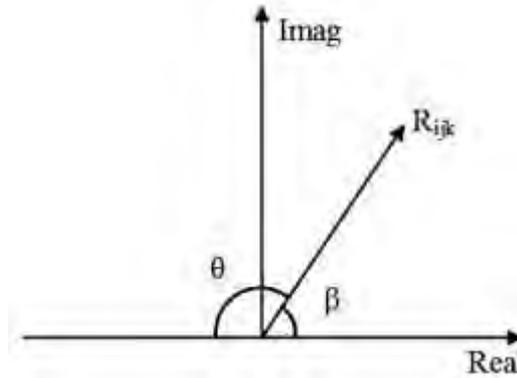
Conhecendo a representação em espaços de estado do diagrama mostrado na Figura 12 e aplicando a equação (54) se obtém a sensibilidade de um dado autovalor λ_i da matriz de estados A em função das variações do ganho estático K_{POD} do controlador e do resíduo R_{ijk} da função de transferência que relaciona uma entrada qualquer do sistema com a saída que se deseja controlar (equação (56)).

$$\frac{\Delta\lambda_i}{\Delta K_{POD}} = R_{ijk} C(\lambda_i) \quad (56)$$

Da equação (51) conclui-se que o coeficiente de amortecimento do modo oscilatório é diretamente proporcional à magnitude da parte real do par complexo conjugado relacionado a este modo e, sendo assim, para aumentar seu amortecimento é necessário que se aumente sua parte real. Para isso o deslocamento $\Delta\lambda_i$ devido à atuação do controlador deve ser no sentido do semiplano esquerdo do plano complexo.

O controlador POD é capaz de realizar este deslocamento através da compensação de fase do resíduo, fazendo com este se desloque θ graus para o semiplano esquerdo do plano complexo conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Deslocamento do Autovalor de Interesse.



Fonte: Almada (2012)

Do exposto, o projeto do controlador se resume a calcular as constantes de tempo $T_1=T_3$, $T_2=T_4$ (de forma a introduzir a compensação de fase necessária ao deslocamento do autovalor de interesse) e o ganho K_{POD} (para fornecer o amortecimento desejado). O conjunto de equações (57) mostra o procedimento necessário para obtenção destes parâmetros (Yang et alli, 1998; Furini, 2008) (ω_i é a frequência em rad/s do modo eletromecânico de interesse).

$$\theta = 180^\circ - \beta \quad (57.a)$$

$$\alpha = \frac{1 - \text{sen}(\theta / 2)}{1 + \text{sen}(\theta / 2)} \quad (57.b)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \quad (57.c)$$

$$T_1 = \alpha T_2 \quad (57.d)$$

$$K_{POD} = \left| \frac{\Delta \lambda_i}{R_{ijk} C(\lambda_i)} \right| \quad (57.e)$$

3.4.2 Método de Ajuste: Diagrama de Nyquist e Root Locus (*toolbox rlttool*)

Outra forma de se calcular os parâmetros do controlador POD é utilizando o critério de estabilidade de Nyquist com o qual é possível avaliar a estabilidade absoluta (que não será utilizada neste trabalho) e relativa de um sistema de controle em malha fechada a partir da análise de sua FTMA (OGATA, 2003).

Dessa forma, utilizando o critério de Nyquist para a análise de estabilidade relativa do sistema, é possível se obter a os intervalos de variação do ganho e da fase do controlador POD

para os quais o sistema se mantém estável.

Na sequência é apresentado o procedimento necessário para realizar o ajuste dos parâmetros do POD (utilizando as ferramentas do aplicativo Matlab[®]) (VALLE, 2010; VALLE et al., 2010) (este método de ajuste é chamado de SISO do inglês *Single Input Single Output*)

1. Utilizando a função *damp* é possível determinar o modo oscilatório crítico do sistema elétrico a partir da matriz de estados A (desta forma são obtidas as frequências ω_n e o coeficiente de amortecimento ξ de todos os modos oscilatórios do sistema elétrico).

$$[w_n, \xi] = damp(A) \quad (58)$$

2. A função de transferência do bloco *washout* do controlador (Figura 8) é obtido do comando “*tf*” (é necessário especificar o valor da constante de tempo T_w que deve assumir um valor entre 1 e 20 segundos).

$$wsh = tf([T_w \ 0], [T_w \ 1]) \quad (59)$$

3. A representação do sistema em espaços de estados é criada a partir da função “*ss*” (*state space*).

$$sys = ss(A, B, C, D) \quad (60)$$

A partir da Figura 3.6 é calculada a FTMA do sistema elétrico (equação (61)).

$$FTMA = SEP(s)POD(s) \quad (61)$$

No procedimento que está sendo apresentado, a função $SEP(s)$ é substituída pela representação em espaço de estados do sistema obtida em (60) resultando em uma Função de Transferência em Malha Aberta Parcial (FTMAP) onde não são representados os blocos de avanço e atraso de fase do controlador.

Feito isso é possível obter a fase a ser compensada (o ângulo θ mostrado na Figura 13) a partir da análise da resposta de Nyquist da FTMAP, calculada para a frequência do autovalor responsável pela oscilação que se deseja amortecer.

Este resultado é representado por um número complexo $R + jI$ cujo ângulo representa a fase θ que deve ser compensada pelos blocos de avanço e atraso de fase.

4. Utilizando a função *nyquist* é determinado o número $R + jI$.

$$[R, I] = \text{nyquist}(\text{sys} * \text{wsh} * w_n(\lambda_i)) \quad (62)$$

A fase θ é obtida a partir da equação (3.44).

$$\theta = \text{angle}(R + jI) \quad (63)$$

Após obter a fase a ser compensada (θ) as constantes de tempo $T_1 = T_3$ e $T_2 = T_4$ são determinadas por meio das equações (57.b) a (57.d).

5. A função de transferência dos blocos de avanço-atraso de fase é obtida pela função “*tf*” (equação (64)).

$$\text{leadleg} = \text{tf}([T_1 \ 1], [T_2 \ 1])^2 \quad (64)$$

O ganho K_{POD} é obtido através da ferramenta gráfica *rltool* para a qual devem ser fornecidas as funções de transferência envolvidas. A partir destes dados é calculado o Lugar Geométrico das Raízes (*rlocus*) de onde é possível se determinar o ganho K_{POD} .

3.5 Conclusões

Neste Capítulo foram apresentados e equacionados dois modelos para um controlador adicional que será acoplado ao TCSC com a função de introduzir amortecimento suplementar às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência.

No primeiro modelo é proposto um controlador de primeira ordem, representado por um ganho K_{DIN} e uma constante de tempo T_{DIN} . Este modelo foi equacionado e suas equações foram acopladas às equações do MSP original resultando na modelagem de um sistema elétrico de potência multimáquinas considerando a atuação de um dispositivo TCSC representado como injeções de potências.

Um controlador do tipo POD formado por blocos de avanço-atraso de fase também foi

modelado e suas equações foram agrupadas às equações do MSP original o que resultou em um modelo do sistema multimáquinas onde se considera a atuação de um TCSC equipado com este controlador.

Para o ajuste dos parâmetros do POD (determinação das constantes de tempo e ganho) foram apresentados dois métodos.

O primeiro método apresentado é baseado nos resíduos da função de transferência em malha aberta do sistema a ser controlado e também foi utilizado para se determinar a localização do TCSC e seu controlador.

No segundo método é utilizado o critério de estabilidade relativa de Nyquist para a determinação da compensação θ necessária a ser introduzida pelo controlador. Para isto foi utilizada a ferramenta *nyquist* do aplicativo Matlab[®] (a partir de θ são calculadas as constantes de tempo). O ganho do controlador é determinado utilizando-se a ferramenta *rltool* (método SISO).

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e as simulações realizadas para um sistema de potência teste utilizando-se o equacionamento desenvolvido neste Capítulo e no Capítulo 2.

4. Simulações e Resultados

4.1 Introdução

Neste Capítulo são apresentados os resultados, simulações e consequentes análises do modelo de injeção de potência do dispositivo FACTS TCSC e sua aplicação no estudo da estabilidade a pequenas perturbações de um sistema de potência teste.

Para isto será utilizado um sistema simétrico de duas áreas composto por 4 geradores, especialmente proposto para o estudo do comportamento das oscilações de baixa frequência associadas aos modos interárea de oscilação (KLEIN et al., 1991; SAUER; PAI, 1998).

Os modelos desenvolvidos no Capítulo 2 e no Capítulo 3 foram implementados computacionalmente com o auxílio do software MATLAB[®]. As condições iniciais (caso base) foram calculadas utilizando-se a ferramenta MATPOWER[®] (ZIMMERMAN; GAN, 2009) (destaca-se estar fora do escopo deste trabalho a análise de métodos de solução de fluxo de potência).

Inicialmente são realizadas simulações para a validação do modelo de injeção de potência do TCSC.

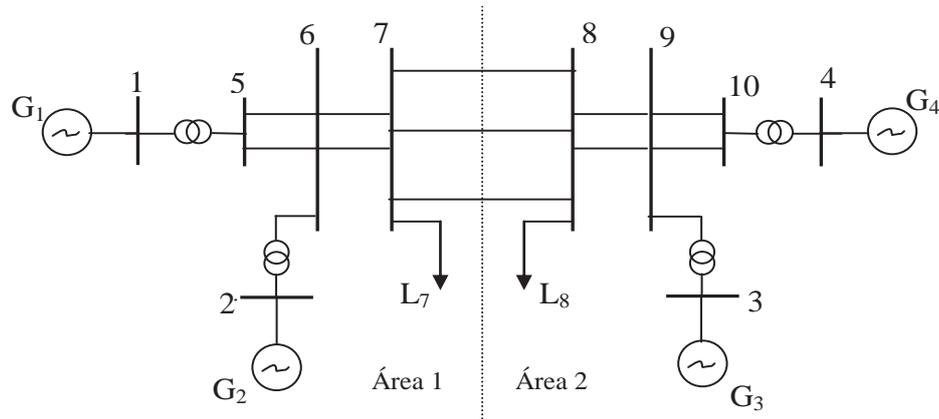
Na sequência o estudo da estabilidade a pequenas perturbações é feito no domínio da frequência através da análise dos autovalores da matriz de estados A do sistema elétrico. Também é realizado o estudo da estabilidade no domínio do tempo analisando-se as curvas de algumas grandezas do sistema elétrico após a ocorrência de uma pequena perturbação (neste trabalho a perturbação considerada é uma variação em degrau de 0,01 pu na potência mecânica de entrada do gerador 1 que também é escolhido como referência para o sistema multimáquinas).

4.2 Sistema Simétrico de Duas Áreas

O sistema multimáquinas hipotético, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 4.1, foi proposto para se estudar os fatores que influenciam os modos interárea de oscilação do sistema elétrico de potência (KLEIN et al., 1991).

Trata-se de um sistema simétrico, composto por duas áreas e que vem sendo utilizado com frequência na literatura (SAUER; PAI, 1995; KUNDUR, 1994; FURINI; ARAUJO, 2008). Os dados dos geradores, reguladores automáticos de tensão, barras, linhas de transmissão e fluxo de potência para o caso base estão listados no Apêndice.

Figura 14 – Diagrama Unifilar do Sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Sauer; Pai (1998)

Na Tabela 1 são apresentados os autovalores dominantes (λ) da matriz de estados do sistema elétrico, bem como o coeficiente de amortecimento (ξ) e a frequência natural não amortecida (ω_n) a eles associados para o caso base (sistema sem compensação). Estes dados foram obtidos com o auxílio do software MATLAB[®] onde as condições iniciais são calculadas utilizando-se a ferramenta MATPOWER[®] sendo os resultados inseridos no MSP para análise de estabilidade a pequenas perturbações.

Tabela 1 – Autovalores Dominantes - Caso base.

Modos	λ	ξ (%)	ω_n (Hz)
Local 1	$-0,2348 \pm j6,2891$	3,7308	1.0016
Local 2	$-0,1584 \pm j5,8752$	2,6951	0.9354
Interárea	$0,0456 \pm j4,1383$	-1,1018	0.6586

Analisando-se os dados mostrados na Tabela 1 pode-se afirmar que o sistema simétrico possui três modos oscilatórios sendo dois deles associados a modos locais de oscilação (faixa de frequências entre 0,8 Hz e 1,8 Hz) e um associado a um modo interárea (faixa de frequências entre 0,2 Hz a 0,8 Hz) (LARSEN; SWANN, 1981).

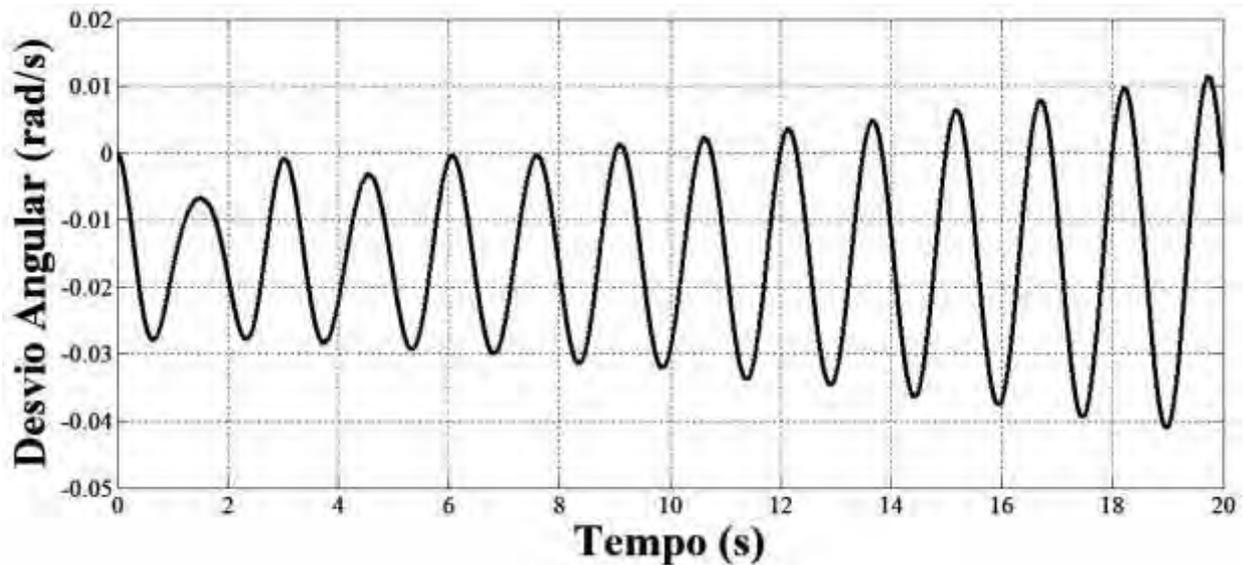
Também dos dados mostrados conclui-se que o sistema é instável às pequenas perturbações para o ponto de operação considerado. Além disso, esta instabilidade está relacionada ao modo interárea de oscilação e é caracterizada por oscilações de amplitudes crescentes (autovalor no semiplano direito do plano complexo).

Esta característica de resposta transitória pode ser observada na curva mostrada na Figura 15 que descreve o desvio angular entre os geradores 3 e 1 após a ocorrência de uma perturbação.

Com o objetivo de amortecer o modo oscilatório interárea e tornar o sistema estável

para o ponto de operação considerado é proposta a atuação de um TCSC colocado nas linhas de transmissão entre a barra 7 e a barra 8, que fazem a interligação das duas áreas (ver diagrama unifilar mostrado na Figura 14).

Figura 15 – Desvio Angular: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$: Caso Base.



Fonte: Almada (2012)

A escolha do local de instalação está de acordo com o estudo desenvolvido em Furini e Araujo (2008) onde a influência do dispositivo TCSC sobre cada modo oscilatório é analisada para diferentes localizações através do método dos resíduos da função de transferência em malha aberta do sistema de potência.

Nestes estudos será utilizado o modelo de injeção de potência do TCSC desenvolvido no Capítulo 2.

4.3 Validação do Modelo de Injeção de Potência do TCSC

Em Yang et al. (1998) e Furini e Araujo (2008) o TCSC é modelado como uma reatância variável ligada em série com a linha de transmissão. Em Sadikovic et al. (2005) o dispositivo é modelado como injeções de corrente. Neste trabalho é proposta a análise dos efeitos da compensação inserida pelo TCSC através de injeções de potência, sendo que estas potências serão depois consideradas no balanço nodal de potências do sistema elétrico (conceito fundamental do MSP).

Para a validação do modelo de injeção de potência do TCSC (MIP-TCSC) serão realizadas simulações (utilizando as equações (19)) e seus resultados serão comparados com

os obtidos quando o TCSC é modelado como uma reatância variável (RV-TCSC). Em ambos os casos o TCSC atuará realizando uma compensação estática de 10% da reatância equivalente das linhas de transmissão da interligação entre as barras 7 e 8.

Para as simulações do RV-TCSC esta compensação é realizada alterando-se as reatâncias das linhas de transmissão diretamente no banco de dados do sistema elétrico e depois é realizado o cálculo do fluxo de potência (através do aplicativo MATPOWER), seguido da análise de estabilidade através do MSP. Os resultados obtidos para esta situação podem ser vistos na Tabela 2 onde são apresentados os autovalores dominantes (λ), o coeficiente de amortecimento (ξ) e a frequência natural amortecida a eles associados (ω_n). As mesmas grandezas são mostradas na Tabela 3 onde é considerado o MIP-TCSC.

Tabela 2 – RV-TCSC: Autovalores Dominantes.

Modos	λ	ξ (%)	ω_n (Hz)
Local 1	$-0,2371 \pm j6,2978$	3,7621	1,0030
Local 2	$-0,1602 \pm j5,8792$	2,7238	0,9360
Interárea	$0,0468 \pm j4,2357$	-1,1048	0,6741

Tabela 3 – MIP-TCSC: Autovalores Dominantes.

Modos	λ	ξ (%)	ω_n (Hz)
Local 1	$-0,2371 \pm j6,2990$	3,7614	1,0032
Local 2	$-0,1579 \pm j5,8753$	2,6866	0,9354
Interárea	$0,0472 \pm j4,1489$	-1,1376	0,6604

Comparando-se os valores mostrados nas Tabelas 2 e 3 pode-se afirmar que o MIP-TCSC permite as mesmas conclusões qualitativas que o RV-TCSC (a conclusão de sistema instável caracterizado por oscilações de amplitudes crescentes é a mesma, não importa qual o modelo utilizado). As diferenças quantitativas (consideradas muito pequenas) podem ser justificadas pelas aproximações realizadas na concepção do modelo.

Vale ressaltar que o cálculo do fluxo de potência deve ser realizado para cada nível de compensação quando se utiliza o RV-TCSC. No caso do MIP-TCSC este cálculo é realizado uma única vez, pois as modificações decorrentes da atuação do TCSC passam a ser vistas pelo sistema como potências injetadas nas barras dos extremos das linhas em que o dispositivo é instalado. Com isto diminui-se o tempo computacional das simulações.

Uma vez validado o MIP-TCSC este será utilizado na análise da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência.

4.4 Análise da Estabilidade: Compensação Estática

Para se avaliar como a compensação estática (compensação fixa, sem a atuação de controladores adicionais) introduzida pelo TCSC influencia o comportamento transitório do sistema multimáquinas novas simulações foram realizadas por meio das equações (19) e os resultados são mostrados nas Tabelas 4 e 5 (compensação de 50% e 85% da reatância da linha de transmissão entre as barras 7 e 8, respectivamente).

Tabela 4 – Autovalores Dominantes – 50% de Compensação.

Modos	λ	ξ (%)	ω_n (Hz)
Local 1	$-0,2446 \pm j6,3260$	3,8637	1,0076
Local 2	$-0,1451 \pm j5,8535$	2,4781	0,9319
Interárea	$0,0636 \pm j4,2272$	-1,5044	0,6729

Tabela 5 – Autovalores Dominantes – 85% de Compensação.

Modos	λ	ξ (%)	ω_n (Hz)
Local 1	$-0,2647 \pm j6,3808$	4,1448	1,0164
Local 2	$-0,1305 \pm j5,8447$	2,2322	0,9304
Interárea	$-0,0198 \pm j4,8550$	0,4078	0,7727

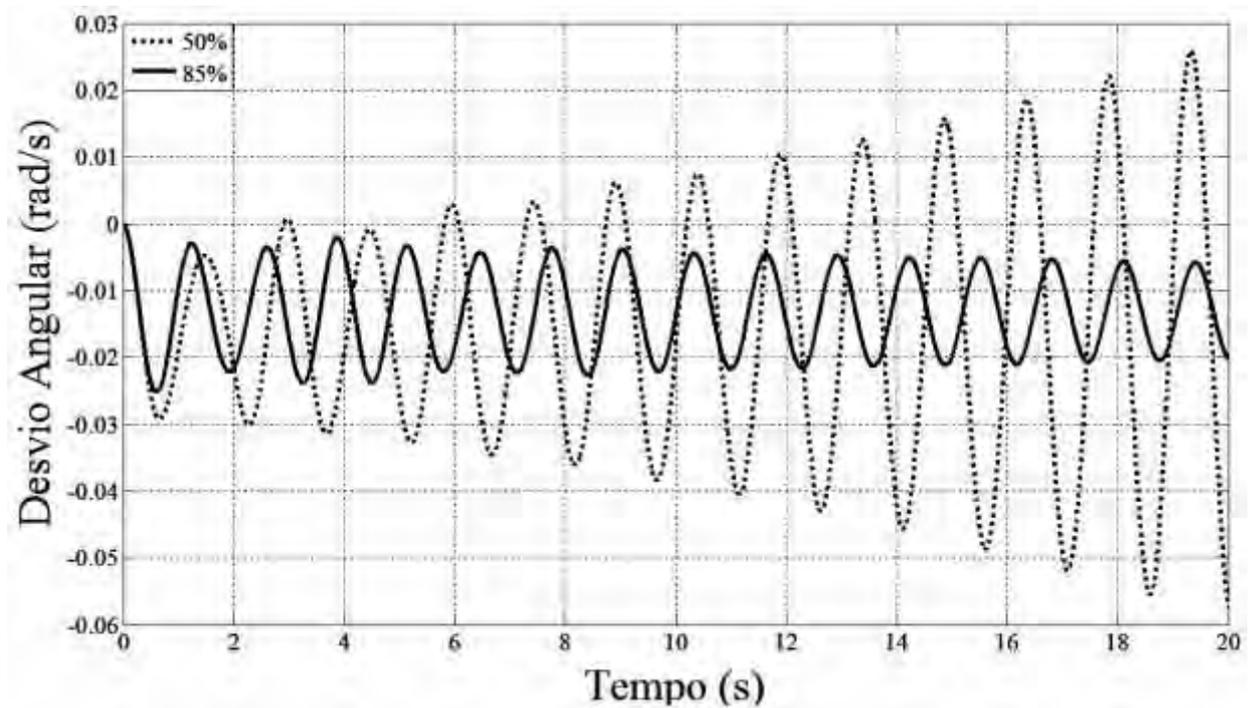
Avaliando os autovalores mostrados nas Tabelas 4 conclui-se que o sistema de potência teste permanece instável para o ponto de operação considerado mesmo com uma compensação estática de 50%. Comparando o coeficiente de amortecimento do modo interárea para este nível de compensação com o mostrado na Tabela 3 (compensação estática de 10%) percebe-se que o autovalor associado a este modo se deslocou em direção ao semiplano esquerdo do plano complexo, mas permaneceu ainda no semiplano direito, acarretando a instabilidade. No que se refere aos autovalores associados aos modos locais, o acréscimo do nível da compensação estática aumentou o amortecimento do modo local 1 (de 3,7614 – Tabela 3 para 3,8637 – Tabela 4) e diminuiu o amortecimento do modo local 2 (de 2,6866 – Tabela 3 para 2,4781 – Tabela 4).

Através de simulações adicionais (não mostradas neste trabalho) verificou-se que o sistema teste só se torna estável com um nível de compensação em torno de 85% da reatância das linhas de transmissão (resultados listados na Tabela 5).

Neste caso o modo interárea se desloca para o semiplano esquerdo do plano complexo, tornando o sistema estável. A tendência de se aumentar o amortecimento do modo local 1 permanece (de 3,8637 – Tabela 4 para 4,1448 – Tabela 5). Também se verifica a diminuição de amortecimento do modo local 2 (de 2,4781 – Tabela 4 para 2,2322 – Tabela 5).

A diminuição de amortecimento do modo local 2 não compromete a estabilidade do sistema de potência pois o autovalor associado a este modo permanece no semiplano esquerdo do plano complexo.

Figura 16 – Desvio Angular: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$: Compensação em 50% e 85%.



Fonte: Almada (2012)

Na Figura 4.3 são representados os desvios angulares entre os geradores 3 e 1 para as compensações de 50% e 85%, de onde se pode concluir que mesmo quando a estabilidade é alcançada o sistema é fracamente amortecido.

Além disso, uma compensação de 85% não é praticável, pois não permite grande margem de manobra para a operação do sistema elétrico (WATANABE et al., 1998; SONG; JOHNS, 1999).

Dessa forma se faz necessária a utilização de controladores suplementares para se introduzir amortecimento suplementar aos modos oscilatórios instáveis ou pouco amortecidos do sistema elétrico de potência.

4.5 Análise da Estabilidade: Controlador de Primeira Ordem

Para se avaliar o desempenho do sistema multimáquinas com um TCSC equipado com um controlador de primeira ordem frente a pequenas perturbações foram realizadas

simulações utilizando as equações (29).

O nível de compensação estática foi mantido em 10% da reatância da linha de transmissão e a constante de tempo T_{DIN} (ver Figura 7) foi fixada em 0,001 segundo. O ganho K_{DIN} assumiu valores entre 0,0100 pu e 0,0312 pu.

Os autovalores dominantes bem como ξ e ω_n obtidos destas simulações são mostrados na Tabela 6.

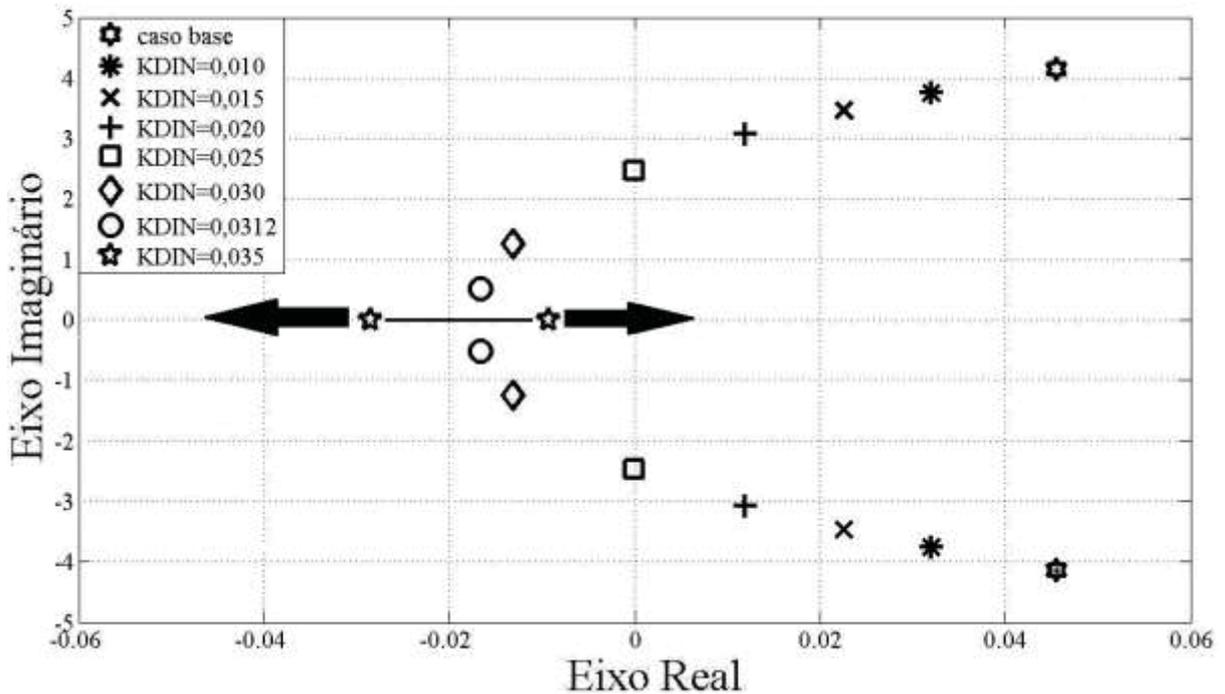
Tabela 6 – Autovalores Dominantes: Controlador de Primeira Ordem.

K_{DIN}	Modos	λ	ξ (%)	ω_n (Hz)	
0,0100	Local 1	$-0,2357 \pm j6,2917$	3,7436	1,0021	
	Local 2	$-0,1567 \pm j5,8715$	2,6679	0,9348	
	Interárea 1	$0,0320 \pm j3,7567$	-0,8518	0,5979	
0,0150	Local 1	$-0,2347 \pm j6,2878$	3,7300	1,0014	
	Local 2	$-0,1563 \pm j5,8698$	2,6618	0,9345	
	Interárea 1	$0,0226 \pm j3,4687$	-0,6515	0,5521	
0,0200	Local 1	$-0,2336 \pm j6,2837$	3,7150	1,0008	
	Local 2	$-0,1558 \pm j5,8681$	2,6541	0,9343	
	Interárea 1	$0,0119 \pm j3,0695$	-0,3877	0,4885	
0,0250	Local 1	$-0,2322 \pm j6,2795$	3,6952	1,0001	
	Local 2	$-0,1552 \pm j5,8663$	2,6447	0,9340	
	Interárea 1	$-0,0001 \pm j2,4613$	0,0041	0,3917	
0,0300	Local 1	$-0,2307 \pm j6,2751$	3,6740	0,9994	
	Local 2	$-0,1545 \pm j5,8645$	2,6336	0,9337	
	Interárea 1	$-0,0131 \pm j1,2545$	1,0442	0,1997	
0,0312	Local 1	$-0,2303 \pm j6,2741$	3,6682	0,9992	
	Local 2	$-0,1544 \pm j5,8640$	2,6321	0,9336	
	Interárea 1	$-0,0166 \pm j0,5177$	3,2048	0,0824	
0,035	Local 1	$-0,2289 \pm j6,2709$	3,6478	0,9987	
	Local 2	$-0,1538 \pm j5,8632$	2,6222	0,9334	
	Interárea 1 (choque)		-0,0285	-	-
			-0,00931	-	-

Analisando os valores mostrados conclui-se que o modo oscilatório interárea, responsável pela instabilidade do sistema, sofre um deslocamento para o semiplano esquerdo do plano complexo, tornando o sistema estável para um ganho em torno de 0,030 pu.

O par complexo conjugado de autovalores descreve um movimento de se afastar do eixo imaginário e se aproximar do eixo real, como pode ser visto na Figura 17. Este comportamento se mantém até para um ganho em torno de 0,0312 pu quando ocorre uma bifurcação sela-nó, originando dois autovalores reais. Simulações adicionais (não mostradas no trabalho) permitiram concluir que um destes autovalores se torna mais negativo e o outro se desloca para o semiplano direito do plano complexo, com o contínuo aumento do ganho K_{DIN} . Este deslocamento tornará o sistema de potência instável de forma monotônica.

Figura 17 – Deslocamento do Modo Interárea: Controlador de 1ª Ordem.



Fonte: Almada (2012)

4.6 Análise da Estabilidade: Controlador POD

Para introduzir amortecimento aos modos oscilatórios do sistema elétrico é utilizado o controlador POD cuja estrutura é a mostrada na Figura 8 com o equacionamento dado pelas equações (37) a (40). Para o ajuste de seus parâmetros são utilizados os métodos dos resíduos e o SISO. Em ambos os casos o objetivo do controlador é amortecer o modo oscilatório interárea, sendo estipulado em projeto um coeficiente de amortecimento de 10%. A compensação estática introduzida pelo TCSC é de 10% da reatância da linha de transmissão de instalação. As constantes de tempo T_{DIN} e T_w (ver Figura 8) foram mantidas em 0,001 segundo e 3 segundos, respectivamente.

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros do POD obtidos pelo método dos resíduos e pelo toolbox *rltool* (método SISO).

Tabela 7 – Parâmetros do POD.

Parâmetros	Resíduos	SISO
K_{POD}	0,0013	0,0095
T_1	0,6590	0,6248
T_2	0,1075	0,1134

Da comparação entre os valores mostrados observa-se que a relação entre as constantes de tempo (T_1/T_2) é praticamente a mesma para os dois métodos pois a fase a ser compensada também é a mesma. Quanto aos ganhos, o obtido pelo método SISO é cerca de sete vezes maior que o calculado pelo método dos resíduos. Isto indica que o controlador POD cujos parâmetros foram ajustados pelo método SISO exercerá um maior esforço de controle que o controlador ajustado pelo método dos resíduos, para se garantir os 10% de coeficiente de amortecimento para o modo interárea.

Utilizando o conjunto de equações (49) são calculados os autovalores do sistema de potência teste quando o controlador POD é ajustado pelo método dos resíduos. Os principais resultados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Autovalores Dominantes: Método dos Resíduos.

Modos	Autovalores	ξ (%)	ω_n (Hz)
Local 1	$-0,2496 \pm j6,2896$	3,9653	1,0018
Local 2	$-0,1622 \pm j5,8705$	2,7619	0,9347
Interárea	$-0,3948 \pm j3,7477$	10,4765	0,5998
Controlador	$-4,8817 \pm j4,6711$	72,2520	1,0753

Realizando o mesmo procedimento, no entanto utilizando o controlador com os parâmetros calculados através do método SISO, os autovalores do sistema teste são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Autovalores Dominantes: Método SISO.

Modos	Autovalores	ξ (%)	ω_n (Hz)
Local 1	$-0,3147 \pm j6,3444$	4,9542	1,0110
Local 2	$-0,1973 \pm j5,8884$	3,3488	0,9377
Interárea	$-0,5534 \pm j5,4833$	10,0415	0,8771
Controlador	$-1,7768 \pm j1,9635$	67,0976	0,4215

Analisando os resultados mostrados nas Tabelas 8 e 9 pode-se afirmar que o coeficiente de amortecimento obtido para o modo interárea pelo método SISO ficou mais próximo do especificado em projeto ($\xi_{des} = 10\%$), porém o amortecimento obtido pelo método dos resíduos ficou bastante próximo do estipulado, apresentando um erro de 4,59%.

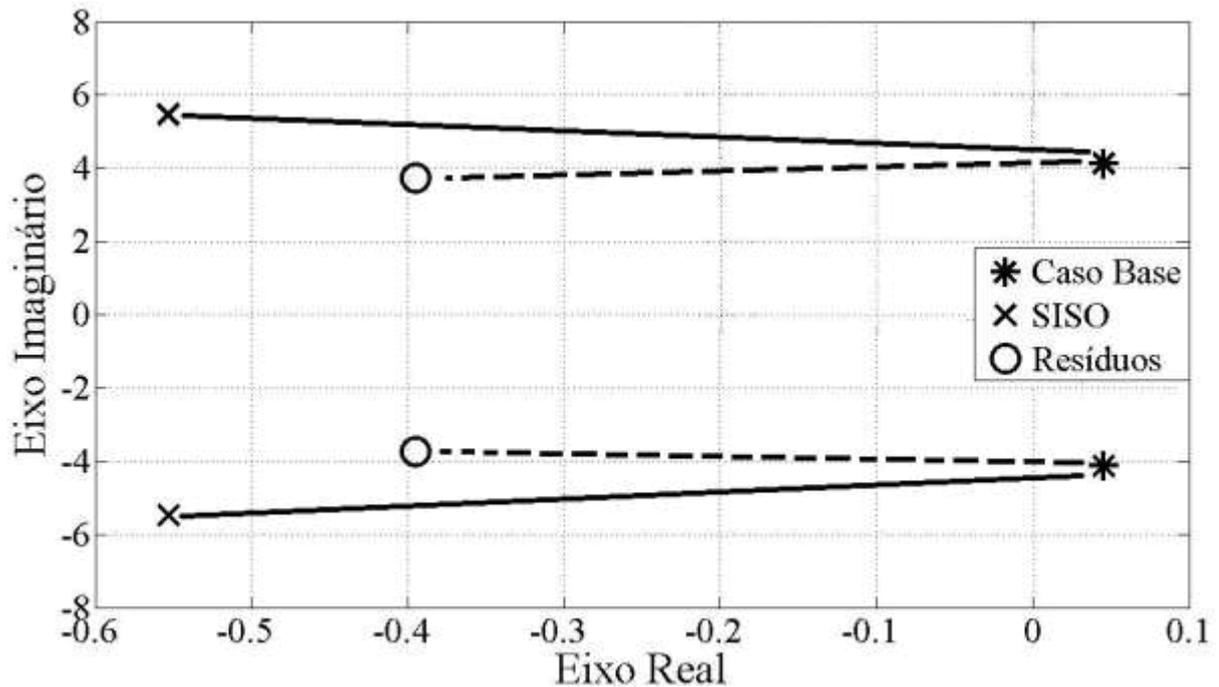
Comparando os dados das Tabelas 8 e 9 com os mostrados na Tabela 1 (caso base) conclui-se que o controlador POD atua no modo interárea e também provoca modificações nos modos locais.

Os coeficientes de amortecimento dos modos locais apresentam um aumento pela atuação do controlador POD, seja ajustado pelo método SISO, seja ajustado pelo método dos resíduos. Quantitativamente, o aumento do amortecimento dos modos locais é maior quando o POD é ajustado pelo método SISO (observe que o ganho K_{POD} é maior para o ajuste pelo método SISO – Tabela 7).

Com relação à frequência natural de oscilação dos modos locais, o POD ajustado pelo método dos resíduos praticamente não a altera, diferentemente do POD ajustado pelo método SISO.

Na Figura 18 é mostrado o deslocamento dos autovalores associados ao modo interárea de oscilação para os diferentes métodos de ajuste do controlador.

Figura 18 – Deslocamento do Modo de Oscilação Interárea: Controlador POD.



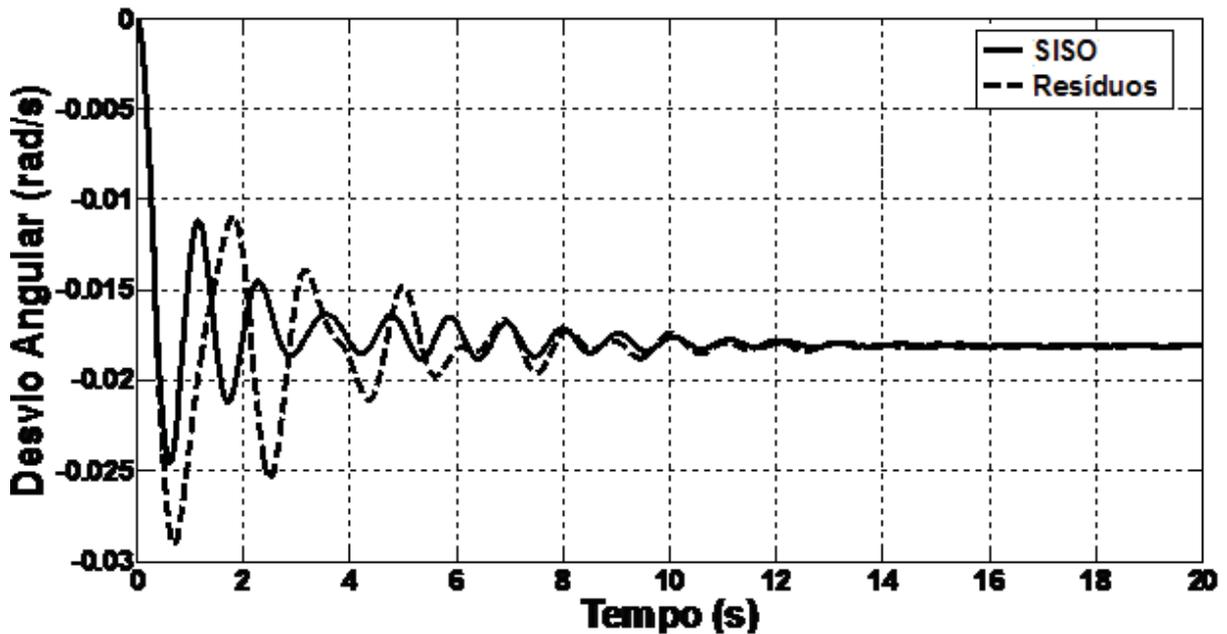
Fonte: Almada (2012)

Quando o POD é ajustado pelo método dos resíduos, o deslocamento do autovalor é praticamente paralelo ao eixo real, o que altera pouco sua frequência natural. Ao se considerar o POD ajustado pelo método SISO, pode-se observar que houve uma maior alteração na parte imaginária do autovalor, implicando numa maior alteração da frequência natural.

Estas mesmas conclusões podem ser obtidas comparando os dados mostrados nas Tabelas 1, 8 e 9. No caso base (Tabela 1) a frequência natural do modo interárea é 0,6093 Hz, modificando para 0,5998 Hz para o ajuste pelo método dos resíduos (Tabela 8) e para 0,8771 Hz quando se considera o método SISO (Tabela 9).

Por fim, a inclusão do conjunto TCSC/POD excitou outro modo oscilatório que foi denominado de modo Controlador. Porém, este modo não deve comprometer a estabilidade do sistema simétrico por ser bastante amortecido.

Uma análise comparativa no domínio do tempo para os dois métodos de ajuste do controlador POD pode ser feita a partir da Figura 19 onde é mostrado o desvio angular entre os geradores 3 e 1, após a ocorrência de uma perturbação.

Figura 19 – Desvio Angular: $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$: Método SISO e Método dos Resíduos.

Fonte: Almada (2012)

Dos valores mostrados nas Tabelas 8 e 9 conclui-se que o método dos resíduos introduz maior amortecimento ao modo interárea que o método SISO. Entretanto, analisando as curvas mostradas na Figura 19 observa-se que a curva referente ao ajuste realizado pelo método SISO é mais amortecida, quando comparada com a curva obtida quando o método dos resíduos é utilizado.

A justificativa para este comportamento é que o método dos resíduos introduziu menos amortecimento aos modos locais de oscilação. Conforme mostrado nas Tabelas 8 e 9 o modo local 2 apresenta os menores coeficientes de amortecimento seja o método de ajuste o SISO ou o dos resíduos, tornando-se assim o modo dominante da resposta. Como o seu coeficiente de amortecimento obtido pelo método dos resíduos é menor que o obtido pelo método SISO, a curva referente ao método dos resíduos é menos amortecida que a curva relacionada ao método SISO.

4.7 Conclusões

Neste Capítulo foram apresentadas as simulações e análise de resultados obtidos para um sistema de potência teste, utilizando o equacionamento desenvolvido nos Capítulos 2 e 3.

O sistema teste utilizado foi um simétrico de duas áreas que, para o pontom de operação considerado, era instável.

Após a validação do modelo de injeção de potência do TCSC, foi proposta a inclusão de um TCSC equipado com controlador suplementar de amortecimento para tornar o sistema teste estável.

Foram avaliados dois tipos de controladores, um de primeira ordem e outro conhecido como POD. Considerando a atuação destes controladores no sistema elétrico, foram realizados estudos da estabilidade a pequenas perturbações.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentado um modelo de injeção de potência para o TCSC para ser incorporado ao Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) proposto por Deckmann e da Costa (1994).

No modelo de injeção de potência do TCSC (MIPTCSC) os efeitos de compensação inserida pelo dispositivo passam a ser consideradas como injeções de potências nas barras que se encontram nos extremos da linha de transmissão onde o TCSC é instalado. Dessa forma, partindo de um ponto de operação conhecido do sistema, a análise da atuação do TCSC é desenvolvida alterando o balanço nodal de potência das barras e para isto foi utilizado o equacionamento desenvolvido no Capítulo 2 onde as equações resultantes foram linearizadas e agrupadas às equações do MSP original. Este procedimento forneceu um modelo do sistema de potências multimáquinas onde se considera a atuação de um TCSC representado por injeções de potência.

No Capítulo 3 foram apresentados e equacionados dois modelos de controladores adicionais com a função de introduzir amortecimento às oscilações do sistema elétrico de potência.

O primeiro controlador apresentado foi modelado através de um ganho K_{DIN} e constante de tempo T_{DIN} (controlador de primeira ordem). Outro controlador estudado apresentava uma estrutura mais sofisticada, sendo composto por blocos de avanço-atraso de fase, além de um ganho K_{POD} e bloco washout. Este controlador é conhecido como POD.

Ambos os controladores foram equacionados e suas equações foram agrupadas às equações do MSP que considera a atuação de um TCSC.

Também foi discutida a localização do conjunto TCSC/Controlador no sistema elétrico de modo a se introduzir de maneira eficaz amortecimento aos modos oscilatórios. A técnica escolhida para se determinar a localização do TCSC/Controlador foi o método dos resíduos.

Este mesmo método foi proposto para o ajuste dos parâmetros do POD, seguido de outro que utiliza as ferramentas *nyquist* e *rltool* do aplicativo MATLAB[®]. Este método foi denominado de SISO.

No Capítulo 4 são apresentadas as simulações e resultados obtidos a partir do equacionamento desenvolvido nos Capítulos 2 e 3. As simulações foram implementadas utilizando-se o software MATLAB[®]. O sistema teste utilizado é formado por duas áreas e é bastante utilizado na literatura.

Inicialmente é feita a validação do MIPTCSC para a análise da estabilidade a pequenas perturbações em sistemas elétricos de potência e foi considerada uma compensação estática de 10% da reatância equivalente da linha de instalação do TCSC. A análise desta compensação foi realizada de duas formas.

A primeira é feita alterando-se o banco de dados do sistema para se considerar a atuação do TCSC (maneira tradicional, utilizada por Yang et alli (1998) e Furini e Araujo (2008), dentre outros) e se faz necessário calcular o fluxo de potência para cada nível de compensação especificado e depois, utilizando o MSP original, realizar a análise da estabilidade a pequenas perturbações.

No caso do MIPTCSC o fluxo de potência é calculado uma única vez e a atuação do TCSC é representada por injeções de potências. Com isto diminui-se o peso computacional da análise se comparada com o método anterior favorecendo a utilização do modelo em tempo real.

Da análise dos resultados obtidos pelas duas formas concluiu-se que o MIPTCSC fornece as mesmas conclusões qualitativas do método tradicional. Os resultados quantitativos diferem dentro de padrões aceitáveis e são devido às simplificações realizadas na dedução do MIPTCSC.

Validado o modelo proposto para o TCSC este foi utilizado na análise da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência.

A modelagem desenvolvida foi aplicada ao sistema simétrico de duas áreas e dos resultados obtidos foi possível afirmar que o sistema era instável para o ponto de operação considerado. Além disso, a instabilidade era causada por um modo de oscilação interárea e caracterizada por oscilações de amplitude crescente.

Para tornar o sistema estável foi introduzido no sistema elétrico um TCSC cuja localização foi determinada utilizando-se o método dos resíduos.

Para se avaliar o desempenho do sistema multimáquinas quando da ocorrência de uma pequena perturbação o TCSC foi modelado pelo MIPTCSC e simulações foram realizadas.

Considerando apenas o TCSC, sem nenhum controlador adicional, a estabilidade foi alcançada para um nível de compensação estática em torno de 85%. Este nível de compensação é impraticável e além disso, o sistema se tornou fracamente amortecido. Estes altos valores de compensação estática necessários para estabilizar o sistema elétrico também foram encontrados em outros trabalhos (JIANBO et al., 2005; FURINI; ARAUJO, 2008).

Para tornar o sistema elétrico estável com níveis aceitáveis de compensação e ainda melhorar o desempenho do sistema elétrico frente às pequenas perturbações, foi acoplado ao

TCSC um controlador suplementar com a função de introduzir amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência. O sinal de entrada para o controlador foi a variação da potência ativa na linha de transmissão de instalação do TCSC.

Inicialmente foi utilizado um controlador de primeira ordem de ganho K_{DIN} e constante de tempo T_{DIN} com o qual foi possível analisar o comportamento dinâmico do sistema elétrico. Com esta configuração chegou-se à estabilidade com uma compensação estática de 10% e ganho K_{DIN} em torno de 0,030 pu. Com o objetivo de introduzir mais amortecimento ao sistema multimáquinas o ganho foi aumentado e pode-se observar o surgimento de uma bifurcação sela-nó, o que restringiu sua excursão, limitando a eficácia do controlador.

Outro controlador testado foi o POD utilizando também como sinal de entrada as variações da potência ativa na linha de transmissão de instalação do conjunto TCSC/POD.

Para o ajuste dos parâmetros do POD foram utilizados dois métodos. O primeiro deles foi o método dos resíduos, que é baseado nos resíduos da função de malha aberta do sistema compensado para se realizar o deslocamento dos autovalores de interesse para o semiplano direito do plano complexo.

O outro método de ajuste utilizado tem como fundamento o critério de estabilidade relativa de Nyquist e o procedimento para sua aplicação foi explicado no trabalho. Este método foi chamado de SISO e utiliza o toolbox *rtool* do MATLAB[®].

Para os dois métodos a compensação estática foi mantida em 10% e foi especificado em projeto um coeficiente de amortecimento de 10% para o modo oscilatório interárea.

Foi realizado o projeto dos parâmetros do POD e o coeficiente de amortecimento foi obtido para os dois métodos, porém com algumas particularidades.

Com relação ao amortecimento inserido pelo controlador ao modo interárea, o ajuste realizado pelo método SISO se aproximou mais do valor especificado. No entanto, o ajuste realizado pelo método dos resíduos apresentou um erro percentual aceitável (4,59%). Desta forma concluiu-se que é possível se obter boa precisão com qualquer um dos métodos.

Em se tratando do ganho do controlador, utilizando o método dos resíduos foi necessário um valor maior quando comparado com o obtido pelo método SISO, indicando assim um maior esforço de controle por parte deste controlador.

Em contrapartida o método dos resíduos modifica muito pouco a frequência do modo interárea, quando comparado com o método SISO. A consequência deste fato é que o autovalor associado ao modo interárea de oscilação se desloca para o semiplano esquerdo do plano complexo praticamente sobre uma reta paralela ao eixo real.

Importante destacar que o controlador POD com os parâmetros ajustados pelo método

dos resíduos ou pelo método SISO excitou um novo modo oscilatório que foi chamado de modo Controlador. A partir da análise realizada conclui-se que este modo oscilatório não deve comprometer a estabilidade do sistema elétrico devido ao seu alto amortecimento.

Como conclusões finais pode-se afirmar que o MIPTCSC se prestou muito bem para a análise da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos e que os dois métodos de ajuste considerados conseguem, com pequenas diferenças, atingir o objetivo de introduzir amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência.

Trabalhos Futuros

O ajuste de parâmetros realizado através dos métodos apresentados neste trabalho é válido para um determinado ponto de operação, sendo necessário um novo ajuste caso ocorra alguma mudança no sistema elétrico. Uma sugestão de trabalhos futuros é a utilização de técnicas inteligentes como Redes Neurais e Algoritmos Genéticos para o cálculo dos parâmetros do POD deve tornar o controlador mais robusto, de modo que um único ajuste satisfaça de maneira aceitável diferentes pontos de operação.

A utilização do MIPTCSC em sistemas de maior porte, onde diferentes modos oscilatórios são problemáticos, também é item de interesse para pesquisa. Nestas situações diferentes controladores (por exemplo, POD e Estabilizadores de Sistemas de Potência) devem atuar concomitantemente no sistema elétrico para melhorar seu desempenho e então é necessário o ajuste coordenado de seus parâmetros.

Referências

ALMADA, L. M. *O modelo de injeção de potência do TCSC e sua aplicação no estudo da estabilidade a pequenas perturbações*. 2012. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. 2. ed. Iowa: Iowa State University, 2003. 568 p. (IEEE Power System Engineering Series).

CAI, L. J. C.; ERLICH, I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 20, n. 1, p. 294-300; 2005.

CHANG, Y.; XU, Z. A novel SVC supplementary controller based on wide area signals. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 77, n. 12, p. 1569 - 1574, 2007.

DECKMANN, S. M.; da COSTA, V. F. A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 965-971, 1994.

DEL ROSSO A. D.; CAÑIZARES C. A.; DOÑA V. M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway,, v. 18, n. 4, p. 1487–1496, 2003.

DeMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, v. 88, n. 4, p. 316-329, 1969.

FURINI, M. A. *Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob ação dos controladores FACTS TCSC e UPFC*. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

FURINI, M. A.; ARAUJO P. B. Melhora da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas usando o dispositivo FACTS thyristor–controlled series capacitor – TCSC. *Revista Controle & Automação*, Campinas, v. 19, n. 2, p.214-225, 2008.

GAMA, C. Brazilian north-south interconnection control-application and operating with a TCSC. *IEEE power engineering society winter meeting*, New York, v. 2, p. 1103-1108, July 1999.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission system*. New York: IEEE Press- John Wiley, 1999. 452 p.

IEEE/CIGRE JOINT TASK FORCE. Definition and classification of power system stability.

ELECTRA, Paris, n. 208, p. 74-80, 2003.

JIANBO, G.; GESONG, C.; JIMING, L.; BAIQING, L.; WEIZHOU, W. Chengxian 220KV thyristor controlled series compensation: parameters desing, control & overvoltage protection: IEEE transaction and distribution In: CONFERENCE AND EXHIBITION: ASIA AND PACIFIC, 2005, [S.l.:sn], 2005. p. ...-...

KLEIN M., ROGERS G. J.; KUNDUR P. A fundamental study of inter-area oscillation in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 6, n. 3, p. 914-921, 1991.

KUNDUR, P. *Power system stability and control* EUA: MacGraw-Hill, 1994. 1167p.,

LARSEN E. V.; SWANN D. A. Applying power system stabilizers, part 1: general concepts, part 2: performance objectives and tuning concepts, part 3: practical considerations. *IEEE Power Apparatus and Systems*, New York, v. PAS-100, n. 12, p. 3017–3046, 1981.

LIMA, D. A. *Alocação de perdas e custos pelo uso do sistema de transmissão*. 2007. ... f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

MARTINS N.; LIMA L. T. G. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static VAR compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 5, n. 4, p. 74–82, 1990.

MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Análise de resíduos e zeros da função de transferência de controladores suplementares de amortecimento de dispositivos FACTS UPFC para diferentes sinais de entrada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 18., 2010, Bonito. *Anais ...* Bonito: [s.n.], 2010. p. 1-6.

MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Influência dos zeros na localização e controle de dispositivos FACTS UPFC/POD para o amortecimento de oscilações eletromecânicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 3., 2010, Belém. *Anais ...* Belém: [s.n.], 2010. p. 1-6.

MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Análise das limitações no amortecimento de oscilações eletromecânicas devido à má localização dos zeros da função de transferência de controladores suplementares, In: IEEE/PES T&D LATIN AMÉRICA, 2010, São Paulo. *Proceedings ...* São Paulo: [s.n.], 2010, p. 1-6.

NOROOZIAN M.; ANDERSSON G. Damping of inter-area and local modes by use of controllable components. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 10, n. 4, p. 2007–2012, 1995.

OGATA, K. *Engenharia do controle moderno*. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, ano de

publicação. 788p.

OKOU, F.; DESSAINT, L. A.; AKHRIF, O. Power systems stability enhancement using a wide-area signals based hierarchical controller. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 20, n. 3, p. 1465 – 1477, 2005.

PELLANDA P. C.; SAVELLI, D. C.; MACEDO, N. J. P.; MARTINS, N.; LUZ, G. S. Síntese de sinais e escolha de estrutura dos estabilizadores dos TCSCs da interligação norte-sul considerando robustez a perturbações externas. In: SEPOPE, 10., 2006, Florianópolis. *Proceedings...* Florianópolis: [s.l.], 2006.

PESSANHA J. E. O., SAAVEDRA O. R., BUZAR J. C. R., PAZ A. A.; POMA, C. P. Power system stability reinforcement based on network expansion: a practical case. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Oxford, v. 29, n. 3, p. 208 – 216, 2007.

QUIZHPI, J. C. L. *Decomposição de Dantzing-Wolf aplicada ao problema de planejamento de reativos em sistemas de potência multi-áreas*. 2011. ... f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

SADIKOVIC, R.; KORBA, P.; ANDERSSON, G. Application of FACTS devices for damping of power system oscillations. In: Power Tech, 2005 Russia. Conference... Russia: IEEE, 2005. p.1-6

SAUER P. W.; PAI, M. A. *Power system dynamics and stability*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357 p.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC transmission systems- FACTS*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999. 592 p.

VALLE, D. B. *A influência do IPFC na estabilidade de pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência*. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

VALLE, D. B.; KOPCAK, I.; da COSTA, V. F. Aplicação do controlador IPFC para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas de potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 3., 2010, Belém. *Anais ...* Belém: [s.n.], 2010. p. 1-6..

WANG H. F., SWIFT F. J., LI M. FACTS-based stabilizer designed by the phase compensation method part-II: multi-machine power systems. In: APSCOM, número do evento, 1997, Hong Kong. *Proceedings...* Hong Kong: [s.n.], 1997. p. 644-649.

Referências

WANG H. F.; SWIFT F. J. An unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations part 2: multi-machine power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 13, n. 4, p. 1355-1362, 1998.

WATANABE E. H.; BARBOSA P. G.; ALMEIDA K. C.; TARANTO G. N. Tecnologia FACTS- Tutorial. *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.

YANG, N.; LIU Q.; MACCALLEY J. D. TCSC Controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 13, n. 14, p. 1304–1310, 1998.

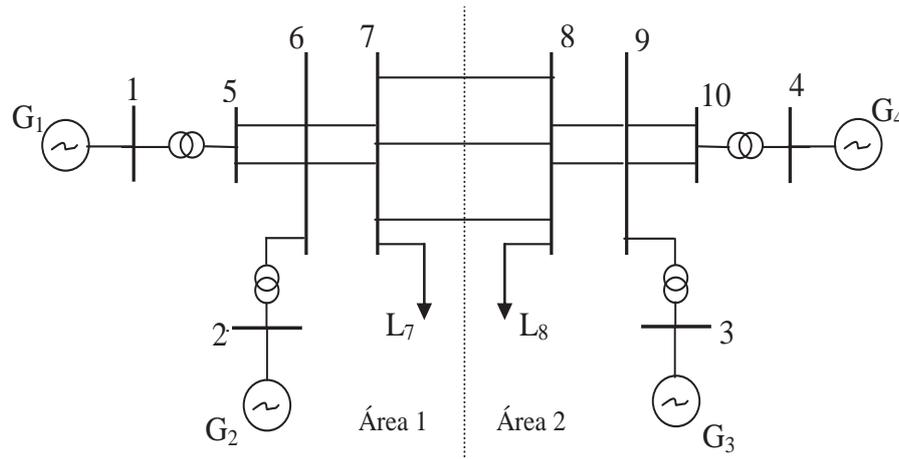
YU, F.; BAILU, Q. Electrical design aspects of pingguo TCSC project. *IEEE Transaction on Power Systems*, Piscataway, v. 18, n. 4, p. 1497-1506, 2005.

ZIMMERMAN R.; GAN D. Matpower a matlab power system simulation package. Lugar de Publicação: Local de Edição, ano de publicação. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/matpower.html>>. Acesso em: 15 nov. 2009.

Apêndice: Dados do Sistema Multimáquinas

O diagrama unifilar do sistema simétrico de duas áreas é mostrado na Figura A.1. Os dados aqui reproduzidos nas Tabelas A.1 a A.4 podem ser encontrados em Sauer e Pai (1998).

Figura 20 – Sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Sauer e Pai (1998)

Tabela 10 – Dados dos Geradores

	G1	G2	G3	G4
x'_d (pu)	0,033	0,033	0,033	0,033
x_q (pu)	0,19	0,19	0,19	0,19
x_d (pu)	0,2	0,2	0,2	0,2
H (s)	54	54	63	63
D (pu)	0,1	0,1	0,1	0,1
T'_{do} (s)	8	8	8	8

Tabela 11 – Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão

Variável	G1	G2	G3	G4
Kr (pu)	200	200	200	200
Tr (s)	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabela 12 – Dados das Linhas de Transmissão

Barra Inicial	Barra Final	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	5	0,001	0,012	-
2	6	0,001	0,012	-
7	8	0,022	0,22	0,33
7	8	0,022	0,22	0,33
7	8	0,022	0,22	0,33
6	7	0,002	0,02	0,03
6	7	0,002	0,02	0,03
4	10	0,001	0,012	-
3	9	0,001	0,012	-
9	8	0,002	0,02	0,03
9	8	0,002	0,02	0,03
5	6	0,005	0,05	0,075
5	6	0,005	0,05	0,075
10	9	0,005	0,05	0,075
10	9	0,005	0,05	0,075

Tabela 13 – Dados do Ponto de Operação Inicial - Caso Base.

Barra	V (pu)	Ang. (graus)	P _G (MW)	Q _G (MVar)	P _L (MW)	Q _L (MVar)
1	1,0	8,683	700,00	195,97	-	-
2	1,0	-2,088	700,00	505,25	-	-
3	1,0	-11,92	700,00	601,55	-	-
4	1,0	0	743,69	236,08	-	-
5	0,973	3,846	-	-	-	-
6	0,936	-6,928	-	-	-	-
7	0,886	-16,16	-	-	1159	212
8	0,865	-26,57	-	-	1575	288
9	0,924	-16,76	-	-	-	-
10	0,968	-5,149	-	-	-	-

Anexo: Artigo Submetido

ALMADA, L. M.; VALLE, D. B.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Utilização do modelo de injeção de potência do dispositivo FACTS TCSC para a análise da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos. *CBA*, (S.l.), 2012. (submetido – CBA 2012).