

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

**UTILIZAÇÃO DE SINAIS ADICIONAIS
ESTABILIZANTES PARA O AMORTECIMENTO DE
OSCILAÇÕES DE BAIXA FREQUÊNCIA DO SISTEMA
ELÉTRICO DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS**

Carlos Alberto Febres

Percival Bueno de Araujo

Orientador

Ilha Solteira – SP, Maio de 2008

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Utilização de Sinais Adicionais Estabilizantes para o Amortecimento de Oscilações de Baixa Frequência do Sistema Elétrico de Potência Multimáquinas”

CARLOS ALBERTO FEBRES

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
Maio/2008

FICHA CATALOGRÁFICA

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

F289u Febres, Carlos Alberto.
Utilização de sinais adicionais estabilizantes para o amortecimento de oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência multimáquinas / Carlos Alberto Febres. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008
119f . : il.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2008

Orientador: Percival Bueno de Araujo
Bibliografia: p. 98-105

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Estabilidade a pequenas perturbações.
3. Oscilações eletromecânicas. 4. PSS. 5. FACTS. 6. TCSC. 7. POD.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Utilização de Sinais Adicionais Estabilizantes para o Amortecimento de Oscilações de Baixa Frequência do Sistema Elétrico de Potência Multimáquinas

AUTOR: CARLOS ALBERTO FEBRES TAPIA

ORIENTADOR: Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

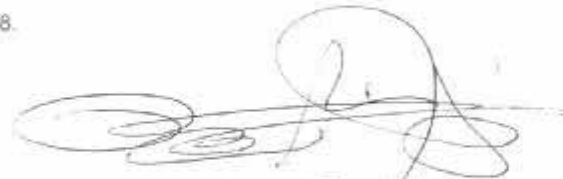
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora.

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

Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MENDONÇA ROCHA
Centro de Engenharias e Ciências Exatas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Data da realização: 28 de maio de 2008.



Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

*Aos meus pais José Francisco e Maria Jesús
Aos meus irmãos Ivonne Greta e Pool Christian*

Dedico

*Ao meu tio Héctor Jerónimo
Ao meu orientador Percival Bueno de Araújo*

Ofereço

Agradecimentos

Muitas coisas eu posso dizer agora quando consigo ver quanto andei e relembrar todas as situações que passei, desde quando eu cheguei até aqui, equipado de coragem e a perseverança tornou-se a minha melhor companheira para vencer mais uma etapa na minha vida. Quero agradecer a todas as pessoas que me ajudaram.

Ao Professor Percival Bueno de Araujo pelo desafio, compreensão, paciência, motivação e orientação para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Ana Diva Plascência Lotufo, Carlos Roberto Mendonça da Rocha e Laurence Duarte Colvara, pelas importantes sugestões que enriqueceram este trabalho.

A minha família.

Ao meu pai José Francisco Febres Tovar pelos ensinamentos, constante apoio e coragem nesta fase da minha vida.

A minha mãe Maria Jesús Tapia pela carinho, dedicação e compreensão por eu ter ficado longe de casa.

À minha irmã Ivonne Greta Febres Tapia pela amizade, parceria, auxílio e constante apoio nesta etapa.

Ao meu irmão Pool Christian Febres Tapia pela amizade e parceria em diferentes atividades nas minhas voltas para casa.

Ao meu tio Héctor Jerónimo pelo exemplo de perseverança e também por acompanhar os meus passos acreditando nos meus objetivos para esta minha formação.

A todos meus familiares, Tio Alberto Febres, Tia Graciela Málaga (Tia Chela), Tia Rosa Febres, primo José Tello Febres, sobrinhos Giancarlo e Gianfranco, avô Carlos Alberto Febres Fernandini e avó Irene Tovar, Tia Norma Tapia, Tio José Humberto Montoya e Tia Miriam Jerónimo, primos Karem Sybila e José Humberto (pepé), avó Georgina Terbullino, Tio Justo Carbajal, Tia Sara González Tio Justo Carbajal González, Tio Ricardo Carbajal González, Tio Arsedio Carbajal González.

Aos amigos Carlos Ronchi Cabrera, Victor Quichiz Bazalar e Frank Sotelo, que sempre estiveram atentos a minha trajetória.

Ao Conselho do Programa de Pós Graduação do qual fiz parte como representante discente.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, Ricardo Tokyo Higuti, Sérgio Kurokawa, Dílson Amâncio Alves, Carlos Roberto Minussi, Aparecido Augusto de Carvalho.

Ao pessoal da Seção de Pós Graduação, Onilda Naves de Oliveira Akasaki, Adelaide Amaral dos Santos Passipieri, entre muitos outros funcionários da FEIS/UNESP.

Ao Deoclécio Mitsuiti Kosaka, José Roberto Campos e técnicos administrativos do Departamento de Engenharia Elétrica pelas facilidades fornecidas durante o desenvolvimento das minhas atividades acadêmicas

Ao Departamento de Engenharia Elétrica pelo apoio financeiro na divulgação de trabalhos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro.

Ao Marcelo Santos Silva (Pardal) pela amizade, parceria e reciprocidade. Aos amigos do Departamento de Engenharia Elétrica, Marcos Amorielle Furini e André Luiz Silva Pereira (Cuiabá) que contribuíram para o melhor entendimento deste trabalho; ao Niltom Vieira Junior, Marcelo Fuly Batista, Jorge Henrique Depieri Medeiros e Guilherme Magalini Santos Decanini pela amizade.

A Vânia Claudia Paris.

Aos amigos Marcelo Sanches, Fabiano Alves Souza, Elcio Alteris dos Santos, Wesley Pontes, Renato de Aguiar Teixeira Mendes (Soneca), José Luis Choque, Wellington Guerra, Silvio Segura Salas, Rudi Vargas Solano, Andréa Barboza Proto, Virgilio Fries Müller, Apio Carniello, Estelio da Silva Amorin, Dárcio dos Santos Silva, Carlos Alberto Mota Castro (Maranhão), Vlademir de Jesús Silva Oliveira, Adriano dos Santos Cardoso, Wendel Cleber Soares, Marco Hideyoshi Shigematsu Nakashima, Flávio Queiroz de Souza, Flávio Andrade Faria, Ricardo Luiz Barros de Freitas (Baiano), Emerson Ravazzi Pires da Silva, Carlos Eduardo Pupin, Weslei Batista Perin, Meire de Melo Marques, Rodrigo Serra Daltin, Fausto Oliveira de Carvalho, Marcelo Semensato, Williams Pizolato, Lizandra Zacarias, Elmana, Cida, Renato (Coelho), Rafael, Eder Modesto, Maxwell Menezes, Ricardo Frangiosi.

*" ... O mundo está nas mãos daqueles que tem a coragem de sonhar
e correr o risco de viver seus sonhos ... "*
Paulo Coelho

Falou-me para meu bem, e por isso que tuas palavras me seguirão como cachorros fieis seguem seus donos.

Seguir-me-ão até que as receba na minha casa e as guarde.

Velaram por meu bem estar.

Espantarão os meus piores inimigos e

Deitar-se-ão docilmente no umbral da minha paz.

Como água em quase todos os terrenos, assim eu encontrarei a paz à maior ou menor profundidade, em quase todas as situações da minha vida.

Eu afundo o poço com os meus pensamentos e mais ainda com o meu amor, nascerá por fim água pura e fresca que satisfazendo a minha sede acalmará a minha alma.

Darei a minha alma seu alimento, sua oportunidade para crescer e fortalecer-se, para estar à altura do meu destino e para manifestar-se. Darei-lhe a hora de solidão e de silêncio cada dia!

No silêncio e na solidão descobrirei o segredo para aumentar e consolidar meu bem estar.

Para o meu bem estar eu acordo com o sol e faço o plano da minha vida.

Tenho sorriso e palavras bondosas no momento certo.

Não darei a quem não mereça.

Condeno o mal com o elogio do oposto.

Para corrigir o mal, elogio ante ele o bom.

Avanço em linha reta até meus objetivos.

Preparo-me para viver um ou mil dias.

Esta atitude é tranqüila e corajosa é guardiã diante do impenetrável e é a suprema dignidade do homem.

O homem cria seu próprio mundo. Um dia é o pai dos dias que seguem. Venho do meu próprio ontem.

Não espero o sucesso, avanço até ele.

Tenho certeza que posso lançar o meu ser como uma flecha, desde o denso arco da minha vontade. E que irá aonde eu olhar.

Os dias da minha existência estão contados; não sei quantos são, mas eu sei que estão vazios e preciso enchê-los.

Não posso deter-me. De cada ponto aonde eu chego saem muitos caminhos. Eu escolho o meu em cada passo. Cada um deles é uma afirmação e uma decisão.

O erval que encontrou fica semeado, e agora é um dos que no final da tarde retornam através do imenso campo adormecido.

Se com a tua semeadura, não me sinto mais feliz, para que terás semeado.

Se não me arrancou pelo menos uma espinha da minha carne, para que terás vivido?.

Recolho tuas palavras!

Ainda que tu cales, nunca deixarei de te escutar.

Logo será uma sombra que não se move na sombra, mas continuarei te amando.

Resumo

Com o crescimento do consumo de energia, aliado às restrições ambientais que dificultam a construção de unidades geradoras e/ou de linhas de transmissão, os sistemas elétricos de potência se tornaram cada vez maiores e complexos. Para aumentar sua confiabilidade, diferentes sistemas foram interligados e passaram a trabalhar próximo de seus limites.

Este trabalho apresenta estudos referentes à estabilidade a pequenas perturbações de um sistema elétrico de potência multimáquinas. Busca-se fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência com a utilização dos dispositivos Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) e também o dispositivo FACTS Capacitor Série controlado a tiristor (TCSC), equipado com um controlador adicional (POD).

Para se conseguir este objetivo é realizada a modelagem do sistema elétrico de potência, seguindo de sua modificação para a inclusão do TCSC. São também modelados os controladores ESP e POD.

O ajuste dos parâmetros dos controladores é feito pelo Método da Compensação de Fase e a localização destes dispositivos no sistema elétrico é discutida.

A partir dos modelos implementados computacionalmente são realizadas simulações e os resultados obtidos são discutidos e conclusões são apresentadas a respeito da estabilidade às pequenas perturbações do sistema elétrico de potência.

Palavras-chave – Sistemas Elétricos de Potência, Estabilidade a Pequenas Perturbações, Oscilações Eletromecânicas, PSS, FACTS, TCSC, POD.

Abstract

As the electrical energy demand increases, associated to environmental restrictions that difficult the construction of new generator unities and/or transmission lines, the electrical power systems are becoming large and complex. To increase the reliability, different systems are interconnected and working close to their limits.

This work presents studies referred to small perturbations stability of a multimachine electrical power system. Low frequency electromechanical oscillations are damped using stabilizer devices like Power Systems Stabilizer (PSS) and also FACTS devices as tiristor control series capacitor (TCSC) equipped with an additional controller (POD).

This objective is attained modeling the electrical power system and modifying it to include the TCSC. The ESP and POD controllers are also modeled.

The controller parameter adjustments are effectuated by the Phase Compensation Method and the positioning of these devices on the electrical power system is discussed.

Simulations are realized from the models computationally implemented and the results are discussed emphasizing the stability to small perturbations of the electrical power system.

Key-Words – Electric Power Systems, Small Signal Stability, Electromechanical Oscillations, PSS, FACTS, TCSC, POD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Diagrama Unifilar – Gerador Síncrono.....	28
Figura 2.1.	Fluxo de Potência na Linha de Transmissão.....	31
Figura 2.3.	Regulador de Tensão – Diagrama de Blocos.....	35
Figura 2.4.	MSP Multimáquinas – Diagrama de Blocos.....	36
Figura 3.1.	Fluxo de Potência Ativa sob Influência da Resistência Elétrica.....	41
Figura 3.2.	Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC.....	42
Figura 3.3.	Diagrama Unifilar – Inclusão do TCSC.....	43
Figura 3.4.	Sistema de Controle da Compensação do TCSC.....	46
Figura 3.5.	MSP Multimáquinas – Atuação do TCSC.....	48
Figura 4.1.	Sinal Suplementar ΔV_{sk} inserido pelo ESP.....	51
Figura 4.2.	Estrutura Dinâmica Básica do ESP.....	51
Figura 4.3.	Malha de Controle da Tensão.....	52
Figura 4.4.	Controlador POD para Dispositivo FACTS.....	58
Figura 4.5.	Estrutura Dinâmica do TCSC – POD.....	59
Figura 4.6.	Função de Transferência do Sistema Elétrico de Potência com Controlador POD.....	62
Figura 4.7.	Efeito do Controlador POD no Resíduo Associado ao Autovalor λ_i	63
Figura 5.1.	Sistema Sul Brasileiro Reduzido – Diagrama Unifilar.....	67
Figura 5.2.	Fatores de Participação: Modo Local 4.....	68
Figura 5.3.	Fatores de Participação: Modo Local 5.....	68
Figura 5.4.	Fatores de Participação: Modo Local 7.....	68
Figura 5.5.	Fatores de Participação: Modo Local 8.....	69
Figura 5.6.	Fatores de Participação: Modo Local 9.....	69
Figura 5.7.	Variações da Velocidade Angular: Gerador 3.....	72
Figura 5.8.	Sistema New England – Diagrama Unifilar.....	73
Figura 5.9.	Fatores de Participação: Modo Local 4.....	74
Figura 5.10.	Fatores de Participação: Modo Local 5.....	74
Figura 5.11.	Fatores de Participação: Modo Local 6.....	75
Figura 5.12.	Fatores de Participação: Modo Local 7.....	75
Figura 5.13.	Fatores de Participação: Modo Local 8.....	75
Figura 5.14.	Sistema New England Equipado com ESP's: $\xi = 0.80$	77

Figura 5.15.	Sistema New England Equipado com ESP's: $\xi = 0.25$	79
Figura 5.16.	Influência diversos $\xi=0.25$ para ESP por Máquina (2, 3, 5, 6, 9).....	81
Figura 5.17.	Fatores de Participação: Modo Oscilatório 4.....	83
Figura 5.18.	Fatores de Participação: Modo Oscilatório 5.....	83
Figura 5.19.	Fatores de Participação: Modo Oscilatório 6.....	84
Figura 5.20.	Fatores de Participação: Modo Oscilatório 7.....	84
Figura 5.21.	Fatores de Participação: Modo Oscilatório 8.....	84
Figura 5.22.	Fatores de Participação: Modo Oscilatório Interárea.....	85
Figura 5.23.	Influência dos ESP's $\xi=0.80$ por Máquina no Sistema New England Modificado.....	86
Figura 5.24.	Locais vs. Resíduos para instalação do TCSC – POD.....	89
Figura 5.25.	Variações da Velocidade na Máquina 2 – Sistema New England Modificado: TCSC POD e ESP's.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1.	Sistema Sul Brasileiro Reduzido: Autovalores Dominantes.....	67
Tabela 5.2.	Parâmetros dos ESP's: $\xi = 0.2$	69
Tabela 5.3.	Parâmetros dos ESP's: $\xi = 0.8$	70
Tabela 5.4.	Autovalores Dominantes: com ESP's: $\xi = 0.2$	70
Tabela 5.5.	Autovalores Dominantes: com ESP's: $\xi = 0.8$	71
Tabela 5.6.	Autovalores Dominantes: Sistema New England.....	74
Tabela 5.7.	Fatores de Participação – Sistema New England.....	76
Tabela 5.8.	Parâmetros dos ESP's – Coeficiente de Amortecimento Especificado $\xi = 0.8$ Caso Base.....	76
Tabela 5.9.	Estabilidade vs. Combinações – Máquinas com ESP $\xi = 0.80$	77
Tabela 5.10.	Parâmetros dos ESP's – Coeficiente de Amortecimento Especificado $\xi = 0.25$	78
Tabela 5.11.	Autovalores Dominantes: Sistema New England com ESP's $\xi = 0.25$	80
Tabela 5.12.	Estabilidade vs. Combinações – Máquinas com ESP: diversos ξ	81
Tabela 5.13.	Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado.....	83
Tabela 5.14.	Fatores de Participação – Sistema New England Modificado.....	85
Tabela 5.15.	Parâmetros dos ESP's: Coeficiente de Amortecimento $\xi = 0.8$ – Caso Modificado.....	86
Tabela 5.16.	Estabilidade vs. Combinações – Máquinas com ESP: $\xi = 0.80$	87
Tabela 5.17.	Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado com ESP's $\xi = 0.80$	87
Tabela 5.18.	Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado com ESP's $\xi = 0.80$	88
Tabela 5.19.	Parâmetros do POD.....	89
Tabela 5.20.	Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado com TCSC– POD.....	90
Tabela 5.21.	Fatores de Participação: Sistema New England Modificado com TCSC– POD.....	90
Tabela 5.22.	Parâmetros ESP – Coeficiente de Amortecimento Especificado $\xi = 0.8$ Caso Modificado.....	91

Tabela 5.23.	Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado com TCSC – POD e ESP's.....	91
Tabela II.1	Dados das Linhas.....	108
Tabela II.2.	Dados das Barras.....	111
Tabela II.3.	Dados dos Geradores.....	112
Tabela II.4.	Parâmetros do Sistema de Excitação.....	112
Tabela III.1	Dados das Linhas.....	113
Tabela III.2.	Dados das Barras – Caso Base.....	115
Tabela III.3.	Dados das Barras – Caso Modificado.....	116
Tabela III.4.	Dados dos Geradores.....	118
Tabela III.5.	Parâmetros do Sistema de Excitação.....	118
Tabela III.6.	Dados do Compensador Série Controlado a Tiristor.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS

MSP	Modelo de Sensibilidade de Potência
SEP	Sistema Elétrico de Potência
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
ESP	Estabilizador de Sistemas de Potência
PSS	Power System Stabilizer
POD	Power Oscillation Damping
GTO	Gate – Turn Off Thyristor
TCR	Thyristor Controlled Reactor
RAT	Regulador Automático de Tensão
GEP	Função de Transferência do Sistema Elétrico

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS

Δ	Pequenas variações em torno de um ponto de operação
∂	Derivada parcial
\cdot	d/dt
T	Matriz de transformação de coordenadas
s	Operador de Laplace
E'_k	Tensão interna do gerador k
E_{ak}	Tensão do gerador k
I_k	Corrente do gerador k
I_{km}	Corrente na linha de transmissão k – m
V_{dk}, V_{qk}	Tensões de eixo direto e eixo de quadratura
V_r, V_m	Tensões de eixo real e eixo imaginário
V_k	Tensão terminal do gerador k
V_{refk}	Tensão de referência do gerador k
S_{Gk}	Potência complexa do gerador k
S_{km}, S_{mk}	Potência complexa da linha de transmissão k – m
E_{fdk}	Tensão de campo da máquina síncrona;
E'_{qk}	Tensão interna da máquina síncrona;
I_{dk}, I_{qk}	Correntes da máquina síncrona referidas às coordenadas da própria máquina
Z_{km}	Impedância da linha de transmissão entre as barras k – m
r_{km}	Resistência elétrica da linha de transmissão k – m
X_{km}	Indutância elétrica da linha de transmissão k – m
X_{csc}	Capacitância do Compensador Série Controlado a Tiristor
K_{rk}	Ganho do regulador de tensão
T_{rk}	Constante de tempo do regulador de tensão
K_{Ak}, K_{Vk}	Coefficientes de reação de armadura
$M_k = 2H_k$	Constante de inércia da máquina síncrona
T'_{d0k}	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto da máquina síncrona
X_{dk}	Reatância síncrona de eixo direto da máquina síncrona
X'_{dk}	Reatância transitória de eixo direto da máquina síncrona

x_{qk}	Reatância síncrona de eixo de quadratura da máquina síncrona
K_{TCSC}	Ganho do Compensador Série Controlado a Tiristor
T_{TCSC}	Constante de tempo do Compensador Série Controlado a Tiristor
P_{e_k}	Potência elétrica ativa gerada pelo gerador k
P_{m_k}	Potência mecânica do gerador k
P_{a_k}	Potência de aceleração do gerador k
D_k	Coefficiente de amortecimento da máquina síncrona
ω_{ok}	Velocidade síncrona = 377 (rad/s)
ω_k	Velocidade do rotor do gerador k
δ_k	Ângulo de carga da máquina síncrona
$A1_{Gk}, A2_{Gk}, A3_{Gk}$	Coefficientes de sensibilidade de potência ativa do gerador k
$R1_{Gk}, R2_{Gk}, R3_{Gk}$	Coefficientes de sensibilidade de potência reativa do gerador k
$A1_{km}, A2_{km}, A3_{km}$	Coefficiente de sensibilidade de potência ativa do gerador k
$R1_{km}, R2_{km}, R3_{km}$	Coefficientes de sensibilidade de potência reativa do gerador k
A_{xkm}	Coefficiente de sensibilidade de potência ativa da linha de transmissão
R_{xkm}	Coefficiente de sensibilidade de potência reativa da linha de transmissão
V_k, V_m	Tensões das barras em estudo k e m
θ_k	Ângulo de tensão na barra k
θ_m	Ângulo de tensão na barra m
P_{Gk}	Potência ativa gerada entregue na barra k
Q_{Gk}	Potência reativa gerada entregue na barra k
P_{km}	Potência ativa transferida da barra k para m
Q_{km}	Potência reativa transferida da barra k para m
P_{Lk}	Carga de potência ativa na barra k
Q_{Lk}	Carga de potência reativa na barra k
ω_n	Frequência natural não amortecida
T_{m_k}	Variação de torque mecânico no gerador k
Ω	Conjunto de linhas de transmissão ligadas à barra k

$[A]$	Matriz de sensibilidade de potência ativa
$[R]$	Matriz de sensibilidade de potência reativa
A	Matriz de estado
λ	Autovalor
φ	Autovetor direito
ψ	Autovetor esquerdo
f_p	Fator de participação
R_{ijk}	Resíduo associado ao modo k devido à entrada i e saída j
ω_{nlek}	Frequência natural não amortecida no gerador k
T_{ok}	Constante de tempo do bloco washout – ESP e POD
$T_{1k}, T_{2k}, T_{3k}, T_{4k}$	Constates de tempo para controladores ESP e POD
V_{1k}, V_{2k}, V_{sk}	Variáveis de estado do ESP
$X'_{1k}, X'_{2k}, X'_{sk}$	Variáveis de estado do POD
K_{1k}	Coefficiente de torque de sincronização
ξ_{min}	Coefficiente de amortecimento mínimo especificado
D_{PSSk}	Amortecimento especificado do ESP no gerador k
K_{PSSk}	Ganho do Estabilizador de Sistemas de Potência
K_{PODK}	Ganho do controlador POD

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução.....	20
Capítulo 2: Modelo de Sensibilidade de Potência para Sistema Multimáquinas.....	26
2.1. Introdução.....	26
2.2. Equações Básicas do MSP para Sistemas Multimáquinas.....	27
2.3. Potências Geradas.....	30
2.4. Fluxo de Potência na Rede de Transmissão.....	30
2.5. Balanço Nodal de Potência.....	31
2.6. Tensão Interna de Eixo de Quadratura da Máquina Síncrona.....	34
2.7. Sistema de Excitação (Regulador Automático de Tensão).....	35
2.8. Equação de Oscilação (Equação Swing).....	35
2.9. Representações do Sistema Multimáquinas pelo MSP.....	36
2.9.1. Decomposição Ativa e Reativa.....	37
2.9.2. Decomposição em Escalas de Tempo Rápida e Lenta.....	37
2.9.3. Modelos Ativo e Reativo para Sistema Multimáquinas.....	37
2.10. Conclusões.....	38
Capítulo 3: Modelo do Compensador Série Controlado a Tiristor e sua Influência no Sistema Elétrico de Potência Multimáquinas.....	40
3.1. Introdução.....	40
3.2. Influência da Compensação Série.....	41
3.3. Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC.....	42
3.4. Coeficientes de Sensibilidade de Potência do Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC.....	43
3.5. Inclusão do Controle da Reatância do Compensação do Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC.....	45
3.6. Balanço Nodal de Potência sob Atuação do TCSC.....	46
3.7. Representações do Sistema Multimáquinas sob Atuação do Compensador Série Controlado a Tiristor pelo MSP.....	47
3.8. Conclusões.....	48
Capítulo 4: Sinais Estabilizantes Suplementares ESP e POD.....	50
4.1. Introdução.....	50
4.2. Estabilizador de Sistemas de Potência.....	51
4.2.1. Inclusão de Estabilizador de Sistemas de Potência no MSP.....	53
4.2.2. Localização do Estabilizador de Sistemas de Potência.....	55
4.2.3. Ajuste dos Parâmetros do Estabilizador de Sistemas de Potência.....	56
4.3. Controlador para Amortecimento de Oscilações de Potência POD.....	58
4.3.1. Inclusão do TCSC – POD no MSP.....	59
4.3.2. Localização do TCSC – POD.....	62
4.3.3. Ajuste dos Parâmetros do Controlador POD.....	63
4.4. Conclusões.....	64
Capítulo 5: Simulações e Resultados.....	66
5.1. Introdução.....	66
5.2. Sistema Sul Brasileiro Reduzido.....	66

5.3. Sistema New England - Caso Base.....	72
5.4. Sistema New England - Modificado.....	82
5.4.1. Sistema New England Modificado – ESP.....	82
5.4.2. Sistema New England Modificado – TCSC POD.....	88
5.5. Conclusões	92
Capítulo 6: Conclusões Gerais e Sugestões para Trabalhos Futuros	95
Referências	98
Apêndice I – Transformação de Coordenadas	106
Apêndice II – Dados: Sistema Sul Brasileiro Reduzido.....	108
Apêndice III – Dados: Sistema New England.....	113
Anexo I – Artigos Publicados.....	119

Capítulo 1

Introdução

Uma demanda crescente de energia elétrica tem sido registrada nos últimos anos e esta tendência deve continuar o que contribui para o aparecimento de problemas de sobrecarga, subutilização do potencial de transmissão e problemas relacionados com a estabilidade dos sistemas elétricos de potência.

Dentre vários fatores, a estabilidade dos sistemas elétricos de potência é condição fundamental para uma operação segura e confiável, sendo este assunto bastante estudado na literatura (DEMELLO; CONCÓRDIA, 1969, KUNDUR, 1994, ANDERSON; FOUAD, 2003). Em muitos casos, a estabilidade é dividida em estabilidade transitória (no caso de grandes perturbações), e estabilidade dinâmica (quando de pequenas perturbações) (KUNDUR et al., 2004).

A origem das pequenas perturbações é diversificada e podem ocorrer em qualquer sistema elétrico de potência. Estas pequenas perturbações podem excitar os modos de oscilações eletromecânicas do sistema elétrico (oscilações do ângulo do rotor do gerador síncrono).

As oscilações eletromecânicas surgem a partir da falta de torque de amortecimento em sistema elétricos. Inicialmente estas oscilações foram amortecidas usando os enrolamentos amortecedores dos rotores dos geradores síncronos, o que ficou sendo por um tempo a solução do problema. Com o crescimento e sofisticação dos sistemas de energia, estes começaram a trabalhar muito próximos de limites operacionais comprometendo assim a sua estabilidade (MARTINS, et al., 1994, PAI; GUPTA; PADIYAR, 2004) e novos métodos tiveram que ser utilizados para manter uma operação segura.

As oscilações eletromecânicas surgem no sistema elétrico em regime permanente, em condições de carga pesada, aliadas a longas linhas de transmissão e possuem frequências na faixa de 0.5 a 2.0 Hz (DEMELLO; CONCORDIA, 1969). Estas oscilações podem ser pouco amortecidas e, em casos mais graves, até mesmo instáveis. Uma das conseqüências das oscilações eletromecânicas são as variações nos fluxos de potência nas linhas de transmissão, que podem limitar a capacidade de transmissão de potência elétrica.

Reguladores de tensão com constantes de tempo pequenas e altos ganhos aliados às condições de grandes potências transferidas a longas distancias, comprometeram ainda mais a questão da estabilidade às pequenas perturbações (DEMELLO; CONCORDIA, 1969, PAI, GUPTA, PADIYAR, 2004). Para superar o problema, sinais adicionais estabilizantes começaram ser introduzidos nos sistemas de excitação para fornecer torque de amortecimento através dos chamados Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) (do inglês Power System Stabilizer – PSS) (DEMELLO; CONCORDIA, 1969). O uso de ESP's fornece soluções confiáveis e baratas e ainda são utilizadas atualmente.

Para a aplicação dos ESP's uma representação linear do sistema elétrico de potência pode ser utilizada, pois permite uma identificação dos modos oscilatórios de baixa frequência, aliada a uma análise conhecida como análise modal. Desta análise pode-se obter informações sob a estabilidade, o grau de participação das variáveis elétricas na formação das oscilações e os meios para amortecer estas oscilações (ROGERS, 2000).

Como nos dias atuais existe uma necessidade crescente de energia elétrica, condições de maior eficiência e maior flexibilidade passaram a ser exigidas do sistema elétrico, principalmente para aumentar os limites estáveis de transmissão de potência. Para isto, após o desenvolvimento da eletrônica de potência, uma alternativa passou a ser o uso dos controladores FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) (WANG; SWIFT, 1997, SONG; JOHNS, 1999).

Esta é uma solução efetiva e simples que podem contribuir para o amortecimento das oscilações eletromecânicas, além de controlar os fluxos de potência e aumentar a capacidade de transferência de potência na rede de transmissão (SONG; JONHS, 1999, HINGORANI; GYUGYI, 2000, CORONADO; ZUÑIGA; RAMÍREZ, 2001).

Dentre os diversos dispositivos FACTS existentes, um deles é o Compensador Série Controlado a Tiristor (do inglês, Thyristor Controlled Serie Capacitor - TCSC) (SONG; JONHS, 1999, COLMAN; ARAUJO, 2004, NASSIF et al., 2004).

Estes equipamentos têm como principal função o controle do fluxo de potência na linha de transmissão. Estudos posteriores mostraram que o TCSC, quando dotado de um sistema de controle suplementar, poderia gerar torque de amortecimento ao sistema elétrico, melhorando então o seu desempenho pelo amortecimento de suas oscilações (LARSEN; SWANN, 1981, WANG; SWIFT, 1996, WANG, 2000).

A utilização destes dispositivos eletrônicos baseados em diodos, tiristores e GTO (do inglês Gate – Turn Off Thyristor) permite modificar parâmetros elétricos para controlar o fluxo de potência, além de estender os limites térmicos de uma linha de transmissão. Estes dispositivos têm atuação rápida, o que pode ser usado para amortecer oscilações eletromecânicas oferecendo uma vantagem em relação ao uso de controladores mecânicos. Com isto o impacto dinâmico destes dispositivos no sistema elétrico de potência é positivo. Esta ação de controle sob as oscilações eletromecânicas melhora a estabilidade às pequenas perturbações do sistema elétrico de potência (DEMELLO; CONCÓRDIA, 1969, SONG; JONHS, 1999, HINGORANI; GYUGYI, 2000, CORONADO; ZUÑIGA; RAMÍREZ, 2001).

Este trabalho tem por objetivo o estudo da estabilidade às pequenas perturbações de um sistema de potência multimáquinas, com a consideração dos dispositivos ESP e FACTS TCSC.

Para a realização destes estudos é necessária a modelagem do sistema elétrico de potência multimáquinas, composto por geradores e controladores, interligados por uma rede de transmissão.

Neste trabalho a modelagem do sistema multimáquinas será feita através do Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP), apresentado por Deckmann e da Costa (1994). Este modelo tem se mostrado como uma alternativa ao modelo conhecido como de Heffron & Phillips, largamente utilizado na literatura (DEMELLO; CONCÓRDIA, 1969, MOUSSA; YU, 1974, KUNDUR, 1994, ANDERSON; FOUAD, 2003).

A formulação que aqui será utilizada difere da apresentada por Deckmann e Da Costa (1994) pela consideração da resistência da linha de transmissão (este parâmetro tem se tornado mais influente nos sistemas de transmissão atuais, devido às grandes distâncias entre os centros geradores de energia e os consumidores). Também será formulada a inclusão do dispositivo TCSC nas linhas de transmissão do sistema multimáquinas.

Uma vez modelado o sistema elétrico e o TCSC, será proposto um sistema de controle suplementar para o equipamento FACTS. A partir de então, são realizados estudos a respeito da estabilidade a pequenas perturbações. Estes estudos são feitos a partir de análises no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Através de simulações mostra-se que as oscilações produzidas pelo carregamento das linhas de transmissão são eletromecânicas e também se indica os locais onde seria mais efetiva a instalação de sinais adicionais estabilizantes e/ou dispositivo TCSC para se obter amortecimento adequado.

Neste trabalho são usados controladores ESP e dispositivo FACTS TCSC equipado com controlador POD (Power Oscillations Damping) com o objetivo de amortecer oscilações eletromecânicas pouco amortecidas ou instáveis do sistema elétrico.

Utilizando-se técnicas de projeto do controle clássico como a compensação de fase, são projetados os parâmetros dos sistemas de controle destes dois equipamentos. Para isto foram considerados sinais de natureza local para a entrada dos sistemas de controle, isto é, sinais que estão disponíveis no local de instalação dos equipamentos. No caso do ESP foi utilizado o sinal “variações de velocidade angular do rotor do gerador ($\Delta\omega$)” e para o POD as “variações de fluxo de potência ativa na linha de transmissão ΔP_{km} ”.

Para a decisão sobre os locais de instalação dos dispositivos foram utilizados os fatores de participação (no caso dos ESP's) e os resíduos da função de transferência (para os POD's).

A partir das equações obtidas, são realizadas simulações para se verificar a influência destes dispositivos na estabilidade às pequenas perturbações do sistema elétrico de potência multimáquinas.

Contribuições da Dissertação

Neste trabalho são realizadas a implementação computacional no MSP para sistemas multimáquinas, com a consideração da resistência das linhas de transmissão, assim como sua modificação para se considerar a atuação do dispositivo FACTS TCSC. O equacionamento da forma de operação do TCSC é realizado o que permite incluí-lo na modelagem do sistema elétrico de potência. Os controladores adicionais ESP e POD também são equacionados e suas atuações são introduzidas no modelo. A localização destes controladores no sistema elétrico de potência também é averiguada, bem como o ajuste de seus parâmetros. Simulações no domínio do tempo e no domínio da frequência são realizadas para se verificar a estabilidade às pequenas perturbações do sistema elétrico de potência. De maneira geral, estas são as maiores contribuições desta Dissertação de Mestrado.

Estrutura do Trabalho

Quanto à organização do texto, este se apresenta como descrito na seqüência.

No Capítulo 2 é apresentado o Modelo de Sensibilidade de Potência para Sistema Multimáquinas, com toda a formulação matemática necessária ao seu desenvolvimento.

No Capítulo 3 são deduzidas as equações para a inclusão do TCSC no sistema elétrico de potência, refletido nos coeficientes de sensibilidade de potência da linha de transmissão (tanto ativo quanto reativo). Também é definido o controle suplementar do TCSC.

No Capítulo 4 são deduzidas as equações para sinais estabilizantes suplementares dos controladores ESP's e dispositivo FACTS TCSC equipado com controlador POD, com o objetivo de se introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência existentes em sistemas elétricos de potência multimáquinas.

No Capítulo 5 são apresentadas simulações e análises de resultados obtidos a partir de dois sistemas teste chamados de “Sul Brasileiro Reduzido” e “New England” a respeito da estabilidade às pequenas perturbações. As simulações foram realizadas utilizando-se o software MATLAB[®].

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões gerais do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

Seguem as Referências Bibliográficas, Apêndices e Anexos, necessários para uma

melhor compreensão do trabalho realizado.

Capítulo 2

Modelo de Sensibilidade de Potência para Sistemas Multimáquinas

2.1. Introdução

Este Capítulo apresenta o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP), para sistemas de energia elétrica multimáquinas.

O modelo é baseado no balanço nodal de potência, isto é, em qualquer instante, a potência ativa entregue a qualquer nó do sistema multimáquinas deve ser igual à potência ativa que deixa este nó. O mesmo vale para a potência reativa.

Ao final da dedução o sistema multimáquinas fica representado por coeficientes de sensibilidade de potência tanto para máquinas síncronas (coeficientes dos geradores), como também para linhas de transmissão do sistema elétrico (coeficientes das linhas de transmissão).

Estes coeficientes de sensibilidade de potência relacionam as variações das potências geradas e consumidas (ativa e reativa), com variáveis de estado e variáveis algébricas, que passam a descrever o sistema elétrico de potência multimáquinas.

2.2. Equações Básicas do MSP para Sistemas Multimáquinas

O modelo de Sensibilidade de Potência foi proposto em (DECKMANN; DA COSTA, 1994) para a análise das oscilações eletromecânicas de baixa frequência dos rotores dos geradores síncronos.

Neste modelo são considerados no gerador síncrono os enrolamentos do estator (enrolamentos das fases a, b e c), e também um enrolamento do rotor, (o enrolamento de campo fd).

Em vista disso têm-se dois sistemas de coordenadas em atuação. Um onde estão representadas as grandezas do estator (parte fixa do gerador síncrono), sendo este um sistema de coordenadas estático [r,m]. O outro sistema de coordenadas se refere às grandezas do rotor (parte móvel do gerador síncrono), sendo este um sistema rotativo [d,q]. Como consequência, faz-se necessária uma mudança de coordenadas para se trabalhar num sistema comum de coordenadas, facilitando os cálculos necessários para os estudos futuros. Aqui será utilizada uma transformação baseada na Transformada de Park (ANDERSON; FOUAD, 2003), onde todas as grandezas podem ser referidas ao sistema de coordenadas rotativo ou ao sistema de coordenadas estático.

O operador linear que realiza essa operação é a matriz T, cuja dedução é apresentada no Apêndice 1 e mostrada na equação (2.1), onde a variável δ_k corresponde ao ângulo formado entre o eixo real (eixo r, do sistema de coordenadas fixo), e o eixo em quadratura (eixo q, do sistema de coordenadas rotativo), do rotor do gerador síncrono conectado à barra k do sistema elétrico de potência.

$$T = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta_k & -\text{cos } \delta_k \\ \text{cos } \delta_k & \text{sen } \delta_k \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Para a obtenção das equações básicas do MSP considere inicialmente um gerador

síncrono conectado a uma barra genérica k do sistema elétrico, como na Figura 2.1.

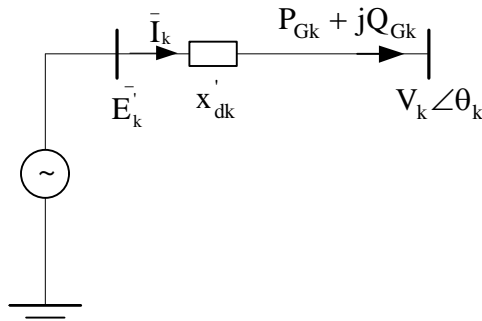


Figura 2.1. Diagrama Unifilar – Gerador Síncrono

Na Figura 2.1, as grandezas \bar{E}'_k , \bar{V}_k e \bar{I}_k correspondem à tensão interna do gerador k, à tensão terminal da barra k e à corrente do gerador k, respectivamente. \tilde{S}_{Gk} é a potência complexa interna do gerador síncrono k, enquanto \tilde{S}_{Gk} é a potência complexa entregue à barra k. O parâmetro x'_{dk} é a reatância transitória de eixo direto do gerador síncrono k.

A tensão terminal expressa em componentes do sistema de coordenadas fixo (r,m), é mostrada na equação (2.2), enquanto que a equação (2.3) (tensão interna do gerador k), é obtida por inspeção na Figura 2.1.

$$\bar{V}_k = V_k \angle \theta_k = V_k \cos \theta_k + j V_k \sin \theta_k = V_{rk} + j V_{mk} \quad (2.2)$$

$$\bar{E}'_k = \bar{V}_k + j x'_{dk} \bar{I}_k = |\bar{E}'_k| \angle \gamma \quad (2.3)$$

Para a localização do sistema de coordenadas móvel (d,q) do gerador k basta conhecer o ângulo interno δ_k . Para seu cálculo é utilizada a tensão \bar{E}_{ak} [ANDERSON; FOUAD, 2003, KUNDUR, 1994], conforme a equação (2.4) onde a grandeza x_{qk} corresponde à reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador k.

$$\bar{E}_{ak} = \bar{V}_k + j x_{qk} \bar{I}_k = |\bar{E}_{ak}| \angle \delta_k \quad (2.4)$$

Aplicando a matriz de transformação de coordenadas T à equação (2.2), a tensão terminal é expressa em componentes de eixo direto e de eixo em quadratura, conforme mostrado nas equações (2.5).

$$V_{dk} = V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k) \quad (2.5)$$

$$V_{qk} = V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k)$$

Adotando procedimento análogo ao realizado com a equação (2.2), as equações (2.3) e (2.4) podem ser expressas em componentes de eixo direto e eixo em quadratura, como nas equações (2.6) e (2.7), respectivamente.

$$E'_{dk} = V_{dk} - x'_{dk} I_{qk} \quad (2.6)$$

$$E'_{qk} = V_{qk} + x'_{dk} I_{dk}$$

$$0 = V_{dk} - x_{qk} I_{qk} \quad (2.7)$$

$$E_{ak} = V_{qk} + x_{qk} I_{dk}$$

Agrupando as equações (2.5) a (2.7) e isolando os termos correspondentes à tensão do gerador k, podem ser escritas as equações (2.8) para a tensão terminal.

$$V_{dk} = V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k) = E'_{dk} + x'_{dk} I_{qk} = x_{qk} I_{qk} \quad (2.8)$$

$$V_{qk} = V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k) = E'_{qk} - x'_{dk} I_{dk} = E_{ak} - x_{qk} I_{dk}$$

Utilizando as equações (2.8), podem ser obtidas as correntes de eixo direto e eixo em quadratura do gerador k, como nas equações (2.9).

$$I_{dk} = \frac{E'_{qk} - V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{X_{qk}} \quad (2.9)$$

$$I_{qk} = \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{X_{qk}}$$

As equações (2.5) a (2.9) são as equações básicas que permitem a formulação do Modelo de Sensibilidade de Potência para o sistema multimáquinas.

2.3. Potências Geradas

A potência complexa entregue à barra k – \tilde{S}_{Gk} , decomposta em potência ativa (P_{Gk}) e potência reativa (Q_{Gk}), pode ser calculada pela equação (2.10).

$$\tilde{S}_{Gk} = \bar{V}_k \bar{I}_k^* = P_{Gk} + jQ_{Gk} \quad (2.10)$$

A substituição das equações básicas do MSP permitem escrever as parcelas de potência ativa e potência reativa entregues à barra k , como nas equações (2.11).

$$P_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k}{X_{dk}} \sin(\delta_k - \theta_k) + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{X_{qk}} - \frac{1}{X_{dk}} \right] V_k^2 \sin 2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.11)$$

$$Q_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k}{X_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) - \frac{V_k^2}{X_{dk}} - \frac{1}{2} V_k^2 \left[\frac{1}{X_{qk}} - \frac{1}{X_{dk}} \right] [1 - \cos 2(\delta_k - \theta_k)]$$

2.4. Fluxo de Potência na Rede de Transmissão

Para o cálculo do fluxo de potência na linha de transmissão entre as barras k e m , considere o diagrama da Figura 2.2.

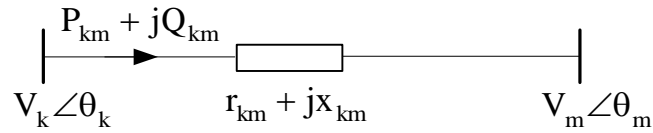


Figura 2.2: Fluxo de Potência na Linha de Transmissão

A potência complexa transferida entre as barras k e m através da linha de transmissão (\tilde{S}_{km}), decomposta em parcelas de fluxos de potência ativa (P_{km}) e reativa (Q_{km}), é determinada pela equação (2.12).

$$\tilde{S}_{km} = P_{km} + jQ_{km} = \bar{V}_k \bar{I}_{km}^* \quad (2.12)$$

A corrente \bar{I}_{km} , expressa em termos da diferença de tensões entre as barras k e m, é dada pela equação (2.13), onde r_{km} e x_{km} são a resistência e a reatância da linha de transmissão.

$$\bar{I}_{km} = \left(\frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + jx_{km}} \right) \quad (2.13)$$

Após manipulações utilizando-se as equações (2.12), (2.13) e as equações básicas do MSP, o fluxo de potência ativa e fluxo de potência reativa entre as barras k e m são dados pelas equações (2.14).

$$P_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} [V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] + \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (2.14)$$

$$Q_{km} = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) + \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} [V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)]$$

2.5. Balanço Nodal de Potência

O MSP é baseado no balanço nodal de potência ativa e potência reativa, que em sua

forma incremental (pequenas variações), é expresso pelas equações (2.15).

$$\Delta P_{Gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta P_{km} = 0 \quad (2.15)$$

$$\Delta Q_{Gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta Q_{km} = 0$$

Na equação (2.15), ΔP_{Gk} e ΔQ_{Gk} são as variações das potências ativa e reativa entregues à barra k pelo gerador síncrono. ΔP_{Lk} e ΔQ_{Lk} são as variações das potências ativa e reativa de eventual carga ligada à barra k. ΔP_{km} e ΔQ_{km} são os fluxos de potências ativa e reativa da barra k para a barra m. Ω é o conjunto de linhas ligadas à barra k.

Admitindo-se pequenas perturbações em torno de um ponto de equilíbrio (“0”), as equações (2.11) podem ser linearizadas, resultando nas equações (2.16).

$$\Delta P_{Gk} = A1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + A2_{Gk} \Delta E'_{qk} + A3_{Gk} \Delta V_k \quad (2.16)$$

$$\Delta Q_{Gk} = R1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + R2_{Gk} \Delta E'_{qk} + R3_{Gk} \Delta V_k$$

As constantes $A1_{Gk}$, $A2_{Gk}$ e $A3_{Gk}$ são chamados “coeficientes de sensibilidade de potência ativa do gerador k” e são mostrados nas equações (2.17).

$$A1_{Gk} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial(\delta_k - \theta_k)} = \frac{E'_{qk} V_k}{X_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) + \left[\frac{1}{X_{qk}} - \frac{1}{X_{dk}} \right] V_k^2 \cos 2(\delta_k - \theta_k)$$

$$A2_{Gk} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial E'_{qk}} = \frac{V_k}{X_{dk}} \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (2.17)$$

$$A3_{Gk} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial V_k} = \frac{E'_{qk}}{X_{dk}} \sin(\delta_k - \theta_k) + \left[\frac{1}{X_{qk}} - \frac{1}{X_{dk}} \right] V_k \sin 2(\delta_k - \theta_k)$$

As constantes $R1_{Gk}$, $R2_{Gk}$ e $R3_{Gk}$ são os “coeficientes de sensibilidade de potência reativa do gerador k”, mostrados nas equações (2.18).

$$R1_{Gk} = \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial (\delta_k - \theta_k)} = -\frac{E'_{qk} V_k}{X_{dk}} \text{sen}(\delta_k - \theta_k) - \left[\frac{1}{X_{qk}} - \frac{1}{X_{dk}} \right] V_k^2 \text{sen}2(\delta_k - \theta_k)$$

$$R2_{Gk} = \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial E'_{qk}} = \frac{V_k}{X_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (2.18)$$

$$R3_{Gk} = \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial V_{tk}} = \frac{E'_{qk}}{X_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) - 2 \frac{V_k}{X_{dk}} - V_k \left[\frac{1}{X_{qk}} - \frac{1}{X_{dk}} \right] [1 - \cos2(\delta_k - \theta_k)]$$

As variações incrementais de fluxo de potência nas linhas de transmissão são obtidas pela linearização das equações (2.14) e as variações do fluxo de potência ativa (ΔP_{km}) são mostradas na equação (2.19), enquanto os “coeficientes de sensibilidade de potência ativa da linha de transmissão” ($A1_{km}$, $A2_{km}$ e $A3_{km}$) são dados nas equações (2.20).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta(\theta_k - \theta_m) + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m \quad (2.19)$$

$$A1_{km} = \left. \frac{\partial P_{km}}{\partial (\theta_k - \theta_m)} \right|_0 = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k V_m \text{sen}(\theta_k - \theta_m) + \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)$$

$$A2_{km} = \left. \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \right|_0 = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} [2V_k - V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] + \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_m \text{sen}(\theta_k - \theta_m) \quad (2.20)$$

$$A3_{km} = \left. \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \right|_0 = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k \cos(\theta_k - \theta_m) + \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k \text{sen}(\theta_k - \theta_m)$$

As variações do fluxo de potência reativa (ΔQ_{km}) são mostradas na equação (2.21), enquanto os “coeficientes de sensibilidade de potência reativa da linha de transmissão” ($R1_{km}$, $R2_{km}$ e $R3_{km}$) são dados nas equações (2.22).

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \Delta(\theta_k - \theta_m) + R2_{km} \Delta V_k + R3_{km} \Delta V_m \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}
R1_{km} &= \left. \frac{\partial Q_{km}}{\partial (\theta_k - \theta_m)} \right|_0 = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m) + \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) \\
R2_{km} &= \left. \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} \right|_0 = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_m \sin(\theta_k - \theta_m) + \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} [2V_k - V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] \\
R3_{km} &= \left. \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} \right|_0 = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k \sin(\theta_k - \theta_m) - \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} V_k \cos(\theta_k - \theta_m)
\end{aligned} \tag{2.22}$$

2.6. Tensão Interna de Eixo de Quadratura da Máquina Síncrona

As variações da tensão interna da máquina síncrona (E'_{qk}) são expressas pela equação (2.23) (ANDERSON; FOUAD, 2003, KUNDUR, 1994, YU, 1983), onde T'_{d0} é a constante de tempo de eixo direto em circuito aberto e E_{fd} é a tensão de campo do gerador síncrono.

$$T'_{d0k} \Delta E'_{qk} = E_{fdk} - E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk}) I_{dk} \tag{2.23}$$

A forma incremental da equação (2.23) é mostrada na equação (2.24), onde são definidos os “coeficientes de reação da armadura” (K_{Ak} e K_{Vk}) (equações (2.25)).

$$\Delta E'_{qk} = -\frac{x_{dk}}{x'_{dk} T'_{d0k}} \Delta E'_{qk} + \frac{1}{T'_{d0k}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{Vk}}{T'_{d0k}} \Delta V_k + \frac{K_{Ak}}{T'_{d0k}} \Delta (\delta_k - \theta_k) \tag{2.24}$$

$$K_{Vk} = \frac{x_{dk} - x'_{dk}}{x'_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) \tag{2.25}$$

$$K_{Ak} = \frac{x_{dk} - x'_{dk}}{x'_{dk}} V_k \sin(\delta_k - \theta_k)$$

Das equações (2.25) pode-se ver que a reação de armadura depende das variações do ângulo interno do gerador síncrono ($\Delta \delta_k$) e do ângulo da tensão terminal da barra onde está conectado o gerador ($\Delta \theta_k$), além do módulo desta tensão (ΔV_k).

Para condições de funcionamento em vazio, K_{V_k} é máximo e K_{A_k} é nulo. Em condições normais de carga, estes coeficientes assumem valores positivos e similares.

O ângulo da tensão terminal θ_k do gerador síncrono tem uma característica magnetizante, que atua de forma contrária ao efeito desmagnetizante do ângulo interno do gerador δ_k , como mostra a equação (2.24).

2.7. Sistema de Excitação (Regulador Automático de Tensão)

Dentre os vários modelos existentes para o sistema de excitação, neste trabalho será considerado um de primeira ordem, com ganho K_{rk} e constante de tempo T_{rk} , conforme o diagrama de blocos da Figura 2.3.

Nesta Figura, V_{refk} é a tensão de referência do gerador síncrono e E_{fdk} é a tensão de campo do gerador síncrono.

Por inspeção, e considerando pequenos desvios em torno de um ponto de equilíbrio, as variações da tensão de campo podem ser escritas como na equação (2.26).

$$\Delta E_{fdk} = -\frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{refk} \quad (2.26)$$

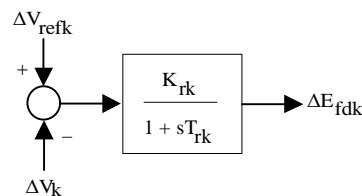


Figura 2.3. Regulador de Tensão – Diagrama de Blocos

2.8. Equação de Oscilação (Equação Swing)

Para uma completa descrição do comportamento do gerador síncrono, são necessárias as equações que relacionam as grandezas elétricas com as grandezas mecânicas (equações eletromecânicas do gerador síncrono). Estas equações são obtidas da equação de oscilação do gerador (swing), decomposta em duas equações de ordem 1 (ANDERSON; FOUAD, 2003, KUNDUR, 1994, YU, 1983), que são mostradas nas equações (2.27) e (2.28).

$$\Delta \delta_k = \omega_o \Delta \omega_k \quad (2.27)$$

A análise do diagrama de blocos da Figura 2.4 permite verificar a permanência no MSP das variáveis algébricas módulo e ângulo das tensões de todas as barras do sistema elétrico (ΔV_k e $\Delta \theta_k$, respectivamente). Esta característica do MSP (preservação da rede de transmissão), não ocorre no modelo de Heffron & Phillips (MOUSSA; YU, 1974), podendo ser considerada uma vantagem do MSP. Outra característica do MSP é a decomposição em subsistemas ativo/reactivo e subsistemas lento/rápido, que serão discutidas na sequência.

2.9.1. Decomposição Ativa e Reativa

A decomposição em subsistemas ativo e reativo pode ser observada no diagrama de blocos da Figura 2.4, delimitada pela linha vertical tracejada.

Observe que existe uma troca de informações entre as variáveis dos subsistemas esquerdo (ativo) e direito (reativo). O subsistema ativo fornece as correções do ângulo do rotor $\Delta \delta_k$ e ângulo da tensão terminal das barras $\Delta \theta_k$ a partir das solicitações da potência ativa. O subsistema reativo responde fazendo as correções do valor absoluto da tensão interna de eixo de quadratura do gerador k ($\Delta E'_{qk}$) e dos valores absolutos das tensões das barras do sistema de transmissão (ΔV_k), a partir das solicitações da potência reativa.

2.9.2. Decomposição em Escalas de Tempo Rápida e Lenta

A decomposição em subsistemas rápido e lento pode ser observada pela linha horizontal tracejada do diagrama de blocos da Figura 2.4.

Esta decomposição existe pois dinâmicas de velocidades diferentes ocorrem no sistema elétrico (a malha de controle de tensão (através da potência reativa), é mais rápida que a malha de controle de frequência (por meio da potência ativa)).

Na Figura 2.4 observa-se que o subsistema superior (diferencial), troca informações com o subsistema inferior (algébrico). As variáveis da rede ($\Delta \theta$, ΔV) são atualizadas rapidamente pelo sistema algébrico, enquanto as variáveis da máquina síncrona ($\Delta \delta_k$, $\Delta E'_{qk}$) são lentamente atualizadas pelo sistema diferencial.

2.9.3. Modelos Ativo e Reativo para Sistema Multimáquinas

Para um sistema multimáquinas de n barras são obtidas duas matrizes que relacionam

variáveis algébricas, representadas pelos blocos “Modelo Ativo da Rede” e “Modelo Reativo da Rede”, no diagrama de blocos da Figura 2.4. As equações matriciais (2.29) e (2.30) mostram os Modelos Ativo e Reativo mencionados.

Os desvios de potência ativa $[\Delta P]$, através da matriz de sensibilidade de potência ativa $[A]$, fornecem as correções necessárias dos ângulos das tensões das barras ($[\Delta\theta]$). Os desvios de potência reativa $[\Delta Q]$, através da matriz de sensibilidade de potência reativa $[R]$, fornecem as correções necessárias dos valores absolutos das tensões das barras ($[\Delta V]$).

As matrizes de sensibilidade de potência ativa ($[A]$) e reativa ($[R]$) correspondem à extensão das equações de balanço nodal para sistemas multimáquinas. Estas matrizes têm natureza esparsa e são similares estruturalmente à matriz admitância de barra do sistema elétrico de potência, utilizada na solução do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_k \\ \dots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{k1} & \dots & A_{1n} \\ A_{k1} & A_{kk} & \dots & A_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & A_{kn} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_k \\ \dots \\ \Delta\theta_n \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_k \\ \dots \\ \Delta\theta_n \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_k \\ \dots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{k1} & \dots & R_{1n} \\ R_{k1} & R_{kk} & \dots & R_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{1n} & R_{kn} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_k \\ \dots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_k \\ \dots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.10. Conclusões

Neste Capítulo foi apresentado o Modelo de Sensibilidade de Potência para sistemas multimáquinas, que é baseado no balanço de potência em qualquer barra do sistema elétrico, em qualquer instante. Este modelo é linear e tem se apresentado como uma alternativa ao modelo de Heffron & Phillips no estudo da estabilidade às pequenas perturbações do sistema elétrico de potência.

O MSP é descrito por coeficientes de sensibilidade de potência ativa e reativa, referentes aos geradores e sistema de transmissão.

Estes coeficientes de sensibilidade dependem do ponto de operação considerado e relacionam as variações de potências ativa e reativa geradas e os fluxos de potência nas linhas de transmissão com as variáveis de estado e as variáveis algébricas do sistema elétrico.

Uma característica importante do MSP é a preservação das variáveis algébricas do sistema elétrico (notadamente, as tensões de todas as barras do sistema), o que implica na preservação do sistema de transmissão no modelo.

Outra característica é a subdivisão entre potências ativa e reativa (subsistemas ativo/reactivo). Ocorre também uma divisão na escala de tempo (subsistemas rápido/lento, em função das variáveis de estado e das variáveis algébricas).

O MSP será utilizado neste trabalho para o estudo da estabilidade às pequenas perturbações do sistema elétrico de potência multimáquinas.

Capítulo 3

Inclusão do Compensador Série Controlado a Tiristor no Modelo de Sensibilidade de Potência para Sistemas Multimáquinas

3.1. Introdução

Neste Capítulo é apresentado o tratamento dado ao dispositivo FACTS Compensador Série Controlado a Tiristor (do inglês, Thyristor Controlled Series Capacitor – TCSC) (SONG; JOHNS, 1999).

Inicialmente é apresentada uma descrição do dispositivo, assim como as vantagens

operativas mais relevantes para amortecimento de oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência.

Na sequência é apresentado o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) para sistema multimáquinas com a atuação do dispositivo FACTS TCSC (NASSIF et al., 2004, FEBRES et al., 2007).

A inclusão do TCSC no modelo do sistema multimáquinas modifica os coeficientes de sensibilidade de potência originais da linha de transmissão ($A1_{km}$, $A2_{km}$, $A3_{km}$, $R1_{km}$, $R2_{km}$ e $R3_{km}$), e introduz dois novos coeficientes, a saber, A_{xkm} e R_{xkm} .

As constantes A_{xkm} e R_{xkm} são chamadas “coeficientes de sensibilidade de potência ativa e reativa do Compensador Série Controlado a Tiristor”.

Para tornar o dispositivo FACTS mais eficiente, também é introduzido um controle automático para os desvios da capacitância Δx_{csc} do TCSC, representado por um bloco de primeira ordem, cujo sinal de entrada serão as variações da potência elétrica na linha onde está instalado o compensador.

Novamente são realizadas representações do sistema multimáquinas considerando a atuação do TCSC.

3.2. Influência da Compensação Série

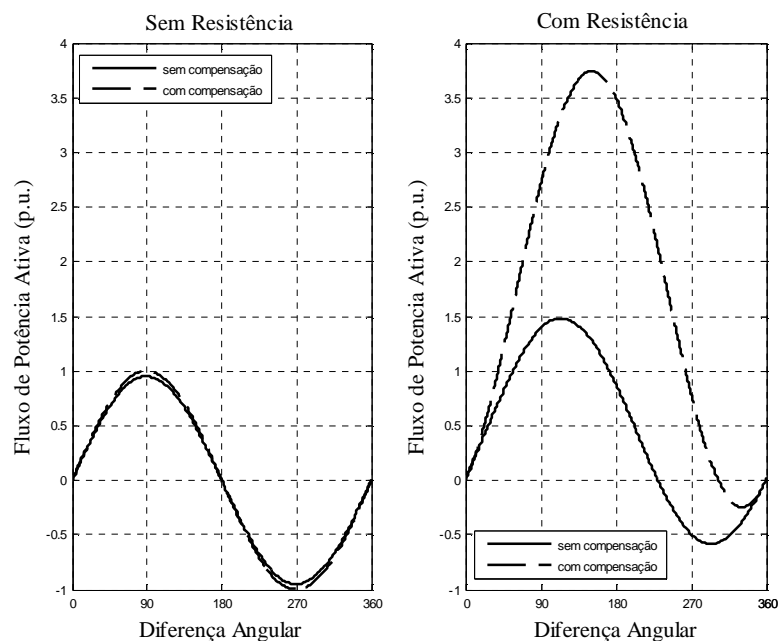


Figura 3.1. Fluxo de Potência Ativa sob Influência da Resistência Elétrica

Um parâmetro que tem se tornado muito influente nos sistemas elétricos atuais, devido à existência de grandes distâncias entre os centros geradores de energia e os centros de consumo é a resistência elétrica das linhas de transmissão.

Das Figuras 3.1 mostradas pode-se afirmar que uma compensação (fixa) usando capacitores, aumenta o fluxo de potência ativa. Este aumento do fluxo de potência ativa mostra-se mais considerável quando considerada a resistência elétrica das linhas de transmissão. Esta característica muito importante é, de fato, a influência da resistência elétrica presente nos sistemas de transmissão. Neste trabalho é apresentada a formulação da compensação série considerando este parâmetro e esta é uma das diferenças com relação à formulação apresentada por Deckmann e da Costa. Respeito da estabilidade angular pode-se afirmar que a margem de estabilidade aumentou também de forma considerável.

3.3. Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC

Capacitores ligados em série têm sido utilizados para aumentar a capacidade de transferência de potência de linhas de transmissão e melhorar a estabilidade do sistema elétrica há alguns anos (KUNDUR, 1994).

O princípio de operação do dispositivo FACTS TCSC é o uso de capacitores série para compensar a queda de tensão indutiva na linha de transmissão mediante a inclusão da tensão capacitiva associada a eles. Esta tensão série é de característica proporcional e está em quadratura com a corrente na linha de transmissão. Quando isto ocorre o dispositivo só consome ou injeta potência reativa ao sistema elétrico (SONG; JONHS, 1999, CORONADO et al., 2001).

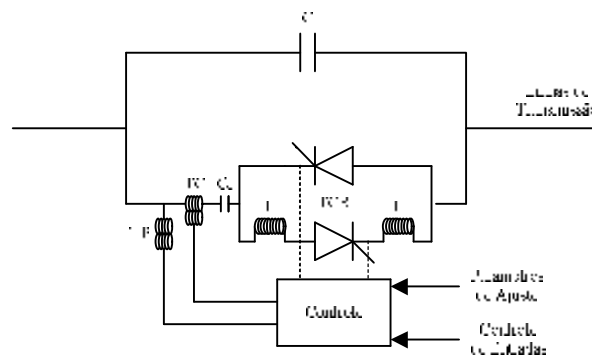


Figura 3.2. Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC

A estrutura básica de um dispositivo TCSC é composta por reatores (indutores – L) controlados por tiristores (TCR – Thyristor Controlled Reactor) em paralelo com capacitores (C) como mostrado na Figura 3.2. Esta configuração torna o dispositivo TCSC mais flexível já que a reatância efetiva da linha de transmissão fica sob controle pela utilização destes tiristores. Como consequência, os fluxos de potência nas linhas de transmissão podem ser mantidos em direções específicas (SONG; JONHS, 1999, HINGORANI; GYUGYI, 2000, MARTINS et al., 1999).

A eficiência da dinâmica introduzida no sistema elétrico pelo dispositivo TCSC depende da ação de seu controle e neste Capítulo, é apresentado um sistema de controle representado por um bloco de primeira ordem para um melhor entendimento do problema. No Capítulo posterior, dispositivos de controle mais sofisticados são acoplados ao TCSC para melhorar seu desempenho dinâmico e fornecer maior amortecimento às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência multimáquinas.

3.4. Coeficientes de Sensibilidade de Potência do Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC

Para a dedução dos coeficientes de sensibilidade de potência do sistema multimáquinas, com a atuação do TCSC, considere o diagrama unifilar mostrado na Figura 3.3, onde x_{csc} é a reatância do TCSC.

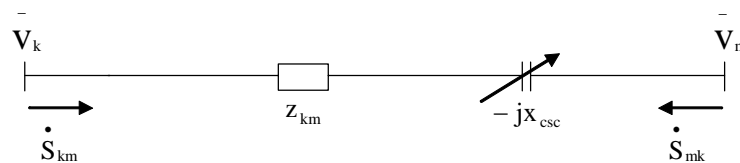


Figura 3.3: Diagrama Unifilar – Inclusão do TCSC

Na Figura 3.3, a linha de transmissão entre as barras k e m é representada pela sua impedância Z_{km} , com resistência r_{km} e reatância x_{km} .

Os fluxos de potência ativa e potência reativa entre as barras k e m são dados na equação (3.1).

As variações incrementais de fluxo de potência nas linhas de transmissão são obtidas pela expansão em série de Taylor das equações (3.1), admitindo-se pequenas variações em

torno de um ponto de equilíbrio estável (linearização).

$$P_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} [V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] + \frac{x_{km} - x_{csc}}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m)$$

$$Q_{km} = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) + \frac{x_{km} - x_{csc}}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} [V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)]$$
(3.1)

A forma linearizada do fluxo de potência ativa (ΔP_{km}), bem como os coeficientes de sensibilidade de potência ativa da linha de transmissão com a atuação do controlador TCSC é mostrada na equação (3.2).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta(\theta_k - \theta_m) + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m + A_{xkm} \Delta x_{csc}$$
(3.2)

$$A1_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) + \frac{(x_{km} - x_{csc})}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)$$
(3.2.a)

$$A2_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} [2V_k - V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] + \frac{(x_{km} - x_{csc})}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} V_m \sin(\theta_k - \theta_m)$$
(3.2.b)

$$A3_{km} = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} V_k \cos(\theta_k - \theta_m) + \frac{(x_{km} - x_{csc})}{r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2} V_k \sin(\theta_k - \theta_m)$$
(3.2.c)

$$A_{xkm} = \frac{2r_{km}(x_{km} - x_{csc})}{\left[r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2 \right]^2} [V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] + \frac{-r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2}{\left[r_{km}^2 + (x_{km} - x_{csc})^2 \right]^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m)$$
(3.2d)

De maneira análoga, é obtida a forma linearizada do fluxo de potência reativa e os coeficientes de sensibilidade de potência reativa da linha de transmissão sob a atuação do controlador TCSC (equação (3.3)).

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \Delta(\theta_k - \theta_m) + R2_{km} \Delta V_k + R3_{km} \Delta V_m + R_{xkm} \Delta x_{csc} \quad (3.3)$$

$$R1_{km} = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2} V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m) + \frac{(X_{km} - X_{csc})}{r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (3.3.a)$$

$$R2_{km} = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2} V_m \sin(\theta_k - \theta_m) + \frac{(X_{km} - X_{csc})}{r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2} [2V_k - V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (3.3.b)$$

$$R3_{km} = -\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2} V_k \sin(\theta_k - \theta_m) - \frac{(X_{km} - X_{csc})}{r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2} V_k \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (3.3.c)$$

$$R_{xkm} = -\frac{2r_{km}(X_{km} - X_{csc})}{\left[r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2\right]^2} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) + \frac{-r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2}{\left[r_{km}^2 + (X_{km} - X_{csc})^2\right]^2} [V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (3.3.d)$$

Os coeficientes de sensibilidade de potência ativa e reativa das equações (3.2) e (3.3) diferem dos coeficientes de sensibilidade de potência das equações (2.20) e (2.22) (Capítulo 2), pois envolvem a inclusão da reatância x_{csc} do Compensador Série Controlado a Tiristor.

Além disso, são incluídos dois novos coeficientes (A_{xkm} e R_{xkm}), diretamente ligados à atuação do TCSC. Estes coeficientes são o coeficiente de sensibilidade de potência ativa A_{xkm} e o coeficiente de sensibilidade de potência reativa R_{xkm} do sistema multimáquinas sob a atuação do dispositivo FACTS TCSC.

3.5. Inclusão do Controle da Reatância do Compensador Série Controlado a Tiristor – TCSC

Para tornar a ação do TCSC mais eficiente no que se refere à estabilidade a pequenas perturbações pode ser introduzida uma dinâmica na compensação fornecida pelo Compensador Série Controlado a Tiristor, isto é, as variações da capacitância Δx_{csc} . Para desempenhar esta função será inicialmente utilizado um dispositivo de controle de primeira

ordem, cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 3.4 (WANG; SWIFT, 1997, NASSIF et al, 2004, FEBRES et al, 2007).

Na Figura 3.4 K_{TCSC} é o ganho e T_{TCSC} é a constante de tempo do dispositivo de controle. O sinal de entrada escolhido são as variações de potência elétrica na linha de transmissão onde está instalado o TCSC (ΔP_{km} – equação (3.2)).

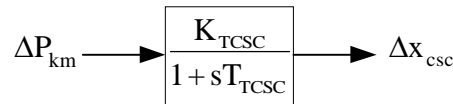


Figura 3.4. Sistema de Controle da Compensação do TCSC

Este sinal de entrada foi escolhido por se tratar de uma grandeza mensurável localmente, o que é desejável, pois permite manter a flexibilidade do dispositivo FACTS TCSC.

O equacionamento da grandeza Δx_{csc} no domínio da frequência pode ser obtido por inspeção da Figura 3.4, com a substituição da equação (3.2), resultando na equação (3.4).

$$\Delta x_{csc} = \frac{K_{TCSC}}{1 + sT_{TCSC}} (A1_{km} \Delta(\theta_k - \theta_m) + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m + A_{xkm} \Delta x_{csc}) \quad (3.4)$$

A forma diferencial da equação (3.4), isto é, no domínio do tempo, é mostrada na equação (3.5).

$$\Delta x_{csc} = \frac{K_{TCSC} A_{xkm} - 1}{T_{TCSC}} \Delta x_{csc} + \frac{K_{TCSC} A1_{km}}{T_{TCSC}} \Delta \theta_k - \frac{K_{TCSC} A1_{km}}{T_{TCSC}} \Delta \theta_m + \frac{K_{TCSC} A2_{km}}{T_{TCSC}} \Delta V_k + \frac{K_{TCSC} A3_{km}}{T_{TCSC}} \Delta V_m \quad (3.5)$$

3.6. Balanço Nodal de Potência com a Atuação do TCSC

O balanço nodal de potência com a atuação do TCSC pode ser realizado substituindo-se as equações (2.16) (deduzidas no Capítulo 2) e as equações (3.2) e (3.3) nas equações (2.15) do Capítulo 2. Estas operações resultam nas equações algébricas do MSP considerando-se a presença do TCSC (equações (3.6) e (3.7)).

$$\begin{aligned}
0 = & A1_{Gk} \Delta\delta_k + A2_{Gk} \Delta E'_{qk} - A_{xkm} \Delta x_{csc} - A1_{Gk} \Delta\theta_k - \sum_{m \in \Omega_k} A1_{km} \Delta\theta_k \\
& + \sum_{m \in \Omega_k} A1_{km} \Delta\theta_m + A3_{Gk} \Delta V_k - \sum_{m \in \Omega_k} A2_{km} \Delta V_k - \sum_{m \in \Omega_k} A3_{km} \Delta V_m - \Delta P_{Lk}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
0 = & R1_{Gk} \Delta\delta_k + R2_{Gk} \Delta E'_{qk} - R_{xkm} \Delta x_{csc} - R1_{Gk} \Delta\theta_k - \sum_{m \in \Omega_k} R1_{km} \Delta\theta_k \\
& + \sum_{m \in \Omega_k} R1_{km} \Delta\theta_m + R3_{Gk} \Delta V_k - \sum_{m \in \Omega_k} R2_{km} \Delta V_k - \sum_{m \in \Omega_k} R3_{km} \Delta V_m - \Delta Q_{Lk}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Observe que nas equações (3.6) e (3.7) as expressões para as variações incrementais da potência ativa e da potência reativa geradas são as mesmas deduzidas no Capítulo 2, pois estas não sofrem alterações com a consideração do dispositivo TCSC.

3.7. Representações do Sistema Multimáquinas sob a Atuação do Compensador Série Controlado a Tiristor pelo MSP

A aplicação da Transformada de Laplace nas equações diferenciais (2.24), (2.26), (2.27) e (2.28) (Capítulo 2) (que não se modificam com a atuação do TCSC), em conjunto com as equações algébricas (3.6) e (3.7), permite realizar a representação do MSP para o sistema de potência multimáquinas no domínio da frequência (diagrama de blocos), como mostrado na Figura 3.5 (representação para um gerador genérico k).

A análise do diagrama de blocos da Figura 3.5 permite concluir que as características intrínsecas do MSP (preservação das variáveis algébricas e, conseqüentemente, o sistema de transmissão externo), permanecem quando da consideração do dispositivo TCSC. O mesmo comentário vale para as decomposições entre subsistemas ativo/reactivo e subsistemas rápido/lento.

Observe que para o subsistema ativo, o coeficiente A_{xkm} representa a inclusão do TCSC no sistema multimáquinas, enquanto que para o subsistema reativo, quem desempenha esta função é o coeficiente R_{xkm} .

Para se considerar o dispositivo de controle para Δx_{csc} basta acrescentar a equação (3.2) ao diagrama de blocos da Figura 3.5.

3.8. Conclusões

Neste Capítulo foi apresentado o estudo do Modelo de Sensibilidade de Potência para sistema multimáquinas com a consideração do Compensador Série Controlado a Tiristor.

Com a inclusão do compensador não são modificados analiticamente os coeficientes de sensibilidade de potência relativos ao gerador, diferentemente dos coeficientes relacionados às linhas de transmissão.

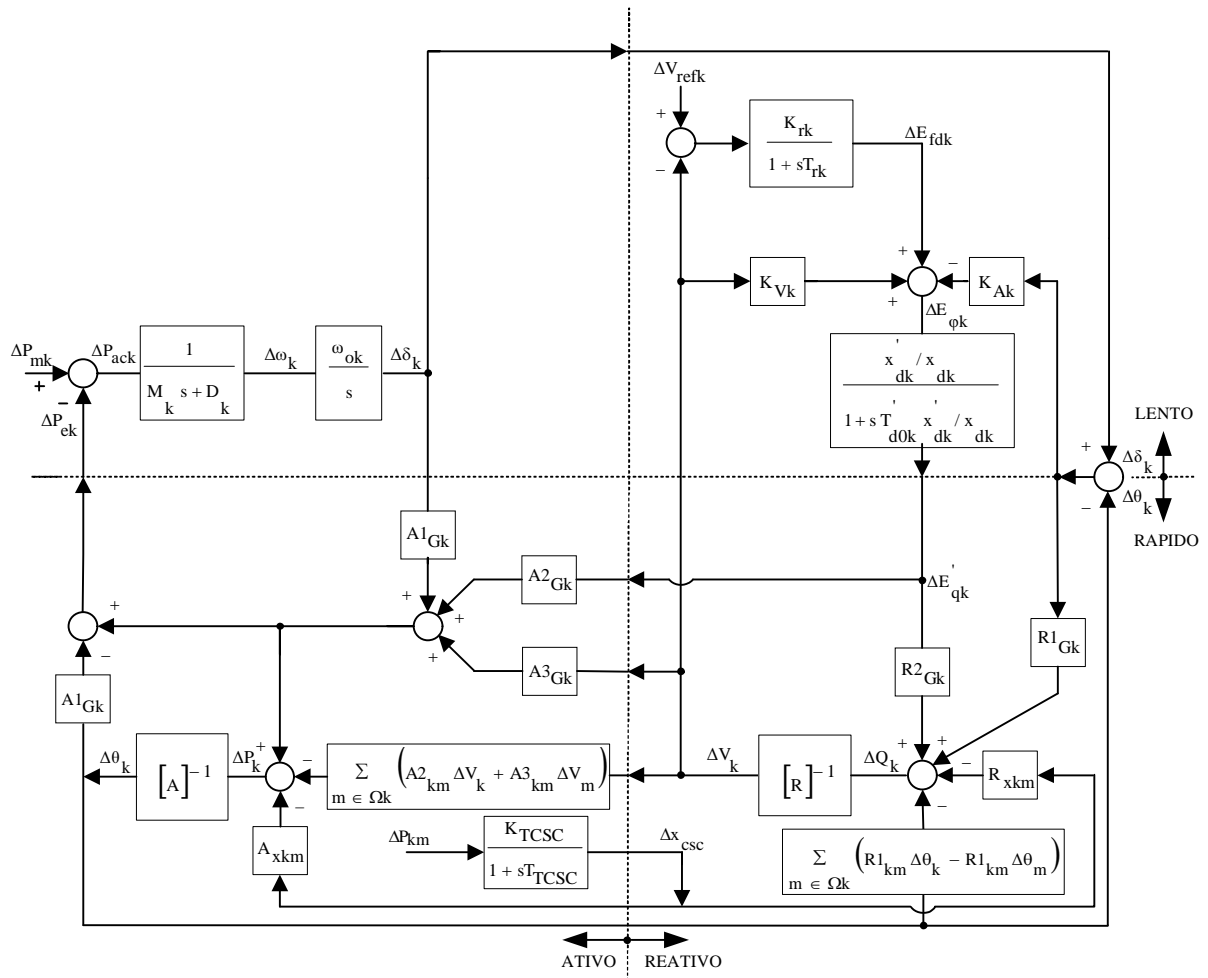


Figura 3.5. MSP Multimáquinas – Atuação do TCSC

No caso das linhas, os coeficientes $A1_{km}$, $A2_{km}$, $A3_{km}$, $R1_{km}$, $R2_{km}$ e $R3_{km}$, diferem analiticamente quando calculados para sistema sem e com a atuação do TCSC.

Também são introduzidos mais dois coeficientes de sensibilidade de potência que relacionam diretamente a inclusão do TCSC no sistema multimáquinas: A_{xkm} e R_{xkm} (coeficientes de sensibilidade de potências ativa e reativa do TCSC, respectivamente).

Estes coeficientes de sensibilidade dependem do ponto de operação considerado e

relacionam as variações de potência ativa e reativa geradas e os fluxos de potências ativo e reativo nas linhas de transmissão sob atuação do Compensador Série Controlado a Tiristor com as variáveis de estado e as variáveis algébricas do sistema elétrico de potência.

A preservação das variáveis algébricas para todas as barras do sistema elétrico ($\Delta\theta_k$, ΔV_k), que é uma característica essencial do MSP, permanece com a consideração do Compensador Série implicando na preservação do sistema de transmissão externo no modelo.

Outro detalhe importante é a permanência de dois subsistemas com características distintas de potência (subsistemas ativo/reactivo), e de dois subsistemas com dinâmicas de velocidades diferentes (subsistemas rápido/lento).

Também foi proposto um dispositivo de controle para as variações da reatância do compensador (Δx_{csc}), representado por um bloco de primeira ordem.

Uma vez obtido o modelo do sistema multimáquinas com a consideração do dispositivo TCSC, este será utilizado na análise da estabilidade às pequenas perturbações.

Capítulo 4

Sinais Estabilizantes Suplementares ESP e POD

4.1. Introdução

Neste Capítulo é apresentado o estudo e a inclusão de sinais estabilizantes suplementares no sistema elétrico de potência multimáquinas. Para tal fim o MSP será modificado, para possibilitar a atuação destes dispositivos. Serão tratados dois tipos destes sinais: o Estabilizador de Sistemas de Potência – ESP (no inglês, Power System Stabilizer – PSS) e o Controlador para Amortecimento de Oscilações de Potência (no inglês, Power Oscillation Damping – POD).

Técnica de ajuste dos parâmetros do ESP e POD baseada na teoria do controle clássico

é apresentada, bem como a escolha da localização no sistema elétrico de potência destes dispositivos.

4.2. Estabilizador de Sistemas de Potência

O Estabilizador de Sistemas de Potência tem como função introduzir torque elétrico em fase com as variações da velocidade do rotor (torque de amortecimento) ao gerador síncrono. Isto é obtido por meio de um sinal de controle suplementar ΔV_{sk} aplicado ao regulador de tensão do gerador conforme mostrado na Figura 4.1.

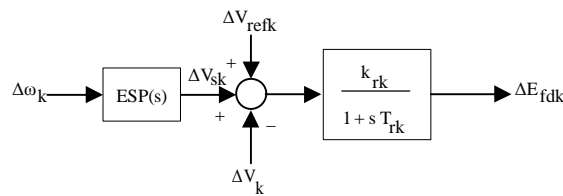


Figura 4.1. Sinal Suplementar ΔV_{sk} Inserido pelo ESP.

Para desempenhar esta função o Estabilizador de Sistemas de Potência deve compensar os atrasos de fase introduzidos pelo gerador, sistema de excitação e sistema de transmissão externo no caminho de formação de torque elétrico (ANDERSON; FOUAD, 2003, DEMELLO; CONCÓRDIA, 1969, KUNDUR, 1994, MARTINS, 1986).

Na literatura especializada, de maneira geral, a estrutura básica de um ESP é a mostrada na Figura 4.2, que utiliza como sinal de entrada as variações da velocidade angular do rotor do gerador síncrono.

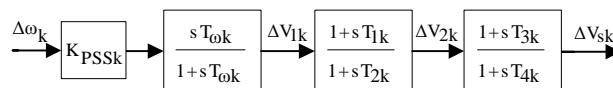


Figura 4.2. Estrutura Dinâmica Básica do ESP.

O valor de K_{PSSk} é ajustado para fornecer uma quantidade de amortecimento adequado aos modos oscilatórios instáveis ou pouco amortecidos do sistema elétrico. A presença do bloco washout (representado pelo bloco com constante de tempo $T_{\omega k}$, na faixa de 1 a 20

segundos) permite somente a passagem de sinais de baixas frequências (para o caso de sistemas de potência, na ordem de 0.8 Hz a 2.0 Hz, relacionadas aos modos locais de interesse).

Finalmente, a compensação de fase é realizada pelos blocos de constantes de tempo T_{1k} , T_{2k} , T_{3k} e T_{4k} . É comum se realizar o ajuste dos parâmetros do ESP fazendo $T_{1k} = T_{2k}$ e $T_{3k} = T_{4k}$.

A função de transferência a ser compensada pelo ESP é definida pela redução do diagrama de blocos da Figura 4.3, resultando na função GEP(s) dada na equação (4.1), similar à utilizada por DeMello e Concordia (1969).

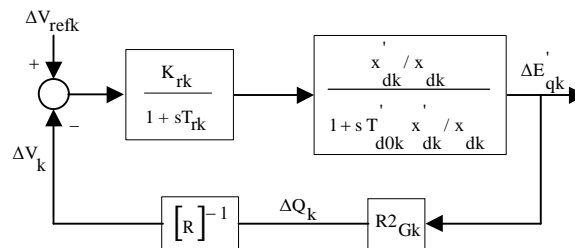


Figura 4.3. Malha de Controle de Tensão

$$GEP(s) = \frac{K_{rk} \frac{X'_{dk}}{X_{dk}} [R]^{-1} A2_{Gk}}{(1 + sT_{rk}) \left(1 + sT'_{d0k} \frac{X'_{dk}}{X_{dk}} \right) [R]^{-1} + R2_{Gk} K_{rk} \frac{X'_{dk}}{X_{dk}}} \quad (4.1)$$

Na equação (4.1) a parcela $[R]^{-1}$ que representa a rede de transmissão, é dada na equação (4.2) onde $R3_{Gk}$ e $\sum R2_{km}$ são os coeficientes de sensibilidade de potência dos fluxos de potências reativas com relação à tensão da barra onde esta ligada a máquina síncrona “k”.

$$[R]^{-1} = \frac{1}{-R3_{Gk} + \sum_{m \in \Omega_k} R2_{km}} \quad (4.2)$$

4.2.1. Inclusão do Estabilizador de Sistemas de Potência no MSP

A inclusão do ESP no modelo pdo sistema elétrico de potência introduz três novas variáveis de estado, a saber: ΔV_{1k} , ΔV_{2k} e ΔV_{sk} , como se pode observar do diagrama de blocos da Figura 4.2, a partir do qual, por inspeção, podem ser escritas as equações (4.3), (4.4) e (4.5).

$$\Delta V_{1k} = K_{PSSk} \Delta \omega_k - \frac{1}{T_{\omega k}} \Delta V_{1k} \quad (4.3)$$

$$\Delta V_{2k} = \frac{T_{1k}}{T_{2k}} \Delta \dot{V}_{1k} + \frac{1}{T_{2k}} \Delta V_{1k} - \frac{1}{T_{2k}} \Delta V_{2k} \quad (4.4)$$

$$\Delta V_{sk} = \frac{T_{3k}}{T_{4k}} \Delta V_{2k} + \frac{1}{T_{4k}} \Delta V_{2k} - \frac{1}{T_{4k}} \Delta V_{sk} \quad (4.5)$$

Substituindo-se a equação (2.16) na equação (2.28) (ambas mostradas no Capítulo 2) e o resultado introduzido na equação (4.3), esta assume a forma mostrada na equação (4.6).

$$\begin{aligned} \Delta V_{1k} = & -\frac{K_{PSSk} D_k}{M_k} \Delta \omega_k - \frac{K_{PSSk} A1_{Gk}}{M_k} \Delta \delta_k - \frac{K_{PSSk} A2_{Gk}}{M_k} \Delta E'_{qk} + \frac{K_{PSSk} A1_{Gk}}{M_k} \Delta \theta_k \\ & - \frac{1}{T_{\omega k}} \Delta V_{1k} - \frac{K_{PSSk} A3_{Gk}}{M_k} \Delta V_k + \frac{K_{PSSk}}{M_k} \Delta P m_k \end{aligned} \quad (4.6)$$

Substituindo-se a equação (4.6) na equação (4.4), é obtida a variação da derivada temporal da variável ΔV_{2k} , cujo resultado é mostrado na equação (4.7).

$$\begin{aligned} \Delta V_{2k} = & -\frac{K_{PSSk} D_k T_{1k}}{M_k T_{2k}} \Delta \omega_k - \frac{K_{PSSk} T_{1k} A1_{Gk}}{M_k T_{2k}} \Delta \delta_k - \frac{K_{PSSk} T_{1k} A2_{Gk}}{M_k T_{2k}} \Delta E'_{qk} \\ & + \frac{1}{T_{2k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{\omega k}}\right) \Delta V_{1k} - \frac{1}{T_{2k}} \Delta V_{2k} + \frac{K_{PSSk} T_{1k} A1_{Gk}}{M_k T_{2k}} \Delta \theta_k \\ & - \frac{K_{PSSk} T_{1k} A3_{Gk}}{M_k T_{2k}} \Delta V_k + \frac{K_{PSSk} T_{1k}}{M_k T_{2k}} \Delta P m_k \end{aligned} \quad (4.7)$$

Analogamente, substituindo-se a equação (4.7) em (4.5) resulta a equação (4.8).

$$\begin{aligned} \Delta V_{sk} = & -\frac{K_{PSSk} D_k T_{1k} T_{3k}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \Delta \omega_k - \frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k} A1_{Gk}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \Delta \delta_k - \frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k} A2_{Gk}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \Delta E'_{qk} \\ & + \frac{T_{3k}}{T_{2k} T_{4k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{\omega k}}\right) \Delta V_{1k} + \frac{1}{T_{4k}} \left(1 - \frac{T_{3k}}{T_{2k}}\right) \Delta V_{2k} - \frac{1}{T_{4k}} \Delta V_{sk} \\ & + \frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k} A1_{Gk}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \Delta \theta_k - \frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k} A3_{Gk}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \Delta V_k + \frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \Delta Pm_k \end{aligned} \quad (4.8)$$

Para completar a inclusão do ESP no sistema elétrico de potência, a partir do diagrama de blocos da Figura 4.1 é obtida a equação (4.9).

$$\Delta E_{fdk} = -\frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{sk} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{refk} \quad (4.9)$$

As equações (4.6) a (4.9) permitem a inclusão do ESP no modelo do sistema elétrico de potência multimáquinas que numa representação matricial assume a forma mostrada na equação (4.10).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_{qk} \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta V_{1k} \\ \Delta V_{2k} \\ \Delta V_{sk} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -\frac{D_k}{M_k} & \frac{A1_{Gk}}{M_k} & -\frac{A2_{Gk}}{M_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{ok} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{Ak}}{T_{d0k}} & \frac{x_{dk}}{x'_{dk} T_{d0k}} & \frac{1}{x'_{dk} T_{d0k}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{rk}} & 0 & 0 & -\frac{K_{rk}}{T_{rk}} \\ \frac{K_{PSSk} D_k}{M_k} & -\frac{K_{PSSk} A1_{Gk}}{M_k} & -\frac{K_{PSSk} A2_{Gk}}{M_k} & -\frac{1}{T_{\omega k}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{PSSk} D_k T_{1k}}{M_k T_{2k}} & -\frac{K_{PSSk} T_{1k} A1_{Gk}}{M_k T_{2k}} & -\frac{K_{PSSk} T_{1k} A2_{Gk}}{M_k T_{2k}} & 0 & \frac{1}{T_{2k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{\omega k}}\right) & \frac{1}{T_{2k}} & 0 \\ -\frac{K_{PSSk} D_k T_{1k} T_{3k}}{M_k T_{2k} T_{4k}} & -\frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k} A1_{Gk}}{M_k T_{2k} T_{4k}} & -\frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k} A2_{Gk}}{M_k T_{2k} T_{4k}} & 0 & \frac{T_{3k}}{T_{2k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{\omega k}}\right) & \frac{1}{T_{2k}} \left(1 - \frac{T_{3k}}{T_{2k}}\right) & -\frac{1}{T_{4k}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_{qk} \\ \Delta E_{fdk} \\ \Delta V_{1k} \\ \Delta V_{2k} \\ \Delta V_{sk} \end{bmatrix} \\ + & \begin{bmatrix} \frac{A1_{Gk}}{M_k} & 0 & -\frac{A3_{Gk}}{M_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{Ak}}{T_{d0k}} & 0 & \frac{K_{vk}}{T_{d0k}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{rk}}{T_{rk}} & 0 \\ \frac{K_{PSSk} A1_{Gk}}{M_k} & 0 & -\frac{K_{PSSk} A3_{Gk}}{M_k} & 0 \\ \frac{K_{PSSk} T_{1k} A1_{Gk}}{M_k T_{2k}} & 0 & -\frac{K_{PSSk} T_{1k} A3_{Gk}}{M_k T_{2k}} & 0 \\ \frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k} A1_{Gk}}{M_k T_{2k} T_{4k}} & 0 & -\frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k} A3_{Gk}}{M_k T_{2k} T_{4k}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ \Delta V_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{M_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{rk}}{T_{rk}} \\ \frac{K_{PSSk}}{M_k} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{PSSk} T_{1k}}{M_k T_{2k}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{PSSk} T_{1k} T_{3k}}{M_k T_{2k} T_{4k}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta Pm_k \\ \Delta V_{refk} \\ \Delta P_{1k} \\ \Delta Q_{1k} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.2.2. Localização do Estabilizador de Sistemas de Potência

A estabilidade às pequenas perturbações de um sistema elétrico de potência multimáquinas pode ser determinada pela análise dos autovalores da matriz de estados A . Os autovalores reais representam modos não oscilatórios. Quando estes autovalores são reais negativos correspondem a um modo não oscilatório estável, enquanto que autovalores reais positivos caracterizam instabilidade monotônica.

Os autovalores pares complexos conjugados correspondem a um determinado modo oscilatório. A parte real destes autovalores fornece o coeficiente de amortecimento enquanto a parte imaginária fornece a frequência de oscilação deste modo. Desta forma, se a parte real é negativa as oscilações são amortecidas. No caso de parte real positiva, estas oscilações são caracterizadas por oscilações de amplitude crescente, resultando em instabilidade por falta de amortecimento.

Os autovalores da matriz de estados A são dados pelos valores do parâmetro escalar λ para o qual existem soluções não triviais para a equação (4.11).

$$A\varphi = \lambda\varphi \quad (4.11)$$

A partir da equação (4.11) pode ser escrita a equação (4.12) cuja solução são os autovalores da matriz de estados A .

$$\det(A - \lambda I)\varphi = 0 \quad (4.12)$$

Cada autovalor da matriz A possui autovetores direitos φ_i e esquerdos ψ_i , relacionados de acordo com as equações (4.13) e (4.14).

$$A\varphi_i = \lambda\varphi_i \quad (4.13)$$

$$\psi_1 A = \lambda \psi_1 \quad (4.14)$$

Na análise da estabilidade a partir dos autovetores definem-se quais variáveis podem ser observadas e quais são as contribuições nos modos oscilatórios instáveis de cada uma das variáveis, através dos fatores de participação $f_{p_{ni}}$ (HSU; CHEN, 1987, FEBRES et al., 2008), de acordo com a equação (4.15).

$$f_{p_{ni}} = \varphi_{ni} \psi_{in} \quad (4.15)$$

O fator de participação define a participação relativa de uma variável de estado “n” em um determinado modo de oscilação “i”. Estes fatores de participação são quantidades adimensionais que ajudam a identificar as possíveis origens de problemas relacionados com modos oscilatórios pouco amortecidos ou instáveis.

A partir dos fatores de participação podem ser determinados os melhores geradores para a instalação do ESP visando fornecer um adequado grau de amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência e será este o método utilizado neste trabalho para a melhor localização dos ESP's no sistema elétrico de potência multimáquinas.

4.2.3. Ajuste dos Parâmetros do Estabilizador de Sistemas de Potência

Os parâmetros para ESP são ajustados para se obter um coeficiente de amortecimento mínimo especificado (ξ_{\min}) para os modos instáveis ou pouco amortecidos do sistema elétrico de potência. Para o ajuste dos parâmetros podem ser utilizados os métodos da compensação de fase e/ou alocação de pólos (LARSEN; SWANN, 1981, GUIMARÃES et al., 2000), que são técnicas da teoria do controle clássico.

Neste trabalho é utilizado o método da compensação de fase e a frequência de ajuste será a frequência natural do laço eletromecânico de interesse (ω_{nlek}).

Esta frequência natural do laço eletromecânico (frequência de interesse) é característica de cada máquina síncrona e é definida a partir das contribuições de torque de

sincronização principal (representado pelo parâmetro $K1_k$) e a constante de inércia da máquina síncrona M_k , como mostrada na equação (4.16).

$$\omega_{nlek} = \sqrt{\frac{K1_k}{M_k}} \quad (4.16)$$

O coeficiente de torque de sincronização principal $K1_k$ é obtido a partir do diagrama de blocos da Figura 2.4 (Capítulo 2) considerando-se apenas o subsistema ativo e lento do MSP. Este torque de sincronização principal pode ser escrito então, conforme a equação (4.17).

$$K1_k = \frac{A1_{Gk} \sum_{m \in \Omega k} A1_{km}}{A1_{Gk} + \sum_{m \in \Omega k} A1_{km}} \quad (4.17)$$

Para se obter torque de amortecimento puro (compensar todo o atraso de fase introduzido por $GEP(s)$ – equação (4.1)), a equação (4.18) deve ser satisfeita.

$$PSS(j\omega_{nlek}) + GEP(j\omega_{nlek}) = 0 \quad (4.18)$$

Especificando-se os valores de $T_{\omega k}$ e $T_{2k} = T_{4k}$, a constante de tempo $T_{1k} = T_{3k}$ é determinada de acordo com a expressão (4.19).

$$T_{1k} = \frac{\omega_{nlek} T_{2k} - \frac{\text{imag}(GEP(j\omega_{nlek}))}{2 \text{real}(GEP(j\omega_{nlek}))}}{\omega_{nlek}} \quad (4.19)$$

Especificando-se a contribuição desejada de amortecimento do ESP (D_{PSSk}), o ganho K_{PSSk} é calculado como na equação (4.20).

$$K_{PSSk} = \frac{D_{PSSk}}{|GEP(j\omega_{nlek})||PSS(j\omega_{nlek})|} \quad (4.20)$$

4.3. Controlador para Amortecimento de Oscilações de Potência – POD

A capacidade de transferência de potência é um dos aspectos mais importantes nos sistemas de potência atuais. Esta capacidade é restringida pelos limites térmicos dos equipamentos e/ou limites de estabilidade (WATANABE et al., 1998). Com o crescimento do consumo de energia e a falta de investimento nos sistemas de transmissão, os limites de estabilidade tiveram que se tornar cada vez maiores e novas soluções foram surgindo, principalmente com o avanço da eletrônica de potência.

Com este avanço surgiram os dispositivos FACTS (do inglês, Flexible Altern Current Transmission System) com reconhecido potencial de aplicação em sistemas de potência controlando, entre outras grandezas elétricas, a impedância das linhas de transmissão, a tensão, a corrente e os ângulos de fase das tensões nas diversas barras do sistema elétrico de potência (SONG; JOHNS, 1999).

Estudos posteriores mostraram que os dispositivos FACTS, se acoplados a um controlador adicional, poderiam inserir amortecimento às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico. Essa função pode ser desempenhada através da introdução de um sinal estabilizante de característica suplementar, similar à utilizada nos Estabilizadores de Sistemas de Potência, na malha de controle dos FACTS (CAI; ERLICH, 2003).

Este tipo de estabilizador é denominado POD (Power Oscillation Damping Controller), cuja estrutura básica é mostrada na Figura 4.4 (SONG; JOHNS, 1999, MARTINS et al., 1999, ROUCO; PAGOLA, 2001, CAI; ERLICH, 2003).

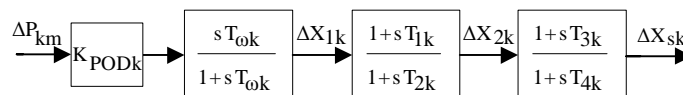


Figura 4.4. Controlador POD para Dispositivo FACTS

No caso do dispositivo FACTS TCSC, com o objetivo de melhorar a capacidade das linhas de transmissão bem como a estabilidade dos sistemas de potência, é realizada uma compensação reativa em série na impedância da linha de transmissão.

O objetivo desta compensação é compensar a queda de tensão indutiva na linha de transmissão e é realizada através da inserção de uma tensão capacitiva, trazendo como consequência, a redução da reatância efetiva da linha de transmissão, conforme a equação (4.21).

$$x_{km} = x - x_{csc} = (1 - k)x \quad (4.21)$$

Na equação (4.21) x_{km} é a reatância da linha de transmissão compensada com a inserção da reatância capacitiva do TCSC x_{csc} , x é a reatância real da linha de transmissão e k é o “grau de compensação” introduzido pelo TCSC.

Adicionando-se um controlador POD ao TCSC para o controle automático da reatância efetiva x_{km} , pode-se introduzir amortecimento às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência. Neste caso, o modelo dinâmico do TCSC é o mostrado na Figura 4.5.

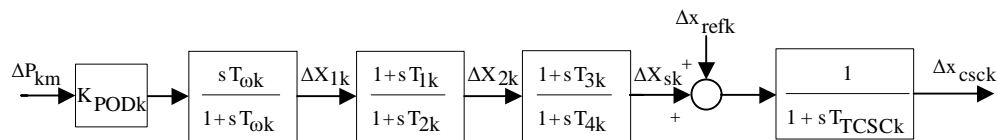


Figura 4.5. Estrutura Dinâmica do TCSC – POD

Dentre os vários sinais de entrada para o POD listados na literatura (WANG; SWIFT, 1997, MARTINS et al., 1999), neste trabalho será utilizado a potência ativa na linha de transmissão onde está instalado o dispositivo TCSC.

4.3.1. Inclusão do TCSC – POD no MSP

A inclusão do TCSC equipado com POD no modelo do sistema elétrico de potência introduz quatro novas variáveis de estado, a saber: ΔX_{1k} , ΔX_{2k} , ΔX_{sk} e Δx_{csc} , como se pode

observar do diagrama de blocos da Figura 4.5.

O processo de inclusão é semelhante ao procedimento realizado anteriormente para o ESP, sendo que pelo fato da entrada do controlador não ser uma variável de estado, deve-se rearranjar o diagrama de blocos da Figura 4.5, definindo outras variáveis de estado sem significado físico, que são dadas nas equações (4.22) a (4.24).

$$\Delta X'_{1k} = \frac{1}{T_{ok}} \Delta X'_{1k} + \frac{K_{PODK}}{T_{ok}} \Delta P_{km} \quad (4.22)$$

$$\Delta X'_{2k} = \frac{1}{T_{2k}} \Delta X_{1k} + \frac{1}{T_{2k}} \Delta X'_{2k} \quad (4.23)$$

$$\Delta X'_{sk} = \frac{1}{T_{4k}} \Delta X_{2k} + \frac{1}{T_{4k}} \Delta X'_{sk} \quad (4.24)$$

Substituindo-se a expressão de ΔP_{km} (equação (3.2) – Capítulo 3) na equação (4.22) e rearranjando, são obtidas as equações (4.25) a (4.27) e, por inspeção no diagrama de blocos da Figura 4.5 é obtida a equação (4.28).

$$\begin{aligned} \Delta X'_{1k} = & -\frac{1}{T_{ok}} \Delta X'_{1k} + \frac{K_{PODK} A1_{km}}{T_{ok}} \Delta \theta_k - \frac{K_{PODK} A1_{km}}{T_{ok}} \Delta \theta_m \\ & + \frac{K_{PODK} A2_{km}}{T_{ok}} \Delta V_k + \frac{K_{PODK} A3_{km}}{T_{ok}} \Delta V_m + \frac{K_{PODK} A_{xkm}}{T_{ok}} \Delta X_{csck} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \Delta X'_{2k} = & -\frac{1}{T_{2k}} \Delta X'_{1k} - \frac{1}{T_{2k}} \Delta X'_{2k} + \frac{K_{PODK} A1_{km}}{T_{2k}} \Delta \theta_k - \frac{K_{PODK} A1_{km}}{T_{2k}} \Delta \theta_m \\ & + \frac{K_{PODK} A2_{km}}{T_{2k}} \Delta V_k + \frac{K_{PODK} A3_{km}}{T_{2k}} \Delta V_m + \frac{K_{PODK} A_{xkm}}{T_{2k}} \Delta X_{csck} \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} \Delta X'_{sk} = & -\frac{T_{1k}}{T_{2k} T_{4k}} \Delta X'_{1k} + \frac{1}{T_{4k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{2k}} \right) \Delta X'_{2k} - \frac{1}{T_{4k}} \Delta X'_{sk} + \frac{K_{PODK} T_{1k} A1_{km}}{T_{2k} T_{4k}} \Delta \theta_k \\ & - \frac{K_{PODK} T_{1k} A1_{km}}{T_{2k} T_{4k}} \Delta \theta_m + \frac{K_{PODK} T_{1k} A2_{km}}{T_{2k} T_{4k}} \Delta V_k + \frac{K_{PODK} T_{1k} A3_{km}}{T_{2k} T_{4k}} \Delta V_m \\ & + \frac{K_{PODK} T_{1k} A_{xkm}}{T_{2k} T_{4k}} \Delta X_{csck} \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta X_{\text{cscck}} = & -\frac{T_{1k} T_{3k}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} \Delta X'_{1k} - \frac{T_{3k}}{T_{\text{TCSCk}} T_{4k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{2k}}\right) \Delta X'_{2k} - \frac{1}{T_{\text{TCSCk}}} \left(1 - \frac{T_{3k}}{T_{4k}}\right) \Delta X'_{3k} \\
 & - \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{1km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} \Delta \theta_k + \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{1km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} \Delta \theta_m - \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{2km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} \Delta V_k \\
 & - \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{3km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} \Delta V_m + \frac{1}{T_{\text{TCSCk}}} \Delta X_{\text{refk}} - \left(\frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{xkm}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} + \frac{1}{T_{\text{TCSCk}}} \right) \Delta X_{\text{cscck}}
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

A equação (4.28) fornece as variações da variável a ser controlada ΔX_{cscck} (saída do POD).

As equações (4.25) a (4.28) em conjunto com as equações diferenciais do sistema multimáquinas modelado pelo MSP (equações (2.24), (2.26), (2.27) e (2.28) – Capítulo 2) e as equações algébricas do sistema multimáquinas equipado com TCSC (equações (3.2) e (3.3) – Capítulo 3) podem ser agrupadas e escritas na forma mostrada na equação (4.29).

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_{qk} \\ \Delta E'_{dk} \\ \Delta X'_{1k} \\ \Delta X'_{2k} \\ \Delta X'_{3k} \\ \Delta X'_{\text{cscck}} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} \frac{D_k}{M_k} & \frac{A_{1Gk}}{M_k} & \frac{A_{2Gk}}{M_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{sk} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{AK}}{T_{dkk}} & \frac{x_{dk}}{x_{dk} T_{dkk}} & \frac{1}{x_{dk} T_{dkk}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_o} & 0 & 0 & \frac{K_{\text{PODK}} A_{3km}}{T_{ok}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{2k}} & -\frac{1}{T_{2k}} & 0 & \frac{K_{\text{PODK}} A_{3km}}{T_{2k}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T_{1k}}{T_{2k} T_{2k}} & \frac{1}{T_{2k}} \left(1 - \frac{1}{T_{2k}}\right) & -\frac{1}{T_{4k}} & \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} A_{3km}}{T_{2k} T_{4k}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T_{1k} T_{3k}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} & -\frac{T_{3k}}{T_{\text{TCSCk}} T_{4k}} \left(1 - \frac{T_{1k}}{T_{2k}}\right) & -\frac{1}{T_{\text{TCSCk}}} \left(1 - \frac{T_{3k}}{T_{4k}}\right) & -\frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{3km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_k \\ \Delta \delta_k \\ \Delta E'_{qk} \\ \Delta E'_{dk} \\ \Delta X'_{1k} \\ \Delta X'_{2k} \\ \Delta X'_{3k} \\ \Delta X'_{\text{cscck}} \end{bmatrix} \\
 + & \begin{bmatrix} \frac{A_{1Gk}}{M_k} & 0 & \frac{A_{3Gk}}{M_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_{AK}}{T_{dkk}} & 0 & \frac{K_{VK}}{T_{dkk}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{dk}}{T_{dk}} & 0 \\ \frac{K_{\text{PODK}} A_{1km}}{T_{ok}} & -\frac{K_{\text{PODK}} A_{1km}}{T_{ok}} & \frac{K_{\text{PODK}} A_{2km}}{T_{ok}} & \frac{K_{\text{PODK}} A_{3km}}{T_{ok}} \\ \frac{K_{\text{PODK}} A_{1km}}{T_{2k}} & -\frac{K_{\text{PODK}} A_{1km}}{T_{2k}} & \frac{K_{\text{PODK}} A_{2km}}{T_{2k}} & \frac{K_{\text{PODK}} A_{3km}}{T_{2k}} \\ \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} A_{1km}}{T_{2k} T_{4k}} & -\frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} A_{1km}}{T_{2k} T_{4k}} & \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} A_{2km}}{T_{2k} T_{4k}} & \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} A_{3km}}{T_{2k} T_{4k}} \\ -\frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{1km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} & \frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{1km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} & -\frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{2km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} & -\frac{K_{\text{PODK}} T_{1k} T_{3k} A_{3km}}{T_{\text{TCSCk}} T_{2k} T_{4k}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ \Delta V_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{M_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{dk}}{T_{dk}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{\text{TCSCk}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta V_{\text{refk}} \\ \Delta P_{1k} \\ \Delta Q_{1k} \\ \Delta X_{\text{refk}} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

4.3.2. Localização do TCSC – POD

A localização do dispositivo TCSC equipado com controlador POD influencia o fornecimento de amortecimento para os modos oscilatórios pouco amortecidos ou mesmo instáveis do sistema elétrico, sendo que sua localização está diretamente relacionada com a capacidade de controle fornecida pelo dispositivo ao sistema multimáquinas. Nesta seção será tratado o aspecto da controlabilidade para a determinação da “localização apropriada” do dispositivo TCSC – POD.

Para isto considere um sistema elétrico de potência multimáquinas e o dispositivo FACTS equipado com controlador POD em atuação, representados pelas funções de transferência $SEP(s)$ e $K_{POD}C(s)$ como mostrado na Figura 4.6, onde K_{POD} é o ganho estático do controlador POD.

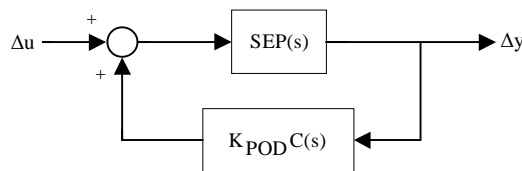


Figura 4.6. Função de Transferência do Sistema Elétrico com Controlador POD

Uma forma para se determinar a localização mais apropriada do TCSC equipado com POD é obtida usando a análise dos Resíduos da Função de Transferência de Malha Aberta para entradas e saídas do controlador POD (MARTINS; LIMA, 1990, YANG et al., 1998), conforme as equações (4.30) e (4.31).

$$\frac{\Delta\lambda_i}{\Delta K_{POD}} = R_{ijk} C(\lambda_i) \quad (4.30)$$

$$\Delta\lambda_i = \Delta K_{POD} R_{ijk} C(\lambda_i) \quad (4.31)$$

Nas equações (4.30) e (4.31) $\Delta\lambda_i$ é o deslocamento desejado do autovalor

correspondente ao modo pouco amortecido (ou instável) para torná-lo estável, R_{ijk} é o resíduo associado à entrada Δu_k e à saída Δy_j .

Das equações (4.30) e (4.31) nota-se que a sensibilidade para um deslocamento do autovalor associado ao modo oscilatório a ser amortecido é diretamente proporcional ao resíduo R_{ijk} . Deste fato pode-se concluir que um maior deslocamento do autovalor será atingido desde que o resíduo associado seja também maior.

Este método será o utilizado neste trabalho para a escolha da localização do dispositivo TCSC equipado com POD no sistema elétrico de potência multimáquinas.

4.3.3. Ajuste dos Parâmetros do Controlador POD

O projeto do controlador POD é baseado no conceito de compensação de fase, ou seja, devem ser determinados os parâmetros de um controlador POD tal que o resíduo se desloque θ graus para o semiplano esquerdo do plano complexo conforme mostrado na Figura 4.7. O modelo do controlador POD adotado é composto de um ganho estático, um bloco washout e dois blocos de avanço-atraso de fase conforme mostrado na Figura 4.4 para o caso do TCSC, proposto em (WANG; SWIFT, 1998, FURINI; ARAUJO, 2008).

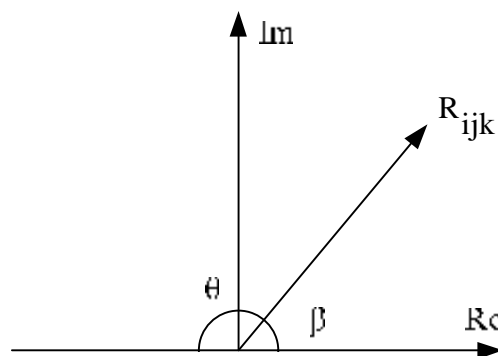


Figura 4.7. Efeito do Controlador POD no Resíduo Associado ao Autovalor λ_i

O conjunto de equações (4.32) mostra o procedimento necessário para obtenção das constantes de tempo do POD, considerando $T_{1k} = T_{3k}$ e $T_{2k} = T_{4k}$.

$$\begin{aligned}\theta &= 180^\circ - \beta \\ \alpha &= \frac{1 - \text{sen}(\theta / 2)}{1 + \text{sen}(\theta / 2)} \\ T_{2k} &= \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}}; \quad T_{1k} = \alpha T_{2k}\end{aligned}\tag{4.32}$$

O ganho $K_{\text{POD}k}$ do controlador é obtido através dos parâmetros anteriormente obtidos e da posição desejada (λ_{ides}) para o autovalor (λ_i) associado ao modo de oscilação a ser amortecido, que possui frequência natural (ω_i), de acordo com a equação (4.33).

$$K_{\text{POD}k} = \frac{|\lambda_{\text{ides}} - \lambda_i|}{|R_{ijk}| |C(\lambda_i)|}\tag{4.33}$$

4.4. Conclusões

Este Capítulo tratou de sinais adicionais estabilizadores utilizados para introduzir amortecimento aos modos de baixa frequência pouco amortecidos ou instáveis do sistema elétrico de potência. Os dispositivos avaliados foram os ESP's e POD's.

Estes equipamentos foram equacionados e depois suas equações foram introduzidas na modelagem do sistema elétrica, alterando-se o MSP original.

No caso dos ESP's, o sinal de entrada utilizado foram os desvios da velocidade angular $\Delta\omega_k$ de um gerador genérico k para o controle do sinal suplementar ΔV_{sk} , de modo a introduzir amortecimento positivo ao sistema elétrico. Com relação aos POD's, o sinal utilizado como entrada foram os desvios da potência ativa na linha de transmissão onde estava instalado o controlador (ΔP_{km}), para o controle da variável ΔX_{sk} .

A localização destes controladores no sistema elétrico também foi discutida, sendo que para os ESP's o método escolhido para sua localização foi o dos Fatores de Participação. No caso dos POD's, utilizou-se os Resíduos da Função de Transferência.

Para ambos os controladores, o ajuste de seus parâmetros foi baseado no método da

compensação de fase.

Conclusões a respeito da localização dos dispositivos ESP e TCSC equipado com POD, bem como suas influências na estabilidade às pequenas perturbações do sistema elétrico de potência serão vistas no Capítulo 5.

Capítulo 5

Simulações e Resultados

5.1. Introdução

Neste Capítulo são apresentadas simulações em dois sistemas teste de onde foram obtidos resultados a respeito da estabilidade às pequenas perturbações, utilizando-se o controlador adicional ESP e o dispositivo FACTS TCSC acoplado a um POD. Os sistemas multimáquinas sob estudo são o “Sul Brasileiro Reduzido” e o “New England”.

Para as simulações todas as modelagens apresentadas nos capítulos precedentes foram implementadas computacionalmente utilizando-se o *software* MATLAB 7.0[®]. Para o cálculo das condições iniciais dos sistemas teste (fluxo de potência) foi utilizada a ferramenta MATPOWER[®] desenvolvida em linguagem MATLAB em Zimmerman, 2007.

5.2. Sistema Sul Brasileiro Reduzido

O Sistema Sul Brasileiro Reduzido, cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 5.1, compreende 10 geradores síncronos, 45 barras e 73 linhas de transmissão (MINUSSI, 1990) e

Analisando os autovalores listados na Tabela 5.1 pode-se ver que este sistema, para o ponto de operação considerado, possui 9 modos oscilatórios dos quais 5 são instáveis (modos 4, 5, 7, 8 e 9 – observe o coeficiente de amortecimento ξ negativo). Analisando-se os valores das frequências naturais conclui-se que estes modos instáveis são modos locais de oscilação.

Para tornar o sistema estável é proposta a inclusão de ESP's cujos parâmetros serão ajustados de acordo com o procedimento apresentado no Capítulo anterior.

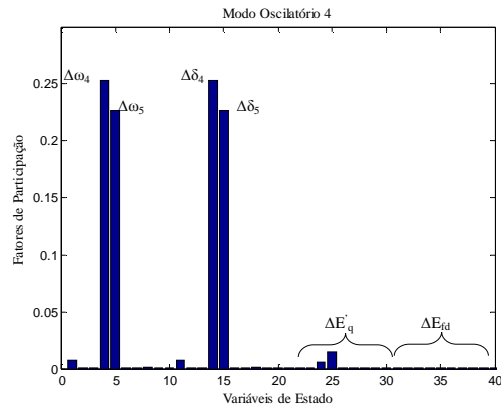


Figura 5.2. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 4

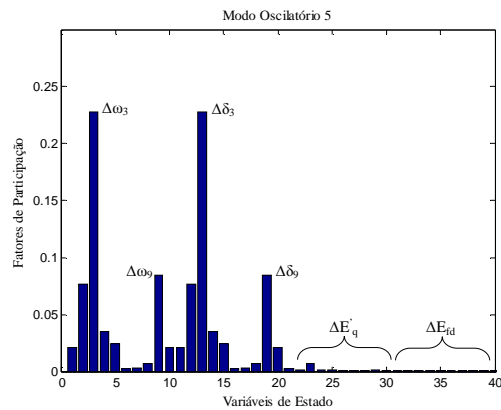


Figura 5.3. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 5

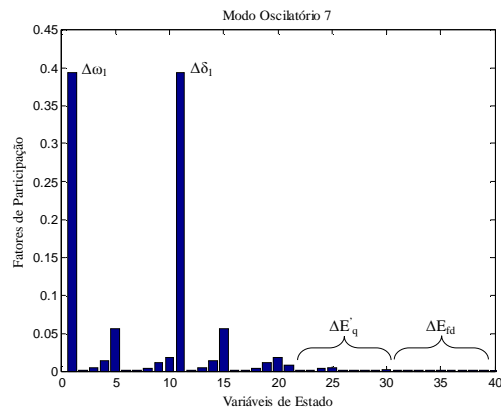


Figura 5.4. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 7

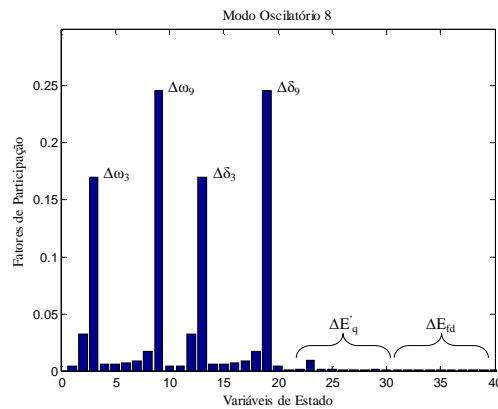


Figura 5.5. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 8

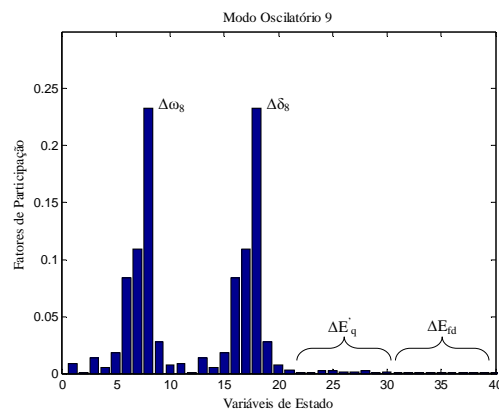


Figura 5.6. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 9

Para se definir quais são os geradores mais efetivos para a instalação dos ESP's foram calculados os fatores de participação relacionados aos modos instáveis, como mostrados nas Figuras 5.2 a 5.6.

Os fatores de participação resultaram maiores para as variáveis $\Delta\omega_1$, $\Delta\delta_1$, $\Delta\omega_3$, $\Delta\delta_3$, $\Delta\omega_4$, $\Delta\delta_4$, $\Delta\omega_5$, $\Delta\delta_5$, $\Delta\omega_8$ e $\Delta\delta_8$, indicando que os geradores 1, 3, 4, 5 e 8 são as melhores localizações para os sinais adicionais estabilizantes.

Tabela 5.2. Parâmetros dos ESP's: $\xi = 0.2$

Máq.	$K_{PSSk} (\xi=0.2)$	$T_{\omega k}$	T_{1k}	T_{2k}
1	4.1748	1.0000	0.1010	0.0200
3	4.4331	1.0000	0.0991	0.0200
4	4.4360	1.0000	0.0978	0.0200
5	4.9551	1.0000	0.0978	0.0200
8	4.4041	1.0000	0.0757	0.0200

Tabela 5.3. Parâmetros dos ESP's: $\xi = 0.8$

Máq.	$K_{PSSk} (\xi=0.8)$	$T_{\omega k}$	T_{1k}	T_{2k}
1	16.6990	1.0000	0.1010	0.0200
3	17.7320	1.0000	0.0991	0.0200
4	17.7440	1.0000	0.0978	0.0200
5	19.8200	1.0000	0.0978	0.0200
8	17.6160	1.0000	0.0757	0.0200

A partir destas localizações, foram calculados os parâmetros de cinco estabilizadores método descrito no Capítulo 4, para dois valores de coeficiente de amortecimento ($\xi = 0.2$ e $\xi = 0.8$). Os parâmetros obtidos são listados nas Tabelas 5.2. e 5.3.

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 pode ser observado que as constantes de tempo são as mesmas para os dois ajustes, já que atraso de fase introduzido pela função de transferência $GEP(s)$ é o mesmo para os dois casos. Diferentemente, os valores para os ganhos dos sinais estabilizadores são maiores quando se exige maior amortecimento.

Tabela 5.4. Autovalores Dominantes: com ESP's: $\xi = 0.2$

$\xi = 0.2$		
λ Dominantes	ξ	ω_n
$-49.9340 \pm 12.2080i$	0.9714	8.1813
$-49.6540 \pm 18.5330i$	0.9369	8.4352
$-48.8800 \pm 18.5260i$	0.9351	8.3195
$-48.9170 \pm 17.9160i$	0.9390	8.2912
$-49.0180 \pm 16.2110i$	0.9494	8.2170
$-0.2653 \pm 9.7131i$	0.0273	1.5465
$-0.8084 \pm 9.3236i$	0.0864	1.4895
$-0.3887 \pm 8.5299i$	0.0455	1.3590
$-0.8180 \pm 7.5961i$	0.1071	1.2159
$-0.0448 \pm 7.6356i$	0.0059	1.2153
$-0.1936 \pm 5.9853i$	0.0323	0.9531
$-0.5918 \pm 6.8529i$	0.0860	1.0947
$-0.0679 \pm 6.5685i$	0.0103	1.0455
$-0.2522 \pm 6.8375i$	0.0369	1.0890

Tabela 5.5. Autovalores Dominantes: com ESP's: $\xi = 0.8$

$\xi = 0.8$		
λ Dominantes	ξ	ω_n
$-49.0580 \pm 24.4560i$	0.8950	8.7243
$-46.3710 \pm 38.4240i$	0.7700	9.5846
$-48.6140 \pm 37.2450i$	0.7938	9.7469
$-46.6530 \pm 37.1780i$	0.7821	9.4943
$-46.7880 \pm 33.3990i$	0.8139	9.1492
$-0.2698 \pm 9.7087i$	0.0278	1.5458
$-0.6724 \pm 7.9043i$	0.0848	1.2625
$-0.0427 \pm 7.5830i$	0.0056	1.2069
$-1.3583 \pm 7.3990i$	0.1806	1.1973
$-2.4689 \pm 7.0538i$	0.3304	1.1894
$-0.2251 \pm 6.4617i$	0.0348	1.0290
$-2.7996 \pm 5.7268i$	0.4392	1.0145
$-2.1030 \pm 5.4224i$	0.3616	0.9256
$-1.0924 \pm 5.2042i$	0.2054	0.8463

Incluindo no sistema elétrico de potência os estabilizadores com os parâmetros mostrados nas Tabelas 5.2 e 5.3 (conjunto de equações (4.10) – Capítulo 4), foram obtidos os autovalores dominantes do sistema sob estudo, listados nas Tabelas 5.4 e 5.5, bem como o coeficiente de amortecimento e a frequência natural (em Hz) a eles associados. Observe que os ajustes efetuados atingiram o objetivo, pois o sistema teste antes instável, se tornou estável com todos os coeficientes de amortecimentos positivos. Deve-se ressaltar que a especificação dos coeficientes de amortecimento não leva exatamente o autovalor ao local desejado devido às interações com os outros modos presentes no sistema (observe que todos os modos oscilatórios sofreram variação), mas o resultado final é um sistema estável.

Observe também os outros modos de oscilação introduzidos pelos ESP's, modos estes não relacionados com modos locais de oscilação (suas frequências naturais de oscilação não são frequências típicas de modos locais de oscilação).

Na Figura 5.7 são mostradas as curvas dos desvios da velocidade angular do gerador 3

para uma perturbação de 0.05 p.u. no torque mecânico de entrada do gerador 1 (o gerador 1 foi considerado referência para o sistema teste).

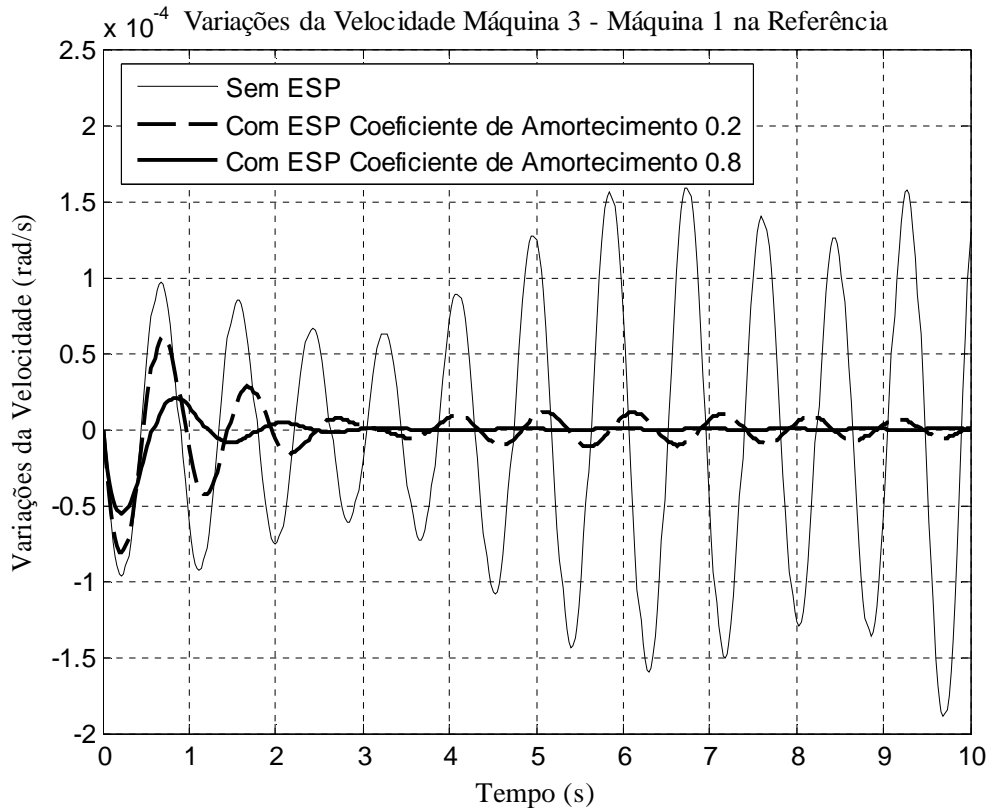


Figura 5.7. Variações de Velocidade Angular: Gerador 3

Analisando-se as curvas da Figura 5.7 pode-se concluir que o aumento do coeficiente de amortecimento especificado (com conseqüente aumento do ganho K_{PSSK}) provoca maiores contribuições de amortecimento “puro” D_{PSSK} , fazendo com que as oscilações se tornem mais amortecidas, levando o sistema de potência a atingir um novo estado de regime permanente mais rapidamente.

5.3. Sistema New England – Caso Base

O Sistema New England (MARTINS; LIMA, 1990, ARAUJO; ZANETTA, 2001, KUIAVA, 2007) é formado por 10 geradores síncronos, 39 barras e 46 linhas de transmissão, conforme o diagrama unifilar mostrado na Figura 5.8 (os principais dados deste sistema estão listados no Apêndice III).

Efetuando-se sua modelagem pelo MSP, são calculados os autovalores da matriz de estado, cujos modos de interesse são mostrados na Tabela 5.6 bem como o coeficiente de amortecimento ξ e a frequência natural de oscilação ω_n (em Hz) associada a eles.

Analisando os autovalores listados na Tabela 5.6. pode-se ver que este sistema, para o ponto de operação considerado, possui 9 modos oscilatórios dos quais cinco são instáveis (modos 4, 5, 6, 7 e 8 – veja o coeficiente de amortecimento ξ negativo). Observando os valores das frequências naturais conclui-se que estes modos instáveis são modos locais de oscilação.

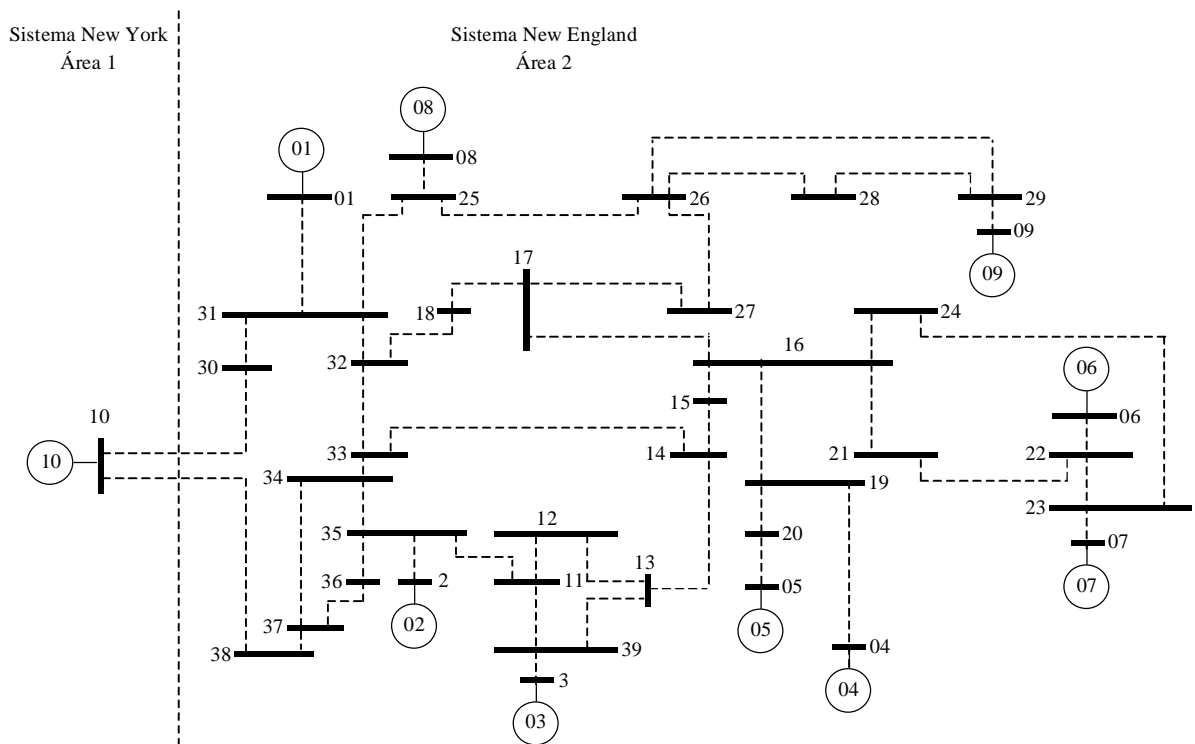


Figura 5.8. Sistema New England – Diagrama Unifilar

Outra particularidade deste sistema é o modo de oscilação interárea (modo número 9 na Tabela 5.6), reconhecido pela sua frequência situada na faixa de frequências típicas dos modos interárea. No ponto de operação considerado, este modo é estável (situa-se no semiplano esquerdo do plano complexo).

Como o problema da instabilidade está ocorrendo por causa de modos locais, para tornar o sistema estável é proposta a inclusão de ESP's cujos parâmetros serão ajustados de acordo com os procedimentos apresentados no Capítulo 4.

Tabela 5.6. Autovalores Dominantes: Sistema New England

Modo	λ Dominantes	ξ	ω_n
1	$-0.26368 \pm 8.204i$	0.032123	1.3064
2	$-0.2369 \pm 8.1598i$	0.02902	1.2992
3	$-0.22287 \pm 8.0394i$	0.027711	1.28
4	$0.0093463 \pm 7.1991i$	-0.0012983	1.1458
5	$0.21195 \pm 7.0019i$	-0.030257	1.1149
6	$0.33525 \pm 6.2637i$	-0.053447	0.99832
7	$0.1914 \pm 6.6814i$	-0.028635	1.0638
8	$0.1984 \pm 6.5974i$	-0.028635	1.0505
9	$-0.0021885 \pm 3.9069i$	0.00056016	0.6218

Para se definir quais são os melhores geradores para a instalação dos ESP's foram calculados os fatores de participação relacionados aos modos instáveis, como mostrados nas Figuras 5.9 a 5.13.

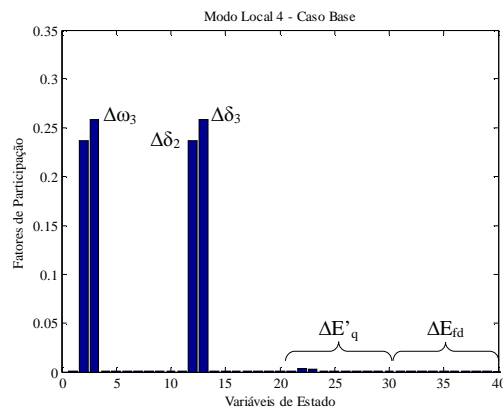


Figura 5.9. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 4

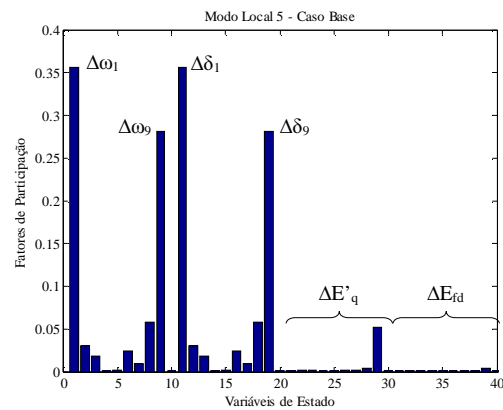


Figura 5.10. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 5

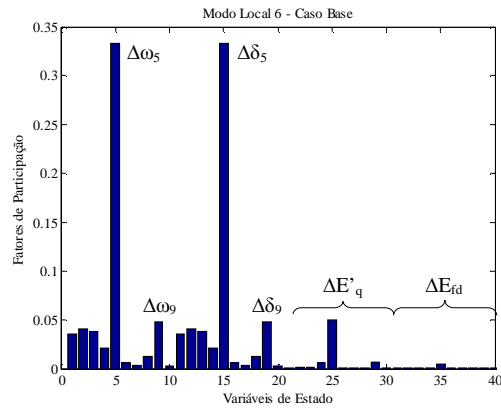


Figura 5.11. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 6

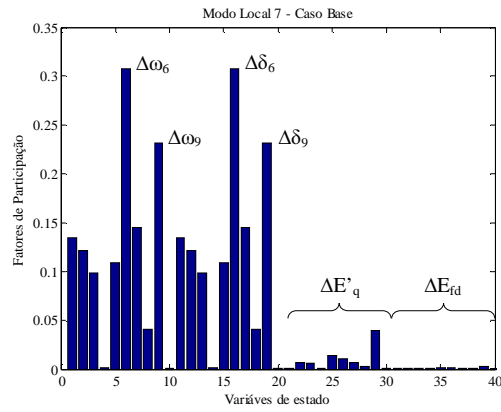


Figura 5.12. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 7

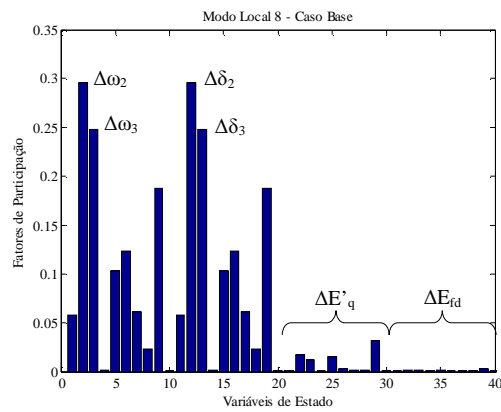


Figura 5.13. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 8

Na Tabela 5.7 são mostrados os valores numéricos os fatores de participação para uma melhor análise.

Tabela 5.7. Fatores de Participação – Sistema New England

Modo	Máq. / F. de Participação	Máq. / F. de Participação
Local 4	3 / 0.25853	2 / 0.23718
Local 5	1 / 0.35623	9 / 0.28150
Local 6	5 / 0.33295	9 / 0.04785
Local 7	6 / 0.30784	9 / 0.23219
Local 8	2 / 0.29584	3 / 0.24828

Os fatores de participação resultaram maiores para as variáveis $\Delta\omega_1$, $\Delta\delta_1$, $\Delta\omega_2$, $\Delta\delta_2$, $\Delta\omega_3$, $\Delta\delta_3$, $\Delta\omega_5$, $\Delta\delta_5$, $\Delta\omega_6$ e $\Delta\delta_6$, o que indica que os geradores 1, 2, 3, 5 e 6 são as melhores localizações para os sinais adicionais estabilizantes. Também da Tabela 5.7 observa-se que a máquina 9, com suas variáveis $\Delta\omega_9$ e $\Delta\delta_9$ esta associada a três modos oscilatórios locais (5, 6 e 7), o que faz prever sua importância como local para instalação de um dispositivo ESP.

Especificando-se os valores $T_{\omega k}$ e T_{2k} e o coeficiente de amortecimento ξ desejado dos dispositivos ESP's ajustado em 0.8, foram determinados os parâmetros K_{PSSk} e $T_{1k} = T_{3k}$, admitindo-se $T_{2k} = T_{4k}$. Os resultados são mostrados na Tabela 5.8 para as máquinas com fatores de participação mais altos nos modos oscilatórios de interesse (máquinas 1, 2, 3, 5 e 6) e também a máquina 9 (por sua contribuição em mais de um modo oscilatório).

Tabela 5.8. Parâmetros dos ESP's – Coeficiente de Amortecimento Especificado $\xi = 0.8$ Caso Base

Máq.	$T_{\omega k}$	T_{1k}	T_{2k}	T_{3k}	T_{4k}	K_{PSSk}
1	1.0000	0.17156	0.0200	0.17156	0.0200	71.8060
2	1.0000	0.17013	0.0200	0.17013	0.0200	15.2640
3	1.0000	0.14380	0.0200	0.14380	0.0200	15.0130
5	1.0000	0.32354	0.0200	0.32354	0.0200	5.7889
6	1.0000	0.23469	0.0200	0.23469	0.0200	8.4936
9	1.0000	0.18902	0.0200	0.18902	0.0200	8.2867

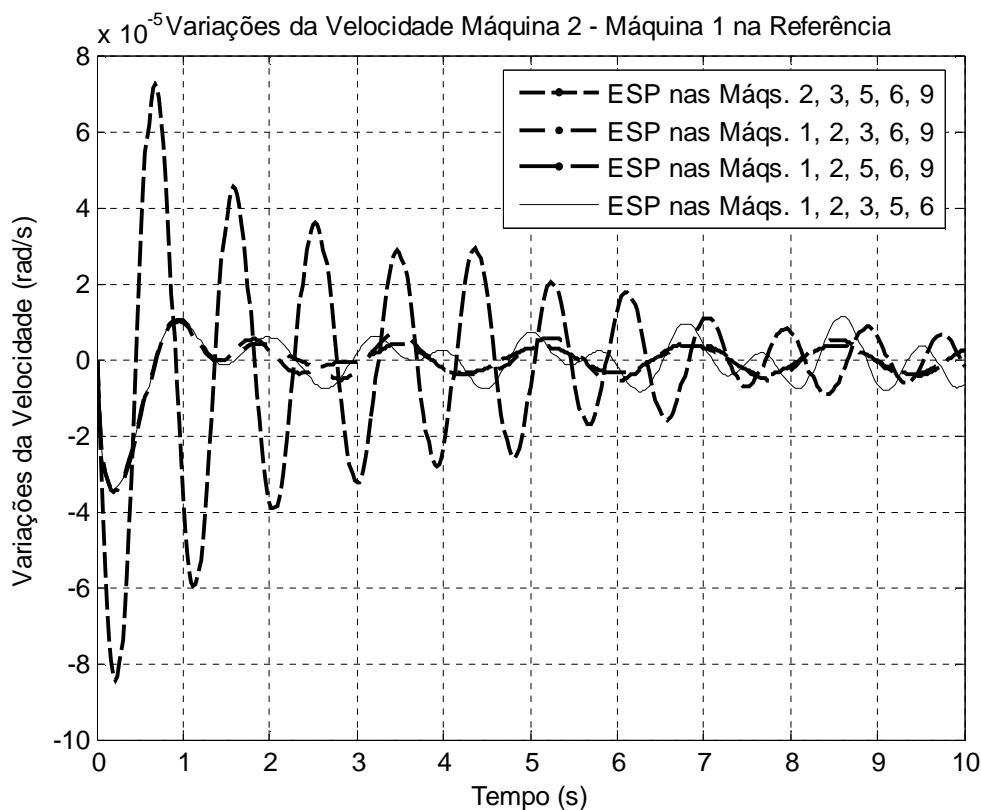


Figura 5.14. Sistema New England Equipado com ESP's: $\xi = 0.80$

Para uma análise no domínio do tempo foi aplicada uma perturbação em degrau de 0.05 p.u. na potência mecânica na máquina 1 (ΔT_{m1}) e na Figura 5.14 são mostrados os resultados desta simulação (na Figura 5.14 está mostrado como se comporta a diferença de velocidades do rotor da máquina 2 em relação ao gerador 1 ($\Delta\omega_2 - \Delta\omega_1$), sendo que a máquina 1 foi escolhida como referência angular do sistema).

Analisando-se as curvas mostradas na Figura 5.14 é possível concluir que foram necessários cinco dispositivos ESP's para amortecer as oscilações de baixa frequência no Sistema New England, considerando-se a existência de cinco modos oscilatórios locais instáveis.

Tabela 5.9. Estabilidade vs. Combinações – Máquinas com ESP $\xi = 0.80$

ξ	Máqs. com ESP	Condição
0.80	2, 3, 5, 6, 9	Estável
	1, 2, 3, 6, 9	Estável
	1, 2, 5, 6, 9	Estável
	1, 2, 3, 5, 6	Instável

Ainda analisando as curvas mostradas, observa-se que os melhores resultados em termos de amortecimento são obtidos para uma combinação de instalação dos ESP's como mostrado na Tabela 5.9, refletido na Figura 5.14, onde se pode notar a destacada eficiência para amortecimento das oscilações do sistema New England com a combinação dos ESP's instalados nas máquinas 1, 2, 5, 6 e 9.

Especificando-se o coeficiente de amortecimento ξ exigido dos dispositivos estabilizadores em 0.25 foram realizados novos ajustes dos parâmetros cujos resultados são mostrados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Parâmetros dos ESP's – Coeficiente de Amortecimento Especificado $\xi = 0.25$

Máq.	$T_{\omega k}$	T_{1k}	T_{2k}	T_{3k}	T_{4k}	K_{PSSk}
1	1.0000	0.17156	0.0200	0.17156	0.0200	22.4390
2	1.0000	0.17013	0.0200	0.17013	0.0200	4.7701
3	1.0000	0.14380	0.0200	0.14380	0.0200	4.6917
5	1.0000	0.32254	0.0200	0.32254	0.0200	1.8090
6	1.0000	0.23469	0.0200	0.23469	0.0200	2.6542
9	1.0000	0.18902	0.0200	0.18902	0.0200	2.3709

Para uma análise no domínio do tempo novamente foi aplicada uma perturbação em degrau de 0.05 p.u. na potência mecânica na máquina 1 (ΔT_{m1}) e na Figura 5.15 são mostradas as curvas resultantes desta simulação para várias combinações de geradores.

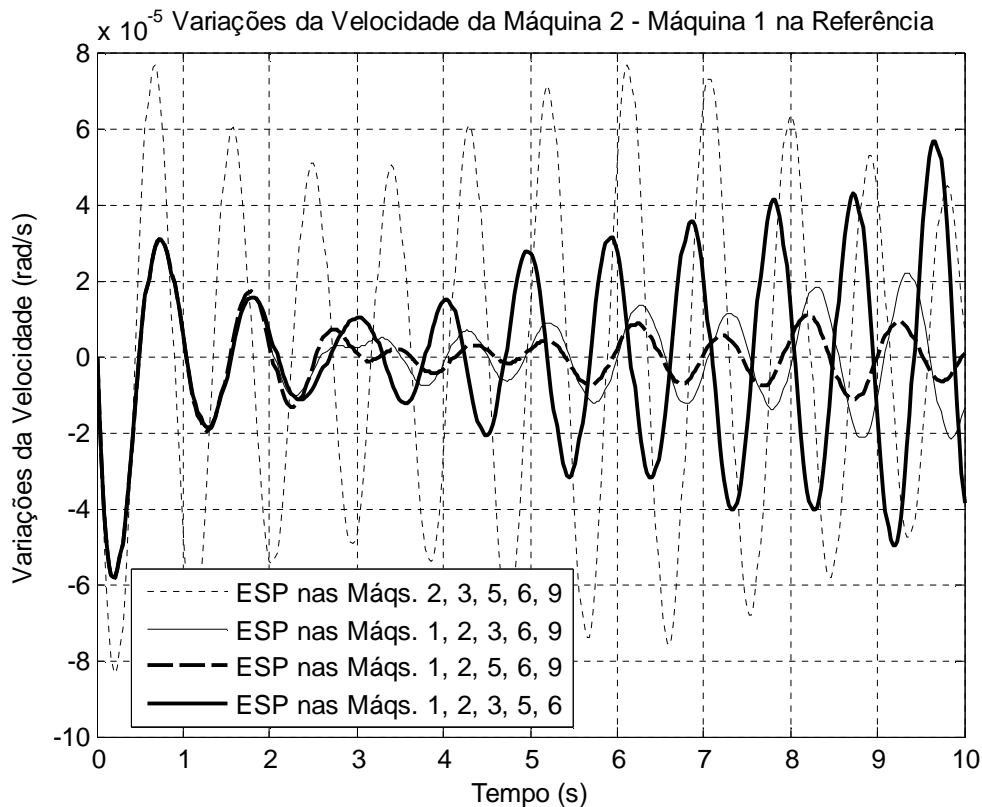


Figura 5.15. Sistema New England Equipado com ESP's: $\xi = 0.25$

Das curvas mostradas na Figura 5.15. pode ser observado um fraco amortecimento inserido pelos ESP's quando o coeficiente de amortecimento ξ é estipulado em 0.25.

Analisando-se os autovalores dominantes dados na Tabela 5.11 é possível concluir que o sistema New England se mantém estável apenas com os ESP's instalados nas máquinas 2, 3, 5, 6 e 9 se o coeficiente de amortecimento é estipulado em 0.25. Para todas as outras combinações de geradores o sistema é instável.

Na Tabela 5.12 são mostradas várias combinações de geradores para a instalação dos dispositivos ESP's quando o coeficiente de amortecimento ξ pode assumir valores entre 0.24 e 0.25 e a condição de operação que o sistema New England assume quanto à estabilidade.

Analisando as combinações mostradas, associados aos diferentes coeficientes de amortecimento estipulados, os dados da Tabela 5.12 permite concluir que a combinação de máquinas 2, 3, 5, 6 e 9 é a mais robusta para o ponto de operação considerado.

Tabela 5.11. Autovalores Dominantes: Sistema New England com ESP's $\xi = 0.25$

$\xi = 0.25$ ESP's nas Máqs. 2, 3, 5, 6, 9			$\xi = 0.25$ ESP's nas Máqs. 1, 2, 3, 6, 9		
λ Dominantes	ξ	ω_n	λ Dominantes	ξ	ω_n
$-39.8910000 \pm 34.851i$	0.7530800	8.43060	$-48.5220000 \pm 28.306i$	0.8637700	8.94050
$-42.4210000 \pm 27.216i$	0.8416700	8.02160	$-40.8690000 \pm 31.182i$	0.7950200	8.18160
$-41.9910000 \pm 31.005i$	0.8044700	8.30760	$-41.3810000 \pm 29.199i$	0.8170700	8.06050
$-40.5260000 \pm 30.891i$	0.7953000	8.11010	$-41.6430000 \pm 28.486i$	0.8253600	8.03000
$-41.2310000 \pm 28.959i$	0.8183200	8.01910	$-35.4410000 \pm 24.663i$	0.8208200	6.87200
$-0.2564400 \pm 8.1885i$	0.0313020	1.30390	$-0.2955900 \pm 8.1609i$	0.0361960	1.29970
$-0.3510900 \pm 8.0412i$	0.0436210	1.28100	$-0.5713400 \pm 7.9610i$	0.0715830	1.27030
$-0.5763700 \pm 7.5314i$	0.0763050	1.20220	$-0.5635700 \pm 7.5195i$	0.0747380	1.20010
$-0.0197970 \pm 6.8792i$	0.0028777	1.09490	$-1.0412000 \pm 6.4966i$	0.1582500	1.04720
$-1.0381000 \pm 6.4994i$	0.1577200	1.04750	$-0.8047000 \pm 6.3157i$	0.1263900	1.01330
$-0.0493850 \pm 6.1164i$	0.0080739	0.97348	$0.2187700 \pm 6.1523i$	-0.035536	0.97979
$-0.0069306 \pm 5.6524i$	0.0012261	0.89960	$-0.0420530 \pm 6.3055i$	0.0066691	1.00360
$-0.3881800 \pm 6.0318i$	0.0642230	0.96197	$-0.3790200 \pm 5.9958i$	0.0630890	0.95616
$-0.0222910 \pm 3.8551i$	0.0057820	0.61358	$0.0091615 \pm 3.8582i$	-0.0023746	0.61405
$\xi = 0.25$ ESP's nas Máqs. 1, 2, 5, 6, 9			$\xi = 0.25$ ESP's nas Máqs. 1, 2, 3, 5, 6		
λ Dominantes	ξ	ω_n	λ Dominantes	ξ	ω_n
$-47.782 \pm 29.635i$	0.8498200	8.94860	$-39.9320000 \pm 34.431i$	0.7573400	8.39160
$-39.895 \pm 34.502i$	0.7563800	8.39460	$-45.7610000 \pm 24.845i$	0.8788300	8.28730
$-40.887 \pm 31.190i$	0.7950800	8.18470	$-41.0610000 \pm 30.706i$	0.8008400	8.16030
$-41.345 \pm 29.307i$	0.8158300	8.06570	$-41.2000000 \pm 28.868i$	0.8189700	8.00660
$-35.645 \pm 25.638i$	0.8118200	6.98810	$-38.4210000 \pm 21.925i$	0.8685300	7.04040
$-0.38294 \pm 8.0418i$	0.0475650	1.28130	$-0.3911500 \pm 8.0401i$	0.0485930	1.28110
$-0.54698 \pm 7.9861i$	0.0683310	1.27400	$-0.4968600 \pm 7.9592i$	0.0623050	1.26920
$-0.63075 \pm 7.4416i$	0.0844570	1.18860	$-0.6702400 \pm 7.4168i$	0.0900010	1.18520
$-0.33177 \pm 6.8448i$	0.0484130	1.09070	$0.1698600 \pm 6.7231i$	-0.0252560	1.07040
$-0.81507 \pm 6.3133i$	0.1280400	1.01310	$-1.0421000 \pm 6.4964i$	0.1583900	1.04710
$-0.46501 \pm 6.2128i$	0.0746380	0.99156	$-0.7127100 \pm 6.3088i$	0.1122600	1.01050
$-0.011561 \pm 6.1990i$	0.0018650	0.98661	$-0.4099200 \pm 6.0538i$	0.0675590	0.96569
$0.017223 \pm 5.6369i$	-0.0030555	0.89715	$-0.0346880 \pm 5.6309i$	0.0061602	0.89620
$0.015806 \pm 3.8498i$	-0.0041056	0.61272	$0.0112280 \pm 3.8506i$	-0.0029160	0.61285

Tabela 5.12. Estabilidade vs. Combinações – Máquinas com ESP: diversos ξ

ξ	Máqs. com ESP	Condição
	1, 2, 5, 6, 9	Instável
0.80	1, 2, 5, 6, 9	Estável
	2, 3, 5, 6, 9	Estável
0.60	2, 3, 5, 6, 9	Estável
0.40	2, 3, 5, 6, 9	Estável
0.30	2, 3, 5, 6, 9	Estável
0.20	2, 3, 5, 6, 9	Estável
0.27	2, 3, 5, 6, 9	Estável
0.26	2, 3, 5, 6, 9	Estável
0.25	2, 3, 5, 6, 9	Estável
0.24	2, 3, 5, 6, 9	Instável

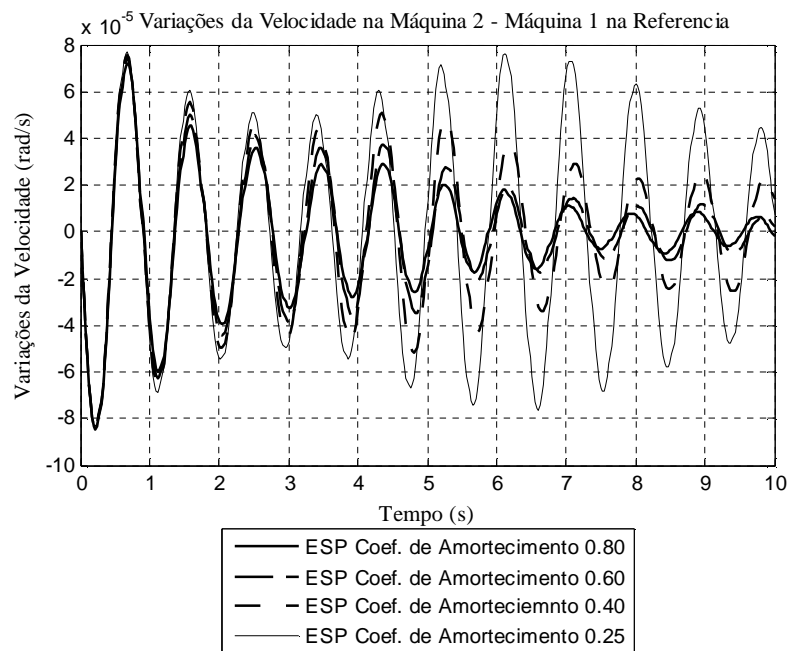


Figura 5.16. Influência diversos ξ para ESP's por Máquina (2, 3, 5, 6, 9)

Na Figura 5.16 são apresentadas as curvas da velocidade angular do gerador 2 em relação ao gerador 1 ($\Delta\omega_2 - \Delta\omega_1$) para uma perturbação em degrau na potência mecânica do gerador 1, para várias especificações de ξ para ESP's localizados nos geradores 2, 3, 5, 6 e 9.

Das curvas mostradas na Figura 5.16. pode-se ver que em todos os casos analisados, a

resposta transitória do sistema New England são caracterizadas por oscilações de amplitude decrescente para os diferentes coeficientes de amortecimento ξ (0.80, 0.60, 0.40 e 0.25) exigidos dos ESP's instalados nas máquinas 2, 3, 5, 6, e 9. Dentro desta faixa de ajuste do coeficiente de amortecimento e com a combinação de ESP's nas máquinas 2, 3, 5, 6 e 9, o sistema se mantém estável. Salienta-se que a faixa de ajuste deste coeficiente de amortecimento ξ fica limitada entre 0.80 a 0.25 (para valores abaixo, o sistema New England se torna instável). Esta particularidade do projeto de Estabilizadores de Potência tem muito a ver com a robustez do ajuste dos dispositivos, o que pode determinar a estabilidade para diversos pontos de operação, para um único conjunto de parâmetros.

5.4. Sistema New England Modificado

5.4.1 Sistema New England Modificado – ESP

Os dados do sistema New England original (caso base), foram alterados para efeitos de estudo. Foi aumentada a potência ativa da carga ligada à barra 10 para 1200 MW e utilizando-se o MSP foi novamente modelado o sistema, sendo calculada a nova matriz de estado para este ponto de operação. Os autovalores foram novamente calculados e os modos oscilatórios de interesse são mostrados na Tabela 5.13, assim como o coeficiente de amortecimento ξ e a frequência natural de oscilação ω_n (em Hz) associados a eles.

Pode-se ver na Tabela 5.13 que para este ponto de operação seis modos oscilatórios possuem parte real positiva, caracterizando a instabilidade do sistema.

Além dos cinco modos oscilatórios locais instáveis (reconhecidos pelas suas frequências típicas), o modo oscilatório interarea também se tornou instável como resultado do aumento da carga na barra 10.

Para tornar o sistema New England estável para esta configuração, é proposta a inclusão de ESP's cujos parâmetros serão ajustados de acordo com os procedimentos apresentados no Capítulo 4.

Para se determinar quais são os melhores geradores para a instalação dos ESP's visando tornar o sistema estável, foram calculados novamente os fatores de participação associados agora aos seis modos instáveis e os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5.17 a 5.22.

Tabela 5.13. Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado

Modo	λ Dominantes	ξ	ω_n
1	$-0.2631400 \pm 8.2038i$	0.03206000	1.30630
2	$-0.2368400 \pm 8.1598i$	0.02901300	1.29920
3	$-0.2220400 \pm 8.0390i$	0.02761000	1.27990
4	$0.1130800 \pm 7.3016i$	-0.01548500	1.16220
5	$0.1908500 \pm 7.0223i$	-0.02716800	1.11800
6	$0.3505900 \pm 6.2675i$	-0.05585000	0.99906
7	$0.3067800 \pm 6.6709i$	-0.04593900	1.06280
8	$0.1405500 \pm 6.6858i$	-0.02101700	1.06430
9	$0.0010749 \pm 3.9094i$	-0.00027496	0.62221

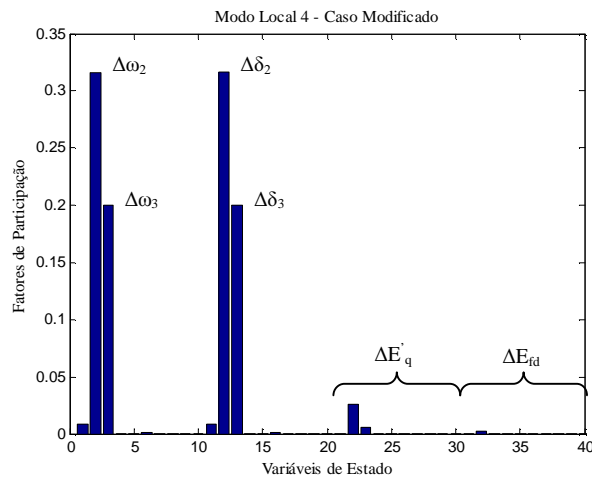


Figura 5.17. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 4

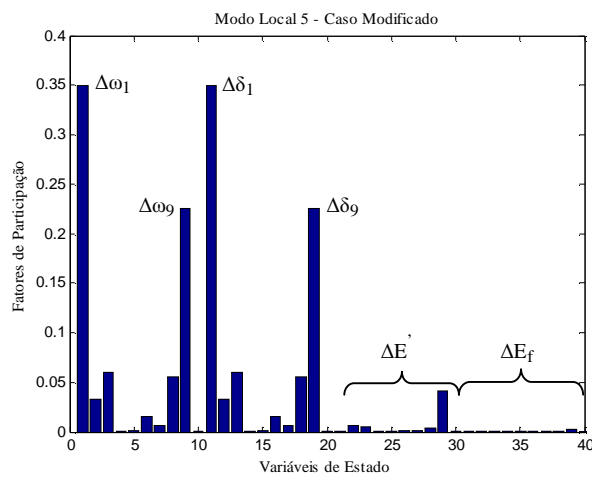


Figura 5.18. Fatores de Participação no Modo Oscilatório 5

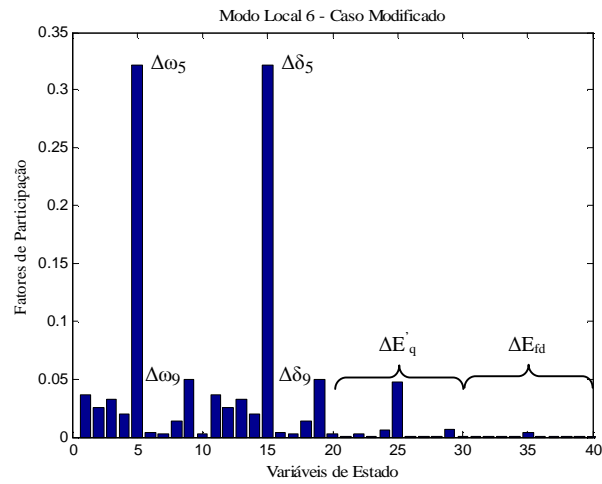


Figura 5.19. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 6

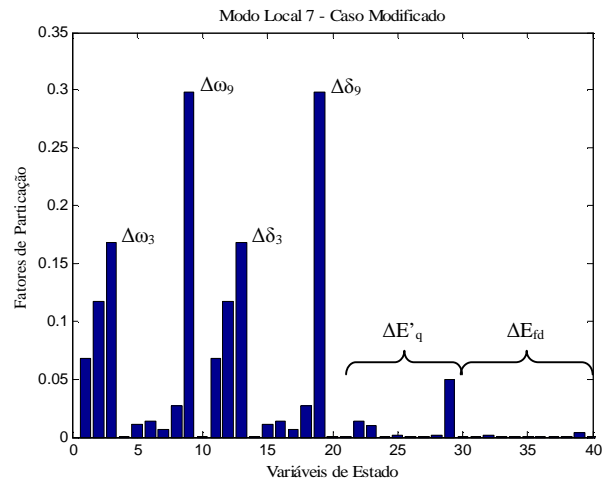


Figura 5.20. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 7

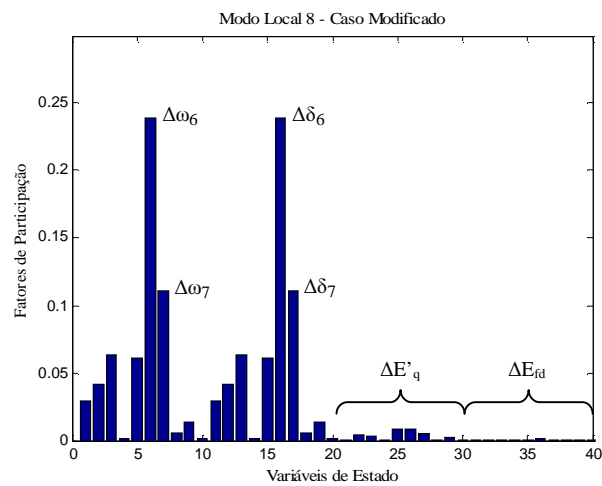


Figura 5.21. Fatores de Participação: Modo Oscilatório 8

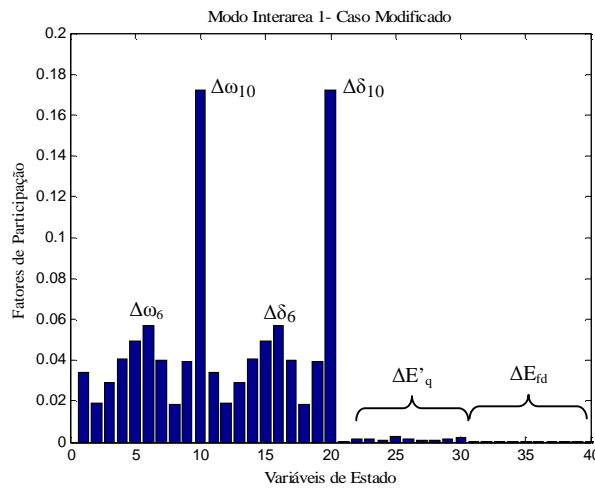


Figura 5.22. Fatores de Participação: Modo Oscilatório Interárea

Na Tabela 5.14 são mostrados os valores numéricos dos fatores de participação com os maiores valores para uma melhor análise.

Tabela 5.14. Fatores de Participação – Sistema New England Modificado

Modo	Máq. / F. de Participação	Máq. / F. de participação
Local 4	2 / 0.31616	3 / 0.20038
Local 5	1 / 0.34938	9 / 0.22495
Local 6	5 / 0.32193	9 / 0.049919
Local 7	3 / 0.16843	3 / 0.29818
Local 8	6 / 0.23932	7 / 0.11065
Interarea 1	10 / 0.17238	6 / 0.056865

Os fatores de participação resultaram maiores para as variáveis $\Delta\omega_1, \Delta\delta_1, \Delta\omega_2, \Delta\delta_2, \Delta\omega_5, \Delta\delta_5, \Delta\omega_6, \Delta\delta_6, \Delta\omega_9$ e $\Delta\delta_9$, o que indica que os geradores 1, 2, 5, 6 e 9 são as melhores localizações para os sinais adicionais estabilizantes em se tratando dos modos locais instáveis. Da Tabela 5.14 observa-se que a máquina 10, com suas variáveis $\Delta\omega_{10}$ e $\Delta\delta_{10}$, está associada ao modo oscilatório interarea, o que era de se esperar já que o aumento de carga ocorreu na barra 10.

Especificando-se os valores T_{ok} e T_{2k} e o coeficiente de amortecimento ξ exigido dos dispositivos ESP's estipulado em 0.8, foram determinados os parâmetros dos ESP's que são

mostrados na Tabela 5.15 para as máquinas com fatores de participação mais altos associados aos modos oscilatórios locais instáveis.

Tabela 5.15. Parâmetros dos ESP's: Coeficiente de Amortecimento $\xi = 0.8$ – Caso Modificado

Máq.	$T_{\omega k}$	T_{1k}	T_{2k}	T_{3k}	T_{4k}	K_{PSSk}
1	1.0000	0.17159	0.0200	0.17159	0.0200	71.9210
2	1.0000	0.17894	0.0200	0.17894	0.0200	13.5960
3	1.0000	0.14343	0.0200	0.14343	0.0200	15.1230
4	1.0000	0.32235	0.0200	0.32235	0.0200	5.7963
6	1.0000	0.23454	0.0200	0.23454	0.0200	8.5073
9	1.0000	0.19193	0.0200	0.19193	0.0200	7.5883

Os ESP's com os parâmetros ajustados de acordo com os valores da Tabela 5.15 foram introduzidos no sistema New England e a aplicação de uma perturbação em degrau de 0.05 p.u. na potência mecânica na máquina 1 (ΔT_{m1}) resultou na variação da velocidade do rotor da máquina 2 como mostrado na Figura 5.23.

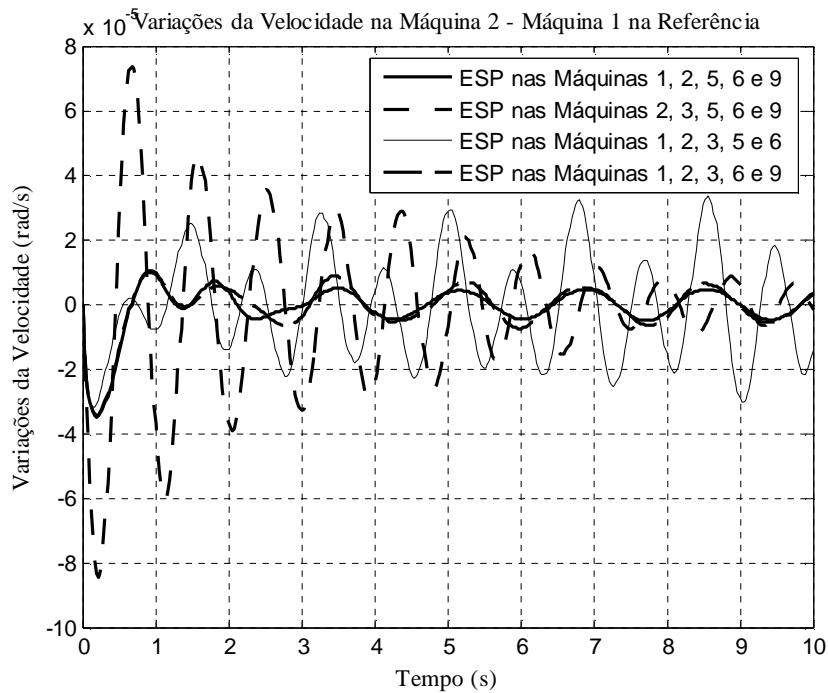


Figura 5.23 Influência dos ESP's $\xi=0.80$ por Máquina no Sistema New England Modificado

Pode-se concluir das curvas mostradas na Figura 5.23 se tornou estável sendo que tanto os cinco modos locais migraram para o semiplano esquerdo do plano complexo, bem como o modo interárea.

Na Tabela 5.16 são mostrados os resultados para diversas combinações de locais de instalação dos ESP's.

Tabela 5.16. Estabilidade vs. Combinações – Máquinas com ESP: $\xi = 0.80$

ξ	Máqs. com ESP	Condição
0.80	1, 2, 5, 6, 9	Estável
	2, 3, 5, 6, 9	Estável
	1, 2, 3, 5, 6	Instável
	1, 2, 3, 6, 9	Estável

Para uma análise no domínio da frequência, nas Tabelas 5.17 e 5.18 são listados os autovalores de interesse para as combinações apresentadas na Tabela 5.16.

Tabela 5.17. Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado com ESP's $\xi = 0.80$

$\xi = 0.80$ ESP nas Máqs. 1, 2, 5, 6, 9			$\xi = 0.80$ ESP nas Máqs. 2, 3, 5, 6, 9		
λ Dominantes	ξ	ω_n	λ Dominantes	ξ	ω_n
$-40.3830000 \pm 46.866i$	0.65276000	9.84600	$-30.331000 \pm 53.892i$	0.490470	9.84230
$-30.3620000 \pm 53.600i$	0.49287000	9.80420	$-34.889000 \pm 42.606i$	0.633560	8.76430
$-31.9230000 \pm 48.858i$	0.54698000	9.28880	$-33.641000 \pm 47.299i$	0.579590	9.23770
$-32.2280000 \pm 47.163i$	0.56420000	9.09130	$-31.829000 \pm 48.539i$	0.548350	9.23800
$-25.7580000 \pm 42.759i$	0.51601000	7.94480	$-31.790000 \pm 46.987i$	0.560370	9.02890
$-0.3777600 \pm 7.9472i$	0.04748100	1.26630	$-0.264700 \pm 8.1743i$	0.032365	1.30170
$-0.5427800 \pm 7.7712i$	0.06967500	1.23980	$-0.341820 \pm 7.9382i$	0.043020	1.26460
$-0.1995100 \pm 6.9705i$	0.02861100	1.10980	$-0.234980 \pm 6.9697i$	0.033695	1.10990
$-1.0423000 \pm 6.0757i$	0.16908000	0.98111	$-0.723590 \pm 6.4830i$	0.110920	1.03820
$-2.0323000 \pm 4.7652i$	0.39230000	0.82449	$-2.199800 \pm 4.9613i$	0.405330	0.86375
$-0.5828300 \pm 5.3183i$	0.10894000	0.85150	$-0.481530 \pm 5.1914i$	0.092358	0.82978
$-1.2643000 \pm 5.0664i$	0.24211000	0.83107	$-0.432340 \pm 4.6275i$	0.093025	0.73969
$-0.3890400 \pm 4.6352i$	0.08363900	0.74030	$-1.039900 \pm 4.9778i$	0.204490	0.80934
$-0.0025907 \pm 3.6881i$	0.00070245	0.58699	$-0.077249 \pm 3.7361i$	0.020672	0.59474

Da análise dos valores mostrados nestas Tabelas pode-se concluir da efetividade da máquina 9 no amortecimento das oscilações do sistema para este ponto de operação (observe que no caso em que a máquina 9 não é equipada com ESP o sistema é instável).

Tabela 5.18. Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado com ESP's

$\xi = 0.80$ ESP nas Máqs. 1, 2, 3, 6, 9			$\xi = 0.80$ ESP nas Máqs. 1, 2, 3, 5, 6		
λ Dominantes	ξ	ω_n	λ Dominantes	ξ	ω_n
$-40.88000 \pm 44.918i$	0.673080	9.66640	$-30.397000 \pm 53.528i$	0.4938000	9.79700
$-26.06500 \pm 42.033i$	0.527000	7.87150	$-38.260000 \pm 42.115i$	0.6724200	9.05580
$-31.85800 \pm 48.908i$	0.545810	9.28970	$-31.975000 \pm 48.457i$	0.5507600	9.23990
$-33.58900 \pm 44.643i$	0.601220	8.89170	$-32.044000 \pm 46.351i$	0.5686600	8.96830
$-31.91600 \pm 47.141i$	0.560630	9.06040	$-28.437000 \pm 41.019i$	0.5697400	7.94380
$-0.29308 \pm 8.1577i$	0.035904	1.29920	$-0.387980 \pm 7.9487i$	0.0487530	1.26660
$-0.56095 \pm 7.7055i$	0.072606	1.22960	$-0.409640 \pm 7.7726i$	0.0526300	1.23880
$-0.36154 \pm 6.7672i$	0.053349	1.07860	$0.134060 \pm 6.8859i$	0.019465	1.09610
$-0.29923 \pm 6.0366i$	0.049509	0.96194	$-1.038800 \pm 6.1425i$	0.1667600	0.99149
$-0.55144 \pm 5.3268i$	0.102970	0.85232	$-2.135300 \pm 4.9744i$	0.3944600	0.86155
$-1.02300 \pm 4.9805i$	0.201200	0.80922	$-2.086800 \pm 4.7818i$	0.3999700	0.83037
$-2.16310 \pm 4.9694i$	0.399110	0.86259	$-1.041100 \pm 4.9803i$	0.2046200	0.80978
$-2.06400 \pm 4.7189i$	0.400740	0.81973	$-0.442410 \pm 4.5863i$	0.0960190	0.73331
$-0.02008 \pm 3.7172i$	0.005402	0.59161	$-0.016244 \pm 3.6914i$	0.0044005	0.58752

Observe também que o modo interárea antes instável, também se torna amortecido pela ação compensadora dos ESP's. Este fato permite concluir que neste caso, cinco dispositivos estabilizantes tornaram estáveis seis modos oscilatórios antes instáveis.

5.4.2. Sistema New England Modificado – TCSC POD

Nesta seção o sistema New England é modificado para a inclusão de um Dispositivo FACTS TCSC equipado com um controlador POD, com o intuito de amortecer oscilações de baixa frequência, tendo como prioridade os modos oscilatórios interárea.

Para a localização do TCSC no sistema elétrico são utilizados os resíduos da função de transferência (deduzidos na seção 4.3.2 – Capítulo 4).

A Figura 5.24 mostra os resíduos de função de transferência para diversos locais de instalação de dispositivo FACTS TCSC equipado com POD. Estes resíduos estão diretamente associados ao modo interárea, cuja instabilidade está relacionada com o aumento do carregamento na barra 10 (modificação do caso base). (veja os autovalores dominantes para o caso modificado na Tabela 5.13, onde existem cinco modos locais e um modo interárea, todos instáveis).

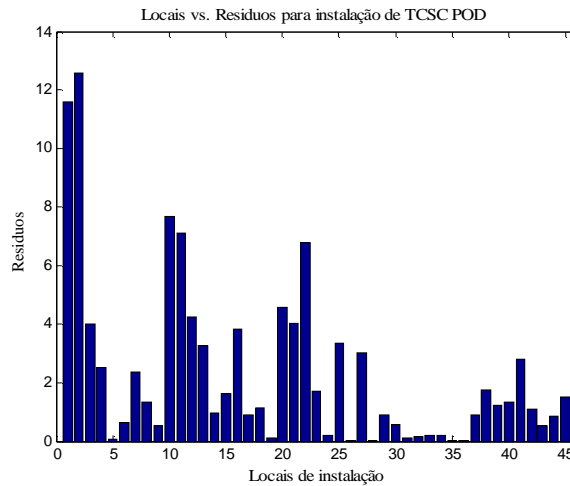


Figura 5.24. Locais vs. Resíduos para instalação do TCSC – POD

Analisando os dados da Figura 5.24 pode-se concluir que a melhor localização do dispositivo TCSC com POD é a linha de transmissão 2, entre as barras 30 e 10 (veja o diagrama unifilar da Figura 5.8). Esta conclusão é coerente pois a linha de transmissão 2 é uma linha de interligação entre as áreas 1 e 2 do sistema New England e o TCSC equipado com POD será instalado com o objetivo de fornecer amortecimento ao modo interárea instável.

Utilizando o método descrito na seção 4.3.3 do Capítulo 4, são ajustados os parâmetros para o controlador POD, mostrados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19. Parâmetros do POD

Linha	K_{POD}	T_{ω}	T_1	T_2	T_3	T_4
10 - 30	0.67708	1.0000	0.088712	0.73059	0.088712	0.73059

Através das equações 4.29 – Capítulo 4, o dispositivo FACTS TCSC equipado com o controlador POD é incluído no sistema New England modificado e são calculados os autovalores da matriz de estado para esta configuração.

Os autovalores de interesse (modos oscilatórios) são mostrados na Tabela 5.20, assim como o coeficiente de amortecimento ξ e a frequência natural não amortecida ω_n (em Hz) a eles associados.

Tabela 5.20. Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado com TCSC – POD

Modo	λ Dominantes	ξ	ω_n
1	$-0.26756 \pm 8.2047i$	0.032593	1.30650
2	$-0.23746 \pm 8.1555i$	0.029104	1.29850
3	$-0.22188 \pm 8.0386i$	0.027592	1.27990
4	$0.11241 \pm 7.3024i$	-0.015392	1.16230
5	$0.32369 \pm 6.2605i$	-0.051635	0.99772
6	$0.17975 \pm 6.9362i$	-0.025906	1.10430
7	$0.12837 \pm 6.6989i$	-0.019159	1.06640
8	$0.26942 \pm 6.7036i$	-0.040158	1.06780
9	$-2.38590 \pm 4.1634i$	0.497210	0.76371
10	$-0.58221 \pm 3.1597i$	0.181210	0.51135

Analisando os autovalores mostrados na Tabela 5.20 conclui-se que o modo interárea, antes instável, tornou-se estável com a instalação do TCSC equipado com POD (modo 10 – Tabela 5.20). Restam ainda cinco modos locais instáveis (modos 4, 5, 6, 7 e 8, - Tabela 5.20) que devem ser amortecidos para o sistema New England se tornar estável para este ponto de operação.

Para estabilizar os modos locais instáveis restantes serão utilizados dispositivos ESP's e os locais de instalação são determinados pelos fatores de participação, calculados para esta nova configuração do sistema New England, cujos resultados são mostrados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21. Fatores de Participação: Sistema New England Modificado com TCSC – POD

Modo	Máq. / F. de Participação	Máq. / F. de Participação
Local 4	2 / 0.31334	3 / 0.19898
Local 5	5 / 0.33413	9 / 0.04610
Local 6	1 / 0.42025	9 / 0.40210
Local 7	6 / 0.28500	7 / 0.13029
Local 8	3 / 0.25580	9 / 0.39419

Por ordem de influência das máquinas nos modos oscilatórios locais, os ESP's devem ser instalados prioritariamente na máquina 9 ($\Delta\omega_9 = 0.40210, 0.39419, 0.04610$ – associada a três modos), seguido pelas máquinas 5 ($\Delta\omega_5 = 0.33413$ – associada a um modo), 2 ($\Delta\omega_2 = 0.31334$ – associada a um modo), 6 ($\Delta\omega_6 = 0.28500$ – associada a um modo) e 7 ($\Delta\omega_7 = 0.13029$ – associada a um modo). A particularidade para a máquina 9 estar influenciando três modos oscilatórios mostra sua importância para o amortecimento das oscilações instáveis do sistema New England.

Escolhendo como locais de instalação dos ESP's as máquinas 3, 5 e 9 e especificando-se os valores $T_{\omega k}$ e T_{2k} e o coeficiente de amortecimento ξ associado aos dispositivos ESP's ajustado em 0.8, foram calculados os demais parâmetros dos controladores, cujos resultados são mostrados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22. Parâmetros ESP – Coeficiente de Amortecimento Especificado $\xi = 0.8$ Caso Modificado

Máq.	$T_{\omega k}$	T_{1k}	T_{2k}	T_{3k}	T_{4k}	K_{PSSk}
2	1.0000	0.17894	0.0200	0.17894	0.0200	13.5960
5	1.0000	0.32235	0.0200	0.32235	0.0200	5.7963
9	1.0000	0.19193	0.0200	0.19193	0.0200	7.5883

Tabela 5.23. Autovalores Dominantes: Sistema New England Modificado com TCSC – POD e ESP's

λ Dominantes	ξ	ω_n
$-30.405000 \pm 53.981i$	0.4907600	9.86040
$-33.575000 \pm 47.547i$	0.5768300	9.26390
$-32.166000 \pm 46.832i$	0.5661500	9.04230
$-0.268150 \pm 8.1726i$	0.0327940	1.30140
$-0.246630 \pm 8.0889i$	0.0304760	1.28800
$-0.354190 \pm 7.8263i$	0.0452090	1.24690
$-0.073632 \pm 6.8902i$	0.0106860	1.09670
$-0.018402 \pm 6.6965i$	0.0027479	1.06580
$-0.336370 \pm 5.5623i$	0.0603630	0.88689
$-1.314500 \pm 5.2149i$	0.2444200	0.85595
$-0.376520 \pm 4.6303i$	0.0810490	0.73936
$-2.388400 \pm 4.1225i$	0.5013100	0.75828
$-0.551110 \pm 3.1034i$	0.1748500	0.50165

Com um dispositivo FACTS TCSC equipado com POD instalado na linha de transmissão 2 (entre as barras 10 e 30) e três ESP's instalados nas máquinas 2, 5 e 9, o sistema New England Modificado possui característica estável, como mostram os autovalores dominantes calculados para esta configuração (ver Tabela 5.23).

Na Figura 5.25 é mostrada as variações da velocidade angular do gerador 2, para um distúrbio em degrau de 0.05 pu no torque mecânico do gerador 1 e pode-se notar que as oscilações são amortecidas, indicando a introdução de torque de amortecimento positivo no sistema New England pelos dispositivos estabilizadores a ele acoplado.

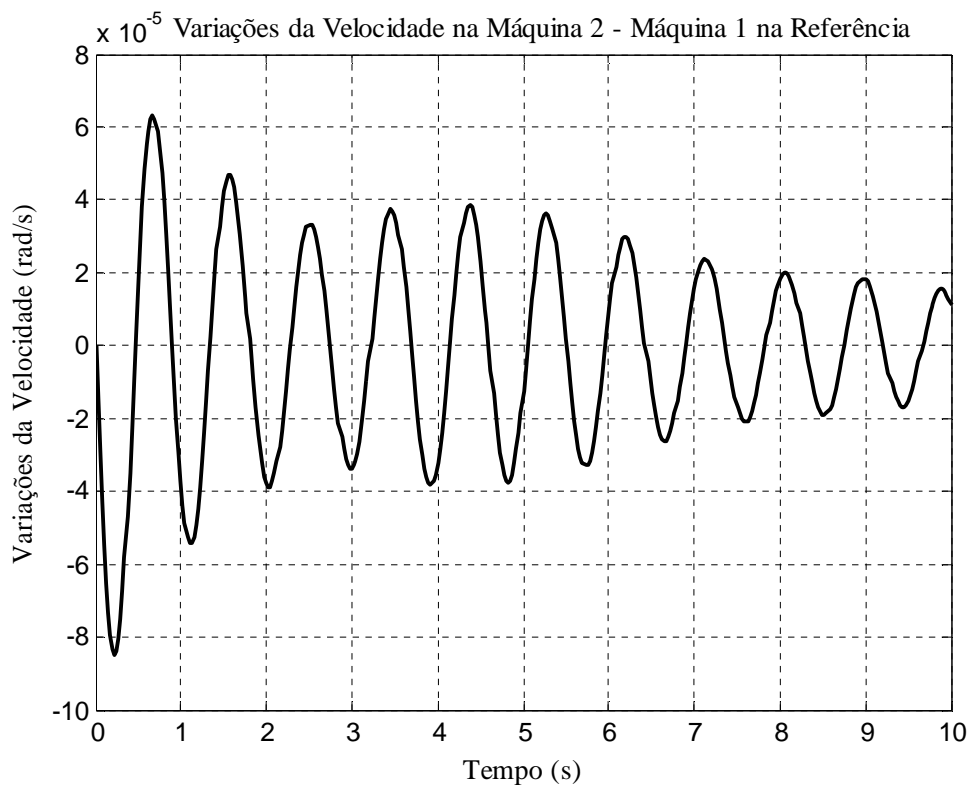


Figura 5.25. Variações da Velocidade na Máquina 2 – Sistema New England Modificado: TCSC POD e ESP's

Deve ser ressaltado que para o sistema New England equipado com um dispositivo FACTS TCSC equipado com POD, foram necessários apenas três ESP's para amortecer os cinco modos locais antes instáveis.

5.5. Conclusões

Neste Capítulo foram apresentados simulações e resultados obtidos em dois sistemas de potência teste (Sul Brasileiro Reduzido e New England), enfatizando o estudo da estabilidade às pequenas perturbações.

Ambos os sistemas foram modelados através do Modelo de Sensibilidade de Potência (deduzido no Capítulo 2) e a questão da estabilidade às pequenas perturbações foi analisada no domínio da frequência (autovalores) e no domínio do tempo (curvas de respostas de grandezas do sistema).

Nos dois sistemas de potência teste o caso base resultou instável e a instabilidade era causada por modos locais de oscilação. Para tornar os sistemas estáveis optou-se pela inclusão de dispositivos ESP's acoplado a determinados geradores.

A localização (pelo método dos Fatores de Participação – mostrado no Capítulo 4) e o ajuste dos parâmetros destes dispositivos (pelo método da Compensação de Fase – também mostrada no Capítulo 4) foram realizados.

Após a inclusão destes ESP's nos sistemas de potência testes, estes se tornaram estáveis.

Na seqüência o ponto de operação base do sistema New England foi alterado, resultando para esta nova condição a existência de modos locais e interárea instáveis.

A inclusão de cinco ESP's tornou este novo ponto de operação estável.

Incluiu-se então um dispositivo FACTS TCSC acoplado com um controlador POD ao sistema New England (equacionamento mostrado no Capítulo 3), cuja localização foi determinada pelos Resíduos da Função de Transferência (dedução mostrada no Capítulo 4) e em seguida foi realizado o ajuste dos parâmetros do POD (o método utilizado para ajuste foi deduzido no Capítulo 4).

Ao se incluir o TCSC equipado com POD no sistema New England observou-se que o modo instável interárea havia se estabilizado, restando os cinco modos locais ainda instáveis.

A utilização de três dispositivos ESP's permitiu estabilizar os modos instáveis restantes, indicando que o controlador POD também agiu sobre os modos locais de oscilação.

Deve-se salientar que o ajuste dos parâmetros dos ESP's são realizados individualmente, de forma isolada, especificando-se um coeficiente de amortecimento ξ

desejado. Apenas depois é que são colocados todos ao mesmo tempo no para atuação no sistema elétrico de potência. Como na atuação conjunta dos ESP's um interfere no outro, isto explica o porquê de não se obter no sistema global exatamente o coeficiente de amortecimento estipulado.

Capítulo 6

Conclusões Gerais e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentado o Modelo de Sensibilidade de Potência para sistemas multimáquinas, baseado no balanço de potência em qualquer barra do sistema, em qualquer instante. O modelo foi deduzido considerando-se a resistência das linhas de transmissão com e sem a atuação do compensador FACTS TCSC.

Este modelo é linear e tem se apresentado como uma alternativa ao modelo de Heffron & Phillips no estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência.

No caso dos geradores síncronos, os coeficientes $A1_{Gk}$, $A2_{Gk}$, $A3_{Gk}$, $R1_{Gk}$, $R2_{Gk}$ e $R3_{Gk}$ não diferem analiticamente para sistemas multimáquinas sem e com atuação do TCSC.

No caso das linhas de transmissão, os coeficientes $A1_{km}$, $A2_{km}$, $A3_{km}$, $R1_{km}$, $R2_{km}$ e $R3_{km}$, diferem analiticamente quando calculados para sistema sem e com atuação do TCSC.

Também são introduzidos mais dois coeficientes de sensibilidade de potência que relacionam diretamente a inclusão do TCSC no sistema multimáquinas: A_{xkm} e R_{xkm} .

Os coeficientes de sensibilidade de potência (tanto dos geradores como das linhas de transmissão e TCSC) dependem do ponto de operação considerado e relacionam as variações de potências ativa e reativa geradas com os fluxos de potência nas linhas de transmissão.

No final o sistema de potência multimáquinas, descrito pelo Modelo de Sensibilidade de Potência, fica representado através de variáveis de estado (de maneira geral, variáveis relacionadas com as grandezas dos reguladores e seus controladores), e por variáveis algébricas (as diversas tensões das barras do sistema elétrico).

A preservação das variáveis algébricas para todas as barras do sistema elétrico ($\Delta\theta_k$, ΔV_k), que é uma característica essencial do Modelo de Sensibilidade de Potência, permanece com a consideração do Compensador Série. Isto implica na preservação do sistema de transmissão externo no modelo.

Outras duas características do MSP sem FACTS são a subdivisão entre potências ativa e reativa (subsistemas ativo/reactivo) e a divisão na escala de tempo (subsistemas rápido/lento, em função das variáveis de estado e das variáveis algébricas). Estas duas características também permanecem no modelo quando da inclusão do TCSC.

Para amortecer as oscilações eletromecânicas de baixa frequência foram utilizados sinais suplementares para compensação de fase em razão do atraso de fase introduzido pela função de transferência de malha aberta de controle da tensão e para o deslocamento dos autovalores instáveis ou pouco amortecidos para o semiplano esquerdo do plano complexo.

Estes sinais suplementares provem de controladores ESP e POD, sendo este último o controle suplementar do dispositivo FACTS TCSC. O controlador de primeira ordem do TCSC foi melhorado através do controlador POD.

Ambos os controladores ESP e POD possuem estruturas dinâmicas similares, para atingir a compensação de fase e deslocamento de autovalores, respectivamente.

No projeto do controlador ESP foi utilizada como sinal de entrada “as variações da velocidade angular do rotor da máquina síncrona”. No caso do controlador POD foi utilizado um sinal de entrada medido localmente, para manter a flexibilidade do TCSC e neste trabalho foi utilizado as “variações do fluxo de potência ativa” da linha de transmissão onde está conectado o TCSC.

Usou-se a representação geral através do MSP, e avaliou-se a estabilidade

determinando-se os modos oscilatórios locais e os modos oscilatórios interárea, reconhecidos pela faixa de frequência natural não amortecida que apresentavam.

A partir da dedução do modelo foram realizadas representações do sistema elétrico no domínio do tempo e no domínio da frequência. Com isto foi possível realizar simulações e obter resultados que foram analisados.

Para efeitos de simulação foram utilizados os sistemas elétricos de potência “Sul Brasileiro Reduzido” e o “New England” (Caso Base e Caso Modificado)

Sem os ESP's o sistema Sul Brasileiro Reduzido e o sistema New England apresentavam modos com amortecimentos negativos (instáveis).

Os estabilizadores com os ajustes propostos conseguem amortecer os modos oscilatórios produzidos por pequenas perturbações no cenário estudado.

A determinação dos parâmetros de ajuste (constantes de tempo) para ambos os controladores têm procedimentos diferentes, mas atingem o mesmo objetivo de compensação de fase.

Foram tratadas duas formas para a localização dos controladores no sistema elétrico de potência baseados na participação das variáveis de estado e sua influência para amortecer os modos oscilatórios. No caso dos controladores ESP's atingiu-se principalmente os modos locais, sem deixar de fornecer amortecimento para modo interárea também.

Para o caso do TCSC equipado com POD atingiu-se prioritariamente o modo interárea. Foi observado que o TCSC equipado com POD pode até reduzir o número de controladores ESP's para os casos estudados.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser consideradas a avaliação de outros dispositivos FACTS atuando no sistema elétrico, assim como técnicas de controle robusto e/ou adaptativo para o ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e POD. Também o ajuste coordenado (conjunto) dos parâmetros dos diversos controladores presentes deve ser averiguado.

Outro assunto de interesse é a avaliação do desempenho dos controladores ESP e POD, que são ajustados para pequenas perturbações, quando da ocorrência de grandes distúrbios no sistema elétrico de potência.

Referências

ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. **Power systems control and stability**. 2th ed. New York: John Wiley & Sons, 2003. 658 p.

ARAUJO, P. B.; ZANETTA Jr., L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. **Electrical Power and Energy System**, New York, v. 23, n. 3, p. 173 – 178, 2001. Disponível em:

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2T-4240861-2&_user=972052&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000049647&_version=1&_urlVersion=0&_userid=972052&_md5=2c3ab1ac3ac5c8e9c424fe29f602e183 >.

Acessado em: 07 dez. 2007.

CAI, L. J.; ERLICH, I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS controller for damping power system oscillations in multi-machine systems. In: IEEE BOLOGNA POWER TECH CONFERENCE PROCEEDINGS, 2003, Bologna. **Proceedings...** Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003. v. 2, p. 136-141. Disponível em:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=28979&isYear=2003> > Acessado em:

07 dez. 2006.

COLMAN, R. L.; ARAUJO, P. B. Análise da influência do compensador série controlado a tiristor no sistema elétrico de potência, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 15, 2004, Gramado. **Anais...** Juiz de Fora: Sociedade Brasileira de Automática, 2004. 1 CD/ROM.

CORONADO, I.; ZÚÑIGA P.; RAMÍREZ, J. M. FACTS: soluciones modernas para la industria eléctrica. **Avance y Perspectiva del CINVESTAV**, México, v. 20, p. 235 – 241, 2001. Disponível em: <<http://www.cinvestav.mx/Difusi%C3%B3n/Revistas/AvanceyPerspectiva/Julago01.aspx>> . Acessado em 07 dez. 2006.

DECKMANN, S. M.; DA COSTA, V. F. A. Power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 9, n. 2, p. 965 – 971, 1994. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel1/59/7654/00317649.pdf?tp=&arnumber=317649&isnumber=7654>>. Acessado em: 07 dez. 2006

DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. 88, n. 4, p. 316–329, 1969. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10669/4073827/04073838.pdf?=&arnumber=4073838&isnumber=4073827>>. Acessado em 07 de dez. 2006

FEBRES, C. A. T.; SILVA, M. S.; ARAUJO, P. B. Avaliação dos dispositivos FACTS na estabilidade a pequenas perturbações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – CBEE, 2, 2007, Vitória. **Anais...** Vitória: Associação Brasileira de Eficiência Energética, Universidade Federal de Espírito Santo, Grupo de Eficiência Energética/UFES, 2007. 1 CD/ ROM.

FEBRES, C. A. T.; ARAUJO, P. B.; FURINI, M. A. Amortecimento de oscilações de baixa frequência por controle suplementar de estabilizadores de sistemas de potência. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND APPLICATIONS -

DINCON, 7, 2008, Presidente Prudente. **Proceedings...** Presidente Prudente: [s.n.], 2008. 1 CD/ROM.

FURINI, M.A.; ARAUJO, P. B. Amortecimento de oscilações eletromecânicas utilizando dispositivos TCSC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS DE ENERGIA, 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: [s.n.], 2008. 1 CD ROM.

GUIMARÃES, C. H. C. et al. Projeto de estabilizadores de sistemas de potência por posicionamento parcial de pólos complexos conjugados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 13, 2000, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Automática, 2000. 1 CD ROM.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS concepts and technology of flexible altern current transmission systems**. New York: IEEE Press – Jonh Wiley & Sons, 2000. 452 p.

HSU, Y. Y.; CHEN, L. C. Identification of optimum location for stabilizer applications using participation factor. **IEE Proceedings – C Generation, Transmission and Distribution** , Londres, v. 134, n. 3, p. 238 – 244, 1987.

KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 19, n. 3, p. 1387 – 1401, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/59/29221/01318675.pdf?tp=&arnumber=1318675&isnumber=29221>> . Acessado em 07 de dez. 2006.

KUIAVA, R. **Controle robusto de dispositivos FACTS para o amortecimento de oscilações em sistemas elétricos de potência**. 2007. 148 f. Dissertação (Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

- KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw Hill, 1994, 1176 p.
- LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers – part I: general concepts; **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. 100, n. 6, p. 3017 – 3024, USA. 1981. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10669/4110925/04110969.pdf?tp=&arnumber=4110969&isnumber=4110925>>. Acessado em: 07 dez 2006.
- LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers – part II: performance objectives and tuning concepts. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. 100, n. 6, p. 3025 – 3033, 1981. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10669/4110925/04110970.pdf?tp=&arnumber=4110970&isnumber=4110925>>. Acesso em 07 dez 2006.
- LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers – part III: practical considerations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. 100, n. 6, p. 3034 – 3046, 1981. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10669/4110925/04110971.pdf?tp=&arnumber=4110971&isnumber=4110925>>. Acessado em: 07 dez. 2006
- MARTINS, N. Efficient eigenvalue and frequency response methods applied to power system small-signal stability studies, **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 1, n. 1, p. 217 – 224, 1986. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/59/4334831/04334874.pdf?tp=&arnumber=4334874&isnumber=4334831>>. Acessado em: 07 dez. 2007.
- MARTINS, N. et al. Utility Experience on Power System Oscillations, Summary of Utility Experience. In: KUNDUR, P. (Org.). **IEEE Publication No. 95 TP 101 on Inter-Area Oscillations In Power Systems**. Piscataway: IEEE Power Engineering Society, 1994. p. 43-44.

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. 1455 - 1469, 1990. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel1/59/3139/00099400.pdf?tp=&arnumber=99400&isnumber=3139>>. Acessado em: 07 dez. 2007.

MARTINS, N. et al. **Retuning stabilizers for the north-south Brazilian interconnection. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999, Edmonton. Proceedings... Piscataway: The Institute Electrical and Electronics Engineers, 1999.** v. 1. p. 58 – 67. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6361/17001/00784325.pdf?tp=&arnumber=784325&isnumber=17001>>. Acessado em: 07 dez. 2007.

MARTINS, N.; PINTO, H. J. C. P.; PASERBA, J. J. Using a TCSC for line power scheduling and system oscillation damping – small signal and transient stability studies. In: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Seattle. **Piscataway: The Institute Electrical and Electronics Engineers, 2000.** v. 2, p. 1455 – 1461. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6841/18393/00850193.pdf?tp=&arnumber=850193&isnumber=18393>>. Acessado em: 07 dez. 2007.

MINUSSI C. R. **Controle de segurança dinâmica em sistemas de energia elétrica.** 1990. 165 f. Tese (Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

MOUSSA, H. A. M.; YU, Y. Dynamic interaction of multimachine power system and excitation control. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. 93, n. 4, p. 1150 – 1158, 1974. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10669/4075450/04075471.pdf?tp=&arnumber=4075471&isnumber=4075450>>. Acessado em: 07 dez. 2006.

NASSIF, A. B. et al. Comparação do PSS, SVC e STATCOM no amortecimento de oscilações de modo local em sistemas de potência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA- CBA, 15, 2004, Gramado. **Anais...** Gramado: Sociedade Brasileira de Automática, 2004. 1 CD/ROM.

PAI, M. A., GUPTA, D. P. S., PADIYAR, K. R. **Small signal analysis of power system.** San Rafael: Morgan & Claypool, 2004. 316 p.

ROGERS, G. J. **Power system oscillations.** New York: Springer Verlag, 1999. 344 p.

ROUCO, L. PAGOLA, F. L. On the sign of feedback applied by power system damping controllers. In: IEEE POWER TECH CONFERENCE, 2001, Porto. **Proceedings...** [S.l]: IEE, 2001. p. 1 – 7 . Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7632/20828/00964756.pdf?tp=&arnumber=964756&isnumber=20828>> Acessado em: 07 dez. 2007.

STAGG, G. W.; EL-ABIAD, A. H. **Computer methods in power system analysis.** New York: McGraw-Hill, 1968. 427 p.

SONG, Y. H.; JONHS, A. T. **Flexible altern current trasmission systems FACTS.** London: The Institution of Electrical Engineers, 1999. 592 p.

WANG, H. F.; SWIFT, F. J. Capability of the static VAr compensator in damping power system oscillations. **IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution,** Londres, v. 143, n. 4, 353 – 358, 1996. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel1/2195/11290/00533148.pdf?arnumber=533148>> Acessado em: 07 dez. 2006.

WANG, H. F.; SWIFT, F. J. A unified model for the analisys of FACTS devices in damping power oscillations. part I: single-machine infinite-bus power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery,** New York, v. 12, n. 2, p. 941 – 946. 1997. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel3/61/12635/00584417.pdf?tp=&arnumber=584417&isnumber=12635>> Acessado em: 07 dez. 2006.

WANG, H. F.; SWIFT, F. J. FACTS-based stabilizer designed by the phase compensation method. Part I. single – machine infinite – bus power system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT - APSCOM-97, 4, Hong Kong, 1997. **Proceedings...** Hong Kong: Institution of Electrical Engineers, 1997. p. 638 – 643. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel4/5865/15622/00724923.pdf?isnumber=15622&prod=&arnumber=724923&arSt=638&ared=649+vol.2&arAuthor=Wang%2C+H.F.%3B+Li%2C+M.%3B+Swift%2C+F.J.>> Acessado em: 07 dez. 2006.

WANG, H. F.; SWIFT, F. J. FACTS-based stabilizer designed by the phase compensation method. Part II. multi-machine power systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT - APSCOM-97, 4, Hong Kong, 1997. **Proceedings...** Hong Kong: Institution of Electrical Engineers, 1997. 634 – 649. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel4/5865/15622/00724924.pdf?isnumber=15622&prod=&arnumber=724924&arSt=644&ared=649&arAuthor=Wang%2C+H.F.%3B+Swift%2C+F.J.>>. Acessado em: 07 dez. 2006.

WANG, H. F. and SWIFT, F. J. A Unified model for the analysis of FACTS devices in damping power oscillations. Part II: multi-machine power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 13, n. 4, p. 1355 – 1362, 1998. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel4/61/15502/00714508.pdf?p=&arnumber=714508&isnumber=15502>>. Acessado em: 07 dez. 2006.

WANG, H. F. Interaction analysis and co-ordination of SVC voltage and damping control. In: PROCEEDINGS INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND POWER TECHNOLOGIES, 2000, London. **Proceedings...** London: City University, 2000. p. 361-365. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/6909/18580/00855691.pdf?tp=&arnumber=855691&isnumber=18580>>. Acessado em: 07 dez. 2006.

WATANABE, E. H. et al. Tecnologia FACTS – Tutorial. **Controle & Automação**, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39 – 55, 1998. Disponível em: <http://www.fee.unicamp.br/revista/sba/Welcome.html>>. Acessado em: 07 dez. 2006.

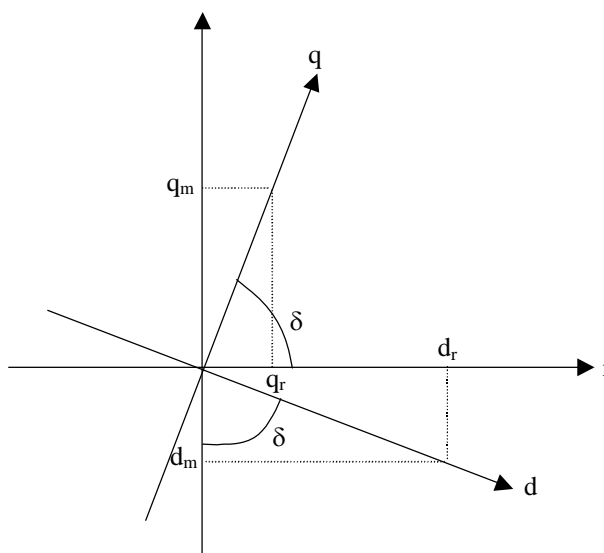
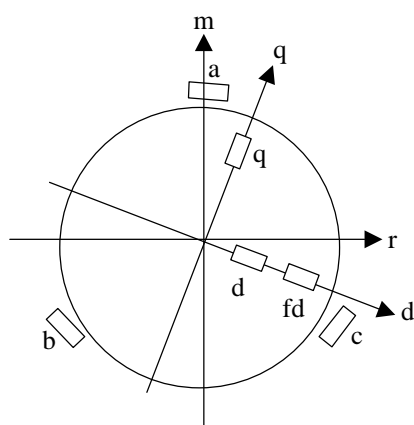
YANG, N.; LIU, Q.; MCCALLEY, J. D. TCSC controller design for damping interarea oscillation. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 13, n. 4. p. 1304 – 1310, 1998. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/iel4/59/15860/00736269.pdf?tp=&arnumber=736269&isnumber=15860>> Acessado em: 07 dez. 2006.

YU, Y. N. **Electric power system dynamics**. New York: Academic Press, 1983. 255 p.

ZIMMERMAN, R.; MURILLO – SANCHEZ, C. E.; GAN, D. **Matpower**: a matlab power system simulation package. (s.l.: s.n.), 2007. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/matpower.html>>. Acessado em: 07 dez. 2006.

Apêndice I

Transformação de Coordenadas



$$r = d_r + q_r$$

$$m = -d_m + q_m$$

$$\cos \delta = \frac{q_r}{q} \rightarrow q_r = q \cos \delta \quad \text{sen } \delta = \frac{q_m}{q} \rightarrow q_m = q \text{ sen } \delta$$

$$\cos \delta = \frac{d_m}{d} \rightarrow d_m = d \cos \delta \quad \text{sen } \delta = \frac{d_r}{d} \rightarrow d_r = d \text{ sen } \delta$$

Logo:

$$r = d \text{ sen } \delta + q \cos \delta$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \text{sen } \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix}$$

$$m = -d \cos \delta + q \text{ sen } \delta$$

De maneira inversa: $\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \text{sen } \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix}$

Apêndice II

Dados: Sistema Sul Brasileiro Reduzido

Tabela II.1. Dados de Linhas

Barra Origem	Barra Destino	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância Shunt (p.u.)
11	12	0.0007	0.0145	1.5672
11	12	0.0007	0.0145	1.5672
11	25	0.0018	0.0227	2.1230
11	33	0.0014	0.0204	2.2869
12	42	0.0000	0.0063	0.0000
1	29	0.0000	0.0135	0.0000
13	14	0.0386	0.1985	0.3425
13	35	0.0096	0.0491	0.0861
13	45	0.0033	0.0167	0.3019
14	15	0.0463	0.3378	0.3917
14	15	0.0463	0.3378	0.3917
14	37	0.0177	0.0910	0.1510
14	37	0.0177	0.0910	0.1510

Tabela II.1. Dados de Linhas – Continuação

Barra Origem	Barra Destino	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância Shunt (p.u.)
14	37	0.0177	0.0910	0.1510
2	15	0.0000	0.0460	0.0000
15	16	0.0163	0.0835	0.1411
15	16	0.0163	0.0835	0.1411
15	39	0.0250	0.1648	0.4581
16	17	0.0163	0.0835	0.1445
16	18	0.0316	0.1621	0.2746
17	18	0.0153	0.0861	0.1328
3	18	0.0000	0.0114	0.0000
18	19	0.0306	0.1523	0.2620
18	44	0.0344	0.1760	0.3061
18	44	0.0344	0.1760	0.3061
19	20	0.0245	0.1256	0.1981
19	25	0.0000	0.0300	0.0000
20	21	0.0088	0.0415	0.5009
21	22	0.0182	0.0935	0.1602
21	22	0.0182	0.0935	0.1602
21	26	0.0000	0.0062	0.0000
22	23	0.0154	0.0776	0.1386
22	23	0.0154	0.0776	0.1386
23	24	0.0216	0.1105	0.1872
23	24	0.0216	0.1105	0.1872
23	28	0.0000	0.0062	0.0000
24	35	0.0180	0.0920	0.1556
24	35	0.0180	0.0920	0.1556
4	25	0.0000	0.0067	0.0000
25	26	0.0019	0.0280	3.1526
25	27	0.0019	0.0274	3.0741
25	29	0.0014	0.0195	2.2505
25	36	0.0005	0.0070	0.7857

Tabela II.1. Dados de Linhas – Continuação

Barra Origem	Barra Destino	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância Shunt (p.u.)
26	27	0.0005	0.0069	0.7728
26	28	0.0012	0.0175	2.0160
29	30	0.0021	0.0300	3.5289
30	38	0.0000	0.0062	0.0000
31	32	0.0022	0.0300	3.6137
31	40	0.0000	0.0062	0.0000
32	33	0.0014	0.0195	2.2441
5	33	0.0000	0.0114	0.0000
33	36	0.0005	0.0070	0.7856
6	34	0.0000	0.0871	0.0000
34	35	0.0000	0.0590	0.0000
7	35	0.0000	0.0701	0.0000
8	35	0.0000	0.0450	0.0000
35	45	0.0129	0.0657	0.1155
10	36	0.0000	0.0068	0.0000
37	38	0.0021	0.0107	0.0208
37	38	0.0021	0.0107	0.0208
37	38	0.0021	0.0107	0.0208
37	40	0.0184	0.0949	0.0000
37	40	0.0184	0.0949	0.0000
37	40	0.0184	0.0949	0.0000
9	39	0.0000	0.0236	0.0000
39	40	0.0202	0.1129	0.1993
41	42	0.0106	0.0596	0.0951
41	42	0.0106	0.0596	0.0951
41	43	0.0110	0.1184	0.2081
41	44	0.0229	0.1174	0.2087
42	43	0.0172	0.0884	0.1446
42	43	0.0172	0.0884	0.1446
43	44	0.0181	0.0929	0.1671

Tabela II.2. Dados de Barras

Barra	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	(MW) Injetados	(MVar) Injetados	Tensão (p.u.)
1	-	-	650	53.49	1.000∟-7.349°
2	-	-	215	50.30	1.000∟-14.912°
3	-	-	895	134.66	1.000∟2.921°
4	-	-	1541	43.67	1.000∟0.000°
5	-	-	1325	55.68	1.000∟7.264°
6	-	-	90	44.12	1.000∟-26.256°
7	-	-	120	51.29	1.000∟-24.662°
8	-	-	241	85.31	1.000∟-23.215°
9	-	-	460	134.08	1.000∟-15.654°
10	-	-	1100	-20.01	1.000∟2.823°
11	-	-	-	-	0.995∟-7.332°
12	-	-	-	-	0.984∟-9.926°
13	177	68	-	-	0.933∟-34.520°
14	191	42	-	-	0.974∟-36.122°
15	171	18.50	-	-	0.982∟-20.693°
16	126	47	-	-	0.961∟-17.242°
17	46	14.70	-	-	0.964∟-11.307°
18	281	56.50	-	-	0.990∟-2.995°
19	279	60.70	-	-	0.980∟-11.618°
20	130	29.40	-	-	0.965∟-22.223°
21	427	-25.00	-	-	0.975∟-22.437°
22	310	141	-	-	0.917∟-29.474°
23	424	90.60	-	-	0.949∟-28.121°
24	117	53.10	-	-	0.947∟-30.746°
25	-	-	-	-	1.002∟-5.913°
26	-	-	-	-	0.979∟-19.925°
27	368	59	-	-	0.985∟-18.302°
28	-	-	-	-	0.958∟-25.920°
29	174	-8.00	-	-	0.997∟-12.400°
30	-	-	-	-	0.982∟-31.021°

Apêndice III

Dados: Sistema New England

Tabela III.1. Dados de Linhas

Barra Origem	Barra Destino	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância Shunt (p.u.)
30	31	0.0035	0.0411	0.6987
30	10	0.0010	0.0250	0.7500
31	32	0.0013	0.0151	0.2572
31	25	0.0070	0.0086	0.1406
32	33	0.0013	0.0213	0.2214
32	18	0.0011	0.0133	0.2138
33	34	0.0008	0.0128	0.1342
33	14	0.0008	0.0129	0.1382
34	35	0.0002	0.0026	0.0434
34	37	0.0008	0.0112	0.1476
35	36	0.0006	0.0092	0.1130
35	11	0.0007	0.0082	0.1389
36	37	0.0004	0.0046	0.0780

Tabela III.1. Dados de Linhas – Continuação

Barra Origem	Barra Destino	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância Shunt (p.u.)
37	38	0.0023	0.0363	0.3804
38	10	0.0010	0.025	1.2000
39	11	0.0004	0.0043	0.0729
39	13	0.0004	0.0043	0.0729
13	14	0.0009	0.0101	0.1723
14	15	0.0018	0.0217	0.3660
15	16	0.0009	0.0094	0.1710
16	17	0.0007	0.0089	0.1342
16	19	0.0016	0.0195	0.3040
16	21	0.0008	0.0135	0.2548
16	24	0.0003	0.0059	0.0680
17	18	0.0007	0.0082	0.1319
17	27	0.0013	0.0173	0.3216
21	22	0.0008	0.0140	0.2565
22	23	0.0006	0.0096	0.1846
23	24	0.0022	0.0350	0.3610
25	26	0.0032	0.0323	0.5130
26	27	0.0014	0.0147	0.2396
26	28	0.0043	0.0474	0.7802
26	29	0.0057	0.0625	1.0290
28	29	0.0014	0.0151	0.2490
12	11	0.0016	0.0435	0.0000
12	13	0.0016	0.0435	0.0000
35	2	0.0000	0.0250	0.0000
39	3	0.0000	0.0200	0.0000
19	4	0.0007	0.0142	0.0000
20	5	0.0009	0.0180	0.0000
22	6	0.0000	0.0143	0.0000
23	7	0.0005	0.0272	0.0000
25	8	0.0006	0.0232	0.0000

Tabela III.1. Dados de Linhas – Continuação

Barra Origem	Barra Destino	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância Shunt (p.u.)
31	1	0.0000	0.0181	0.0000
29	9	0.0008	0.0156	0.0000
19	20	0.0007	0.0138	0.0000

Tabela III.2. Dados de Barras – Caso Base

Barra	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	(MW) Injetados	(MVar) Injetados	Tensão (p.u.)
1	-	-	250.0000	86.7650	1.000∠-3.354°
2	9.0000	5.0000	552.6000	232.0900	1.000∠0.000°
3	-	-	650.0000	234.4500	1.000∠2.302°
4	-	-	632.0000	141.0200	1.000∠4.502°
5	-	-	508.0000	132.6700	1.000∠3.606°
6	-	-	650.0000	193.5500	1.000∠6.499°
7	-	-	560.0000	132.4300	1.000∠9.682°
8	-	-	540.0000	36.9290	1.000∠2.715°
9	-	-	830.0000	66.1940	1.000∠8.660°
10	1104.0000	250.0000	1000.0000	190.3400	1.000∠-10.751°
11	-	-	-	-	0.957∠-6.396°
12	8.0000	88.0000	-	-	0.937∠-6.383°
13	-	-	-	-	0.957∠-6.238°
14	-	-	-	-	0.951∠-8.049°
15	320.0000	153.0000	-	-	0.947°∠-8.338°
16	329.0000	32.0000	-	-	0.962∠-6.641°
17	-	-	-	-	0.965∠-7.861°
18	158.0000	30.0000	-	-	0.964∠-8.866°
19	-	-	-	-	0.980∠-0.696°
20	628.0000	103.0000	-	-	0.976∠-1.701°
21	274.0000	115.0000	-	-	0.959∠-3.983°
22	-	-	-	-	0.977∠1.038°
23	275.0000	85.0000	-	-	0.973∠0.716°

Tabela III.2. Dados de Barras – Caso Base – Continuação

Barra	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	(MW) Injetados	(MVar) Injetados	Tensão (p.u.)
24	309.0000	-92.0000	-	-	0.967L -6.550°
25	225.0000	48.0000	-	-	0.996L -4.498°
26	139.0000	17.0000	-	-	0.987L -5.837°
27	281.0000	76.0000	-	-	0.970L -8.079°
28	206.0000	28.0000	-	-	0.989L -1.898°
29	284.0000	27.0000	-	-	0.991L 1.187°
30	-	-	-	-	1.004L -9.016°
31	-	-	-	-	0.985L -5.986°
32	322.0000	2.0000	-	-	0.966L -9.212°
33	500.0000	184.0000	-	-	0.944L -10.214°
34	-	-	-	-	0.950L -8.965°
35	-	-	-	-	0.953L -8.199°
36	233.0000	84.0000	-	-	0.943L -10.649°
37	522.0000	176.0000	-	-	0.942L -11.211°
38	-	-	-	-	0.988L -10.984°
39	-	-	-	-	0.962L -5.465°

Tabela III.3. Dados de Barras – Caso Modificado

Barra	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	(MW) Injetados	(MVar) Injetados	Tensão (p.u.)
1	-	-	250.0000	86.7650	1,00L -5.77°
2	9.0000	5.0000	552.6000	232.0900	1.00L 0.00°
3	-	-	650.0000	234.4500	1.00L 0.701°
4	-	-	632.0000	141.0200	1.00L 2.499°
5	-	-	508.0000	132.6700	1.00L 1.602°
6	-	-	650.0000	193.5500	1.00L 4.497°
7	-	-	560.0000	132.4300	1.000L 7.681°
8	-	-	540.0000	36.9290	1.000L 0.335°
9	-	-	830.0000	66.1940	1.000L 6.431°
10	1200.0000	250.0000	1000.0000	190.3400	1.000L -14.667°

Tabela III.3. Dados de Barras – Caso Modificado – Continuação

Barra	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	(MW) Injetados	(MVar) Injetados	Tensão (p.u.)
11	-	-	-	-	0.956L -7.968°
12	8.0000	88.0000	-	-	0.936L -7.994°
13	-	-	-	-	0.956L -7.887°
14	-	-	-	-	0.950L -9.803°
15	320.0000	153.0000	-	-	0.947L -10.269°
16	329.0000	32.0000	-	-	0.961L -8.647°
17	-	-	-	-	0.965L -9.936°
18	158.0000	30.0000	-	-	0.964L -10.966°
19	-	-	-	-	0.979L -2.70°
20	628.0000	103.0000	-	-	0.976L -3.705°
21	274.0000	115.0000	-	-	0.959L -5.987°
22	-	-	-	-	0.977L -0.965°
23	275.0000	85.0000	-	-	0.973L -1.287°
24	309.0000	-92.0000	-	-	0.967L -8.556°
25	224.0000	48.0000	-	-	0.996L -6.878°
26	139.0000	17.0000	-	-	0.987L -8.066°
27	281.0000	76.0000	-	-	0.970L -10.239°
28	206.0000	28.0000	-	-	0.989L -4.127°
29	284.0000	27.0000	-	-	0.991L -1.042°
30	-	-	-	-	1.003L -12.375°
31	-	-	-	-	0.985L -8.409°
32	322.0000	2.0000	-	-	0.965L -11.351°
33	500.0000	184.0000	-	-	0.942L -11.995°
34	-	-	-	-	0.951L -9.694°
35	-	-	-	-	0.951L -9.694°
36	233.0000	84.0000	-	-	0.941L -12.336°
37	522.0000	176.0000	-	-	0.940L -12.993°
38	-	-	-	-	0.987L -14.063°
39	-	-	-	-	0.961L -7.075°

Tabela III.4. Dados de Geradores

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
x_d	0.1000	0.2950	0.2495	0.2620	0.6700	0.2540	0.2950	0.2900	0.2106	0.0200
x'_d	0.0310	0.0697	0.0531	0.0436	0.1320	0.0500	0.0490	0.0570	0.0570	0.0060
x_q	0.0609	0.2820	0.2370	0.2580	0.6200	0.2410	0.2920	0.2800	0.2050	0.0190
T_{d0}	10.200	6.5600	5.7000	6.5600	5.4000	7.3000	5.6600	6.7700	4.7900	7.0000
H	42.000	30.300	35.800	28.600	26.000	34.800	26.400	24.300	34.500	500.000
D	6.8200	4.8700	5.6800	4.6400	4.2200	5.6500	4.2800	3.9400	5.6000	10.0000

Tabela III.5. Dados do Sistema de Excitação

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
K_r	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
T_r	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Tabela III.6. Dados do Compensador Série Controlado a Tiristor

	TCSC
x_{csc}	10% x_{km}
K_{TCSC}	0.10
T_{TCSC}	0.05

Anexo I

Artigos Publicados

FEBRES, C. A. T.; SILVA, M. S.; ARAUJO, P. B. (2007) “Avaliação dos Dispositivos FACTS na Estabilidade a Pequenas Perturbações”. *CD-Rom – Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética (CBEE 2007)*, 6 p., Vitória – ES – Brasil.

FEBRES, C. A. T., ARAUJO, P. B. e FURINI, P. B. (2008) “Amortecimento de Oscilações de Baixa Frequência por Controle Suplementar de Dispositivos Estabilizadores de Potência”. *CD-Rom – Proceedings do 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications (DINCON’ 2008)*, 7 p., Presidente Prudente – SP – Brasil.