

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

**ESTUDO DA ESTABILIDADE A PEQUENAS  
PERTURBAÇÕES DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS SOB A AÇÃO DOS  
CONTROLADORES FACTS TCSC E UPFC**

**Marcos Amorielle Furini**

**Percival Bueno de Araujo**

Orientador

Ilha Solteira – SP, Janeiro de 2008

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**“Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações de  
Sistemas Elétricos de Potência Multimáquinas sob a Ação  
dos Controladores FACTS TCSC e UPFC”**

**MARCOS AMORIELLE FURINI**

**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  
Janeiro/2008

#### FICHA CATALOGRÁFICA

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

- |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F984e | <p>Furini, Marcos Amorielle</p> <p>Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob a ação dos controladores FACTS TCSC e UPFC / Marcos Amorielle Furini. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008</p> <p>153 p.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2008</p> <p>Orientador: Percival Bueno de Araujo</p> <p>Bibliografia: p. 136-140</p> <p>1. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 2. Estabilidade dinâmica. 3. TCSC. 4. UPFC</p> |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*À Marina Cruz Furini*

## **Agradecimentos**

Ao Professor Percival Bueno de Araujo, que foi fonte de conhecimento, dedicação, motivação, amizade e apoio para mim na realização desta dissertação.

Aos professores Dilson Amâncio Alves, Laurence Duarte Colvara e Anna Diva Plasencia Lotufo pelas discussões e sugestões que contribuíram para a versão final do trabalho.

À minha Esposa, Adriana Antonia da Cruz Furini, pelo amor, dedicação, companheirismo, amizade, incentivo e compreensão sem os quais nada disso seria possível.

Ao meu Pai, Décio Furini, pelo incentivo, carinho e exemplo de caráter, paciência e generosidade.

À minha Mãe, Sandra Mara Amorielle Furini, pelo amor, atenção, dedicação e por ser exemplo de perseverança em mudar e melhorar.

À minha Avó, Ada Dallarmellina Amorielle, pelo apoio e carinho incondicional.

Aos amigos de longa data, Shigueo, Pedro, Matheus, Marcelo, Fabrício, Eduardo e Gustavo e aos amigos do departamento, Carlos, Marcelo, Zé Guilherme, Newton, Jorge e André que contribuíram tecnicamente ou proporcionando uma melhor convivência.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica pelo suporte técnico e financeiro.

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

“Não há nada mais prático que uma boa teoria, pois é a ferramenta para pensar corretamente.”

Cláudio de Moura Castro

## Resumo

O objetivo desta Dissertação de Mestrado é apresentar a possibilidade de fornecer amortecimento às oscilações de baixa frequência do sistema elétrico de potência através dos dispositivos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) e UPFC (Unified Power Flow Controller). Para isso realiza-se o desenvolvimento e implementação do Modelo de Sensibilidade de Potência para sistemas multmáquinas. Na sequência são introduzidos os dispositivos TCSC e UPFC, bem como os seus controladores.

Apresentam-se resultados de acordo com a evolução dos modelos que representam os dispositivos FACTS, ou seja, parte-se de uma compensação fixa, passando para um modelo dinâmico de primeira ordem e por fim, é incluído o controlador POD (Power Oscillation Damping). A utilização de sinais locais e remotos para entrada do controlador POD também é analisada. Além disso são mostrados os resultados obtidos pela técnica clássica de introdução de amortecimento através de sinais suplementares (os estabilizadores de sistemas de potência – PSS: Power System Stabilizers).

O projeto dos controladores POD e PSS é baseado no método da compensação de fase, utilizando a teoria de controle clássico.

Fatores de participação, autovetores, autovalores e resíduos de funções de transferência são utilizados como índices para examinar a melhor alocação dos controladores POD e PSS no sistema elétrico de potência.

**Palavras-chave** – Sistemas Elétricos de Potência, Estabilidade a Pequenas Perturbações, Oscilações Eletromecânicas, PSS, FACTS, TCSC, UPFC, Power Oscillation Damping.

## Abstract

The objective of this work is to present the possibility to provide damping to low frequencies oscillations of the electrical power systems by FACTS devices (Flexible Alternating Current Transmission System): TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) and UPFC (Unified Power Flow Controller). This is developed and implemented using the Power Sensitivity Model for multimachine systems. Afterwards, the TCSC and UPFC devices are introduced as well as the controllers.

Results are presented according to the evolution of the models that represent the FACTS devices, i.e., it starts with a fixed compensation, passing through a first order dynamic model and finally, it is included a POD controller (Power Oscillation Damping). It is also analyzed the inclusion of local and remote signals for the input of the POD controller. Besides, results obtained by classical techniques of introducing damping by supplementary signals (Power Systems Stabilizer – PSS) are shown.

The project of POD and PSS controllers are based on the Phase Compensation Method using the classical control theory.

Participation Factor like eigenvalues, eigenvectors and transfer function residues are used as index to examine the best allocation of the POD and PSS controllers on the electrical power systems.

**Key-Words** – Electric Power Systems, Small Signal Stability, Electromechanical Oscillations, PSS, FACTS, TCSC, UPFC, Power Oscillation Damping.

## Índice de Figuras

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 2.1 – Diagrama Unifilar do Gerador Síncrono.....                                         | 22  |
| Figura 2.2 – Potências no Sistema Multimáquinas.....                                            | 24  |
| Figura 2.3 – Regulador Automático de Tensão.....                                                | 31  |
| Figura 2.4 – Diagrama de Blocos do MSP para Sistemas Multimáquinas.....                         | 37  |
| Figura 3.1 – Sistema de Transmissão de 2 Barras.....                                            | 42  |
| Figura 3.2 – Fluxo de Potência Ativa Com e Sem Compensação.....                                 | 42  |
| Figura 3.3 – Configuração Básica do TCSC .....                                                  | 45  |
| Figura 3.4– Modelo Dinâmico Linearizado do TCSC .....                                           | 45  |
| Figura 3.5 – Composição Básica do UPFC .....                                                    | 52  |
| Figura 3.6 – Representação do UPFC para o Modelo de Injeção de Potência.....                    | 53  |
| Figura 3.7 – Diagrama Fasorial da Tensão $V_k$ Devido a Inclusão da Tensão Série.....           | 53  |
| Figura 3.8 – Representação da Fonte de Tensão Série por uma Fonte de Corrente.....              | 54  |
| Figura 3.9 – Transformação da Fonte de Corrente Série.....                                      | 56  |
| Figura 3.10 – Modelo de Injeção de Potência para o UPFC .....                                   | 58  |
| Figura 3.11 – Modelo Dinâmico do UPFC – Blocos de Primeira Ordem.....                           | 59  |
| Figura 4.1 – (a) Falta de Torque de Amortecimento; (b) Falta de Torque de Sincronização....     | 65  |
| Figura 4.2 – Estrutura Básica do PSS.....                                                       | 67  |
| Figura 4.3 – Regulador Automático de Tensão com o Sinal Suplementar .....                       | 72  |
| Figura 4.4 – Diagrama de Blocos do Sistema MBI – MHP .....                                      | 75  |
| Figura 4.5 – Malha Reativa para o MSP Multimáquinas .....                                       | 76  |
| Figura 4.6 – Laço Eletromecânico para a Máquina Geradora $k$ .....                              | 77  |
| Figura 4.7 – Diagrama de Blocos para Amortecimento Puro Introduzido pelo PSS .....              | 78  |
| Figura 4.8 – Modelo Dinâmico do TCSC com Controlador POD para Amortecimento de Oscilações ..... | 81  |
| Figura 4.9 – Divisão do Bloco Washout.....                                                      | 82  |
| Figura 4.10 – Divisão do Bloco Avanço-Atraso de Fase .....                                      | 82  |
| Figura 4.11 – Divisão do Segundo  Bloco de Avanço-Atraso de Fase.....                           | 83  |
| Figura 4.12 – Modelo Dinâmico do UPFC – Modo $V_q$ .....                                        | 89  |
| Figura 4.13 – Função de Transferência do Sistema Elétrico de Potência com Controlador ....      | 96  |
| Figura 4.14 – Efeito do Controlador POD no Resíduo Associado ao Autovalor $\lambda_i$ .....     | 97  |
| Figura 5.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Simétrico de Duas Áreas.....                          | 100 |

|                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.2- Fatores de Participação: (a) Local 1; (b) Local 2; (c) Interárea.....                                                                                                                                             | 101 |
| Figura 5.3 – Comportamento do Par Complexo de Autovalores Associado ao Modo Interárea .....                                                                                                                                   | 102 |
| Figura 5.4 – Variações do Ângulo Interno da Máquina Geradora 2 .....                                                                                                                                                          | 103 |
| Figura 5.5 – Comportamento do Par Complexo de Autovalores Devido a Variações do Ganho $K_{TCSC}$ .....                                                                                                                        | 104 |
| Figura 5.6 – Fatores de Participação: a) Modo Local 1 e b) Modo Interárea.....                                                                                                                                                | 105 |
| Figura 5.7 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 .....                                                                                                                                                                   | 106 |
| Figura 5.8 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 2 .....                                                                                                                                                                   | 106 |
| Figura 5.9 – Variações da Velocidade Angular: (a) Gerador 3; (b) Gerador 2 .....                                                                                                                                              | 107 |
| Figura 5.10 – Variações do Fluxo de Potência Ativa na LT 7-8 e da Reatância do TCSC....                                                                                                                                       | 108 |
| Figura 5.11 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 .....                                                                                                                                                                  | 111 |
| Figura 5.12 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 2 .....                                                                                                                                                                  | 112 |
| Figura 5.13 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea.....                                                                                                                                              | 112 |
| Figura 5.14 – Variações do Ângulo Interno: (a) Gerador 2; (b) Gerador 3.....                                                                                                                                                  | 114 |
| Figura 5.15 – Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão entre as barras 7-8 para Diversas Localizações do TCSC .....                                                                                                    | 114 |
| Figura 5.16 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 – Inclusão de Vários Dispositivos TCSC .....                                                                                                                           | 115 |
| Figura 5.17 – Variações do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Interligação para Diversos Sinais de Diferença de Velocidade Angular para Entrada do POD.....                                                                  | 116 |
| Figura 5.18 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3, Devido a Inclusão do TCSC, Utilizando as Variações da Velocidade Angular e as Variações do Fluxo de Potência Ativa como Entrada para o POD .....                      | 117 |
| Figura 5.19 - Variações do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Interligação, Devido a Inclusão do TCSC, Utilizando as Variações da Velocidade Angular e as Variações do Fluxo de Potência Ativa como Entrada para o POD ..... | 118 |
| Figura 5.20 – Tensão Série Inserida pelo UPFC Devido a Variações no Nível de Compensação .....                                                                                                                                | 119 |
| Figura 5.21 – Comportamento do Par Complexo de Autovalores Associado ao Modo Interárea .....                                                                                                                                  | 120 |
| Figura 5.22 – Variações do ângulo Interno do Gerador 3 .....                                                                                                                                                                  | 121 |
| Figura 5.23 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 .....                                                                                                                                                                  | 122 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.24 – Variações do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Interligação –(barras 7 e 8) |     |
| .....                                                                                       | 122 |
| Figura 5.25 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea.....            | 123 |
| Figura 5.26 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 .....                                | 125 |
| Figura 5.27 – Variações do Fluxo de Potência Ativa em Linhas de Transmissão do Sistema      |     |
| .....                                                                                       | 126 |
| Figura 5.28 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea.....            | 126 |
| Figura 5.29 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea.....            | 127 |
| Figura 5.30 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 .....                                | 128 |
| Figura 5.31 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea.....            | 129 |
| Figura 5.32 – Fatores de Participação para o Modo Interárea; Sistema com PSS-1 .....        | 130 |
| Figura 5.33 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 .....                                | 130 |
| Figura 5.34 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 .....                                | 131 |
| Figura A.I.1 – Sistemas de coordenadas r,m e d,q .....                                      | 141 |
| Figura A.IV.1 – Sistemas Multimáquinas de duas áreas .....                                  | 151 |

## Índice de Tabelas

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 5.1 – Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficientes de Amortecimento.....                                                                                  | 100 |
| Tabela 5.2 – Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficientes de Amortecimento $\eta_c=82\%$ .<br>.....                                                              | 103 |
| Tabela 5.3 – Coeficientes de Amortecimento dos Modos de Oscilações Devido às Variações<br>do Ganho do TCSC.....                                                       | 105 |
| Tabela 5.4 – Módulos dos Resíduos Associados aos Modos Eletromecânicos para Diversas<br>Localizações do TCSC .....                                                    | 109 |
| Tabela 5.5 – Coeficientes de Amortecimento dos Modos Eletromecânicos para Diversas<br>Localizações do TCSC .....                                                      | 110 |
| Tabela 5.6 – Parâmetros do POD Instalado na Linha de Transmissão entre as Barras 7 e 8.                                                                               | 110 |
| Tabela 5.7 – Parâmetros dos Controladores POD Instalados nas Linhas de Transmissão.....                                                                               | 113 |
| Tabela 5.8 – Parâmetros dos Controladores POD Instalados nas Linhas de Transmissão.....                                                                               | 115 |
| Tabela 5.9 – Módulos dos Resíduos Associados aos Modos Eletromecânicos para Diversas<br>Localizações do TCSC .....                                                    | 116 |
| Tabela 5.10 – Parâmetros do POD instalado na Linha de Transmissão entre as Barras 7 e 8,<br>Utilizando como Entrada o Sinal $(\Delta\omega_2 - \Delta\omega_3)$ ..... | 117 |
| Tabela 5.11 – Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficientes de Amortecimento para<br>$\eta_c=62\%$ .....                                                          | 120 |
| Tabela 5.12 – Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficientes de Amortecimento para<br>Modelo de Primeira Ordem com $\eta_c=60\%$ .....                             | 122 |
| Tabela 5.13 – Módulos dos Resíduos Associados aos Modos Eletromecânicos para Diversas<br>Localizações do UPFC .....                                                   | 124 |
| Tabela 5.14 – Parâmetros do POD Instalado na Linha de Transmissão entre as Barras 7 e 8,<br>para Dispositivo UPFC – POD – $V_q$ .....                                 | 125 |
| Tabela 5.15 – Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficientes de Amortecimento para<br>UPFC – POD. ....                                                             | 125 |
| Tabela 5.16 – Parâmetros do POD Instalado na Linha de Transmissão entre as Barras 7 e 8,<br>para Dispositivo UPFC – POD – $I_q$ .....                                 | 127 |
| Tabela 5.17 – Parâmetros dos Dispositivos PSS para cada Máquina Geradora (G). ....                                                                                    | 129 |
| Tabela A.IV.1 – Dados das Máquinas Geradoras .....                                                                                                                    | 151 |
| Tabela A.IV.2 – Dados do Regulador Automático de Tensão .....                                                                                                         | 151 |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A.IV.3 – Dados das Linhas de Transmissão.....                 | 152 |
| Tabela A.IV.4 – Dados do Ponto de Operação Inicial - Caso Base. .... | 152 |

## Lista de Símbolos e Abreviaturas

FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems

GTO – Gate-Turn Off Thyristor

MHP – Modelo de Heffron & Phillips

MSP – Modelo de Sensibilidade de Potência

POD – Power Oscillation Damping

PSS – Power System Stabilizer

RAT – Regulador Automático de Tensão

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SSSC – Static Synchronous Series Compensator

STATCOM – Static Synchronous Compensator

SVC – Static Var Compensator

TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor

UPFC – Unified Power Flow Controller

$A1_{Gk}$ ,  $A2_{Gk}$ ,  $A3_{Gk}$  – Coeficientes de potência ativa do gerador k

$A1_{km}$ ,  $A2_{km}$ ,  $A3_{km}$  – Coeficientes de potência ativa da linha de transmissão k-m

$A4_{km}$ ,  $R4_{km}$  – Coeficientes ativo e reativo da linha de transmissão k-m com TCSC

$A1_{Ui}$ ,  $A2_{Ui}$ ,  $A3_{Ui}$ ,  $A4_{Ui}$ ,  $A5_{Ui}$ ,  $A6_{Ui}$  – Coeficientes da injeção de potência ativa da barra inicial de instalação do UPFC

$A1_{Uf}$ ,  $A2_{Uf}$ ,  $A3_{Uf}$ ,  $A4_{Uf}$ ,  $A5_{Uf}$ ,  $A6_{Uf}$  – Coeficientes da injeção de potência ativa da barra final de instalação do UPFC

$D_k$  – Coeficiente de amortecimento do gerador k

$E_{ak}$  – Tensão de definição da posição do sistema de coordenadas rotativo

$E_{fdk}$  – Tensão de campo do gerador k

$E'_{qk}$  – Tensão interna em quadratura do gerador k

GEP(s) – Função de transferência para projeto de PSS

$I_{dk}$  – Componente de eixo direto da corrente da barra k.

$I_k$  – Corrente elétrica do gerador k

$I_q$  – Componente da corrente shunt injetada pelo UPFC

$I_{qk}$  – Componente de eixo em quadratura da corrente da barra k.

J1, J2, J3, J4, B1, B2 – Matrizes do MSP

- $J1_E, J2_E, J3_E, J4_E, B1_E, B2_E$  – Matrizes do MSP com PSS
- $J1_T, J2_T, J3_T, J4_T, B1_T, B2_T$  – Matrizes do MSP com TCSC
- $J1_U, J2_U, J3_U, J4_U, B1_U, B2_U$  – Matrizes do MSP com UPFC
- $K_{Ak}, K_{Vk}$  – Coeficientes da reação de armadura do gerador  $k$  no MSP
- $K_{POD}$  – Ganho do controlador POD
- $K_{PSS}$  – Ganho do controlador PSS
- $K_{rk}$  – Ganho do RAT
- $K_{TCSC}$  – Ganho do TCSC
- $M_k = 2H_k$  – Constante de Inércia do gerador  $k$
- $nc$  – Nível de Compensação
- $P_{Gk}$  – Potência ativa gerada pelo gerador  $k$
- $P_k$  – Injeção de potência ativa para a barra inicial de instalação do UPFC
- $P_{km}$  – Fluxo de potência ativa entre as barras  $k$  e  $m$
- $P_{Lk}$  – Carga ativa da barra  $k$
- $P_m$  – Injeção de potência ativa para a barra final de instalação do UPFC
- $P_{mk}$  – Potência mecânica de entrada do gerador  $k$
- $Q_{Gk}$  – Potência reativa gerada pelo gerador  $k$
- $Q_k$  – Injeção de potência reativa para a barra inicial de instalação do UPFC
- $Q_{km}$  – Fluxo de potência reativa entre as barras  $k$  e  $m$
- $Q_{Lk}$  – Carga reativa da barra  $k$
- $Q_m$  – Injeção de potência reativa para a barra final de instalação do UPFC
- $r$  – Parâmetro de controle da magnitude da tensão inserida pelo UPFC
- $R1_{Gk}, R2_{Gk}, R3_{Gk}$  – Coeficientes de potência reativa do gerador  $k$
- $R1_{km}, R2_{km}, R3_{km}$  – Coeficientes de potência reativa da linha de transmissão  $k$ - $m$
- $R1_{Ui}, R2_{Ui}, R3_{Ui}, R4_{Ui}, R5_{Ui}, R6_{Ui}$  – Coeficientes da injeção de potência reativa da barra inicial de instalação do UPFC
- $R1_{Uf}, R2_{Uf}, R3_{Uf}, R4_{Uf}, R5_{Uf}, R6_{Uf}$  – Coeficientes da injeção de potência reativa da barra final de instalação do UPFC
- $R_{ijk}$  – Resíduo associado ao modo  $k$  devido entrada  $i$  e saída  $j$
- $R_{km}$  – Resistência da linha de transmissão entre as barras  $k$  e  $m$
- $s$  – Operador de Laplace
- $T$  – Matriz de Transformação de Coordenadas
- $T'_{d0k}$  – Constante de tempo transitória de eixo direto do gerador  $k$
- $T_{rk}$  – Constante de tempo do RAT

$T_{TCSC}$  – Constante de Tempo do TCSC

$T_{Vp}, T_{Vq}, T_{Iq}$  – Constantes de tempo dos parâmetros de controle do UPFC

$T_w$  – Constante de tempo washout para PSS e POD

$T_1, T_2, T_3, T_4$  – Constantes de tempo dos blocos avanço-atraso de fase para PSS e POD

$V_{dk}$  – Componente de eixo direto da tensão da barra k

$V_k$  – Tensão terminal da barra k

$V_p$  – Componente da tensão inserida pelo UPFC em fase com a corrente da linha

$V_q$  – Componente da tensão inserida pelo UPFC em quadratura com a corrente da linha

$V_{qk}$  – Componente de eixo em quadratura da tensão da barra k.

$V_{ref\ k}$  – Tensão de referência para o RAT

$\tilde{V}_s$  – Tensão síncrona inserida pelo UPFC

$\tilde{x}$  - Fasor da variável x

$X_{CSC}$  – Reatância do TCSC

$x_{dk}$  – Reatância síncrona de eixo direto do gerador k

$x'_{dk}$  – Reatância transitória de eixo direto do gerador k

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

$x_{qk}$  – Reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador k

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

$\delta_k$  – Ângulo interno do gerador k

$\theta_k$  – Ângulo da tensão da barra k

$\Omega_k$  – Conjunto de barras vizinhas à barra k

$\omega_k$  – Velocidade Angular do gerador k

$\omega_0$  – Velocidade síncrona – 377 rad/s

$\gamma$  – Parâmetro de controle do ganho da tensão inserida pelo UPFC

$\omega_{nle}$  – frequência natural do laço eletromecânico

$\lambda$  – Autovalor

$\varphi$  – Autovetor direito

$\psi$  – Autovetor esquerdo

$[\cdot]$  – Representa d/dt

$\Delta$  – Representa pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio

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

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

## Sumário

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Introdução .....                                                                   | 16  |
| 2. Desenvolvimento do Modelo de Sensibilidade de Potência para Sistemas Multimáquinas | 21  |
| 2.1 Introdução .....                                                                  | 21  |
| 2.2 Equações Gerais do MSP para Sistemas Multimáquinas .....                          | 21  |
| 2.3 Potências Geradas e Fluxo de Potências no Sistema Multimáquinas.....              | 24  |
| 2.4 Balanço Nodal de Potências no Sistema Multimáquinas .....                         | 28  |
| 2.5 Tensão Interna da Máquina Síncrona .....                                          | 28  |
| 2.6 Tensão de Campo da Máquina Síncrona .....                                         | 30  |
| 2.7 Equações de Movimento da Máquina Síncrona .....                                   | 31  |
| 2.8 Representações do MSP para Sistemas Multimáquinas .....                           | 32  |
| 2.9 Variáveis de Estado Redundantes .....                                             | 38  |
| 2.10 Conclusões.....                                                                  | 39  |
| 3. Inclusão de Dispositivos FACTS no Modelo de Sensibilidade de Potência .....        | 41  |
| 3.1 Introdução .....                                                                  | 41  |
| 3.2 Dispositivos FACTS.....                                                           | 41  |
| 3.3 Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) .....                                | 44  |
| 3.3.1 – Inclusão do TCSC no Modelo de Sensibilidade de Potência .....                 | 45  |
| 3.4 Unified Power Flow Controller (UPFC) .....                                        | 51  |
| 3.4.1 – Modelo de Injeção de Potência para o UPFC.....                                | 52  |
| 3.4.2 – Inclusão do UPFC no Modelo de Sensibilidade de Potência .....                 | 58  |
| 3.5 – Conclusões.....                                                                 | 64  |
| 4. Sinais Estabilizadores Suplementares .....                                         | 65  |
| 4.1 Introdução .....                                                                  | 65  |
| 4.2 Power System Stabilizer (PSS) .....                                               | 65  |
| 4.2.1 Inclusão de Dispositivos PSS no MSP .....                                       | 67  |
| 4.2.2 Função de Transferência <i>GEP(s)</i> para o MSP.....                           | 74  |
| 4.2.3 Obtenção dos Parâmetros do PSS.....                                             | 77  |
| 4.3 Power Oscillation Damping (POD).....                                              | 79  |
| 4.3.1 TCSC – POD .....                                                                | 81  |
| 4.3.2 UPFC – POD .....                                                                | 88  |
| 4.3.3 Localização e Projeto de Controladores POD .....                                | 95  |
| 4.4 Conclusões.....                                                                   | 97  |
| 5. Resultados e Simulações .....                                                      | 99  |
| 5.1 Introdução .....                                                                  | 99  |
| 5.2 Sistema Simétrico de Duas Áreas.....                                              | 99  |
| 5.2.1 TCSC – Modelo Fixo .....                                                        | 101 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.2 TCSC – Modelo Dinâmico de Primeira Ordem .....                    | 103 |
| 5.2.3 TCSC – Equipado com POD .....                                     | 108 |
| 5.2.4 UPFC – Modelo Fixo .....                                          | 118 |
| 5.2.5 UPFC – Modelo Dinâmico de Primeira Ordem .....                    | 121 |
| 5.2.6 UPFC – Equipado com POD .....                                     | 123 |
| 5.2.7 Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas utilizando PSS .....  | 128 |
| 5.3 Conclusões.....                                                     | 131 |
| 6. Conclusões Finais e Trabalhos Futuros .....                          | 133 |
| Referências Bibliográficas.....                                         | 136 |
| Apêndice I. Matriz de Transformação de Coordenadas .....                | 141 |
| Apêndice II. Coeficientes do Modelo de Injeção de Potência do UPFC..... | 143 |
| Apêndice III. Análise Modal .....                                       | 148 |
| Apêndice IV. Dados do Sistema Multimáquinas Utilizado.....              | 151 |
| Anexo I. Artigos Submetidos e Publicado .....                           | 153 |

## 1. Introdução

A energia elétrica desempenha um importante papel como fonte de bem estar, contribuindo para o progresso contínuo da humanidade. Os avanços na área de saúde aumentam as taxas de sobrevivência, com conseqüente crescimento das taxas populacionais. Além disso, a sociedade moderna é altamente competitiva e consumista, onde crescimento econômico e industrial e melhorias na qualidade de vida estão intimamente ligados ao aumento da demanda por energia elétrica. Esta demanda crescente de energia elétrica deve ser satisfeita em quantidade, qualidade e economicidade. Portanto, o papel do engenheiro de sistemas de energia elétrica, seja na área de planejamento ou na área de operação, sempre será desafiador.

O principal objetivo do Sistema de Energia Elétrica (Sistema Elétrico de Potência - SEP) é suprir seu mercado de energia elétrica, de acordo com dois princípios básicos: segurança e confiabilidade. Segurança é a manutenção de níveis adequados de tensão e frequência, necessários ao funcionamento ótimo dos equipamentos elétricos. Manter a confiabilidade do SEP é garantir a entrega de energia elétrica com o menor número de interrupções possível, mesmo em condições adversas. O conjunto dessas duas características garante a estabilidade do sistema elétrico de potência.

O termo estabilidade é comumente reconhecido, pois frequentemente comenta-se sobre estabilidade econômica, estabilidade financeira, etc. Desta mesma maneira, a estabilidade em sistemas elétricos está ligada ao seu comportamento quando submetido a uma perturbação. Esta perturbação pode ser de grande escala ou de pequena escala, o que define uma importante divisão no estudo da estabilidade. A análise do comportamento do sistema quando submetido a uma grande perturbação, por exemplo, uma falta em linha de transmissão ou perda de sincronismo de um parque gerador, é chamada de análise da estabilidade transitória. Entretanto, pequenas perturbações, de ocorrência contínua na forma de desvios de carga ocasionando conseqüentes ajustes de geração, caracterizam o estudo da estabilidade dinâmica (ou estabilidade a pequenas perturbações) [1]. Matematicamente podemos descrever uma pequena perturbação como um pequeno desvio no estado no sistema; assim, todas as equações que descrevem o sistema podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio e, desta maneira, todas as propriedades aplicáveis à análise de sistemas lineares podem ser utilizadas.

O estudo da estabilidade dinâmica do SEP será o foco desse trabalho e para sua análise

é necessária uma confiável modelagem matemática do sistema.

A modelagem de um sistema de energia elétrica é um grande desafio, por se tratar de grandes sistemas interligados, de alta complexidade e diversidade de equipamentos.

O equipamento principal constituinte de um SEP é a máquina síncrona e vários modelos podem ser utilizados para sua representação, de acordo com o grau de detalhamento requerido. No passado, tinha larga utilização nos estudos de estabilidade o modelo clássico [2,3,4], onde o fluxo concatenado pelo circuito de campo da máquina síncrona era considerado constante por um intervalo de tempo igual a 1 ou 2 segundos e os efeitos dos controladores e reguladores não eram considerados. Este modelo é de grande importância para os estudos dos conceitos básicos de estabilidade. Entretanto, com o avanço tecnológico dos reguladores e controladores, a atuação desses aparelhos se tornou extremamente rápida. Outro fator que contribuiu para a introdução de novos modelos de análises foi a interligação entre grandes sistemas com grandes inércias, resultando em aumentos consideráveis dos períodos oscilatórios. Desta maneira, Heffron e Phillips [5], propuseram um modelo linear de grande eficiência (MHP).

A modelagem do sistema elétrico proposto por Heffron e Phillips considera o gerador síncrono conectado a uma barra infinita através de uma impedância externa, a qual representa a linha de transmissão. Este modelo fornece informações sobre as oscilações de uma máquina geradora conectada a um sistema de grande dimensão, o qual pode ser considerado uma barra infinita. Uma barra infinita é caracterizada por possuir tensão e frequência constante, ou seja, qualquer perturbação na máquina geradora não causará distúrbios na barra infinita [6].

A necessidade da representação de uma barra infinita no MHP é um fator de restrição para a extensão do modelo para sistemas multimáquinas, pois exige uma referência angular e assim, todas as informações da barra terminal são perdidas. Outro aspecto importante a ser ressaltado é que a consideração de uma barra infinita entre sistemas reais interligados não é totalmente correta [7].

Deckmann e Costa descreveram um modelo de análise linear do comportamento dinâmico de sistemas elétricos de potência de modo a superar a necessidade da representação de uma barra infinita. Este modelo chamado de Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) [7], tem como conceito fundamental de aplicação o balanço nodal de potência. Características importantes podem ser notadas neste modelo, tais como a decomposição entre subsistemas de potência (subsistema ativo e subsistema reativo), e também uma decomposição temporal entre as variáveis de estado de característica lenta e as variáveis algébricas de característica rápida. Devido ao grande potencial e facilidade de extensão para sistemas multimáquinas, o MSP

pode ser satisfatoriamente empregado na análise de estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas.

Para garantir a estabilidade a pequenas perturbações é necessária a verificação da existência de fontes naturais de amortecimento para o sistema, caso contrário faz-se necessária a introdução de fontes suplementares de amortecimento. Atualmente, devido às crescentes interligações entre sistemas nacionais e até mesmo internacionais tem-se notado o surgimento de oscilações de baixa frequência fracamente amortecidas por fontes naturais. Tais oscilações são conhecidas como modos eletromecânicos de oscilação, pois são originadas pela interação das oscilações dos rotores das diversas máquinas geradoras do sistema elétrico. O efetivo amortecimento dessas oscilações tornou-se, portanto, decisivo para a estabilidade dos sistemas elétricos de potência.

Os modos eletromecânicos de oscilação podem ser classificados de acordo com sua frequência de ocorrência. Os modos eletromecânicos de maior interesse são os modos locais e modos interárea. Modos locais de oscilação se encontram na faixa de 0,7 a 2,0 Hz e estão associados às oscilações dos rotores de um grupo de geradores próximos, fisicamente ou eletricamente. Modos interárea de oscilação localizam-se na faixa de 0,1 a 0,8 Hz e são relacionados com as oscilações de grupos de geradores de uma área contra outro grupo de geradores de outra área [2,3,4].

Os primeiros passos para o controle das oscilações de baixa frequência foram dados por deMello e Concórdia, onde introduziram conceitos básicos para o projeto de Estabilizadores do Sistema Elétrico (PSS – do inglês Power System Stabilizers) [5]. Tais Estabilizadores são largamente e efetivamente utilizados como fontes adicionais de amortecimento para as oscilações dos rotores. Porém, com o avanço da tecnologia empregada na eletrônica de potência, dispositivos automáticos de compensação foram desenvolvidos, os quais receberam o nome de FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) que podem introduzir amortecimento adicional ao sistema [11,12,13,14,15]. É importante ressaltar que a filosofia inicial de emprego de dispositivos FACTS não foi a de introduzir amortecimento ao sistema e sim a de aumentar os limites de estabilidade e controlar o fluxo de potência nas linhas de transmissão [11]. Em vista disso, para que ocorra a adição de amortecimento de maneira efetiva e semelhante à realizada para o PSS é necessária a introdução de um controlador POD (Power Oscillation Damping) à malha de controle do dispositivo FACTS [17].

Os dispositivos FACTS podem ser divididos em duas grandes gerações de acordo com a utilização de dispositivos semicondutores para o seu controle. A primeira geração utiliza o

controle do tempo de condução de chaves tiristoras de potência para introduzir montantes variáveis de potência reativa ao sistema necessitando, portanto, de bancos de capacitores e reatores. Já na segunda geração são utilizados dispositivos semicondutores autocomutados, como o GTO (Gate-Turn Off) que são agrupados em estruturas de ponte para geração de uma tensão síncrona. Dentre os diversos dispositivos FACTS pertencentes às duas gerações, encontram-se o TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) e o UPFC (Unified Power Flow Controller), representantes da primeira e segunda gerações, respectivamente [11].

Para que os controladores PSS e POD introduzam amortecimento aos modos eletromecânicos fracamente amortecidos, deve-se instalá-los em locais onde possam fornecer o maior amortecimento para o modo oscilatório considerado sem que haja detrimento dos outros modos estáveis [12]. Para verificar a melhor localização de dispositivos PSS podem ser estudadas as propriedades da matriz de estados  $A$ , ou seja, são obtidas informações sobre os autovalores, autovetores e fatores de participação. A melhor localização para instalação de dispositivos FACTS pode ser obtida da análise dos resíduos da função de transferência de malha aberta do controlador FACTS a ser inserido no sistema. Vários métodos podem ser utilizados para o projeto dos parâmetros dos controladores PSS e POD, sendo que o mais usual consiste na compensação de fase baseado na teoria de controle clássico, o que define a estrutura desses controladores por blocos de avanço-atraso de fase [5].

### **Contribuições da Dissertação**

Neste trabalho são realizadas a implementação computacional no MSP para sistemas multimáquinas, bem como sua modificação para a consideração da atuação dos dispositivos FACTS TCSC e UPFC. Para a inclusão destes dispositivos, inicialmente foram efetuadas suas modelagens e na sequência, suas equações foram introduzidas no MSP. Também foram definidos seus controladores (a partir de um modelo mais simples, evoluindo para os PSS's e POD's). A localização destes controladores no sistema elétrico de potência também é averiguada, bem como o ajuste de seus parâmetros. De maneira geral, estas são as maiores contribuições desta Dissertação de Mestrado.

### **Estrutura do Trabalho**

Quanto à organização do texto, este se apresenta dividido em capítulos, apêndices e anexos.

No Capítulo 2 é desenvolvido o Modelo de Sensibilidade de Potência para o sistema multimáquinas. No Capítulo 3 são modelados os dispositivos FACTS TCSC e UPFC, com a conseqüente inclusão de suas equações no Modelo de Sensibilidade de Potência.

O Capítulo 4 é dedicado aos sinais suplementares de controle, mais especificamente o PSS e o POD.

No que se refere ao PSS é definida a função de transferência a ser compensada (análoga à GEP(s) deduzida por deMello e Concordia [5]), para o Modelo de Sensibilidade de Potência e também é mostrado como se realizar o ajuste de seus parâmetros.

No caso do POD é realizada sua implementação nos dispositivos FACTS TCSC e UPFC. A localização destes controladores no sistema elétrico de potência também é discutida.

O Capítulo 5 é dedicado às simulações e discussão dos resultados obtidos com um sistema teste, enquanto que no Capítulo 6 são mostradas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

Seguem as Referências Bibliográficas, Apêndices e Anexos, para uma melhor compreensão do trabalho.

## 2. Desenvolvimento do Modelo de Sensibilidade de Potência para Sistemas Multimáquinas

### 2.1 Introdução

Neste Capítulo será apresentada a extensão do Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) para Sistemas Multimáquinas [7]. O equacionamento do MSP para Sistemas Multimáquinas é obtido pela aplicação do balanço nodal de potências ativa e reativa em cada barra do sistema. O modelo resultante é linear e conseqüentemente, pode ser utilizado para a análise da estabilidade a pequenas perturbações.

### 2.2 Equações Gerais do MSP para Sistemas Multimáquinas

Neste trabalho a modelagem matemática do gerador síncrono é feita considerando os enrolamentos do estator (enrolamentos das fases a, b e c), e também um enrolamento do rotor, (o enrolamento de campo – fd). Portanto, tem-se dois sistemas de coordenadas existentes, um onde estão representadas as grandezas do estator, (sendo esse um sistema de coordenadas estático - (r,m)), e outro rotativo (d,q), representando as grandezas do rotor. Faz-se então necessária a introdução de uma transformação baseada na Transformação de Park [2], onde todas as grandezas são referidas ao sistema de coordenadas rotativo. O operador linear que realiza essa operação é a matriz T, cuja dedução é apresentada no Apêndice I e mostrada na equação (2.1), onde a variável  $\delta_k$  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.

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

Na Figura 2.1 é mostrado o diagrama unifilar do gerador síncrono ligado a uma barra genérica k. As variáveis  $\tilde{E}'_{qk}$ ,  $x'_{dk}$ ,  $\tilde{V}_k$  e  $\tilde{i}_k$  correspondem respectivamente à tensão interna

do gerador k, à reatância transitória de eixo direto do gerador k, à tensão terminal da barra contendo o gerador k e à corrente do gerador k.

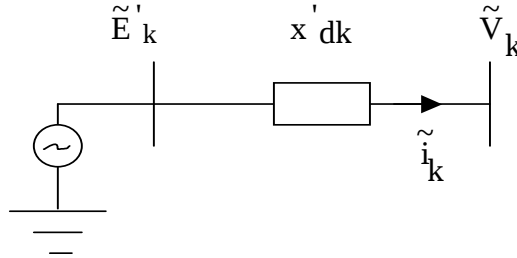


Figura 2.1 – Diagrama Unifilar do Gerador Síncrono

A tensão terminal, expressa em componentes de eixos real e imaginário (r, m), é dada pela equação (2.2), enquanto a equação (2.3) é obtida por inspeção na Figura 2.1.

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

$$\tilde{E}'_k = \tilde{V}_k + j x'_{dk} \tilde{i}_k \quad (2.3)$$

De acordo com [2,3] pode-se definir uma tensão  $\tilde{E}_{ak}$ , localizada sobre o eixo em quadratura, a qual define a localização do sistema de coordenadas rotativo ( $d_k, q_k$ ) para cada gerador. Esta tensão é expressa conforme a equação (2.4), onde a grandeza  $x_{qk}$  corresponde à reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador k.

$$\tilde{E}_{ak} = \tilde{V}_k + j x_{qk} \tilde{i}_k \quad (2.4)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Agrupando as equações (2.5), (2.6) e (2.7), e isolando os termos correspondentes à tensão terminal do gerador k, pode-se escrever as equações (2.8) e (2.9) para a tensão terminal em componentes de eixos direto e em quadratura.

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

$$V_{qk} = V_k \cos(\delta_k - \theta_k) = E'_{qk} - x'_{dk} I_{dk} = E_{ak} - x_{qk} I_{dk} \quad (2.9)$$

Utilizando as equações (2.8) e (2.9), podem ser obtidas as correntes de eixos direto e em quadratura do gerador k, como nas equações (2.10) e (2.11).

$$I_{dk} = \frac{E'_{qk} - V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.10)$$

$$I_{qk} = \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x_{qk}} \quad (2.11)$$

### 2.3 Potências Geradas e Fluxo de Potências no Sistema Multimáquinas

Um gerador síncrono conectado à uma barra  $k$  do sistema elétrico, fornece potências ativa e reativa que são transferidas para às cargas através de linhas de transmissão. Para a dedução das equações dessas potências, considere uma barra de geração genérica  $k$  conectada a outras duas barras  $m$  e  $l$ , através de linhas de transmissão, cujas impedâncias são respectivamente  $Z_{km} = R_{km} + jX_{km}$  e  $Z_{kl} = R_{kl} + jX_{kl}$ , conforme mostrado na Figura 2.2.

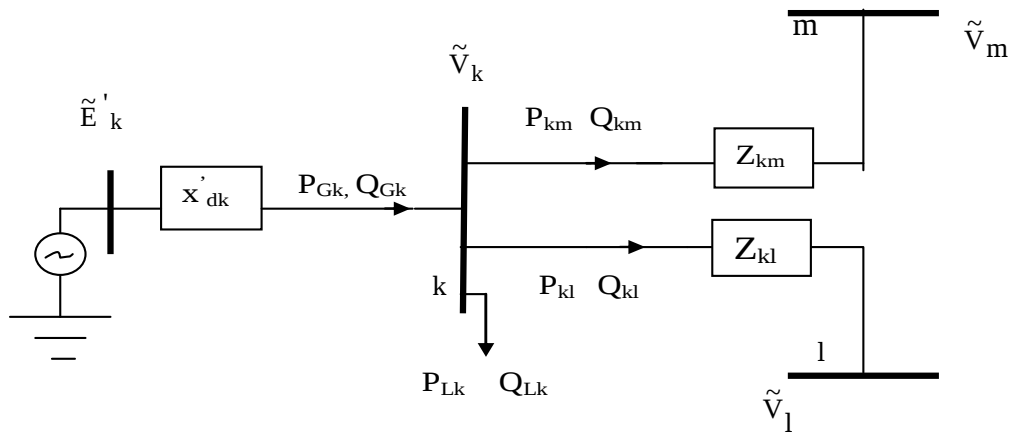


Figura 2.2 – Potências no Sistema Multimáquinas

As potências, ativa e reativa fornecidas pelos geradores podem ser obtidas através do cálculo da potência complexa entregue à barra  $k$ , de acordo com a equação (2.12).

$$\tilde{S}_{Gk} = \tilde{V}_k (\tilde{i}_k)^* = P_{Gk} + jQ_{Gk} \quad (2.12)$$

A substituição das equações (2.8) a (2.11) na equação (2.12) fornece as expressões para as potências ativa e reativa geradas, conforme as equações (2.13) e (2.14).

$$P_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] V_k^2 \sin 2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.13)$$

$$Q_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{2} \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \cdot [1 - \cos 2(\delta_k - \theta_k)] \quad (2.14)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio estável, as equações (2.13) e (2.14) podem ser linearizadas, e expressas em função das variações das diferenças angulares entre o ângulo do rotor da máquina  $k$  e o ângulo da tensão terminal da barra na qual o gerador síncrono encontra-se conectado,  $(\delta_k - \theta_k)$ , da magnitude da tensão interna em quadratura  $E'_{qk}$  e da magnitude da tensão terminal  $V_k$  (equações (2.15) e (2.16)).

$$\Delta P_{Gk} = A1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + A2_{Gk} \Delta E'_{qk} + A3_{Gk} \Delta V_k \quad (2.15)$$

$$A1_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial(\delta_k - \theta_k)} \right) = \frac{E'_{qk} V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k^2 \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \cos 2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.15.a)$$

$$A2_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.15.b)$$

$$A3_{Gk} = \left( \frac{\partial P_{Gk}}{\partial V_k} \right) = \frac{E'_{qk} \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \sin 2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.15.c)$$

$$\Delta Q_{Gk} = R1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + R2_{Gk} \Delta E'_{qk} + R3_{Gk} \Delta V_k \quad (2.16)$$

$$R1_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial(\delta_k - \theta_k)} \right) = -\frac{E'_{qk} V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - V_k^2 \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \sin 2(\delta_k - \theta_k) \quad (2.16.a)$$

$$R2_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{V_k \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.16.b)$$

$$R3_{Gk} = \left( \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial V_k} \right) = \frac{E'_{qk} \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{2V_k}{x'_{dk}} - V_k \left[ \frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right] \cdot [1 - \cos 2(\delta_k - \theta_k)] \quad (2.16.c)$$

As constantes  $A1_{Gk}$ ,  $A2_{Gk}$  e  $A3_{Gk}$  são os coeficientes de potência ativa do gerador  $k$ ,

enquanto os termos  $R_{1Gk}$ ,  $R_{2Gk}$  e  $R_{3Gk}$  são os coeficientes de potência reativa do gerador k.

Para obtenção dos coeficientes do sistema de potência externo, considere a linha de transmissão responsável pela ligação entre as barras k e m do sistema multimáquinas (Figura 2.2). A impedância da linha de transmissão entre as barras k e m ( $Z_{km}$ ), é representada conforme equação (2.17).

$$Z_{km} = R_{km} + jX_{km} = |Z_{km}| \angle (Z_{km}) \quad (2.17)$$

A linha de transmissão k-m é percorrida por uma corrente  $I_{km}$ , transferindo os fluxos ativo  $P_{km}$  e reativo  $Q_{km}$  (o índice km nos fluxos de potência indica a sua direção).

É importante ressaltar que neste trabalho o efeito das perdas ativas nas linhas de transmissão está sendo considerado, isto é, a parte real da impedância  $Z_{km}$  da linha de transmissão km não é nula.

A corrente na linha de transmissão que interliga a barra k à barra m pode ser expressa pela equação (2.18) e o fluxo da potência complexa com sentido da barra k para a barra m é dado pela equação (2.19).

$$\tilde{I}_{km} = \frac{(\tilde{V}_k - \tilde{V}_m)}{Z_{km}} \quad (2.18)$$

$$\tilde{S}_{km} = \tilde{V}_k (\tilde{I}_{km})^* = P_{km} + jQ_{km} \quad (2.19)$$

Da manipulação da equação (2.19) são obtidos os fluxos de potência ativo e reativo, dados pelas equações (2.20) e (2.21) respectivamente.

$$P_{km} = \frac{R_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (2.20)$$

$$Q_{km} = -\frac{R_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{X_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.21)$$

É importante lembrar que os efeitos da susceptância shunt ( $b_{km}^{sh}$ ) foram considerados

no elemento da diagonal principal,  $(X_{kk})$  da matriz de impedância do sistema de transmissão.

Para pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, as equações (2.20) e (2.21) podem ser linearizadas e assumem a forma das equações (2.22) e (2.23), respectivamente.

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m \quad (2.22)$$

$$A1_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial (\theta_{km})} \right) = \frac{R_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{X_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.22.a)$$

$$A2_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial (V_k)} \right) = \frac{R_{km}}{|Z_{km}|^2} (2V_k - V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_m \sin \theta_{km}) \quad (2.22.b)$$

$$A3_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial (V_m)} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k \cos \theta_{km}) + \frac{X_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k \sin \theta_{km}) \quad (2.22.c)$$

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \Delta \theta_{km} + R2_{km} \Delta V_k + R3_{km} \Delta V_m \quad (2.23)$$

$$R1_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial (\theta_{km})} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (2.23.a)$$

$$R2_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial (V_k)} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_m \sin \theta_{km}) + \frac{X_{km}}{|Z_{km}|^2} (2V_k - V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.23.b)$$

$$R3_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial (V_m)} \right) = -\frac{R_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k \sin \theta_{km}) - \frac{X_{km}}{|Z_{km}|^2} (V_k \cos \theta_{km}) \quad (2.23.c)$$

As constantes  $A1_{km}$ ,  $A2_{km}$  e  $A3_{km}$  são os coeficientes de potência ativa da linha de transmissão k-m, enquanto os termos  $R1_{km}$ ,  $R2_{km}$  e  $R3_{km}$  são os coeficientes de potência reativa da linha de transmissão k-m.

## 2.4 Balanço Nodal de Potências no Sistema Multimáquinas

O MSP para Sistema Multimáquinas tem como conceito fundamental a aplicação do balanço incremental de potências ativa e reativa em cada barra do sistema [7].

Considerando uma barra genérica  $k$ , conectada a outras duas barras  $l$  e  $m$  do sistema elétrico (conforme Figura 2.2), as variações das potências ativa e reativa geradas na barra  $k$  ( $\Delta P_{Gk}$  e  $\Delta Q_{Gk}$ ) devem ser iguais à somatória das variações dos fluxos ativo e reativo ( $\Delta P_{km}$  e  $\Delta Q_{km}$ ) e ( $\Delta P_{kl}$  e  $\Delta Q_{kl}$ ) nas linha  $k$ - $m$  e  $k$ - $l$  somada às variações das cargas ativas e reativas ( $\Delta P_{Lk}$  e  $\Delta Q_{Lk}$ ) conectadas à barra  $k$  (as cargas são representadas pelo modelo de impedância constante).

Para a generalização deste conceito, considere o conjunto de todas as barras conectadas à barra  $k$ , denominado  $\Omega_k$ . Desta forma, o balanço incremental de potências ativa e reativa na barra  $k$  é dado pelas equações (2.24) e (2.25).

$$\Delta P_{Gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta P_{km} = 0 \quad (2.24)$$

$$\Delta Q_{Gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta Q_{km} = 0 \quad (2.25)$$

É importante notar que as equações (2.24) e (2.25) são equações algébricas e traduzem o balanço nodal de potência na sua forma incremental em cada barra do sistema multimáquinas.

## 2.5 Tensão Interna da Máquina Síncrona

Considerando-se o circuito de campo do gerador síncrono, as variações da tensão interna são dadas pela equação (2.26), onde  $x_{dk}$  é a reatância síncrona de eixo direto,  $E_{fdk}$  é a tensão de campo do gerador síncrono e  $T'_{d0k}$  a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto [2,3].

$$T'_{d0k} \dot{E}'_{qk} = E_{fdk} - [E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk})I_{dk}] \quad (2.26)$$

Admitindo que o sistema será submetido a pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio, a equação (2.26) pode ser linearizada, resultando nas equações (2.27) mostradas na seqüência.

$$T'_{d0k} \Delta \dot{E}'_{qk} = \left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E_{fdk}} \right) \Delta E_{fdk} + \left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E'_{qk}} \right) \Delta E'_{qk} + \left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial I_{dk}} \right) \Delta I_{dk} \quad (2.27)$$

$$\left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E_{fdk}} \right) = 1 \quad (2.27.a)$$

$$\left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E'_{qk}} \right) = -1 \quad (2.27.b)$$

$$\left( \frac{\partial(T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial I_{dk}} \right) = -(x_{dk} - x'_{dk}) \quad (2.27.c)$$

Para uma completa dedução da forma incremental das variações da tensão interna do gerador síncrono, necessita-se linearizar a corrente de eixo direto do gerador k (equação (2.10)). Sua forma linearizada, expressa em função das variações da magnitude da tensão interna do gerador k ( $E'_{qk}$ ), pelas variações da magnitude da tensão terminal da barra k ( $V_k$ ) e pelas variações das diferenças angulares ( $\delta_k - \theta_k$ ), é mostrada no conjunto de equações (2.28).

$$\Delta I_{dk} = \left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial E'_{qk}} \right) \Delta E'_{qk} + \left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial V_k} \right) \Delta V_k + \left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial (\delta_k - \theta_k)} \right) \Delta (\delta_k - \theta_k) \quad (2.28)$$

$$\left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial E'_{qk}} \right) = \frac{1}{x'_{dk}} \quad (2.28.a)$$

$$\left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial V_k} \right) = - \frac{\cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.28.b)$$

$$\left( \frac{\partial I_{dk}}{\partial (\delta_k - \theta_k)} \right) = \frac{V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.28.c)$$

Substituindo as equações (2.28) na equação (2.27) tem-se a equação que expressa as variações da tensão interna do gerador k (equação (2.29)).

$$T'_{d0k} \Delta \dot{E}'_{qk} = \Delta E_{fdk} - \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \Delta E'_{qk} + K_{V_k} \Delta V_k - K_{A_k} \Delta (\delta_k - \theta_k) \quad (2.29)$$

$$K_{V_k} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.29.a)$$

$$K_{A_k} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) \cdot V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (2.29.b)$$

Os coeficientes  $K_{V_k}$  e  $K_{A_k}$  são denominados de coeficientes de reação de armadura do gerador síncrono k.

A reação de armadura no modelo de sensibilidade de potência é determinada pelas variações do ângulo da tensão interna do gerador síncrono ( $\delta_k$ ), da magnitude da tensão terminal ( $V_k$ ) e do ângulo da tensão terminal ( $\theta_k$ ), em contraste com o Modelo Linear de Heffron – Phillips onde a reação de armadura é associada somente às variações de  $\delta_k$  ponderada pelo termo  $K_4$ ; portanto, o Modelo de Sensibilidade de Potência fornece uma melhor representação da reação de armadura do gerador síncrono quando este é submetido a perturbações externas [7,8].

## 2.6 Tensão de Campo da Máquina Síncrona

A fim de se considerar os efeitos do enrolamento de campo, ou seja, a variação da tensão de excitação da máquina síncrona, se faz necessário introduzir o Sistema de Excitação (chamado comumente de Regulador Automático de Tensão - RAT) do gerador. O RAT tem como função regular a tensão de excitação da máquina síncrona ( $E_{fd}$ ), de acordo com as

variações da tensão terminal ( $V_k$ ) em relação a uma tensão de referência especificada ( $V_{refk}$ ), conforme Figura 2.3.

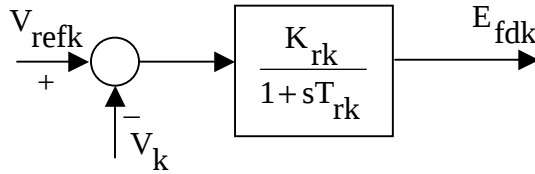


Figura 2.3 – Regulador Automático de Tensão

Dentre os vários modelos para o regulador automático de tensão, neste trabalho será considerado um de primeira ordem, representado por um ganho  $K_{rk}$  e por uma constante de tempo  $T_{rk}$ , muito utilizado em estudos da estabilidade a pequenas perturbações [2,3,4,5].

Com base no diagrama da Figura 2.3, pode-se escrever a expressão da tensão de campo  $E_{fd}$  nos domínios da frequência (equação (2.30)), e do tempo (equação (2.31)).

$$E_{fdk} = \frac{K_{rk}}{1 + sT_{rk}} (V_{refk} - V_k) \quad (2.30)$$

$$\dot{E}_{fdk} = \frac{-E_{fdk}}{T_{rk}} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} (V_{refk} - V_k) \quad (2.31)$$

Admitindo-se pequenos desvios em torno de um ponto de operação, a forma linearizada de (2.31) é mostrada na equação (2.32).

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = -\frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{refk} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k \quad (2.32)$$

## 2.7 Equações de Movimento da Máquina Síncrona

O comportamento das grandezas mecânicas de uma máquina síncrona, em função das grandezas elétricas, é obtido a partir da equação de balanço (swing) da máquina síncrona.

A partir da equação de oscilação do gerador síncrono [2,3,4], (equação diferencial de grau dois, que pode ser decomposta em duas equações diferenciais de grau um), as variações

do ângulo interno ( $\delta_k$ ) e velocidade angular do rotor ( $\omega_k$ ), linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio, são dadas por (2.33) e (2.34).

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} (\Delta P_{mk} - \Delta P_{Gk} - D_k \Delta \omega_k) \quad (2.33)$$

$$\Delta \dot{\delta}_k = \omega_0 \Delta \omega_k \quad (2.34)$$

Nas equações (2.33) e (2.34),  $\omega_0$  é a velocidade síncrona (377 rad/s),  $M_k (= 2H_k)$  é a constante de inércia da máquina síncrona e  $D$  é o coeficiente de amortecimento inerente ao sistema (este termo é normalmente designado por coeficiente de torque de amortecimento, e expressa as componentes de torques contrários às oscilações do rotor, relativas às inércias das cargas e sistemas de transmissão e distribuição e atritos não considerados) [3,6].

## 2.8 Representações do MSP para Sistemas Multimáquinas

O conjunto de equações algébricas (2.24) e (2.25) e diferenciais (2.29), (2.32), (2.33) e (2.34) permitem representar o sistema multimáquinas através do Modelo de Sensibilidade de Potência. Estas representações podem ser realizadas no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Para estas representações, considere um sistema multimáquinas constituído de  $ng$  geradores e  $nb$  barras.

As equações (2.35) mostram como é feita a representação do MSP para sistema multimáquinas no domínio do tempo.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.35)$$

$$\Delta x = \left[ \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \cdots \Delta \omega_{ng} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \cdots \Delta \delta_{ng} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta E'_{q1} \cdots \Delta E'_{q_{ng}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta E_{fd1} \cdots \Delta E_{fd_{ng}} \end{bmatrix} \right]^t \quad (2.35.a)$$

$$\Delta u = \left[ \begin{bmatrix} \Delta P_{m1} \cdots \Delta P_{m_{ng}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta V_{ref1} \cdots \Delta V_{ref_{ng}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \cdots \Delta P_{L_{nb}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \Delta Q_{L1} \cdots \Delta Q_{L_{nb}} \end{bmatrix} \right]^t \quad (2.35.b)$$

$$\Delta z = \left[ \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \cdots \Delta\theta_{nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \cdots \Delta V_{nb} \end{bmatrix} \right]^t \quad (2.35.c)$$

Os parâmetros do gerador síncrono e os coeficientes do modelo de sensibilidade de potência podem ser agrupados na forma matricial conforme mostra o conjunto de equações (2.36).

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & D_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & D_{ng} \end{bmatrix} \quad (2.36.a)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & M_{ng} \end{bmatrix} \quad (2.36.b)$$

$$[\omega_o] = \begin{bmatrix} \omega_o & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_o & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \omega_o \end{bmatrix}_{ng \times ng} \quad (2.36.c)$$

$$[x'_d] = \begin{bmatrix} x'_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x'_{d2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & x'_{dng} \end{bmatrix} \quad (2.36.d)$$

$$[T'_{do}] = \begin{bmatrix} T'_{do1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T'_{do2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & T'_{dong} \end{bmatrix} \quad (2.36.e)$$

$$[x_d] = \begin{bmatrix} x_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x_{d2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & x_{dng} \end{bmatrix} \quad (2.36.f)$$

$$[K_A] = \begin{bmatrix} K_{A1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{A2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & K_{Ang} \end{bmatrix} \quad (2.36.g)$$

$$[K_V] = \begin{bmatrix} K_{V1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{V2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & K_{Vng} \end{bmatrix} \quad (2.36.h)$$

$$[A1_G] = \begin{bmatrix} A1_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A1_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & A1_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.i)$$

$$[A2_G] = \begin{bmatrix} A2_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A2_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & A2_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.j)$$

$$[A3_G] = \begin{bmatrix} A3_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A3_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & A3_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.k)$$

$$[R1_G] = \begin{bmatrix} R1_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R1_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & R1_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.l)$$

$$[R2_G] = \begin{bmatrix} R2_{G1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R2_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & R2_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.m)$$

$$[R3_G] = \begin{bmatrix} R3_{G1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R3_{G2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & R3_{Gng} \end{bmatrix} \quad (2.36.n)$$

Com as equações (2.36), podem ser obtidas as equações diferenciais e algébricas mostradas nas equações (2.37) e (2.38).

$$\begin{bmatrix} \dot{[\Delta \omega]} \\ \dot{[\Delta \delta]} \\ \dot{[\Delta E'_q]} \\ \dot{[\Delta E_{fd}]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[D][M]^{-1} & -[A1_G][M]^{-1} & -[A2_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} \\ [\omega_o] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & -[K_A][T'_{do}]^{-1} & -[x_d][x'_d]^{-1}[T'_{do}]^{-1} & [T'_{do}]^{-1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -[T'_r]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} [A1_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[A3_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [K_A][T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} & [K_V][T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \quad (2.37)$$

$$+ \begin{bmatrix} [M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & [A2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix} + \quad (2.38)$$

$$+ \begin{bmatrix} [J4_1] & [J4_2] \\ [J4_3] & [J4_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [diag(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [diag(-1)]_{nb \times nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix}$$

A matriz J4 na representação descrita pela equação matricial (2.38), possui formação correspondente à matriz Jacobiana do fluxo de potência. O conjunto de equações (2.39)

mostra a lei de formação de cada submatriz componente da matriz J4.

$$[J4_1] = \begin{cases} J4_{1kk} = -A1_{Gk} - \sum_{k \neq m} A1_{km} \\ J4_{1km} = A1_{km} \end{cases} \quad (2.39.a)$$

$$[J4_2] = \begin{cases} J4_{2kk} = A3_{Gk} - \sum_{k \neq m} A2_{km} \\ J4_{2km} = -A3_{km} \end{cases} \quad (2.39.b)$$

$$[J4_3] = \begin{cases} J4_{3kk} = -R1_{Gk} - \sum_{k \neq m} R1_{km} \\ J4_{3km} = R1_{km} \end{cases} \quad (2.39.c)$$

$$[J4_4] = \begin{cases} J4_{4kk} = R3_{Gk} - \sum_{k \neq m} R2_{km} \\ J4_{4km} = -R3_{km} \end{cases} \quad (2.39.d)$$

Finalmente, com as equações (2.39), as equações (2.37) e (2.38) podem ser representadas em uma forma compacta, como em (2.40).

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} \cdot [\Delta u] \quad (2.40)$$

A representação em forma de espaço de estados é obtida através da eliminação do vetor de variáveis algébricas ( $\Delta z$ ), resultando na equação (2.41).

$$\dot{\Delta x} = (J1 - J2 \cdot J4^{-1} \cdot J3) \cdot \Delta x + (B1 - J2 \cdot J4^{-1} \cdot B2) \cdot \Delta u \quad (2.41)$$

Na equação (2.41), a matriz de estados (ou matriz de planta), será dada por  $(J1 - J2J4^{-1}J3)$ . A matriz de entradas B é dada por  $(B1 - J2J4^{-1}B2)$ .



solicitações da potência ativa. O modelo reativo responde corrigindo o valor absoluto das tensões ( $\Delta e'_q, \Delta v$ ), resultantes do balanço de potência reativa.

Pode-se também subdividir o diagrama de blocos da Figura 2.4 em outros dois subsistemas (conforme separação horizontal). O subsistema inferior é considerado rápido, o qual representa os efeitos das variáveis algébricas de rápida variação. O subsistema lento (porção superior), relaciona os efeitos das variáveis de estado, de lenta variação.

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 variáveis com o subsistema inferior (algébrico). As variáveis da rede ( $\Delta\theta, \Delta v$ ) são atualizadas rapidamente pelo sistema algébrico, enquanto as variáveis da máquina síncrona ( $\Delta\delta, \Delta e'_q$ ) são lentamente atualizadas pelo sistema diferencial.

A modelagem da rede elétrica é explícita no Modelo de Sensibilidade de Potência. No diagrama de blocos da Figura 2.4 esta modelagem fica representada nos modelos ativo e reativo da rede, expressos pelas equações (2.42) e (2.43) respectivamente. Note que esta representação permite observar claramente os acoplamentos ( $\Delta P - \Delta\theta$ ) e ( $\Delta Q - \Delta V$ ) [7].

$$[\Delta P_k] = [A]_{k \times k} \cdot [\Delta\theta_k] \quad (2.42)$$

$$[\Delta Q_k] = [R]_{k \times k} \cdot [\Delta V_k] \quad (2.43)$$

## 2.9 Variáveis de Estado Redundantes

Nos sistemas multimáquinas, quando entre as variáveis de estado consideradas estão a velocidade angular do rotor e o ângulo interno de cada gerador, a matriz de estados  $A$  possui um ou dois autovalores nulos. Quando da ocorrência desses autovalores, de acordo com o Primeiro Método de Lyapunov [3], nada se pode afirmar sobre a estabilidade do sistema [9].

Um autovalor nulo surge devido à falta de uma referência angular para o sistema elétrico. Este problema pode ser resolvido colocando uma máquina como referência angular. Neste trabalho a máquina de número 1 foi escolhida como referência. Desta maneira, eliminam-se da matriz  $A$ , a coluna e a linha referentes às variações do ângulo do rotor da

máquina 1 ( $\Delta\delta_1$ ), sendo que todos os ângulos do rotor das máquinas restantes serão expressos em função do ângulo da máquina 1. Portanto, tem-se novas variáveis de estado, estas expressas por diferenças angulares. Por exemplo, a variável de estado ângulo do rotor para a máquina 2 será ( $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$ ), e a matriz A será quadrada de ordem  $4k-1$ .

Um outro autovalor nulo ocorre quando se desprezam parcelas de torque elétrico proporcionais às variações da velocidade angular do rotor.

Este problema pode ser resolvido através da inserção de um termo de torque elétrico proporcional às variações da velocidade do rotor na equação de oscilação (equação “swing”), expressa pela equação (2.33). Este termo é ponderado pelo coeficiente de amortecimento inerente do sistema  $D_k$ .

## 2.10 Conclusões

Neste Capítulo foi apresentado o desenvolvimento de um modelo linear para a análise da estabilidade de sistemas elétricos submetidos a pequenas perturbações, denominado de Modelo de Sensibilidade de Potência, para sistemas multimáquinas. Tal modelo foi obtido a partir das equações que descrevem o comportamento mecânico e elétrico de um sistema de potência genérico.

Após o desenvolvimento matemático do modelo, foram feitas representações do Sistema Multimáquinas no domínio do tempo (na forma de espaço de estados), e no domínio da frequência (na forma de diagrama de blocos).

Observou-se da representação no espaço de estados que para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas é necessária a adoção de uma máquina para referência angular, eliminando desta maneira o autovalor nulo da matriz de estados.

Da representação em diagrama de blocos, notou-se que no modelo linear obtido surgem duas importantes decomposições.

A separação vertical do diagrama de blocos mostra a decomposição entre a parte ativa do sistema (lado esquerdo), e a parte reativa do sistema (lado direito).

Na separação horizontal do diagrama de blocos, vê-se a decomposição entre outros dois subsistemas, o subsistema lento (parte superior), correspondente às variáveis de estado do gerador síncrono, e o subsistema rápido (parte inferior), correspondente às variáveis algébricas da rede de transmissão.

No próximo Capítulo serão apresentados os procedimentos necessários para a

modelagem e conseqüente inclusão de dispositivos FACTS no Modelo de Sensibilidade de Potência.

### **3. Inclusão de Dispositivos FACTS no Modelo de Sensibilidade de Potência**

#### **3.1 Introdução**

Neste Capítulo será apresentada uma breve revisão sobre os conceitos relevantes à teoria e aplicação de dispositivos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems). Atenção especial será dada aos dispositivos TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor) e UPFC (Unified Power Flow Controller), sendo que modelos dinâmicos serão definidos e principalmente a implementação no Modelo de Sensibilidade de Potência será abordada. A facilidade de inclusão de novos dispositivos no Modelo de Sensibilidade de Potência desta forma será verificada.

#### **3.2 Dispositivos FACTS**

A necessidade de aumento da confiabilidade e a diminuição de custos na operação e planejamento de sistemas elétricos de potência exigiram interligações entre subsistemas regionais, nacionais e até mesmo internacionais [11]. Tais subsistemas possuem equipamentos com características dinâmicas diversas, o que evidencia a complexidade exigida no controle de um sistema interligado. Oscilações eletromecânicas entre áreas e grandes fluxos de potência constituem a principal limitação para uma total utilização da capacidade dos sistemas de transmissão.

Em princípio, a redundância na implementação de sistemas foi utilizada para aumentar sua confiabilidade desprezando portanto, o aspecto financeiro. Atualmente geração, transmissão e distribuição são gerenciadas por agentes diferentes, fato que aliado às forças de mercado e financeiras, exigem a máxima e efetiva utilização dos sistemas existentes. Assim, os sistemas elétricos passaram a operar próximos de seus limites térmicos e de estabilidade [12].

As dificuldades acima citadas tornaram-se motivo e foco de pesquisas de engenheiros de sistemas. O uso da tecnologia FACTS em sistemas elétricos de potência, sugerida em [13], se mostra com grande potencial de aplicação nos desafios atuais do setor elétrico. FACTS possuem como característica motivadora o uso de dispositivos baseados na eletrônica de potência, ou seja, chaves eletrônicas para altos níveis de tensão e pequeno tempo de

chaveamento quando comparado às oscilações eletromecânicas [14].

O principal aspecto benéfico dos dispositivos FACTS está relacionado à sua rápida atuação sobre os parâmetros que governam a operação dos sistemas elétricos de potência, a saber, impedância, tensão, ângulo e corrente. Para evidenciar esse fato considere a Figura 3.1 é mostrado o fluxo de potência ativa entre duas barras (k e m), conectadas por uma linha de transmissão com impedância  $Z_{km} = jX_{km}$ , e a atuação de um dispositivo que realiza compensação série simples através da reatância capacitiva  $X_C$ .

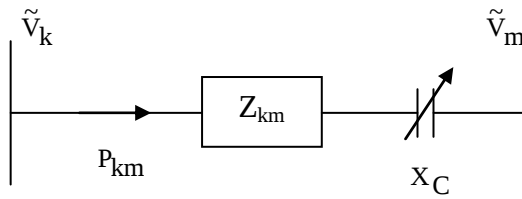


Figura 3.1 – Sistema de Transmissão de 2 Barras

Nestas condições, o fluxo de potência ativa na linha de transmissão é dado de acordo com a equação (3.1). Na Figura 3.2 é mostrado o comportamento do fluxo de potência para uma faixa de diferença angular de 0 a 180 graus para o sistema sem compensação e com uma compensação de 50% do valor da reatância da linha original.

$$P_{km} = \frac{V_k V_m}{X_{km} - X_C} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (3.1)$$

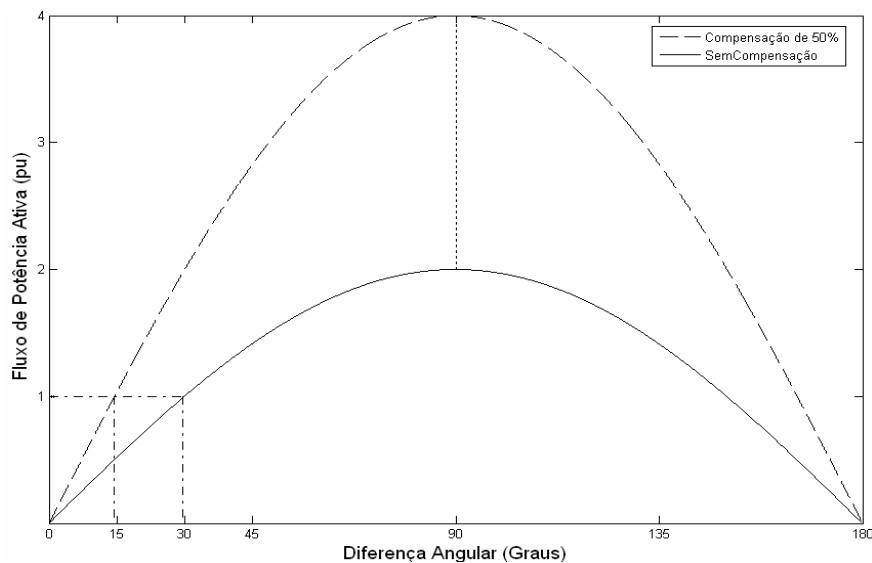


Figura 3.2 – Fluxo de Potência Ativa Com e Sem Compensação

Da Figura 3.2 pode-se concluir que a compensação aumentou a capacidade de transmissão da linha em 100%. Outro fato importante e desejado é que para um dado valor de fluxo de potência ativa, a margem de estabilidade de ângulo, ou seja, sua posição relativa antes de atingir 90 graus, aumentou consideravelmente.

O simples e hipotético exemplo anterior mostra os aspectos positivos da compensação série, a qual pode ser realizada por dispositivos FACTS como o TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) e o SSSC (Static Synchronous Series Compensator). Porém, os dispositivos FACTS não se resumem aos compensadores série e sim a uma grande variedade sendo que podem ser classificados de acordo com sua inserção no sistema.

Os dispositivos FACTS são divididos em quatro categorias: Controladores Série, Controladores Shunt, Controladores Combinados Série - Série e Controladores Combinados Série – Shunt [11,14].

Os Controladores Série, de maneira geral, inserem uma tensão em série à linha de transmissão. A tensão injetada, em quadratura com a corrente da linha, pode ser originada de uma reatância capacitiva variável como é o caso do TCSC e TSSR (Thyristor Switched Series Reactor), ou de uma fonte de tensão controlada em magnitude como o caso do SSSC. Tais controladores possuem grande aplicação para o controle do fluxo de potência nas linhas de transmissão e amortecimento de oscilações eletromecânicas quando equipados com dispositivos POD (Power Oscillation Damping). Aspectos relacionados ao uso e implementação de sinais estabilizantes suplementares para amortecimento de oscilações através do uso de dispositivos PSS (Power System Stabilizer [18]) e de dispositivos FACTS no Modelo de Sensibilidade de Potência serão abordados no Capítulo 4.

Os Controladores Shunt, por sua vez, injetam uma corrente em quadratura com a tensão da barra de conexão do sistema. Tal corrente pode ser advinda de reatâncias capacitivas ou indutivas variáveis como o caso do SVC (Static Var Compensator), ou de fontes controladas de tensão ou corrente como é o caso do STATCOM (Static Synchronous Compensator). Esses dispositivos são comumente empregados no controle do nível de tensão da barra em que estão conectados, pois realizam a injeção ou absorção de potência reativa da barra em questão.

Combinações entre os Controladores Série e Shunt podem ser realizadas de maneira a modificar todos os parâmetros que determinam o fluxo de potência. A grande vantagem destes dispositivos é oferecer um caminho para o fluxo de potência ativa entre os controladores, atuando sobre as potências ativa e reativa. O IPFC (Interline Power Flow Controller) é um exemplo de um Controlador Combinado Série – Série, que atua de maneira

efetiva sobre a potência reativa em múltiplas linhas de transmissão e realiza a transferência de potência ativa entre os controladores. Grandes perspectivas se têm com a aplicação do Controlador Combinado Série – Shunt UPFC (Unified Power Flow Controller), pois este pode atuar sobre todos os parâmetros que determinam o fluxo de potência de maneira isolada ou combinada.

A seguir os dispositivos TCSC e UPFC serão abordados em profundidade em relação à sua modelagem e implementação no Modelo de Sensibilidade de Potência.

### 3.3 Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

O comportamento em regime permanente e transitório de um sistema elétrico de potência pode ser melhorado com o uso de dispositivos de compensação de potência reativa. A utilização de capacitores série fixos para compensação da reatância indutiva da linha de transmissão foi realizada durante décadas. Porém, para uma efetiva melhora da estabilidade do sistema são exigidos altos níveis de compensação, o que pode ocasionar problemas como grandes variações de corrente e fluxo de potência devido a pequenas flutuações na diferença angular entre as barras da linha de transmissão [3].

Devido à possibilidade de aumento do grau de compensação de capacitores série chaveados mecanicamente quando da ocorrência de saída de uma linha de operação, nota-se melhor desempenho da compensação chaveada quando comparado à compensação fixa, pelo fato de aumentar os limites de estabilidade e diminuir as oscilações angulares rapidamente [16]. Entretanto, o advento de tiristores de alta potência proporcionou grande avanço na compensação de potência reativa e conseqüentemente, melhora na estabilidade de sistemas elétricos de potência. Deste fato surgem os dispositivos FACTS, sendo que destaque especial é dado ao TCSC por oferecer controle de fluxo de potência e amortecimento de oscilações [17].

O TCSC utiliza como princípio fundamental a injeção de uma reatância capacitiva variável, de forma a diminuir a queda de tensão indutiva e assim, aumentar a capacidade do sistema de transmissão e controlar o fluxo de potência na linha de transmissão. De maneira geral, trata-se de um compensador série composto por uma capacitância fixa em paralelo com um reator controlado a tiristores, conforme mostra a configuração básica deste dispositivo, apresentada na Figura 3.3.

A reatância capacitiva do TCSC pode assim, ser rapidamente e continuamente variada

de acordo com o tempo de condução dos tiristores.

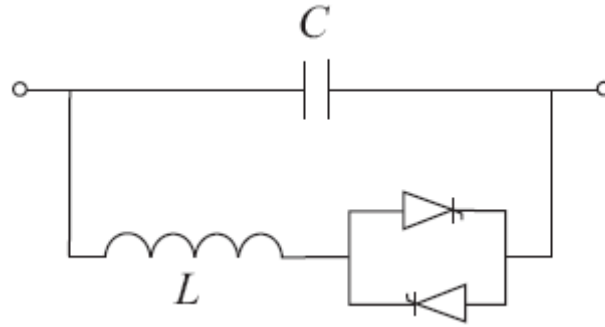


Figura 3.3 – Configuração Básica do TCSC

### 3.3.1 – Inclusão do TCSC no Modelo de Sensibilidade de Potência

Para estudos de estabilidade em relação a pequenas perturbações o TCSC pode ser modelado matematicamente como uma reatância variável ( $X_{CSC}$ ) que provoca a diminuição da reatância original da linha ( $X_{km}$ ), resultando em uma reatância efetiva ( $X_{kmef}$ ) como mostrada pela equação (3.2).

$$X_{kmef} = X_{km} - X_{CSC} \quad (3.2)$$

A Figura 3.4 mostra um modelo dinâmico linearizado para o TCSC onde o sinal de entrada são as variações da potência ativa ( $\Delta P_{km}$ ) na linha de transmissão onde o controlador está instalado [30,31]. A reatância do TCSC ( $X_{CSC}$ ) é modulada por um bloco de primeira ordem definido por um ganho estático ( $K_{TCSC}$ ) e uma constante de tempo ( $T_{TCSC}$ ), inerente ao tempo de processamento do sistema de controle do dispositivo. O sinal de referencia ( $\Delta X_{ref}$ ) pode ser utilizado para a inserção de um sinal estabilizante suplementar.

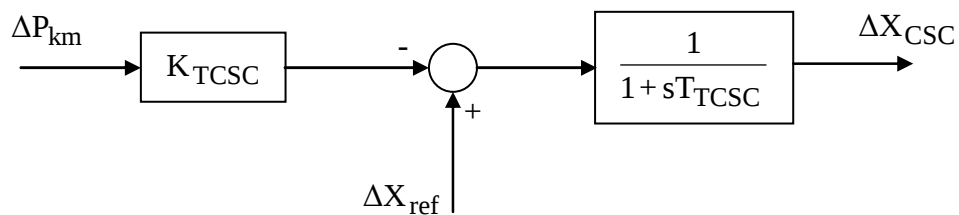


Figura 3.4– Modelo Dinâmico Linearizado do TCSC

A partir do modelo do TCSC, apresentado na Figura 3.4, é obtida a equação (3.3) que descreve o comportamento dinâmico do controlador. Desta maneira a reatância do TCSC se torna uma variável de estado do sistema elétrico.

$$\dot{\Delta X}_{CSC} = \frac{1}{T_{TCSC}} (\Delta X_{ref} - \Delta X_{CSC} - K_{TCSC} \Delta P_{km}) \quad (3.3)$$

A inclusão do TCSC no Modelo de Sensibilidade de Potência é feita através da consideração da equação (3.3) nas equações dinâmicas do modelo e com a colocação da reatância série constante do dispositivo ( $X_{CSC}$ ), de maneira a modificar os fluxos de potências ativa e reativa. Desta forma, a impedância de uma linha de transmissão entre quaisquer barras  $k$  e  $m$  do sistema elétrico, após a inclusão do TCSC, será dada pela equação (3.4).

$$Z_{kmef} = R_{km} + j(X_{km} - X_{CSC}) = R_{km} + jX_{kmef} \quad (3.4)$$

A corrente e a potência complexa que fluem nesta linha de transmissão são dadas pelas equações (3.5) e (3.6), respectivamente.

$$\tilde{I}_{km} = \frac{(\tilde{V}_k - \tilde{V}_m)}{Z_{kmef}} \quad (3.5)$$

$$\tilde{S}_{km} = \tilde{V}_k (\tilde{I}_{km})^* = P_{km} + jQ_{km} \quad (3.6)$$

De maneira semelhante ao procedimento realizado no Capítulo 2 para as equações (2.20) e (2.21), os fluxos de potência ativa e reativa na linha de transmissão com o TCSC instalado são dados pelas equações (3.7) e (3.8), respectivamente.

$$P_{km} = \frac{R_{km}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{(X_{km} - X_{CSC})}{|Z_{kmef}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (3.7)$$

$$Q_{km} = -\frac{R_{km}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{(X_{km} - X_{CSC})}{|Z_{kmef}|^2} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.8)$$

As equações (3.9) e (3.10) denotam a forma linearizada e os respectivos coeficientes ativos e reativos das equações (3.7) e (3.8).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m + A4_{km} \Delta X_{CSC} \quad (3.9)$$

$$A1_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_{km}} \right) = \frac{R_{km}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{X_{kmef}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.9.a)$$

$$A2_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \right) = \frac{R_{km}}{|Z_{kmef}|^2} (2V_k - V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_{kmef}}{|Z_{kmef}|^2} (V_m \sin \theta_{km}) \quad (3.9.b)$$

$$A3_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \right) = \frac{-R_{km}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k \cos \theta_{km}) + \frac{X_{kmef}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k \sin \theta_{km}) \quad (3.9.c)$$

$$A4_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial X_{CSC}} \right) = \frac{2R_{km}X_{kmef}}{|Z_{kmef}|^4} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{(-R_{km}^2 + X_{kmef}^2)}{|Z_{kmef}|^4} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (3.9.d)$$

Nota-se que devido à inclusão do TCSC são definidos dois novos coeficientes, um coeficiente ativo  $A4_{km}$  e outro coeficiente reativo  $R4_{km}$ , que ponderam respectivamente as variações dos fluxos de potências ativa e reativa devido às variações na reatância do TCSC.

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \Delta \theta_{km} + R2_{km} \Delta V_k + R3_{km} \Delta V_m + R4_{km} \Delta X_{CSC} \quad (3.10)$$

$$R1_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_{km}} \right) = \frac{-R_{km}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k V_m \cos \theta_{km}) + \frac{X_{kmef}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (3.10.a)$$

$$R2_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} \right) = \frac{-R_{km}}{|Z_{kmef}|^2} (V_m \sin \theta_{km}) + \frac{X_{kmef}}{|Z_{kmef}|^2} (2V_k - V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.10.b)$$

$$R3_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} \right) = \frac{-R_{km}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k \sin \theta_{km}) - \frac{X_{kmef}}{|Z_{kmef}|^2} (V_k \cos \theta_{km}) \quad (3.10.c)$$

$$R4_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial X_{csc}} \right) = \frac{-2R_{km}X_{kmef}}{|Z_{kmef}|^4} (V_k V_m \sin \theta_{km}) + \frac{(-R_{km}^2 + X_{kmef}^2)}{|Z_{kmef}|^4} (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.10.d)$$

O comportamento dinâmico do TCSC é completamente descrito pela equação (3.11) obtida da substituição de (3.9) em (3.3).

$$\dot{\Delta X_{CSC}} = K1_{CSC} \Delta X_{CSC} + K2_{CSC} \Delta \theta_{km} + K3_{CSC} \Delta V_k + K4_{CSC} \Delta V_m + K5_{CSC} \Delta X_{ref} \quad (3.11)$$

$$K1_{CSC} = \frac{(-K_{TCSC} A4_{km} - 1)}{T_{TCSC}} \quad (3.11.a)$$

$$K2_{CSC} = \frac{-K_{TCSC} A1_{km}}{T_{TCSC}} \quad (3.11.b)$$

$$K3_{CSC} = \frac{-K_{TCSC} A2_{km}}{T_{TCSC}} \quad (3.11.c)$$

$$K4_{CSC} = \frac{-K_{TCSC} A3_{km}}{T_{TCSC}} \quad (3.11.d)$$

$$K5_{CSC} = \frac{1}{T_{TCSC}} \quad (3.11.e)$$

Para um sistema multimáquinas com múltiplos dispositivos TCSC instalados, as constantes definidas na equação (3.11) podem ser agrupadas na forma matricial de acordo com o conjunto de equações (3.12). Para isso considere um sistema multimáquinas com  $ng$  geradores,  $nb$  barras e  $nt$  dispositivos TCSC instalados em linhas de transmissão que

interligam barras iniciais (designadas por “nb inicial”) e finais (designadas por “nb final”), definidas de acordo com o sentido do fluxo de potência na referida linha de transmissão.

$$[K1_{CSC}] = \begin{bmatrix} K1_{CSC1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K1_{CSC2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & K1_{CSCnt} \end{bmatrix} \quad (3.12.a)$$

$$[K2_{CSC}] = \begin{cases} K2_{CSC}(nt, nb \text{ inicial}) = -K2_{CSC} \\ K2_{CSC}(nt, nb \text{ final}) = K2_{CSC} \\ K2_{CSC}(nt, nb) = 0 \end{cases} \quad (3.12.b)$$

$$[K34_{CSC}] = \begin{cases} K34_{CSC}(nt, nb \text{ inicial}) = K3_{CSC} \\ K34_{CSC}(nt, nb \text{ final}) = K4_{CSC} \\ K34_{CSC}(nt, nb) = 0 \end{cases} \quad (3.12.c)$$

$$[K5_{CSC}] = \begin{bmatrix} K5_{CSC1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K5_{CSC2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & K5_{CSCnt} \end{bmatrix} \quad (3.12.d)$$

O conjunto de equações (3.12) e a equação matricial (2.37) podem ser agrupados de forma a obter-se a equação matricial (3.13), que representa o comportamento das variáveis dinâmicas do Modelo de Sensibilidade de Potência para sistemas multimáquinas com a consideração de múltiplos dispositivos TCSC. Para a representação das equações algébricas do modelo considere as equações (3.14) e (3.15) que mostram a regra de formação das submatrizes  $A4_{Tkm}$  e  $R4_{Tkm}$ , que representam, respectivamente, o efeito da reatância do TCSC no balanço de potência ativa e reativa em cada barra do sistema.

$$\begin{bmatrix} \dot{[\Delta \omega]} \\ \dot{[\Delta \delta]} \\ \dot{[\Delta E'_q]} \\ \dot{[\Delta E_{fd}]} \\ \dot{[\Delta X_{CSC}]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1] & [0]_{4ng \times nt} \\ [0]_{nt \times 4ng} & [K1_{CSC}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta X_{CSC}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J2] \\ [K2_{CSC}] & [K34_{CSC}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \quad (3.13)$$

$$+ \begin{bmatrix} [B1] & [0]_{4ng \times nt} \\ [0]_{nt \times 4ng} & [K5_{CSC}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta X_{ref}] \end{bmatrix}$$

$$[A4_{Tkm}] = \begin{cases} A4_{Tkm}(nb \text{ inicial}, nt) = -A4_{km} \\ A4_{Tkm}(nb \text{ final}, nt) = -A4_{mk} \\ A4_{Tkm}(nb, nt) = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

$$[R4_{Tkm}] = \begin{cases} R4_{Tkm}(nb \text{ inicial}, nt) = -R4_{km} \\ R4_{Tkm}(nb \text{ final}, nt) = -R4_{mk} \\ R4_{Tkm}(nb, nt) = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Com as equações (3.9), (3.10) e (3.15) é obtida a forma matricial das equações algébricas, como mostrado em (3.16); tais equações algébricas representam o balanço de fluxo de potências ativa e reativa ao longo do tempo.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J3] & \begin{bmatrix} [A4_{Tkm}] \\ [R4_{Tkm}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta X_{CSC}] \end{bmatrix} + [J4] \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B2] & \begin{bmatrix} [0]_{ng \times nt} \\ [0]_{ng \times nt} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta X_{ref}] \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

A matriz J4 possui a mesma lei de formação dada no Capítulo 2, pelo conjunto de equações (2.39), sendo que somente os coeficientes são modificados devido a presença da reatância do dispositivo TCSC. Assim, as equações (3.14) e (3.16), podem ser expressas de uma maneira compacta conforme mostrado em (3.17), de maneira que a representação no

espaço de estados é obtida da eliminação do vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$ , fornecendo a equação (3.18).

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x_T} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_T & J2_T \\ J3_T & J4_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_T \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_T \\ B2_T \end{bmatrix} \cdot [\Delta u_T] \quad (3.17)$$

$$\dot{\Delta x_T} = (J1_T - J2_T \cdot J4_T^{-1} \cdot J3_T) \cdot \Delta x_T + (B1_T - J2_T \cdot J4_T^{-1} \cdot B2_T) \cdot \Delta u_T \quad (3.18)$$

### 3.4 Unified Power Flow Controller (UPFC)

A atuação dos dispositivos FACTS nos parâmetros que determinam o fluxo de potência em uma linha de transmissão do Sistema Elétrico de Potência pode ser obtida de acordo com sua categoria, conforme descrito anteriormente. A representação de um dispositivo de atuação generalizada, representando a ação de vários controladores existentes deu origem ao UPFC. Este dispositivo pode atuar sobre todos os parâmetros que determinam o fluxo de potência em uma linha de transmissão, ou seja, pode controlar a tensão terminal, o ângulo e a reatância da linha de transmissão [19]. Portanto, através de condições simplificadoras, pode-se obter o funcionamento de outros dispositivos FACTS tais como o STATCOM e o SSSC [20].

Os dispositivos FACTS podem ser divididos em duas gerações de acordo com a maneira de compensação utilizada. A primeira geração representada principalmente pelos dispositivos TCSC e SVC é caracterizada pela utilização de bancos de capacitores ou reatores chaveados por chaves tiristoras. Portanto, para essa geração é necessária uma fonte externa de energia reativa. O SSSC, STATCOM e UPFC compõem a segunda geração, a qual utiliza conversores fonte de tensão, constituídos basicamente de chaves tiristoras auto-comutadas, como por exemplo, o GTO (Gate-Turn Off) para obter a energia reativa necessária à compensação.

O UPFC é composto de dois conversores fonte de tensão, inseridos em série e paralelo com a linha de transmissão, interligados por um capacitor (C) conforme mostrado na Figura 3.5.

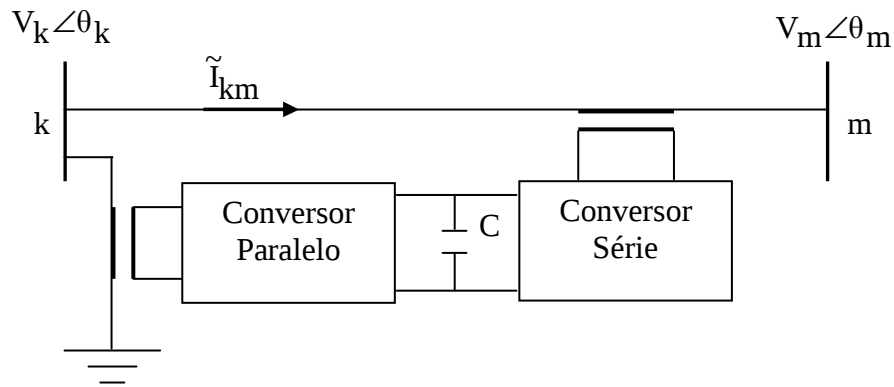


Figura 3.5 – Composição Básica do UPFC

O conversor série realiza a função principal do UPFC, inserindo uma tensão série com a linha de transmissão que pode ser controlada em magnitude e ângulo. Desta forma, de acordo com a diferença angular entre a tensão inserida e a corrente na linha de transmissão, esse controlador pode absorver ou injetar potência ativa e/ou reativa no sistema de transmissão [21].

O conversor paralelo possui como principal função disponibilizar a potência ativa necessária para o conversor série transferir ao sistema de transmissão, através do capacitor de interligação. Este conversor também pode absorver ou gerar potência reativa através de sua interligação com a barra inicial de instalação do UPFC, constituindo portanto, uma fonte controlável de reativos, efetuando uma função semelhante à realizada pelo dispositivo SVC [19].

Para a correta inclusão do dispositivo UPFC no Modelo de Sensibilidade de Potência é necessário adotar uma modelagem para os conversores série e paralelo anteriormente descritos. Nessa dissertação será utilizado o Modelo de Injeção de Potência para o UPFC [22].

### 3.4.1 – Modelo de Injeção de Potência para o UPFC

De acordo com as características de cada conversor acima descrito, pode-se representar o conversor série por uma fonte de tensão ideal  $\tilde{V}_s$  e o conversor paralelo por uma fonte de corrente ideal  $\tilde{I}_{sh}$ , conforme mostrado na Figura 3.6, para a inclusão do UPFC na linha de transmissão entre as barras  $k$  e  $m$  representada por uma impedância  $Z_{km} = R_{km} + jX_{km}$ . [23].

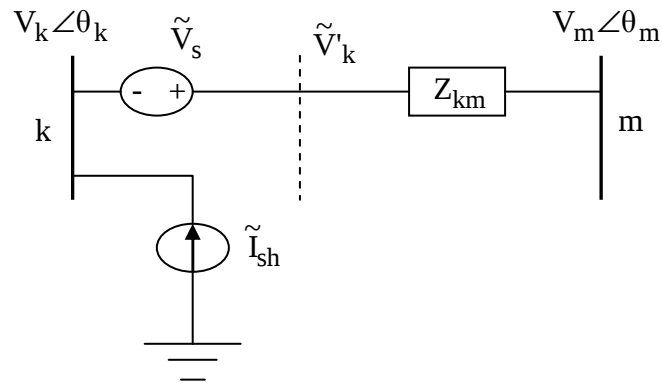


Figura 3.6 – Representação do UPFC para o Modelo de Injeção de Potência

A tensão fictícia  $\tilde{V}'_k$  representa o efeito da inclusão do UPFC na tensão terminal da barra  $k$ . A tensão série inserida pelo UPFC pode ser controlada em magnitude, através do parâmetro  $r$ , e defasamento angular através do parâmetro  $\gamma$ , conforme evidenciado na equação (3.19) e no diagrama fasorial da Figura 3.7.

$$\tilde{V}_s = r\tilde{V}_k e^{j\gamma} = rV_k e^{j(\theta_k + \gamma)} \quad (3.19)$$

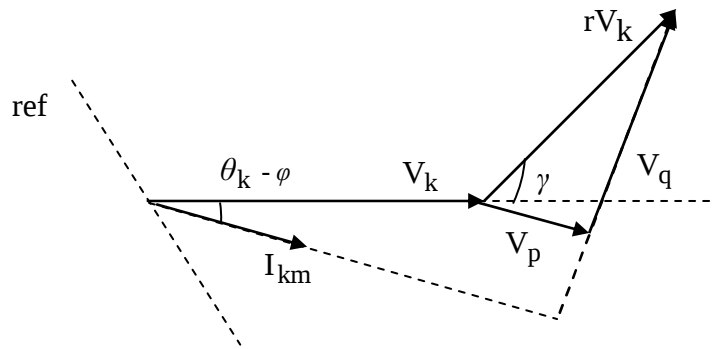


Figura 3.7 – Diagrama Fasorial da Tensão  $V_k$  Devido a Inclusão da Tensão Série

A tensão série inserida pelo UPFC pode ser decomposta em duas parcelas conforme mostrado na Figura 3.7, uma parcela em fase ( $V_p$ ) e outra em quadratura ( $V_q$ ), com a corrente da linha de transmissão. Ainda desta Figura é possível definir os parâmetros  $r$  e  $\gamma$  em função das variáveis do sistema e do UPFC, de acordo com as equações (3.20) e (3.21), respectivamente [19,20].

$$r = \frac{\sqrt{V_p^2 + V_q^2}}{V_k} \quad (3.20)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{V_q}{V_p}\right) - \theta_k + \varphi \quad (3.21)$$

A fim de obter as injeções de potência em cada barra de instalação do UPFC, a fonte de tensão série é transformada em uma fonte de corrente série ideal  $\tilde{I}_s$ , descrita pela equação (3.22), conforme mostrado na Figura 3.8.

$$\tilde{I}_s = \frac{V_k e^{j(\theta_k)} + r V_k e^{j(\theta_k + \gamma)}}{R_{km} + jX_{km}} V_m e^{j(\theta_m)} \quad (3.22)$$

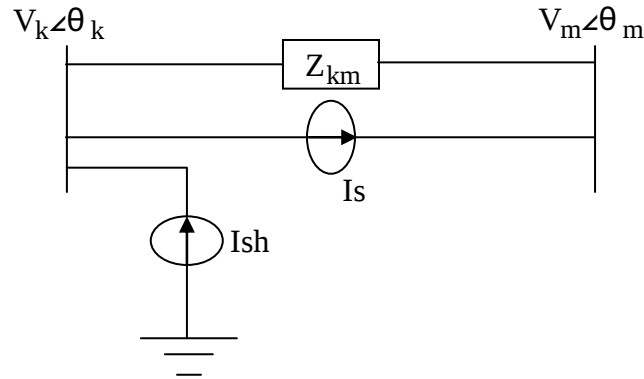


Figura 3.8 – Representação da Fonte de Tensão Série por uma Fonte de Corrente

A potência complexa injetada pelo conversor série é dada pela equação (3.23).

$$\tilde{S}_s = \tilde{V}_s (\tilde{I}_s)^* \quad (3.23)$$

As potências ativa ( $P_s$ ) e reativa ( $Q_s$ ) injetadas pelo conversor série são dadas pelas equações (3.24) e (3.25), respectivamente.

$$P_s = \frac{r^2(V_k)^2 R_{km} + r(V_k)^2 (R_{km} \cos \gamma - X_{km} \sin \gamma) + rV_k V_m [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)]}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \quad (3.24)$$

$$Q_s = \frac{r^2(V_k)^2 X_{km} - r(V_k)^2 (R_{km} \sin \gamma + X_{km} \cos \gamma) - rV_k V_m [R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)]}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \quad (3.25)$$

A corrente shunt injetada pelo conversor paralelo pode ser decomposta em duas parcelas, sendo uma em fase ( $I_p$ ) e outra em quadratura ( $I_q$ ), com a tensão terminal da barra inicial de instalação do UPFC, de acordo com a equação (3.26). Tal procedimento é realizado para representação da possibilidade de controle do nível de tensão através da inserção de reativos pelo conversor paralelo, conforme descrito na seção anterior.

$$\tilde{I}_{sh} = (I_p - jI_q) e^{j\theta_k} \quad (3.26)$$

Aplicando um procedimento semelhante ao realizado para o conversor série, é obtida a potência complexa injetada pelo conversor paralelo e conseqüentemente, a injeção ativa ( $P_{sh}$ ) e reativa deste conversor ( $Q_{sh}$ ), dadas respectivamente pelas equações (3.27), (3.28) e (3.29).

$$\tilde{S}_{sh} = \tilde{V}_k (\tilde{I}_{sh})^* \quad (3.27)$$

$$P_{sh} = -V_k I_p \quad (3.28)$$

$$Q_{sh} = -V_k I_q \quad (3.29)$$

Conforme descrito na seção anterior, a principal função do conversor paralelo é fornecer a potência ativa requerida pelo conversor série; portanto, a potência ativa consumida pelo conversor série é injetada pelo conversor paralelo e vice e versa. Desta forma, através da manipulação das equações (3.29) e (3.24) é obtida a equação (3.30) que descreve a corrente  $I_p$

em função dos parâmetros do UPFC e do sistema elétrico de potência. Assim são obtidos os três parâmetros de controle do UPFC, sendo a tensão em fase com a corrente da linha de transmissão ( $V_p$ ), a tensão em quadratura com a corrente da linha de transmissão ( $V_q$ ) e a corrente em quadratura com a tensão terminal da barra inicial de instalação do UPFC ( $I_q$ ).

$$i_p = \left\{ \frac{r^2 V_k R_{km} + r V_k (R_{km} \cos \gamma - X_{km} \sin \gamma) + r V_m [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)]}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \right\} \quad (3.30)$$

O próximo passo para obtenção das injeções de potência do UPFC é dividir a fonte de corrente série em duas fontes paralelas de corrente, conforme mostrado na Figura 3.9.

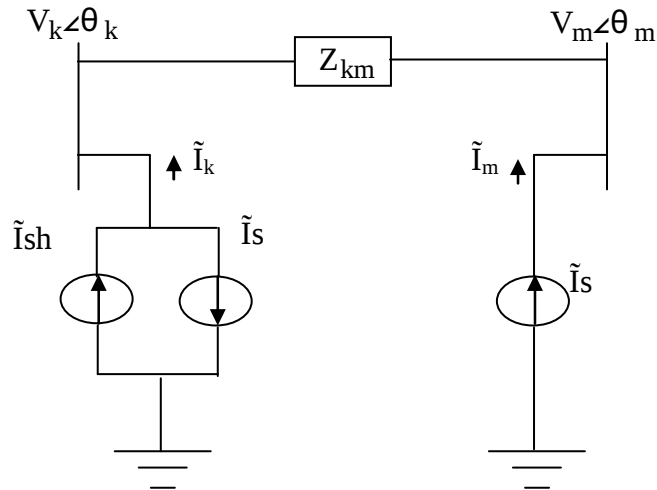


Figura 3.9 – Transformação da Fonte de Corrente Série

As injeções de corrente  $I_k$  e  $I_m$  podem ser obtidas do diagrama mostrado na Figura 3.9 e das equações (3.26) e (3.22) e são dadas pelas equações (3.31) e (3.32), respectivamente.

$$\tilde{I}_k = \frac{-r^2 V_k R_{km} - r V_k (R_{km} \cos \gamma - X_{km} \sin \gamma) - r V_m [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)]}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} e^{j\theta_k} - \left[ j I_q e^{j\theta_k} \right] - \frac{r V_k e^{j\theta_k}}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} (R_{km} - j X_{km}) \quad (3.31)$$

$$\tilde{I}_m = \tilde{I}_s = \frac{rV_k e^{j\theta_k}}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} (R_{km} - jX_{km}) \quad (3.32)$$

As injeções de potência ativa ( $P_k$ ) e reativa ( $Q_k$ ) para a barra inicial  $k$  de instalação do UPFC podem ser obtidas da potência complexa injetada nesta barra, de acordo com o conjunto de equações (3.33).

$$\tilde{S}_k = \tilde{V}_k (\tilde{I}_k)^* \quad (3.33)$$

$$P_k = \frac{r^2(V_k)^2 R_{km} + r(V_k)^2 (2R_{km} \cos \gamma) + rV_k V_m [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)]}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \quad (3.33.a)$$

$$Q_k = \frac{-r(V_k)^2 [R_{km} \sin(\gamma) - X_{km} \cos(\gamma)]}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} - V_k I_q \quad (3.33.b)$$

Realizando um procedimento semelhante para a barra final  $m$  de instalação do UPFC, são obtidas as injeções de potência ativa ( $P_m$ ) e reativa ( $Q_m$ ) para essa barra, de acordo com o conjunto de equações (3.34).

$$\tilde{S}_m = \tilde{V}_m (\tilde{I}_m)^* \quad (3.34)$$

$$P_m = \frac{-rV_k V_m [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)]}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \quad (3.34.a)$$

$$Q_m = \frac{rV_k V_m [R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)]}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \quad (3.34.b)$$

Os conjuntos de equações (3.33) e (3.34) definem o Modelo de Injeção de Potência para o UPFC instalado entre as barras  $k$  e  $m$ , que pode ser representado de maneira simples pelo diagrama da Figura 3.10.

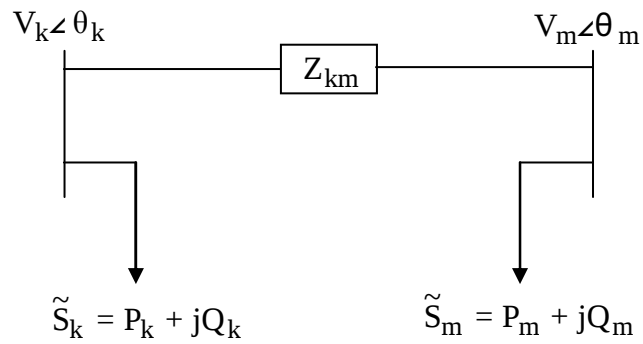


Figura 3.10 – Modelo de Injeção de Potência para o UPFC

O escopo deste trabalho é o estudo da ação dos dispositivos FACTS na estabilidade a pequenas perturbações e portanto, as equações (3.33) e (3.34) podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio estável, para a obtenção dos coeficientes ativos e reativos para o Modelo de Injeção de Potência do UPFC, mostrados de forma integral no Apêndice II.

### 3.4.2 – Inclusão do UPFC no Modelo de Sensibilidade de Potência

Para inclusão do UPFC no Modelo de Sensibilidade de Potência é necessária a representação de um modelo dinâmico para os parâmetros de controle do UPFC. Nesta seção serão definidos modelos simples, representados por blocos de primeira ordem, para expressar o comportamento dinâmico de  $V_p$ ,  $V_q$  e  $I_q$ . Para os parâmetros  $V_p$  e  $V_q$ , o bloco é definido pelas constantes de tempo  $T_{Vp}$  e  $T_{Vq}$  respectivamente, representando o atraso inerente ao disparo dos tiristores constituintes do conversor série do UPFC. Para o caso do parâmetro  $I_q$ , define-se de maneira semelhante uma constante de  $T_{Iq}$  e um ganho estático  $K_{Iq}$ , responsável pela regulação da tensão terminal da barra inicial de instalação do UPFC. Estes modelos são apresentados de maneira compacta no diagrama de blocos da Figura 3.11, que utiliza como entrada o sinal das variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão de instalação do UPFC, dado pela equação (3.35).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m \quad (3.35)$$

Os três parâmetros de controle do UPFC podem ser definidos como variáveis de estado do sistema elétrico, através da manipulação do diagrama de blocos mostrado na Figura 3.11. Pode-se escolher um controlador em particular para a entrada do fluxo de potência, ou

todos ao mesmo tempo.

Os conjuntos de equações (3.36), (3.37) e (3.38) definem as equações que representam o comportamento dinâmico dos parâmetros de controle de  $n$  dispositivos UPFC, instalados entre uma barra inicial  $k$  e outra final  $m$  em um sistema multimáquinas de  $ng$  geradores,  $nb$  barras. Neste equacionamento o UPFC opera no modo  $V_p$ , ou seja, o sinal de potência é inserido ao controlador do parâmetro  $V_p$ .

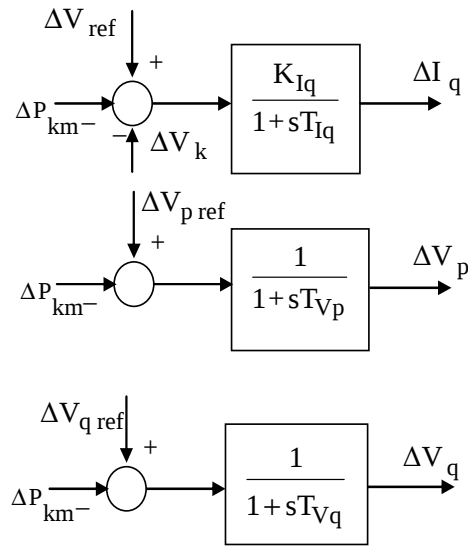


Figura 3.11 – Modelo Dinâmico do UPFC – Blocos de Primeira Ordem

$$\dot{\Delta V}_{pn} = K_{p1}\Delta V_{pn} + K_{p2}\Delta\theta_{km} + K_{p3}\Delta V_k + K_{p3}\Delta V_m + K_{p4}\Delta V_{p\text{ refn}} \quad (3.36)$$

$$[K_{p1}] = \text{diagonal} \left( -\frac{1}{T_{Vpn}} \right) \quad (3.36.a)$$

$$[K_{p2}] = \begin{cases} K_{p2}(n \times k) = \frac{-A1_{km}}{T_{Vpn}} \\ K_{p2}(n \times m) = \frac{A1_{km}}{T_{Vpn}} \\ K_{p2}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (3.36.b)$$

$$[K_{p3}] = \begin{cases} K_{p3}(n \times k) = \frac{-A2_{km}}{T_{Vqn}} \\ K_{p3}(n \times m) = \frac{-A3_{km}}{T_{Vpn}} \\ K_{p3}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (3.36.c)$$

$$[K_{p4}] = \text{diagonal} \left( \frac{1}{T_{Vpn}} \right) \quad (3.36.d)$$

$$\dot{\Delta V}_{qn} = K_{q1} \Delta V_{qn} + K_{q2} \Delta V_{q \text{ refn}} \quad (3.37)$$

$$[K_{q1}] = \text{diagonal} \left( -\frac{1}{T_{Vqn}} \right) \quad (3.37.a)$$

$$[K_{q2}] = \text{diagonal} \left( \frac{1}{T_{Vqn}} \right) \quad (3.37.b)$$

$$\dot{\Delta I}_{qn} = K_{i1} \Delta I_{qn} + K_{i2} \Delta V_{\text{refn}} - K_{i2} \Delta V_k \quad (3.38)$$

$$[K_{i1}] = \text{diagonal} \left( -\frac{K_{Iqn}}{T_{Iqn}} \right) \quad (3.38.a)$$

$$[K_{i2}] = \text{diagonal} \left( \frac{K_{Iqn}}{T_{Iqn}} \right) \quad (3.38.b)$$

As equações algébricas do modelo são obtidas do balanço instantâneo de potências ativa e reativa para cada barra do sistema, conforme mostrado nas equações (3.39) e (3.40), respectivamente. Nas equações (3.39) e (3.40),  $\Delta P_k$  e  $\Delta P_m$  são, respectivamente, as injeções lineares de potência ativa para a barra inicial e final de instalação do UPFC, bem como  $\Delta Q_k$  e

$\Delta Q_m$  são as injeções de potência reativa para a barra inicial e final de instalação do UPFC. Portanto, se a barra  $k$  em questão for uma barra inicial de instalação,  $\Delta P_m$  e  $\Delta Q_m$  serão nulos; porém, se esta for uma barra final, então  $\Delta P_k$  e  $\Delta Q_k$  é que serão nulos.

$$\Delta P_{Gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} (\Delta P_{km}) - \Delta P_k - \Delta P_m = 0 \quad (3.39)$$

$$\Delta Q_{Gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} (\Delta Q_{km}) - \Delta Q_k - \Delta Q_m = 0 \quad (3.40)$$

As expressões de  $\Delta P_k$ ,  $\Delta Q_k$ ,  $\Delta P_m$  e  $\Delta Q_m$  são mostradas no Apêndice II como também seus respectivos coeficientes. Para facilidade de leitura são aqui apresentadas novamente, pelas equações (3.41), (3.42), (3.43) e (3.44), respectivamente.

$$\Delta P_k = A1_{Ui} \Delta \theta_{km} + A2_{Ui} \Delta V_k + A3_{Ui} \Delta V_m + A4_{Ui} \Delta V_p + A5_{Ui} \Delta V_q + A6_{Ui} \Delta I_q \quad (3.41)$$

$$\Delta Q_k = R1_{Ui} \Delta \theta_{km} + R2_{Ui} \Delta V_k + R3_{Ui} \Delta V_m + R4_{Ui} \Delta V_p + R5_{Ui} \Delta V_q + R6_{Ui} \Delta I_q \quad (3.42)$$

$$\Delta P_m = A1_{Uf} \Delta \theta_{km} + A2_{Uf} \Delta V_k + A3_{Uf} \Delta V_m + A4_{Uf} \Delta V_p + A5_{Uf} \Delta V_q + A6_{Uf} \Delta I_q \quad (3.43)$$

$$\Delta Q_m = R1_{Uf} \Delta \theta_{km} + R2_{Uf} \Delta V_k + R3_{Uf} \Delta V_m + R4_{Uf} \Delta V_p + R5_{Uf} \Delta V_q + R6_{Uf} \Delta I_q \quad (3.44)$$

As equações (3.36), (3.37) e (3.38) podem ser agrupadas à equação (2.37), mostrada no Capítulo 2, que expressa as variáveis de estado de um sistema multimáquinas com  $ng$  geradores e  $nb$  barras em função de todas as variáveis, de estado e algébricas, envolvidas na modelagem. A equação (3.45) mostra o agrupamento citado para a inclusão de  $n$  dispositivos UPFC. Novamente, a facilidade de inclusão de novos dispositivos no MSP é evidenciada, pois o equacionamento anterior não é perdido a cada inclusão de dispositivos FACTS ou PSS.

$$\begin{bmatrix} \dot{[\Delta \omega]} \\ \dot{[\Delta \delta]} \\ \dot{[\Delta E'_q]} \\ \dot{[\Delta E_{fd}]} \\ \dot{[\Delta V_p]} \\ \dot{[\Delta V_q]} \\ \dot{[\Delta I_q]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1] & [0]_{4ng \times 3n} \\ [0]_{3n \times 4ng} & \begin{bmatrix} [K_{p1}] & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [0]_{n \times n} & [K_{q1}] & [0]_{n \times n} \\ [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [K_{i1}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta V_p] \\ [\Delta V_q] \\ [\Delta I_q] \end{bmatrix} + \quad (3.45)$$

$$+ \begin{bmatrix} [J2] & \begin{bmatrix} [K_{p2}] & [K_{p3}] \\ [0]_{n \times nb} & [0]_{n \times nb} \\ [0]_{n \times nb} & [-K_{i2}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1] & \begin{bmatrix} [K_{p4}] & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [0]_{3n \times 2ng + 2nb} & [0]_{n \times nb} & [K_{q2}] & [0]_{n \times nb} \\ [0]_{n \times nb} & [0]_{n \times nb} & [0]_{n \times nb} & [K_{i2}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{p ref}] \\ [\Delta V_{q ref}] \\ [\Delta V_{ref}] \end{bmatrix}$$

A equação algébrica (2.38) (Capítulo 2), que define o balanço de potências ativa e reativa em cada barra do sistema deve ser modificada, conforme mostrado nas equações (3.39) e (3.40). A equação (3.46) mostra de maneira completa esse balanço de potências ativa e reativa, com a consideração de dispositivos UPFC.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J3] & \begin{bmatrix} [-A4_U] & [-A5_U] & [-A6_U] \\ [-R4_U] & [-R5_U] & [-R6_U] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta V_p] \\ [\Delta V_q] \\ [\Delta I_q] \end{bmatrix} + [J4_U] \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B2] & \begin{bmatrix} [0]_{nb \times 3n} \\ [0]_{nb \times 3n} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{p ref}] \\ [\Delta V_{q ref}] \\ [\Delta V_{ref}] \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

As submatrizes  $A4_U$ ,  $A5_U$ ,  $A6_U$ ,  $R4_U$ ,  $R5_U$  e  $R6_U$  são formadas de acordo com o tipo de barra de instalação do UPFC, ou seja, se a barra em questão for do tipo inicial de instalação do UPFC, teremos coeficientes ativos e reativos da barra inicial (*bi*), caso contrário, serão formadas por coeficientes ativos e reativos da barra final (*bf*), conforme mostrado no Apêndice II.

A matriz  $J4_U$  possui formulação semelhante à apresentada no Capítulo 2 pela equação (2.39), porém deve-se incluir o efeito do dispositivo UPFC no balanço de potências ativa e reativa conforme mostrado pelo conjunto de equações (3.47).

$$[J4_{U11}] = \begin{cases} J4_{U11}(kk) = -A1_{Gk} - \sum_{k \neq m} A1_{km} - \sum_{k \neq m} A1_{Ui} - \sum_{k \neq m} A1_{Uf} \\ J4_{U11}(km) = A1_{km} + A1_{Ui} + A1_{Uf} \end{cases} \quad (3.47.a)$$

$$[J4_{U12}] = \begin{cases} J4_{U12}(kk) = A3_{Gk} - \sum_{k \neq m} A2_{km} - \sum_{k \neq m} A2_{Ui} - \sum_{k \neq m} A2_{Uf} \\ J4_{U12}(km) = -A3_{km} - A3_{Ui} - A3_{Uf} \end{cases} \quad (3.47.b)$$

$$[J4_{U21}] = \begin{cases} J4_{U21}(kk) = -R1_{Gk} - \sum_{k \neq m} R1_{km} - \sum_{k \neq m} R1_{Ui} - \sum_{k \neq m} R1_{Uf} \\ J4_{U21}(km) = R1_{km} + R1_{Ui} + R1_{Uf} \end{cases} \quad (3.47.c)$$

$$[J4_{U22}] = \begin{cases} J4_{U22}(kk) = R3_{Gk} - \sum_{k \neq m} R2_{km} - \sum_{k \neq m} R2_{Ui} - \sum_{k \neq m} R2_{Uf} \\ J4_{U22}(km) = -R3_{km} - R2_{Ui} - R2_{Uf} \end{cases} \quad (3.47.d)$$

No conjunto de equações (3.37) os coeficientes iniciais e finais do UPFC serão nulos caso a barra em questão for respectivamente do tipo final e inicial de instalação do UPFC.

As equações (3.45) e (3.46) podem ser agrupadas de acordo como mostrado de maneira compacta na equação (3.48).

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x_U} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_U & J2_U \\ J3_U & J4_U \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_U \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_U \\ B2_U \end{bmatrix} \cdot [\Delta u_U] \quad (3.48)$$

Eliminando-se o vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$  é obtida a formulação do sistema multimáquinas no espaço de estados, expressa pela equação (3.49).

$$\dot{\Delta x_U} = (J1_U - J2_U \cdot J4_U^{-1} \cdot J3_U) \cdot \Delta x_U + (B1_U - J2_U \cdot J4_U^{-1} \cdot B2_U) \cdot \Delta u_U \quad (3.49)$$

### 3.5 – Conclusões

Neste Capítulo foram apresentados os conceitos motivadores da utilização de dispositivos FACTS em Sistemas Elétricos de Potência. As diversas categorias destes equipamentos foram abordadas, onde o princípio fundamental de funcionamento de cada dispositivo foi discutido.

Atenção especial foi conferida aos dispositivos TCSC e UPFC, onde suas inclusões no Modelo de Sensibilidade de Potência foram abordadas. O TCSC foi representado como uma reatância variável, responsável pela compensação série da linha de transmissão. O Modelo de Injeção de Potência, o qual representa o UPFC por uma fonte de tensão série regulável em módulo e ângulo e uma fonte de corrente shunt responsável pelo controle do nível da tensão, foi utilizado.

Como o escopo deste trabalho é o estudo da ação destes dispositivos na estabilidade a pequenas perturbações, suas equações foram linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio estável. Apresentou-se a completa dedução e implementação de modelos dinâmicos simples, definidos por blocos de primeira ordem, para as variáveis de controle do TCSC e UPFC.

No próximo Capítulo será apresentada a utilização de sinais estabilizadores suplementares, tanto para as máquinas geradoras, recebendo a denominação de PSS (Power System Stabilizers), quanto para os controladores FACTS, normalmente designados por POD (Power Oscillation Damping).

## 4. Sinais Estabilizadores Suplementares

### 4.1 Introdução

Neste Capítulo serão apresentados os conceitos relevantes à teoria e aplicação de sinais estabilizadores suplementares para sistemas elétricos de potência multimáquinas. A inclusão no Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) e o projeto de dispositivos PSS (Power System Stabilizer) para máquinas síncronas e POD (Power Oscillation Damping) para controladores FACTS serão apresentados. O projeto dos dispositivos PSS e POD será realizado através da teoria de controle clássico pelo método da compensação de fase. A análise dos fatores de participação e resíduos será utilizada para determinar a melhor localização para instalação dos dispositivos PSS e POD.

### 4.2 Power System Stabilizer (PSS)

Toda variação de torque elétrico produzido pela máquina geradora síncrona pode ser dividida em duas componentes que determinam a estabilidade do sistema elétrico de potência. Uma destas componentes está em fase com as variações do ângulo do rotor ( $\Delta\delta$ ), e a outra em fase com as variações da velocidade angular ( $\Delta\omega$ ). A primeira componente é definida como torque de sincronização, enquanto que a segunda como torque de amortecimento. A insuficiência de qualquer uma das componentes pode levar o sistema à instabilidade, conforme mostrado na Figura 4.1.

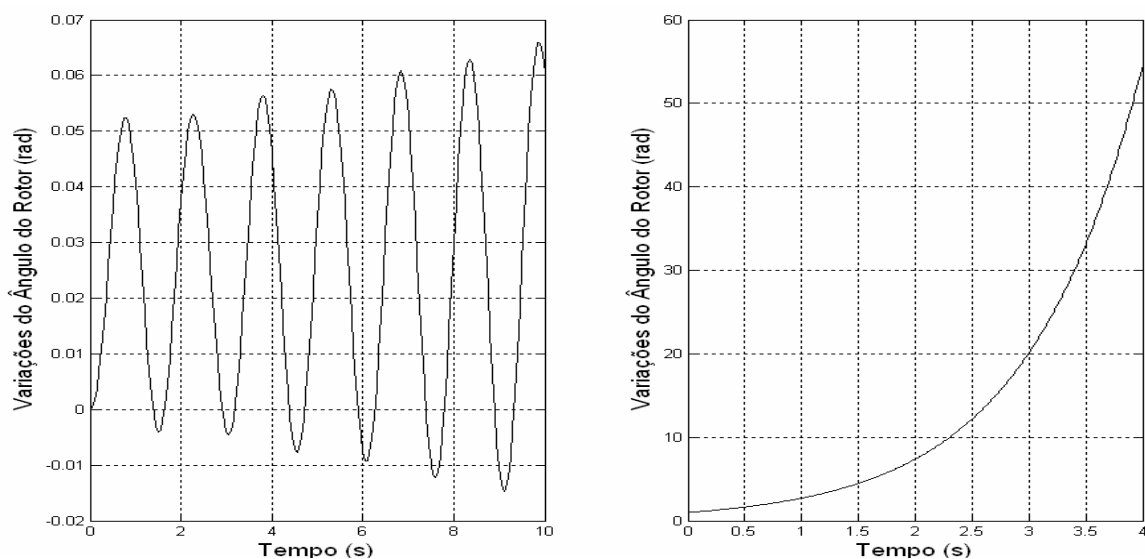


Figura 4.1 – (a) Falta de Torque de Amortecimento; (b) Falta de Torque de Sincronização

A perda de estabilidade por falta de torque de sincronização se caracteriza como uma instabilidade aperiódica, ou seja, as variações do ângulo do rotor crescem de forma exponencial. Oscilações de amplitude crescente caracterizam uma instabilidade dinâmica e são originadas pela falta de torque de amortecimento. Este tipo de instabilidade pode levar o sistema ao colapso em um intervalo de tempo maior que o decorrente da instabilidade por falta de torque de sincronização, após a ocorrência da perturbação. Atualmente, a principal causa dos problemas de estabilidade em sistemas elétricos está relacionada à insuficiência de torque de amortecimento [3,5].

Este fato foi ressaltado a partir da década de 1950, onde o uso de reguladores automáticos de tensão de ação rápida e contínua se tornou comum para a maioria das máquinas geradoras [5].

O regulador automático de tensão (RAT) desempenha importante papel na extensão dos limites de estabilidade nos regimes permanente e transitório do sistema elétrico quando este é submetido a uma grande perturbação. A tensão terminal do gerador irá diminuir bruscamente quando da ocorrência de uma perturbação, ocasionando uma queda repentina na transferência de potência elétrica gerada. Portanto, o RAT deve ser de atuação extremamente rápida e proporcionar um alto valor de teto (ceiling) para a tensão de campo do gerador de forma que a primeira oscilação após a perturbação seja controlada e, após isso, o regulador de velocidade possa atuar com uma menor potência acelerante [2,3,5,18,24].

As características acima citadas para os reguladores de tensão são obtidas com baixas constantes de tempo e altos ganhos estáticos. Porém essa configuração diminui o amortecimento inerente do sistema elétrico de potência. Em certas condições de alta carga e de um fraco sistema de transmissão esse amortecimento pode se tornar negativo. Portanto nota-se a presença de objetivos conflitantes, ou seja, o RAT fornece sincronização para o sistema, mas pode proporcionar instabilidade ocasionada pela falta de amortecimento [5,18].

De maneira a sanar os aspectos conflitantes acima descritos é utilizada, em larga escala, a realimentação de sinais estabilizadores suplementares à malha de controle do RAT de forma a fornecer amortecimento às oscilações do rotor da máquina geradora. Vários sinais podem ser utilizados, sendo de mais comum uso a velocidade angular, a potência acelerante e a frequência da barra de instalação do gerador. Nesta dissertação o sinal estabilizante suplementar será a velocidade angular do gerador em questão.

Em [5] e [18] apresenta-se de maneira clara que o torque elétrico produzido pelo gerador e originado da malha de controle do RAT possui características de atraso de fase, ou seja, mesmo com a utilização da velocidade angular como sinal suplementar a produção de

torque de amortecimento é mínima. Portanto faz-se necessária a utilização de um sistema de controle de forma a reduzir o atraso de fase inserido pelo RAT e pelo sistema de potência e assim o torque elétrico produzido pelo sinal suplementar estará quão mais em fase possível com as variações da velocidade angular. O dispositivo que realiza essa compensação das características de fase e ganho da malha de controle do RAT é o Estabilizador do Sistema de Potência (PSS – Power System Stabilizer) [18].

A estrutura básica de um PSS é conforme a mostrada na Figura 4.2, quando o método de compensação de fase é utilizado para o seu projeto. O PSS é composto basicamente de um ganho  $K_{PSS}$  ajustado para fornecer a quantidade de amortecimento requerido; um bloco washout que permite somente a passagem de sinais associados às baixas frequências eletromecânicas de interesse, definido pela constante de tempo  $T_w$  de valor não crítico na faixa de 1 a 20 segundos e por fim, uma associação de blocos de avanço-atraso de fase, definidos pelas constantes de tempo  $T_1=T_3$  e  $T_2=T_4$ , proporcionando avanço e atraso de fase respectivamente [25].

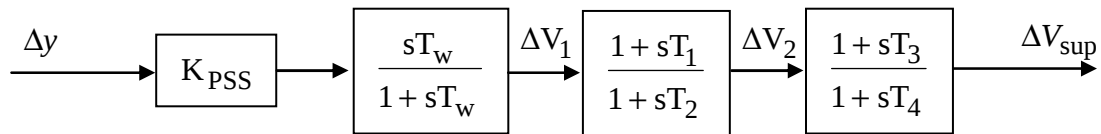


Figura 4.2 – Estrutura Básica do PSS

Na Figura 4.2 a entrada do PSS é  $\Delta y$  e o sinal de saída  $\Delta V_{sup}$  é somado à tensão de referência do RAT. A seção seguinte mostra o procedimento para inclusão e implementação de dispositivos PSS com a consideração da velocidade angular como sinal de entrada mostrando a facilidade de inclusão de novos dispositivos no MSP multimáquinas.

#### 4.2.1 Inclusão de Dispositivos PSS no MSP

A inclusão do PSS no MSP exige a definição de três novas variáveis de estado para cada máquina geradora  $k$  equipada com PSS, sendo elas  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  e  $\Delta V_{sup}$  localizadas entre os blocos de avanço-atraso de fase conforme mostra o modelo linearizado do PSS na Figura 4.2. O sinal de velocidade angular é utilizado como entrada e possui a forma linearizada descrita pela equação (4.1).

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} (\Delta P_{mk} - \Delta P_{Gk} - D_k \Delta \omega_k)$$

onde (4.1)

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

A variável de estado  $\Delta V_1$  pode ser obtida do diagrama de blocos da Figura 4.2 e assim é dada pela equação (4.2).

$$\Delta \dot{V}_{1k} = K_{PSSk} \Delta \dot{\omega}_k - \frac{1}{T_{wk}} \Delta V_{1k} \quad (4.2)$$

Adotando um procedimento análogo ao realizado para obtenção de  $\Delta V_1$ , as equações (4.3) e (4.4), que definem as variáveis de estado  $\Delta V_2$  e  $\Delta V_{sup}$ , podem ser obtidas em função dos parâmetros do PSS.

$$\Delta \dot{V}_{2k} = \frac{T_{1k}}{T_{2k}} \Delta \dot{V}_{1k} + \frac{1}{T_{2k}} \Delta V_{1k} - \frac{1}{T_{2k}} \Delta V_{2k} \quad (4.3)$$

$$\Delta \dot{V}_{supk} = \frac{T_{3k}}{T_{4k}} \Delta \dot{V}_{2k} + \frac{1}{T_{4k}} \Delta V_{2k} - \frac{1}{T_{4k}} \Delta V_{supk} \quad (4.4)$$

Da manipulação das equações (4.1) e (4.2) é obtido o conjunto de equações (4.5), que define a variável de estado  $\Delta V_1$  em função de todas as variáveis de estado e algébricas do modelo. Este conjunto de equações também apresenta os coeficientes do modelo em forma matricial devido a inclusão de  $k$  dispositivos PSS incorporados a  $p$  geradores, visando a representação final do sistema no espaço de estados.

$$\Delta \dot{V}_{1k} = K_{11} \Delta \omega_k + K_{12} \Delta \delta_k + K_{13} \Delta E'_{qk} + K_{14} \Delta \theta_k + K_{15} \Delta V_k + K_{16} \Delta V_{1k} + K_{17} \Delta P_{mk} \quad (4.5)$$

$$[K_{11}] = \begin{cases} K_{11}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} D_k}{M_k} \\ K_{11}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.5.a)$$

$$[K_{12}] = \begin{cases} K_{12}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A1_{Gk}}{M_k} \\ K_{12}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.5.b)$$

$$[K_{13}] = \begin{cases} K_{13}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A2_{Gk}}{M_k} \\ K_{13}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.5.c)$$

$$[K_{14}] = -[K_{12}] \quad (4.5.d)$$

$$[K_{15}] = \begin{cases} K_{15}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A3_{Gk}}{M_k} \\ K_{15}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.5.e)$$

$$[K_{16}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{wk}} \right) \quad (4.5.f)$$

$$[K_{17}] = \begin{cases} K_{17}(k \times p) = \frac{K_{PSSk}}{M_k} \\ K_{17}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.5.g)$$

Adotando um procedimento semelhante ao realizado para a equação (4.5) é obtido o conjunto de equações (4.6) que define a variável de estado  $\Delta V_2$ , através da manipulação das

equações (4.3) e (4.5).

$$\dot{\Delta V}_{2k} = K_{21} \Delta \omega_k + K_{22} \Delta \delta_k + K_{23} \Delta E'_{qk} + K_{24} \Delta \theta_k + K_{25} \Delta V_k + K_{26} \Delta V_{1k} + K_{27} \Delta P_{mk} + K_{28} \Delta V_{2k} \quad (4.6)$$

$$[K_{21}] = \begin{cases} K_{21}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} D_k T_{1k}}{M_k T_{2k}} \\ K_{21}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.6.a)$$

$$[K_{22}] = \begin{cases} K_{22}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A1_{Gk} T_{1k}}{M_k T_{2k}} \\ K_{22}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.6.b)$$

$$[K_{23}] = \begin{cases} K_{23}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A2_{Gk} T_{1k}}{M_k T_{2k}} \\ K_{23}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.6.c)$$

$$[K_{24}] = -[K_{22}] \quad (4.6.d)$$

$$[K_{25}] = \begin{cases} K_{25}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A3_{Gk} T_{1k}}{M_k T_{2k}} \\ K_{25}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.6.e)$$

$$[K_{26}] = \text{diagonal} \left( \frac{-T_{1k}}{T_{2k} T_{wk}} + \frac{1}{T_{2k}} \right) \quad (4.6.f)$$

$$[K_{27}] = \begin{cases} K_{27}(k \times p) = \frac{K_{PSSk} T_{1k}}{M_k T_{2k}} \\ K_{27}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.6.g)$$

$$[K_{28}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{2k}} \right) \quad (4.6.h)$$

A equação (4.7) que define a variável de estado  $\Delta V_{\text{sup}}$  é obtida da substituição da equação (4.6) em (4.4).

$$\begin{aligned} \dot{\Delta V}_{\text{sup}k} = & K_{s1} \Delta \omega_k + K_{s2} \Delta \delta_k + K_{s3} \Delta E'_{qk} + K_{s4} \Delta \theta_k + K_{s5} \Delta V_k + K_{s6} \Delta V_{1k} + \\ & + K_{s7} \Delta P_{mk} + K_{s8} \Delta V_{2k} + K_{s9} \Delta V_{\text{sup}k} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$[K_{s1}] = \begin{cases} K_{s1}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} D_k T_{1k} T_{3k}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \\ K_{s1}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.7.a)$$

$$[K_{s2}] = \begin{cases} K_{s2}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A1_{Gk} T_{1k} T_{3k}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \\ K_{s2}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.7.b)$$

$$[K_{s3}] = \begin{cases} K_{s3}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A2_{Gk} T_{1k} T_{3k}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \\ K_{s3}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.7.c)$$

$$[K_{s4}] = -[K_{s2}] \quad (4.7.d)$$

$$[K_{s5}] = \begin{cases} K_{s5}(k \times p) = \frac{-K_{PSSk} A3_{Gk} T_{1k} T_{3k}}{M_k T_{2k} T_{4k}} \\ K_{s5}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.7.e)$$

$$[K_{s6}] = \text{diagonal} \left( \frac{-T_{1k} T_{3k}}{T_{2k} T_{wk} T_{4k}} + \frac{T_{3k}}{T_{2k} T_{4k}} \right) \quad (4.7.f)$$

$$[K_{27}] = \begin{cases} K_{27}(k \times p) = \frac{K_{PSSk} T_{1k}}{M_k T_{2k}} \\ K_{27}(k \times s) = 0 \\ s \neq p \end{cases} \quad (4.7.g)$$

$$[K_{28}] = \text{diagonal} \left( \frac{-T_{3k}}{T_{2k} T_{4k}} + \frac{1}{T_{4k}} \right) \quad (4.7.h)$$

$$[K_{s9}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{4k}} \right) \quad (4.7.i)$$

Por fim, para completar o processo de inclusão do PSS é necessário somar o sinal suplementar  $\Delta V_{\text{sup}}$  à malha do RAT, conforme mostrado na Figura 4.3, obtendo-se a equação (4.8) para a tensão de campo na forma linearizada.

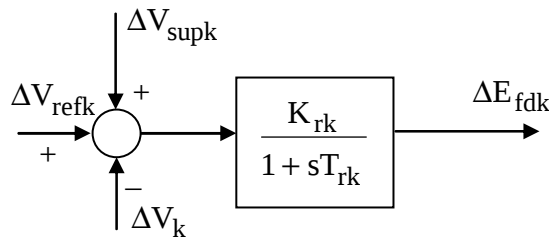


Figura 4.3 – Regulador Automático de Tensão com o Sinal Suplementar

$$\dot{\Delta E}_{fdk} = -\frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{refk} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{supk} \quad (4.8)$$

Com as equações (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) e as equações diferenciais e algébricas do MSP sem PSS dadas no Capítulo 2 na forma compacta da equação por (2.40), pode-se obter um novo conjunto de equações algébricas e diferenciais para um sistema elétrico com  $ng$  geradores,  $nb$  barras, com a inclusão de  $k$  dispositivos PSS conforme as equações (4.9) e (4.10).

$$\begin{bmatrix} \dot{[\Delta \omega]} \\ [\Delta \delta] \\ \dot{[\Delta E'_q]} \\ [\Delta E_{fd}] \\ \dot{[\Delta V_1]} \\ [\Delta V_2] \\ \dot{[\Delta V_{sup}]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1] & [0]_{3ng \times 3k} \\ [K_{11}] [K_{12}] [K_{13}] [0]_{k \times ng} \\ [K_{21}] [K_{12}] [K_{23}] [0]_{k \times ng} \\ [K_{s1}] [K_{s2}] [K_{s3}] [0]_{k \times ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0]_{ng \times k} [0]_{ng \times k} [K_r][T_r]^{-1} \\ [K_{16}] [0]_{k \times k} [0]_{k \times k} \\ [K_{26}] [K_{28}] [0]_{k \times k} \\ [K_{s6}] [K_{s8}] [K_{s9}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta V_1] \\ [\Delta V_2] \\ [\Delta V_{sup}] \end{bmatrix} + \quad (4.9)$$

$$+ \begin{bmatrix} [J2] \\ [K_{14}] [K_{15}] \\ [K_{24}] [0]_{3k \times nb - k} [K_{25}] [0]_{3k \times nb - k} \\ [K_{s4}] [K_{s5}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1] \\ [K_{17}] [K_{27}] [K_{s7}] \\ [0]_{3k \times (ng + 2nb - k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [J3] \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta V_1] \\ [\Delta V_2] \\ [\Delta V_{sup}] \end{bmatrix} + [J4] \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + [B2] \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

As equações (4.9) e (4.10), representadas na forma compacta na equação (4.11), mostram a facilidade de inclusão de novos dispositivos no MSP, sendo que a formulação anteriormente obtida não é descartada, somente novas submatrizes são adicionadas ao modelo.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x_E} \\ \Delta x_E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_E & J2_E \\ J3_E & J4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_E \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_E \\ B2 \end{bmatrix} \cdot [\Delta u] \quad (4.11)$$

Assim, a representação na forma de espaço de estados pode ser obtida pela eliminação do vetor de variáveis algébricas ( $\Delta z$ ) conforme mostra a equação (4.12).

$$\dot{\Delta x_E} = (J1_E - J2_E \cdot J4^{-1} \cdot J3_E) \cdot \Delta x + (B1_E - J2_E \cdot J4^{-1} \cdot B2) \cdot \Delta u \quad (4.12)$$

Estando o PSS devidamente implementado no MSP, deve-se realizar o seu projeto, sendo que o primeiro passo é determinar suas características de ganho e fase de maneira a compensar a ação do gerador, sistema de excitação, sistema de transmissão e cargas. Para isso é necessária a obtenção de uma função de transferência de malha aberta conhecida na literatura como  $GEP(s)$ .

#### 4.2.2 Função de Transferência $GEP(s)$ para o MSP

O PSS deve fornecer amortecimento através da modulação da tensão de referência e tensão de campo do gerador. Como visto anteriormente, para a produção de torque de amortecimento em fase com as variações da velocidade angular, o PSS deve compensar o atraso de fase inserido pelos componentes do sistema elétrico de potência, ou seja, geradores, sistema de excitação, sistema de transmissão e cargas.

Em [5] e [18] define-se uma função de transferência, chamada  $G(s)$  e  $GEP(s)$  respectivamente, que representa os efeitos dinâmicos de todos os componentes acima enumerados. Para isso é considerada a representação de um gerador conectado através de uma impedância externa a uma barra infinita (Sistema MBI), dando origem ao Modelo de Heffron & Phillips (MHP), largamente utilizado no estudo de estabilidade dinâmica de sistemas elétricos.

A representação do MHP em forma de diagrama de blocos é mostrada na Figura 4.4, onde  $K_1$ - $K_6$  são os coeficientes do modelo [2,3,4,5]. Esta representação é de grande importância didática, pois permite o acompanhamento visual dos sinais envolvidos no processo de formação de torques elétricos e assim, pode-se definir e visualizar a função de transferência  $GEP(s)$ .

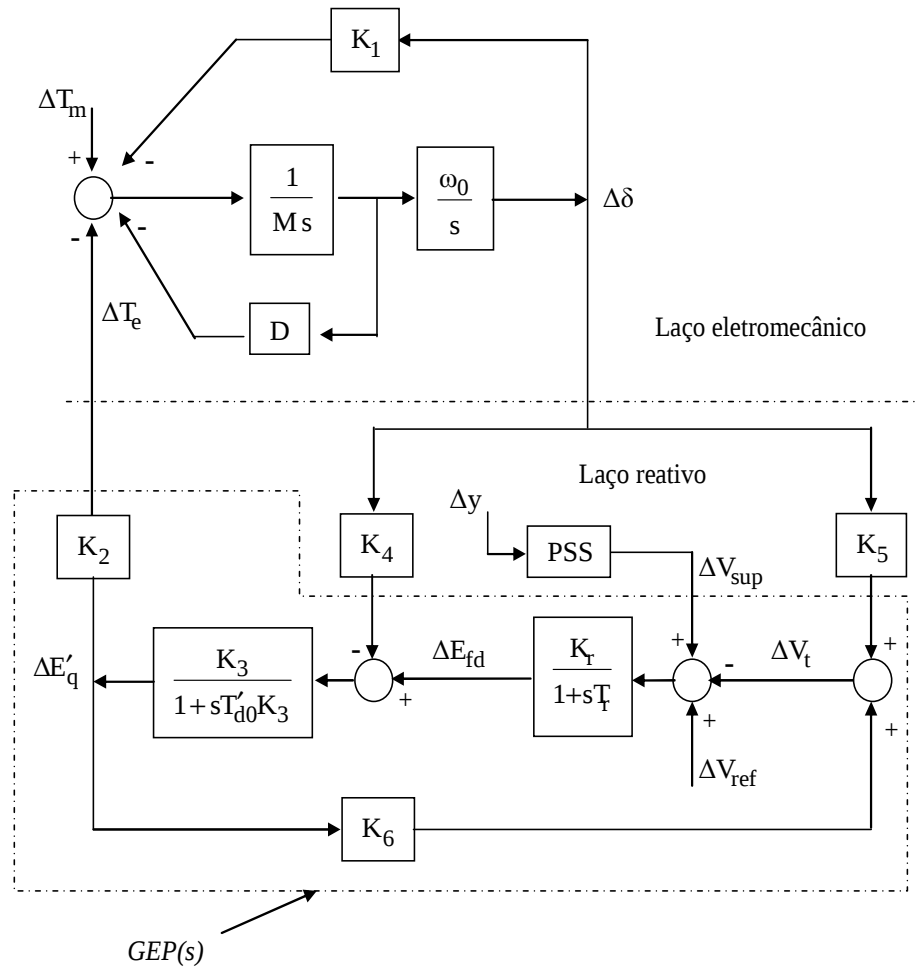


Figura 4.4 – Diagrama de Blocos do Sistema MBI – MHP

As características de ganho e fase da função  $GEP(s)$  são proporcionais às características da malha fechada de controle de tensão, portanto podem ser obtidas da redução do diagrama de blocos mostrado na Figura 4.4, entre a tensão de referência do RAT ( $\Delta V_{ref}$ ) e a tensão interna de eixo em quadratura ( $\Delta E'_q$ ) [18]. A equação (4.13) expressa esses fatos.

$$GEP(s) = K_2 \frac{\Delta E'_q}{\Delta V_{ref}} \quad (4.13)$$

O Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) para um sistema MBI possui grandes semelhanças com o MHP [7]. Este fato pode ser utilizado para a obtenção da função de transferência  $GEP(s)$  para o MSP multimáquinas através de uma extensão do procedimento mostrado em Da Costa (1993). Para isso considere a Figura 2.4 do Capítulo 2, onde se

apresenta o diagrama de blocos do MSP para sistema multimáquinas. Considere para isso a Figura 4.5, sendo mostrada a malha de controle da tensão, ou malha reativa para o MSP multimáquinas.

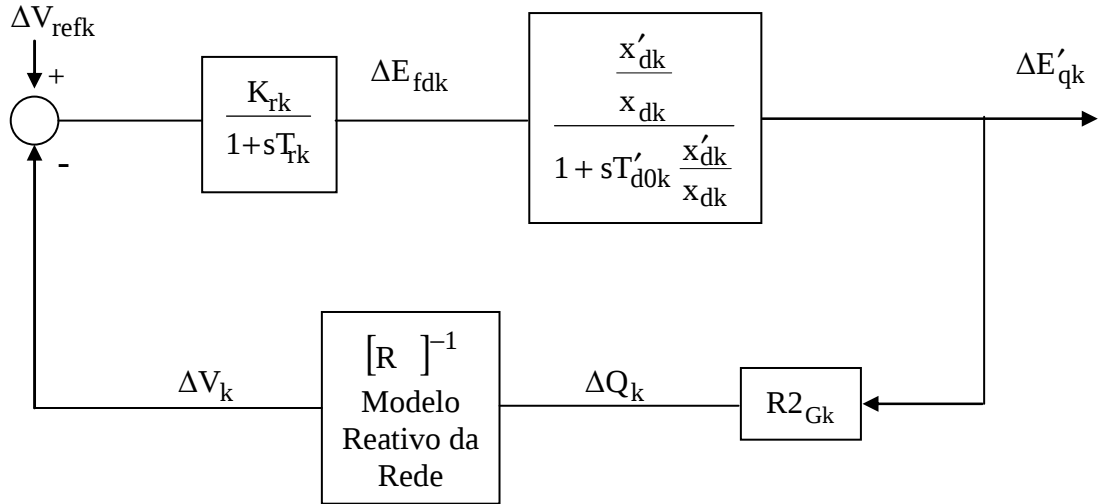


Figura 4.5 – Malha Reativa para o MSP Multimáquinas

Através da Figura 4.5 pode-se notar que a obtenção da função  $GEP(s)$  é feita para cada gerador do sistema, ou seja, ela é descentralizada, considerando as características reativas do gerador e o sistema de transmissão conectado à barra de geração, representado pelo bloco Modelo Reativo da Rede ( $R^{-1}$ ) dado pela equação (4.14).

$$[R]^{-1} = \frac{1}{(-R3_g + \sum R2_{km})} \quad (4.14)$$

Por fim, a equação (4.15) é obtida da Figura 4.5, onde o caminho de formação de torque elétrico se torna completo através de  $A2_g$  conforme mostrado na Figura 2.4 do Capítulo 2.

$$GEP(s) = A2_g \frac{\Delta E'_{qk}}{\Delta V_{refk}} = A2_g \frac{K_{rk} (x'_{dk} / x_{dk}) [R]}{(1 + sT_{rk}) (1 + sT'_{d0k} x'_{dk} / x_{dk}) [R] + R2_g K_{rk} (x'_{dk} / x_{dk})} \quad (4.15)$$

Obtidas as características de ganho e fase da função  $GEP(s)$  pode-se realizar o projeto e especificação dos parâmetros do dispositivo PSS.

### 4.2.3 Obtenção dos Parâmetros do PSS

O bom desempenho do PSS depende do correto projeto dos seus parâmetros. Várias metodologias podem ser empregadas para a obtenção dos parâmetros do PSS, entre elas as que utilizam técnicas de controle clássico como compensação de fase e localização de pólos são as mais utilizadas [9,18]. A metodologia aqui apresentada para o ajuste dos parâmetros do PSS é realizada no domínio da frequência de maneira a compensar o atraso de fase da função  $GEP(s)$  para uma determinada frequência de interesse. Como se pode notar, o projeto do PSS não é robusto, necessitando o cálculo da frequência natural do laço eletromecânico para cada máquina geradora a ser equipada com o PSS. Esse procedimento é feito considerando somente a parte ativa, descrita pela Figura 4.6, do diagrama de blocos do sistema multimáquinas, mostrado na Figura 2.4 do Capítulo 2.

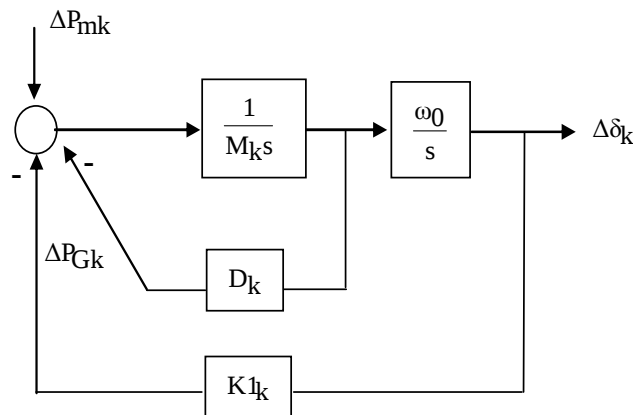


Figura 4.6 – Laço Eletromecânico para a Máquina Geradora k

O sistema elétrico reduzido da Figura 4.6 possui como equação característica a equação (4.16), onde  $K1_k$  representa o coeficiente principal de torque de sincronização e é dado pela equação (4.17).

$$s^2 + \frac{D_k}{M_k}s + \frac{K1_k \omega_0}{M_k} = 0 \quad (4.16)$$

$$K1_k = \frac{A1_{gk} \sum A1_{km}}{A1_{gk} + \sum A1_{km}} \quad (4.17)$$

Após obtenção do valor da frequência natural do laço eletromecânico ( $\omega_{nle}$  – rad/s) de cada gerador de acordo com a equação (4.18), deve-se projetar as características de fase PSS de modo que a equação (4.19) possa ser satisfeita.

$$\omega_{nlek} = \sqrt{\frac{K1_k \omega_0}{M_k}} \quad (4.18)$$

$$\angle PSS(j \omega_{nlek}) + \angle GEP(j \omega_{nlek}) = 0 \quad (4.19)$$

Especificando um valor para  $T_2 = T_4$  na faixa de 0,02 a 0,15 segundos, pode ser obtido o valor para  $T_1 = T_3$ , desconsiderando o efeito do bloco washout, de acordo com a equação (4.20).

$$T_{1k} = \frac{\omega_{nlek} T_{2k} - \frac{\text{imag}(GEP(j \omega_{nlek}))}{2(\text{real}(GEP(j \omega_{nlek})))}}{\omega_{nlek}} \quad (4.20)$$

Para o cálculo do ganho do sinal suplementar, considere que o PSS anula totalmente o atraso de fase da função  $GEP(s)$  (compensação total de fase), de forma a inserir torque de amortecimento puro, ponderado por um coeficiente  $D_{PSS}$ , conforme ilustrado na Figura 4.7 e na equação (4.21).

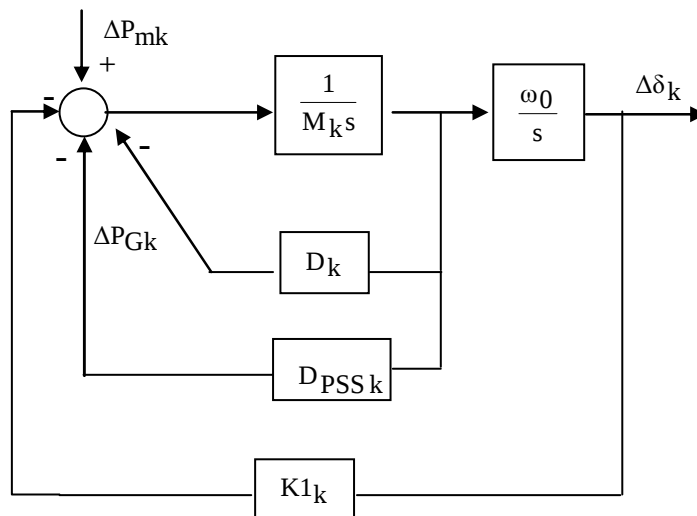


Figura 4.7 – Diagrama de Blocos para Amortecimento Puro Introduzido pelo PSS

$$D_{PSS\,k} = K_{PSS\,k} |GEP(j\omega_{nlek})| |PSS(j\omega_{nlek})|$$

onde (4.21)

$$|PSS(j\omega_{nlek})| = \left| \frac{1 + sT_{1k}}{1 + sT_{2k}} \right|^2$$

Por fim pode-se obter a equação característica para o sistema elétrico da Figura 4.7 e especificando um amortecimento ( $\xi$ ) desejado é obtido o coeficiente  $D_{PSS}$  de acordo com a equação (4.22)

$$D_{PSS\,k} = 2\xi\omega_{nlek} M_k \quad (4.22)$$

O ganho do dispositivo PSS é obtido da substituição da equação (4.22) em (4.21).

### 4.3 Power Oscillation Damping (POD)

Os dispositivos PSS são utilizados para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de maneira eficaz, econômica e confiável a várias décadas. Das seções anteriores nota-se que devido o PSS introduzir um sinal suplementar à malha de controle de tensão do gerador síncrono, seu grande impacto muitas vezes fica restrito às oscilações associadas a grupos de máquinas geradoras situadas em sua proximidade, classificadas como oscilações de modo local. Portanto, seu grande alvo é o amortecimento de modos locais de oscilação.

A necessidade de uma operação mais segura e confiável tornou o uso de interligações de grandes sistemas uma prática comum. Visto que essas interligações normalmente são feitas por longas linhas de transmissão de altas reatâncias, pode ocorrer o surgimento de oscilações de baixa frequência, denominadas oscilações de modo interárea [10,25,34]. O controle de oscilações interárea se tornou foco e motivo de preocupação, pois essas oscilações são obtidas da interação das dinâmicas de máquinas e dispositivos de controle situados em áreas distantes entre si. A solução mais econômica seria o ajuste correto dos parâmetros dos dispositivos PSS existentes de modo a fornecerem também amortecimento para o modo interárea, mas deste reajuste surgem algumas características negativas [36]. A modificação da estratégia de controle para os dispositivos PSS pode gerar conflitos e diminuir o amortecimento de modos

locais de oscilação, pois é necessário o ajuste na maioria dos PSS existentes; outro fato é que a fonte de amortecimento para o modo interárea estará situada à longa distancia [21].

O exemplo evidente de surgimento de baixas frequências de oscilação relacionadas a modos interárea é o caso brasileiro de interligação entre os sistemas Norte (antigo Norte-Nordeste) e Sul (antigo Sul-Sudeste), sendo que interrompendo essa interligação, anula-se o modo interárea situado na faixa de 0,18 Hz, demonstrando que a ligação entre os sistemas foi responsável pelo surgimento deste modo fracamente amortecido. A solução encontrada para o efetivo amortecimento deste modo foi a instalação de dois dispositivos FACTS TCSC entre as extremidades da linha de interligação [26,27,28].

Os dispositivos FACTS possuem como principais objetivos a maximização da capacidade de transmissão e o controle do fluxo de potência dos sistemas existentes, sendo em sua grande maioria projetados para atender esses objetivos principais. Porém, sabe-se da potencialidade desses dispositivos para introdução de amortecimento no sistema elétrico. Para isso esses dispositivos devem ser equipados com controladores que possuem ação suplementar de amortecimento, essa ação suplementar é chamada de Power Oscillation Damping (POD) [29-31,35-38].

Para um efetivo amortecimento devem ser realizadas análises quanto ao uso de melhores sinais para entrada do controlador POD e lugares para sua inserção no sistema. Neste trabalho utiliza-se o cálculo de resíduos das funções de transferência entre a entrada e a saída do controlador para se atingir esses objetivos. Os resíduos fornecem informações sobre a controlabilidade do sinal de saída e observabilidade do sinal de entrada do POD e são obtidos de acordo com o procedimento descrito no Apêndice III [32].

Desde que a inclusão dos FACTS é feita na rede de transmissão, percebe-se um fato positivo em relação ao PSS, pois estes dispositivos podem fornecer amortecimento para todas as máquinas do sistema se um estudo sobre sua efetiva localização for realizado. Para isso é preferível, portanto, o uso de sinais locais para entrada do POD tais como potência ativa, reativa, corrente ou tensão terminal em detrimento de sinais remotos como a velocidade angular dos geradores, pois com isso é descartado o uso de sistemas de telecomunicação que aumentam o custo e diminuem a confiabilidade da operação [27,28,30].

A utilização de técnicas de controle clássico para o projeto do controlador POD define uma estrutura semelhante ao PSS para esse controlador, conforme mostrado na Figura 4.8, onde os parâmetros envolvidos possuem a mesma função descrita para o PSS. As próximas subseções apresentam os procedimentos necessários para inclusão de controladores POD aos dispositivos FACTS TCSC e UPFC.

### 4.3.1 TCSC – POD

Para a inclusão de um dispositivo TCSC no MSP considere o modelo dinâmico apresentado na Figura 4.8. Tal modelo é responsável pelo fornecimento de amortecimento ao sistema devido à presença do controlador POD.

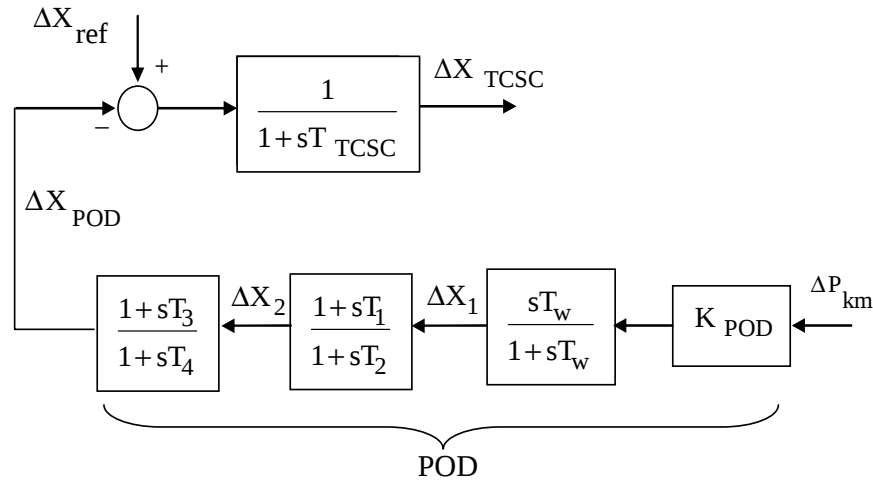


Figura 4.8 – Modelo Dinâmico do TCSC com Controlador POD para Amortecimento de Oscilações

O sinal de entrada para o controlador POD é a variação do fluxo de potência ativa na linha de transmissão onde o TCSC estiver instalado, dada pela equação (4.23) (observe que se trata de um sinal disponível localmente). Outro fato importante é que os modos interárea de oscilação possuem alta observabilidade neste sinal, tornando prática comum o uso do fluxo de potência ativa para a entrada do controlador POD [31]. Ainda na Figura 4.8 é utilizado o sinal  $\Delta X_{ref}$ , sendo este o desvio do valor da reatância do TCSC em regime permanente.

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m + A4_{km} \Delta X_{CSC} \quad (4.23)$$

A inclusão do TCSC equipado com controlador POD é semelhante ao procedimento realizado anteriormente para o PSS, sendo que pelo fato da entrada do controlador não ser uma variável de estado, deve-se dividir cada bloco, conforme mostrado na Figura 4.9 para o bloco washout, definindo outras variáveis de estado sem significado físico.

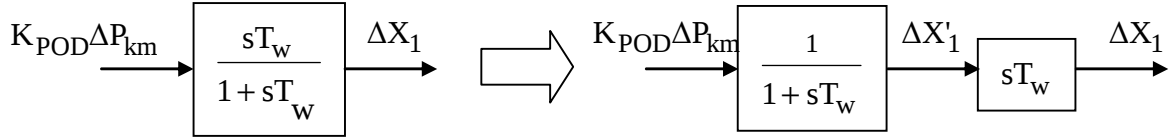


Figura 4.9 – Divisão do Bloco Washout

Da Figura 4.9 podem ser obtidas as expressões para a nova variável de estado  $\Delta X'_1$  e para a saída do bloco washout  $\Delta X_1$  conforme as equações (4.24) e (4.25), respectivamente.

$$\dot{\Delta X'_1} = \frac{1}{T_w} (K_{\text{POD}} \Delta P_{\text{km}} - \Delta X'_1) \quad (4.24)$$

$$\Delta X_1 = (K_{\text{POD}} \Delta P_{\text{km}} - \Delta X'_1) \quad (4.25)$$

A divisão em blocos pode ser realizada para o primeiro bloco que proporciona avanço-atraso de fase, de acordo com a Figura 4.10.

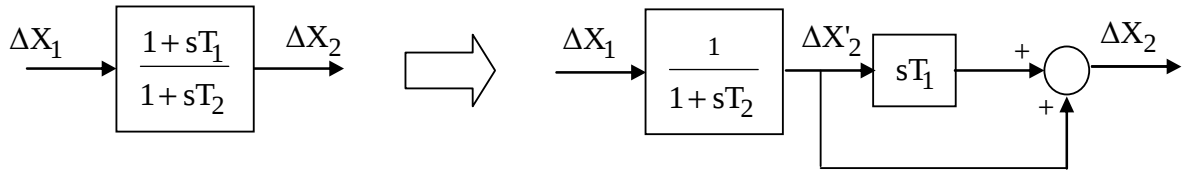


Figura 4.10 – Divisão do Bloco Avanço-Atraso de Fase

Através da manipulação do diagrama de blocos mostrado na Figura 4.10 e da equação (4.25), são obtidas a variável de estado  $\Delta X'_2$  e o sinal de saída  $\Delta X_2$  do primeiro bloco avanço-atraso de fase, de acordo com as equações (4.26) e (4.27), respectivamente.

$$\dot{\Delta X'_2} = \frac{1}{T_2} (\Delta X_1 - \Delta X'_2) \quad (4.26)$$

$$\Delta X_2 = \left( \frac{T_1}{T_2} \right) \Delta X_1 + \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \Delta X'_2 \quad (4.27)$$

Realiza-se o mesmo procedimento para o segundo bloco de avanço-atraso de fase de acordo com a Figura 4.11, obtendo as equações (4.28) e (4.29) para a variável de estado  $\Delta X'_{\text{POD}}$  e sua saída  $\Delta X_{\text{POD}}$ , respectivamente.

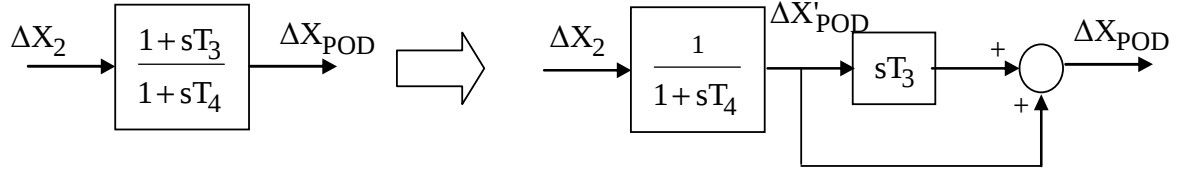


Figura 4.11 – Divisão do Segundo |Bloco de Avanço-Atraso de Fase

$$\dot{\Delta X'_{\text{POD}}} = \frac{1}{T_4} (\Delta X_2 - \Delta X'_{\text{POD}}) \quad (4.28)$$

$$\Delta X_{\text{POD}} = \left( \frac{T_3}{T_4} \right) \Delta X_2 + \left( 1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \Delta X'_{\text{POD}} \quad (4.29)$$

Por fim, completa-se o caminho de modulação da reatância do TCSC ( $\Delta X_{\text{TCSC}}$ ), definindo-a como variável de estado de acordo com a equação (4.30).

$$\dot{\Delta X_{\text{TCSC}}} = \frac{1}{T_{\text{TCSC}}} (\Delta X_{\text{ref}} - \Delta X_{\text{POD}} - \Delta X_{\text{TCSC}}) \quad (4.30)$$

Da manipulação das equações (4.24) e (4.23) é obtido o conjunto de equações (4.31), que define a variável de estado  $\Delta X'_1$  em função de todas as variáveis algébricas e de estado do modelo. Nota-se também a definição de novos coeficientes apresentados na forma matricial de maneira a facilitar a representação na forma de espaço de estados de um sistema com multimáquinas com  $ng$  geradores,  $nb$  barras,  $n$  dispositivos TCSC equipados com POD instalados entre uma barra inicial ( $k$ ) e outra barra final ( $m$ ).

$$\dot{\Delta X'_{1n}} = K_{11} \Delta X'_{1n} + K_{12} \Delta X_{\text{TCSC}n} + K_{13} \Delta \theta_{km} + K_{14} \Delta V_k + K_{14} \Delta V_m \quad (4.31)$$

$$[K_{11}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{wn}} \right) \quad (4.31.a)$$

$$[K_{12}] = \text{diagonal} \left( \frac{K_{\text{PODn}} A_{4\text{km}}}{T_{\text{wn}}} \right) \quad (4.31.b)$$

$$[K_{13}] = \begin{cases} K_{13}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{1\text{km}}}{T_{\text{wn}}} \\ K_{13}(n \times m) = \frac{-K_{\text{PODn}} A_{1\text{km}}}{T_{\text{wn}}} \\ K_{13}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.31.c)$$

$$[K_{14}] = \begin{cases} K_{14}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{2\text{km}}}{T_{\text{wn}}} \\ K_{14}(n \times m) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{3\text{km}}}{T_{\text{wn}}} \\ K_{14}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.31.d)$$

O mesmo procedimento pode ser empregado para a variável de estado  $\Delta X'_2$  definida de acordo com o conjunto de equações (4.32), resultante da manipulação das equações (4.25) e (4.26).

$$\dot{\Delta X}'_{2n} = K_{21} \Delta X'_{1n} + K_{22} \Delta X_{\text{TCSCn}} + K_{23} \Delta \theta_{\text{km}} + K_{24} \Delta V_k + K_{24} \Delta V_m + K_{25} \Delta X'_{2n} \quad (4.32)$$

$$[K_{21}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{2n}} \right) \quad (4.32.a)$$

$$[K_{22}] = \text{diagonal} \left( \frac{K_{\text{PODn}} A_{4\text{km}}}{T_{2n}} \right) \quad (4.32.b)$$

$$[K_{23}] = \begin{cases} K_{23}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{1\text{km}}}{T_{2n}} \\ K_{23}(n \times m) = \frac{-K_{\text{PODn}} A_{1\text{km}}}{T_{2n}} \\ K_{23}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.32.c)$$

$$[K_{24}] = \begin{cases} K_{24}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{2\text{km}}}{T_{2n}} \\ K_{24}(n \times m) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{3\text{km}}}{T_{2n}} \\ K_{24}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.32.d)$$

$$[K_{25}] = [K_{21}] \quad (4.32.e)$$

De maneira semelhante ao realizado para o conjunto de equações (4.33), é obtido o conjunto de equações (4.33) que define a variável de estado  $\Delta X'_{\text{POD}}$ .

$$\begin{aligned} \dot{\Delta X'_{\text{PODn}}} = & K_{x1} \Delta X'_{1n} + K_{x2} \Delta X_{\text{TCSCn}} + K_{x3} \Delta \theta_{\text{km}} + K_{x4} \Delta V_k + K_{x4} \Delta V_m + \\ & + K_{x5} \Delta X'_{2n} + K_{x6} \Delta X'_{\text{PODn}} \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$[K_{x1}] = \text{diagonal} \left( \frac{-T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \right) \quad (4.33.a)$$

$$[K_{x2}] = \text{diagonal} \left( \frac{K_{\text{PODn}} A_{4\text{km}} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \right) \quad (4.33.b)$$

$$[K_{x3}] = \begin{cases} K_{x3}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{1\text{km}} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \\ K_{x3}(n \times m) = \frac{-K_{\text{PODn}} A_{1\text{km}} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \\ K_{x3}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.33.c)$$

$$[K_{x4}] = \begin{cases} K_{x4}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{2\text{km}} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \\ K_{x4}(n \times m) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{3\text{km}} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \\ K_{x4}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.33.d)$$

$$[K_{x5}] = \text{diagonal} \left( \frac{1}{T_{4n}} - \frac{T_{1n}}{T_{2n}T_{4n}} \right) \quad (4.33.e)$$

$$[K_{x6}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{4n}} \right) \quad (4.33.f)$$

Por fim define-se a reatância do TCSC como variável de estado em função de todas as variáveis de estado e algébricas do MSP, conforme descrito pelo conjunto de equações (4.34).

$$\begin{aligned} \dot{\Delta X}_{TCSCn} = & K_{t1} \Delta X'_{1n} + K_{t2} \Delta X_{TCSCn} + K_{t3} \Delta \theta_{km} + K_{t4} \Delta V_k + K_{t4} \Delta V_m + \\ & + K_{t5} \Delta X'_{2n} + K_{t6} \Delta X'_{PODn} + K_{t7} \Delta X_{refn} \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$[K_{t1}] = \text{diagonal} \left( \frac{T_{1n}T_{3n}}{T_{2n}T_{4n}T_{TCSCn}} \right) \quad (4.34.a)$$

$$[K_{t2}] = \text{diagonal} \left( \frac{-K_{PODn} A_{4km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{TCSCn}} - \frac{1}{T_{TCSCn}} \right) \quad (4.34.b)$$

$$[K_{t3}] = \begin{cases} K_{t3}(n \times k) = \frac{-K_{PODn} A_{1km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{TCSCn}} \\ K_{t3}(n \times m) = \frac{K_{PODn} A_{1km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{TCSCn}} \\ K_{t3}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.34.c)$$

$$[K_{t4}] = \begin{cases} K_{t4}(n \times k) = \frac{-K_{PODn} A_{2km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{TCSCn}} \\ K_{t4}(n \times m) = \frac{-K_{PODn} A_{3km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{TCSCn}} \\ K_{t4}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.34.d)$$

$$[K_{t5}] = \text{diagonal} \left( \frac{-T_{3n}}{T_{4n} T_{TCSCn}} + \frac{T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{TCSCn}} \right) \quad (4.34.e)$$

$$[K_{t6}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{TCSCn}} + \frac{T_{3n}}{T_{4n} T_{TCSCn}} \right) \quad (4.34.f)$$

$$[K_{t7}] = \text{diagonal} \left( \frac{1}{T_{TCSCn}} \right) \quad (4.34.g)$$

As equações (4.31), (4.32), (4.33) e (4.34) podem ser agrupadas com as equações algébricas e diferenciais dadas no Capítulo 2, expressas na forma compacta da equação (2.40), definindo o MSP para um sistema com  $ng$  geradores,  $nb$  barras,  $n$  dispositivos TCSC equipados com controladores POD conforme mostram as equações (4.35) e (4.36).

$$\begin{bmatrix} \dot{[\Delta\omega]} \\ \dot{[\Delta\delta]} \\ \dot{[\Delta E'_q]} \\ \dot{[\Delta E_{fd}]} \\ \dot{[\Delta X'_1]} \\ \dot{[\Delta X'_2]} \\ \dot{[\Delta X'_{POD}]} \\ \dot{[\Delta X_{TCSC}]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1] & [0]_{4ng \times 4k} \\ [0]_{4k \times 4ng} & \begin{bmatrix} [K_{11}] & [0]_{k \times k} & [0]_{k \times k} & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{25}] & [0]_{k \times k} & [K_{22}] \\ [K_{x1}] & [K_{x5}] & [K_{x6}] & [K_{x2}] \\ [K_{t1}] & [K_{t5}] & [K_{t6}] & [K_{t2}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\omega] \\ [\Delta\delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta X'_1] \\ [\Delta X'_2] \\ [\Delta X'_{POD}] \\ [\Delta X_{TCSC}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J2] \\ \begin{bmatrix} [K_{13}] & [K_{14}] \\ [K_{23}] & [K_{24}] \\ [K_{x3}] & [K_{x4}] \\ [K_{t3}] & [K_{t4}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta\theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1] \\ \begin{bmatrix} [0]_{3k \times (2ng+2nb+k)} \\ [0]_{k \times (2ng+2nb)} & [K_{t7}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta X_{ref}] \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Na equação (4.36) as submatrizes  $A4_{Tkm}$  e  $R4_{Tkm}$  representam o efeito da inserção do TCSC nas equações algébricas, ou seja, no balanço de potência ativa e reativa e possuem formação idêntica a fornecida no Capítulo 3 para inclusão do TCSC sem controlador POD.

Ainda nesta equação, a matriz J4 tem estrutura semelhante ao Jacobiano do fluxo de carga e sua formação é descrita no Capítulo 2.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J3] & [0]_{2nb \times 3k} \\ [A4_{Tkm}] & [R4_{Tkm}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta X_1] \\ [\Delta X_2] \\ [\Delta X_{POD}] \\ [\Delta X_{TCSC}] \end{bmatrix} + [J4] \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + [B2] \begin{bmatrix} [0]_{nb \times k} \\ [0]_{nb \times k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta X_{ref}] \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

As equações (4.35) e (4.36) representam completamente o MSP e podem ser organizadas na equação (4.37) de uma forma compacta.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta X_T} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_T & J2_T \\ J3_T & J4_T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_T \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_T \\ B2_T \end{bmatrix} \cdot [\Delta u_T] \quad (4.37)$$

Adotando o mesmo procedimento realizado para o PSS, elimina-se o vetor de variáveis algébricas ( $\Delta z$ ), obtendo a representação na forma de espaço de estados de acordo com a equação (4.38).

$$\dot{\Delta X_T} = (J1_T - J2_T \cdot J4_T^{-1} \cdot J3_T) \cdot \Delta X_T + (B1_T - J2_T \cdot J4_T^{-1} \cdot B2_T) \cdot \Delta u_T \quad (4.38)$$

#### 4.3.2 UPFC – POD

O processo de inclusão de um controlador POD a um dispositivo UPFC é semelhante ao realizado na seção anterior para o TCSC. Porém, conforme descrito no Capítulo 3, o UPFC possui três parâmetros de controle,  $V_p$ ,  $V_q$  e  $I_q$ . Portanto, deve-se escolher em qual modo de operação o controlador POD irá operar. A seguir é apresentada a formulação para representação de dispositivos UPFC no modo de operação  $V_q$ , sendo que esta formulação pode ser aplicada aos outros parâmetros de controle do UPFC. O modo de operação  $V_q$  é, evidentemente, relacionado à atuação de um dispositivo TCSC, pois a tensão inserida pelo UPFC é defasada de  $90^\circ$  da corrente da linha, exibindo um comportamento semelhante à

queda de tensão provocada por uma reatância capacitiva inserida em série com a linha de transmissão. Considere a Figura 4.12, onde são mostrados os diagramas de blocos do modelo dinâmico do UPFC.

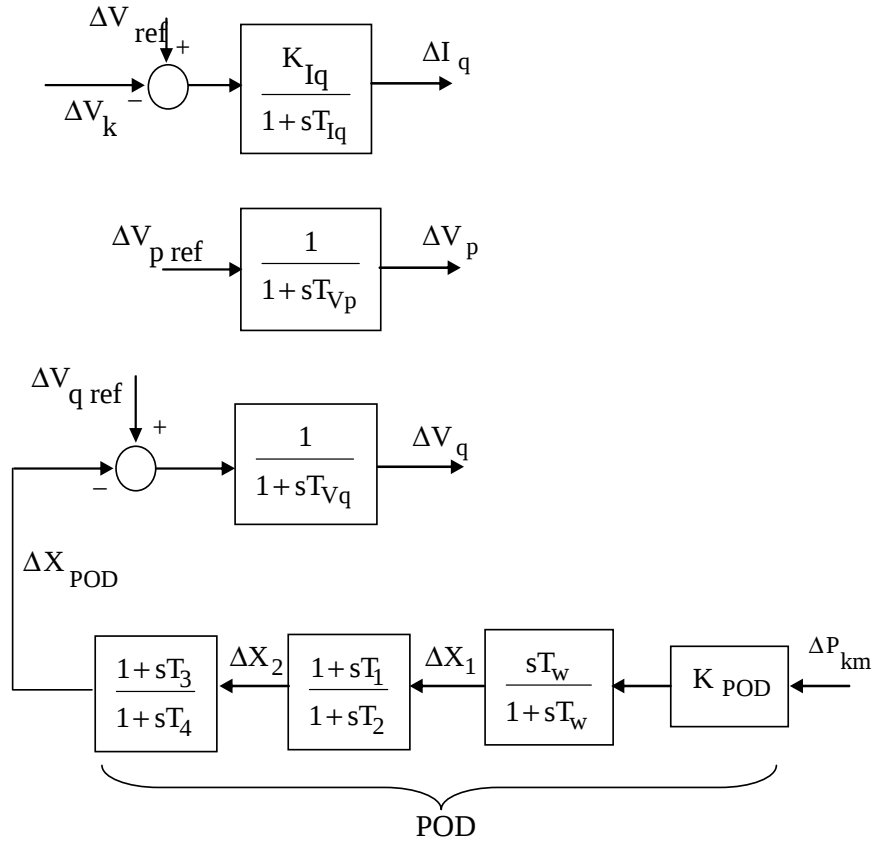


Figura 4.12 – Modelo Dinâmico do UPFC – Modo Vq

O sinal de entrada para o controlador POD é o fluxo de potência ativa na linha de transmissão de instalação do UPFC que pode ser expresso pela equação (4.39).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_{km} + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta V_m \quad (4.39)$$

Do diagrama de blocos mostrado na Figura 4.12 e adotando um procedimento análogo ao realizado para o TCSC-POD, é obtido o conjunto de equações (4.40), que definem a variável de estado  $\Delta X'_1$  para um sistema multimáquinas constituído de  $ng$  geradores,  $nb$  barras e  $n$  dispositivos UPFC instalados entre uma barra inicial  $k$  e outra final  $m$ .

$$\dot{\Delta X'}_{1n} = K_{11}\Delta X'_{1n} + K_{12}\Delta\theta_{km} + K_{13}\Delta V_k + K_{13}\Delta V_m \quad (4.40)$$

$$[K_{11}] = \text{diagonal}\left(\frac{-1}{T_{wn}}\right) \quad (4.40.a)$$

$$[K_{12}] = \begin{cases} K_{12}(n \times k) = \frac{K_{PODn} A1_{km}}{T_{wn}} \\ K_{12}(n \times m) = \frac{-K_{PODn} A1_{km}}{T_{wn}} \\ K_{12}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.40.b)$$

$$[K_{13}] = \begin{cases} K_{13}(n \times k) = \frac{K_{PODn} A2_{km}}{T_{wn}} \\ K_{13}(n \times m) = \frac{K_{PODn} A3_{km}}{T_{wn}} \\ K_{13}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.40.c)$$

De maneira análoga define-se a variável de estado  $\Delta X'_2$  de acordo com o conjunto de equações (4.41).

$$\dot{\Delta X'}_{2n} = K_{21}\Delta X'_{1n} + K_{22}\Delta\theta_{km} + K_{23}\Delta V_k + K_{23}\Delta V_m + K_{24}\Delta X'_{2n} \quad (4.41)$$

$$[K_{21}] = \text{diagonal}\left(\frac{-1}{T_{2n}}\right) \quad (4.41.a)$$

$$[K_{22}] = \begin{cases} K_{22}(n \times k) = \frac{K_{PODn} A1_{km}}{T_{2n}} \\ K_{22}(n \times m) = \frac{-K_{PODn} A1_{km}}{T_{2n}} \\ K_{22}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.41.b)$$

$$[K_{23}] = \begin{cases} K_{23}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{2km}}{T_{2n}} \\ K_{23}(n \times m) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{3km}}{T_{2n}} \\ K_{23}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.41.c)$$

$$[K_{24}] = [K_{21}] \quad (4.41.d)$$

A variável de estado do controlador POD  $\Delta X'_{\text{POD}}$  é definida de acordo com o conjunto de equações (4.42).

$$\dot{\Delta X'_{\text{PODn}}} = K_{x1} \Delta X'_{1n} + K_{x2} \Delta \theta_{km} + K_{x3} \Delta V_k + K_{x3} \Delta V_m + K_{x4} \Delta X'_{2n} + K_{x5} \Delta X'_{\text{PODn}} \quad (4.42)$$

$$[K_{x1}] = \text{diagonal} \left( \frac{-T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \right) \quad (4.42.a)$$

$$[K_{x2}] = \begin{cases} K_{x2}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{1km} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \\ K_{x2}(n \times m) = \frac{-K_{\text{PODn}} A_{1km} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \\ K_{x2}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.42.b)$$

$$[K_{x3}] = \begin{cases} K_{x3}(n \times k) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{2km} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \\ K_{x3}(n \times m) = \frac{K_{\text{PODn}} A_{3km} T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \\ K_{x3}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.42.c)$$

$$[K_{x4}] = \text{diagonal} \left( \frac{1}{T_{4n}} - \frac{T_{1n}}{T_{2n} T_{4n}} \right) \quad (4.42.d)$$

$$[K_{x5}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{4n}} \right) \quad (4.42.e)$$

As variáveis de controle do UPFC ( $V_q$ ,  $V_p$  e  $I_q$ ) são definidas como variáveis de estado conforme mostram os conjuntos de equações (4.43), (4.44) e (4.45), respectivamente.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{qn} = & K_{q1} \Delta X'_{1n} + K_{q2} \Delta V_{qn} + K_{q3} \Delta \theta_{km} + K_{q4} \Delta V_k + K_{q4} \Delta V_m + \\ & + K_{q5} \Delta X'_{2n} + K_{q6} \Delta X'_{\text{PODn}} + K_{q7} \Delta V_{q \text{ refn}} \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$[K_{q1}] = \text{diagonal} \left( \frac{T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{\text{TCSCn}}} \right) \quad (4.43.a)$$

$$[K_{q2}] = \text{diagonal} \left( -\frac{1}{T_{Vqn}} \right) \quad (4.43.b)$$

$$[K_{q3}] = \begin{cases} K_{q3}(n \times k) = \frac{-K_{\text{PODn}} A1_{km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{Vqn}} \\ K_{q3}(n \times m) = \frac{K_{\text{PODn}} A1_{km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{Vqn}} \\ K_{q3}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.43.c)$$

$$[K_{q4}] = \begin{cases} K_{q4}(n \times k) = \frac{-K_{\text{PODn}} A2_{km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{Vqn}} \\ K_{q4}(n \times m) = \frac{-K_{\text{PODn}} A3_{km} T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{Vqn}} \\ K_{q4}(n \times s) = 0 \\ s \neq k \text{ ou } m \end{cases} \quad (4.43.d)$$

$$[K_{q5}] = \text{diagonal} \left( \frac{-T_{3n}}{T_{4n} T_{Vqn}} + \frac{T_{1n} T_{3n}}{T_{2n} T_{4n} T_{Vqn}} \right) \quad (4.43.e)$$

$$[K_{q6}] = \text{diagonal} \left( \frac{-1}{T_{Vqn}} + \frac{T_{3n}}{T_{4n} T_{Vqn}} \right) \quad (4.43.f)$$

$$[K_{q7}] = \text{diagonal} \left( \frac{1}{T_{Vqn}} \right) \quad (4.43.g)$$

$$\Delta \dot{V}_{pn} = K_{p1} \Delta V_{pn} + K_{p2} \Delta V_{p \text{ refn}} \quad (4.44)$$

$$[K_{p1}] = \text{diagonal} \left( -\frac{1}{T_{Vpn}} \right) \quad (4.44.a)$$

$$[K_{p2}] = \text{diagonal} \left( \frac{1}{T_{Vpn}} \right) \quad (4.44.b)$$

$$\Delta \dot{I}_{qn} = K_{i1} \Delta I_{qn} + K_{i2} \Delta V_{\text{refn}} - K_{i2} \Delta V_k \quad (4.44)$$

$$[K_{i1}] = \text{diagonal} \left( -\frac{K_{Iq}}{T_{Iqn}} \right) \quad (4.44.a)$$

$$[K_{i2}] = \text{diagonal} \left( \frac{K_{Iq}}{T_{Iqn}} \right) \quad (4.44.b)$$

As equações (4.40) a (4.44) definem o comportamento dinâmico de  $n$  dispositivos UPFC equipados com controladores POD no MSP, que podem ser agrupadas à equação (2.37) definindo as equações dinâmicas, representadas de forma matricial na equação (4.45).

As equações algébricas do modelo são obtidas do balanço instantâneo de potência ativa e reativa em cada barra do sistema elétrico. As equações algébricas são obtidas do balanço de fluxo de potência ativa e reativa conforme descrito pelas equações (4.46) e (4.47).

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta X'_1 \\ \Delta X'_2 \\ \Delta X'_{sup} \\ \Delta V_p \\ \Delta V_q \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1] & [0]_{4ng \times 6n} \\ [0]_{6n \times 4ng} & \begin{bmatrix} [K_{11}] & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [K_{21}] & [K_{24}] & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [K_{x1}] & [K_{x2}] & [K_{x5}] & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [K_{p1}] & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [K_{q1}] & [K_{q5}] & [K_{q6}] & [0]_{n \times n} & [K_{q2}] & [0]_{n \times n} \\ [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [K_{i1}] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta X'_1 \\ \Delta X'_2 \\ \Delta X'_{POD} \\ \Delta V_p \\ \Delta V_q \\ \Delta I_q \end{bmatrix} + \quad (4.45)$$

$$+ \begin{bmatrix} [J2] \\ \begin{bmatrix} [K_{12}] & [K_{13}] \\ [K_{22}] & [K_{23}] \\ [K_{x2}] & [K_{x3}] \\ [0]_{n \times nb} & [0]_{n \times nb} \\ [K_{q3}] & [K_{q4}] \\ [0]_{n \times nb} & [-K_{i2}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1] \\ \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [K_{p2}] & [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} \\ [0]_{n \times n} & [K_{q7}] & [0]_{n \times n} \\ [0]_{n \times n} & [0]_{n \times n} & [K_{i2}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{p ref}] \\ [\Delta V_{q ref}] \\ [\Delta V_{ref}] \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\Delta P_{Gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} (\Delta P_{km}) - \Delta P_k - \Delta P_m = 0 \quad (4.46)$$

$$\Delta Q_{Gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} (\Delta Q_{km}) - \Delta Q_k - \Delta Q_m = 0 \quad (4.47)$$

As equações (4.46) e (4.47) podem ser agrupadas de forma semelhante ao realizado para o UPFC no Capítulo 3, sendo expressas pela equação (4.48). As submatrizes envolvidas na formação da equação (4.48) são idênticas às submatrizes definidas no Capítulo 3 para o UPFC.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [J3] \begin{bmatrix} [0]_{nb \times 3n} & [-A4_U] & [-A5_U] & [-A6_U] \\ [0]_{nb \times 3n} & [-R4_U] & [-R5_U] & [-R6_U] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta X'_1] \\ [\Delta X_1] \\ [\Delta X'_{POD}] \\ [\Delta V_p] \\ [\Delta V_q] \\ [\Delta I_q] \end{bmatrix} + \\
&+ [J4_U] \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B2] \begin{bmatrix} [0]_{nb \times 3n} \\ [0]_{nb \times 3n} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_m] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{p ref}] \\ [\Delta V_{q ref}] \\ [\Delta V_{ref}] \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.48}$$

Adotando um procedimento semelhante ao realizado para o TCSC pode-se agrupar as equações (4.47) e (4.48) na forma compacta da equação (4.49).

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x_U} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1_U & J2_U \\ J3_U & J4_U \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_U \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_U \\ B2_U \end{bmatrix} \cdot [\Delta u_U] \tag{4.49}$$

Eliminando o vetor de variáveis algébricas  $\Delta z$  é obtida a formulação do sistema multimáquinas no espaço de estados, expressa pela equação (4.50).

$$\dot{\Delta x_U} = (J1_U - J2_U \cdot J4_U^{-1} \cdot J3_U) \cdot \Delta x_U + (B1_U - J2_U \cdot J4_U^{-1} \cdot B2_U) \cdot \Delta u_U \tag{4.50}$$

### 4.3.3 Localização e Projeto de Controladores POD

A localização de um dispositivo FACTS equipado com controlador POD deve ser adotada de forma a fornecer maior amortecimento para os modos oscilatórios fracamente amortecidos. Esta localização pode ser obtida através da análise dos resíduos da função de transferência de malha aberta para diversos sinais de entrada e saída do controlador POD [31,32] (o cálculo de resíduos é mostrado no Apêndice III). Para obter a influência que o

controlador irá exercer sobre os autovalores do sistema, considere que o sistema elétrico de potência é representado por uma função de transferência  $SEP(s)$ , e que  $KC(s)$  seja a função de transferência do controlador POD a ser inserido, de acordo com a Figura 4.13.

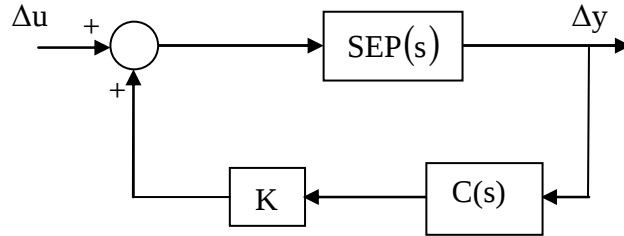


Figura 4.13 – Função de Transferência do Sistema Elétrico de Potência com Controlador

A equação (4.51) mostra a relação entre a sensibilidade de um dado autovalor  $\lambda_i$ , o ganho estático  $K$  do controlador e o resíduo ( $R_{ijk}$ ) associado ao conjunto entrada saída ( $\Delta y_j$ - $\Delta u_k$ ) para o mesmo autovalor [31].

$$\frac{\Delta \lambda_i}{\Delta K} = R_{ijk} C(\lambda_i) \quad (4.51)$$

Considerando que para um estado de operação inicial o controlador possui um ganho nulo ( $K_0 = 0$ ), assim a equação (4.52) mostrará que devido à inclusão do controlador POD o autovalor de interesse  $\lambda_i$  sofrerá um deslocamento; este deslocamento deve ser para o semiplano esquerdo do plano complexo de modo a aumentar o valor absoluto da parte real deste autovalor. Da equação (4.52) nota-se que o resíduo é diretamente proporcional ao deslocamento do autovalor de interesse, portanto é evidente que um maior resíduo terá maior efeito sobre o deslocamento deste autovalor.

$$\Delta \lambda_i = R_{ijk} KC(\lambda_i) \quad (4.52)$$

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  $\theta$  graus para o semiplano esquerdo do plano complexo conforme mostrado na Figura 4.13. 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 4.14 para o caso do TCSC,

proposto em [31].

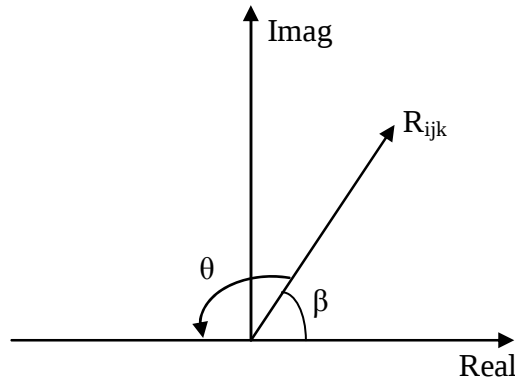


Figura 4.14 – Efeito do Controlador POD no Resíduo Associado ao Autovalor  $\lambda_i$

O conjunto de equações (4.53) demonstra o procedimento necessário para obtenção de todos os parâmetros do POD, considerando  $T_1 = T_3$  e  $T_2 = T_4$ , sendo que este procedimento é utilizado em [33] para a obtenção dos parâmetros de controladores PSS e POD para dispositivos Static Var Compensator (SVC). O ganho  $K$  do controlador é obtido através dos parâmetros anteriormente obtidos e da posição desejada ( $\lambda_{i\ des}$ ) para o autovalor ( $\lambda_i$ ) associado ao modo de oscilação a ser amortecido, que possui frequência natural ( $\omega_i$ ), de acordo com a equação (4.54).

$$\theta = 180^\circ - \beta$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin(\theta / 2)}{1 + \sin(\theta / 2)} \quad (4.53)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}}; \quad T_1 = \alpha T_2$$

$$K_{\text{POD}} = \left| \frac{\lambda_{i\ des} - \lambda_i}{R_{ijk} C(\lambda_i)} \right| \quad (4.54)$$

#### 4.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as razões que motivam a utilização de sinais estabilizadores suplementares a décadas. Apresentou-se a solução clássica para introduzir

amortecimento a sistemas elétricos de potência, sendo caracterizada pela introdução de dispositivos PSS (Power System Stabilizers).

A inclusão de dispositivos PSS no Modelo de Sensibilidade de Potência foi realizada, bem como o procedimento para obtenção dos parâmetros que definem os blocos de avanço e atraso de fase e ganho deste equipamento.

Uma solução alternativa que ganha grande destaque na literatura é a inclusão de sinais estabilizadores suplementares aos controladores FACTS. Portanto, foi apresentada a formulação completa para inclusão de dispositivos TCSC e UPFC equipados com controladores POD (Power Oscillation Damping) no Modelo de Sensibilidade de Potência.

O ajuste dos parâmetros do controlador POD é feito com base na possibilidade de deslocamento dos autovalores críticos para o semiplano esquerdo do plano complexo, através da obtenção dos resíduos da função da transferência definida entre a entrada e a saída do controlador. Esse método pode fornecer a melhor localização para inclusão dos dispositivos TCSC e UPFC.

No próximo Capítulo serão apresentados os resultados e análises obtidas para um sistema multimáquinas teste, devido à inclusão de dispositivos PSS, UPFC e TCSC, equipados ou não com controladores POD.

## 5. Resultados e Simulações

### 5.1 Introdução

Neste Capítulo serão apresentados os resultados, simulações e conseqüentes análises do comportamento dinâmico de um sistema multimáquinas teste, com foco na influência da inclusão de controladores FACTS e PSS.

Será utilizado um sistema de duas áreas simétrico, composto por 4 geradores, especialmente proposto para se estudar o comportamento de oscilações de baixa frequência associadas com modos interárea de oscilação.

Toda modelagem apresentada nos capítulos precedentes foi implementada computacionalmente com o auxílio do software MATLAB 7.0<sup>®</sup>. Ressalta-se estar fora do escopo deste trabalho a análise de métodos de solução de fluxo de potência, porém, para a obtenção dos casos base para cada sistema teste foi utilizada a ferramenta MATPOWER<sup>®</sup>, desenvolvida em linguagem MATLAB, disponível em [39].

Os parâmetros dos controladores PSS e POD foram obtidos da teoria do controle clássico (trata-se de sistemas lineares), pelo método da compensação de fase. A mais eficiente localização dos dispositivos PSS e POD foi determinada pela análise dos fatores de participação e resíduos do sistema em questão.

São apresentadas análises quanto às propriedades da matriz de estados  $A$  de cada configuração dos sistemas teste, ou seja, autovalores, autovetores, fatores de participação, frequência natural e coeficientes de amortecimento. Simulações no domínio do tempo foram realizadas a partir da ocorrência de uma pequena perturbação em forma de degrau de 0,05 pu na potência mecânica de uma máquina geradora.

### 5.2 Sistema Simétrico de Duas Áreas

O sistema multimáquinas hipotético, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 5.1 foi proposto para se estudar os fatores que influenciam os modos interárea de oscilação [40]. Trata-se de um sistema simétrico, composto por duas áreas e vem sendo utilizado com frequência na literatura. Os dados dos geradores, barras, linhas de transmissão e fluxo de potência para o caso base são mostrados no Apêndice IV.

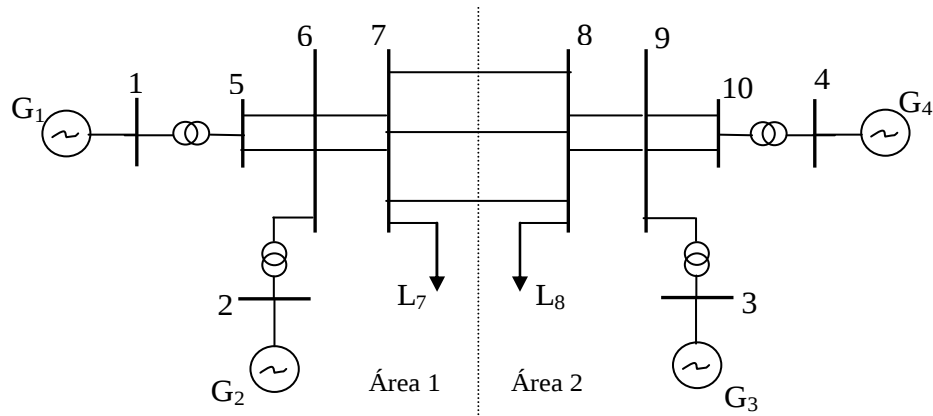


Figura 5.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Simétrico de Duas Áreas

Nota-se claramente a existência de duas áreas simétricas, sendo estas conectadas por três linhas de transmissão paralelas longas, ou seja, com alta reatância indutiva, constituindo uma interligação eletricamente fraca entre os sistemas, normalmente designada por “tie-line”. Tal fato contribui para a falta de amortecimento do sistema, ocasionando instabilidade. Isto pode ser visto através da análise das raízes da equação característica do sistema, ou seja, pela análise dos autovalores dominantes da matriz de estados do sistema, conforme mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Autovalores Dominantes, Freqüência e Coeficientes de Amortecimento.

| Autovalores                       | Freqüência (Hz) | Coeficiente de Amortecimento ( $\zeta$ ) |
|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| $-0,2356 \pm j 6,2956$ (Local 1)  | 1,0026          | 0,0374                                   |
| $-0,1585 \pm j 5,8779$ (Local 2)  | 0,9358          | 0,0270                                   |
| $0,0460 \pm j 4,1382$ (interárea) | 0,6587          | -0,0111                                  |

Da Tabela 5.1 nota-se claramente que o par complexo conjugado associado ao modo interárea de oscilação é o responsável pela instabilidade do sistema. Os autovalores foram classificados em Local 1, Local 2 e Interárea, com base nas freqüências apresentadas na Tabela 5.1, bem como na análise dos fatores de participação de cada variável de estado nestes modos oscilatórios, conforme mostrado na Figura 5.2.

Para solucionar o problema de estabilidade é proposta a inclusão dos dispositivos FACTS TCSC e UPFC no sistema em questão. Nas seções seguintes serão apresentados resultados evolutivos para os modelos dos dispositivos FACTS de acordo com o andamento da pesquisa, ou seja, inicialmente foram utilizados modelos fixos para os dispositivos,

posteriormente modelos dinâmicos definidos por blocos de primeira ordem e por fim, realizou-se a inclusão de controladores POD aos dispositivos FACTS.

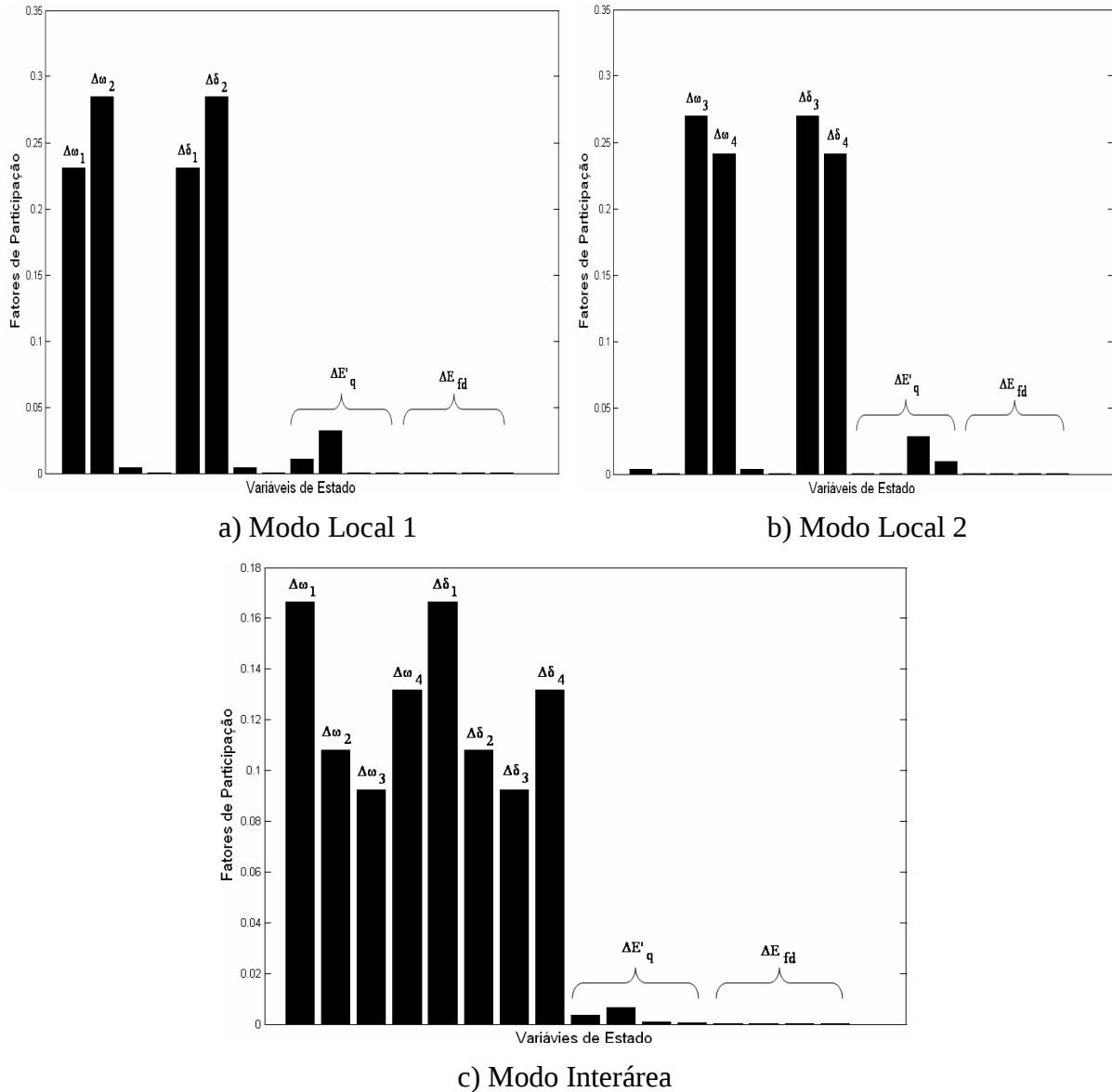


Figura 5.2- Fatores de Participação: (a) Local 1; (b) Local 2; (c) Interárea

### 5.2.1 TCSC – Modelo Fixo

O TCSC pode ser representado por uma reatância ajustável, conforme descrito no Capítulo 3. Considere que, de acordo o nível de compensação requerido, é possível regular o valor de uma reatância capacitiva a ser inserida em série com a linha de transmissão. Portanto, o TCSC irá operar como uma reatância capacitiva ajustável manualmente, ou seja, o valor de sua reatância é uma entrada do sistema, especificada de acordo com o nível de compensação.

Escolheu-se a linha de transmissão entre as barras 7 e 8 para inserção do TCSC – modelo fixo, de maneira a diminuir a distância elétrica entre as áreas. Na Figura 5.3 é descrita a trajetória do par complexo de autovalores associado ao modo interárea, onde nota-se que o sistema torna-se estável somente para um nível de compensação ( $nc$ ) de 82% do valor nominal da reatância da linha de transmissão.

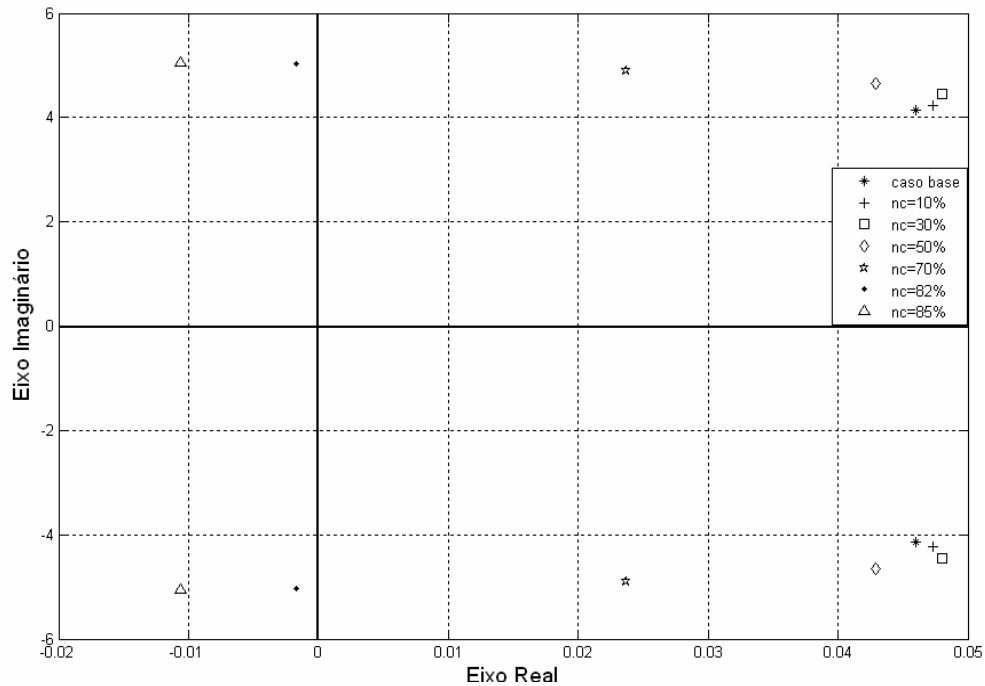


Figura 5.3 – Comportamento do Par Complexo de Autovalores Associado ao Modo Interárea

A ação do dispositivo se concentra no modo interárea, sendo que os modos locais são fracamente afetados. Isto pode ser comprovado pelos dados apresentados na Tabela 5.2 onde são mostrados os autovalores dominantes e seus respectivos coeficientes de amortecimento para um nível de compensação de 82% da reatância nominal da linha de transmissão. Outro fato importante é que níveis altos de compensação não são executáveis, pois podem ocasionar o surgimento de novos modos oscilatórios indesejáveis no sistema, bem como aumentar as perdas ativas do sistema de transmissão [15].

Da Tabela 5.2 pode-se notar que o fornecimento de amortecimento ao sistema é mínimo para essa configuração do TCSC, ou seja, o sistema torna-se estável, mas as oscilações são fracamente amortecidas. Mostra-se na Figura 5.4, o comportamento dinâmico do ângulo interno do gerador 2 em relação ao ângulo interno da máquina geradora 1 (referência do sistema), devido a uma pequena perturbação na potência mecânica da máquina geradora 1 e comprova que as oscilações são fracamente amortecidas.

Tabela 5.2 – Autovalores Dominantes, Freqüência e Coeficientes de Amortecimento  $\eta=82\%$ .

| Autovalores                        | Freqüência (Hz) | Coeficiente de Amortecimento ( $\zeta$ ) |
|------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| $-0,2529 \pm j 6,3389$ (Local 1)   | 1,0097          | 0,0399                                   |
| $-0,1771 \pm j 5,9060$ (Local 2)   | 0,9404          | 0,0300                                   |
| $-0,0017 \pm j 5,0226$ (interárea) | 0,7994          | 0,0003                                   |

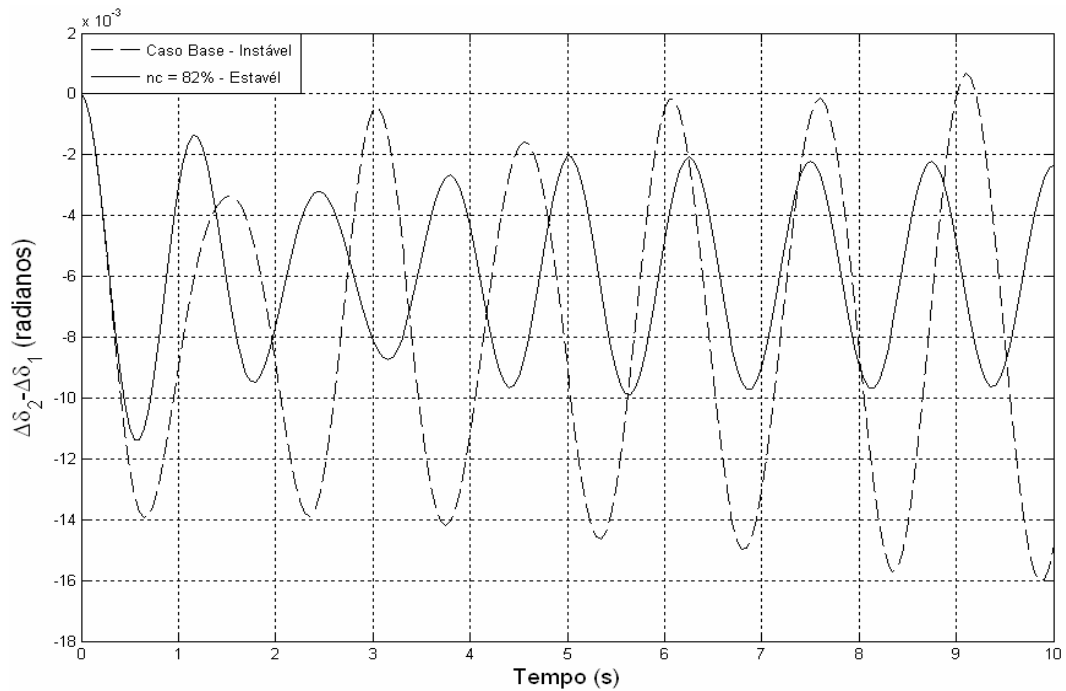


Figura 5.4 – Variações do Ângulo Interno da Máquina Geradora 2

Dos resultados nota-se a potencialidade da compensação série na melhoria da estabilidade dinâmica do sistema, porém faz-se necessária a consideração de um modelo dinâmico para o TCSC, que inicialmente será representado por um bloco de primeira ordem, que realize uma compensação automática de acordo com o nível do fluxo de potência na linha de transmissão.

### 5.2.2 TCSC – Modelo Dinâmico de Primeira Ordem

A introdução de um sistema de controle para a reatância  $X_{CSC}$  do TCSC pode introduzir melhoras consideráveis à estabilidade dinâmica do sistema. Para isso foi utilizado o sistema de controle sugerido no Capítulo 3, definido por uma constante de tempo  $T_{TCSC}$ , de valor igual a 0,05 segundos e um ganho estático  $K_{TCSC}$  ajustado manualmente. Utilizou-se como sinal de entrada as variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão.

Novamente incluiu-se o TCSC na linha de interligação entre as barras 7 e 8, sendo que o nível de compensação foi de 10% do valor nominal da reatância da linha de interligação. Com isso foi obtida a trajetória do par complexo de autovalores associado ao modo interárea de oscilação devido à inclusão do TCSC e à variação do seu ganho estático, conforme mostrado na Figura 5.5.

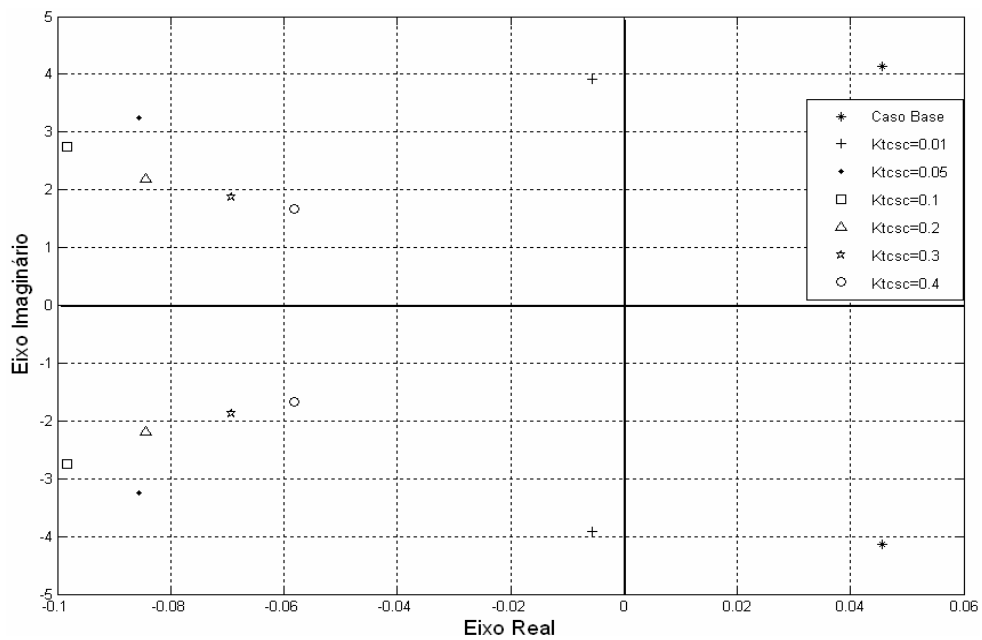


Figura 5.5 – Comportamento do Par Complexo de Autovalores Devido a Variações do Ganho  $K_{TCSC}$

Nota-se que somente a inserção de um sistema de controle para a reatância do TCSC foi suficiente para estabilizar o sistema e, de acordo com a variação do ganho, pode-se introduzir amortecimento positivo ao sistema, provocando o deslocamento do par complexo de autovalores associado ao modo interárea para o semiplano esquerdo do plano complexo. Porém, aumentos sucessivos do ganho não se traduzem em aumento do amortecimento, pois conforme mostrado na Figura 5.5 os autovalores tendem a se deslocar para o semiplano direito. Simulações adicionais mostraram que um ganho de 30 pu conduz o sistema à instabilidade, pois o par complexo chega a origem e se torna dois autovalores reais, um positivo e outro negativo, caracterizando uma instabilidade aperiódica. Os autovalores associados aos modos locais de oscilação são fracamente influenciados pela mudança do ganho estático do controlador do TCSC. Os fatos anteriormente descritos podem ser corroborados pelos dados mostrados na Tabela 5.3, ou seja, o coeficiente de amortecimento para o modo local 1, local 2 e interárea devido às variações do ganho estático  $K_{TCSC}$ . Outra maneira de observar a influência do aumento do ganho estático é pela Figura 5.6 onde se

apresentam os fatores de participação de todas as variáveis de estado no modo local 1 e modo interárea, quando da inclusão do TCSC, com ganho igual a 0,2 pu.

Tabela 5.3 – Coeficientes de Amortecimento dos Modos de Oscilações Devido às Variações do Ganho do TCSC.

| $K_{TCSC}$ | Local 1 | Local 2 | Interárea |
|------------|---------|---------|-----------|
| 0          | 0,0377  | 0,0273  | -0,0111   |
| 0,1        | 0,0373  | 0,0271  | 0,0378    |
| 0,2        | 0,0370  | 0,0270  | 0,0399    |
| 0,3        | 0,0369  | 0,0270  | 0,0380    |
| 0,4        | 0,0368  | 0,0269  | 0,0358    |
| 0,5        | 0,0368  | 0,0269  | 0,0337    |

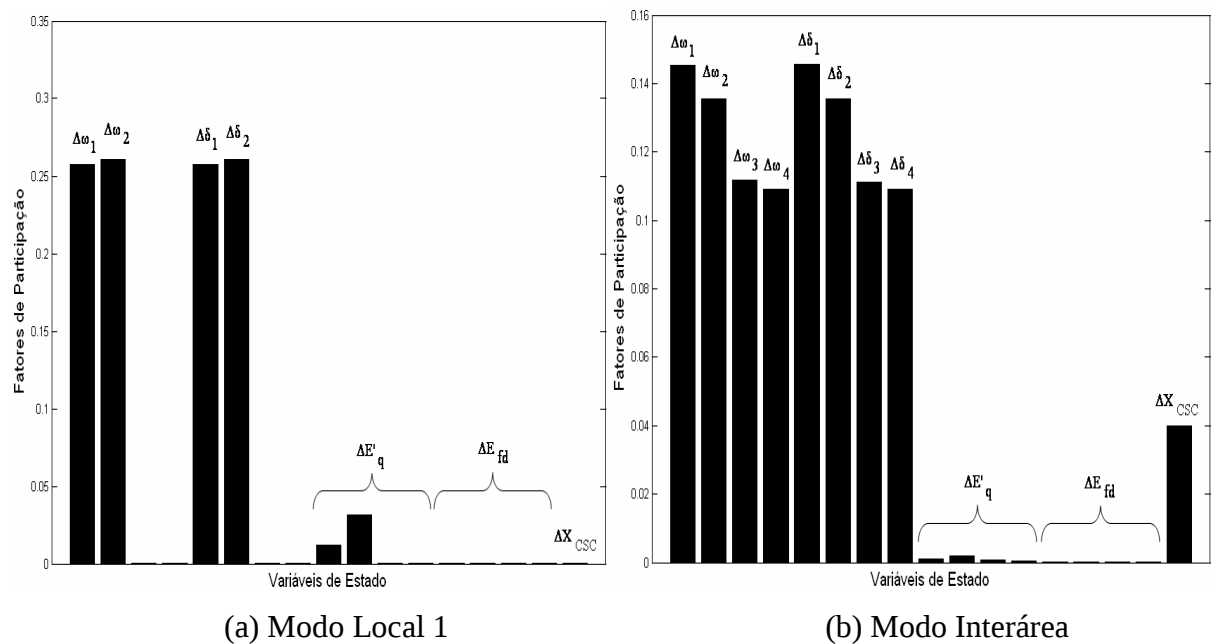


Figura 5.6 – Fatores de Participação: a) Modo Local 1 e b) Modo Interárea

Do exposto na Figura 5.6 nota-se a maior participação da reatância do TCSC no modo interárea, fornecendo amortecimento a esse modo e pouca ação sobre os modos locais, estando os resultados de acordo com a Tabela 5.3.

Este fato pode também ser evidenciado pela análise do comportamento dinâmico das variáveis de estado do sistema após a ocorrência de uma pequena perturbação. Para isso considere o comportamento dinâmico das variações do ângulo interno das máquinas geradoras 3 e 2, apresentados na Figura 5.7 e na Figura 5.8, respectivamente.

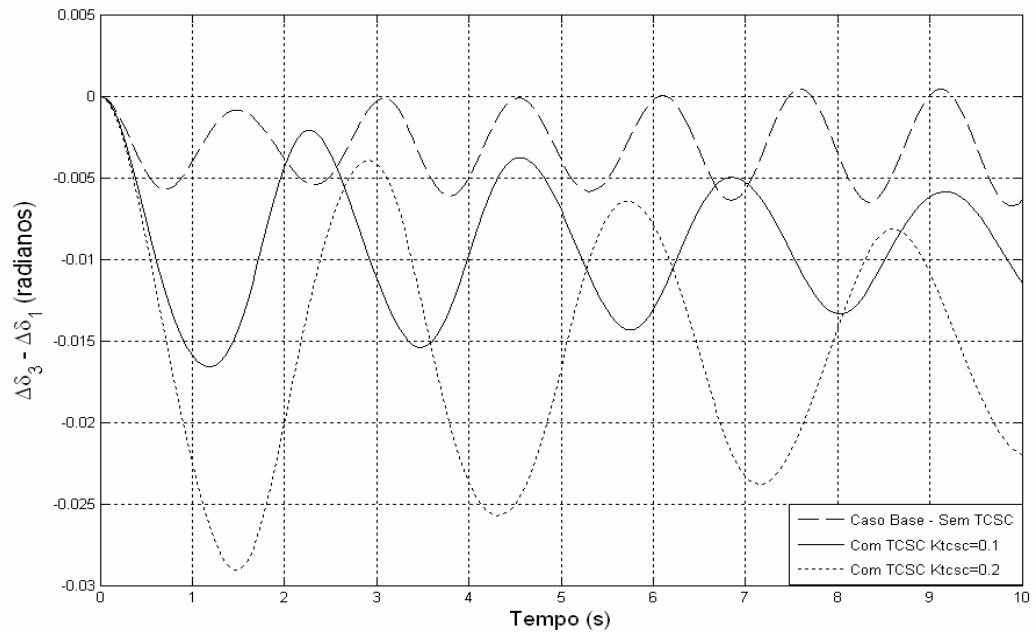


Figura 5.7 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3

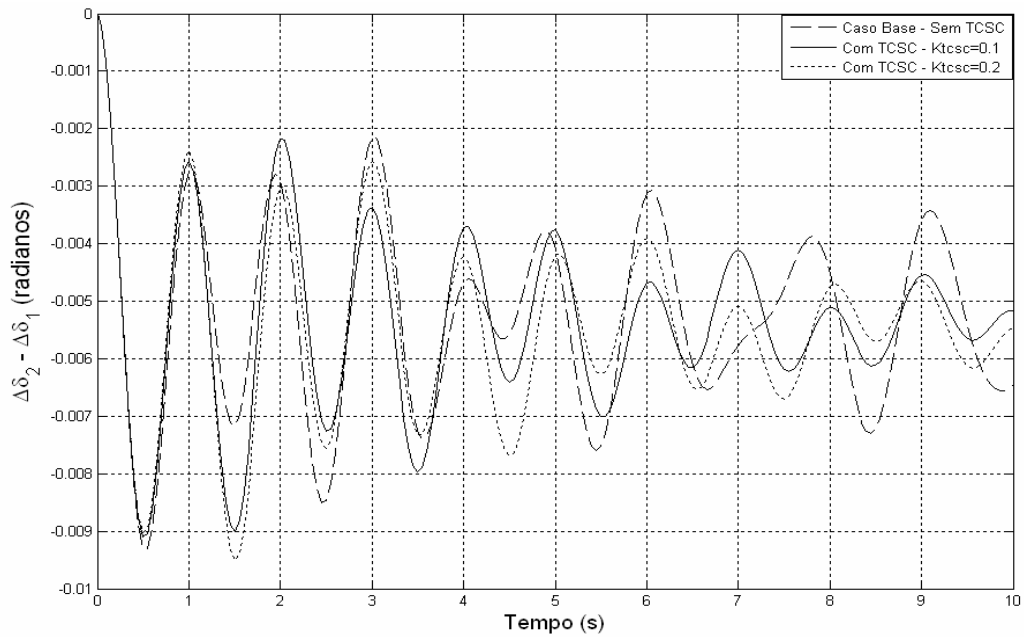


Figura 5.8 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 2

A partir da Figura 5.7 vê-se que o ângulo interno da máquina geradora 3 possui oscilações de amplitude crescente quando o sistema encontra-se sem o controlador TCSC. Porém, quando o controlador é inserido, as oscilações se tornam amortecidas e tendem para um valor final. Ainda de acordo com a Figura 5.7, o aumento do ganho do TCSC produz excursões maiores do ângulo interno da máquina geradora 3. Este fato ocasiona um tempo maior para a entrada em regime permanente do sistema elétrico e também, um desvio maior

no valor final do ângulo interno do gerador 3.

Analisando as curvas da Figura 5.8, nota-se que a inclusão da função de controle do TCSC leva o sistema a um ponto de estabilidade, porém, o aumento do ganho do controlador não altera substancialmente o comportamento dinâmico do ângulo interno da máquina geradora 2. Tal fato pode ser explicado pela localização do TCSC, que atua mais fortemente no modo de oscilação interárea, como pode ser visto a partir dos dados da Tabela 5.3. A máquina geradora 2 se encontra na mesma área que a máquina geradora 1, esta que sofre a perturbação. A máquina geradora 2 sente, portanto os modos locais de oscilação, diferentemente da máquina geradora 3, de área distinta, que sofre maior influência do modo de oscilação interárea.

Conclusões semelhantes podem ser obtidas da análise do comportamento dinâmico da velocidade angular das máquinas geradores 3 e 2, em relação à velocidade angular da máquina 1 (referência do sistema) conforme evidenciado na Figura 5.9.

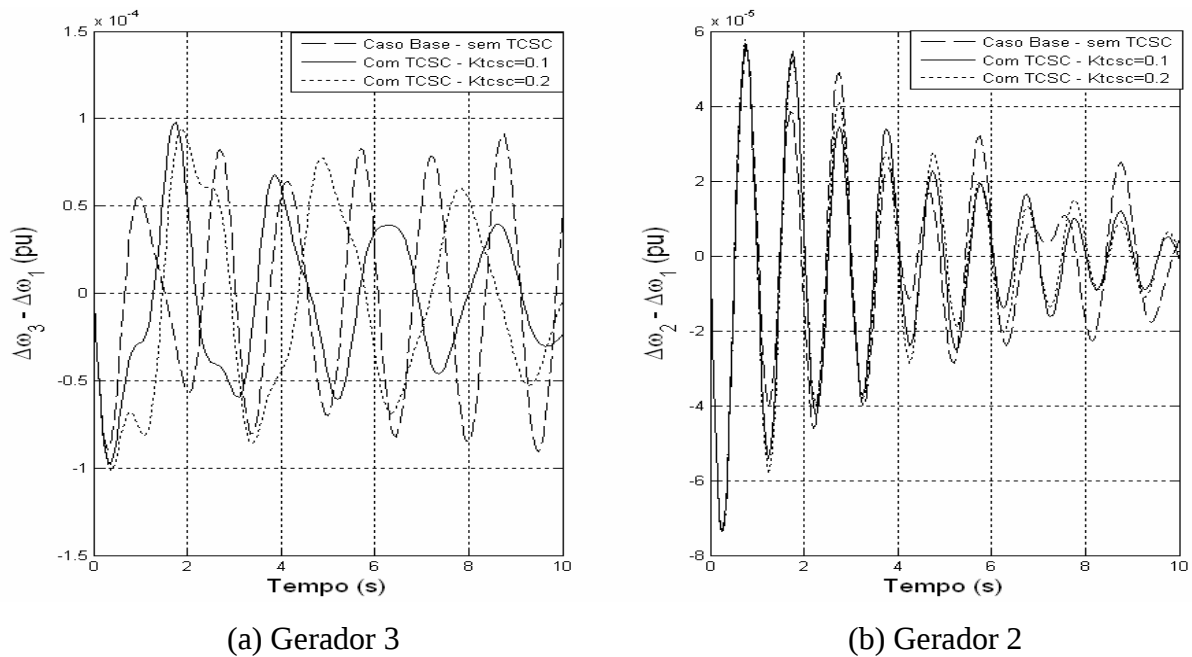


Figura 5.9 – Variações da Velocidade Angular: (a) Gerador 3; (b) Gerador 2

Outro fato importante que explica a atuação do TCSC no modo interárea é a utilização das variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão como entrada para o controlador de primeira ordem. Este é um sinal local, com alta observabilidade do modo interárea. Assim, a reatância do TCSC será diretamente proporcional, em função do ganho  $K_{TCSC}$ , a esse sinal conforme atestado na Figura 5.10, que mostra as variações da reatância do TCSC e as variações do fluxo de potência ativa na linha de interligação entre as barras 7 e 8.

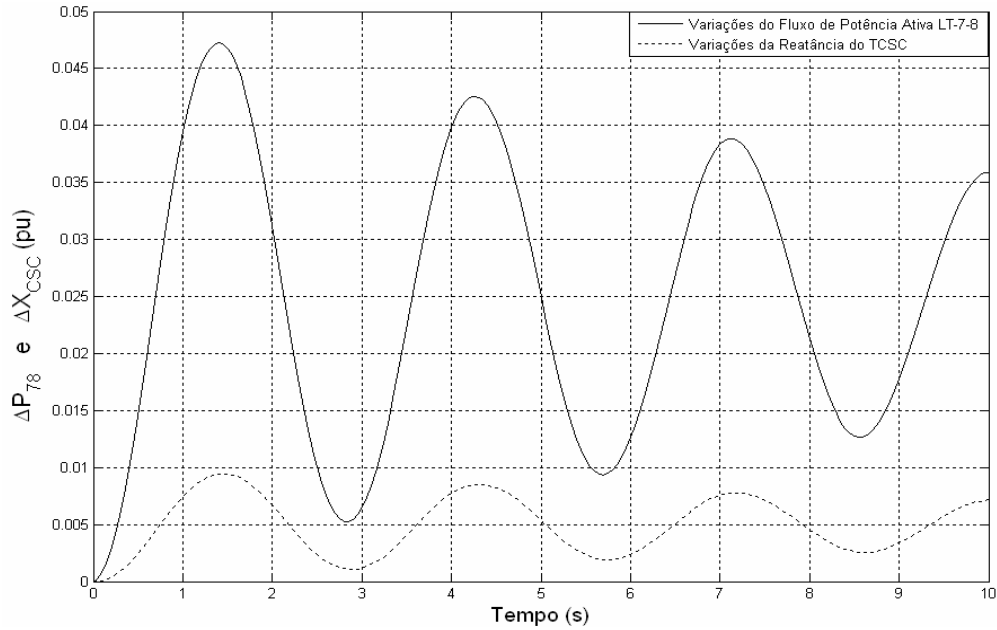


Figura 5.10 – Variações do Fluxo de Potência Ativa na LT 7-8 e da Reatância do TCSC

Através da análise do comportamento dinâmico das variáveis de estado mecânicas (velocidade angular e ângulo interno) e dos fatores de participação do sistema, pode-se concluir que a ação do controlador dependerá da sua localização. A seção seguinte apresentará o cálculo de resíduos da função de transferência em malha aberta do controlador POD a ser inserido ao TCSC de modo a comprovar esses resultados e amortecer de maneira mais efetiva as oscilações do sistema.

### 5.2.3 TCSC – Equipado com POD

Nas seções anteriores foi mostrado o potencial do TCSC para melhoria da estabilidade dinâmica do sistema multimáquinas de duas áreas, considerando uma compensação fixa e um controlador de primeira ordem. Para se buscar um melhor desempenho no que diz respeito à estabilidade a pequenas perturbações será acoplado ao TCSC um controlador do tipo POD. Essa fonte adicional de amortecimento será projetada pelo método de compensação de fase, utilizando o cálculo de resíduos da função de transferência em malha aberta deste controlador, conforme descrito no Capítulo 4 e Apêndice III.

Nas seções anteriores não se utilizou nenhum método sistemático para alocação do TCSC, porém, conforme descrito no Apêndice III, os resíduos da função de transferência em malha aberta do controlador POD podem fornecer informações sobre o melhor local para instalação do TCSC.

É mostrado na Tabela 5.4 o módulo dos resíduos da função de transferência em malha aberta do POD, correspondentes aos autovalores associados aos modos eletromecânicos locais e interárea para as possíveis localizações do TCSC no sistema. Foi utilizada como entrada para o POD as variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão ( $\Delta P_{km}$ ) onde o TCSC poderia ser instalado.

Tabela 5.4 – Módulos dos Resíduos Associados aos Modos Eletromecânicos para Diversas Localizações do TCSC

| <b>L.T.</b> | <b>Modo Local 1</b> | <b>Modo Local 2</b> | <b>Modo Interárea</b> |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 – 5       | 140,230             | 1,4993              | 20,201                |
| 2 – 6       | 274,220             | 0,2869              | 21,908                |
| 5 – 6       | 142,580             | 1,4028              | 20,018                |
| 6 – 7       | 1,3265              | 2,7771              | 166,520               |
| 7 – 8       | 0,7349              | 0,3717              | 27,869                |
| 8 – 9       | 5,0980              | 1,2624              | 137,990               |
| 3 – 9       | 6,1628              | 264,060             | 14,047                |
| 9 – 10      | 0,0917              | 154,860             | 18,388                |
| 4 – 10      | 0,0889              | 152,980             | 18,687                |

De acordo com a Tabela 5.4 a instalação do TCSC na área 1 terá maior influência no modo local 1, sendo que no caso de instalação na área 2, a influência maior será sobre o modo local 2. Nota-se também que as maiores influências sobre o modo interárea ocorrem nas linhas 6-7 e 9-8. Isso pode ser explicado pelo fato de essas linhas serem uma extensão da linha de interligação, ou seja, constituem em um caminho obrigatório para o fluxo interárea. Porém, observa-se que essas linhas possuem os menores valores de reatância do sistema, limitando desta forma a faixa de compensação e deve-se, portanto, escolher outra linha de transmissão para a inclusão do TCSC [41]. Com isto, a linha de interligação entre as barras 7 e 8 torna-se a melhor localização para implementação do TCSC para o efetivo amortecimento do modo interárea de oscilação.

Para comprovar os fatos descritos na Tabela 5.4 efetuou-se a inserção e modelagem dos dispositivos POD conforme descrito no Capítulo 4 para todas as instalações disponíveis para o TCSC. Estes resultados estão listados na Tabela 5.5 que contém os coeficientes de amortecimento dos modos locais e interárea para as diversas localizações do TCSC. Ressalta-se que o TCSC realiza uma compensação de 10% da reatância nominal da linha de

transmissão e os coeficientes de amortecimento são obtidos para cada instalação, individualmente.

Tabela 5.5 – Coeficientes de Amortecimento dos Modos Eletromecânicos para Diversas Localizações do TCSC

| <b>L.T.</b> | <b>Modo Local 1</b> | <b>Modo Local 2</b> | <b>Modo Interárea</b> |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 – 5       | 0,5244              | 0,0276              | 0,0343                |
| 2 – 6       | 0,5327              | 0,0274              | 0,0241                |
| 5 – 6       | 0,5149              | 0,0276              | 0,0340                |
| 6 – 7       | 0,0383              | 0,0289              | 0,2430                |
| 7 – 8       | 0,0403              | 0,0288              | 0,2049                |
| 8 – 9       | 0,0413              | 0,0271              | 0,2272                |
| 3 – 9       | 0,0373              | 0,0063              | -0,0281               |
| 9 – 10      | 0,0375              | 0,5428              | 0,0127                |
| 4 – 10      | 0,0374              | 0,5468              | 0,0129                |

Da Tabela 5.5 é evidente a relação entre a localização e a inserção de amortecimento aos diferentes modos eletromecânicos de oscilação. Nota-se que a inserção do TCSC na área 1 fornecerá maior amortecimento ao modo local 1, enquanto que o TCSC na área 2 para o modo local 2. Quanto ao modo interárea nota-se que a instalação do TCSC nas linhas 7-8, 6-7 e 8-9 introduzem amortecimento semelhante para os três casos, daí outra justificativa para inclusão do TCSC equipado com POD na linha de transmissão entre as barras 7 e 8, pelo alto nível da sua reatância.

Do exposto conclui-se que a melhor localização para instalação do TCSC equipado com controlador POD é na linha de transmissão entre as barras 7 e 8, utilizando como sinal de entrada as variações do fluxo de potência ativa nessa linha ( $\Delta P_{78}$ ). A partir destas constatações são obtidos os parâmetros do POD mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Parâmetros do POD Instalado na Linha de Transmissão entre as Barras 7 e 8.

| <b>K<sub>POD</sub> (pu)</b> | <b>T<sub>w</sub> (s)</b> | <b>T1 (s)</b> | <b>T2 (s)</b> | <b>T3 (s)</b> | <b>T4 (s)</b> |
|-----------------------------|--------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0,34002                     | 1                        | 0,080596      | 0,69138       | 0,080596      | 0,69138       |

Após inclusão do TCSC equipado com POD obteve-se o comportamento dinâmico das variáveis de interesse do sistema, quando este foi submetido à uma pequena perturbação. Na

Figura 5.11 é mostrado o comportamento do ângulo interno da máquina geradora 3, pertencente à área 2, em relação à máquina geradora 1 (referência do sistema – pertencente à área 1) para três situações: caso base (sem TCSC), com TCSC equipado com o POD (com os parâmetros mostrados na Tabela 5.6), e com TCSC equipado com POD com os parâmetros da Tabela 5.6, exceto para o ganho  $K_{POD}$  aumentado para 0,8 pu.

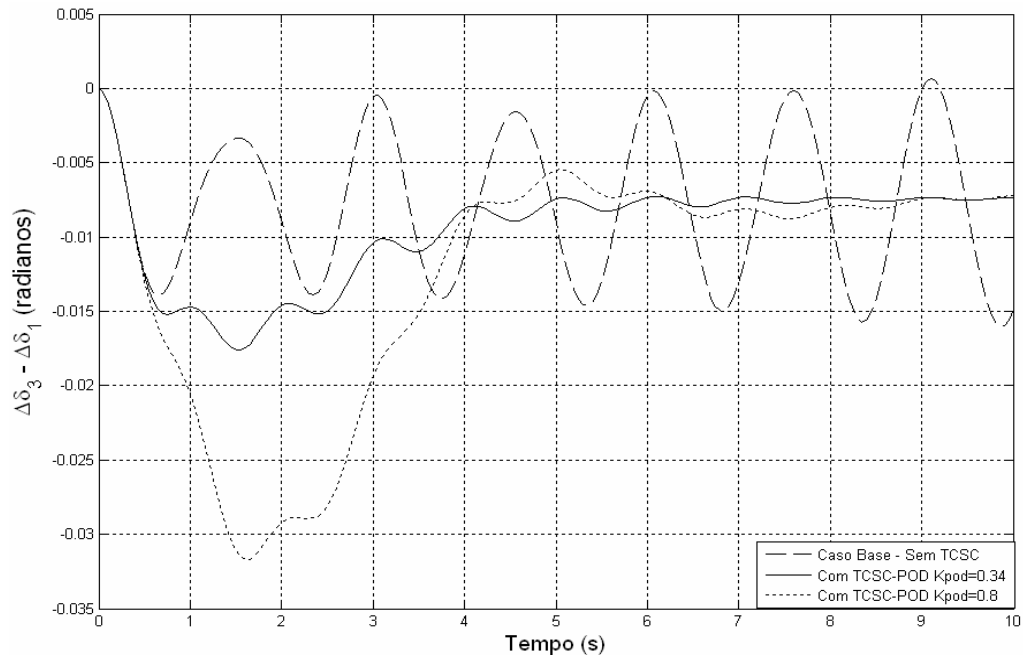


Figura 5.11 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3

De acordo com a Figura 5.11 o ângulo interno da máquina geradora 3 possui oscilações crescentes no caso base (sistema instável). Com a instalação do TCSC equipado com POD nota-se o efetivo amortecimento destas oscilações. Ainda da Figura 5.11 observa-se que o aumento do ganho  $K_{POD}$  ocasiona excursões maiores nas primeiras oscilações do ângulo interno da máquina geradora 3. Este fato pode ser explicado pela diminuição do amortecimento do modo oscilatório associado ao controlador POD, indicando que conforme mostrado anteriormente, há uma limitação para o aumento do ganho, fato este usual quando se aplica atraso de fase através do controlador POD [26]. As simulações mostraram as mesmas conclusões para o gerador 4.

De maneira semelhante ao realizado para o ângulo interno da máquina geradora 3 é obtida a Figura 5.12, onde é mostrado o comportamento dinâmico do ângulo interno da máquina geradora 2.

Analisando as curvas da Figura 5.12, nota-se que a inclusão do POD ao TCSC leva o sistema a um ponto de estabilidade, porém, aumentos do ganho do controlador não alteram

substancialmente o comportamento dinâmico do ângulo interno da máquina geradora 2, pois a máquina geradora 2 encontra-se na mesma área da perturbação e esta sujeita à atuação do modo local de oscilação. Novamente recorre-se ao fato da localização do TCSC, que proporciona maior atuação no modo de oscilação interárea, fato que pode ser confirmado a partir dos resíduos dados na Tabela 5.4.

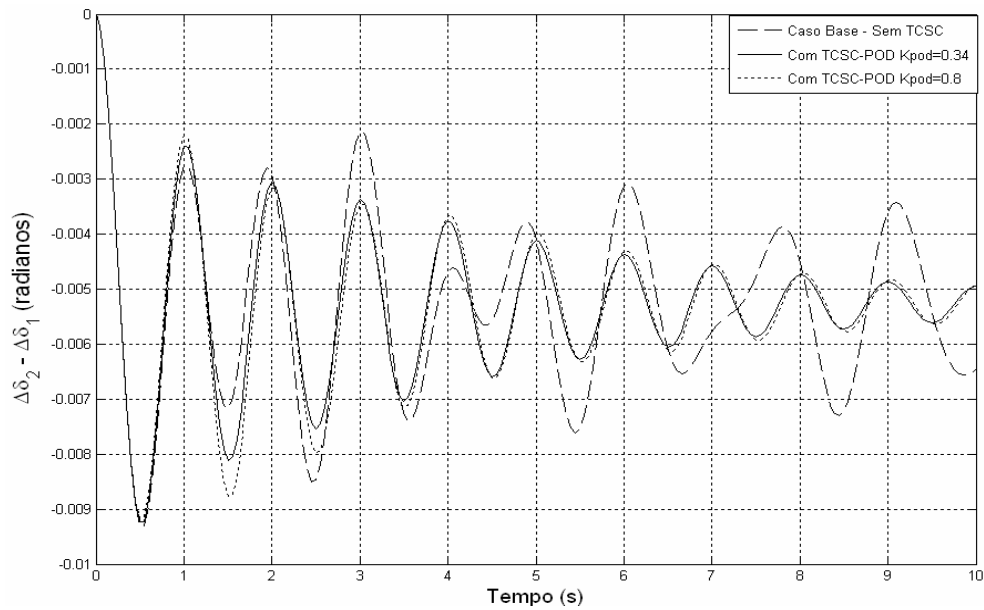


Figura 5.12 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 2

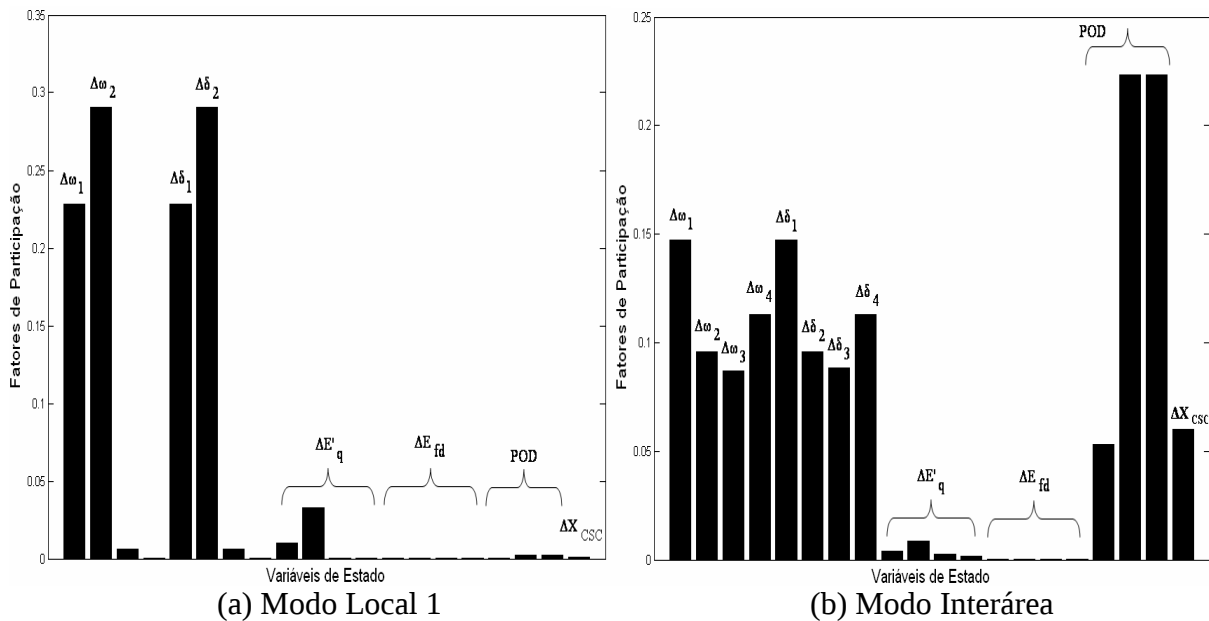


Figura 5.13 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea

Conclusões semelhantes podem ser obtidas da análise dos fatores de participação das

variáveis de estado do sistema nos modos locais e interárea conforme mostrado na Figura 5.13, onde nota-se a inclusão de três novas variáveis de estado ( $\Delta X'_1$ ,  $\Delta X'_2$  e  $\Delta X'_{\text{POD}}$ , definidas pela inclusão do controlador POD no sistema, conforme descrito no Capítulo 4).

Da Figura 5.13 é evidente a maior participação da reatância do TCSC e das variáveis de estado associadas ao POD na formação do modo eletromecânico interárea, sendo que o modo local 1 é pouco influenciado pela reatância do TCSC e pelas variáveis do controlador POD. Conclusões semelhantes podem ser obtidas para os fatores de participação para o modo local 2, ou seja, as variáveis do controlador TCSC equipado com POD não possuem participação significativa neste modo.

Conforme descrito anteriormente as linhas 6-7 e 8-9 são extensões da linha de interligação 7-8 e, portanto, são percorridas obrigatoriamente pelo fluxo de potência interárea. Assim, pode-se comprovar através da Figura 5.14 (comportamento dinâmico do ângulo interno das máquinas geradores 2 e 3), e também da Figura 5.15 (fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 7-8), que a inclusão de um dispositivo TCSC equipado com POD em qualquer dessas linhas proporcionará amortecimento semelhante ao sistema. Para isso, considere os parâmetros dos controladores POD definidos na Tabela 5.7, projetados para inclusão do TCSC nas linhas de transmissão (L.T.) entre as barras 6 e 7, barras 7 e 8 e barras 8 e 9 separadamente, sendo que o sinal de entrada para os controladores é a variação do fluxo de potência ativa na linha onde estão instalados.

Tabela 5.7 – Parâmetros dos Controladores POD Instalados nas Linhas de Transmissão.

| L. T. | $K_{\text{POD}}$ (pu) | $T_w$ (s) | T1 (s)   | T2 (s)  | T3 (s)   | T4 (s)  |
|-------|-----------------------|-----------|----------|---------|----------|---------|
| 6 – 7 | 0,04774               | 1         | 0,088332 | 0,65303 | 0,088332 | 0,65303 |
| 7 – 8 | 0,34002               | 1         | 0,080596 | 0,69138 | 0,080596 | 0,69138 |
| 8 – 9 | 0,06264               | 1         | 0,084916 | 0,68120 | 0,084916 | 0,68120 |

Da Tabela 5.7 vê-se que a compensação de fase necessária para os três casos de instalação do TCSC é semelhante. Entretanto, observa-se um fator positivo para inclusão do TCSC nas linhas 6-7 e 8-9, que é o baixo ganho necessário à introdução de amortecimento, em relação à instalação na linha 7-8. Mas, como já mencionado, as linhas 6-7 e 8-9 possuem o menor valor de reatância (0,01 pu), enquanto que a reatância da linha 7-8 (0,073 pu) é a maior do sistema, justificando a escolha da linha 7-8 pela maior faixa de compensação.

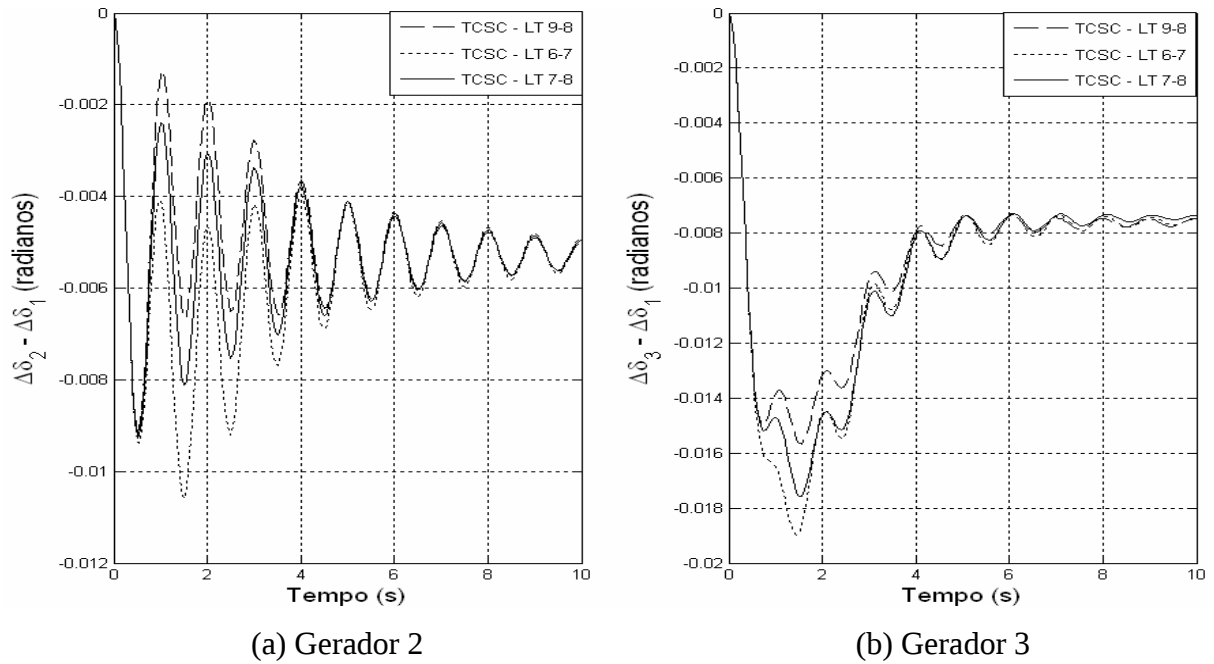


Figura 5.14 – Variações do Ângulo Interno: (a) Gerador 2; (b) Gerador 3

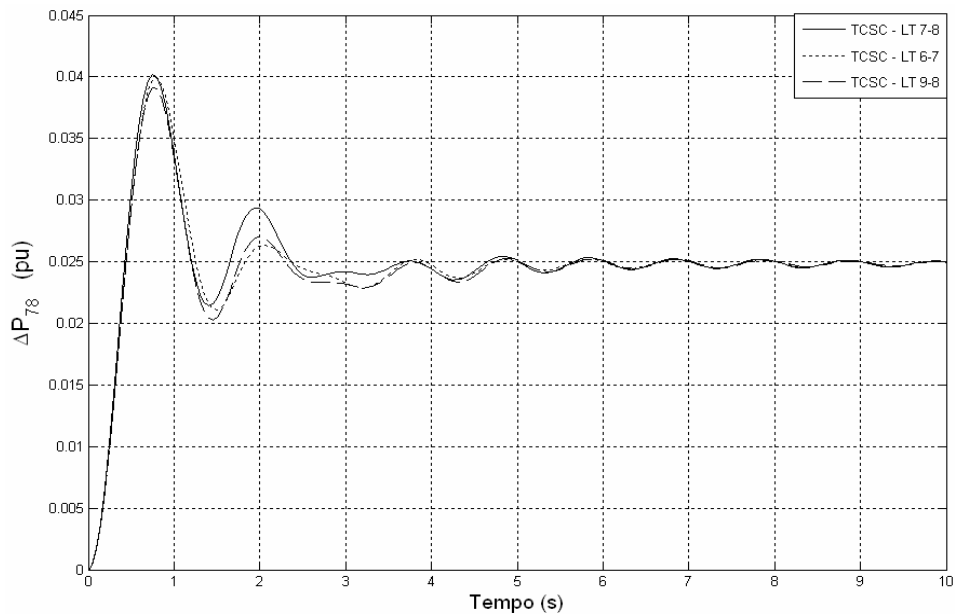


Figura 5.15 – Fluxo de Potência Ativa na Linha de Transmissão entre as barras 7-8 para Diversas Localizações do TCSC

A inclusão de mais dispositivos TCSC no sistema a fim de obter maior amortecimento não é verificada, de acordo com a Figura 5.16 onde é apresentado o comportamento dinâmico do ângulo interno da máquina geradora 3 nos três casos considerados: TCSC na LT 7-8, dois dispositivos TCSC nas LT's 7-8 e 2-6; e três dispositivos TCSC nas LT's 7-8, 2-6 e 9-10.

Isto pode ser explicado pelo fato de que nesse trabalho não se utilizou um método coordenado para projeto dos dispositivos POD e assim ocorre o surgimento de vários modos

oscilatórios associados a esses controladores que interagem de maneira negativa (na Tabela 5.8 são apresentados os parâmetros dos controladores POD para inserção nas linhas de transmissão entre as barras 2 e 6 e entre as barras 9 e 10, sem a preocupação de coordenação de ajuste).

Tabela 5.8 – Parâmetros dos Controladores POD Instalados nas Linhas de Transmissão.

| L. T.  | $K_{POD}$ (pu) | $T_w$ (s) | $T1$ (s) | $T2$ (s) | $T3$ (s) | $T4$ (s) |
|--------|----------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 2 – 6  | 0,33086        | 1         | 0,093058 | 0,61460  | 0,093058 | 0,61460  |
| 9 – 10 | 0,45301        | 1         | 0,086771 | 0,67103  | 0,086771 | 0,67103  |

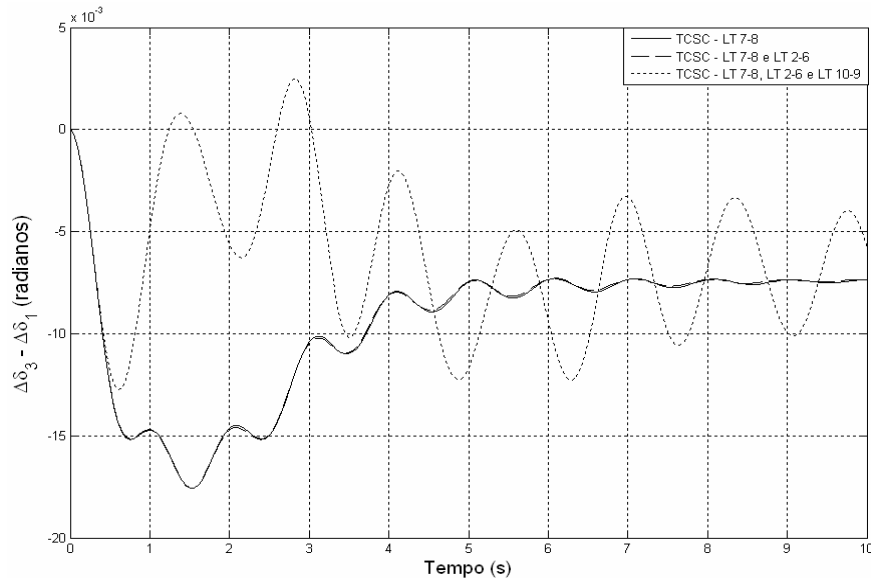


Figura 5.16 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3 – Inclusão de Vários Dispositivos TCSC

Em todos os casos anteriores foi utilizada como entrada o sinal do fluxo de potência ativa na linha de transmissão de instalação do TCSC, seguindo a necessidade de utilização de sinais disponíveis localmente para o controlador POD. Porém, é comum a utilização de sinais remotos tais como a velocidade angular para o uso em controladores. Vale ressaltar que nesse caso é necessário o uso de sistemas de telecomunicação, o que onera e diminui a confiabilidade da operação.

Adotando um procedimento semelhante ao realizado para o fluxo de potência ativa na linha de transmissão é obtido o módulo dos resíduos da função de transferência em malha aberta do controlador POD, como mostrado na Tabela 5.9, considerando a diferença entre a velocidade angular da máquina geradora 2 e máquina geradora 3 ( $\Delta\omega_2 - \Delta\omega_3$ ) como sinal de

entrada. Este sinal foi escolhido, pois carrega informações do modo interárea e também por proporcionar o maior amortecimento ao fluxo interárea, conforme mostrado na Figura 5.17, onde as diversas curvas representam as possibilidades de diferenças de velocidade angular do sistema para a entrada do POD.

Tabela 5.9 – Módulos dos Resíduos Associados aos Modos Eletromecânicos para Diversas Localizações do TCSC

| L.T.   | Modo Local 1 | Modo Local 2 | Modo Interárea |
|--------|--------------|--------------|----------------|
| 1 – 5  | 0,227150     | 0,020815     | 0,059749       |
| 2 – 6  | 0,430840     | 0,007809     | 0,050721       |
| 5 – 6  | 0,233010     | 0,020562     | 0,060719       |
| 6 – 7  | 0,029143     | 0,067671     | 0,296070       |
| 7 – 8  | 0,012568     | 0,007275     | 0,068937       |
| 9 – 8  | 0,109920     | 0,037423     | 0,256600       |
| 3 – 9  | 0,081632     | 0,329930     | 0,059168       |
| 10 – 9 | 0,004463     | 0,198090     | 0,059745       |
| 4 - 10 | 0,004180     | 0,192800     | 0,059327       |

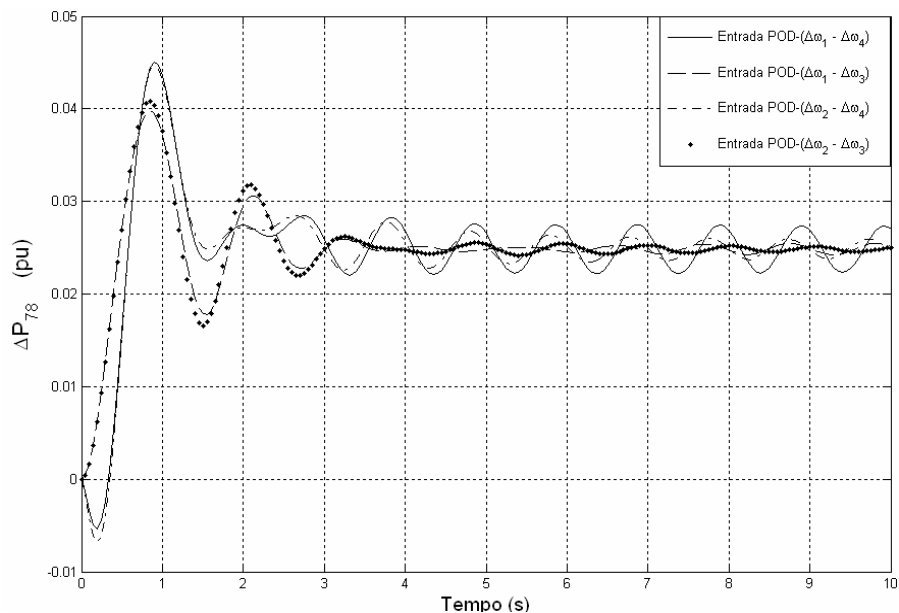


Figura 5.17 – Variações do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Interligação para Diversos Sinais de Diferença de Velocidade Angular para Entrada do POD

Os resíduos obtidos para o sinal velocidade angular como entrada para o POD, são semelhantes aos obtidos para o sinal fluxo de potência ativa, conforme evidenciado nas

Tabelas 5.10 e 5.5, sendo que foi escolhida a linha entre as barras 7-8 para instalação do TCSC pelos mesmos motivos anteriormente descritos. Os parâmetros de um controlador POD para TCSC que utiliza como sinal de entrada as variações da diferença da velocidade angular entre as máquinas 2 e 3 são dados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Parâmetros do POD instalado na Linha de Transmissão entre as Barras 7 e 8, Utilizando como Entrada o Sinal ( $\Delta\omega_2 - \Delta\omega_3$ )

| $K_{\text{POD}}$ (pu) | $T_w$ (s) | T1 (s)  | T2 (s)  | T3 (s)  | T4 (s)  |
|-----------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 26,975                | 1         | 0,21353 | 0,26096 | 0,21353 | 0,26096 |

Pode-se observar que a compensação de fase requerida quando da utilização deste sinal é muito menor quando comparada com o sinal de fluxo de potência ativa. Em contrapartida, o ganho necessário é bem maior em relação ao necessário para o caso anterior. Para verificar a eficácia de cada sinal de entrada, considere o comportamento dinâmico das variações do ângulo interno da máquina geradora 3 e do fluxo de potência ativa na linha de interligação entre as barras 7-8 para os dois tipos de sinal utilizados para entrada do POD, ilustrados nas Figuras 5.18 e 5.19, respectivamente.

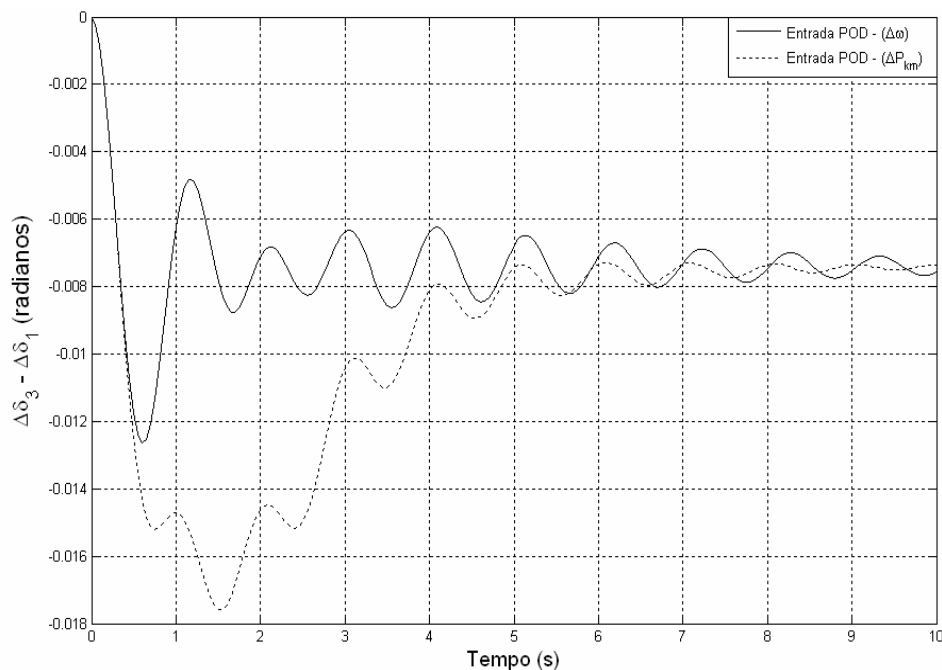


Figura 5.18 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3, Devido a Inclusão do TCSC, Utilizando as Variações da Velocidade Angular e as Variações do Fluxo de Potência Ativa como Entrada para o POD

Analisando a Figura 5.18 nota-se que a utilização do fluxo de potência ativa como

entrada para o POD provoca um afundamento nas oscilações do ângulo interno da máquina geradora 3, fato que não ocorre com a utilização da velocidade angular. Este afundamento pode ser explicado pela presença da reatância do TCSC no sinal fluxo de potência, ponderada pelo coeficiente  $A4_{km}$  conforme mostrado no Capítulo 3. Assim, nos primeiros momentos após a perturbação o sinal de entrada do POD ( $\Delta P_{km}$ ) está sendo modulado pelo próprio controlador. Ainda da Figura 5.18, a utilização do fluxo de potência ativa estabelece um menor tempo para entrada em regime permanente, fato observado também na Figura 5.19.

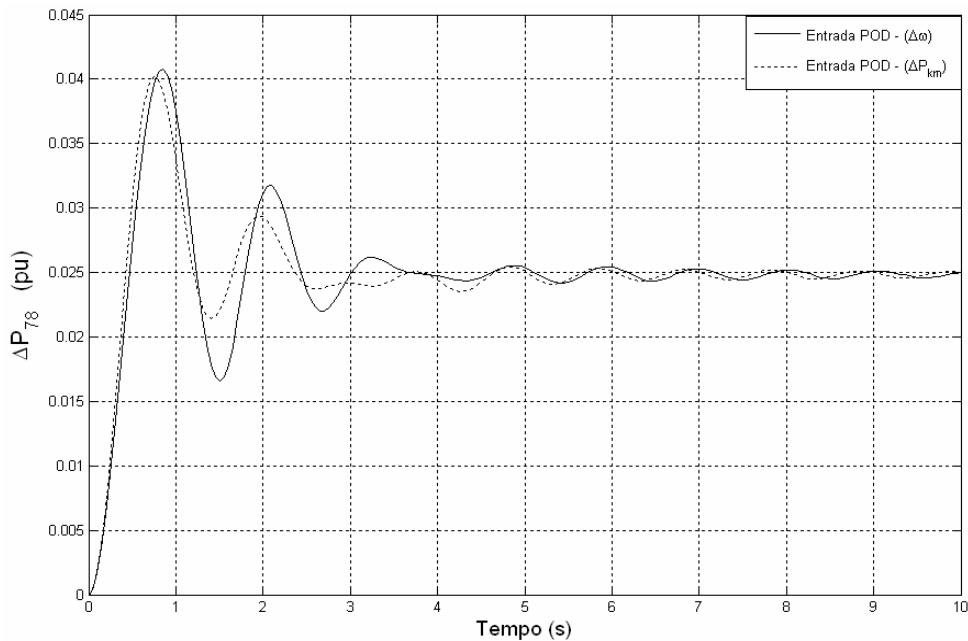


Figura 5.19 - Variações do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Interligação, Devido a Inclusão do TCSC, Utilizando as Variações da Velocidade Angular e as Variações do Fluxo de Potência Ativa como Entrada para o POD

Nas próximas seções são apresentados os resultados obtidos da inclusão do dispositivo UPFC no Modelo de Sensibilidade de Potência para sistemas multimáquinas.

#### 5.2.4 UPFC – Modelo Fixo

O UPFC possui três parâmetros para controle do fluxo de potência no sistema onde se encontra instalado. A tensão  $V_s$  (controlável em magnitude e ângulo), inserida pelo UPFC pode ser decomposta em duas parcelas: uma em fase ( $V_p$ ) e outra em quadratura ( $V_q$ ) com a corrente da linha de transmissão onde este equipamento for instalado. A fonte de corrente shunt é responsável pela injeção de reativos através da componente em quadratura ( $I_q$ ) com a

tensão terminal da barra inicial de instalação do UPFC. A inserção da tensão  $V_q$  é comparável à inclusão de um dispositivo de compensação série como o TCSC e o SSSC, e por esse fato, utilizou-se como conceito fundamental para inicialização desta componente o nível de compensação requerida para reproduzir o efeito da inserção desta tensão.

Através da análise da Figura 5.20, onde a tensão série inserida pelo UPFC de acordo com o aumento do nível de compensação da reatância da linha de interligação entre as barras 7 e 8 é mostrada, pode-se comprovar a eficácia da modelagem utilizada para o UPFC.

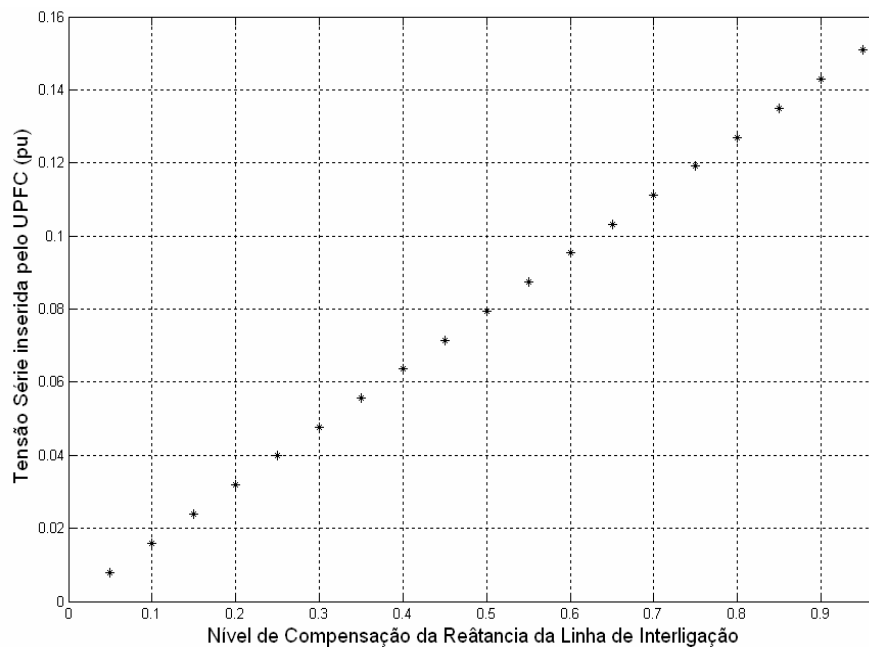


Figura 5.20 – Tensão Série Inserida pelo UPFC Devido a Variações no Nível de Compensação

O limite de estabilidade do sistema pode ser aumentado quando se realiza a inclusão do UPFC representado pelo seu modelo fixo. O modelo fixo do UPFC é feito de acordo com o nível de compensação desejado e conseqüentemente, são definidas as injeções de potência ativa e reativa nas barras inicial e final de instalação do UFPC. Com isto pode-se alterar o comportamento do par complexo de autovalores associado ao modo interárea devido aos aumentos no nível de compensação ( $nc$ ), conforme mostrado na Figura 5.21.

De acordo com a Figura 5.21 nota-se que o sistema atinge a estabilidade para um nível de compensação em torno de 62%, mostrando que o UPFC conduz o sistema à estabilidade com um nível menor de compensação que o requerido pelo TCSC (este em torno de 80%). É importante notar que a atuação do UPFC é feita de maneira ativa nas barras de instalação, ou seja, as injeções de potência para as barras inicial e final de instalação do UPFC carregam

informações sobre o ângulo e módulo de suas tensões após a realização da compensação e obtenção do fluxo de carga, o que caracteriza uma pré-regulação dos parâmetros do UPFC.

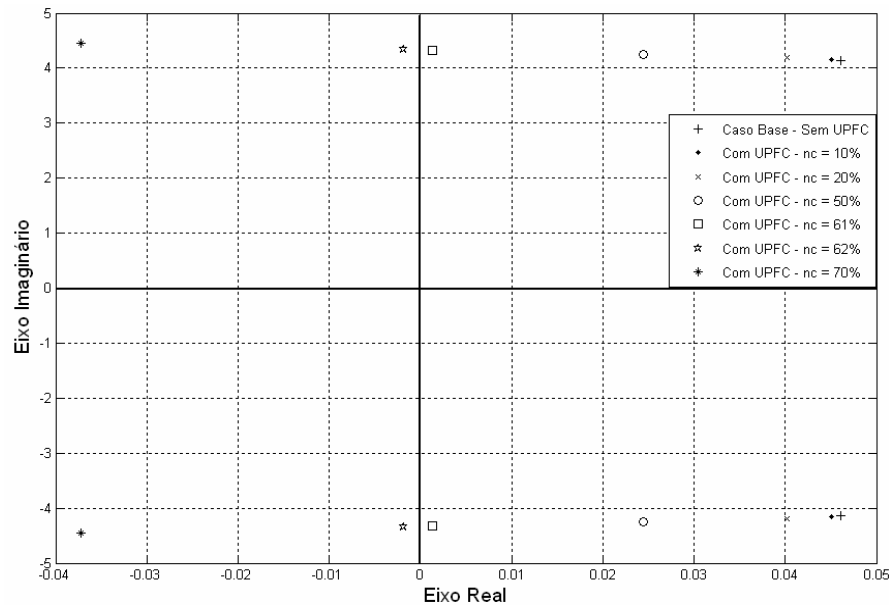


Figura 5.21 – Comportamento do Par Complexo de Autovalores Associado ao Modo Interárea

Na Tabela 5.11 é mostrada a influência da instalação do UPFC, representado por seu modelo fixo, nos autovalores dominantes do sistema. Nota-se a inserção de amortecimento positivo ao modo interárea e seu deslocamento para o semiplano esquerdo do plano complexo. Os modos locais tendem a se deslocar para o semiplano direito do plano complexo, porém esse deslocamento é mínimo e não caracteriza um problema para a estabilidade.

Tabela 5.11 – Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficientes de Amortecimento para  $nc=62\%$

| Autovalores                        | Frequência (Hz) | Coeficiente de Amortecimento ( $\zeta$ ) |
|------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| $-0,2455 \pm j 6,2969$ (Local 1)   | 1,0029          | 0,0390                                   |
| $-0,1588 \pm j 5,8728$ (Local 2)   | 0,9350          | 0,0270                                   |
| $-0,0018 \pm j 4,3383$ (interárea) | 0,6985          | 0,0004                                   |

A introdução de amortecimento positivo ao sistema pode ser comprovada pela análise do comportamento dinâmico do ângulo interno da máquina geradora 3, conforme mostrado na Figura 5.22, após a ocorrência de uma pequena perturbação em forma de degrau de 0,05 pu na potência mecânica da máquina geradora 1. Nota-se que sem o UPFC as oscilações são crescentes, caracterizando a instabilidade. Porém, quando há a inclusão do UPFC as

oscilações são controladas. Como é possível notar, a introdução de amortecimento é mínima para esse caso de configuração do UPFC, sendo portanto necessária a definição de modelos dinâmicos para o UPFC, conforme descrito no Capítulo 3 e apresentado na próxima seção.

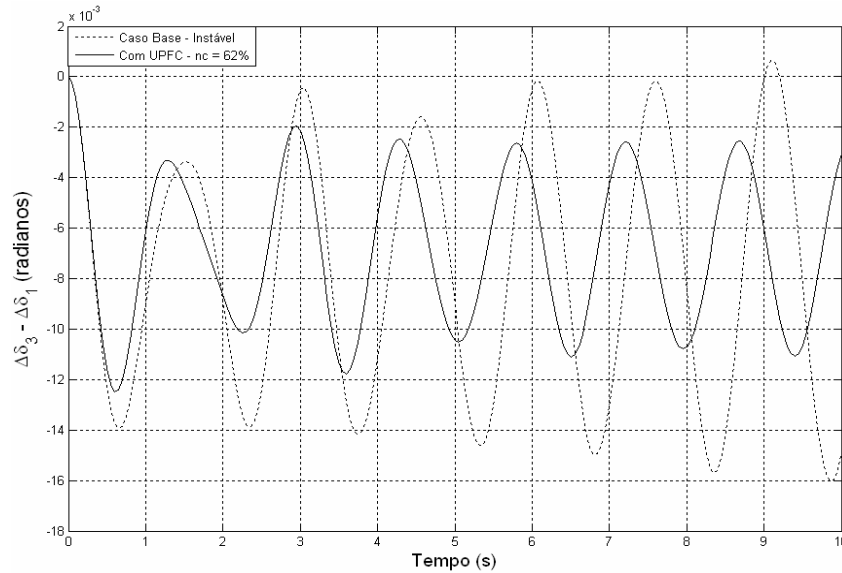


Figura 5.22 – Variações do ângulo Interno do Gerador 3

### 5.2.5 UPFC – Modelo Dinâmico de Primeira Ordem

A definição de um modelo de primeira ordem para o UPFC foi apresentada no Capítulo 3, para o caso de modulação da componente em fase com a corrente ( $V_p$ ) da tensão série injetada pelo UPFC. Os resultados obtidos da inclusão do UPFC representado por um modelo de primeira ordem, definido por um ganho de 0,02 pu e constante de tempo de 0,05 segundos, não apresentaram contribuições positivas significativas em relação ao modelo fixo.

A modulação de qualquer parâmetro de controle do UPFC exigiu alto nível de compensação, sendo de 60% para todos os casos. Notou-se que a melhora inserida nesta configuração foi mínima, pois para um modelo fixo do UPFC necessita-se de 62% de compensação da linha de transmissão para atingir a estabilidade.

Os aspectos positivos desta configuração podem ser evidenciados de acordo com os autovalores dominantes, frequência e coeficiente de amortecimento, mostrados na Tabela 5.12, para o caso de compensação de 60% e inclusão do modelo de primeira ordem para a componente da tensão série injetada pelo UPFC em quadratura ( $V_q$ ) com a corrente da linha. De acordo com esses dados nota-se o aumento do amortecimento do modo interárea, porém ressalta-se que foi aplicado alto nível de compensação.

Tabela 5.12 – Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficientes de Amortecimento para Modelo de Primeira Ordem com  $nc=60\%$

| Autovalores                        | Frequência (Hz) | Coeficiente de Amortecimento ( $\zeta$ ) |
|------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| $-0,2546 \pm j 6,3078$ (Local 1)   | 1,0047          | 0,0403                                   |
| $-0,1583 \pm j 5,8830$ (Local 2)   | 0,9366          | 0,0269                                   |
| $-0,0565 \pm j 4,8078$ (interárea) | 0,7652          | 0,0118                                   |

Na Figura 5.23 é mostrado o comportamento dinâmico do ângulo interno da máquina geradora 3, onde se pode notar que as oscilações tendem para um valor final após a inserção do modelo de primeira ordem.

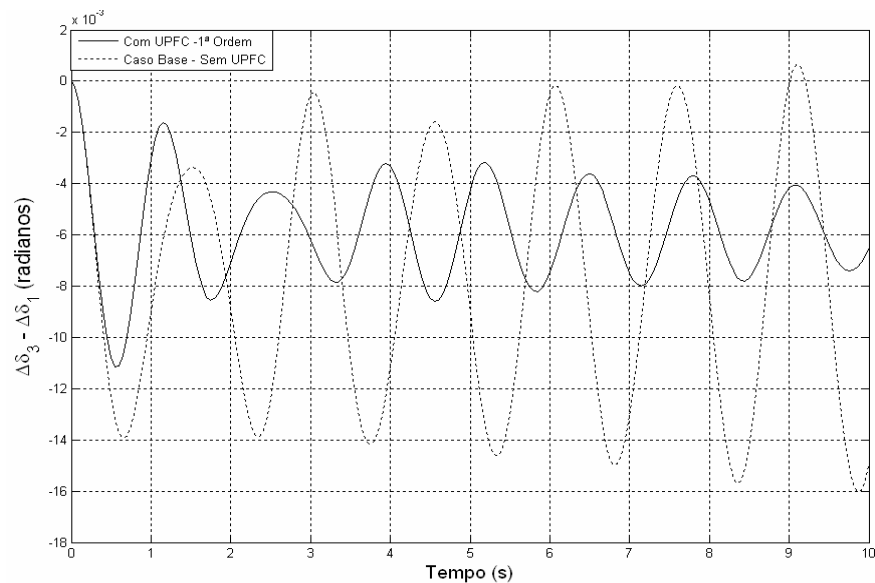


Figura 5.23 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3

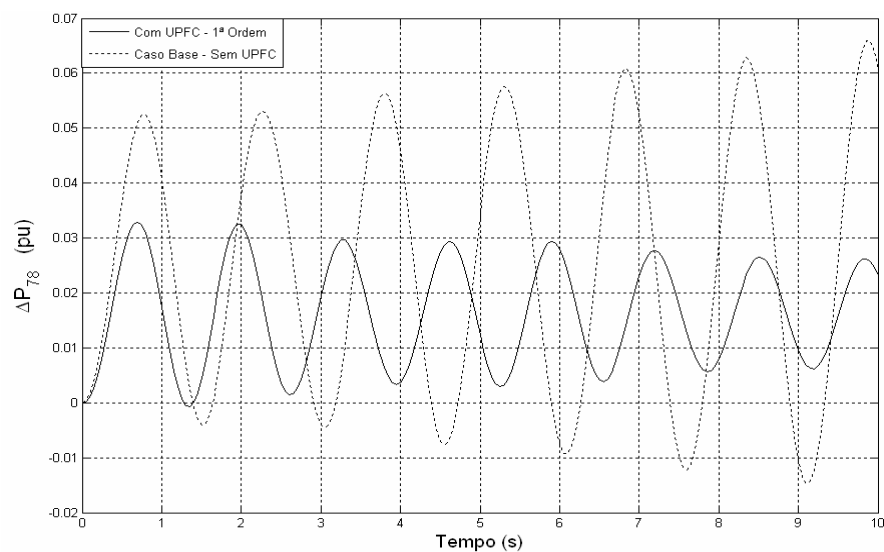


Figura 5.24 – Variações do Fluxo de Potência Ativa na Linha de Interligação –(barras 7 e 8)

Conclusões semelhantes podem ser obtidas da Figura 5.24 onde se apresenta o fluxo de potência ativa na linha de interligação entre as barras 7 e 8 para o caso base, instável sem o UPFC e estável para o caso de inserção do modelo de primeira ordem para o UPFC.

A inclusão do UPFC na linha de interligação proporciona maior amortecimento ao modo interárea e pouco afeta os modos locais. Para confirmar esse fato considere os fatores de participação de todas as variáveis de estado na formação do modo local 1 e modo interárea, conforme ilustrados na Figura 5.25.

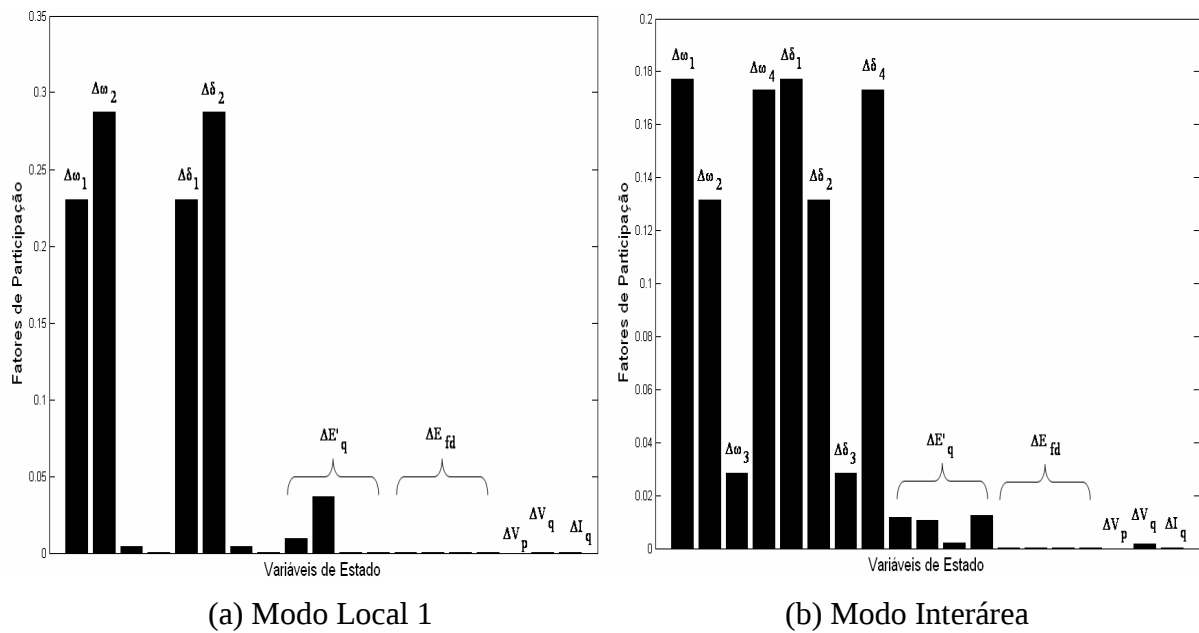


Figura 5.25 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea

Os fatores de participação mostram a pequena participação, porém maior da variável de estado  $\Delta V_q$  no modo interárea em comparação com o modo local 1, fato que nos permite concluir que o amortecimento do modo interárea é devido ao alto nível de compensação realizado.

Do exposto nota-se a necessidade de definição de um modelo mais apropriado para inserção de amortecimento através dos parâmetros de controle do UPFC. Em vista disso, foi incluído ao UPFC o controlador POD conforme descrito no Capítulo 4, e os resultados obtidos dessa inclusão são mostrados na seção seguinte.

### 5.2.6 UPFC – Equipado com POD

O método utilizado neste trabalho de alocação de dispositivos TCSC em um sistema

multimáquinas se mostrou viável de acordo com os resultados obtidos anteriormente. Assim, utilizou-se o mesmo procedimento para verificar a melhor localização do UPFC. Os módulos dos resíduos para cada localização do dispositivo UPFC são mostrados na Tabela 5.13, sendo obtidos da função de transferência em malha aberta do POD. Tal função utiliza como entrada as variações do fluxo de potência ativa na linha de transmissão de instalação do UPFC e como saída, irá modular a componente da tensão série em quadratura ( $V_q$ ) com a corrente da linha. O nível de compensação inserido pela tensão série do UPFC é de 10% da reatância total da linha de transmissão.

Tabela 5.13 – Módulos dos Resíduos Associados aos Modos Eletromecânicos para Diversas Localizações do UPFC

| <b>L.T.</b> | <b>Modo Local 1</b> | <b>Modo Local 2</b> | <b>Modo Interárea</b> |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 – 5       | 21,766              | 0,23401             | 2,2703                |
| 2 – 6       | 17,766              | 0,03774             | 2,3988                |
| 5 – 6       | 29,244              | 0,32409             | 2,5683                |
| 6 – 7       | 0,08799             | 0,20335             | 8,1681                |
| 7 – 8       | 0,2784              | 0,15014             | 5,3367                |
| 9 – 8       | 0,18556             | 0,08288             | 1,2027                |
| 3 – 9       | 0,20182             | 13,242              | 0,65108               |
| 10 – 9      | 0,02931             | 27,014              | 1,6435                |
| 4 - 10      | 0,0889              | 152,980             | 0,18564               |

Dos dados da Tabela 5.13 é verificada a relação de localização do UPFC e a conseqüente atuação sobre os modos oscilatórios dominantes. Escolhe-se a linha de interligação entre as barras 7 e 8 para localização do UPFC, em detrimento da linha de transmissão entre as barras 6 e 7 pelos motivos anteriormente citados, ou seja, maior possibilidade de modulação da reatância da linha e o fato dessas linhas serem percorridas pelo fluxo interárea, obrigatoriamente.

De posse da melhor localização para o UPFC projetou-se o controlador POD de maneira a deslocar o par complexo de autovalores associado ao modo interárea para o semiplano esquerdo do plano complexo. Os parâmetros deste controlador são mostrados na Tabela 5.14.

Com a introdução deste controlador POD é possível introduzir amortecimento ao sistema e principalmente, ao modo interárea, conforme exibido na Tabela 5.15 e na Figura

5.26 onde se mostra respectivamente, os autovalores dominantes do sistema, com seus respectivos valores de frequência e coeficiente de amortecimento e o comportamento dinâmico do ângulo interno da máquina geradora 3.

Tabela 5.14 – Parâmetros do POD Instalado na Linha de Transmissão entre as Barras 7 e 8, para Dispositivo UPFC – POD – Vq

| $K_{\text{POD}}$ (pu) | $T_w$ (s) | $T1$ (s) | $T2$ (s) | $T3$ (s) | $T4$ (s) |
|-----------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 0,010816              | 1         | 0,70156  | 0,082646 | 0,70156  | 0,082646 |

Tabela 5.15 – Autovalores Dominantes, Frequência e Coeficientes de Amortecimento para UPFC – POD.

| Autovalores                        | Frequência (Hz) | Coeficiente de Amortecimento ( $\zeta$ ) |
|------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|
| $-0,2962 \pm j 6,3011$ (Local 1)   | 1,0040          | 0,0470                                   |
| $-0,1867 \pm j 5,8759$ (Local 2)   | 0,9356          | 0,0317                                   |
| $-1,1864 \pm j 5,3328$ (interárea) | 0,8695          | 0,2172                                   |

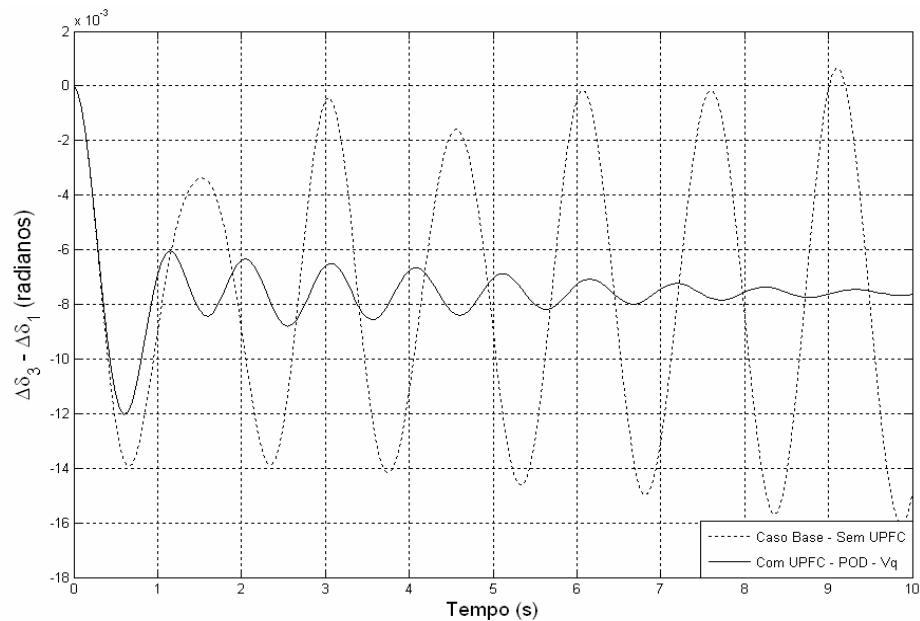


Figura 5.26 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3

Na Figura 5.27 é mostrado o fluxo de potência nas linhas de transmissão entre as barras 6 e 7, as barras 7 e 8, as barras 8 e 9 e entre as barras 1 e 5. Nota-se desta figura que o nível de amortecimento inserido para o fluxo de potência nas três primeiras linhas, que fazem parte da linha de interligação, é semelhante, diferentemente da linha de transmissão entre as barras 1 e 5. Este fato pode ser comprovado através da visualização dos fatores de

participação das variáveis de estado no modo local 1 e interárea mostrados na Figura 5.28.

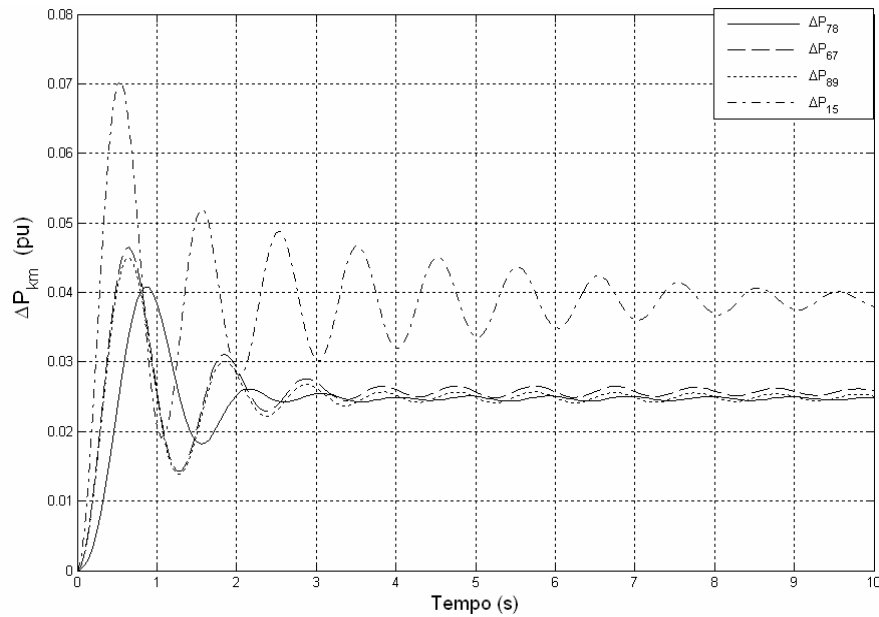


Figura 5.27 – Variações do Fluxo de Potência Ativa em Linhas de Transmissão do Sistema

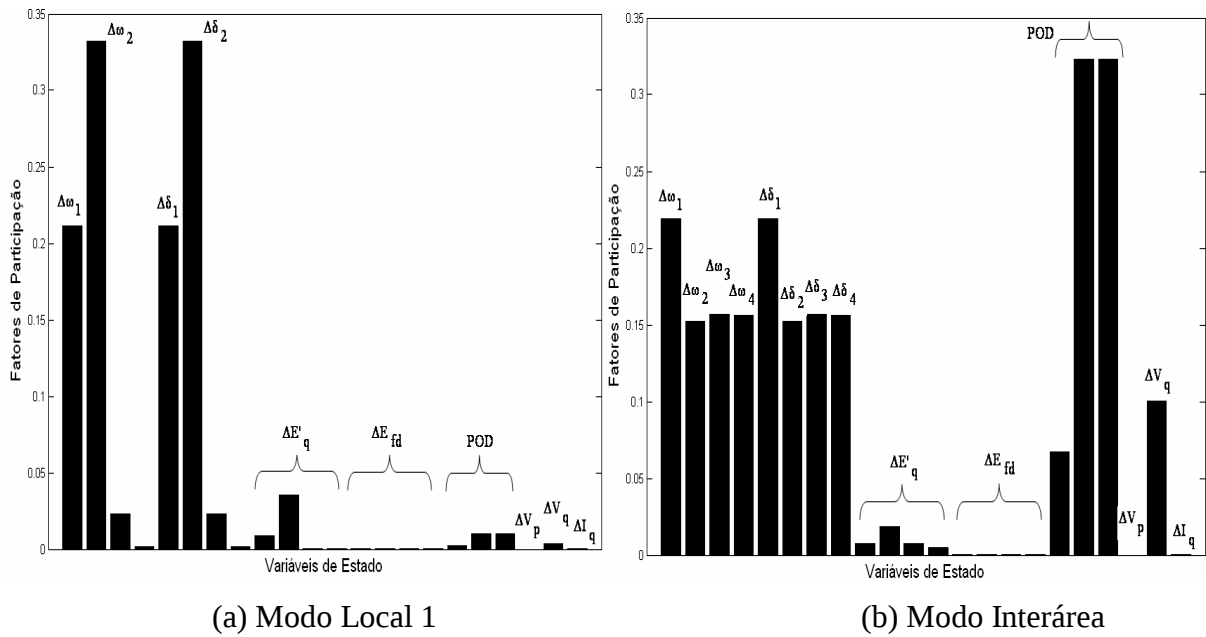


Figura 5.28 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea

É possível inserir amortecimento através da modulação dos outros parâmetros de controle do UPFC. Desta forma, na Tabela 5.16 são dados os parâmetros de um controlador POD que modula o parâmetro de controle da tensão da barra inicial de instalação do UPFC, ou seja, a corrente  $I_q$ , a ser instalado na linha de interligação entre as barras 7 e 8.

Novamente, a introdução de amortecimento ao sistema se dará através do modo

interárea de oscilação de acordo com os fatores de participação para as variáveis de estado no caso de instalação do POD modulando o parâmetro  $I_q$ , mostrados na Figura 5.29. Nota-se desta figura a maior participação no modo interárea e a maior participação do parâmetro  $I_q$  em relação aos parâmetros  $V_p$  e  $V_q$  do UPFC.

Tabela 5.16 – Parâmetros do POD Instalado na Linha de Transmissão entre as Barras 7 e 8, para Dispositivo UPFC – POD –  $I_q$

| $K_{\text{POD}}$ (pu) | $T_w$ (s) | $T1$ (s) | $T2$ (s) | $T3$ (s) | $T4$ (s) |
|-----------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| 30,1                  | 1         | 0,16623  | 0,34879  | 0,16623  | 0,34879  |

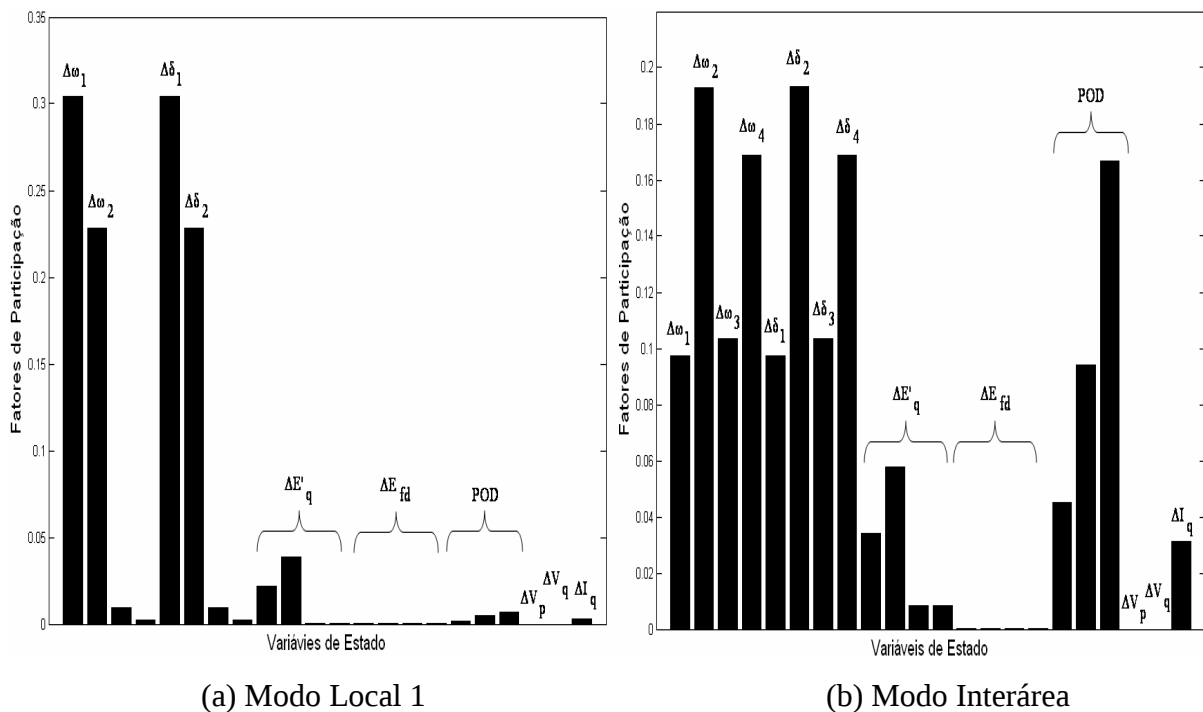


Figura 5.29 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea

A introdução do dispositivo UPFC equipado com POD que modula a corrente  $I_q$  ocasiona benefícios para o desempenho dinâmico do sistema conforme se pode notar pelas variações do ângulo interno do gerador 3, conforme mostrado na Figura 5.30.

Os resultados mostrados até aqui utilizam controladores POD acoplados ao TCSC ou UPFC para introduzir amortecimento no sistema de potência. Entretanto, é mais comum fornecer amortecimento através de dispositivos PSS, o que será descrito na seção seguinte.

### 5.2.7 Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas utilizando PSS

Os dispositivos PSS são efetivamente utilizados para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência. Pela sua atuação, principalmente nas variáveis locais dos geradores, propiciam ótima modulação da tensão de campo do gerador. Esforços contínuos são empregados no projeto de dispositivos PSS robustos e auto-adaptáveis às variações ininterruptas do sistema elétrico de potência [42]. Nesta seção apresentam-se resultados sobre o ajuste dos parâmetros e inclusão do PSS no Modelo de Sensibilidade de Potência multimáquinas pela obtenção de uma função GEP(s) adotando um procedimento semelhante ao realizado em [5], conforme abordado no Capítulo 4.

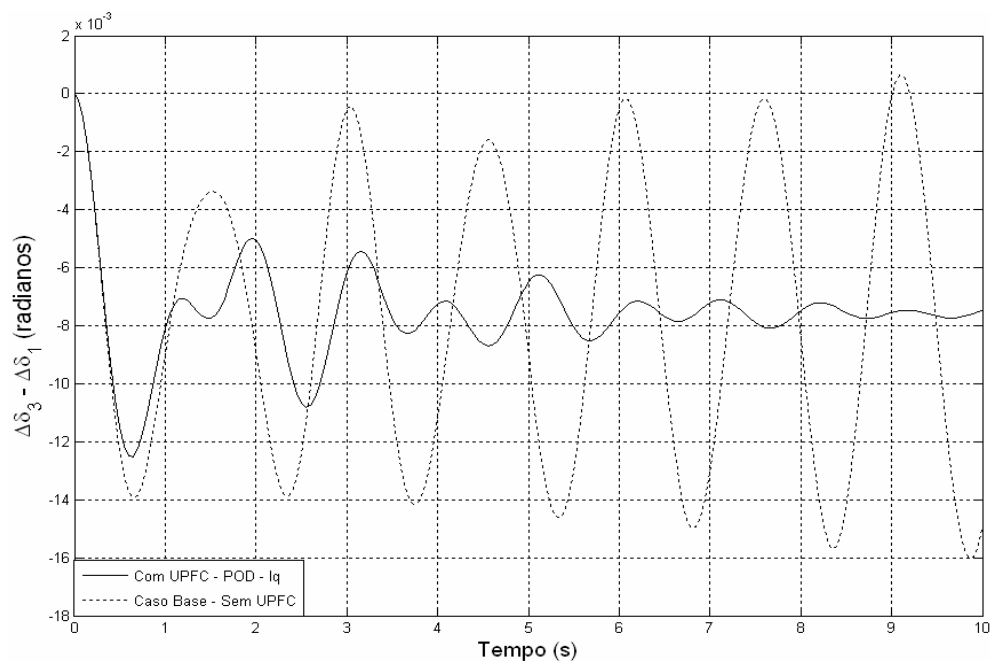


Figura 5.30 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3

De acordo com os resultados anteriormente obtidos para inserção de dispositivos FACTS, concluiu-se que o modo interárea é o responsável pela instabilidade do sistema. Portanto, são obtidos os parâmetros dos dispositivos PSS (mostrados na Tabela 5.17), a serem inseridos em cada máquina geradora para amortecer as oscilações originárias do modo interárea.

A estabilidade é obtida com a inserção de um único PSS em cada máquina geradora por vez para todos os casos, exceto para o gerador 2.

A explicação para este fato é que o PSS é projetado para inserir amortecimento ao modo oscilatório da máquina geradora onde será instalado. Assim, os parâmetros são

calculados para a frequência de oscilação do laço eletromecânico do gerador em questão, designada por  $\omega_{nle}$  no Capítulo 4. Portanto, é devido a essa limitação de inserção de amortecimento que a instalação de somente o PSS na máquina geradora 2 não leva o sistema à estabilidade, o que pode ser comprovado pelos fatores de participação para o modo local 1 e interárea, mostrados na Figura 5.31.

Tabela 5.17 – Parâmetros dos Dispositivos PSS para cada Máquina Geradora (G).

| G | $K_{PSS}$ (pu) | $T_w$ (s) | T1 (s) | T2 (s) | T3 (s) | T4 (s) |
|---|----------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 15,0951        | 1         | 0,1021 | 0,0200 | 0,1021 | 0,0200 |
| 2 | 19,8965        | 1         | 0,0951 | 0,0200 | 0,0951 | 0,0200 |
| 3 | 23,326         | 1         | 0,0938 | 0,0200 | 0,0938 | 0,0200 |
| 4 | 16,4723        | 1         | 0,1022 | 0,0200 | 0,1022 | 0,0200 |

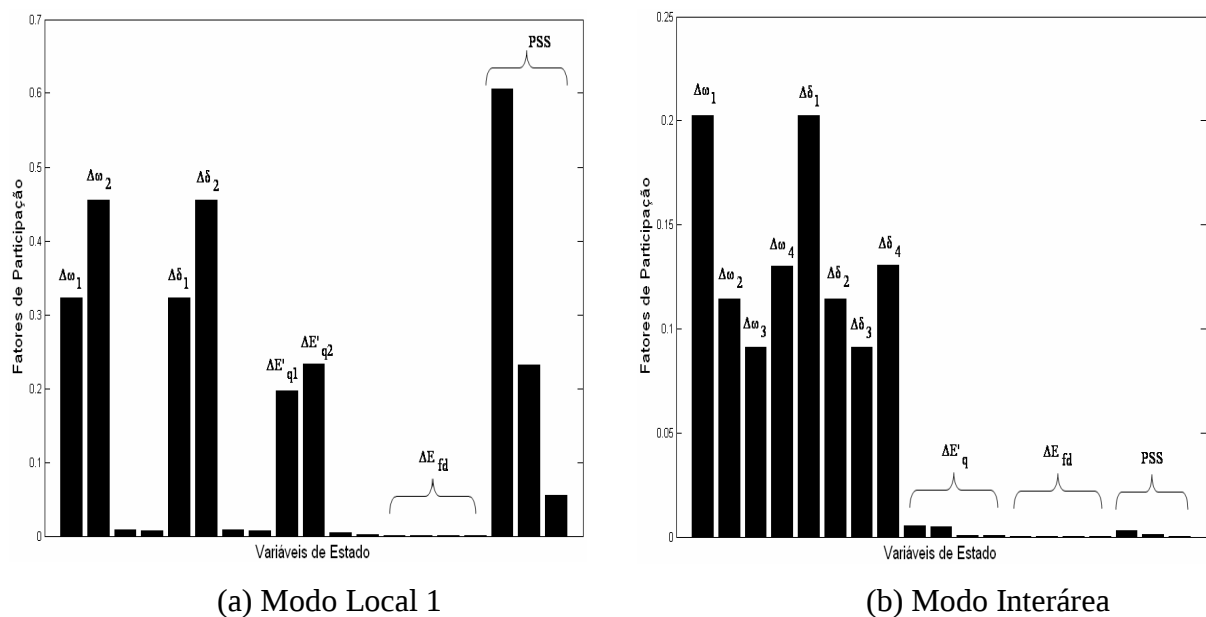


Figura 5.31 – Fatores de Participação: (a) Modo Local 1; (b) Modo Interárea

Analisando a Figura 5.31 nota-se a alta participação das variáveis de estado do PSS no modo local 1, porém no modo interárea há mínima participação do PSS. Entretanto, quando se inclui no sistema o PSS da máquina geradora 1, observa-se a estabilidade do sistema.

A estabilidade é obtida para essa configuração devido a alta participação da máquina geradora 1 na formação do modo interárea de acordo com a Figura 5.31 e a Figura 5.32 onde são mostrados os fatores de participação para o modo interárea devido a inserção do PSS da máquina geradora 1. Este fato justifica a alta participação das variáveis do PSS instalado na

máquina geradora 1 no modo interárea e conseqüentemente, torna o sistema estável.

As variações do ângulo interno da máquina geradora 3 para o caso base (instável) e para o caso de instalação do PSS na máquina geradora 1 são mostradas na Figura 5.33. Nota-se dessa figura que as oscilações são crescentes para o caso base, enquanto que para o caso de instalação do PSS na máquina geradora 1 as oscilações se tornam amortecidas e tendem a um valor final de regime permanente.

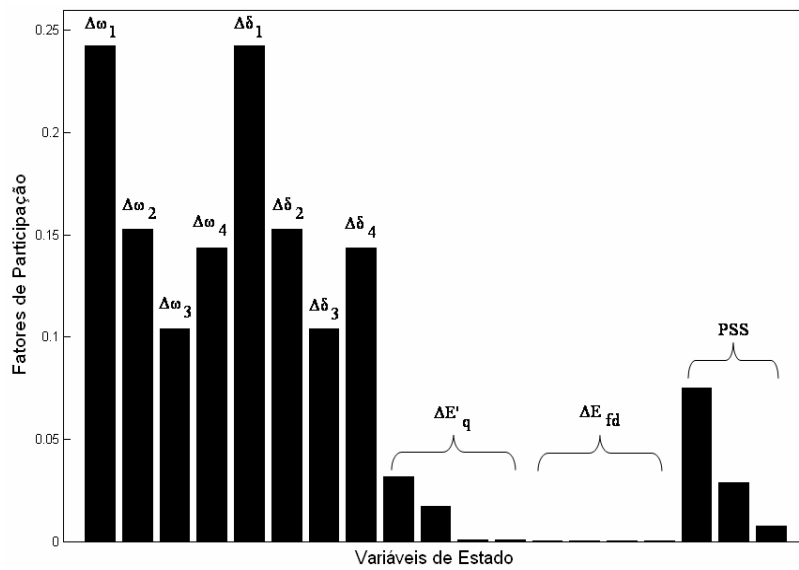


Figura 5.32 – Fatores de Participação para o Modo Interárea; Sistema com PSS-1

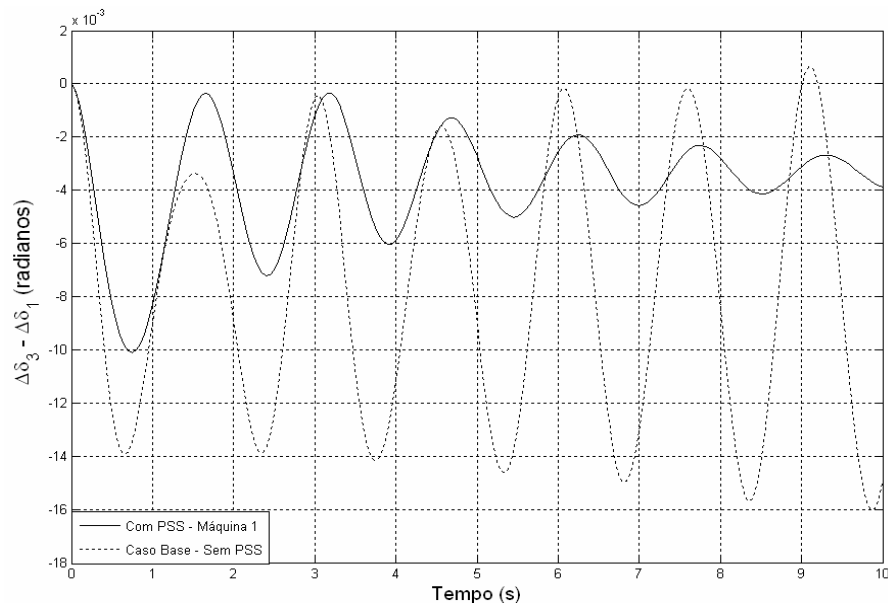


Figura 5.33 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3

É possível a inserção de maior amortecimento pela consideração da inclusão de

dispositivos PSS em mais de uma máquina geradora. Para exemplificar, considere os parâmetros dos PSS's mostrados na Tabela 5.17.

Na Figura 5.34 é mostrado o comportamento do ângulo interno da máquina geradora 3, após a ocorrência de uma pequena perturbação. Para esta simulação, todos os geradores estavam equipados com PSS (ajustados de acordo com os dados da Tabela 5.17).

A comparação entre as Figuras 5.33 e 5.34 mostra maior amortecimento para o caso do sistema com maior número de sinais estabilizadores.

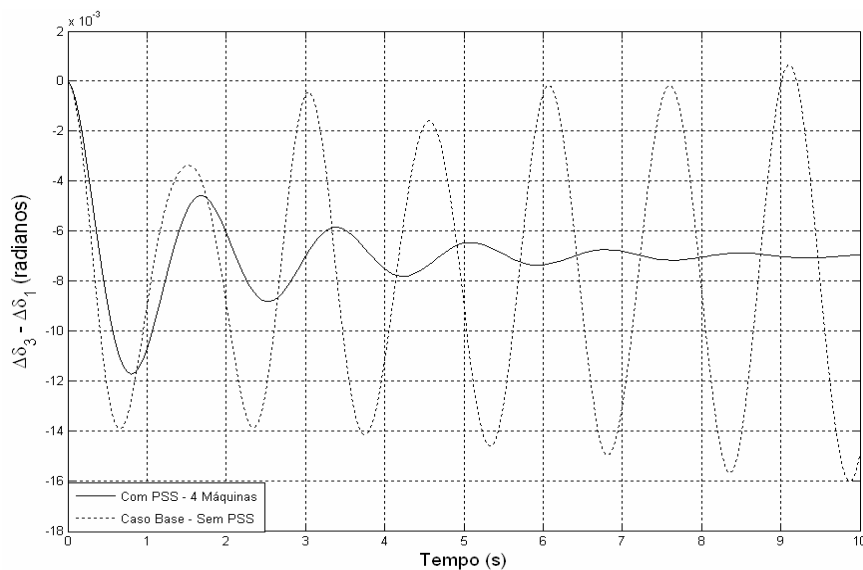


Figura 5.34 – Variações do Ângulo Interno do Gerador 3

### 5.3 Conclusões

Neste Capítulo foram apresentados os resultados obtidos quando da inclusão dos dispositivos PSS, FACTS TCSC e UPFC no Modelo de Sensibilidade de Potência para sistemas multimáquinas. Utilizou-se como fonte de testes o sistema simétrico de duas áreas, pela sua característica didática, fácil visualização e estudo dos principais modos eletromecânicos de oscilação de baixa frequência, ou seja, modos locais e modos interárea.

A evolução da modelagem do TCSC se mostrou eficaz na inserção de amortecimento ao sistema, pois utilizando o modelo fixo necessita-se de um nível de compensação de 82% da reatância da linha, sendo que após definido e implementado um modelo de primeira ordem e após a inclusão do controlador POD, o nível de compensação requerido para atingir a estabilidade foi de 10%.

Utilizando o modelo de primeira ordem para o TCSC verificou-se que, devido à sua

localização na linha de interligação, proporcionava grande participação no modo interárea, de acordo com as análises de fatores de participação e do comportamento dinâmico das máquinas geradoras do sistema. Até então nenhum método sistemático para alocação deste compensador havia sido utilizado.

Porém, para uma introdução efetiva de amortecimento, os FACTS devem ser equipados com controladores mais sofisticados e assim foi implementado os chamados POD's. Para a localização destes controladores utilizou-se o método de deslocamento do autovalor de interesse ao semiplano esquerdo do plano complexo, através do cálculo do resíduo da função de transferência em malha aberta do controlador POD. Assim, para cada localização possível do TCSC foi obtido seu resíduo correspondente.

Uma vez obtidos os parâmetros do POD necessários a inserir o amortecimento e a compensação de fase exigida, concluiu-se pela aceitação do método dos resíduos para alocação e projeto dos controladores POD.

A análise quanto à utilização de sinais remotos e locais foi realizado para o TCSC. Os resultados mostraram que tanto um sinal mensurável localmente (derivado do fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão de instalação do FACTS), quanto um sinal remoto (como a velocidade angular do rotor de algum gerador), apresentaram resultados satisfatórios.

A possibilidade de utilização de um dispositivo FACTS em atual fase de desenvolvimento foi analisada para o caso do UPFC. Assim como feito para o TCSC, foram definidos modelos evolutivos que ao serem equipados com controladores POD, mostraram a eficácia deste dispositivo em amortecer oscilações de baixa frequência. Os resultados obtidos para o UPFC confirmaram e reafirmaram os obtidos para o TCSC.

A introdução de amortecimento pela forma clássica e efetiva de utilização de dispositivos PSS foi analisada e verificada pelo comportamento dinâmico das variáveis de estado e pelos fatores de participação. A análise dos fatores de participação se mostrou eficaz, pois indicou quais as máquinas tinham maior influência nos modos instáveis, que foram então equipadas com dispositivos PSS.

Após a inserção dos PSS's o sistema tornou-se estável, caracterizado por oscilações de amplitude decrescente, indicando a introdução de amortecimento positivo ao sistema elétrico de potência.

## 6. Conclusões Finais e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram realizadas análises quanto à ação dos dispositivos FACTS TCSC e UPFC no estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas. A influência da localização dos dispositivos FACTS foi averiguada com base nos fatores de participação e resíduos. O efetivo amortecimento introduzido por controladores PSS e POD foi verificado.

Para estas análises foi utilizada uma modelagem linear para a representação do sistema elétrico de potência, denominada Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP).

Este modelo, baseado no balanço de potências que deve ser satisfeito a qualquer instante no sistema elétrico, tem como principal característica a preservação do sistema de transmissão, isto é, todas as barras do sistema elétrico são preservadas. Entenda por esta preservação a permanência na modelagem dos valores das tensões em todas as barras (módulo e fase). Com isto é facilitada a inclusão de novos dispositivos e controladores no modelo. Após a dedução do MSP observou-se que o sistema elétrico fica representado por equações diferenciais e algébricas (com isto são definidas as variáveis de estado e as variáveis algébricas). A modelagem permitiu realizar representações no domínio do tempo e da frequência, para posterior uso em simulações.

Na seqüência o MSP foi modificado, para a inclusão dos dispositivos FACTS TCSC e UPFC (anteriormente modelados) e controladores (PSS e POD).

Verificou-se do equacionamento e implementação dos dispositivos FACTS e controladores a facilidade de inclusão de novos componentes do sistema elétrico a esse modelo, pois a cada novo equipamento a ser acrescentado, novas equações dinâmicas e algébricas são incluídas na modelagem, porém, sem a necessidade de reformulação das equações anteriormente definidas.

Com o modelo completo do sistema elétrico de potência multimáquinas foram realizadas simulações para se avaliar a estabilidade a pequenas perturbações.

Dos resultados obtidos para o TCSC observou-se a importância do projeto dos parâmetros do controlador e também da sua localização no sistema elétrico. O modelo fixo do TCSC mostrou-se eficaz no aumento do limite de estabilidade mas requerendo um alto nível de compensação. Porém, com a inclusão de um modelo linear para modulação da reatância do TCSC, notou-se a significativa melhora à estabilidade.

De acordo com a variação do ganho estático do modelo linear do TCSC concluiu-se

sobre a influência de sua localização em determinados modos de oscilação do sistema elétrico, ou seja, devido o TCSC ter sido inserido na linha de interligação entre duas áreas de um sistema teste utilizado, sua ação foi maior no modo interárea de oscilação. A inclusão de um controlador POD para o TCSC mostrou-se extremamente eficaz no controle das oscilações eletromecânicas. Conclui-se que o método de projeto e alocação do TCSC através da análise dos resíduos da função de transferência em malha aberta do POD é eficiente e didático, pois informa sobre o amortecimento inserido a cada modo oscilatório devido às localizações possíveis para o TCSC.

Com relação ao UPFC os resultados mostraram que devido às injeções de potências ativas e reativas das barras inicial e final de sua instalação carregarem informações sobre o estado do sistema, o modelo de injeção de potência para o UPFC apresentou resultados superiores aos do TCSC, no caso de consideração do modelo fixo para o segundo.

A implementação de um modelo de primeira ordem para o UPFC não se mostrou tão eficaz quanto ao modelo de primeira ordem do TCSC, pois para que a estabilidade fosse garantida foi necessário um nível de compensação de 60% da reatância da linha de transmissão.

Utilizou-se o sinal fluxo de potência ativa na linha de transmissão de instalação do TCSC e UPFC para entrada do controlador representado por um bloco de primeira ordem, o qual possui alta observabilidade do modo interárea, porém, a saída do bloco para o UPFC possui baixa controlabilidade no modo interárea. Esses resultados foram confirmados pela comparação dos resíduos da função de transferência em malha aberta do controlador POD obtidos para o TCSC e UPFC, onde se verificou os maiores valores de resíduos para o TCSC para uma mesma localização destes dispositivos.

Quanto ao método utilizado para o projeto e alocação de dispositivos FACTS equipados com POD (método dos resíduos), este se mostrou eficiente pois sua aplicação permitiu inserir alto nível de amortecimento às oscilações eletromecânicas do sistema elétrico de potência.

Concluiu-se ainda das simulações realizadas e resultados obtidos que índices como os fatores de participação (obtidos dos autovetores direito e esquerdo da matriz de estados A), e resíduos de funções de transferência fornecem informações extremamente valiosas, tanto para se averiguar as ações a serem tomadas para estabilização do sistema, quanto para se verificar a atuação das ações adotadas em cada modo oscilatório. Desta maneira foi possível determinar a melhor localização de dispositivos PSS e FACTS no sistema elétrico de potência.

Com relação à atuação do PSS para a inserção de amortecimento ao sistema elétrico, os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando que a aplicação da técnica de análise dos fatores de participação para a escolha do melhor local para a sua instalação é aceitável e conduziu o sistema teste utilizado neste trabalho, antes instável, a um ponto de operação estável.

### Sugestões para Trabalhos Futuros

De posse do modelo multimáquinas aqui apresentado, novos dispositivos FACTS podem ser implementados e sua ação na estabilidade a pequenas perturbações poderá ser verificada, bem como a extensão das análises aqui apresentadas para sistemas elétricos de potência de maior porte.

A modelagem e análise não linear do comportamento do sistema elétrico de potência devem ser realizadas, de forma a obter características de projeto e controle, dos dispositivos responsáveis pelo amortecimento das oscilações eletromecânicas, mais adequadas à operação de sistemas elétricos reais.

Um estudo pormenorizado dos modos de operação do UPFC deve ser realizado, de forma a verificar todas as possibilidades de atuação deste controlador no controle do fluxo de potência, amortecimento de oscilações eletromecânicas e controle do nível de tensão.

Os parâmetros dos controladores PSS e POD foram obtidos pelo método da compensação de fase, que possui como grande limitação sua aplicação somente à frequência de oscilação de interesse, ou seja, para um ponto de operação. Sabe-se que as condições de operação de um sistema elétrico de potência são continuamente modificadas, portanto, devem-se realizar estudos e implementação de métodos para o projeto de controladores PSS e POD utilizando, por exemplo, técnicas de controle robusto, adaptável e nebuloso.

Outro aspecto que merece investigação é com respeito ao PSS, procurando se determinar melhores técnicas para sua localização e métodos de ajuste.

Como a tendência dos sistemas elétricos é terem tanto dispositivos FACTS, controladores do tipo POD e sinais adicionais como o PSS, atuando em conjunto, estudos para se determinar ajuste de parâmetros e operação coordenados destes equipamentos contribuiriam significativamente para se melhorar a estabilidade dos sistemas elétricos de potência reais.

## Referências

- [1] IEEE/CIGRE JOINT TASK FORCE. Definition and Classification of Power System Stability. *ELECTRA*, Paris, n. 208, p. 74-80, 2003.
- [2] ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. United States of America: IEEE Power Systems Engineering Series, 1993. 464p.
- [3] KUNDUR, P. *Power system stability and control*. United States of America: Electric Power Research Institute, 1994. 1176p.
- [4] YU, Y. N. *Electric power system dynamic*. New York: Academic Press, 1983. 255p.
- [5] DEMELLO, F. P.; CONCÓRDIA, 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.
- [6] BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. *Estabilidade transitória em sistemas eletromagnéticos*. São Carlos: USP/EESC 2000. 155p.
- [7] 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.
- [8] DECKMANN, S. M.; DA COSTA, V. F. Synchronizing and damping torques obtained from a power sensitivity model. In: COLLOQUIUM OF CIGRÉ STUDY COMMITTEE, 38, 1993, Florianópolis. *Cigre...*Florianópolis. [s.l.], 1993. p. 3.6.1-3.6.4.
- [9] MARTINS, N. Efficient eigenvalue and frequency response methods applied to power system small-signal stability studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. PWRS-1, n. 1, p. 217-226, 1986.
- [10] DOMINGUES, A. F. *Um modelo de espaço de estados com representação de segunda ordem para análise das oscilações de modo interárea em sistemas de energia elétrica*. Tese (Doutorado). - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

- [11] HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York: IEEE Press- John Wiley, 1999. 452p.
- [12] WATANABE E. H.; BARBOSA P. G.; ALMEIDA K. C.; TARANTO G. N. Tecnologia FACTS- tutorial. *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.
- [13] HINGORANI N. G. High power electronics and flexible AC transmission systems. *IEEE Power Engineering Review*, New York, v. 76, n. 4, p. 3-4, 1998.
- [14] PASERBA J. J. How facts controller benefit AC transmission systems. *Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES*, New York, v. 3, n. 7-12, p. 991–998, 2003.
- [15] SONG Y. H.; JOHNS A. T. *Flexible AC transmission system (FACTS)*. England: The Institute of Electrical Engineers, TJ International, 1999. 592p.
- [16] KIMBARK, E. W. Improvement of system stability by switched series capacitors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, v. PAS-85, n. 2, p. 180–188, 1966.
- [17] NOROOZIAN M.; ANDERSSON G. Damping of inter-area and local modes by use of controllable components, *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 10, n. 4, p. 2007–2012, 1995.
- [18] LARSEN E. V.; SWANN D. A. Applying power system stabilizers, Part I: general concepts, Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts, Part III: Practical Considerations. *IEEE Power Apparatus and Systems*, New York, v. PAS-100, n. 12, p. 3017–3046, 1981.
- [19] GYUGYI L. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, London, v. 139, n. 4, p. 323–331, 1992.
- [20] KUMKRATUA P.; HAQUE M. H. Versatile model of a unified power flow controller in a simple power system. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, London, v. 150, n. 2, p. 155-161, 2003.

- [21] GYUGYI L. The Unified power flow controller- a new approach to power transmission control. *IEEE on Power Delivery*, New York, v. 10, n. 2, p. 1085-1097, 1995.
- [22] NOROOZIAN M.; ÄNGQUIST L.; GHANDHARI M.; ANDERSON G. Use of UPFC for optimal power flow control. *IEEE on Power Delivery*, New York, v. 12, n. 4, p. 1629-1634, 1997.
- [23] MENG Z. J.; SO P. L. A current injection UPFC model for enhancing power system dynamic performance. *IEEE on Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, v. 2, p. 1544-1549, 2000.
- [24] DA COSTA V. F. *Modelo de sensibilidade de potência para análise de oscilações de baixa frequência em sistemas de energia elétrica*. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.
- [25] KUNDUR P.; KLEIN M.; ROGERS G. J.; ZYWNO M. S. Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 4, n. 2, p. 614 – 626, 1989.
- [26] MARTINS N.; PINTO, H. J. C. P.; GAMA, C.; CAVALCANTI, J. A.; LEONI, R. L.; SOUTO, R. V.; MACEDO, N. J. P.; EIRAS, M. J. X. Oscillation damping analysis and control studies of the future interconnection between north-northeast and south-southeast systems. In: SEPOPE, 5, 1996, Recife. *Anais...* Recife: [s.l.], 1996.
- [27] PELLANDA P. C.; SAVELLI, D. C.; MACEDO, N. J. P.; MARTINS, N.; LUZ, G. S. Síntese de sinais e escolha de estrutura dos estabilizadores dos TCSCs da interligação norte-sul considerando robustez a perturbações externas. In: SEPOPE, 10, 2006, Florianópolis. *Proceedings...* Florianópolis: [s.l.], 2006.
- [28] GAMA C. Brazilian north-south interconnection – control application and operating experience with a TCSC. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, New York, v. 2, p. 1103–1108, 1999.
- [29] WANG H. F., SWIFT F. J., LI M. FACTS-based stabilizer designed by the phase compensation method part-II: multi-machine power systems. In: APSCOM, Hong Kong, 1997. *Proceedings...* Hong Kong: [s.l.], 1997. p. 644-649.

- [30] DEL ROSSO A. D.; CAÑIZARES C. A.; DOÑA V. M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 18, n. 4, p. 1487–1496, 2003.
- [31] YANG N.; LIU Q.; MCCALLEY J. D. TCSC controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 13, n. 14, p. 1304–1310, 1998.
- [32] MARTINS N.; LIMA L. T. G. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static VAR compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 5, n. 4, p. 74–82, 1990.
- [33] ABOUL-ELA M. E.; SALLAM A. A.; MCCALLEY J. D.; FOUAD A. A. Damping controller design for power system oscillations using global signals. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 11, n. 2, p. 767-773, 1996.
- [34] SAUER P.W.; PAI M.A. *Power system dynamics and stability*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357p.
- [35] CAI L. J., ERLICH I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS controller for damping power system oscillations in multi-machine systems. *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, v. 2, p. 1-6, 2003.
- [36] KISS L., ZERÉNYI J. A new conception for constructing and tuning power system stabilizers (PSS). *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, v.1 p. 1-5, 2003.
- [37] WANG H. F., SWIFT F. J. An unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations part II: multi-machine power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 13, n. 4, p. 1355-1362, 1998.
- [38] DE OLIVEIRA S. E. M. Synchronizing and damping torque coefficients and power system steady-state stability as affected by static VAR compensators. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 9, n. 1, p. 109-119, 1994.
- [39] ZIMMERMAN R.; GAN D. MATPOWER – A MATLAB power system simulation

package. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/matpower.html>>. Acesso em: 05 dez. 2007.

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

[41] SADIKOVIC R. *Damping controller design for power system oscillations*. Zurich: Technical Report, Power Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, 2004.

[42] MOTA, W. S.; NASCIMENTO, J. A. Projeto de estabilizadores de sistemas de potência por controle clássico e algoritmos genéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 14, 2002, Natal. *Anais...* Natal: UFRN, 2008

## Apêndice I. Matriz de Transformação de Coordenadas

Considere dois sistemas de coordenadas distintos, conforme Figura A.I.1, onde temos um sistema fixo, determinado pelos eixos real (r) e imaginário (m), e outro rotativo, determinado pelos eixos direto (d) e em quadratura (q).

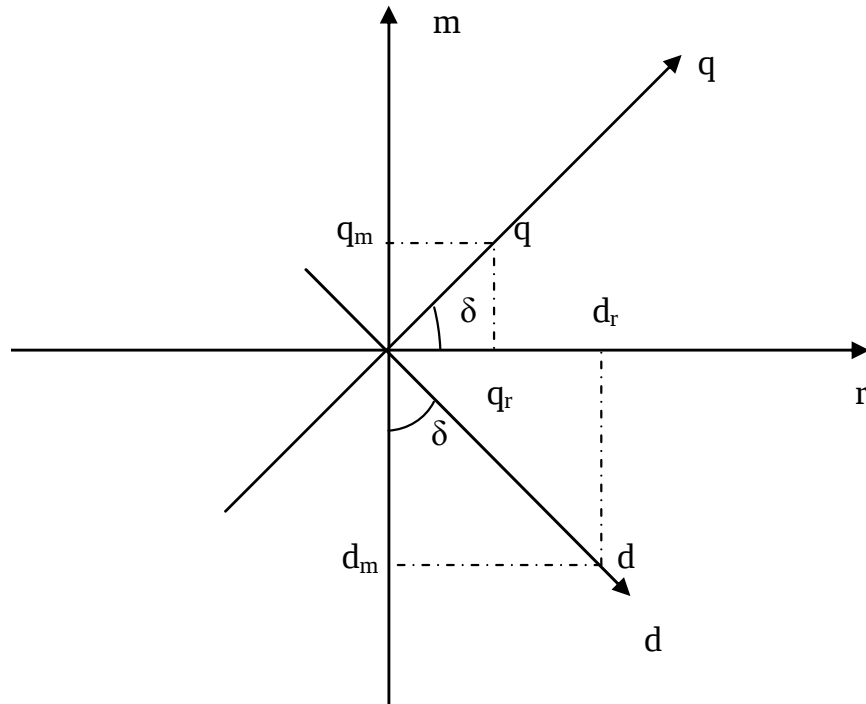


Figura A.I.1 – Sistemas de coordenadas r,m e d,q

Da Figura A.I.1 pode-se expressar uma grandeza sobre o eixo real (r), como na expressão (A.I.1).

$$r = d_r + q_r \quad (\text{A.I.1})$$

De maneira semelhante para uma grandeza no eixo imaginário (m), tem-se a equação (A.I.2).

$$m = -d_m + q_m \quad (\text{A.I.2})$$

Da Figura A.I.1 também podem ser obtidas as relações trigonométricas de interesse, descritas pelas equações (A.I.3).

$$\begin{aligned}
\cos \delta &= \frac{q_r}{q} \\
\sin \delta &= \frac{q_m}{q} \\
\cos \delta &= \frac{d_m}{d} \\
\sin \delta &= \frac{d_r}{d}
\end{aligned}
\tag{A.I.3}$$

Através de substituições pertinentes, pode ser escrito o sistema matricial que transforma uma grandeza descrita no sistema de coordenadas (r,m), para o sistema de coordenadas (d,q) (equação A.I.4).

$$\begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix}
\tag{A.I.4}$$

De maneira similar, obtém-se a transformada inversa entre os sistemas de coordenadas (d,q) e (r,m) (equação A.I.5).

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix}
\tag{A.I.5}$$

## Apêndice II. Coeficientes do Modelo de Injeção de Potência do UPFC

Neste apêndice são mostrados os coeficientes lineares do Modelo de Injeção de Potência do UPFC demonstrado no Capítulo 3. O modelo possui coeficientes ativos e reativos para as barras inicial e final de instalação do UPFC, conforme descrito a seguir.

### A.II.1 – Barra Inicial de Instalação – Coeficientes Ativos

$$\Delta P_k = A1_{Ui} \Delta \theta_{km} + A2_{Ui} \Delta V_k + A3_{Ui} \Delta V_m + A4_{Ui} \Delta V_p + A5_{Ui} \Delta V_q + A6_{Ui} \Delta I_q \quad (A.II.1)$$

$$A1_{Ui} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_{km}} = \frac{1}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ 2rV_k^2 R_{km} \sin \gamma \left[ \frac{V_m^2 - V_k V_m \cos(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] + \right. \\ \left. + rV_k V_m [X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] \left[ \frac{V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.1.a)$$

$$A2_{Ui} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = \frac{1}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ rV_k R_{km} \cos \gamma - \left[ 2rV_k^2 R_{km} \sin \gamma - \right. \right. \\ \left. \left. - rV_k V_m [X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] \right] \left[ \frac{V_m \sin(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.1.b)$$

$$A3_{Ui} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = \frac{1}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ rV_k [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] + \left[ 2rV_k^2 R_{km} \sin \gamma + \right. \right. \\ \left. \left. + rV_k V_m [X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] \right] \left[ \frac{V_k \sin(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.1.c)$$

$$A4_{Ui} = \frac{\partial P_k}{\partial V_p} = \frac{1}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \frac{1}{(V_p^2 + V_q^2)} \left\{ 2V_p R_{km} (V_p^2 + V_q^2) + 2rV_p V_k^2 R_{km} \cos\gamma + 2rV_q V_k^2 R_{km} \sin\gamma - \right. \\ \left. - rV_k V_m [V_q X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + V_q R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - V_p X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + V_p R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] \right\} \quad (A.II.1.d)$$

$$A5_{Ui} = \frac{\partial P_k}{\partial V_q} = \frac{1}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \frac{1}{(V_p^2 + V_q^2)} \left\{ 2V_q R_{km} (V_p^2 + V_q^2) + 2rV_q V_k^2 R_{km} \cos\gamma - 2rV_p V_k^2 R_{km} \sin\gamma + \right. \\ \left. + rV_k V_m [V_q X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - V_q R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + V_p X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + V_p R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] \right\} \quad (A.II.1.e)$$

$$A6_{Ui} = \frac{\partial P_k}{\partial I_q} = 0 \quad (A.II.1.f)$$

## A.II.2 – Barra Inicial de Instalação – Coeficientes Reativos

$$\Delta Q_k = R1_{Ui} \Delta \theta_{km} + R2_{Ui} \Delta V_k + R3_{Ui} \Delta V_m + R4_{Ui} \Delta V_p + R5_{Ui} \Delta V_q + R6_{Ui} \Delta I_q \quad (A.II.2)$$

$$R1_{Ui} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_{km}} = \frac{1}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ rV_k^2 (R_{km} \sin\gamma + X_{km} \cos\gamma) \left[ \frac{V_m^2 - V_k V_m \cos(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.2.a)$$

$$R2_{Ui} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = \frac{V_p^2 + V_q^2}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ R_{km} (\cos\gamma - \sin\gamma) + X_{km} (\cos\gamma + \sin\gamma) \left[ \frac{V_k V_m \sin(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} - i_q \quad (A.II.2.b)$$

$$R3_{Ui} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = \frac{1}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ -rV_k^2 (R_{km} \cos\gamma + X_{km} \sin\gamma) \left[ \frac{V_m \sin(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.2.c)$$

$$R4_{Ui} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_p} = \frac{1}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \frac{V_k^2}{(V_p^2 + V_q^2)} \left\{ -r [V_q (R_{km} \cos \gamma + X_{km} \sin \gamma) + V_p (X_{km} \cos \gamma - R_{km} \sin \gamma)] \right\} \quad (A.II.2.d)$$

$$R5_{Ui} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_q} = \frac{1}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \frac{V_k^2}{(V_p^2 + V_q^2)} \left\{ -r [V_q (R_{km} \sin \gamma - X_{km} \cos \gamma) + V_p (X_{km} \sin \gamma + R_{km} \cos \gamma)] \right\} \quad (A.II.2.e)$$

$$R6_{Ui} = \frac{\partial Q_k}{\partial I_q} = -V_k \quad (A.II.2.f)$$

### A.II.3 – Barra Final de Instalação – Coeficientes Ativos

$$\Delta P_m = A1_{Uf} \Delta \theta_{km} + A2_{Uf} \Delta V_k + A3_{Uf} \Delta V_m + A4_{Uf} \Delta V_p + A5_{Uf} \Delta V_q + A6_{Uf} \Delta I_q \quad (A.II.3)$$

$$A1_{Uf} = \frac{\partial P_m}{\partial \theta_{km}} = \frac{r V_k V_m}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ [-X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] \left[ \frac{V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.3.a)$$

$$A2_{Uf} = \frac{\partial P_m}{\partial V_k} = \frac{r V_k V_m}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ [X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) - R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] \left[ \frac{V_m \sin(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.3.b)$$

$$A3_{Uf} = \frac{\partial P_m}{\partial V_m} = \frac{-r V_k}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] + V_m [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] \left[ \frac{V_k \sin(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.3.c)$$

$$A4_{Uf} = \frac{\partial P_m}{\partial V_p} = \frac{1}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \frac{-rV_k V_m}{(V_p^2 + V_q^2)} \left\{ V_q [R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] + \right. \\ \left. + V_p [R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] \right\} \quad (A.II.3.d)$$

$$A5_{Uf} = \frac{\partial P_m}{\partial V_q} = \frac{1}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \frac{-rV_k V_m}{(V_p^2 + V_q^2)} \left\{ V_q [R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] + \right. \\ \left. + V_p [-R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] \right\} \quad (A.II.3.e)$$

$$A6_{Uf} = \frac{\partial P_m}{\partial I_q} = 0 \quad (A.II.3.f)$$

#### A.II.4 – Barra Final de Instalação – Coeficientes Reativos

$$\Delta Q_m = R1_{Uf} \Delta \theta_{km} + R2_{Uf} \Delta V_k + R3_{Uf} \Delta V_m + R4_{Uf} \Delta V_p + R5_{Uf} \Delta V_q + R6_{Uf} \Delta I_q \quad (A.II.4)$$

$$R1_{Uf} = \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_{km}} = \frac{rV_k V_m}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] \left[ \frac{V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.4.a)$$

$$R2_{Uf} = \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} = \frac{-rV_k V_m}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \left\{ [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] \left[ \frac{V_m \sin(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \right\} \quad (A.II.4.b)$$

$$\begin{aligned}
 R3_{Uf} = \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} = \frac{rV_k}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \{ [-X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] + \\
 + V_m [X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) + R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] \left[ \frac{V_k \sin(\theta_{km})}{V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\theta_{km})} \right] \}
 \end{aligned} \tag{A.II.4.c}$$

$$\begin{aligned}
 R4_{Uf} = \frac{\partial Q_m}{\partial V_p} = \frac{1}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \frac{rV_k V_m}{(V_p^2 + V_q^2)} \{ V_q [-R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) - X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] + \\
 + V_p [R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] \}
 \end{aligned} \tag{A.II.4.d}$$

$$\begin{aligned}
 R5_{Uf} = \frac{\partial Q_m}{\partial V_q} = \frac{1}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} \frac{rV_k V_m}{(V_p^2 + V_q^2)} \{ V_q [R_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma) - X_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma)] + \\
 + V_p [R_{km} \cos(\theta_{km} + \gamma) + X_{km} \sin(\theta_{km} + \gamma)] \}
 \end{aligned} \tag{A.II.4.e}$$

$$R6_{Uf} = \frac{\partial Q_m}{\partial I_q} = 0 \tag{A.II.4.f}$$

## Apêndice III. Análise Modal

A análise do comportamento dinâmico de um sistema elétrico de potência multimáquinas contendo dispositivos PSS e FACTS, quando este é submetido a pequenas perturbações pode ser obtida da sua representação na forma linearizada de espaço de estados de acordo com a equação (A.III.1).

$$\begin{aligned}\dot{\Delta x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u\end{aligned}\tag{A.III.1}$$

Na equação (A.III.1)  $\Delta x$  é o vetor de variáveis de estado,  $\Delta y$  é o vetor de saídas e  $\Delta u$  o vetor de entradas. As matrizes A, B, C e D representam respectivamente a matriz de estados, matriz de entradas, matriz de saídas e matriz de realimentação.

Através da aplicação da Transformada de Laplace pode-se obter uma função de transferência que definirá o comportamento do sistema como um todo de acordo com a equação (A.III.2).

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = C \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} B + D\tag{A.III.2}$$

Todos os valores de  $s$  que satisfazem a equação  $\det(sI - A) = 0$ , conhecida como equação característica da matriz A, são conhecidos como os autovalores ( $\lambda_i$ ) da matriz A. Os autovalores podem ocorrer em valores reais ou em pares complexos conjugados, sendo que os primeiros representam modos não oscilatórios e os segundos definem modos oscilatórios, sendo que seu amortecimento é dado pela parte real e a frequência de oscilação pela parte imaginária. Para cada modo oscilatório, associado a um par complexo conjugado ( $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ ) pode-se definir seu coeficiente de amortecimento que determina uma taxa de eliminação das oscilações de acordo com a equação (A.III.3).

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}}\tag{A.III.3}$$

Para estudos de estabilidade a pequenas perturbações realiza-se a análise do sinal dos autovalores da matriz  $A$ . O Primeiro Método de Lyapunov define que se o sistema possui todos os autovalores com parte real negativa este é estável, porém se ao menos um autovalor possui parte real positivo o sistema é instável, e se a parte real de qualquer autovalor for nula nada se pode afirmar sobre a estabilidade do sistema.

Para cada autovalor podemos definir os autovetores direito ( $\phi_i$ ) e esquerdo ( $\psi_i$ ) que satisfazem as equações (A.III.4) e (A.III.5) respectivamente.

$$A\phi_i = \lambda_i \phi_i \quad (\text{A.III.4})$$

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad (\text{A.III.5})$$

O autovetor direito indica em quais variáveis do sistema o modo oscilatório pode ser observado, enquanto que o autovetor esquerdo determina a faixa de contribuição de uma variável num certo modo oscilatório.

Os autovetores direito e esquerdo podem ser combinados de forma a definir uma relação entre as variáveis de estado e os modos oscilatórios, essa relação é representada pelo fator de participação descrito pela equação (A.III.6).

$$p_{ki} = \phi_{ki} \psi_{ik} \quad (\text{A.III.6})$$

O fator de participação define a participação relativa de uma variável de estado  $k$  em um determinado modo de oscilação  $i$ .

Uma vez obtida as características de cada modo oscilatório, ações de controle devem ser tomadas para que este modo se torne mais amortecido. Para que o controlador inserido contribua de maneira positiva ao amortecimento deve-se escolher um conjunto de entrada e saída de maneira que se obtenha a maior controlabilidade e observabilidade. Ou seja, o modo oscilatório deve ser observável na variável de entrada do controlador, enquanto que a variável de saída deve produzir uma maior influência sobre o sistema. Os resíduos ( $R_i$ ) de uma função de transferência fornecem informações sobre a controlabilidade e observabilidade do conjunto entrada saída para o controlador concomitantemente para um determinado modo de oscilação. Considere que a função de transferência expressa pela equação (A.III.2) possa ser expandida

em frações parciais, tal que possa ser dada pela equação (A.II.7), em função das matrizes C e B e dos autovetores direito e esquerdo.

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \sum \frac{C \phi_i \psi_i B}{(s - \lambda_i)} = \sum \frac{R_i}{(s - \lambda_i)} \quad (\text{A.III.7})$$

Da equação (A.III.7) nota-se que o resíduo é dado pelo produto entre a observabilidade de uma entrada  $C_j$  e a controlabilidade de uma saída  $B_k$  associado a um determinado autovalor de acordo com o conjunto de equações (A.III.8).

$$\text{Obser} = C_j \phi_i$$

$$\text{Cont} = \psi_i B_k \quad (\text{A.III.8})$$

$$R_{ijk} = \text{Obser} \cdot \text{Cont}$$



Tabela A.IV.3 – Dados das Linhas de Transmissão

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

Tabela A.IV.4 – Dados do Ponto de Operação Inicial - Caso Base.

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

## **Anexo I. Artigos Submetidos e Publicado**

FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. (2007). “Analysis of the Dynamic Performance of Electric Power System with Consideration of FACTS Device "Thyristor Controlled Series Compensator””, *Proceedings of the 6th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications – Dincon-2007*, pp. 756-763. São José do Rio Preto – SP. (Publicado).

FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. (2007). “Melhora da Estabilidade Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Multimáquinas usando o Dispositivo FACTS “Thyristor Controlled Series Capacitor - TCSC””, *Revista Controle e Automação da Sociedade Brasileira de Automática - SBA*. (Submetido).

FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. (2007). “Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas Utilizando Dispositivos TCSC”, *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE - 2008*, Belo Horizonte – MG. (Submetido).

FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. (2007). “Influência da Localização de Dispositivos FACTS TCSC no Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas.”, *Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica – SEPOPE – 2008*, Belém – PA. (Submetido).