

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 Multimáquinas com Dispositivos  
FACTS do Tipo SSSC e Controladores Suplementares  
(POD e PSS)**

**Carlos Eduardo Pupin**

**Orientador: Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo**

Ilha Solteira – SP, Maio de 2009

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

**“Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas Elétricos Multimáquinas com Dispositivos FACTS do Tipo SSSC” e Controladores Suplementares (POD e PSS)**

**CARLOS EDUARDO PUPIN**

**Orientador:** Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo

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

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP  
Maio/2009

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

- P984e Pupin, Carlos Eduardo.  
Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos multi-máquinas com dispositivos FACTS do tipo SSSC e controladores suplementares (POD e PSS) / Carlos Eduardo Pupin. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2009.  
144 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2009
- Orientador: Percival Bueno de Araujo  
Bibliografia: p. 129-133
1. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 2. Oscilações eletromecânicas. 3. MSP. 4. SSSC. 5. POD.

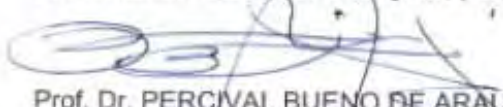
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas Elétricos Multimáquinas com Dispositivos FACTS do Tipo SSSC e Controladores Suplementares (POD e PSS).

**AUTOR:** CARLOS EDUARDO PUPIN

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FRANCISCO VILLARREAL ALVARADO

Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ÉLCIO PRECIOSO DE PAIVA

Coordenação da Área de Indústria / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins - IF/TO - Campus Palmas

Data da realização: 28 de maio de 2009.

*À minha mãe Silvia e à minha irmã Silvelise*  
*À memória de meu pai Carlos*

## **Agradecimentos**

Desejo agradecer a todos com quem convivi nos anos de graduação e mestrado. Principalmente gostaria de agradecer:

Ao meu orientador, professor Percival Bueno de Araujo por sua excelente orientação no desenvolvimento desta dissertação, aos ensinamentos passados e, principalmente, pela amizade compartilhada durante minha vida acadêmica.

Aos professores: Antonio Padilha Feltrin, Dionízio Paschoareli Júnior, Anna Diva Plasencia Lotufo, Francisco Villarreal Alvarado e Laurence Duarte Colvara pelas sugestões e ensinamentos dados, ambos decisivos na conclusão deste trabalho.

Aos amigos da pós-graduação e em especial aos do grupo de estudo: Aline, Marcos, André, Ricardo, Maxwell e Carlos Febres com quem tive o prazer de conviver e tiveram grande participação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos grandes amigos com quem convivo há longa data: Leandro, Allan, Bruno, Leonardo, Rafael, Lucas Mani e Enilton.

A todos os amigos de república com que tive o privilégio de vivenciar grandes momentos nestes anos de convivência longe da família: Antônio, Mario, Evandro, Fábio, Dhiego, Ciro, Ismael, Marcelo, Lucas, Fabrício e Kazuo.

À minha grande família, que sempre me apoiou e aconselhou em todos os momentos de minha vida. Aos meus tios e avôs Maria do Carmo e Sylvio pelo grande carinho.

À minha irmã Silvelise, pelo apoio e confiança que deposita em todos os meus atos.

À minha querida mãe Silvia por todo amor, carinho e dedicação oferecidos a mim, por quem tenho uma dívida eterna de gratidão.

À memória de meu pai Carlos Sergio, por ter me direcionado pelo caminho correto.

A UNESP pela excelente qualidade no ensino oferecido, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica, e à CAPES pelo apoio financeiro.

## **Resumo**

Este trabalho apresenta estudos referentes à estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência, considerando a atuação de FACTS para o amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência. É abordado o dispositivo FACTS SSSC (Static Synchronous Series Compensator).

Para este fim o sistema elétrico é modelado, modificando-se o Modelo de Sensibilidade de Potência para se inserir o compensador.

Para melhorar a estabilidade do sistema desenvolvido, controladores são propostos para maximizar o desempenho do dispositivo SSSC, e dessa forma introduzir amortecimento ao sistema elétrico.

Acrescenta-se ao modelo desenvolvido os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP ou PSS – Power System Stabilizers) e o Power Oscillation Damping (POD), para atuação conjunta com o SSSC.

Utilizando os fatores de participação e teoria de resíduos é possível encontrar a melhor localização para instalação dos dispositivos e realizar o ajuste dos parâmetros dos controladores.

Simulações são realizadas para dois sistemas teste; um de quatro e outro de dez geradores.

A partir dos resultados obtidos conclui-se pela potencialidade da utilização do SSSC para a melhoria da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência.

Palavras-chave: Estabilidade a Pequenas Perturbações, Sistemas Elétricos de Potência, Oscilações Eletromecânicas, MSP, FACTS, SSSC, PSS, POD.

## **Abstract**

This work presents studies to provide damping to low frequencies oscillations of the electrical power systems by FACTS devices, considering SSSC (Static Synchronous Series Compensator). This is developed and implemented using the Power Sensitivity Model for multimachine systems. Afterwards, the SSSC devices are introduced as well as the controllers.

The PSS (Power Systems Stabilizers) and POD (Power Oscillation Damping) controllers has been included using the participation factor and residue number theory to examine their best allocation on the electrical power systems.

The study is based on modal analysis and time domain simulations using two test systems: four and ten generators.

The simulation results show the capability of this method for small signal stability improvement for the electric power systems.

**Keywords** – Electric Power Systems, Small Signal Stability, Electromechanical Oscillations, PSM, PSS, POD, FACTS, SSSC.

## Lista de Figuras

### Página

### Capítulo 2

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Enrolamentos do Gerador Síncrono Trifásico – 2 Pólos. ....                | 26 |
| Figura 2.2 – Diagrama Unifilar do Gerador Síncrono. ....                               | 27 |
| Figura 2.3 – Potências no Sistema Multimáquinas. ....                                  | 29 |
| Figura 2.4 – Sistema de Excitação (Regulador Automático de Tensão) do Gerador Síncrono | 35 |
| Figura 2.5 – Diagrama de Blocos: MSP para Sistemas Multimáquinas. ....                 | 42 |

### Capítulo 3

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 – Representação do Dispositivo FACTS SSSC. ....                               | 45 |
| Figura 3.2 – Diferentes Modos de Operação do SSSC. ....                                  | 46 |
| Figura 3.3 – Circuito Equivalente do SSSC. ....                                          | 47 |
| Figura 3.4 – Circuito Equivalente do SSSC para $V_s = 0$ – Diagrama Fasorial. ....       | 47 |
| Figura 3.5 – Corrente entre as barras i e j, referenciada ao sistema elétrico. ....      | 48 |
| Figura 3.6 – Diagrama Fasorial: operação do SSSC: (a) modo capacitivo. (b) modo indutivo | 50 |
| Figura 3.7 – Diagrama Fasorial: $V_s = 0$ . ....                                         | 52 |

### Capítulo 4

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1 – Controlador de 1ª ordem: diagrama de blocos. ....                                              | 59 |
| Figura 4.2 – Diagrama de Blocos representativo do controlador de primeira ordem. ....                       | 59 |
| Figura 4.3 – Ilustração do controlador POD. ....                                                            | 63 |
| Figura 4.4 – Divisão do bloco washout. ....                                                                 | 63 |
| Figura 4.5 – Divisão dos blocos de avanço-atraso. ....                                                      | 64 |
| Figura 4.6 – Diagrama de blocos representativo do POD. ....                                                 | 65 |
| Figura 4.7 – Estrutura básica do PSS. ....                                                                  | 68 |
| Figura 4.8 – Sistema de excitação (Regulador Automático de Tensão) com adição<br>do Sinal Suplementar. .... | 70 |
| Figura 4.9 – Diagrama de blocos representativo do MSP com o PSS. ....                                       | 70 |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.10 – Malha reativa do MSP multimáquinas. ....                                                  | 73 |
| Figura 4.11 – Diagrama de blocos do laço eletromecânico - Amortecimento puro<br>inserido pelo PSS. .... | 75 |
| Figura 4.12 – Função de transferência do sistema de potência com controlador POD. ....                  | 76 |
| Figura 4.13 – Efeito do controlador POD no resíduo associado ao autovalor $\lambda_i$ . ....            | 78 |

## **Capítulo 5**

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.1 – Variação angular dos geradores: caso base. ....                                                      | 82  |
| Figura 5.2(a) – Modo Local 1. ....                                                                                | 83  |
| Figura 5.2(b) – Modo Local 2. ....                                                                                | 83  |
| Figura 5.2(c) – Modo Interárea. ....                                                                              | 83  |
| Figura 5.3 – Desvio angular da máquina geradora 3 – com e sem PSS. ....                                           | 87  |
| Figura 5.4 – Trajetória do modo interárea para diferentes taxas de compensação. ....                              | 88  |
| Figura 5.5 – Valores assumidos por Vs variando a compensação reativa – SSSC<br>entre as barras 7 e 8. ....        | 89  |
| Figura 5.6 – Trajetória do par complexo conjugado representante do modo interárea. ....                           | 91  |
| Figura 5.7 – Fatores de participação no modo interárea com o uso do controlador de<br>primeira ordem. ....        | 92  |
| Figura 5.8(a) – Desvio do ângulo interno do gerador 2. ....                                                       | 93  |
| Figura 5.8(b) – Desvio do ângulo interno do gerador 3. ....                                                       | 93  |
| Figura 5.9 – Fatores de participação do sistema teste com a inclusão do SSSC/POD<br>( $K_{SSSC} = 0,42716$ ) .... | 98  |
| Figura 5.10 – Trajetória do par complexo conjugado dos modos de oscilações interárea e<br>controlador. ....       | 98  |
| Figura 5.11 – Desvio angular do gerador 2. ....                                                                   | 99  |
| Figura 5.12 – Desvio angular do gerador 3. ....                                                                   | 99  |
| Figura 5.13 – Desvios angulares – Comparação entre POD e Caso base. ....                                          | 100 |
| Figura 5.14 – Variação velocidade angular – Comparação entre POD e Caso base. ....                                | 101 |
| Figura 5.15 – Variação do fluxo potência ativa – Comparação entre POD e Caso base. ....                           | 101 |
| Figura 5.16 – Variação do ângulo interno da máquina 2 – Comparação entre os resultados. ....                      | 102 |
| Figura 5.17 – Variação do ângulo interno da máquina 3 – Comparação entre os resultados. ....                      | 103 |
| Figura 5.18 – Desvio do ângulo interno das máquinas 3, 6 e 8. ....                                                | 105 |
| Figura 5.19(a) – Modo local 1. ....                                                                               | 106 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.19(b) – Modo local 2. ....                                                            | 106 |
| Figura 5.19(c) – Modo local 3. ....                                                            | 106 |
| Figura 5.19(d) – Modo local 4. ....                                                            | 106 |
| Figura 5.19(e) – Modo local 5. ....                                                            | 107 |
| Figura 5.19(f) – Modo local 6. ....                                                            | 107 |
| Figura 5.19(g) – Modo local 7. ....                                                            | 107 |
| Figura 5.19(h) – Modo local 8. ....                                                            | 107 |
| Figura 5.19(i) – Modo interárea. ....                                                          | 107 |
| Figura 5.20(a) – Modo local 6. ....                                                            | 110 |
| Figura 5.20(b) – Modo local 8. ....                                                            | 110 |
| Figura 5.21 – Desvio angular das máquinas 3, 6 e 8 – PSS instalado nas máquinas 2, 5 e 9. .... | 112 |
| Figura 5.22(a) – Modo local 4. ....                                                            | 116 |
| Figura 5.22(b) – Modo local 5. ....                                                            | 116 |
| Figura 5.22(c) – Modo local 6. ....                                                            | 117 |
| Figura 5.22(d) – Modo local 7. ....                                                            | 117 |
| Figura 5.22(e) – Modo local 8. ....                                                            | 117 |
| Figura 5.23 – Desvio angular – SSSC/POD em atuação e PSS nas máquinas 2, 5 e 9. ....           | 121 |
| Figura 5.24 – Desvio angular do gerador 3 – comparação de resultados. ....                     | 122 |

## **Apêndice I**

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| Figura I.1 – Sistemas de coordenadas r,m e d,q. .... | 134 |
|------------------------------------------------------|-----|

## **Apêndice III**

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura III.1 – Diagrama Unifilar – Sistema de 2 Áreas, 4 Geradores e 10 Barras. .... | 138 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## **Apêndice IV**

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura IV.1 – Diagrama Unifilar New England – Sistema de 2 Áreas, 10 Geradores<br>e 39 Barras. .... | 140 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## Lista de Tabelas

Página

### Capítulo 5

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 5.1 – Autovalores Dominantes – Caso Base. ....                                                           | 81  |
| Tabela 5.2 – Parâmetros do PSS. ....                                                                            | 84  |
| Tabela 5.3 – Autovalores Dominantes com atuação do PSS ( $\xi_{des} = 0,2$ ). ....                              | 85  |
| Tabela 5.4 – Autovalores Dominantes com atuação do PSS ( $\xi_{des} = 0,8$ ) ....                               | 86  |
| Tabela 5.5 – Autovalores Dominantes – SSSC sem controlador. ....                                                | 89  |
| Tabela 5.6 – Autovalores Dominantes – SSSC com controlador de primeira<br>ordem ( $K_{SSSC} = 0,2$ ) ....       | 91  |
| Tabela 5.7 – Resíduos – SSSC com controlador POD. ....                                                          | 95  |
| Tabela 5.8 – Parâmetros do controlador POD – amortecimento do modo interárea. ....                              | 95  |
| Tabela 5.9 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo<br>interárea $\xi_{des} = 0,2$ . ....  | 96  |
| Tabela 5.10 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo<br>interárea $\xi_{des} = 0,4$ . .... | 96  |
| Tabela 5.11 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo<br>interárea $\xi_{des} = 0,6$ . .... | 96  |
| Tabela 5.12 – Autovalores dominantes. ....                                                                      | 105 |
| Tabela 5.13 – Parâmetros de atuação do PSS – Sistema New England. ....                                          | 109 |
| Tabela 5.14 – Autovalores dominantes – PSS nas máquinas 2 e 9 ( $\xi_{des} = 0,6$ ). ....                       | 109 |
| Tabela 5.15 – Autovalores dominantes – PSS nas máquinas 2, 5 e 9 ( $\xi_{des} = 0,6$ ). ....                    | 111 |
| Tabela 5.16 – Resíduos – SSSC com controlador POD. ....                                                         | 113 |
| Tabela 5.17 – Parâmetros do controlador POD – amortecimento do modo interárea. ....                             | 113 |
| Tabela 5.18 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea<br>$\xi_{des} = 0,1$ . .... | 114 |
| Tabela 5.19 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea<br>$\xi_{des} = 0,2$ . .... | 115 |
| Tabela 5.20 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea<br>$\xi_{des} = 0,4$ . .... | 115 |

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 5.21 – Parâmetros de atuação do PSS, calculado pelo método de resíduos – Sistema New England. ....           | 118 |
| Tabela 5.22 – Parâmetros de atuação do POD, calculado pelo método de resíduos – Sistema New England. ....           | 118 |
| Tabela 5.23 – Autovalores dominantes ( $\xi_{des} = 0,01$ ) – SSSC/POD em atuação e PSS nas máquinas 2, 5 e 9. .... | 119 |
| Tabela 5.24 – Autovalores dominantes ( $\xi_{des} = 0,05$ ) – SSSC/POD em atuação e PSS nas máquinas 2, 5 e 9. .... | 120 |

### **Apêndice III**

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela III.1 – Dados das Barras. ....                            | 138 |
| Tabela III.2 – Dados das Linhas de Transmissão. ....             | 139 |
| Tabela III.3 – Dados dos Geradores. ....                         | 139 |
| Tabela III.4 – Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão. .... | 139 |

### **Apêndice IV**

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela IV.1 – Dados dos Geradores. ....                         | 140 |
| Tabela IV.2 – Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão. .... | 141 |
| Tabela IV.3 – Dados das Linhas de Transmissão. ....             | 141 |
| Tabela IV.4 – Dados das Barras. ....                            | 143 |

## **Lista de Símbolos e Abreviaturas**

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN – Sistema Interligado Nacional

RAT – Regulador Automático de Tensão

MHP – Modelo de Heffron & Phillips

MSP – Modelo de Sensibilidade de Potência

PSS – Power System Stabilizer

AC – Corrente Alternada

GTO – Gate Turn-Off Thyristor

TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor

SVC – Static Var Compensator

PS – Phase Shifter (Transformador defasador)

STATCOM – Static Synchronous Compensator

SSSC – Static Synchronous Series Compensator

UPFC – Unified Power Flow Controller

IPFC – Interline Power Flow Controller

SVS – Synchronous Voltage Source

POD – Power Oscillation Damping

VSC – Voltage Source Converter

REF – Referência Adotada para o Sistema Elétrico

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SSSC/POD – Dispositivo SSSC com controlador POD acoplado

L.T. – Linha de Transmissão

$A_{\text{POD}}$  – Matriz composta por variáveis de estado, formada pelos parâmetros do POD

$A_{\text{PSS}}$  – Matriz composta por variáveis de estado, formada pelos parâmetros do PSS

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

$A1_{km}, A2_{km}, A3_{km}$  – Coeficientes de sensibilidade da potência ativa da L.T. k-m

$A1_{ij}, A2_{ij}, A3_{ij}, A4_{ij}$  – Coeficientes de sensibilidade da potência ativa da L.T. i – j com SSSC

$B1_s, B2_s$  – Matrizes de entrada do MSP com SSSC

$D_k$  – Coeficiente de amortecimento inerente do gerador k

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

$E_{fdk}$  – Tensão no enrolamento de campo do gerador k

$E'_{dk}$  – Tensão interna em eixo direto 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

$I_{ij}$  – Corrente elétrica que flui pela linha de transmissão com o SSSC

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

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

$J_{\text{POD}}$  – Matriz que relaciona os parâmetros do POD com ângulos e tensões do sistema

$J_{\text{PSS}}$  – Matriz que relaciona os parâmetros do PSS com ângulos e tensões do sistema

$J1_{\text{POD}}, J2_{\text{POD}}, J3_{\text{POD}}, B1_{\text{POD}}, B2_{\text{POD}}$  – Matrizes do MSP com SSSC

$J1_{\text{PSS}}, J2_{\text{PSS}}, B1_{\text{PSS}}$  – Matrizes do MSP com SSSC

$K_{Ak}, K_{Vk}$  – Coeficientes da reação de armadura do gerador k no MSP

$K_{\text{SSSC}}$  – Ganho do controlador POD

$K_{\text{PSS}}$  – Ganho do controlador PSS

$K_{rk}$  – Ganho do RAT

$M_k = 2H_k$  – Constante de Inércia do gerador k

$P_{Gk}$  – Potência ativa gerada pelo gerador k

$P_{ki}$  – Fator de participação de uma variável k relacionada a um modo oscilante i

$P_{km}$  – Fluxo de potência ativa entre as barras k e m

$P_{Lk}$  – Carga ativa da barra k

$P_{Meck}$  – Potencia mecânica de entrada do gerador k

$Q_{Gk}$  – Potência reativa gerada pelo gerador k

$Q_{km}$  – Fluxo de potência reativa entre as barras k e m

$Q_{Lk}$  – Carga reativa da barra k

$R1_{Gk}, R2_{Gk}, R3_{Gk}$  – Coeficientes de potência reativa do gerador k

$R1_{km}, R2_{km}, R3_{km}$  – Coeficientes de potência reativa da linha de transmissão k-m

$R1_{ij}, R2_{ij}, R3_{ij}, R4_{ij}$  – Coeficientes de sensibilidade da potência reativa da L.T. i – j com SSSC

$R_{ijk}$  – Resíduo associado ao modo k devido entrada i e saída j

$R_{km}$  – Resistência da linha de transmissão entre as barras k e m

$S_{km}$  – Potência complexa que sai da barra k em direção a barra 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

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

$T_w$  – 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

$V_k$  – Magnitude da tensão da barra k

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

$V_q$  – Componente da tensão inserida pelo SSSC 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

$VS$  – Vetor contendo os coeficientes de sensibilidade do SSSC

$VS_1, VS_2$  – Vetor contendo os coeficientes do SSSC e os parâmetros do controlador

$\tilde{V}_S$  – Fasor tensão série inserida pelo SSSC

$V_{S0}$  – Tensão de referência do SSSC

$V_{Sup}$  – Tensão suplementar da saída do PSS, inserida no sistema de excitação do gerador

$\tilde{x}$  – Fasor da variável x

$X_C$  – Reatância indutiva do transformador de acoplamento do SSSC

$x_{dk}$  – 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

$Z_T$  – Impedância Total da linha de transmissão entre as barras i e j considerando a reatância indutiva do transformador de acoplamento do SSSC

$\Delta X'_1, \Delta X'_2, \Delta X'_{POD}$  – Variáveis definidas para equacionamento do POD

$\alpha$  – Ângulo da tensão série do SSSC

$\delta_k$  – Ângulo interno do gerador k

$\theta_k$  – Ângulo da tensão da barra k

$\theta_{km}$  – Diferença entre os ângulos das tensões da barra k e m ( $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ )

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

$\omega_k$  – Velocidade Angular do gerador k

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

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

$\lambda$  – Autovalor

$\xi$  – Amortecimento relacionado a uma oscilação

$\varphi$  – Ângulo da corrente em relação a referência do sistema elétrico

$\varphi_{ki}$  – Autovetor esquerdo relacionado ao modo oscilatório i em relação a variável k

$\psi_{ik}$  – Autovetor direito relacionado a variável de estado k em relação ao modo oscilatório i

$\dot{X}$  – Representa a derivada da variável X  $\left( \dot{X} = \frac{dX}{dt} \right)$

$\Delta$  – 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

|                                                                        | Página |
|------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>1. Introdução.</b>                                                  | 20     |
| 1.1. Organização do Trabalho.                                          | 24     |
| <b>2. Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) Multimáquinas.</b>     | 26     |
| 2.1. Introdução.                                                       | 26     |
| 2.2. Equações Gerais do MSP para Sistemas Multimáquinas.               | 26     |
| 2.3. Potências Geradas e Fluxos de Potências no Sistema Multimáquinas. | 29     |
| 2.4. Balanço Nodal de Potências no Sistema Multimáquinas.              | 32     |
| 2.5. Tensão Interna do Gerador Síncrono.                               | 33     |
| 2.6. Tensão de Campo do Gerador Síncrono.                              | 35     |
| 2.7. Equações de Movimento do Gerador Síncrono.                        | 36     |
| 2.8. Representações do Sistema Multimáquinas pelo MSP.                 | 37     |
| 2.9. Conclusões.                                                       | 41     |
| <b>3. Inclusão do SSSC no Modelo de Sensibilidade de Potência.</b>     | 43     |
| 3.1. Introdução.                                                       | 43     |
| 3.2. Dispositivos FACTS.                                               | 43     |
| 3.3. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)                      | 45     |
| 3.4. Modelagem Matemática do SSSC.                                     | 47     |
| 3.5. Inclusão do SSSC no MSP.                                          | 54     |
| 3.6. Conclusões.                                                       | 56     |
| <b>4. Controladores Adicionais (POD e PSS).</b>                        | 58     |
| 4.1. Introdução.                                                       | 58     |
| 4.2. Controlador de Primeira Ordem.                                    | 58     |
| 4.3. Power Oscillation Damping – POD.                                  | 62     |
| 4.3.1 Inclusão do conjunto SSSC - POD no MSP.                          | 63     |
| 4.4. Power System Stabilizer – PSS.                                    | 67     |
| 4.4.1 Inclusão do PSS no MSP.                                          | 68     |
| 4.5. Parâmetros de Controle do PSS.                                    | 73     |
| 4.6. Teoria de Resíduos.                                               | 75     |
| 4.7. Conclusões.                                                       | 79     |
| <b>5. Resultados e Simulações.</b>                                     | 80     |
| 5.1. Introdução.                                                       | 80     |
| 5.2. Sistema Simétrico: 4 Geradores e 10 Barras.                       | 80     |
| 5.2.1 Sistema Simétrico – Caso Base.                                   | 81     |
| 5.2.2 Sistema Simétrico – Dispositivo PSS em Operação.                 | 84     |
| 5.2.3 Sistema Simétrico – Dispositivo SSSC em Operação.                | 87     |

|                                                                                                           |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 5.2.4 Sistema Simétrico – SSSC com Controlador de Primeira Ordem. ....                                    | 90             |
| 5.2.5 Sistema Simétrico – SSSC com Controlador POD. ....                                                  | 94             |
| 5.3. Sistema New England: 10 Geradores e 39 Barras. ....                                                  | 104            |
| 5.3.1 Sistema New England – Caso Base. ....                                                               | 104            |
| 5.3.2 Sistema New England – Dispositivo PSS em Operação. ....                                             | 108            |
| 5.3.3 Sistema New England – Dispositivo SSSC e POD em Operação. ....                                      | 112            |
| 5.3.4 Sistema New England – Dispositivos SSSC, POD e PSS em Operação. ....                                | 116            |
| 5.4. Conclusões. ....                                                                                     | 122            |
| <br><b>6. Conclusões. ....</b>                                                                            | <br><b>125</b> |
| 6.1. Sugestões para trabalhos futuros. ....                                                               | 128            |
| <br>Referências. ....                                                                                     | <br>129        |
| <br>Apêndice I. Matriz de Transformação de Coordenadas. ....                                              | <br>134        |
| <br>Apêndice II. Coeficientes de Sensibilidade de Potência para uma Linha de Transmissão com o SSSC. .... | <br>136        |
| <br>Apêndice III. Dados do Sistema Multimáquinas Simétrico (4 Geradores e 10 Barras). ....                | <br>138        |
| <br>Apêndice IV. Dados do Sistema Multimáquinas New England (10 Geradores e 39 Barras). ....              | <br>140        |
| <br>Anexo I. Artigo Aceito e Submetido. ....                                                              | <br>145        |

## 1. Introdução

A energia elétrica sempre teve um importante papel no desenvolvimento da humanidade e a partir do século passado passou a ser fundamental e indispensável para o bem estar da população mundial. Nos países em desenvolvimento há um crescente consumo de energia elétrica, seja pelo crescimento na produção industrial ou até mesmo pela ampliação do consumo doméstico.

Atualmente o governo federal brasileiro tem feito altos investimentos em infraestrutura, pelo PAC (Programa de Aceleração do Crescimento): na área de energia elétrica são trinta e três usinas termoeletricas e vinte e seis usinas hidroelétricas em obras, totalizando 15.879 MW. Além disso, 6.800 km de linhas de transmissão estão em obras [1].

Apesar dos investimentos atuais, já há algumas décadas o setor de energia elétrica opera próximo de sua capacidade limite, devido ao crescente consumo que não era acompanhado diretamente em produção. Alguns fatores que limitavam o crescimento eram os baixos investimentos e programas de preservação ambiental; esse último é um assunto muito discutido no momento e preocupa as autoridades competentes.

Formas alternativas que elevariam a capacidade de geração e transmissão são massivamente estudadas pelos profissionais que trabalham na área de sistemas de energia elétrica. Inovações tecnológicas apontam uma saída provisória, uma delas é a utilização de dispositivos FACTS. Estes equipamentos já possibilitam um aumento de transmissão de energia elétrica por uma linha de transmissão, adiando a construção de novas linhas. Fontes alternativas de geração de energia estão em intensivo planejamento e estudo, tais como aproveitamento de energia eólica, energia solar, energia das marés, geradores de fusão e até projetos inovadores de gigantescas turbinas que utilizariam o ar quente dos desertos para a geração de energia.

A geração de nada basta se a energia elétrica não for devidamente fornecida a seus mercados consumidores e aí se situa o conceito de estabilidade, que engloba os conceitos de confiabilidade e segurança, garantindo que a energia elétrica sempre será entregue em níveis adequados de tensão e frequência, independente das condições de operação do sistema. Mais especificamente em sistemas de energia elétrica, a estabilidade se refere ao comportamento do sistema após este sofrer algum tipo de perturbação, seja de pequena ou grande intensidade.

Tem-se então a divisão do estudo da estabilidade em ramos distintos: a estabilidade transitória (que estuda as primeiras oscilações do sistema após uma grande perturbação) e a estabilidade dinâmica ou mais recentemente intitulada como, estabilidade a pequenas

perturbações (que se restringe à restauração do regime permanente do sistema após a ocorrência de pequenos distúrbios) [2].

Uma perturbação é considerada pequena se as equações que descrevem o comportamento do sistema podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio estável e, desta maneira, todas as propriedades aplicáveis à análise de sistemas lineares podem ser utilizadas.

Este trabalho trata do estudo da estabilidade a pequenas perturbações, que são as que ocorrem com maior frequência durante a operação de um sistema elétrico. Dados do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) referentes ao SIN (Sistema Interligado Nacional) mostram uma ocorrência média de 1.800 perturbações por ano nos últimos anos (em 2007 foram 2.119 perturbações). Estas perturbações, mesmo sendo de pequena intensidade, podem levar o sistema à instabilidade, dependendo de suas condições de operação [3].

Um grande desafio para o estudo da estabilidade dinâmica é qual a modelagem matemática mais apropriada e confiável para a sua fiel representação. Até os anos 50 um modelo muito utilizado era o chamado “Modelo Clássico – Tensão Constante atrás de Reatância Transitória” [4,5,6]. Este modelo se mostrava muito satisfatório por permitir a avaliação do coeficiente de sincronização do gerador, já que nesta época o amortecimento das oscilações do sistema elétrico não era um fator crítico.

Com o desenvolvimento industrial que permitiu a construção de sistemas elétricos interligados surgiram também oscilações eletromecânicas de baixa frequência fracamente amortecidas ou até mesmo instáveis (não amortecidas). Estas oscilações são originadas da interação das oscilações dos rotores de inúmeras máquinas do sistema elétrico.

Os modos de oscilação eletromecânicos podem ser classificados segundo sua frequência: os modos interárea de oscilação têm frequência natural não amortecidas na faixa de 0,2 a 0,7 Hz sendo caracterizado por oscilações eletromecânicas de um grupo de geradores atuando contra outro grupo de geradores em outra área do sistema, já os modos locais abrangem as frequências entre 0,7 a 2,0 Hz, característica de um gerador (ou grupo de geradores) atuando contra outro gerador em sua proximidade (ou contra o restante do sistema) [4,5,6,7,8,18].

A partir de então se percebeu que em alguns casos, mesmo na ocorrência de grandes perturbações, os sistemas elétricos não perdiam a estabilidade na primeira oscilação e sim após um intervalo de tempo. Neste caso a instabilidade ocorria na forma de oscilações de amplitudes crescentes e era constatada depois de alguns segundos ou até mesmo minutos após a ocorrência da perturbação.

Um fator que contribuiu para o surgimento dessas oscilações foi a utilização dos reguladores automáticos de tensão nos geradores síncronos, que vieram para substituir os reguladores anteriores que eram rotativos e de lenta atuação. Em situações de carga plena, esses reguladores eletrônicos aumentavam o coeficiente de sincronização dos geradores, mas ao mesmo tempo causavam um impacto negativo ao amortecimento do sistema.

No final da década de 60, as análises realizadas por De Mello e Concordia [8] esclareceram como os reguladores automáticos de tensão afetavam prejudicialmente a estabilidade dos sistemas elétricos. Para a realização destes estudos, foi considerado o modelo linearizado de Heffron-Phillips (MHP) [8,15], que considera um gerador síncrono conectado a uma barra infinita através de uma impedância externa, a qual representa a linha de transmissão (sistema de transmissão externo). Uma barra infinita é caracterizada por possuir tensão e frequência constantes, ou seja, qualquer perturbação na máquina geradora não causará distúrbios na barra infinita [9].

Em seus estudos DeMello e Concordia levaram em consideração os conceitos de torque sincronizante (torque elétrico em fase com as variações angulares do rotor) e torque de amortecimento (torque elétrico em fase com as variações da velocidade do rotor), para esclarecer os efeitos dos reguladores automáticos de tensão.

O bom desempenho do MHP motivou os pesquisadores a tentarem a sua ampliação para sistemas multimáquinas, para assim representar as interações entre as diversas unidades geradoras do sistema elétrico, bem como da malha de transmissão e controladores [10].

Mesmo com o seu bom desempenho na análise da estabilidade a pequenas perturbações, o MHP apresenta restrições, seja pela exigência de uma referência angular para o sistema elétrico, seja pela redução do sistema de transmissão às barras onde estão conectados os geradores.

Para tentar superar as limitações do MHP, Deckmann e da Costa propuseram um modelo alternativo, baseado em fatores (ou coeficientes) de sensibilidade de potências ativa e reativa no então denominado “Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP)” [11].

Esse modelo, especialmente desenvolvido para simulação e análise da dinâmica de baixa frequência, tem como característica inerente a sua extensão a sistemas multimáquinas, além de outras importantes vantagens com relação ao MHP.

Uma dessas vantagens é a decomposição entre subsistemas ativo e reativo, que permite separar as respostas do sistema elétrico às solicitações de potência ativa e potência reativa. Outra vantagem é a decomposição temporal entre as variáveis de estado (de natureza lenta) e as variáveis algébricas (de natureza rápida).

O MSP apresenta uma grande facilidade de extensão a sistemas multimáquinas por preservar todas as barras do sistema de transmissão, fator este que também facilita a inclusão de novos dispositivos ao modelo, tais como FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) e PSS (Power System Stabilizers).

Devido ao seu grande potencial, o MSP vem sendo empregado na análise de estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas, como uma alternativa ao MHP.

Nos trabalhos desenvolvidos por DeMello e Concórdia eles propuseram à utilização de sinais estabilizantes suplementares na busca de acrescentar torque de amortecimento às oscilações do rotor da máquina síncrona, utilizando os chamados PSS [8]. Em muitos casos esta é uma solução versátil e relativamente barata, mas considerando sistemas multimáquinas, o PSS geralmente acresce torque de amortecimento as oscilações de modo local, não mostrando significativa contribuição as oscilações de modo interárea.

Com o grande avanço da eletrônica de potência, principalmente a de alta potência, tornou-se possível a aplicação de dispositivos nas linhas de transmissão que controlassem o fluxo de potência passante, podendo assim direcionar o fluxo de energia para regiões de baixo carregamento, aliviando os sistemas de transmissão considerados “fracos”. Surgiu então o conceito de controle de fluxo de potência em sistemas de energia, ou então, de dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems), que foram desenvolvidos como objetivo inicial de aumentar a capacidade de transmissão e controlar o fluxo de potência em uma rede, aumentando assim os limites operacionais e de estabilidade [12].

Com a introdução dos dispositivos FACTS nos sistemas de potência, a estabilidade ganhou mais graus de liberdade. Frente a grandes perturbações (estabilidade transitória) estes dispositivos podem chavear grandes capacitores facilitando o transporte de grandes blocos de energia, e nos estudos da estabilidade a pequenas perturbações, os FACTS podem adicionar amortecimento às oscilações pela modulação de pequenos capacitores ligados a linha de transmissão [12]. Estes benefícios não são conquistados com a instalação de PSS, pois atua no sistema de excitação dos geradores.

Há duas formas distintas de concepção dos controladores FACTS, ambos capazes de eliminar os problemas de transmissão. Os da primeira geração utilizam chaves tiristoras para aplicar cotas de potência reativa, a segunda geração aplica semicondutores auto-comutados como, por exemplo, o GTO (Gate Turn-Off).

São da primeira geração os dispositivos FACTS como o TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), SVC (Static Var Compensator) e o PS (Phase-Shifter) ambos se utilizam de

chaves tiristoras para controle de potência reativa provida de bancos de capacitores ou indutores [13,36]. Da segunda geração têm-se o STATCOM (Static Synchronous Compensator), o SSSC (Static Synchronous Series Compensator), o UPFC (Unified Power Flow Controller) e o IPFC (Interline Power Flow Controller) [13,14]. Estes dispositivos são capazes de trocar potência ativa e reativa com o sistema de potência, através de fontes internas de tensão síncrona (SVS – do inglês Synchronous Voltage Source) com amplitude e ângulo controlados por semicondutores auto-comutados.

Este trabalho dará enfoque ao FACTS do tipo SSSC para sua aplicação em sistemas multimáquinas, fazendo o estudo da sua contribuição no sistema elétrico, principalmente buscando a estabilidade em sistemas inicialmente instáveis.

Para o estudo da estabilidade será utilizado do Modelo de sensibilidade de Potência (MSP) expandido a sistemas Multimáquinas, pois este modelo preserva o equacionamento do sistema de transmissão, ao contrario do modelo linearizado de Heffron-Phillips que considera uma redução do sistema de transmissão.

Para aprimorar a atuação do SSSC são propostos dois controladores (controlador de primeira ordem e POD – Power Oscillation Damping) que atuarão na variável de controle do SSSC ( $\tilde{V}_s$ ) para fornecer amortecimento ao modo oscilatório crítico e, para que isso ocorra, os controladores devem estar bem localizados e seus parâmetros devidamente ajustados.

Também serão avaliados os controladores PSS, primeira solução proposta para o amortecimento das oscilações de baixa frequência.

A localização do FACTS será realizada pela análise dos resíduos da função de transferência de malha aberta, enquanto que os parâmetros dos controladores POD e PSS serão projetados pela teoria de controle clássico, utilizando o método de compensação de fase.

## 1.1. Organização do Trabalho

Para facilidade de leitura e compreensão dos estudos desenvolvidos neste trabalho está dividido em Capítulos sendo que no Capítulo 2 são mostradas as equações do MSP multimáquinas, bem como suas realizações no domínio do tempo e no domínio da frequência.

No Capítulo 3 é realizada uma breve apresentação dos FACTS, e a modelagem do FACTS SSSC para sua devida inclusão nas equações desenvolvidas no Capítulo 2.

Os controladores são desenvolvidos no Capítulo 4, suas equações dinâmicas são obtidas e incluídas ao modelo desenvolvido no Capítulo 3. Atenção especial é dada ao POD

por ser capaz de agregar ao modo oscilatório grande taxa de amortecimento. Ainda no Capítulo 4, o PSS é apresentado e incluído ao modelo do SSSC com POD para a obtenção de um modelo completo onde PSS atue em conjunto com o SSSC controlado pelo POD.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação de resultados obtidos para dois sistemas testes: um sistema que será chamado de “Sistema Simétrico” e um de maior porte conhecido como “Sistema New England”. São obtidos os valores dos resíduos para estabelecer qual a melhor localização do FACTS e realizados os ajustes dos parâmetros dos controladores POD e PSS. As simulações são realizadas por programa computacional implementado via software *MatLab*<sup>®</sup> onde são utilizadas as equações deduzidas nos Capítulos 2, 3 e 4.

A partir dos resultados obtidos é realizada uma análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência. Esta análise é efetuada nos domínios do tempo (através de curvas de respostas a distúrbios) e da frequência (através dos autovalores da matriz de estado).

Seguem as principais conclusões (Capítulo 6), as Referências Bibliográficas, os Apêndices e Anexo, necessários para uma melhor compreensão do trabalho.

## 2. Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) Multimáquinas

### 2.1. Introdução

O equacionamento do Modelo de Sensibilidade de Potência no ambiente multimáquinas é desenvolvido neste Capítulo. Basicamente o modelo MSP trata do balanço nodal de potências ativa e reativa em cada barra do sistema, em qualquer processo dinâmico. O modelo resultante é linear e consequentemente, pode ser utilizado para a análise da estabilidade a pequenas perturbações [11].

### 2.2. Equações Gerais do MSP para Sistemas Multimáquinas

Nesta modelagem será considerado um gerador síncrono trifásico representado pelos enrolamentos do estator (enrolamentos das fases a, b e c) e também um enrolamento do rotor (o enrolamento de campo – fd), conforme o esquema mostrado na Figura 2.1, para um gerador de dois pólos. Os efeitos dos enrolamentos amortecedores não serão considerados.

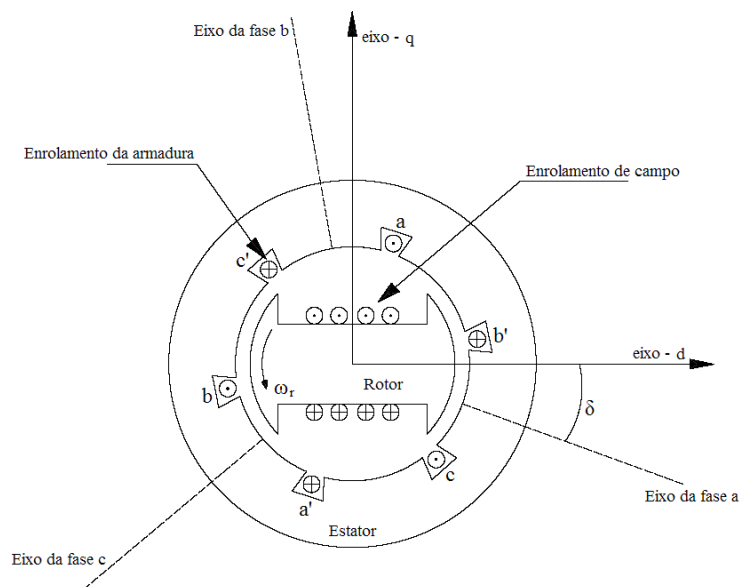


Figura 2.1 – Enrolamentos do Gerador Síncrono Trifásico – 2 Pólos.

Os enrolamentos do estator não se movimentam e suas grandezas são medidas no sistema de coordenadas fixo (r,m). O enrolamento de campo localizado sobre o rotor se move com uma velocidade angular  $\omega$  e suas grandezas são medidas no sistema de coordenadas (d,q)

que gira junto com o rotor. Têm-se, portanto, dois sistemas de coordenadas atuando ao mesmo tempo e, para facilidade de manipulação de equações, será realizada uma transformação de coordenadas baseada na Transformação de Park [4].

Esta transformação de coordenadas, realizada através da matriz  $T$  (equação (2.1)), cuja dedução se encontra no Apêndice I, permite referir as grandezas do sistema de coordenadas fixo ( $r,m$ ) ao sistema de coordenadas rotativo ( $d,q$ ) e vice-versa.

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

Na equação (2.1)  $\delta_k$  é o ângulo interno do gerador conectado a uma barra  $k$  do sistema elétrico de potência, conforme diagrama mostrado na Figura 2.2.

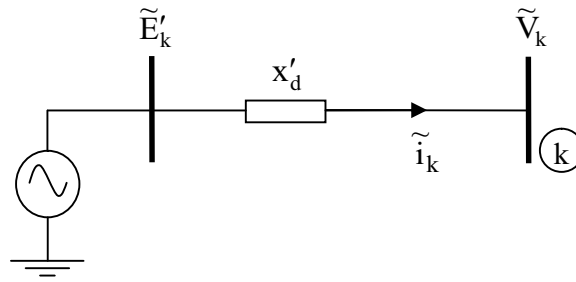


Figura 2.2 – Diagrama Unifilar do Gerador Síncrono.

No diagrama da Figura 2.2  $\tilde{E}'_k$  é a tensão interna do gerador  $k$ ,  $x'_{dk}$  a reatância transitória de eixo direto do gerador  $k$ ,  $\tilde{V}_k$  a tensão terminal da barra contendo o gerador  $k$  e  $\tilde{i}_k$  é a corrente terminal do gerador  $k$ .

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

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

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

De acordo com [4,5] 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) faz-se uma mudança de coordenadas, expressando convenientemente a tensão terminal em componentes de eixo direto e em quadratura, cujo resultado é mostrado na equação (2.5).

$$\begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{aligned} V_{dk} &= V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \\ V_{qk} &= V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \end{aligned} \quad (2.5)$$

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 de quadratura respectivamente, pelas equações (2.6) e (2.7).

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

$$\begin{aligned} 0 &= V_{dk} - x_{qk} I_{qk} \\ E_{ak} &= V_{qk} - x_{qk} I_{dk} \end{aligned} \quad (2.7)$$

A partir das equações (2.5), (2.6) e (2.7), pode-se escrever as equações (2.8) e (2.9).

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

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

As componentes de eixo direto e de eixo em quadratura da corrente terminal do gerador síncrono  $k$  são obtidas pela manipulação das equações (2.8) e (2.9), como mostradas nas equações (2.10) e (2.11).

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

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

As equações (2.8) a (2.11) são equações básicas para o desenvolvimento do MSP.

### 2.3. Potências Geradas e Fluxos de Potências no Sistema Multimáquinas

Para a dedução das equações das potências envolvidas no sistema multimáquinas, considere a Figura 2.3, onde uma barra de geração genérica  $k$  é conectada a outras duas barras  $m$  e  $l$ , através de linhas de transmissão de impedâncias  $Z_{km} = R_{km} + jX_{km}$  e  $Z_{kl} = R_{kl} + jX_{kl}$  respectivamente.

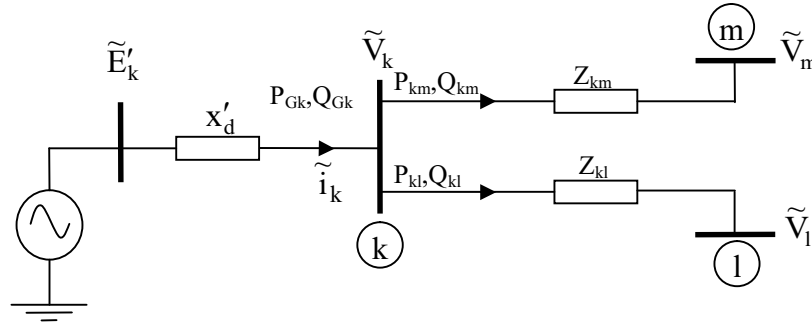


Figura 2.3 – Potências no Sistema Multimáquinas.

Na Figura 2.3,  $P_{Gk}$  e  $Q_{Gk}$  são as potências ativa e reativa geradas pela máquina  $k$  e injetadas na barra  $k$ ,  $P_{km}$  e  $Q_{km}$  são as potências ativa e reativa transmitidas da barra  $k$  para a barra  $m$  e  $P_{kl}$  e  $Q_{kl}$  são as potências ativa e reativa transmitidas da barra  $k$  para a barra  $l$ .

As potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador  $k$  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 (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, as equações (2.13) e (2.14) podem ser linearizadas utilizando da expansão de Taylor desconsiderando os termos de ordem maior e igual a dois, como mostrado nas 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 sensibilidade de potência ativa do gerador k”, enquanto os termos  $R1_{Gk}$ ,  $R2_{Gk}$  e  $R3_{Gk}$  são os “coeficientes de sensibilidade de potência reativa do gerador k”.

Para obtenção dos coeficientes de sensibilidade do sistema de potência externo, considere a linha de transmissão responsável pela ligação entre as barras k e m do sistema multimáquinas (Figura 2.3), cuja impedância é  $Z_{km}$  e, para fins de simplificação, será utilizada sua admitância conforme a equação (2.17).

$$Y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} = \frac{R_{km}}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} - j \frac{X_{km}}{(R_{km}^2 + X_{km}^2)} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.17)$$

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

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

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

Da manipulação das equações (2.18) e (2.19) são obtidos os fluxos de potências ativa e reativa da barra k para a barra m, (equações (2.20) e (2.21), respectivamente).

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.20)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 b_{km} + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.21)$$

Para pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, as equações (2.20) e (2.21) podem ser linearizadas via Taylor, resultando nas equações (2.22) e (2.23), respectivamente.

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

$$A1_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial (\theta_{km})} \right) = V_k V_m g_{km} \sin \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} \quad (2.22.a)$$

$$A2_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial (V_k)} \right) = 2V_k g_{km} - V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_m b_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.22.b)$$

$$A3_{km} = \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial (V_m)} \right) = -V_k g_{km} \cos \theta_{km} - V_k b_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.22.c)$$

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

$$R1_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial (\theta_{km})} \right) = -V_k V_m b_{km} \sin \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} \quad (2.23.a)$$

$$R2_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial (V_k)} \right) = -2V_k (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_m g_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.23.b)$$

$$R3_{km} = \left( \frac{\partial Q_{km}}{\partial (V_m)} \right) = V_k b_{km} \cos \theta_{km} - V_k g_{km} \sin \theta_{km} \quad (2.23.c)$$

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

## 2.4. Balanço Nodal de Potências no Sistema Multimáquinas

O MSP tem como conceito fundamental a aplicação do balanço de potências ativa e reativa em cada barra do sistema [11], mesmo que na sua forma incremental.

Considerando uma barra genérica k, conectada a outras duas barras l e m do sistema elétrico (conforme Figura 2.3), 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 linhas de transmissão k-m e k-l.

Para a generalização deste conceito, considere o conjunto de todas as barras conectadas à barra k, denominado  $\Omega_k$ . Para maior generalização considere ainda que na barra k está conectada uma carga que consome (na sua forma incremental) as potências  $\Delta P_{Lk}$  e  $\Delta Q_{Lk}$ .

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 salientar 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. Esta igualdade de potências deve ser satisfeita no decorrer de qualquer processo do sistema elétrico de potência.

## 2.5. Tensão Interna do Gerador Síncrono

As variações da tensão interna do gerador síncrono 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 [4,5,6].

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

Admitindo pequenas perturbações em torno do ponto de equilíbrio, a equação (2.26) pode ser linearizada e considerando apenas o termo de ordem um, tem-se as equações (2.27).

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

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

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

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

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, mostrada na 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)).

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

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

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

No modelo de sensibilidade de potência, os coeficientes  $K_{V_k}$  e  $K_{A_k}$  são denominados

de “coeficientes de reação de armadura do gerador síncrono k”.

Vale a pena comentar que a reação de armadura no MSP 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 ( $\theta_k$ ), diferentemente do MHP onde a reação de armadura é associada somente às variações de  $\delta_k$  e é ponderada pelo termo  $k_4$  [8,15]. Portanto, o MSP fornece maiores informações a respeito da reação de armadura do gerador síncrono que o MHP [11,16].

## 2.6. Tensão de Campo do Gerador Síncrono

Neste trabalho o controle da tensão terminal do gerador síncrono, pela variação de sua tensão de campo será realizado por um sistema de excitação (chamado comumente de Regulador Automático de Tensão - RAT). O RAT tem como função regular a tensão de excitação da máquina síncrona ( $E_{fdk}$ ), de acordo com as variações da tensão terminal ( $V_k$ ) em relação a uma tensão de referência especificada ( $V_{refk}$ ), conforme Figura 2.4.

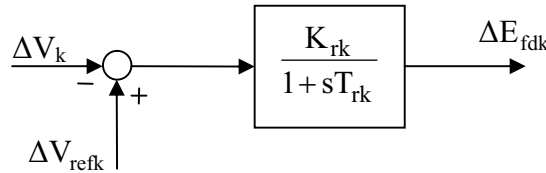


Figura 2.4 – Sistema de Excitação (Regulador Automático de Tensão) do Gerador Síncrono.

Dentre os vários modelos para o regulador automático de tensão, aqui será considerado um de primeira ordem (regular estático - rápido), representado por um ganho  $K_{rk}$  e por uma constante de tempo  $T_{rk}$ , muito utilizado em estudos da estabilidade a pequenas perturbações [4,5,6,8].

Por inspeção do diagrama da Figura 2.4, podem ser escritas as expressões 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 do Gerador Síncrono

O comportamento das grandezas mecânicas de uma máquina síncrona em função das grandezas elétricas, é obtido a partir da equação de balanço (swing) do gerador síncrono, representada na equação (2.33) [4,5,6,8].

$$M_k \frac{\partial^2 \delta_k}{\partial t^2} = P_{Meck} - P_{Gk} - D_k \frac{\partial \delta_k}{\partial t} \quad (2.33)$$

A partir da equação de oscilação do gerador síncrono (equação diferencial de grau dois, que pode ser decomposta em duas equações diferenciais de grau um), as variações do ângulo interno ( $\Delta \delta_k$ ) e as variações da velocidade angular do rotor ( $\Delta \omega_k$ ), linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio, são dadas nas equações (2.34) e (2.35).

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} (\Delta P_{Meck} - \Delta P_{Gk} - D_k \Delta \omega_k) \quad (2.34)$$

$$\Delta \dot{\delta}_k = \omega_0 \Delta \omega_k \quad (2.35)$$

Nas equações (2.34) e (2.35),  $\omega_0$  é a velocidade síncrona (377 rad/s),  $M_k (= 2H_k)$  é a constante de inércia da máquina síncrona e  $D_k$  é o coeficiente de amortecimento inerente do sistema.

Este coeficiente é normalmente designado por “coeficiente de torque de amortecimento do laço eletromecânico” [8,16] e expressa as componentes de torques contrários às oscilações do rotor e aceleração do gerador síncrono. Estes torques se referem a diversos fatores existentes no sistema elétrico de potência como a inércia das cargas, as perdas do sistema de transmissão e do sistema de distribuição, além de possíveis atritos não considerados [4,5,6].

## 2.8. Representações do Sistema Multimáquinas pelo MSP

O conjunto de equações algébricas (2.24) e (2.25) e diferenciais (2.29), (2.32), (2.34) e (2.35) permitem representar o sistema multimáquinas através do MSP. 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.

A representação no domínio do tempo do sistema eléctrico de potência multimáquinas por meio do Modelo de Sensibilidade de Potência é mostrada nas equações (2.36) [17] e observe que esta representação é constituída por variáveis de estado e algébricas.

Nesta equação  $\Delta x$  é o vetor de variáveis de estado,  $\Delta z$  é o vetor de variáveis algébricas e  $\Delta u$  o vetor de entradas. “A” é a matriz de estados e “B” a matriz de entradas (matriz que definirá a controlabilidade do sistema multimáquinas).

$$\dot{\Delta x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.36)$$

$$\Delta x = [[\Delta \omega_1 \dots \Delta \omega_{ng}] [\Delta \delta_1 \dots \Delta \delta_{ng}] [\Delta E'_{q1} \dots \Delta E'_{qng}] [\Delta E_{fd1} \dots \Delta E_{fdng}]]^t \quad (2.36.a)$$

$$\Delta u = [[\Delta P_{Mec1} \dots \Delta P_{Mecng}] [\Delta V_{ref1} \dots \Delta V_{refng}] [\Delta P_{L1} \dots \Delta P_{Lnb}] [\Delta Q_{L1} \dots \Delta Q_{Lnb}]]^t \quad (2.36.b)$$

$$\Delta z = [[\Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_{nb}] [\Delta V_1 \dots \Delta V_{nb}]]^t \quad (2.36.c)$$

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

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

$$[\omega_0] = \begin{bmatrix} \omega_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_0 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \omega_0 \end{bmatrix}_{ng \times ng} \quad (2.36.f)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Com as equações (2.36), podem ser obtidas as equações diferenciais e algébricas do Modelo de Sensibilidade de Potência e suas subdivisões são mostradas nas equações (2.37) e (2.38).

$$\begin{bmatrix} [\Delta \dot{\omega}] \\ [\Delta \dot{\delta}] \\ [\Delta \dot{E}'_q] \\ [\Delta \dot{E}_{fd}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[D][M]^{-1} & -[A1_G][M]^{-1} & -[A2_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} \\ [\omega_0] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & -[K_A][T'_{do}]^{-1} & -[x_d][x'_d]^{-1}[T'_{do}]^{-1} & [T'_{do}]^{-1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -[T'_r]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} [A1_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[A3_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [K_A][T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} & [K_V][T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \quad (2.37) \\ + \begin{bmatrix} [M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & [A2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} [J4_1] & [J4_2] \\ [J4_3] & [J4_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [diag(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [diag(-1)]_{nb \times nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \end{bmatrix} \quad (2.38)
\end{aligned}$$

A matriz J4 que aparece na representação descrita pela equação matricial (2.38), possui formação semelhante à matriz Jacobiana do fluxo de potência. O conjunto de equações (2.39) mostra a lei de formação de cada sub-matriz 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).

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

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).

$$\Delta \dot{x} = (J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3) \Delta x + (B_1 - J_2 J_4^{-1} B_2) \Delta u \quad (2.41)$$

Na equação (2.41), a matriz de estados “A” (ou matriz de planta) será dada por  $(J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3)$  e a matriz de entradas “B” é dada por  $(B_1 - J_2 J_4^{-1} B_2)$ .

Estes dois resultados permitem escrever a equação (2.42) que fornece o Modelo de Sensibilidade de Potência representado na forma de espaço de estados.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.42)$$

A aplicação da Transformada de Laplace nas equações algébricas (2.24) e (2.25) e diferenciais (2.29), (2.32), (2.34) e (2.35), permitem a representação do MSP para sistemas multimáquinas no domínio da frequência, cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 2.5 (apenas para um gerador genérico k).

A representação no domínio da frequência do sistema multimáquinas pelo MSP (diagrama de blocos) permite ver a separação em um subsistema ativo e outro subsistema reativo (delimitados pela linha vertical). À esquerda da linha, um subsistema referente às potências ativas envolvidas (subsistema ativo –  $\Delta P_k, A_{Gk}, A_{km}$ ), e à direita um subsistema reativo (referente às potências reativas envolvidas –  $\Delta Q_k, R_{Gk}, R_{km}$ ).

O diagrama também é separado por uma linha horizontal que o divide em um subsistema lento (na parte superior) composto de variáveis de estado de lenta variação ( $\Delta \delta_k, \Delta E_{fdk}, \Delta E'_{qk}$ ) e em um subsistema rápido (representado na parte inferior), constituído de variáveis algébricas de rápida variação ( $\Delta V_k, \Delta \theta_k$ ) [11].

## 2.9. Conclusões

Neste Capítulo apresentou-se o Modelo de Sensibilidade de Potência de um sistema multimáquinas que pode ser utilizado no estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência.

O modelo se baseia no balanço de energia em todas as barras do sistema e, a partir disso, as variações das potências injetadas em uma barra são comparadas às potências que fluem desta mesma barra. O modelo resultante é composto de equações diferenciais e equações algébricas.

Obtidos os conjuntos de equações do MSP, foi possível realizar sua representação no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Estas representações serão utilizadas posteriormente para a inclusão dos dispositivos FACTS e seus controladores.

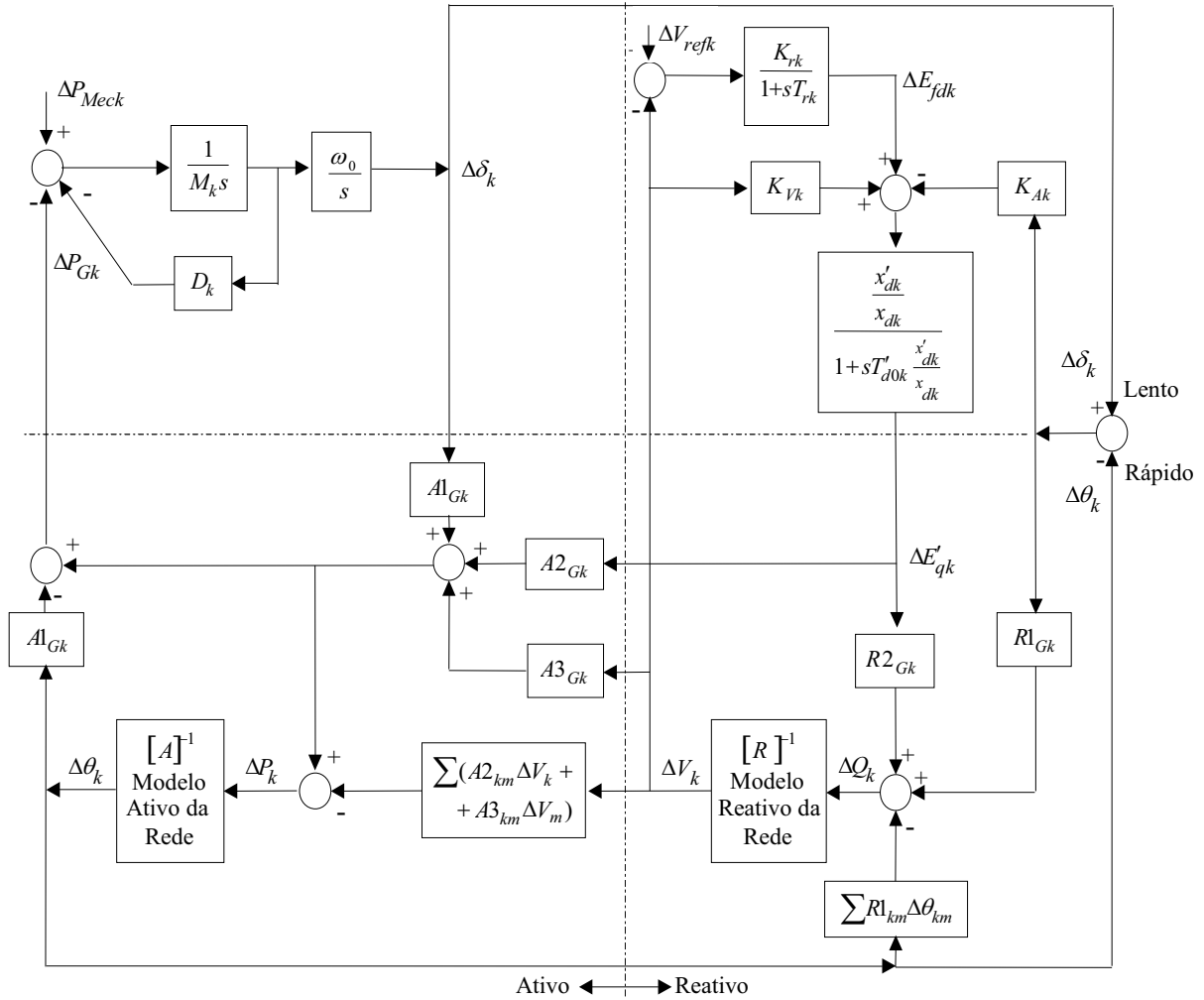


Figura 2.5 – Diagrama de Blocos: MSP para Sistemas Multimáquinas.

### **3. Inclusão do SSSC no Modelo de Sensibilidade de Potência**

#### **3.1. Introdução**

Neste Capítulo será feito um breve resumo sobre a aplicação dos dispositivos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) em sistemas de energia elétrica. Em seguida é feita a apresentação do dispositivo SSSC (Static Synchronous Series Compensator) e sua modelagem para a inclusão no MSP multimáquinas.

#### **3.2. Dispositivos FACTS**

Há uma necessidade crescente de ampliação no setor energético nos países em desenvolvimento e, no Brasil, esse cenário não é diferente. Ao se analisar as últimas cinco décadas houve um expressivo aumento no consumo de energia elétrica devido à revolução industrial e consequente aumento no consumo residencial.

As soluções encontradas na época para a pequena disponibilidade de energia elétrica foram a construção de novas usinas geradoras e a construção de novas linhas de transmissão. Estas consistem em soluções efetivas, mas de elevado custo, que na época contavam com apoio político e poucas restrições ambientais.

A ampliação da geração e transmissão de energia elétrica atualmente encontra restrições na legislação de preservação ambiental, que dificultam a construção de novas usinas e linhas de transmissão, fatores estes que exigem minuciosos estudos e planejamento. As dificuldades impostas pela conjunção deste e outros fatores obrigam cada vez mais que os sistemas de energia operem próximos de seus limites térmicos e de estabilidade.

Na busca de aprimorar os sistemas de energia elétrica já existentes, estudiosos da área realizam inúmeros trabalhos com propostas que visam o aumento da geração e transmissão de energia elétrica. Na década de 60 De Mello e Concórdia [8] propuseram a introdução de sinais estabilizantes com a utilização de PSS [18], para acréscimo do torque de amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência dos geradores, aumentando os limites de estabilidade do sistema, o que permite ao sistema elétrico suportar um considerável aumento na geração e transmissão de energia. Em 1988 Hingorani [19] propôs o uso de equipamentos da eletrônica de potência para o controle do fluxo de potência em sistemas de corrente

alternada, através de chaves eletrônicas de alta potência e com pequeno tempo de atuação, ou seja, a utilização de FACTS [12,13,14,19,24].

Através do controle das grandezas elétricas como tensão, ângulo, impedância e corrente, os dispositivos FACTS aumentam a capacidade de transmissão das redes o que contribui para a estabilidade do sistema elétrico [13,14]. Além disso, os FACTS são reconhecidos como uma alternativa eficiente para prover amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência, principalmente quando junto à malha de controle do FACTS é instalado o dispositivo POD (Power Oscillation Damping) [20,21,22,36].

Dependendo da maneira como é instalado o FACTS na linha de transmissão, ele atua diretamente nos fluxos de potências ativa e reativa. De acordo com seu posicionamento é possível sua classificação em quatro diferentes grupos [12,13,14]. Controladores série, controladores shunt (em derivação), combinação de controladores série – série e a combinação de controladores série – shunt.

Os controladores série atuam com a idéia básica de alterar a reatância série efetiva da linha de transmissão e assim efetuar o controle do fluxo de potência. O TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) atua através do chaveamento de banco de capacitores por meio de tiristores, enquanto que o SSSC (Static Synchronous Series Compensator) altera a impedância da linha de transmissão através de uma tensão série em quadratura com a corrente da linha; a magnitude desta tensão série então influenciaria diretamente a reatância série efetiva da linha de transmissão [13,23,35,37].

Os controladores shunt (ou derivação) têm sua atuação fundamentada na injeção ou absorção de potência reativa à barra a qual está conectado, por meio de banco de capacitores ou indutores variáveis e geralmente são usados para o controle da tensão desta barra. No caso do dispositivo SVC (Static Var Compensator) o controle é feito por meio de tiristores. Entretanto o STATCOM (Static Synchronous Compensator) não se utiliza de banco de capacitores ou indutores para a troca de potência reativa com o sistema, mas sim de uma fonte de tensão CC que por meio de chaves GTO (Gate Turn-Off) faz a conversão em tensão AC com a mesma frequência fundamental da linha de transmissão [13,22].

O IPFC (Interline Power Flow Controller) é um exemplo da combinação série – série e consiste de dois ou mais FACTS do tipo SSSC interligados entre si, cada um deles instalados em diferentes linhas de transmissão com controladores independentes. Esta configuração permite a troca de potência ativa entre as linhas compensadas [13]. Já o UPFC (Unified Power Flow Controller) representa a combinação série – shunt. Consiste de um dispositivo que agrupa a ação de vários controladores existentes, podendo controlar a tensão, ângulo e

reatância de uma linha de transmissão. Simplificando, o UPFC é a junção do STATCOM (shunt) com o SSSC (série) e atua a partir da inserção de uma tensão série na frequência fundamental da rede que permite ser controlada em magnitude e em ângulo. Desta maneira, o UPFC pode absorver ou injetar potências ativa e reativa ao sistema de energia elétrica [17].

Neste trabalho o enfoque principal é o SSSC e na sequência é feito um detalhamento do modo de operação deste tipo de dispositivo FACTS. Posteriormente este dispositivo será matematicamente modelado e suas equações incluídas no Modelo de Sensibilidade de Potência que foi detalhado no Capítulo 2.

### 3.3. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

O FACTS do tipo SSSC é uma fonte de tensão síncrona conectada em série na linha de transmissão, capaz de variar a impedância efetiva da linha através da injeção de uma tensão ( $\tilde{V}_s$ ) em apropriada fase em relação à corrente da linha, permitindo assim a troca de potências ativa e reativa com o sistema de transmissão. Se o ângulo estiver em fase com a corrente da linha ocorre à absorção ou injeção de potência ativa, em contrapartida, se o ângulo estiver em quadratura com a corrente da linha têm-se a injeção ou absorção de potência reativa [13,24,25,32].

Na Figura 3.1 tem-se a ilustração do SSSC conectado em série entre duas barras genéricas (i e j) do sistema elétrico por meio de um transformador de acoplamento. Nesta representação simplificada o SSSC é composto de um conversor fonte de tensão VSC (do inglês - Voltage Source Converter) que por meio de tiristores do tipo GTO (Gate Turn-Off) modulam uma tensão em corrente contínua proveniente de uma fonte externa (independente da linha de transmissão). Como resultado tem-se uma tensão AC injetada em série na linha de transmissão e de mesma frequência fundamental [13,24,32].

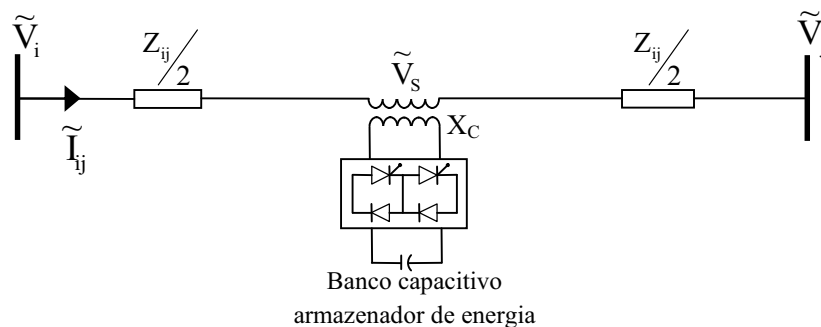


Figura 3.1 – Representação do Dispositivo FACTS SSSC.

Para que o SSSC possa trocar potência ativa com a rede é necessária a instalação de um sistema para suprimento de energia mais robusto, em substituição ao banco capacitivo, tornando assim o SSSC hábil a compensar a resistência da linha de transmissão [13,24,25,32].

Se considerado com uma fonte externa com capacidade suficiente de controlar a potência ativa da rede, o SSSC poderá controlar, além da magnitude da tensão de saída AC, também seu ângulo de defasagem em relação à corrente da linha.

Desse modo o SSSC pode operar dentro dos quatro quadrantes mostrados na Figura 3.2 [24], onde a tensão de saída AC do SSSC é representada pelo fasor  $\tilde{V}_s$  que pode ser decomposto como na equação (3.1) onde  $V_p$  representa a tensão de saída do SSSC em fase com a corrente da linha e  $V_q$  a tensão em quadratura com a corrente da linha, podendo estar adiantada ou atrasada.

$$\tilde{V}_s = V_p + j V_q \quad (3.1)$$

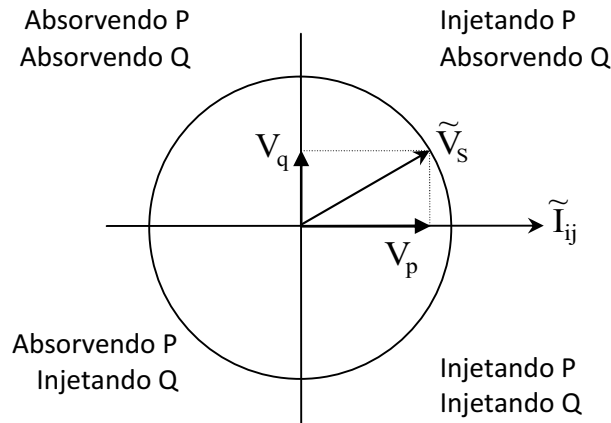


Figura 3.2 – Diferentes Modos de Operação do SSSC.

Neste estudo será considerado o SSSC atuando no modo de compensação de reativos, ou seja,  $V_p = 0$ . Quando a tensão  $\tilde{V}_s$  estiver atrasada da corrente o SSSC estará atuando no modo capacitivo, suprimindo reativos da linha de transmissão. Conseqüentemente, quando a tensão  $\tilde{V}_s$  estiver adiantada de  $90^\circ$  da corrente da linha, o SSSC está operando no modo indutivo, absorvendo reativos da rede [13,24,25,32,35].

Este tipo de variação é muito útil quando se leva em consideração a demanda do sistema de energia elétrica. Em horários de alto carregamento o sistema elétrico necessita de

potência reativa capacitiva, enquanto que em horários de baixo carregamento (madrugadas, feriados e finais de semana) o sistema é predominantemente reativo capacitivo (devido às compensações fixas) precisando neste caso da injeção de potência reativa indutiva para o controle do fator de potência.

### 3.4. Modelagem Matemática do SSSC

Considerando o SSSC como uma tensão variável inserida em série com a linha por um transformador de acoplamento de reatância  $X_C$ , o circuito pode ser representado através de seu equivalente, como na Figura 3.3.

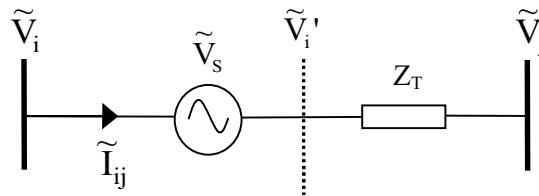


Figura 3.3 – Circuito Equivalente do SSSC.

Na Figura 3.3  $Z_T$  é a impedância equivalente, resultante da soma das impedâncias entre as barras i e j ( $Z_T = Z_{ij} + jX_C$ ).

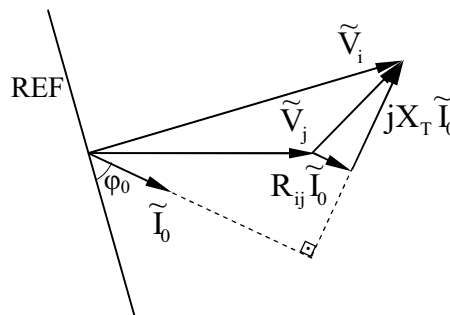


Figura 3.4 – Circuito Equivalente do SSSC para  $V_s = 0$  – Diagrama Fasorial.

Como consideração inicial será admitida que a tensão série do SSSC seja nula ( $\tilde{V}_s = 0$ ) e a corrente que percorre a linha de transmissão que liga as barras i e j é dada na

equação (3.2) (na Figura 3.4 é mostrado o diagrama fasorial do sistema equivalente).

$$\tilde{I}_0 = I_0 \angle \varphi_0 = \frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_j}{Z_T} \quad (3.2)$$

O ângulo da corrente, referenciado ao sistema elétrico é obtido após manipulações geométricas, decompondo o fasor da corrente em parte real e imaginária conforme ilustrado na Figura 3.5.

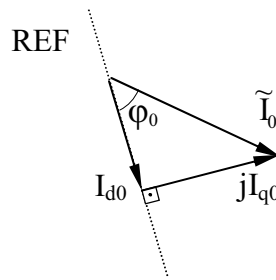


Figura 3.5 – Corrente entre as barras i e j, referenciada ao sistema elétrico.

Desenvolvendo a equação (3.2) obtém-se a expressão da corrente em função das variáveis da linha de transmissão entre as barras i e j (equação (3.3)).

$$\begin{aligned} \tilde{I}_0 = I_{d0} + jI_{q0} = & \frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) \\ & + j \left[ \frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} (V_j \cos \theta_j - V_i \cos \theta_i) \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

O ângulo da corrente para o caso de  $\tilde{V}_s = 0$  é dado na equação (3.4).

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left[ \frac{R_{ij} (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j) + X_T (V_j \cos \theta_j - V_i \cos \theta_i)}{R_{ij} (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j) + X_T (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j)} \right] \quad (3.4)$$

Como citado anteriormente, neste estudo será considerado apenas a compensação reativa por parte do SSSC, o que trás como consequência que a tensão série injetada pelo SSSC na rede sempre estará em quadratura com o ângulo da corrente, independente do tipo de

compensação reativa realizada (capacitiva ou indutiva).

A partir da equação (3.5) pode ser calculada a potência complexa de saída da barra i para a barra j.

$$S_{ij0} = \tilde{V}_i (\tilde{I}_0)^* = P_{ij0} + jQ_{ij0} \quad (3.5)$$

A substituição da equação (3.2) na equação (3.5) expressa as potências ativa e reativa entregues pela barras i à barra j (equações (3.6) e (3.7) respectivamente).

$$P_{ij0} = \frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} (V_i V_j \sin \theta_{ij}) \quad (3.6)$$

$$Q_{ij0} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} (V_i V_j \sin \theta_{ij}) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (3.7)$$

Considere agora o SSSC com ação efetiva no sistema (isto é, tensão série injetada diferente de zero).

Nesta configuração o SSSC pode atuar de duas diferentes formas, no modo capacitivo (suprindo os reativos do sistema) como ilustrado na Figura 3.6.a, ou como na Figura 3.6.b atuando no modo indutivo (absorvendo reativos do sistema).

Neste trabalho a variável  $\tilde{V}_s$  é estipulada a partir do nível de compensação reativa que se deseja aplicar na linha de transmissão através do SSSC. A expressão (3.8) quantifica o valor de  $\tilde{V}_s$  considerando um nível k de compensação estipulado, e é obtida a partir de manipulações geométricas do diagrama fasorial mostrado na Figura 3.6(a).

$$V_s = kX_T |\tilde{I}_{ij}| = kX_T \sqrt{\frac{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}{R_{ij}^2 + X_T^2 (1-k)^2}} \quad (3.8)$$

Com a tensão do SSSC definida como na equação (3.9), é possível determinar a corrente na linha de transmissão entre as barras i e j mostrada na equação (3.10).

$$\tilde{V}_s = V_s \angle \alpha \quad (3.9)$$

$$\tilde{I}_{ij} = I_{ij} \angle \varphi = \frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_s - \tilde{V}_j}{Z_T} = \frac{\tilde{V}_i - \tilde{V}_j}{Z_T} + \left( -\frac{\tilde{V}_s}{Z_T} \right) = \tilde{I}_0 + \tilde{I}_{ijSSC} \quad (3.10)$$

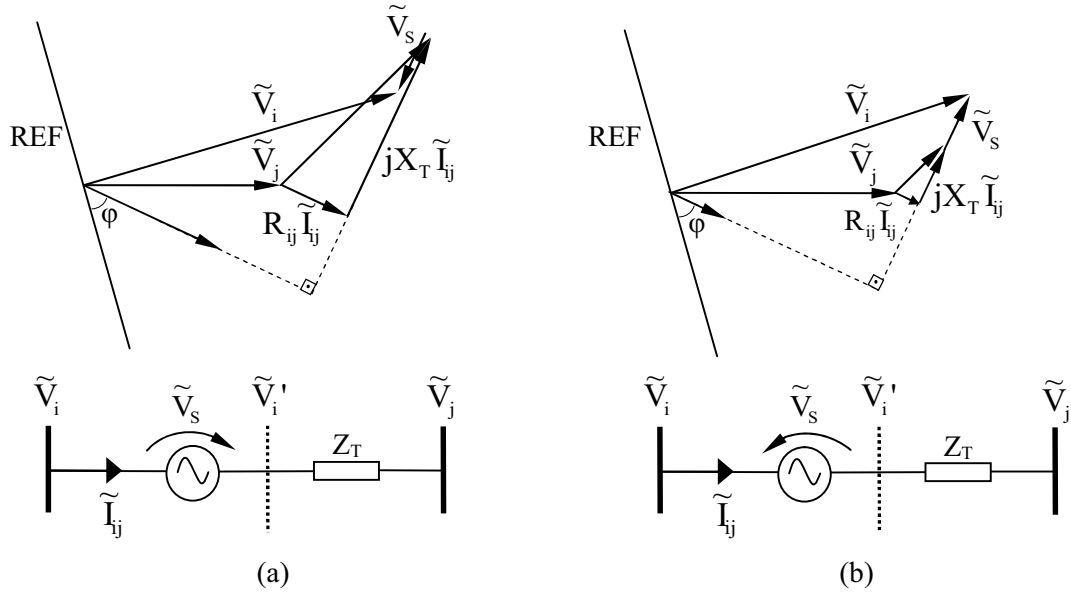


Figura 3.6 – Diagrama Fasorial: operação do SSSC: (a) modo capacitivo. (b) modo indutivo.

A partir da expressão (3.10) pode-se concluir que a corrente na linha pode ser obtida pela superposição de efeitos, somando o termo da corrente na condição inicial ( $\tilde{I}_0$ ) com a parcela de corrente introduzida pelo SSSC ( $\tilde{I}_{ijSSC}$ ), mostrada na equação (3.11).

$$\tilde{I}_{ijSSC} = -\frac{\tilde{V}_s}{\tilde{Z}_T} = -\frac{V_s}{|Z_T|^2} (R_{ij} \cos \alpha + X_T \sin \alpha) - j \frac{V_s}{|Z_T|^2} (R_{ij} \sin \alpha - X_T \cos \alpha) \quad (3.11)$$

A expressão (3.12) representa o fluxo da potência complexa entre as barras i e j com a inclusão do SSSC. Novamente, usando o conceito de superposição de efeitos, é efetuada a soma dos termos de potência complexa para a condição de  $\tilde{V}_s = 0$  com a potência complexa injetada pelo SSSC (na situação de  $\tilde{V}_s \neq 0$ ).

$$\dot{S}_{ij} = \dot{S}_{ij0} + \dot{S}_{ijSSC} \quad (3.12)$$

Desenvolvendo matematicamente o termo  $\dot{S}_{ijSSC}$  da expressão (3.12) que representa a

parcela de potência complexa inserida pelo SSSC, obtêm-se as equações (3.13) à (3.15).

$$\dot{S}_{ijSSSC} = \tilde{V}_i (\tilde{I}_{ijSSSC})^* = P_{ijSSSC} + j Q_{ijSSSC} \quad (3.13)$$

$$P_{ijSSSC} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_i V_S \cos(\theta_i - \alpha) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_i V_S \sin(\theta_i - \alpha) \quad (3.14)$$

$$Q_{ijSSSC} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_i V_S \sin(\theta_i - \alpha) - \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_i V_S \cos(\theta_i - \alpha) \quad (3.15)$$

As equações (3.14) e (3.15) representam respectivamente a potência ativa e a potência reativa injetadas pelo SSSC, estando ambas em função do ângulo da tensão  $\tilde{V}_S$  do SSSC.

Considerando o FACTS atuando no modo capacitivo, ou seja, com o ângulo da tensão  $\tilde{V}_S$  atrasada de  $90^\circ$  em relação à corrente da linha de transmissão ( $\alpha = \varphi - 90^\circ$ ) as equações (3.14) e (3.15) podem ser reescritas como nas equações (3.16) e (3.17).

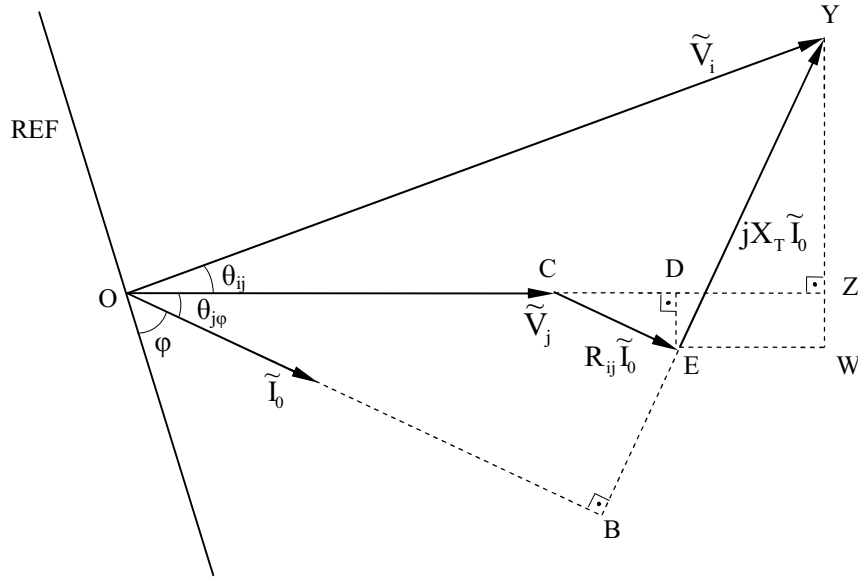
$$P_{ijSSSC} = +\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_i V_S \sin(\theta_i - \varphi) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_i V_S \cos(\theta_i - \varphi) \quad (3.16)$$

$$Q_{ijSSSC} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_i V_S \cos(\theta_i - \varphi) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_i V_S \sin(\theta_i - \varphi) \quad (3.17)$$

As equações (3.16) e (3.17) estão em função do ângulo da tensão da barra  $i$  ( $\theta_i$ ) e do ângulo da corrente que flui da barra  $i$  para a  $j$  ( $\varphi$ ). Tem-se assim a necessidade de se determinar as equações das potências em função de valores conhecidos, como os ângulos das tensões nas barras  $i$  e  $j$ . Para este fim, considere o diagrama fasorial mostrado na Figura 3.7, na condição de  $\tilde{V}_S = 0$ , onde  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  e  $\theta_{j\varphi} = \theta_j - \varphi$ .

A partir da Figura 3.7 e relações geométricas são escritas as equações (3.18) a (3.23).

$$\cos(\theta_i - \varphi) = \frac{\overline{OB}}{\overline{OY}} = \frac{R_{ij}}{V_i} I_0 + \frac{V_j}{V_i} \cos(\theta_j - \varphi) \quad (3.18)$$

Figura 3.7 – Diagrama Fasorial:  $V_s = 0$ .

$$\text{sen}(\theta_i - \varphi) = \frac{\overline{BY}}{\overline{OY}} = \frac{X_T}{V_i} I_0 + \frac{V_j}{V_i} \text{sen}(\theta_j - \varphi) \quad (3.19)$$

$$\cos(\theta_i - \theta_j) = \frac{\overline{OZ}}{V_i} = \frac{V_j}{V_i} + \frac{R_{ij}}{V_i} I_0 \cos(\theta_j - \varphi) + \frac{X_T}{V_i} I_0 \text{sen}(\theta_j - \varphi) \quad (3.20)$$

$$\text{sen}(\theta_i - \theta_j) = \frac{\overline{YZ}}{V_i} = \frac{X_T}{V_i} I_0 \cos(\theta_j - \varphi) - \frac{R_{ij}}{V_i} I_0 \text{sen}(\theta_j - \varphi) \quad (3.21)$$

$$\cos(\theta_j - \varphi) = \frac{\overline{CD}}{R_{ij} I_0} = \frac{V_i \left[ R_{ij} \left( \cos \theta_{ij} - \frac{V_j}{V_i} \right) + X_T \text{sen} \theta_{ij} \right]}{\sqrt{(R_{ij}^2 + X_T^2) (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})}} \quad (3.22)$$

$$\text{sen}(\theta_j - \varphi) = \frac{\overline{DE}}{R_{ij} I_0} = \frac{V_i \left[ -R_{ij} \text{sen} \theta_{ij} + X_T \left( \cos \theta_{ij} - \frac{V_j}{V_i} \right) \right]}{\sqrt{(R_{ij}^2 + X_T^2) (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})}} \quad (3.23)$$

A substituição das equações (3.22) e (3.23) nas equações (3.18) e (3.19) fornecem as equações (3.24) e (3.25).

$$\cos\theta_{i\varphi} = \frac{R_{ij}}{V_i|Z_T|} \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}} + \frac{V_j \left[ R_{ij} \left( \cos\theta_{ij} - \frac{V_j}{V_i} \right) + X_T \sin\theta_{ij} \right]}{|Z_T| \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}}} \quad (3.24)$$

$$\sin\theta_{i\varphi} = \frac{X_T}{V_i|Z_T|} \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}} + \frac{V_j \left[ -R_{ij} \sin\theta_{ij} + X_T \left( \cos\theta_{ij} - \frac{V_j}{V_i} \right) \right]}{|Z_T| \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}}} \quad (3.25)$$

Voltando às equações das potências inseridas pelo SSSC no sistema (equações (3.16) e (3.17)) e substituindo os termos relevantes pelas equações (3.24) e (3.25) obtêm-se as expressões das potências ativa e reativas injetadas ou absorvidas pelo SSSC na forma desejada (equações (3.26) e (3.27)).

$$P_{ijSSSC} = \frac{2R_{ij}X_TV_S}{|Z_T|^3} \left( \frac{V_i^2 - V_iV_j\cos\theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}}} \right) + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2)V_iV_jV_S\sin\theta_{ij}}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}}} \quad (3.26)$$

$$Q_{ijSSSC} = -\frac{2R_{ij}X_TV_iV_jV_S\sin\theta_{ij}}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}}} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2)V_S}{|Z_T|^3} \left( \frac{V_i^2 - V_iV_j\cos\theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}}} \right) \quad (3.27)$$

A soma da equação (3.6) com a equação (3.26) fornece a expressão da potência ativa transferida da barra i para a barra j (equação (3.28)). De maneira análoga, a potência reativa (equação (3.29)) é obtida a partir da soma das equações (3.7) e (3.27).

A equação (3.30) representa a potência complexa que flui entre estas duas barras genéricas do sistema de transmissão que possuem o controlador SSSC acoplado.

As equações (3.28) à (3.30) modelam o FACTS SSSC no sistema de potência considerando a resistência da linha de transmissão.

$$P_{ij} = \frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} (V_i^2 - V_iV_j\cos\theta_{ij}) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} (V_iV_j\sin\theta_{ij}) + \frac{2R_{ij}X_TV_S}{|Z_T|^3} \left( \frac{V_i^2 - V_iV_j\cos\theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}}} \right) + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2)V_iV_jV_S\sin\theta_{ij}}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}}} \quad (3.28)$$

$$Q_{ij} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} (V_i V_j \sin \theta_{ij}) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) - \frac{2R_{ij}X_T V_i V_j V_S \sin \theta_{ij}}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2)V_S}{|Z_T|^3} \left( \frac{V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} \right) \quad (3.29)$$

$$\dot{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} \quad (3.30)$$

### 3.5. Inclusão do SSSC no MSP

Adotando o mesmo procedimento realizado no Capítulo 2, considerando pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio estável, as equações do fluxo de potência da linha com o SSSC, podem ser linearizadas resultando nas equações (3.31) e (3.32) que fornecem as variações de potências ativa e reativa.

$$\Delta P_{ij} = A_{1ij} \Delta \theta_{ij} + A_{2ij} \Delta V_i + A_{3ij} \Delta V_j + A_{4ij} \Delta V_S \quad (3.31)$$

$$\Delta Q_{ij} = R_{1ij} \Delta \theta_{ij} + R_{2ij} \Delta V_i + R_{3ij} \Delta V_j + R_{4ij} \Delta V_S \quad (3.32)$$

Os coeficientes  $A_{ij}$  representam os “coeficientes de sensibilidade de potência ativa da linha transmissão  $i - j$ ”, enquanto que os coeficientes  $R_{ij}$  são os “coeficientes de sensibilidade de potência reativa da linha de transmissão  $i - j$ ”. Estes coeficientes estão mostrados no Apêndice II.

O balanço nodal de potência permanece da mesma forma como realizado no Capítulo 2 que está representado pelas equações (2.24) e (2.25), pois as barras  $i$  e  $j$  ainda são duas barras genéricas do sistema; apenas a equação que descreve os fluxos entre estas barras foi alterada.

A representação matricial do novo sistema de potência com a inclusão do SSSC é praticamente o mesmo do representado no capítulo 2 (equações (2.37) e (2.38)), com exceção do vetor de entradas  $\Delta u$  e da matriz de entradas “B” (formada pelas sub-matrizes  $B_1$  e  $B_2$ ), que incluirão as variáveis do SSSC.

A representação matricial no domínio do tempo é descrita nas equações (3.33) e (3.34).

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} [\Delta \dot{\omega}] \\ [\Delta \dot{\delta}] \\ [\Delta \dot{E}'_q] \\ [\Delta \dot{E}_{fd}] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -[D][M]^{-1} & -[A1_G][M]^{-1} & -[A2_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} \\ [\omega_0] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & -[K_A][T'_{do}]^{-1} & -[x_d][x'_d]^{-1}[T'_{do}]^{-1} & [T'_{do}]^{-1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -[T'_r]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} [A1_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[A3_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [K_A][T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} & [K_V][T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} [M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_S] \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.33}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & [A2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J4_1] & [J4_2] \\ [J4_3] & [J4_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [diag(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [diag(-1)]_{nb \times nb} \end{bmatrix} VS \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_S] \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.34}$$

A inclusão do SSSC ao sistema acarretou no surgimento da variável de entrada  $\Delta V_s$ , presente no vetor de entrada  $\Delta u$ .

Consequentemente, a matriz que multiplica o vetor  $\Delta u$  foi expandida em uma coluna (VS), e é composta pelos coeficientes de sensibilidade A4 e R4. A regra de formação do vetor VS é apresentada na expressão (3.35).

$$[VS]_{(2nb \times 1)} = \begin{cases} VS_{(i \times 1)} = -A4_{ij}, \text{ se } i \text{ for a barra inicial com SSSC.} \\ VS_{(j \times 1)} = -A4_{ji}, \text{ se } j \text{ for a barra final com SSSC.} \\ VS_{(i+nb \times 1)} = -R4_{ij}, \text{ se } i \text{ for a barra inicial com SSSC.} \\ VS_{(j+nb \times 1)} = -R4_{ji}, \text{ se } j \text{ for a barra final com SSSC.} \\ VS = 0, \text{ para qualquer barra diferente de } i \text{ e } j. \end{cases} \tag{3.35}$$

As equações (3.33) e (3.34) podem ser representadas em uma forma compacta, como sugerido em (3.36).

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1_s \\ B2_s \end{bmatrix} [\Delta u_s] \quad (3.36)$$

Realizando a eliminação das variáveis algébricas ( $\Delta z$ ), é possível obter a representação matricial do sistema multimáquinas com um SSSC em operação na forma de espaço de estados, como mostrado nas equações (3.37) e (3.38).

$$\dot{\Delta x} = (J1 - J2 J4^{-1} J3) \Delta x + (B1_s - J2 J4^{-1} B2_s) \Delta u_s \quad (3.37)$$

$$\dot{\Delta x} = A \Delta x + B \Delta u_s \quad (3.38)$$

Anteriormente foi citada a facilidade para a inclusão de diferentes componentes do sistema elétrico de potência ao MSP multimáquinas, o que é confirmado pelas equações que compõem as matrizes (3.33), (3.34) e (3.36). Observe que as equações do SSSC são diretamente inseridas no modelo multimáquinas deduzido no Capítulo 2 através de pequenas adaptações como, por exemplo, a inserção de algumas linhas e colunas nas matrizes que representam o modelo. Isso se deve à preservação das variáveis algébricas que descrevem o sistema de transmissão.

A representação apresentada baseia-se na inclusão do SSSC a um sistema multimáquinas e variações podem ser obtidas ao se incluir diferentes tipos de controladores para o SSSC, que é o assunto que será abordado no próximo Capítulo.

### 3.6. Conclusões

Discutiu-se neste Capítulo sobre a crescente necessidade de ampliação dos sistemas elétricos para continuar o fornecimento de energia elétrica em níveis seguros de operação. Como possível solução foi abordada a utilização de dispositivos FACTS, além de citadas as formas de utilização destes componentes.

Atenção especial foi dada ao SSSC (Static Synchronous Series Compensator) que atua

como uma fonte de tensão em série com a linha de transmissão fazendo a compensação de reativos a partir do controle desta tensão. Explicaram-se as diversas formas de operação deste equipamento, culminando com sua modelagem para posterior inclusão no MSP (Modelo de Sensibilidade de Potência).

A inclusão de um SSSC ao modelo requer a inclusão de apenas uma coluna e uma linha na matriz de entrada e no vetor de entradas do sistema, respectivamente. Variações desta representação são obtidas com a introdução de controladores ao SSSC, assunto tratado no próximo Capítulo.

## 4. Controladores Adicionais (POD e PSS)

### 4.1. Introdução

A simples inclusão dos dispositivos FACTS nos sistemas elétricos de potência nem sempre é capaz de solucionar problemas relacionados com a estabilidade a pequenas perturbações, principalmente quando a ocorrência da instabilidade é por falta de amortecimento das oscilações de baixa frequência (oscilações eletromecânicas). A introdução de controladores adicionais ao sistema de potência ou acoplados aos dispositivos FACTS pode acrescentar amortecimento a estas oscilações.

A utilização de diferentes tipos de controladores fornecem diferentes respostas transitórias quando o sistema sofre alguma perturbação mas, quanto mais avançado é o controlador utilizado, maior será a possibilidade de se inserir mais amortecimento às oscilações de baixa frequência.

Neste trabalho serão tratados dos controladores PSS (do inglês, Power System Stabilizer) [4,5,6,8,18] e controladores adicionais que atuarão em conjunto com o dispositivo FACTS SSSC.

No caso dos controladores para o SSSC serão abordados os de primeira ordem e os chamados POD (do inglês, Power Oscillation Damping) [17,22,26,32,34,41], que são largamente utilizados nos estudos de estabilidade a pequenas perturbações.

São apresentadas as estruturas que representam os controladores e é feita a sua inclusão no modelo do sistema elétrico de potência.

Também é discutida a melhor localização destes controladores, bem como técnicas de ajuste para os seus parâmetros.

### 4.2. Controlador de Primeira Ordem

O controlador de primeira ordem (cuja representação na forma de diagrama de blocos é mostrada na Figura 4.1) é constituído de um ganho estático  $K_{SSSC}$  e uma constante de tempo  $T_{SSSC}$ , que representa o atraso inerente a qualquer sistema físico.

O sinal de referência ( $\Delta V_{S0}$ ) representa o desvio da tensão inserida pelo SSSC em regime permanente e que permite alterar o ponto de operação do dispositivo. A constante de tempo  $T_{SSSC}$  normalmente é muito pequena, pois leva em consideração a dinâmica de atuação

dos dispositivos eletrônicos semicondutores. Normalmente o valor de  $T_{SSSC}$  é menor que a constante de tempo de atuação dos reguladores de tensão dos geradores.

Através de um sinal de entrada  $\Delta X$  o controlador fornece o sinal de saída  $\Delta V_s$  que representa as variações da tensão série inserida pelo dispositivo SSSC.

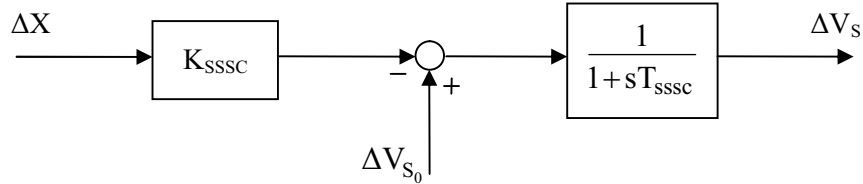


Figura 4.1 – Controlador de 1ª ordem: diagrama de blocos.

Por inspeção, a partir da Figura 4.1, é possível escrever a equação (4.1) que descreve a dinâmica de atuação do controlador de primeira ordem, para um sinal de entrada genérico  $\Delta X$ .

$$\Delta V_s = \frac{1}{1 + sT_{SSSC}} (\Delta V_{S_0} - K_{SSSC} \Delta X) \quad (4.1)$$

Neste trabalho o sinal de entrada adotado para o controlador é a variação do fluxo de potência ativa na linha de transmissão onde o SSSC está instalado ( $\Delta x = \Delta P_{ij}$ ) pois trata-se de um sinal local de fácil obtenção, além de possuir alta observabilidade nos modos de oscilação interáreas [17] (o fato do sinal de entrada do controlador ter grande influência no modo interárea é importante já que este tipo de FACTS geralmente é utilizado para atuar neste modo oscilatório, que ocorre em longas linhas de transmissão distantes dos centros geradores).

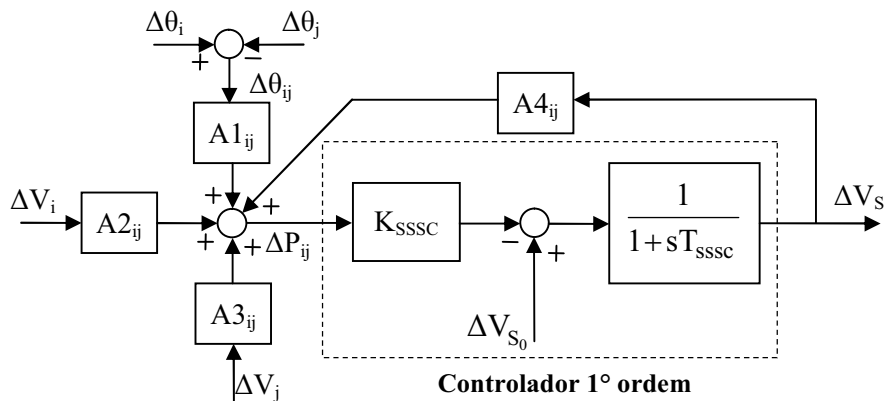


Figura 4.2 - Diagrama de Blocos representativo do controlador de primeira ordem.

Na Figura 4.2 tem-se a representação na forma de diagrama de blocos considerando o SSSC equipado com o controlador de primeira ordem, tendo como entrada do sistema a variação da potência ativa (obtida a partir de parâmetros locais do sistema de transmissão).

Substituindo o sinal de entrada da equação (4.1) para as variações da potência ativa (equação (3.31) – Capítulo 3), obtêm-se a equação (4.2).

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_S = & -A1_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}} \Delta \theta_i + A1_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}} \Delta \theta_j - A2_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}} \Delta V_i - A3_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}} \Delta V_j \\ & - \left( \frac{1}{T_{SSSC}} + A4_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}} \right) \Delta V_S + \frac{1}{T_{SSSC}} \Delta V_{S_0} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Para a introdução deste tipo de controlador no modelo do sistema elétrico de potência são alteradas as equações (3.33) e (3.34) (deduzidas no Capítulo 3), resultando nas expressões (4.3) e (4.4).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_S \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -[D][M]^{-1} & -[A1_G][M]^{-1} & -[A2_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times 1} \\ [\omega_0] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & -[K_A][T'_{do}]^{-1} & -[x_d][x'_d]^{-1}[T'_{do}]^{-1} & [T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -[T'_r]^{-1} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{l \times ng} & [0]_{l \times ng} & [0]_{l \times ng} & [0]_{l \times ng} & -\left( \frac{1}{T_{SSSC}} + \frac{A4_{ij} K_{SSSC}}{T_{SSSC}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_S \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [A1_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[A3_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [K_A][T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} & [K_V][T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & -[K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb-ng} \\ [VS_1]_{1 \times 2nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$+ \begin{bmatrix} [M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{l \times ng} & [0]_{l \times ng} & [0]_{l \times ng} & [0]_{l \times ng} & \left( \frac{1}{T_{SSSC}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{Mec} \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta P_L \\ \Delta Q_L \\ \Delta V_{S_0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & [A2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \end{bmatrix} [VS_2]_{2nb \times 1} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta V_s] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J4_1] & [J4_2] \\ [J4_3] & [J4_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [diag(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times 1} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [diag(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{s0}] \end{bmatrix} \quad (4.4)
\end{aligned}$$

Nas equações (4.3) e (4.4) surgem dois novos vetores denominados de  $VS_1$  e  $VS_2$  onde o vetor  $VS_1$  é composto pelos coeficientes de sensibilidade de potência e das variáveis do controlador. O vetor  $VS_2$  é obtido dos coeficientes de sensibilidade do SSSC ( $A4$  e  $R4$ ) originados da linearização da potência ativa e reativa (equações (3.31) e (3.32) – Capítulo 3).

A regra de formação destes vetores é apresentada em (4.5) e (4.6).

$$[VS_1]_{(1 \times 2nb)} = \begin{cases} VS_{1(1 \times i)} = -A1_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}}, \text{ se } i \text{ for a barra inicial com SSSC.} \\ VS_{1(1 \times j)} = A1_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}}, \text{ se } j \text{ for a barra final com SSSC.} \\ VS_{1(1 \times nb+i)} = -A2_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}}, \text{ se } i \text{ for a barra inicial com SSSC.} \\ VS_{1(1 \times nb+j)} = -A3_{ij} \frac{K_{SSSC}}{T_{SSSC}}, \text{ se } j \text{ for a barra final com SSSC.} \\ VS_1 = 0, \text{ para qualquer barra diferente de } i \text{ e } j. \end{cases} \quad (4.5)$$

$$[VS_2]_{(2nb \times 1)} = \begin{cases} VS_{2(i \times 1)} = -A4_{ij}, \text{ se } i \text{ for a barra inicial com SSSC.} \\ VS_{2(j \times 1)} = -A4_{ji}, \text{ se } j \text{ for a barra final com SSSC.} \\ VS_{2(i+nb \times 1)} = -R4_{ij}, \text{ se } i \text{ for a barra inicial com SSSC.} \\ VS_{2(j+nb \times 1)} = -R4_{ji}, \text{ se } j \text{ for a barra final com SSSC.} \\ VS_2 = 0, \text{ para qualquer barra diferente de } i \text{ e } j. \end{cases} \quad (4.6)$$

Deve-se ressaltar que a durante o desenvolvimento do modelo (antes da inclusão do controlador de primeira ordem), a variável que representa as variações da tensão série do SSSC ( $\Delta V_s$ ) era considerada como uma entrada para o sistema (equações (3.33) e (3.34) –

Capítulo 3). Na nova configuração, a variável  $\Delta V_S$  é uma variável de estado presente no vetor de estados ( $\Delta x$ ). Observa-se também que o sinal de referência  $\Delta V_{S0}$  é agora tratado como variável de entrada para o sistema elétrico de potência.

### 4.3. Power Oscillation Damping – POD

Os Estabilizadores de Sistemas de Potência (PSS - do inglês Power System Stabilizer) (que serão tratados no item 4.4), há várias décadas são utilizados para o acréscimo de sinais suplementares no sistema de excitação dos geradores, com a finalidade de inserir amortecimento às oscilações eletromecânicas. São dispositivos confiáveis e relativamente econômicos. Sua atuação é mais efetiva contra as oscilações associadas a um grupo gerador oscilando contra um grande centro consumidor, ou seja, o PSS é mais eficiente para amortecer modos locais de oscilação.

Com a interligação entre grandes centros geradores e consumidores de energia elétrica, começaram a surgir oscilações eletromecânicas de baixa frequência entre um grupo de máquinas de certa área atuando contra outro grupo de máquinas em outra área do sistema elétrico de potência, que foram chamadas de oscilações de modo interárea. Geralmente estes grupos são ligados por longas linhas de transmissão com grande reatância indutiva, que facilitam o surgimento destas oscilações [7,17,18,27,28].

Os dispositivos PSSs têm a capacidade de fornecer amortecimento aos modos interárea, mas, na condição de um sistema elétrico de grande porte muitas vezes sua atuação não é suficiente para eliminar a instabilidade do modo interárea [10].

Com o surgimento dos dispositivos FACTS, que podem ser instalados em qualquer localidade do sistema de transmissão, inclusive na interligação entre duas áreas, surgiram estudos que mostraram ser possível atuar no amortecimento do modo interárea por meio destes dispositivos desde que fossem equipados com um equipamento adicional que possuísse a ação suplementar de amortecimento, o chamado POD [20,21,25,29,30,41].

O controlador POD passou então a ser utilizado para o controle das oscilações eletromecânicas, já que permite realizar as correções de fase necessárias no sistema elétrico e assim, agregar significativas cotas de amortecimento.

O POD é constituído de um filtro passa alta (*washout*), do circuito compensador de fase e um ganho estático. O filtro *washout* previne a atuação do controlador em regime permanente. Os blocos de avanço-atraso (*lead-lag*) regulam a defasagem do sinal de entrada

conforme a conveniência, enquanto que o ganho atua diretamente na quantidade de amortecimento a ser introduzida pelo controlador.

#### 4.3.1 Inclusão do conjunto SSSC - POD no MSP

No diagrama de blocos da Figura 4.3 é mostrada uma estrutura convencional do POD [32,41], bem como sua atuação na variável de controle do SSSC ( $\Delta V_s$ ).

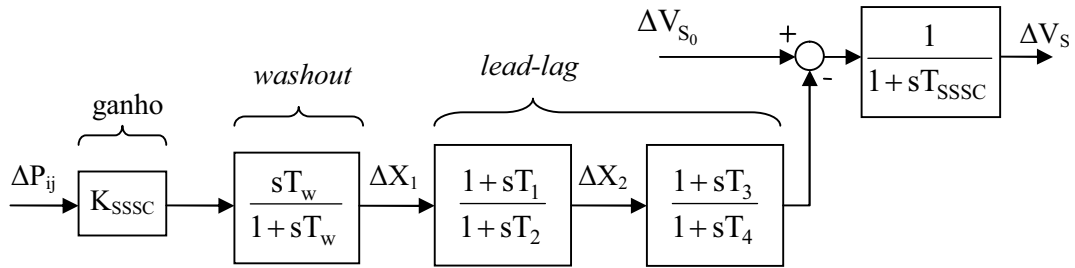


Figura 4.3 – Ilustração do controlador POD.

Como realizado para o controlador de primeira ordem, o sinal de entrada escolhido para o POD será a variação da potência ativa da linha de transmissão onde estiver conectado o SSSC. O sinal de saída do POD são as variações da tensão  $\tilde{V}_s$ .

Como o sinal de entrada do POD não é uma variável de estado, cada bloco que compõe sua estrutura pode ser dividido em dois blocos [22,26,41], resultando na definição de novas variáveis de estado (sem significado físico), mas que são úteis para modelar o controlador na forma de espaço de estados, o que será feito na sequência.

A divisão para o bloco *washout* pode ser feita como mostrado na Figura 4.4 onde, por inspeção, se obtém a equação (4.7), que define uma variável de estado  $\Delta X'_1$ .

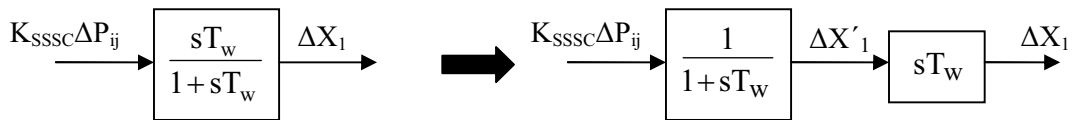


Figura 4.4 – Divisão do bloco *washout*.

$$\Delta \dot{X}'_1 = \frac{K_{SSSC}}{T_w} \Delta P_{ij} - \frac{1}{T_w} \Delta X'_1 \quad (4.7)$$

Procedimento similar é aplicado aos blocos de avanço-atraso, resultando nas Figuras 4.5(a) e 4.5(b).

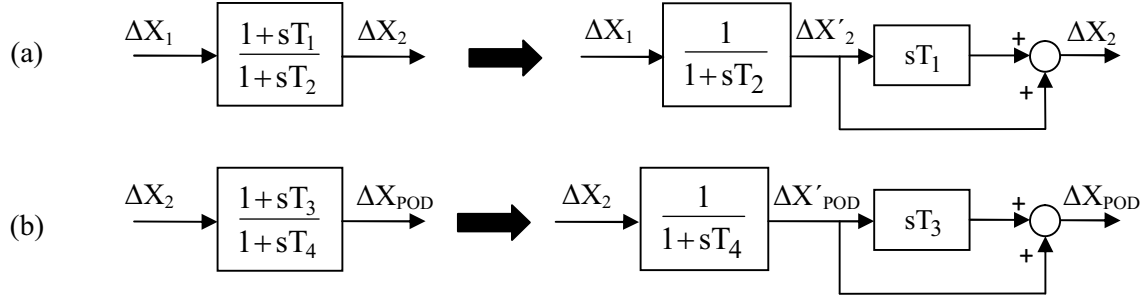


Figura 4.5 – Divisão dos blocos de avanço-atraso.

Através da manipulação do diagrama de blocos da Figura 4.5(a) e da equação (4.7), é obtida a variável de estado  $\Delta X'_2$  do primeiro bloco avanço-atraso de fase (equação (4.8)). Para a obtenção da variável de estado  $\Delta X'_{\text{POD}}$  (equação (4.9)) utiliza-se da Figura 4.5(b) e da equação (4.8).

$$\Delta \dot{X}'_2 = \frac{K_{\text{SSSC}}}{T_2} \Delta P_{ij} - \frac{1}{T_2} \Delta X'_1 - \frac{1}{T_2} \Delta X'_2 \quad (4.8)$$

$$\Delta \dot{X}'_{\text{POD}} = K_{\text{SSSC}} \frac{T_1}{T_2 T_4} \Delta P_{ij} - \frac{T_1}{T_2 T_4} \Delta X'_1 + \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} \Delta X'_2 - \frac{1}{T_4} \Delta X'_{\text{POD}} \quad (4.9)$$

Finalmente, obtém-se a expressão da variável  $\Delta V_s$  (agora definida como uma variável de estado) e que será a responsável pela modulação da tensão série do SSSC e, consequentemente a responsável pela injeção de amortecimento ao sistema de energia elétrica (equação 4.10).

$$\Delta \dot{V}_s = -\frac{K_{\text{SSSC}} T_1 T_3}{T_{\text{SSSC}} T_2 T_4} \Delta P_{ij} - \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{\text{SSSC}}} \Delta X'_1 + \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{T_3}{T_4 T_{\text{SSSC}}} \Delta X'_2 \quad (4.10)$$

$$- \left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{1}{T_{\text{SSSC}}} \Delta X'_{\text{POD}} - \frac{1}{T_{\text{SSSC}}} \Delta V_s + \frac{1}{T_{\text{SSSC}}} \Delta V_{s_0}$$

A variável de entrada do POD é a variação de potência ativa da linha de transmissão entre as barras  $i$  e  $j$  do sistema elétrico (linha onde está conectado o dispositivo SSSC) e foi deduzida no Capítulo 3 (equação (3.31)) e é repetida na equação (4.11), para facilidade de leitura do texto. Pelo diagrama de blocos da Figura 4.6 é possível visualizar a formação do sinal de controle do SSSC ( $\Delta V_S$ ) a partir dos parâmetros do sistema de transmissão.

$$\Delta P_{ij} = A1_{ij} \Delta \theta_{ij} + A2_{ij} \Delta V_i + A3_{ij} \Delta V_j + A4_{ij} \Delta V_S \quad (4.11)$$

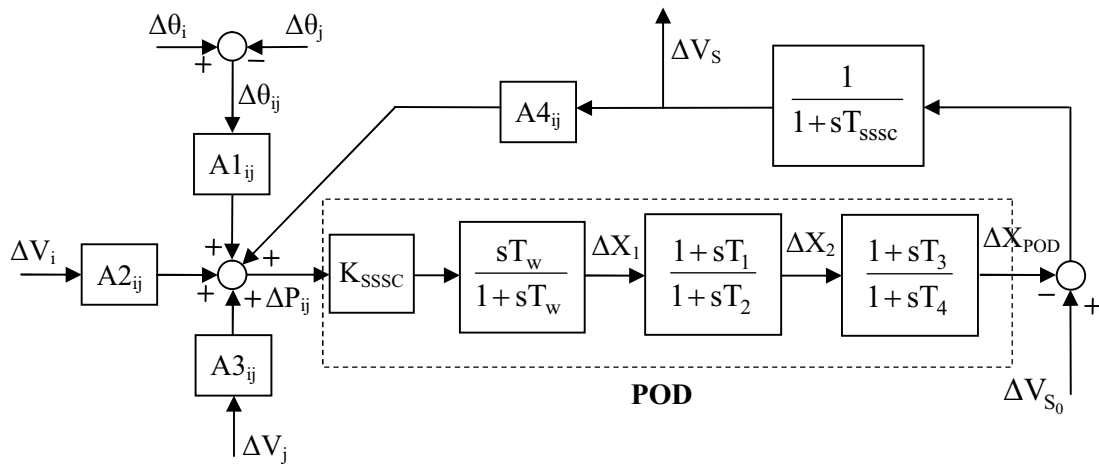


Figura 4.6 – Diagrama de blocos representativo do POD.

Para a inclusão do controlador POD no modelo do sistema elétrico, novamente são modificadas as equações (3.33) e (3.34), resultando nas equações (4.12) e (4.13).

A inclusão do POD resulta em uma sub-matriz  $A_{POD}$  (equação (4.14)), presente na matriz de estados, que relaciona os parâmetros de operação do POD com os coeficientes de sensibilidade do SSSC ( $A4_{ij}$  e  $R4_{ij}$ ). A matriz  $J_{POD}$  (equação (4.15)) relaciona os parâmetros do POD com a magnitude e ângulo das tensões nas barras do sistema que receberam a instalação do POD. As duas primeiras colunas da matriz  $J_{POD}$  multiplicam as variações angulares, enquanto que as duas últimas ponderam as variações da magnitude das tensões nas barras do sistema elétrico.

$$\begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta X'_1] \\ [\Delta X'_2] \\ [\Delta X'_{POD}] \\ [\Delta V_S] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[D][M]^{-1} & -[A1_G][M]^{-1} & -[A2_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times 4} \\ [\omega_0] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times 4} \\ [0]_{ng \times ng} & -[K_A][T'_{do}]^{-1} & -[x_d][x'_d]^{-1}[T'_{do}]^{-1} & [T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times 4} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -[T'_r]^{-1} & [0]_{ng \times 4} \\ [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & [A_{POD}]_{4 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta X'_1] \\ [\Delta X'_2] \\ [\Delta X'_{POD}] \\ [\Delta V_S] \end{bmatrix}$$

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

$$+ \begin{bmatrix} [M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & \left( \frac{1}{T_{SSSC}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{S0}] \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & [A2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta V_S] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J4_1] & [J4_2] \\ [J4_3] & [J4_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [\text{diag}(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times 1} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [\text{diag}(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{S0}] \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$[A_{POD}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_W} & 0 & 0 & \frac{K_{SSSC}}{T_W} A4_{ij} \\ -\frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{K_{SSSC}}{T_2} A4_{ij} \\ -\frac{1}{T_2 T_4} & \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} & -\frac{1}{T_4} & \frac{K_{SSSC} T_1}{T_2 T_4} A4_{ij} \\ \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{SSSC}} - \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{T_3}{T_4 T_{SSSC}} & -\left(1 - \frac{T_3}{T_4}\right) \frac{1}{T_{SSSC}} & -\frac{K_{SSSC} T_1 T_3}{T_{SSSC} T_2 T_4} A4_{ij} & -\frac{1}{T_{SSSC}} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$[J_{\text{POD}}] = \begin{bmatrix} \frac{K_{\text{SSSC}}}{T_W} A_{1ij} & -\frac{K_{\text{SSSC}}}{T_W} A_{1ij} & \frac{K_{\text{SSSC}}}{T_W} A_{2ij} & \frac{K_{\text{SSSC}}}{T_W} A_{3ij} \\ \frac{K_{\text{SSSC}}}{T_2} A_{1ij} & -\frac{K_{\text{SSSC}}}{T_2} A_{1ij} & \frac{K_{\text{SSSC}}}{T_2} A_{2ij} & \frac{K_{\text{SSSC}}}{T_2} A_{3ij} \\ \frac{K_{\text{SSSC}} T_1}{T_2 T_4} A_{1ij} & -\frac{K_{\text{SSSC}} T_1}{T_2 T_4} A_{1ij} & \frac{K_{\text{SSSC}} T_1}{T_2 T_4} A_{2ij} & \frac{K_{\text{SSSC}} T_1}{T_2 T_4} A_{3ij} \\ -\frac{K_{\text{SSSC}} T_1 T_3}{T_{\text{SSSC}} T_2 T_4} A_{1ij} & \frac{K_{\text{SSSC}} T_1 T_3}{T_{\text{SSSC}} T_2 T_4} A_{1ij} & -\frac{K_{\text{SSSC}} T_1 T_3}{T_{\text{SSSC}} T_2 T_4} A_{2ij} & \frac{K_{\text{SSSC}} T_1 T_3}{T_{\text{SSSC}} T_2 T_4} A_{3ij} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

As equações (4.12) a (4.15) podem ser agrupadas em uma forma compacta como mostrado na equação (4.16).

$$\begin{bmatrix} \dot{[\Delta X_{\text{POD}}]} \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1_{\text{POD}}] & [J2_{\text{POD}}] \\ [J3_{\text{POD}}] & [J4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta x_{\text{POD}}] \\ [\Delta z] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1_{\text{POD}}] \\ [B2_{\text{POD}}] \end{bmatrix} [\Delta u_{\text{POD}}] \quad (4.16)$$

Com a eliminação do vetor de variáveis algébricas da equação (4.16) (como realizado nos Capítulos 2 e 3), é obtida a representação na forma de espaço de estados para o modelo do FACTS SSSC com controlador POD (equações (4.17) e (4.18)).

$$\dot{\Delta x_{\text{POD}}} = (J1_{\text{POD}} - J2_{\text{POD}} J4^{-1} J3_{\text{POD}}) \Delta x_{\text{POD}} + (B1_{\text{POD}} - J2_{\text{POD}} J4^{-1} B2_{\text{POD}}) \Delta u_{\text{POD}} \quad (4.17)$$

$$\dot{\Delta x_{\text{POD}}} = A_{\text{POD}} \Delta x_{\text{POD}} + B_{\text{POD}} \Delta u_{\text{POD}} \quad (4.18)$$

#### 4.4. Power System Stabilizer – PSS

O PSS também é conhecido como ESP (Estabilizador de Sistema de Potência) e atua no sistema de excitação dos geradores. Sua ação consiste na injeção de um sinal estabilizante suplementar à malha de controle do regulador automático de tensão, podendo fornecer amortecimento às oscilações do rotor da máquina geradora [4,5,6,8,18].

Geralmente utilizam-se como sinal de entrada para o PSS as variações da velocidade angular dos geradores (como a instalação do PSS é próxima do gerador, este sinal é obtido localmente).

Mesmo com a utilização da velocidade angular como sinal de entrada, o torque elétrico produzido pelo gerador tem característica de atraso de fase devido aos atrasos produzidos pelo regulador de tensão e circuito de campo da máquina (este atraso de fase é definido pela função de transferência conhecida como GEP(s) [8]).

Em vista disso, para a introdução efetiva de amortecimento ao sistema elétrico (ou dito de outra forma, introdução de torque elétrico em fase com as variações da velocidade angular do rotor), é necessária a realização de compensação de fase. Para se conseguir o valor desejado de amortecimento é preciso um bloco proporcional (ganho).

Do exposto, a estrutura do PSS é similar à do POD e mostrada na Figura 4.7 [8,18].

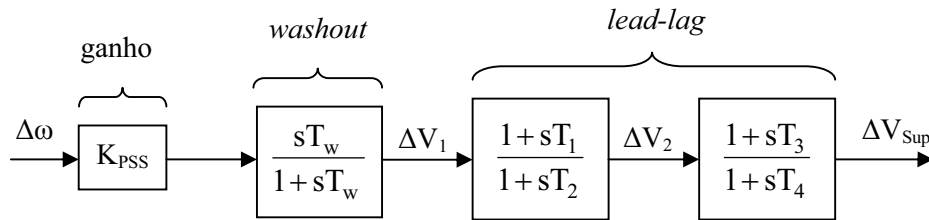


Figura 4.7 – Estrutura básica do PSS.

#### 4.4.1. Inclusão do PSS no MSP

Neste trabalho a variação da velocidade angular do gerador genérico  $k$  ( $\Delta\omega_k$ ) é escolhida como entrada do PSS, pois é um sinal com grande participação nos modos locais de oscilação [8,10,18].

A partir do diagrama mostrado na Figura 4.7 são obtidas as equações do PSS (equações (4.19), (4.20) e (4.21)).

$$\Delta \dot{V}_{1k} = K_{PSS} \Delta \omega_k - \frac{1}{T_w} \Delta V_{1k} \quad (4.19)$$

$$\Delta \dot{V}_{2k} = \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_{1k} + \frac{1}{T_2} \Delta V_{1k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2k} \quad (4.20)$$

$$\Delta \dot{V}_{Supk} = \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{V}_{2k} + \frac{1}{T_4} \Delta V_{2k} - \frac{1}{T_4} \Delta V_{Supk} \quad (4.21)$$

O sinal de entrada do PSS é a variação da velocidade angular, a expressão da aceleração angular (equação (4.22)) é função da variação da velocidade angular ( $\Delta\omega_k$  – sinal

de entrada do PSS) na forma linearizada (equação (2.34) – Capítulo 2) e da função da variação da potência ativa do gerador k (equação (4.23)).

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} (\Delta P_{Meck} - \Delta P_{Gk} - D_k \Delta \omega_k) \quad (4.22)$$

$$\Delta P_{Gk} = A1_{Gk} \Delta(\delta_k - \theta_k) + A2_{Gk} \Delta E'_{qk} + A3_{Gk} \Delta V_k \quad (4.23)$$

Substituindo a equação (4.23) em (4.22) tem-se a expressão completa da variação angular do gerador k que recebeu o PSS e, substituindo-a nas equações (4.19) à (4.21) resulta nas variáveis de estado  $\Delta \dot{V}_{l_k}$ ,  $\Delta \dot{V}_{2_k}$  e  $\Delta \dot{V}_{Sup_k}$  conforme apresentadas nas equações (4.24) à (4.25), respectivamente.

$$\Delta \dot{V}_{l_k} = -D \frac{K_{PSS}}{M_k} \Delta \omega_k - A1_{Gk} \frac{K_{PSS}}{M_k} \Delta(\delta_k - \theta_k) - A2_{Gk} \frac{K_{PSS}}{M_k} \Delta E'_{qk} - \frac{1}{T_w} \Delta V_{l_k} - A3_{Gk} \frac{K_{PSS}}{M_k} \Delta V_k + \frac{K_{PSS}}{M_k} \Delta P_{Meq_k} \quad (4.24)$$

$$\Delta \dot{V}_{2_k} = -D \frac{K_{PSS} T_1}{M_k T_2} \Delta \omega_k - A1_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1}{M_k T_2} \Delta(\delta_k - \theta_k) - A2_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1}{M_k T_2} \Delta E'_{qk} + \left( \frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) \Delta V_{l_k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2_k} - A3_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1}{M_k T_2} \Delta V_k + \frac{K_{PSS} T_1}{M_k T_2} \Delta P_{Meq_k} \quad (4.25)$$

$$\Delta \dot{V}_{Sup_k} = -D \frac{K_{PSS} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} \Delta \omega_k - A1_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} \Delta(\delta_k - \theta_k) - A2_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} \Delta E'_{qk} + \left( 1 - \frac{T_1}{T_w} \right) \frac{T_3}{T_2 T_4} \Delta V_{l_k} + \left( 1 - \frac{T_3}{T_2} \right) \frac{1}{T_4} \Delta V_{2_k} - \frac{1}{T_4} \Delta V_{Sup_k} - A3_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} \Delta V_k + \frac{K_{PSS} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} \Delta P_{Meq_k} \quad (4.26)$$

No caso do PSS o sinal de saída ( $\Delta \dot{V}_{Sup_k}$ ) é inserido no sistema de excitação do gerador síncrono, mais especificamente na malha do regulador automático de tensão (RAT), como mostrado no diagrama de blocos da Figura 4.8.



$$\Delta \dot{E}_{fd_k} = -\frac{1}{T_{r_k}} \Delta E_{fd_k} + \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} \Delta V_{Sup_k} + \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} \Delta V_{Ref_k} - \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} \Delta V_k \quad (4.27)$$

Com as equações dinâmicas (4.24) à (4.27), incluindo as equações desenvolvidas no item 4.3.1 (modelagem do POD realizando o controle do SSSC), a representação matricial do novo sistema é realizada de acordo com as equações (4.28) e (4.29), onde se tem o sistema elétrico com o controlador POD e o controlador PSS em atuação.

$$\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 V_S]} \\ \dot{[\Delta V_1]} \\ \dot{[\Delta V_2]} \\ \dot{[\Delta V_{Sup}]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[D][M]^{-1} & -[A1_G][M]^{-1} & -[A2_G][M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times 4} & [0]_{ng \times 2} & [0]_{ng \times 1} \\ [\omega_0] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times 4} & [0]_{ng \times 2} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & -[K_A][T'_{do}]^{-1} & -[x_d][x'_d]^{-1}[T'_{do}]^{-1} & [T'_{do}]^{-1} & [0]_{ng \times 4} & [0]_{ng \times 2} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -[T_r]^{-1} & [0]_{ng \times 4} & [0]_{ng \times 2} & \frac{K_r}{T_r} \\ \hline [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & [0]_{4 \times ng} & [A_{POD}]_{4 \times 4} & [0]_{4 \times 2} & [0]_{4 \times 1} \\ \hline \frac{K_{PSS_k} D_k}{M_k} & \frac{K_{PSS_k} A1_{Gk}}{M_k} & \frac{K_{PSS_k} A2_{Gk}}{M_k} & [0]_{1 \times ng} & [0]_{1 \times 4} & & \\ \hline \frac{K_{PSS_k} D_k T_1}{M_k T_2} & \frac{K_{PSS_k} A1_{Gk} T_1}{M_k T_2} & \frac{K_{PSS_k} A2_{Gk} T_1}{M_k T_2} & [0]_{1 \times ng} & [0]_{1 \times 4} & & \\ \hline \frac{K_{PSS_k} D_k T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} & \frac{K_{PSS_k} A1_{Gk} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} & \frac{K_{PSS_k} A2_{Gk} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} & [0]_{1 \times ng} & [0]_{1 \times 4} & [A_{PSS}]_{3 \times 3} & \\ \hline \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_S] \\ [\Delta V_1] \\ [\Delta V_2] \\ [\Delta V_{Sup}] \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} \\ \hline [J_{POD}]_{4 \times 2nb} \\ [J_{PSS}]_{3 \times 2nb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$+ \begin{bmatrix} [M]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ [0]_{ng \times ng} & [K_r][T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times 1} \\ \hline [0]_{3 \times ng} & [0]_{3 \times ng} & [0]_{3 \times nb} & [0]_{3 \times nb} & [0]_{3 \times 1} \\ [0]_{1 \times ng} & [0]_{1 \times ng} & [0]_{1 \times nb} & [0]_{1 \times nb} & \left( \frac{1}{T_{SSSC}} \right) \\ \hline \frac{K_{PSS}}{M_k} & [0]_{1 \times ng} & [0]_{1 \times nb} & [0]_{1 \times nb} & [0]_{1 \times 1} \\ \frac{K_{PSS} T_1}{M_k T_2} & [0]_{1 \times ng} & [0]_{1 \times nb} & [0]_{1 \times nb} & [0]_{1 \times 1} \\ \frac{K_{PSS} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} & [0]_{1 \times ng} & [0]_{1 \times nb} & [0]_{1 \times nb} & [0]_{1 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{S0}] \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} [0] \\ [0] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & [A2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \\ [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \omega] \\ [\Delta \delta] \\ [\Delta E'_q] \\ [\Delta E_{fd}] \\ [\Delta V_s] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [J4_1] & [J4_2] \\ [J4_3] & [J4_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [\text{diag}(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times 1} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [\text{diag}(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec}] \\ [\Delta V_{ref}] \\ [\Delta P_L] \\ [\Delta Q_L] \\ [\Delta V_{S0}] \end{bmatrix} \quad (4.29)
\end{aligned}$$

Para facilidade de notação as equações (4.28) e (4.29) mostram a instalação de um único PSS e um único POD, mas a implementação computacional realizada permite representar quantos dispositivos forem necessários.

A regra de formação das matrizes  $A_{PSS}$  e  $J4_{PSS}$  são mostradas nas equações (4.30) e (4.31). As matrizes  $A_{POD}$  e  $J_{POD}$  são as mesmas das equações (4.14) e (4.15).

$$[A_{PSS}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 \\ \left(1 - \frac{T_1}{T_w}\right) \frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ \left(1 - \frac{T_1}{T_w}\right) \frac{T_3}{T_2 T_4} & \left(1 - \frac{T_3}{T_2}\right) \frac{1}{T_4} & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$[J_{PSS}] = \begin{bmatrix} A1_{Gk} \frac{K_{PSS}}{M_k} & [0]_{1 \times nb-1} & -A3_{Gk} \frac{K_{PSS}}{M_k} & [0]_{1 \times nb-1} \\ A1_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1}{M_k T_2} & [0]_{1 \times nb-1} & -A3_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1}{M_k T_2} & [0]_{1 \times nb-1} \\ A1_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} & [0]_{1 \times nb-1} & -A3_{Gk} \frac{K_{PSS} T_1 T_3}{M_k T_2 T_4} & [0]_{1 \times nb-1} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

De forma similar ao POD, as equações do PSS complementam a matriz  $J1$  (equação (2.40) – Capítulo 2), uma matriz que relaciona variáveis de estado. Isto pode ser melhor visualizado na equação (4.32) que denota em forma reduzida as equações (4.28) e (4.29).

$$\begin{bmatrix} [\Delta \dot{X}_{POD/PSS}] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J1_{POD/PSS}] & [J2_{POD/PSS}] \\ [J3_{POD}] & [J4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta x_{POD/PSS}] \\ [\Delta z] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B1_{POD/PSS}] \\ [B2_{POD}] \end{bmatrix} [\Delta u_{POD}] \quad (4.32)$$

A realização na forma de espaço de estado é obtida pela eliminação do vetor composto por variáveis algébricas, obtendo-se a equação (4.33).

$$\dot{\Delta x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (4.33)$$

#### 4.5. Parâmetros de Controle do PSS

Os parâmetros do PSS são determinados empregando técnicas de controle clássico, como o método de compensação de fase [8,18]. A metodologia empregada consiste no ajuste dos parâmetros compensando o atraso de fase da função de transferência GEP(s) (que representa os efeitos dinâmicos dos geradores, sistema de excitação, sistemas de transmissão e cargas [8]) para uma determinada frequência de interesse.

A função de transferência GEP(s) é obtida da malha de controle da tensão e é determinada pela malha reativa do MSP (determinada a partir da redução do diagrama de blocos da Figura 2.5). Na Figura 4.10 tem-se a representação da malha reativa do MSP.

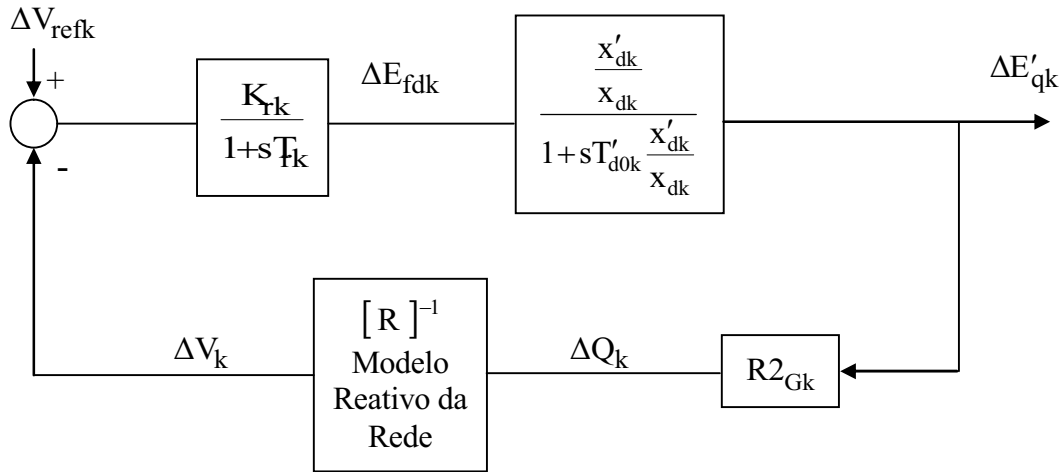


Figura 4.10 – Malha reativa do MSP multimáquinas.

O bloco  $[R]^{-1}$  representa o modelo reativo do sistema de transmissão (composto pelos coeficientes reativos do sistema de transmissão), de acordo com a equação (4.34).

$$[R]^{-1} = \frac{1}{-R3_{Gk} + \sum R2_{km}} \quad (4.34)$$

A expressão da função de transferência GEP(s) é então obtida utilizando-se da Figura 4.10 onde a entrada são as variações da tensão de referência do RAT e as variações da tensão interna do gerador k. A saída são as variações da tensão interna que aparece multiplicada pela constante A2<sub>Gk</sub> para a formação do torque elétrico (potência elétrica) [17] (equação (4.35)).

$$GEP(s) = A2_{Gk} \frac{\Delta E'_{qk}}{\Delta V_{Refk}} = A2_{Gk} \frac{K_{rk} \left( \frac{x'_{dk}}{x_{dk}} \right) [R]}{(1 + sT_{rk}) \left( \frac{1 + sT'_{dok} x'_{dk}}{x_{dk}} \right) [R] + R2_{Gk} K_{rk} \left( \frac{x'_{dk}}{x_{dk}} \right)} \quad (4.35)$$

As características de fase do PSS são obtidas a partir da solução da equação (4.36), onde  $\omega_{nlek}$  é a frequência natural do laço eletromecânico (equação (4.37)).

$$\angle PSS(j\omega_{nlek}) + \angle GEP(j\omega_{nlek}) = 0 \quad (4.36)$$

$$\omega_{nlek} = \sqrt{\frac{K1_k \omega_0}{M_k}} \quad (4.37)$$

Na equação (4.37) K1<sub>k</sub> representa o coeficiente de torque de sincronização do laço eletromecânico da máquina geradora k. A equação (4.38) fornece o valor de K1<sub>k</sub> para o MSP. Esta expressão é obtida da equação característica do laço eletromecânico [17].

$$K1_k = \frac{A1_{Gk} \sum A1_{km}}{A1_{Gk} + \sum A1_{km}} \quad (4.38)$$

Especificando-se as constantes de tempo  $T_2 = T_4$  (geralmente entre 0,02 a 0,15 segundos [8,18]), são obtidos os valores de  $T_1 = T_3$ , de acordo com a equação (4.39).

$$T_{1k} = \frac{\omega_{nlek} T_{2k} - \frac{\text{imag}(GEP(j\omega_{nlek}))}{2(\text{real}(GEP(j\omega_{nlek})))}}{\omega_{nlek}} \quad (4.39)$$

Para o ajuste dos parâmetros do controlador PSS será considerado que este compensa

totalmente o atraso de fase da função  $GEP(s)$ . Nesta situação o torque elétrico gerado através do PSS estará em fase com a velocidade angular do gerador (torque de amortecimento puro), denominado  $\Delta P_{Gk}$  na Figura 4.11.

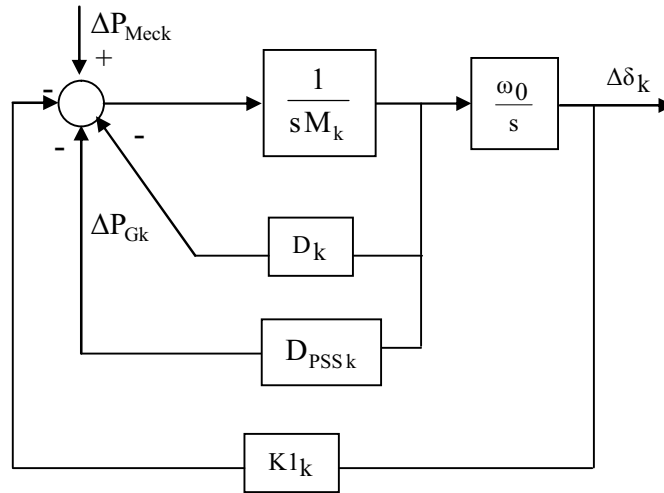


Figura 4.11 – Diagrama de blocos do laço eletromecânico - Amortecimento puro inserido pelo PSS.

Para o cálculo do coeficiente  $D_{PSS}$  é especificado um valor para o amortecimento desejado ( $\xi_{des}$ ) ao modo oscilatório de interesse, como na equação (4.40). O ganho do dispositivo PSS é então obtido pela substituição da equação (4.40) em (4.41).

$$D_{PSSk} = 2\xi_{des} \omega_{nlek} M_k \quad (4.40)$$

$$K_{PSSk} = \frac{D_{PSSk}}{\left| GEP(j\omega_{nlek}) \right| \left| \frac{1+sT_{1k}}{1+sT_{2k}} \right|^2} \quad (4.41)$$

## 4.6. Teoria de Resíduos

Utilizando a teoria dos resíduos é possível determinar qual a melhor localização para a instalação do dispositivo FACTS/PSS e também ajustar os parâmetros dos controladores para atuação direta e efetiva em um modo oscilatório presente no sistema de potência.

Considerando o diagrama de blocos da Figura 4.12 que representa a função de transferência de um sistema elétrico de potência ( $SEP(s)$ ) realimentado por um controlador POD (representado pela função de transferência  $KH(s)$ ), a análise dos resíduos da função de

transferência de malha aberta fornece uma indicação da melhor localização dos dispositivos FACTS e PSS [17,28,29].

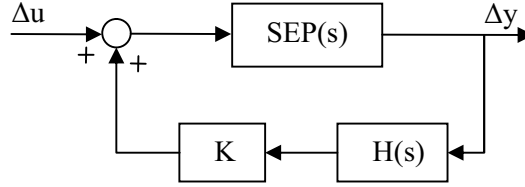


Figura 4.12 – Função de transferência do sistema de potência com controlador POD.

A função  $G(s)$  definirá a resposta dinâmica do sistema ( $\Delta y$ ) quando da ocorrência de alguma perturbação em uma das entradas do sistema ( $\Delta u$ ), como representado pela equação (4.42).

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = C \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} B + D \quad (4.42)$$

Os autovalores ( $\lambda_i$ ) da matriz “A” (matriz de estados) representam todos os valores da variável “s” que satisfazem a equação  $\det(sI - A) = 0$ . Estes autovalores podem assumir valores reais ou complexos (neste caso sempre se apresentam em pares conjugados). Os autovalores reais descrevem exponenciais, enquanto que os pares complexos conjugados definem modos oscilatórios com uma taxa de amortecimento ( $\xi$ ) e frequência natural não amortecida ( $\omega_n$ ). Na equação (4.43) é mostrada a forma de obtenção destes parâmetros [17].

$$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i \Rightarrow \begin{cases} \omega_n = |\lambda_i| = \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2} \\ \xi = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \end{cases} \quad (4.43)$$

A estabilidade ou não de um sistema linear pode ser determinada pela localização dos autovalores da matriz de estados no plano complexo. Pelo Primeiro Método de *Lyapunov* se todos os autovalores da matriz de estados “A” possuírem parte real negativa (autovalores situados no semiplano esquerdo do plano complexo), o sistema é considerado estável. Basta um autovalor possuir parte real positiva (autovalor situado no semiplano direito do plano complexo), para se definir como sistema instável para aquele ponto de operação. No caso de

sistemas elétricos com alto carregamento, a situação crítica para a ocorrência da instabilidade é a falta de amortecimento relacionada a algum modo oscilatório [4,5,9].

É possível de se determinar a influência de uma variável de estado qualquer em um modo oscilatório com o uso dos fatores de participação ( $p_{ki}$ ), que pode ser calculado de acordo com a equação (4.44).

$$P_{ki} = \varphi_{ki} \psi_{ik} \quad (4.44)$$

Na equação (4.44)  $\psi_{ik}$  é o autovetor direito relativo à variável de estado  $k$ , enquanto que  $\varphi_{ik}$  é o autovetor esquerdo relacionado ao modo oscilatório  $i$ , definindo assim a participação ( $p_{ki}$ ) de uma variável  $k$  na oscilação do modo  $i$ .

A partir dos resíduos da função de transferência  $G(s)$  é possível obter informações sobre controlabilidade e observabilidade da entrada e saída do controlador.

Estes resíduos são determinados pela expansão da função de transferência  $G(s)$  (equação (4.42)) em frações parciais em função da matriz  $C$  (matriz relacionada com a observabilidade do sistema linear), da matriz  $B$  (matriz associada à controlabilidade do sistema linear) e dos autovetores esquerdo e direito [17,28,29], como descrito na equação (4.45)

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{C \varphi_i \psi_i B}{(s - \lambda_i)} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{(s - \lambda_i)} \quad (4.45)$$

Para cada termo  $i$  tem-se um escalar chamado resíduo ( $R_i$ ) que dá a participação de um sistema de controle em um modo oscilatório entre os sinais de saída  $y(s)$  e entrada  $u(s)$ . O resíduo  $R_i$  é definido como o produto entre a observabilidade de uma entrada  $j$  presente na matriz  $C$  e a controlabilidade de uma saída  $k$  na matriz  $B$ , associados a um determinado autovalor, como expresso na equação (4.46) [17,28,29].

$$\begin{aligned} \text{Obser} &= C_j \varphi_i \\ \text{Cont} &= \psi_i B_k \\ R_{ijk} &= \text{Obser} \cdot \text{Cont} \end{aligned} \quad (4.46)$$

O controlador deve ser então incorporado ao sistema, de forma a melhorar o modo

oscilatório de interesse. Com a simples consideração do POD com ganho nulo ( $K_{SSSC} = 0$ ), o autovalor sofrerá um deslocamento na direção do semiplano esquerdo do plano complexo, de modo a aumentar o valor absoluto da parte real deste autovalor [17].

A equação (4.47) descreve o deslocamento sofrido pelo autovalor devido à atuação de um controlador. A variação do autovalor é proporcional ao valor absoluto do resíduo, ou seja, quanto maior o resíduo associado ao autovalor, maior será o deslocamento alcançado e, consequentemente, maior o amortecimento obtido.

$$\Delta\lambda_i = R_{ijk} KC(\lambda_i) \quad (4.47)$$

A técnica desenvolvida é de compensação de fase e o controlador POD realiza esta tarefa deslocando a direção da trajetória do resíduo associado a um autovalor em  $\theta$  graus, de modo que o resíduo se desloque em direção ao semiplano esquerdo do plano complexo, como esquematizado na Figura 4.13.

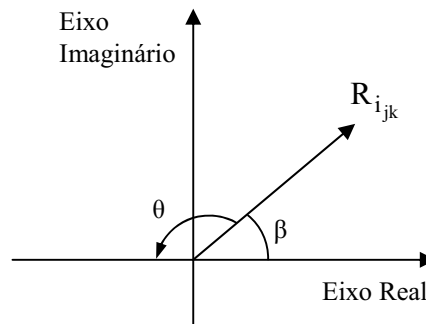


Figura 4.13 - Efeito do controlador POD no resíduo associado ao autovalor  $\lambda_i$ .

Nas equações (4.48) a (4.50) são descritos os meios de se obter os parâmetros do controlador POD (procedimento similar ao adotado em [29,30]). São considerados dois blocos de ajuste de fase, onde:  $T_1 = T_3$  e  $T_2 = T_4$ . O ganho do controlador ( $K_{SSSC}$ ) é calculado considerando um autovalor desejado ( $\lambda_{i,des}$  - autovalor que se deseja alcançar com a atuação do POD) de mesma frequência natural ( $\omega_i$ ) do autovalor que se deseja amortecer.

$$\theta = 180^\circ - \beta; \quad \alpha = \frac{1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4.48)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}}; \quad T_1 = \alpha T_2 \quad (4.49)$$

$$K_{SSSC} = \left| \frac{\lambda_{i,des} - \lambda_i}{R_{i,jk} C(\lambda_i)} \right| \quad (4.50)$$

## 4.7. Conclusões

Neste Capítulo 4 foi realizada a apresentação de dois dispositivos de controle para o dispositivo FACTS SSSC: o controlador de primeira ordem e o controlador POD. Este último é muito utilizado na solução de problemas de estabilidade relacionados às pequenas perturbações por inserir altas cotas de amortecimento, devido à sua capacidade de ajuste de fase. Ambos os controladores foram matematicamente desenvolvidos para sua inclusão nas equações desenvolvidas nos Capítulos 2 e 3, que modelam o sistema elétrico com a atuação do dispositivo FACTS SSSC.

Outro dispositivo muito utilizado por apresentar grandes vantagens é o PSS, equipamento instalado juntamente às unidades geradoras. Para este controlador suas equações também foram deduzidas e incluídas no modelo de sensibilidade de potência expandido.

O ajuste dos parâmetros dos controladores e também as melhores localizações para a instalação dos dispositivos foram abordados a partir da teoria de resíduos, pois através deles é possível reconhecer as variáveis de estado que mais influenciam um modo oscilatório crítico e, posteriormente, regular os controladores para combater este modo.

No próximo Capítulo serão realizadas simulações, aplicando a teoria desenvolvida, em dois sistemas multimáquinas testes. Os resultados obtidos serão analisados e conclusões serão feitas sobre a atuação do SSSC com dispositivos de controle associados no amortecimento das oscilações de baixa frequência.

## 5. Resultados e Simulações

### 5.1. Introdução

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir de simulações de dois sistemas multimáquinas testes, enfocando o amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência com a introdução do dispositivo FACTS SSSC e controladores suplementares (PSS e POD). A partir dos resultados obtidos, conclusões são enunciadas.

As simulações foram realizadas com o uso de um *software* desenvolvido no ambiente *MatLab*<sup>®</sup> utilizando o equacionamento desenvolvido nos Capítulos 2, 3 e 4. Os resultados do fluxo de potência para o caso base foram obtidos através de um programa computacional que utiliza o método de Newton-Raphson para a solução do fluxo de potência [31].

O estudo da estabilidade a pequenas perturbações é feito a partir do Primeiro Método de *Lyapunov* [4], ou seja, analisando os autovalores da matriz de estados do sistema resultante (análise no domínio da frequência). Para a análise no domínio do tempo são utilizadas as curvas das respostas temporais do sistema sob estudo.

A melhor localização para instalação do dispositivo FACTS SSSC e controladores suplementares (POD e PSS) é obtida analisando-se os fatores de participação e resíduos de função de transferência, calculados para cada sistema teste. Os parâmetros dos controladores são determinados utilizando-se de técnicas de controle clássico, como o método de compensação de fase.

Para as simulações optou-se por dois sistemas testes muito utilizados neste tipo de estudo: o primeiro é um sistema simétrico de duas áreas composto por 4 máquinas geradoras e 10 barras [7,38,39]; o segundo sistema é mais elaborado e conhecido como Sistema New England, e é constituído de 10 geradores e um total de 39 barras.

### 5.2. Sistema Simétrico: 4 Geradores e 10 Barras

O sistema elétrico escolhido trata-se de um sistema bastante utilizado em estudos de estabilidade a pequenas perturbações por apresentar modos de oscilação do tipo local e interárea, sendo formado por duas áreas simétricas, interligadas por três linhas de transmissão

paralelas e longas (alta reatância indutiva). Os principais dados deste sistema, bem como seu diagrama unifilar são mostrados no Apêndice III.

### 5.2.1 Sistema Simétrico – Caso Base

Para se avaliar o comportamento do sistema com a introdução dos dispositivos PSS e SSSC (sistema compensado), considere inicialmente o sistema sem a compensação, que aqui será chamado de caso base (sem o SSSC e PSS, sistema não compensado).

O ponto de operação inicial do sistema simétrico é obtido a partir da solução do fluxo de potência calculado por um programa computacional disponível em [31] (a solução de fluxo de potência não faz parte do escopo deste trabalho).

Com a determinação do ponto de operação inicial e demais dados contidos no Apêndice III, é construída a representação do sistema na forma de espaços de estados utilizando das variáveis de estado e algébricas desenvolvidas no Capítulo 2. Dessa representação são obtidos os autovalores da matriz de estados “A” (equações (2.37) e (2.38)) do sistema simétrico para o caso base.

Ao se realizar a determinação dos autovalores, é obtido um total de quinze autovalores sendo que nove deles são reais e negativos (correspondendo, no domínio do tempo, a parcelas de respostas descritas por exponenciais decrescentes que, quando o tempo tende a infinito, assumem o valor zero).

Os seis autovalores restantes correspondem a três pares complexos conjugados e são apresentados na Tabela 5.1 (os autovalores de interesse (dominantes) para a análise da estabilidade) incluindo os coeficientes de amortecimento ( $\xi$ ) e a frequência natural não amortecida  $\omega_n$  a eles associados.

Tabela 5.1 – Autovalores Dominantes – Caso Base.

|                | <b>Autovalores</b>    | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|----------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1   | $-0,2356 \pm j6,2953$ | 0,0374                  | 6,2997                               | 1,0026                            |
| Modo Local 2   | $-0,1585 \pm j5,8779$ | 0,0270                  | 5,8800                               | 0,9358                            |
| Modo Interárea | $0,0460 \pm j4,1382$  | -0,0111                 | 4,1385                               | 0,6587                            |

Analisando-se a frequência dos modos oscilatórios mostrados na Tabela 5.1 conclui-se

que o sistema sob estudo possui dois modos locais de oscilação (ocorrem na faixa de frequências típica – 0,7 e 2,0 Hz [7,18]). O outro modo oscilatório corresponde a um modo interárea de oscilação (frequências típicas na faixa de 0,2 a 0,8 Hz).

Os modos locais de oscilação possuem parte real negativa, que no domínio do tempo formarão parcelas de resposta transitória caracterizadas por oscilações de amplitudes decrescentes.

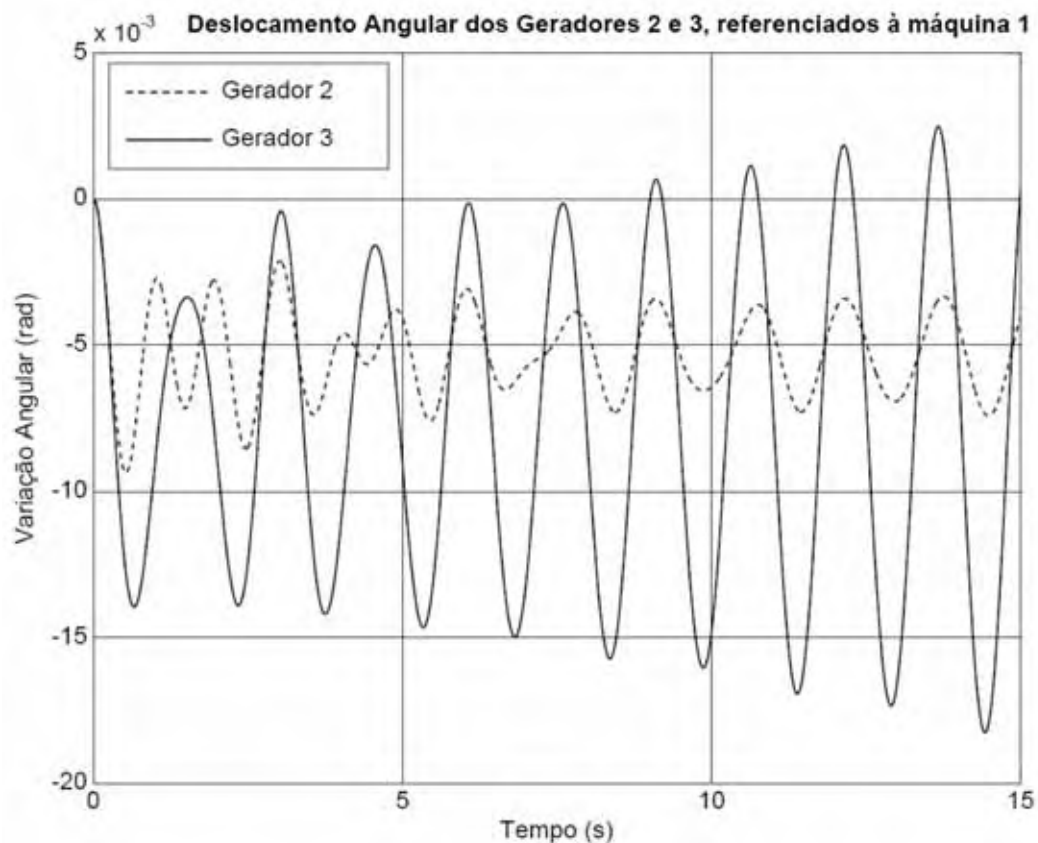


Figura 5.1 – Variação angular dos geradores: caso base.

Em se tratando do modo interárea, observa-se que este possui parte real positiva o que, de acordo com o Primeiro Método de *Lyapunov*, levará o sistema à instabilidade para este dado ponto de operação, quando submetido a uma pequena perturbação. Além disso, esta instabilidade será caracterizada por oscilações de amplitudes crescentes como se pode observar pelo coeficiente de amortecimento ( $\xi$ ) negativo.

Na Figura 5.1 (a título de ilustração) são mostradas as curvas de resposta do deslocamento angular ( $\Delta\delta$ ) para um gerador de cada área do sistema teste (máquina 2 ( $\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1$ ) e máquina 3 ( $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$ )), tomando-se como referência o deslocamento angular do

gerador 1 ( $\Delta\delta_1$  – durante todo o desenvolvimento do trabalho, sempre se utilizará a máquina 1 como referência) para uma variação em degrau de 0,05 pu na potência mecânica do gerador 1 ( $\Delta P_{Mec1} = 0,05$  pu).

Obviamente, a instabilidade está caracterizada por oscilações de amplitudes crescentes, como foi concluído pela análise realizada no domínio da frequência.

Pela análise dos fatores de participação (mostrados nas Figuras 5.2(a), (b) e (c)), é possível identificar quais as variáveis de estado com maiores influências nos modos de oscilação dominantes presentes no sistema simétrico.

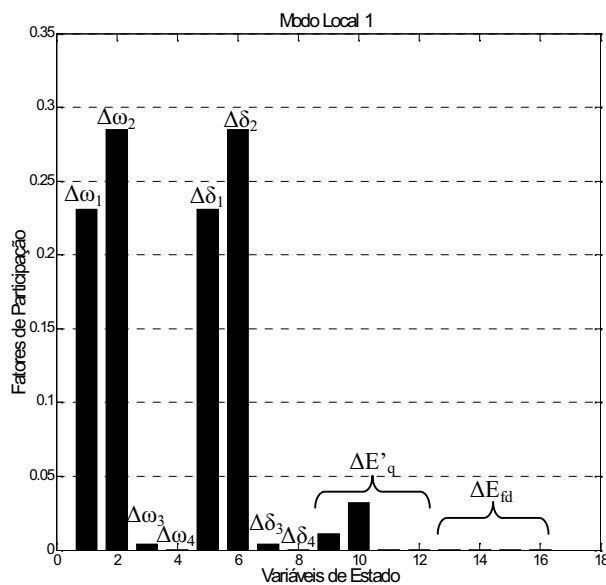


Figura 5.2(a) – Modo Local 1.

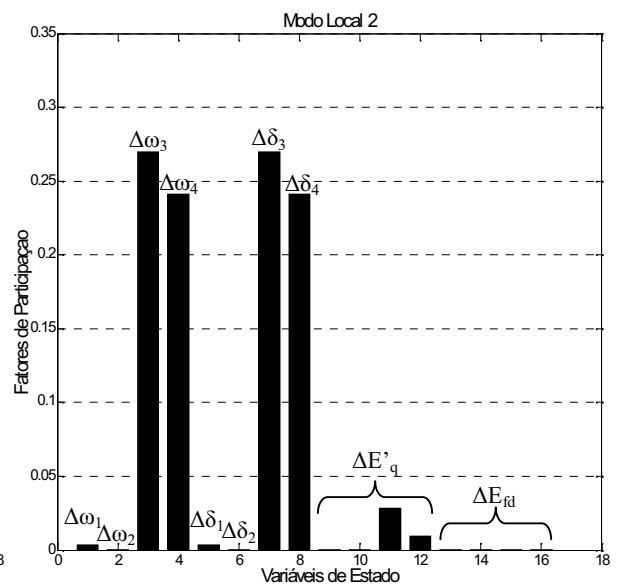


Figura 5.2(b) – Modo Local 2.

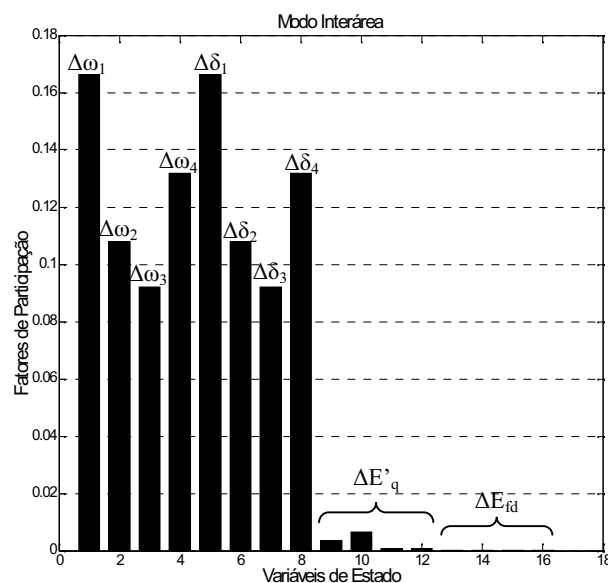


Figura 5.2(c) – Modo Interárea.

Analisando os fatores de participação indicados na Figura 5.2, conclui-se que as máquinas 1 e 2 tem grande participação no modo local de oscilação da área 1, enquanto que as máquinas 3 e 4 participam do modo local 2 de oscilação presente na área 2. Para o modo interárea, é clara a participação de todas as máquinas neste modo oscilatório.

### 5.2.2 Sistema Simétrico – Dispositivo PSS em Operação

A existência do modo oscilatório interárea não amortecido leva o sistema à instabilidade no caso base. Na tentativa de acrescentar amortecimento a este modo instável é proposta a instalação do dispositivo PSS em uma ou mais máquinas geradoras.

A análise dos fatores de participação mostra a influência de todas as máquinas geradoras no modo interárea. Em vista disso, a instalação do PSS em qualquer máquina do sistema seria eficiente no amortecimento do modo interárea.

Os parâmetros do PSS (calculados para sua instalação em cada máquina geradora) foram obtidos pela teoria de controle clássico utilizando-se o método de compensação de fase (nestes cálculos foram especificados os valores de  $T_w$ ,  $T_2 = T_4$ , e do amortecimento desejado ( $\xi_{des}$ ) e obtidos os valores de  $T_1 = T_3$  e do ganho do PSS ( $K_{PSS}$ )) e são mostrados na Tabela 5.2, para dois valores especificados de  $\xi$ .

Tabela 5.2 – Parâmetros do PSS.

| Gerador | Ganho ( $K_{PSS}$ ) |                   | $T_w$ (s) | $T_1 = T_3$ (s) | $T_2 = T_4$ (s) |
|---------|---------------------|-------------------|-----------|-----------------|-----------------|
|         | $\xi_{des} = 0,2$   | $\xi_{des} = 0,8$ |           |                 |                 |
| 1       | 3,7738              | 15,0951           | 1,0       | 0,1021          | 0,0200          |
| 2       | 4,9741              | 19,8965           | 1,0       | 0,0951          | 0,0200          |
| 3       | 5,8316              | 23,3266           | 1,0       | 0,0938          | 0,0200          |
| 4       | 4,1181              | 16,4723           | 1,0       | 0,1022          | 0,0200          |

Uma primeira observação a ser feita a respeito dos parâmetros mostrados na Tabela 5.2 é que as constantes de tempo são as mesmas para os dois diferentes valores de  $\xi_{des}$ , diferindo os ajustes apenas nos valores dos ganhos. Estes resultados já eram esperados, pois a fase do sistema a ser compensada é a mesma para os dois valores de  $\xi_{des}$ . Os ganhos são diferentes pois determinam o quanto de amortecimento se deseja inserir no sistema através da

atuação do PSS.

Analisando os valores obtidos para o ganho dos controladores PSS (Tabela 5.2), observa-se que um PSS instalado na máquina 1 exigiria o menor ganho para atender as especificações do projeto, seguido por um PSS instalado na máquina 4. Isto pode ser explicado a partir dos fatores de participação: como a máquina geradora 1 tem a maior parcela de participação no modo interárea (Figura 5.2(c)) a instalação do PSS nesta máquina requer o menor valor de ganho, isto é, pela sua grande participação no modo oscilatório, menores são os esforços exigidos do controlador. A mesma idéia é válida para a máquina 4: por ser a segunda com maior participação, é a que possui o segundo menor valor de ganho.

Utilizando dos valores obtidos dos parâmetros dos controladores é realizada a simulação do sistema simétrico teste com o PSS instalado na máquina 1, no caso em que  $\xi_{des} = 0,2$ . Os autovalores são calculados a partir da matriz de estados “A” obtidos para esta nova configuração do sistema são mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Autovalores Dominantes com atuação do PSS ( $\xi_{des} = 0,2$ ).

|                | <b>Autovalores</b>      | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1   | $-0,5209 \pm j6,1124$   | 0,0849                  | 6,1346                               | 0,9764                            |
| Modo Local 2   | $-0,1628 \pm j5,8775$   | 0,0277                  | 5,8797                               | 0,9358                            |
| Modo 3         | $-51,0189 \pm j12,8872$ | 0,9696                  | 52,6213                              | 8,3749                            |
| Modo Interárea | $-0,0125 \pm j4,1071$   | 0,0030                  | 4,1071                               | 0,6537                            |

Por inspeção na Tabela 5.3 é visível a melhoria introduzida pelo dispositivo PSS no que se refere à estabilidade do sistema simétrico a pequenas perturbações. O par complexo conjugado que descreve o modo de oscilação interárea migrou do semiplano direito do plano complexo para o semiplano esquerdo, tornando este modo estável (segundo o primeiro método de *Lyapunov* – autovalor com parte real negativa). Vale destacar que o amortecimento obtido ( $\xi = 0,0030$ ) foi menor que o especificado ( $\xi_{des} = 0,2$ ). Isto ocorre porque o ajuste do PSS é realizado “localmente”, isto é, sem a consideração das interações das demais máquinas do sistema multimáquinas. Ao ser inserido no sistema global, as influências das outras máquinas passam a ser observadas, modificando assim as especificações de projeto, tornando a atuação do PSS menos eficiente. Em contrapartida o PSS teve grande atuação no amortecimento do modo local 1 e uma menor participação no amortecimento do modo local 2

(observe que os valores dos coeficientes de amortecimento  $\xi$  destes dois modos são maiores com a instalação do PSS, quando comparados com os valores mostrados na Tabela 5.1). Estes fatos ocorrem porque o PSS foi instalado em uma máquina da área 1, tendo portanto, maior influência no modo de oscilação associado a esta área.

Além disso, a inserção do PSS no sistema simétrico faz com que surja outro modo oscilatório (chamado de Modo 3 na Tabela 5.3). Este modo não se refere às oscilações de interesse e é gerado devido à estrutura utilizada pelo PSS e os valores de seus parâmetros (observe que este modo não interfere na estabilidade do sistema, pois possui um coeficiente de amortecimento associado ( $\xi$ ) de valor elevado (0,9696)).

Simulações adicionais permitiram concluir que a inserção do PSS em qualquer outra máquina se mostrou inviável (seguindo os dados da Tabela 5.2 para  $\xi_{des} = 0,2$ ), pois o sistema permaneceu com o modo interárea instável.

Alterando o ajuste do PSS para a situação de maior amortecimento ( $\xi_{des} = 0,8$ ), foram realizadas novas simulações e na Tabela 5.4 são mostrados os autovalores dominantes para o novo ponto de operação do sistema.

Tabela 5.4 – Autovalores Dominantes com atuação do PSS ( $\xi_{des} = 0,8$ ).

|                | <b>Autovalores</b>      | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1   | $-1,1245 \pm j5,3999$   | 0,2039                  | 5,5157                               | 0,8779                            |
| Modo Local 2   | $-0,1634 \pm j5,8819$   | 0,0278                  | 5,8842                               | 0,9365                            |
| Modo 3         | $-50,7845 \pm j27,7824$ | 0,8773                  | 57,8872                              | 9,2130                            |
| Modo Interárea | $-0,2433 \pm j4,0947$   | 0,0593                  | 4,1019                               | 0,6528                            |

Dos dados mostrados na Tabela 5.4 pode-se concluir que o aumento no ganho do dispositivo PSS propiciou maior amortecimento ao modo interárea, mas ainda assim, não alcançou o valor do amortecimento desejado (a explicação é a mesma realizada para o caso anterior). Da mesma forma que na simulação anterior, o modo local 1 é o que agrega maior cota de amortecimento e, em menor escala, o modo local 2 (o PSS está inserido em uma máquina da área 1, daí estes resultados).

O novo modo oscilatório surgido nesta situação também não é preocupante para a estabilidade a pequenas perturbações, pois possui coeficiente de amortecimento elevado (0,8773 – Tabela 5.4).

O comportamento dinâmico dos desvios angulares da máquina geradora 3 é mostrado na Figura 5.3 para o caso base e a ação do PSS na máquina 1 considerando os ganhos de  $K_{PSS} = 3.738$  e  $K_{PSS} = 15,0951$ .

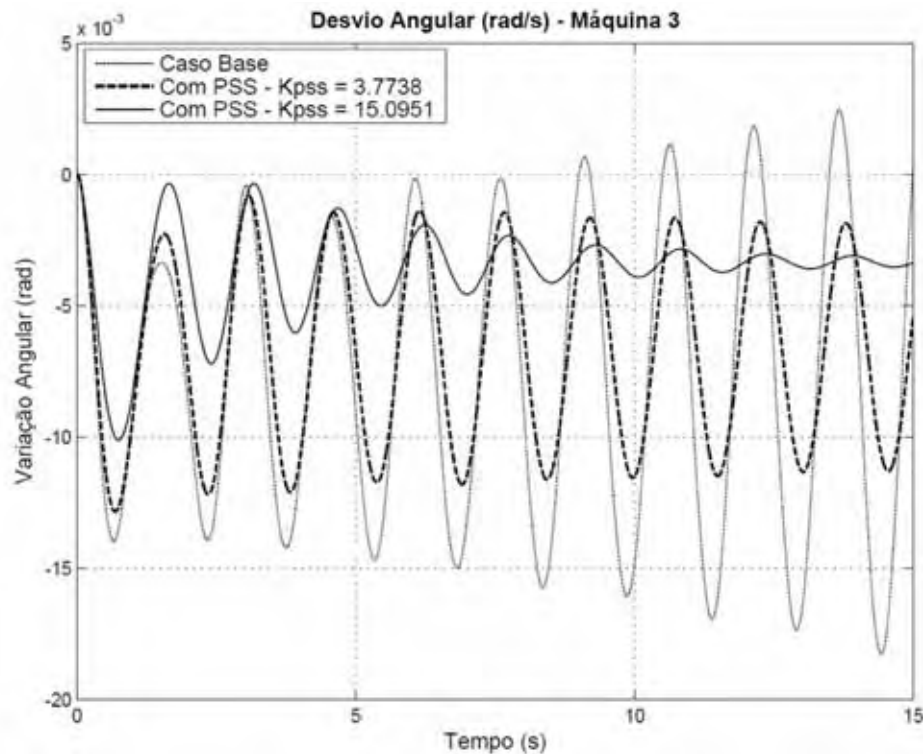


Figura 5.3 – Desvio angular da máquina geradora 3 – com e sem PSS.

Pela análise destes gráficos conclui-se novamente que maior amortecimento é introduzido no sistema, quando se aumenta o valor do ganho do PSS. Além disso, conclui-se pela satisfatória utilização do dispositivo PSS e sua potencialidade em adicionar amortecimento aos modos oscilatórios de baixa frequência do sistema elétrico.

### 5.2.3 Sistema Simétrico – Dispositivo SSSC em Operação

O dispositivo SSSC foi apresentado no Capítulo 3 e um modelo matemático foi desenvolvido para a representação de sua instalação em sistemas multimáquinas. Sua operação consiste na injeção de uma tensão capaz de efetuar a compensação de reativos em uma linha de transmissão de um sistema elétrico.

Assim sendo, foi escolhida a linha de interligação entre as barras 7 e 8 do sistema

simétrico para a instalação do SSSC. O motivo é a alta reatância indutiva desta linha de transmissão (Apêndice III) comparada às demais, o que permite uma maior margem de compensação para o SSSC.

Neste primeiro teste o SSSC atuará controlando o fluxo de potência na linha de transmissão, através de uma compensação fixa de reativos.

Na Figura 5.4 é apresentada a trajetória do par complexo conjugado que caracteriza o modo oscilatório interárea no plano complexo, para diferentes taxas de compensação reativa obtidas com a instalação do dispositivo FACTS SSSC.

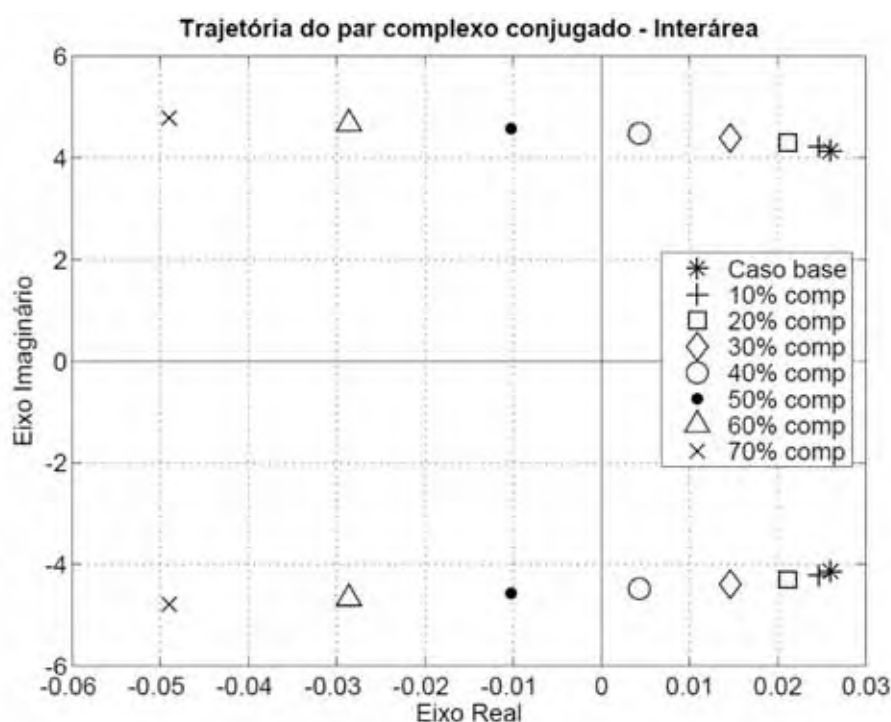


Figura 5.4 – Trajetória do modo interárea para diferentes taxas de compensação.

A partir dos pontos da Figura 5.4 nota-se que o par complexo conjugado se desloca para a esquerda conforme maior a taxa de compensação reativa realizada pelo SSSC e o sistema se torna estável (autovalor com parte real negativa) para valores de compensação reativa maiores e próximos de 60%.

Na Tabela 5.5 são apresentados os autovalores dominantes da matriz de estados “A” (equações (3.33) e (3.34)), a frequência natural não amortecida ( $\omega_n$ ) e o coeficiente de amortecimento ( $\xi$ ) associados considerando o SSSC realizando 60% de compensação reativa estática na linha de transmissão entre as barras 7 e 8.

Os dados da Tabela 5.5 comprovam a estabilidade do sistema simétrico com a atuação do SSSC compensando 60% da reatância da linha, pois sua introdução no sistema foi capaz de acrescentar amortecimento ao modo interárea, tornando-o fracamente amortecido. Os demais modos oscilatórios são pouco afetados.

Tabela 5.5 – Autovalores Dominantes – SSSC sem controlador.

|                | <b>Autovalores</b>    | $\xi$  | $\omega_n$ (rad/s) | $\omega_n$ (Hz) |
|----------------|-----------------------|--------|--------------------|-----------------|
| Modo Local 1   | $-0,2490 \pm j6,3248$ | 0,0393 | 6.3297             | 1,0074          |
| Modo Local 2   | $-0,1696 \pm j5,8896$ | 0,0288 | 5.8920             | 0,9378          |
| Modo Interárea | $-0,0086 \pm j4,6735$ | 0,0018 | 4.6735             | 0,7438          |

Segundo a equação (3.8) deduzida no Capítulo 3, quanto maior a compensação que se deseja realizar com o SSSC, maior deve ser a tensão série inserida no sistema elétrico. Este é um fator a ser levado em consideração no projeto do dispositivo, pois valores elevados desta tensão podem ser inviáveis de serem obtidos.

Na Figura 5.5 é mostrada a curva da tensão série (equação (3.8)) necessária para obtenção da compensação reativa fixa desejada, para o SSSC instalado no sistema entre as barras 7 e 8.

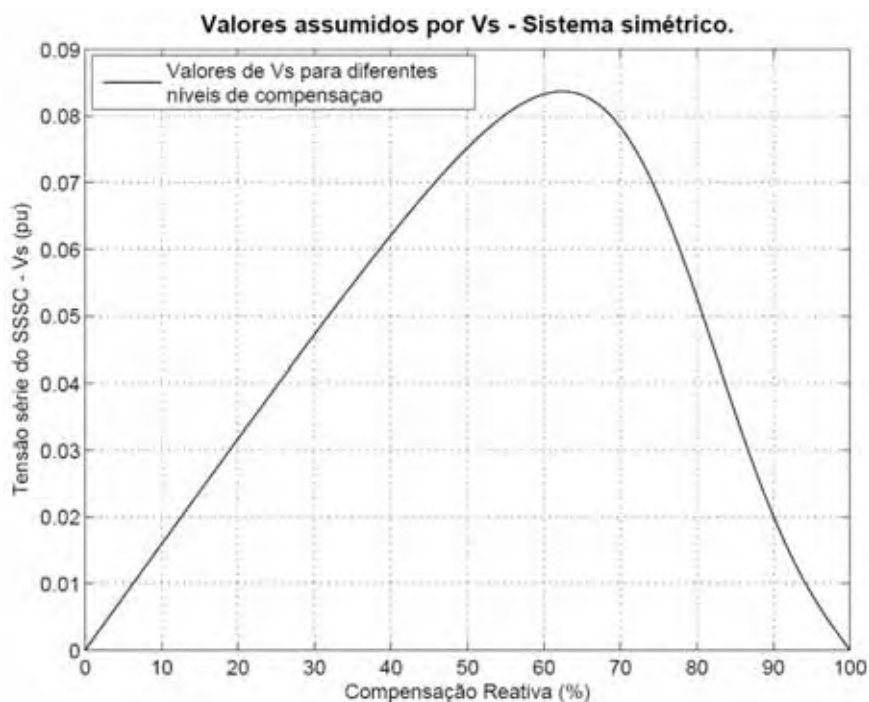


Figura 5.5 – Valores assumidos por  $V_s$  variando a compensação reativa – SSSC entre as barras 7 e 8.

Ao se comparar a curva mostrada na Figura 5.5 com uma simulação apresentada na referência [32], conclui-se que consideração da resistência elétrica do sistema de transmissão altera o formato da curva característica da tensão série inserida pelo SSSC e depende substancialmente do valor da resistência da linha de transmissão. Caso fosse desconsiderada a resistência do sistema de transmissão, a curva mostrada na Figura 5.5 teria uma forma hiperbólica crescente, atingindo o infinito para 100% de compensação, como pode ser inferido a partir da referência [32].

No caso do sistema simétrico considerado, o nível de compensação necessário para amortecer o modo interárea é impraticável. Além disso, é pequena a taxa de amortecimento inserida (observe que o  $\xi$  obtido para o modo interárea é igual a 0,0018). Este problema pode ser solucionado adicionando-se um controlador suplementar para as variáveis do SSSC, com o intuito de fornecer mais amortecimento aos modos oscilatórios e diminuir o nível de compensação reativa fixa necessária para o mesmo fim.

#### 5.2.4 Sistema Simétrico – SSSC com Controlador de Primeira Ordem

Para permitir uma variação na compensação estática de acordo com as solicitações do sistema elétrico, é introduzido um controlador adicional representado por um bloco de primeira ordem acoplado ao SSSC para desempenhar esta função. Este tipo de controlador foi formulado no item 4.2 (Capítulo 4) e serão utilizadas as equações dinâmicas obtidas (equações (4.3) e (4.4)).

Como sinal de entrada do controlador optou-se pela utilização das variações da potência ativa da linha de transmissão onde o dispositivo SSSC encontra-se instalado (por tratar-se de um sinal disponível no local de conexão do SSSC). A constante de tempo de atuação do controlador foi fixada em  $T_{SSC} = 0,05$  (s) (este valor foi obtido através de simulações e comparação das respostas obtidas) e o SSSC atuará fazendo uma compensação reativa fixa de 40% da reatância nominal da linha de transmissão que interliga as barras 7-8 do sistema simétrico.

Para se avaliar a eficácia deste controlador na estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência foram atribuídos diversos valores ao ganho  $K_{SSC}$  e na Figura 5.6 é mostrada a trajetória do par complexo conjugado que caracteriza o modo oscilatório interárea, em função destes ganhos.

A partir da trajetória mostrada na Figura 5.6 pode-se concluir que ao se aumentar o valor de  $K_{SSSC}$  a tendência do autovalor relacionado ao modo interárea é se afastar do eixo imaginário. A partir de um determinado valor de  $K_{SSSC}$  o sentido da trajetória se inverte e o autovalor tende a se aproximar do eixo imaginário (no caso do sistema simulado, o valor de  $K_{SSSC}$  onde ocorre a inversão do sentido da trajetória foi em torno de 0,15).

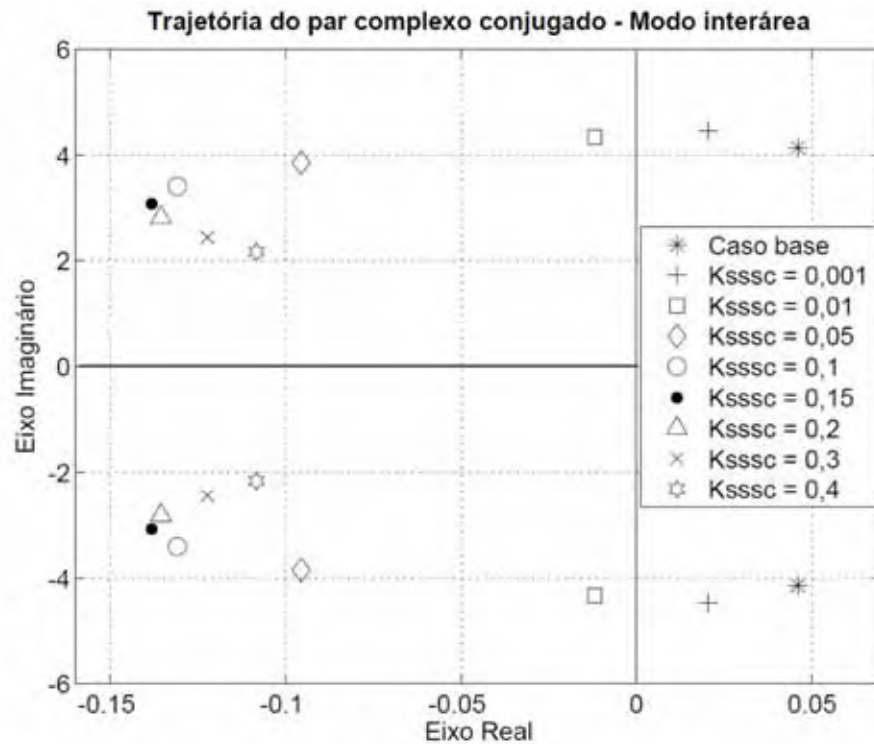


Figura 5.6 – Trajetória do par complexo conjugado representante do modo interárea.

Por meio de simulações adicionais observou-se que os melhores valores de  $K_{SSSC}$  encontrados para o ponto de operação considerado (aqueles que forneceram maior amortecimento) situaram-se em torno de 0,2 e na Tabela 5.6 são apresentados os autovalores de interesse para esta situação (matriz de estados A – equações (4.3) e (4.4)).

Tabela 5.6 – Autovalores Dominantes – SSSC com controlador de primeira ordem ( $K_{SSSC} = 0,2$ ).

|                | <b>Autovalores</b>    | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|----------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1   | $-0,2374 \pm j6,2844$ | 0,0378                  | 6,2889                               | 1,0000                            |
| Modo Local 2   | $-0,1623 \pm j5,8698$ | 0,0276                  | 5,8721                               | 0,9346                            |
| Modo Interárea | $-0,1356 \pm j2,8150$ | 0,0481                  | 2,8183                               | 0,4485                            |

O uso do controlador de primeira ordem acoplado ao SSSC se mostrou uma opção mais vantajosa se levado em consideração os dados obtidos anteriormente (SSSC sem o controlador – apenas com compensação reativa fixa) pois a estabilidade do sistema foi alcançada, com um menor valor de compensação reativa fixa. Porém, é evidente a existência de um valor limitante para o ganho do controlador ( $K_{SSSC} \approx 0,2$ ), que fornece o máximo amortecimento agregado. Além disso, apesar de se obter a estabilidade do sistema elétrico, o valor do coeficiente de amortecimento associado ao modo interárea de oscilação é relativamente pequeno (0,0481, de acordo com a Tabela 5.6).

Este fato pode ser explicado analisando-se os fatores de participação do modo de oscilação interárea, mostrados na Figura 5.7 onde se observa a pequena participação da variável de saída do controlador de primeira ordem ( $\Delta V_S$ ) no modo oscilatório. Comparando-se com a Figura 5.2(c) pode-se concluir que a máquina geradora 1, juntamente com a máquina 2, permanecem como as mais participativas no modo oscilatório interárea.

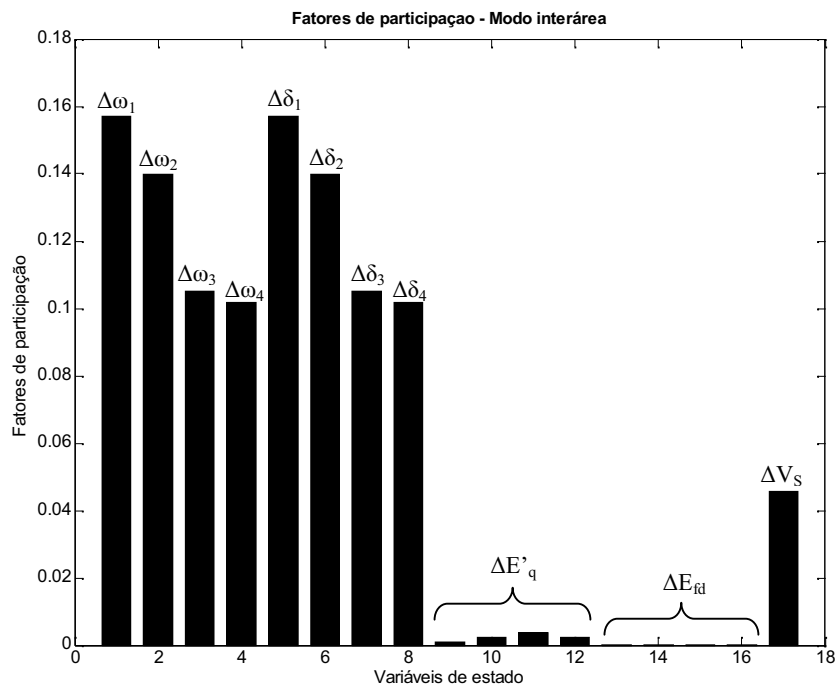


Figura 5.7 – Fatores de participação no modo interárea com o uso do controlador de primeira ordem.

Outro efeito do aumento do ganho  $K_{SSSC}$  do controlador de primeira ordem observado foi que quanto maior este ganho, maiores serão os desvios angulares dos geradores, em regime permanente. Isto pode ser verificado pelas curvas dos geradores 2 e 3, mostradas nas Figura 5.8(a) e (b), respectivamente.

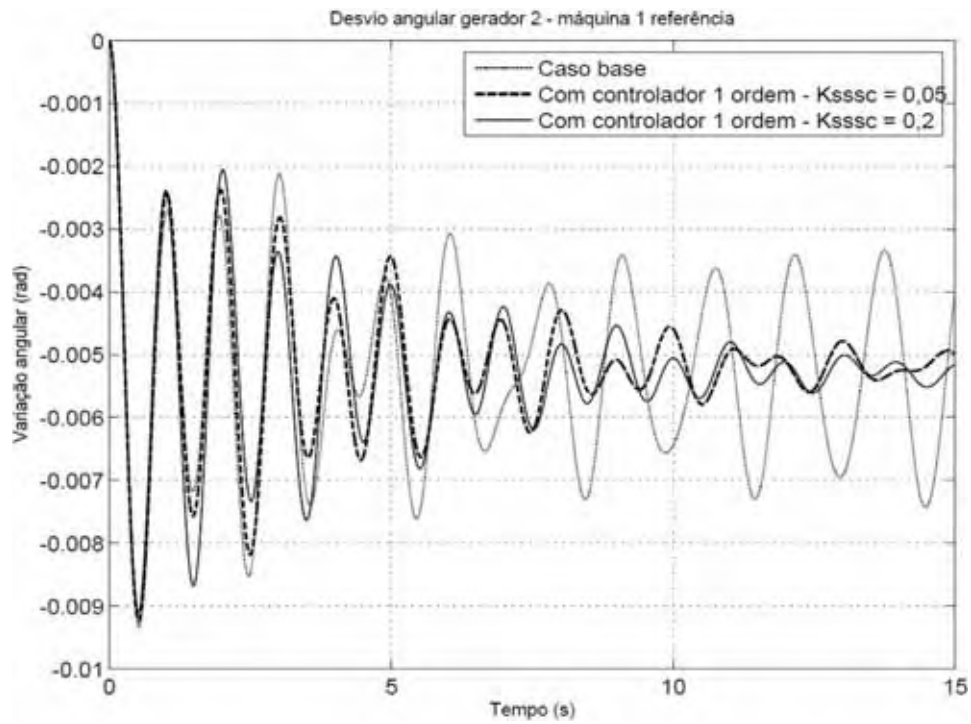


Figura 5.8(a) – Desvio do ângulo interno do gerador 2.

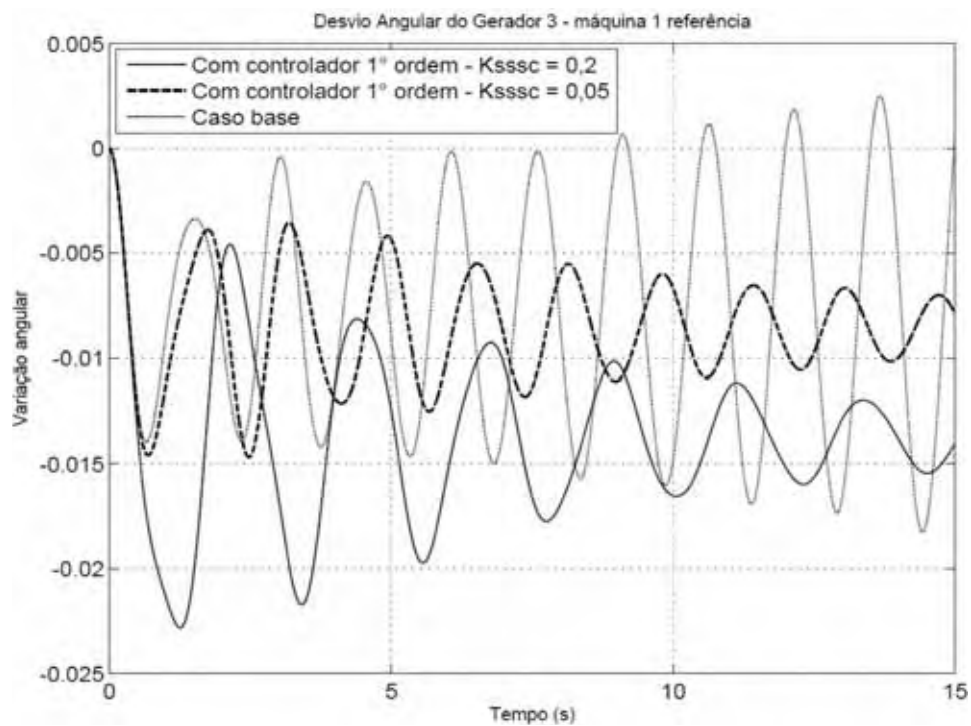


Figura 5.8(b) – Desvio do ângulo interno do gerador 3.

O uso do controlador de primeira ordem acoplado ao dispositivo SSSC, apesar de tornar o sistema estável, mostrou-se pouco satisfatória pois sua operação é limitada a uma

pequena faixa de ganhos, além de exigir um nível de compensação reativa fixa relativamente alta (no caso do sistema sob estudo, 40%). Para melhorar o desempenho do sistema elétrico é proposta a utilização de um controlador mais elaborado, capaz de efetuar a correção de fase de um sinal de entrada e, deste modo, injetar maior amortecimento as oscilações de interesse. Este controlador seria o POD (Power Oscillation Damping).

### 5.2.5 Sistema Simétrico – SSSC com Controlador POD

O acoplamento de um controlador POD aos dispositivos FACTS permite a injeção de amortecimento aos modos oscilatórios, aprimorando sua atuação nos sistemas elétricos de potência.

Para a inclusão do POD no dispositivo FACTS SSSC deve-se encontrar qual a sua melhor localização para uma operação eficiente.

Das análises realizadas nos itens anteriores sabe-se que o sistema objeto de estudo é instável devido à presença de um modo interárea não amortecido. Como destacado no Capítulo 4, o cálculo dos resíduos da função de transferência do sistema estudado fornece informações da melhor localização para a instalação dos FACTS e, conseqüentemente, do controlador POD.

Na Tabela 5.7 são mostrados os resíduos encontrados com a inserção do POD/SSSC em diversas linhas de transmissão do sistema elétrico teste abordado, para os três modos oscilatórios de interesse (os valores apresentados foram obtidos considerando o SSSC compensando 10% dos reativos da linha de transmissão em que se encontra instalado e com a constante de tempo  $T_{SSSC}$  fixada em 0,001 segundos).

Pela análise dos dados mostrados na Tabela 5.7 pode-se verificar que a instalação do SSSC/POD nas linhas de transmissão da área 1 afetam principalmente os modos locais dessa área, em detrimento dos modos locais da área 2 e do modo interárea. De maneira similar, a instalação do SSSC/POD nas linhas de transmissão pertencentes à área 2, afetam principalmente os modos locais destas área, não afetando fortemente os modos locais da área 1 e o modo interárea. Quando se considera o conjunto SSSC/POD instalado nas linhas de transmissão que interligam as duas áreas, é visível a maior participação do SSSC/POD no modo interárea de oscilação.

Analisando-se os resíduos obtidos para a instalação do conjunto SSSC/POD nas linhas

de interligação, conclui-se que a melhor localização é entre as barras 7 e 8 (maior resíduo). Observe que o conjunto também tem uma ativa participação no modo interárea de oscilação caso seja instalado entre as barras 6-7 ou 8-9, o que pode ser explicado analisando-se o diagrama unifilar deste sistema (mostrado no Apêndice III), onde se percebe que estas interligações são um prolongamento da linha de transmissão entre as barras 7 e 8.

Tabela 5.7 – Resíduos – SSSC com controlador POD.

| Linha de Transmissão |             | Modo Local 1 | Modo Local 2 | Modo Interárea |                   |
|----------------------|-------------|--------------|--------------|----------------|-------------------|
| Barra inicial        | Barra final |              |              |                |                   |
| 1                    | 5           | 19,811       | 0,210        | 2,660          | Área 1            |
| 2                    | 6           | 32,300       | 0,038        | 2,484          |                   |
| 5                    | 6           | 20,718       | 0,202        | 2,680          |                   |
| 6                    | 7           | 0,107        | 0,195        | 10,760         | Interli-<br>gação |
| 7                    | 8           | 0,330        | 0,161        | 12,825         |                   |
| 8                    | 9           | 0,325        | 0,057        | 9,240          |                   |
| 3                    | 9           | 0,656        | 29,024       | 1,420          | Área 2            |
| 4                    | 10          | 0,011        | 20,030       | 2,272          |                   |
| 9                    | 10          | 0,013        | 20,145       | 2,551          |                   |

Optando pela inserção dos dispositivos SSSC/POD na linha de transmissão entre as barras 7 e 8 e considerando como sinal de entrada do controlador POD as variações da potência ativa nesta linha ( $\Delta P_{78}$ ), são calculados seus parâmetros (mostrados na Tabela 5.8 para diferentes valores do amortecimento desejado para o modo de oscilação interárea ( $\xi_{des}$ )).

Tabela 5.8 – Parâmetros do controlador POD – amortecimento do modo interárea.

| $K_{SSSC}$ | $\xi_{des}$ | $T_w$ (s) | $T_1 = T_3$ (s) | $T_2 = T_4$ (s) |
|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| 0,42716    | 0,200       | 1,00      | 0,0947          | 0,59246         |
| 0,80323    | 0,400       | 1,00      | 0,0947          | 0,59246         |
| 1,1625     | 0,600       | 1,00      | 0,0947          | 0,59246         |

Estes parâmetros foram calculados de acordo com as expressões deduzidas no

Capítulo 4, utilizando-se o método da compensação de fase.

Observe que mesmo exigindo maior amortecimento para o modo interárea as constantes de tempo do POD não se alteram, apenas o valor do ganho é aumentado (a explicação para este fato é a mesma apresentada para o caso do sinal adicional PSS – item 5.2.2).

Utilizando-se as equações (4.12) e (4.13) deduzidas no Capítulo 4, é feita a inserção do conjunto SSSC/POD no sistema simétrico e são calculados os autovalores para o ponto de operação considerado, que são mostrados nas Tabelas 5.9 a 5.11.

Tabela 5.9 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea  $\xi_{des} = 0,2$ .

|                  | <b>Autovalores</b>    | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1     | $-0,2459 \pm j6,2914$ | 0,0391                  | 6,2962                               | 1,0021                            |
| Modo Local 2     | $-0,1646 \pm j5,8754$ | 0,0280                  | 5,8777                               | 0,9355                            |
| Modo Interárea   | $-0,8566 \pm j4,1003$ | 0,2045                  | 4,1888                               | 0,6667                            |
| Modo Controlador | $-1,398 \pm j1,1941$  | 0,7604                  | 1,8386                               | 0,2926                            |

Tabela 5.10 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea  $\xi_{des} = 0,4$ .

|                  | <b>Autovalores</b>     | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1     | $-0,2474 \pm j 6,2837$ | 0,0393                  | 6,2885                               | 1,0008                            |
| Modo Local 2     | $-0,1650 \pm j 5,8715$ | 0,0281                  | 5,8738                               | 0,9349                            |
| Modo Interárea   | $-1,7283 \pm j 4,1446$ | 0,3849                  | 4,4905                               | 0,7147                            |
| Modo Controlador | $-0,9711 \pm j 1,4420$ | 0,5586                  | 1,7385                               | 0,2767                            |

Tabela 5.11 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea  $\xi_{des} = 0,6$ .

|                  | <b>Autovalores</b>    | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1     | $-0,2459 \pm j6,2786$ | 0,0391                  | 6,2834                               | 1,0000                            |
| Modo Local 2     | $-0,1641 \pm j5,8692$ | 0,0280                  | 5,8715                               | 0,9345                            |
| Modo Interárea   | $-2,4143 \pm j4,3325$ | 0,4868                  | 4,9598                               | 0,7894                            |
| Modo Controlador | $-0,6680 \pm j1,4293$ | 0,4234                  | 1,5777                               | 0,2511                            |

Em todas as situações consideradas, os autovalores passaram a ter parte real negativa, o que pelo primeiro método de *Lyapunov* caracteriza um sistema linear estável.

Em vista disto, pode-se afirmar que o POD se mostrou como uma grande alternativa para inserir amortecimento ao modo oscilatório antes instável para todas as condições de operação estudadas, pois foi capaz de inserir grandes cotas de amortecimento como pode ser verificado analisando-se os valores mostrados nas Tabelas 5.9 a 5.11.

Deve-se enfatizar que os valores desejados de amortecimento foram obtidos, com exceção do caso considerado na Tabela 5.11 ( $\xi_{des} = 0,6$ ) onde o amortecimento efetivo ficou 18% menor do que o valor desejado. Ainda assim trata-se de um grande resultado para um modo oscilatório antes instável.

A inclusão do controlador POD fez surgir um novo modo oscilatório (modo controlador, nas Tabelas 5.9 a 5.11) de baixa frequência com alto coeficiente de amortecimento associado. Este novo modo se origina das interações do sistema elétrico com o controlador POD. Outro resultado que pode ser obtido da análise dos dados mostrados nas Tabelas 5.9 a 5.11 é que quanto mais amortecimento se exige do POD para o modo interárea, mais amortecimento se remove do novo modo oscilatório (modo controlador).

A atuação do POD teve grande influência no modo interárea de oscilação e pouca participação nos modos locais, o que pode ser explicado pelo estudo dos fatores de participação apresentados na Figura 5.9 (observe a grande participação do POD no modo interárea de oscilação e também no modo controlador e a pequena participação do POD nos modos locais). Isto se deve ao fato de que a inclusão do SSSC/POD ter sido feita na linha de transmissão que interliga as duas áreas do sistema elétrico simétrico (linha de transmissão entre as barras 7 e 8).

Na Figura 5.10 é mostrado o deslocamento dos autovalores associados ao modo interárea e ao modo controlador para diversos valores de ganho do controlador POD.

Analisando-se o deslocamento do autovalor do modo oscilatório interárea observa-se que este se afasta do eixo imaginário quase que paralelamente ao eixo real, sem expectativa de sofrer alguma limitação (este, em tese, cresceria indefinidamente com o aumento do ganho do POD).

Em contrapartida, o par complexo associado ao modo controlador se desloca na direção do semiplano direito do plano complexo e as simulações mostraram que este pode se tornar um modo instável (autovalor com parte real positiva) para valores do ganho do POD maiores que 6,0 no caso do sistema sob estudo. Desta maneira, o modo controlador é que limitaria o valor do ganho  $K_{SSSC}$ .

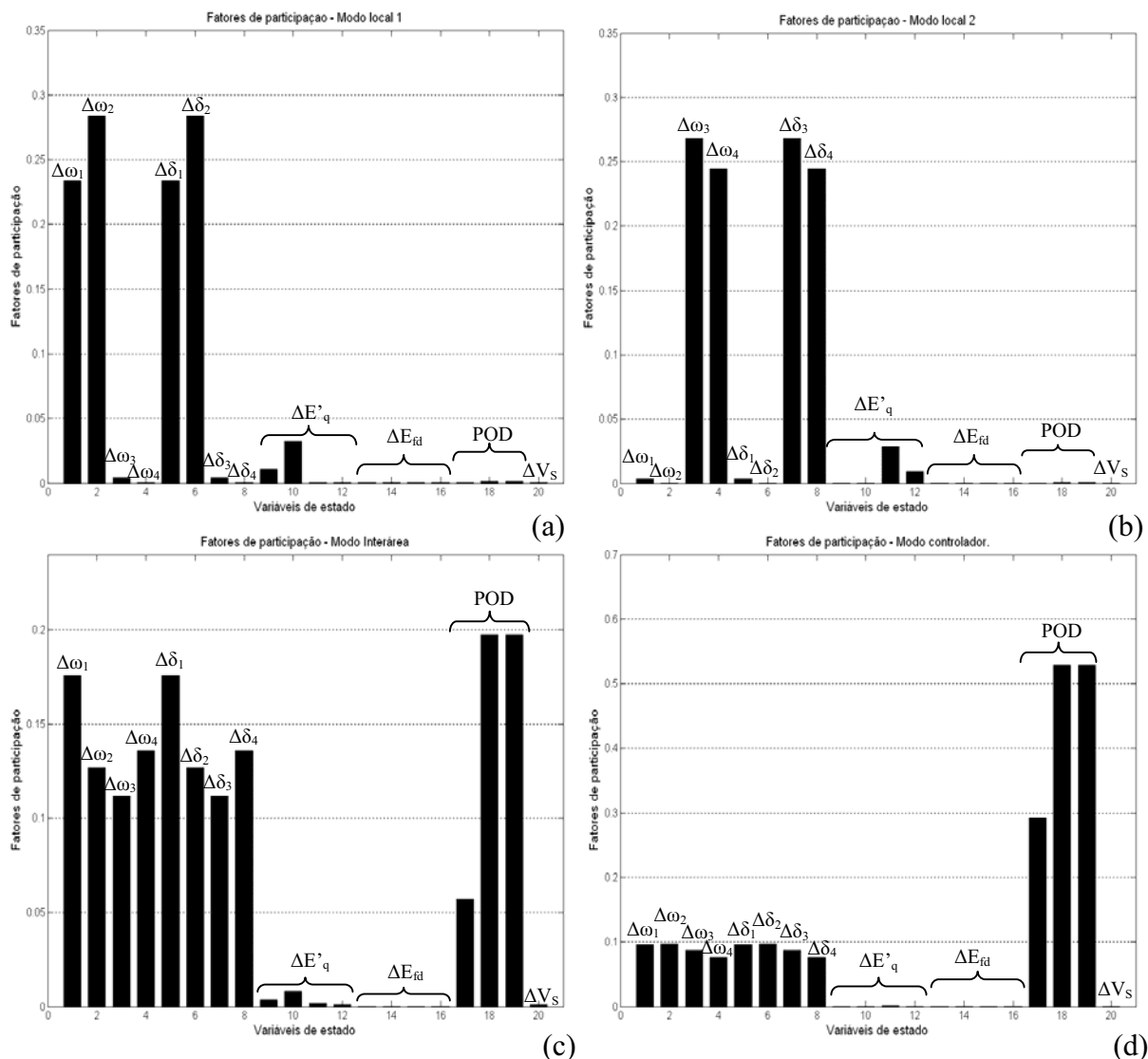


Figura 5.9 – Fatores de participação do sistema teste com a inclusão do SSSC/POD ( $K_{SSSC} = 0,42716$ ).

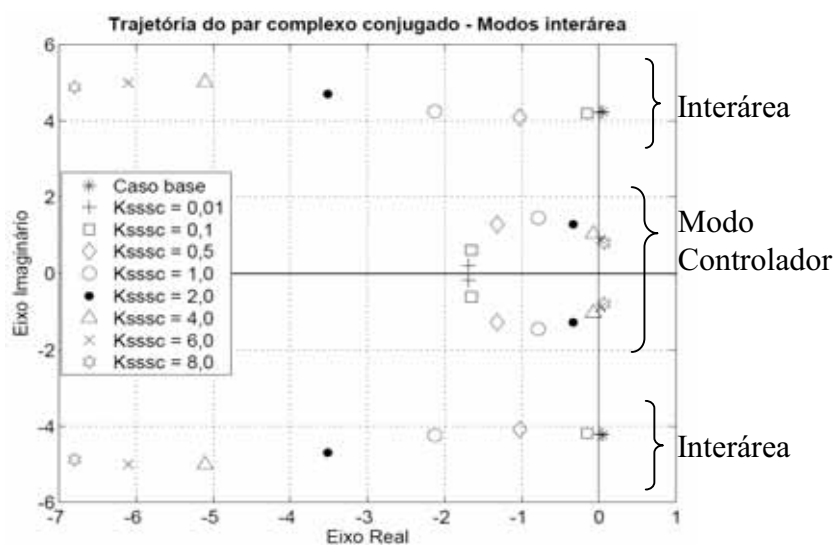


Figura 5.10 – Trajetória do par complexo conjugado dos modos de oscilações interárea e controlador.

Nas Figuras 5.11 e 5.12 são apresentadas as variações do ângulo interno das máquinas geradoras 2 e 3, respectivamente, para diferentes valores de ganho do controlador POD.

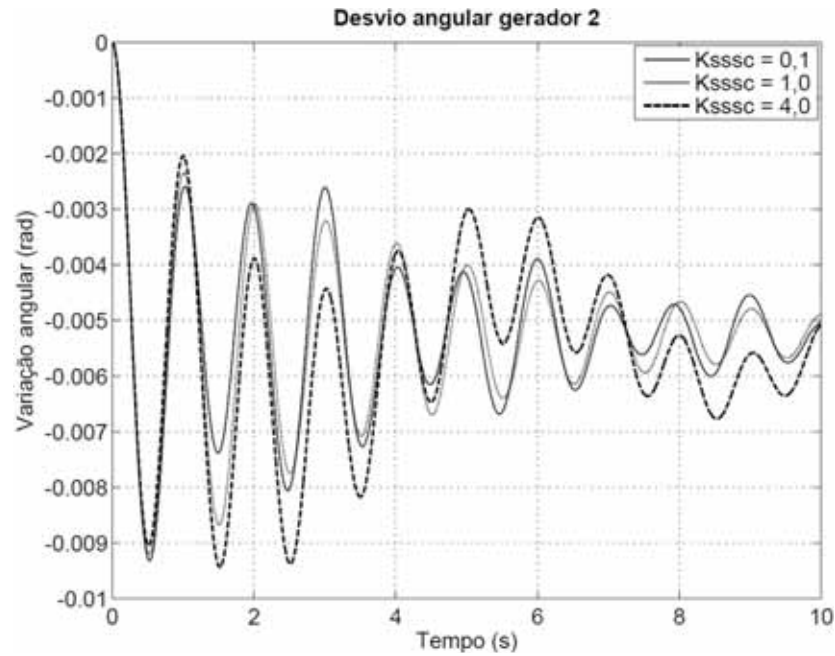


Figura 5.11 – Desvio angular do gerador 2.

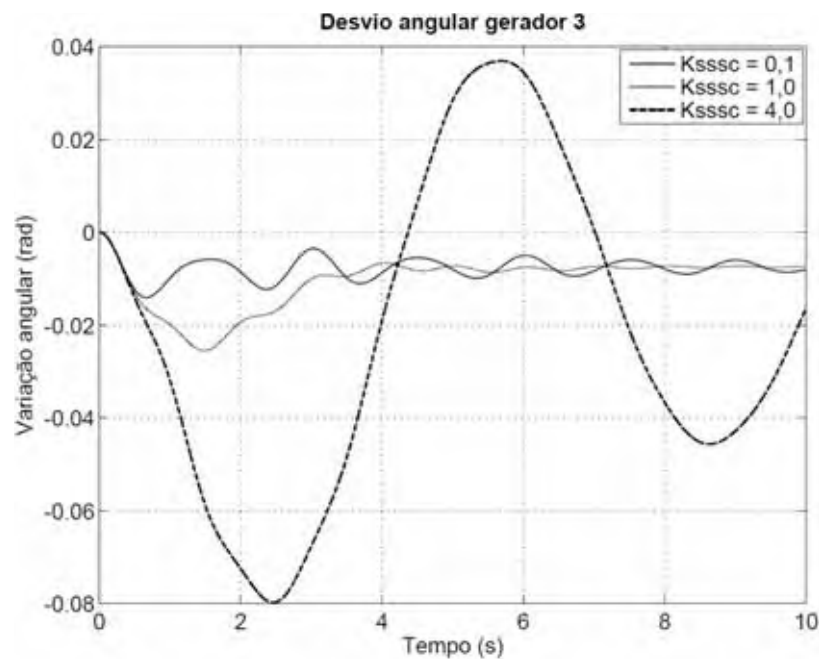


Figura 5.12 – Desvio angular do gerador 3.

Analisando as curvas da Figura 5.11 pode se concluir que as variações no ganho do POD não provocam alterações significativas no comportamento dinâmico do ângulo interno

do gerador 2. Entretanto, é visível a influência do ganho do POD na resposta dinâmica da máquina geradora 3, onde as oscilações em torno do ponto de regime permanente são menores para valores de  $K_{SSSC}$  entre 0,1 e 1,0, diferente das oscilações com o ganho de 4,0.

Baseando-se apenas nas curvas das Figuras 5.11 e 5.12 vê-se que os melhores comportamentos dinâmicos das variações do deslocamento angular dos geradores são obtidos quando o ganho do controlador POD é próximo da faixa de 0,1 a 1,5, para o ponto de operação considerado. Dentro desta faixa de valores se encontram os dados obtidos para a construção das Tabelas 5.9 a 5.11, onde os ganhos  $K_{SSSC}$  foram calculados com a utilização da técnica de resíduos e os valores das constantes de tempo pelo método de compensação de fase.

Para uma melhor comparação do comportamento dinâmico do sistema simétrico com a instalação do conjunto SSSC/POD e o caso base, considere as Figuras 5.13 (desvios angulares), 5.14 (variações da velocidade angular dos rotores) e 5.15 (variação do fluxo de potência ativa). Nestas Figuras o ajuste dos parâmetros do POD são os mostrados na Tabela 5.8, com  $\xi_{des}$  estipulado em 0,2.

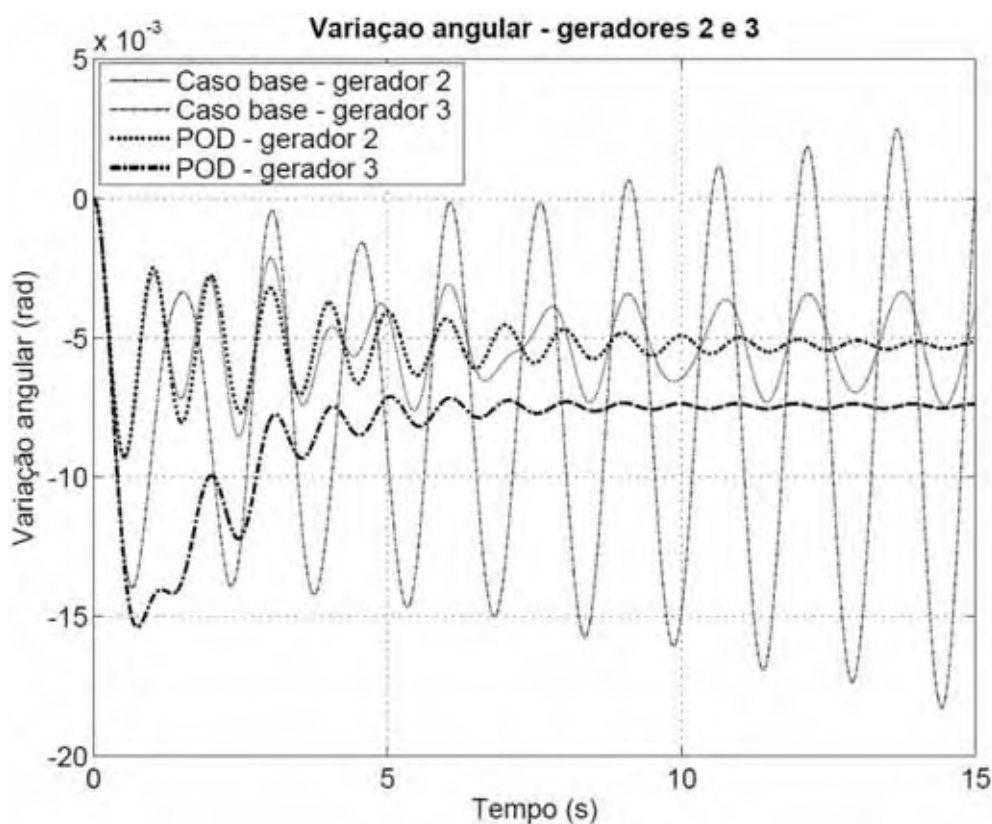


Figura 5.13 – Desvios angulares – Comparação entre POD e Caso base.

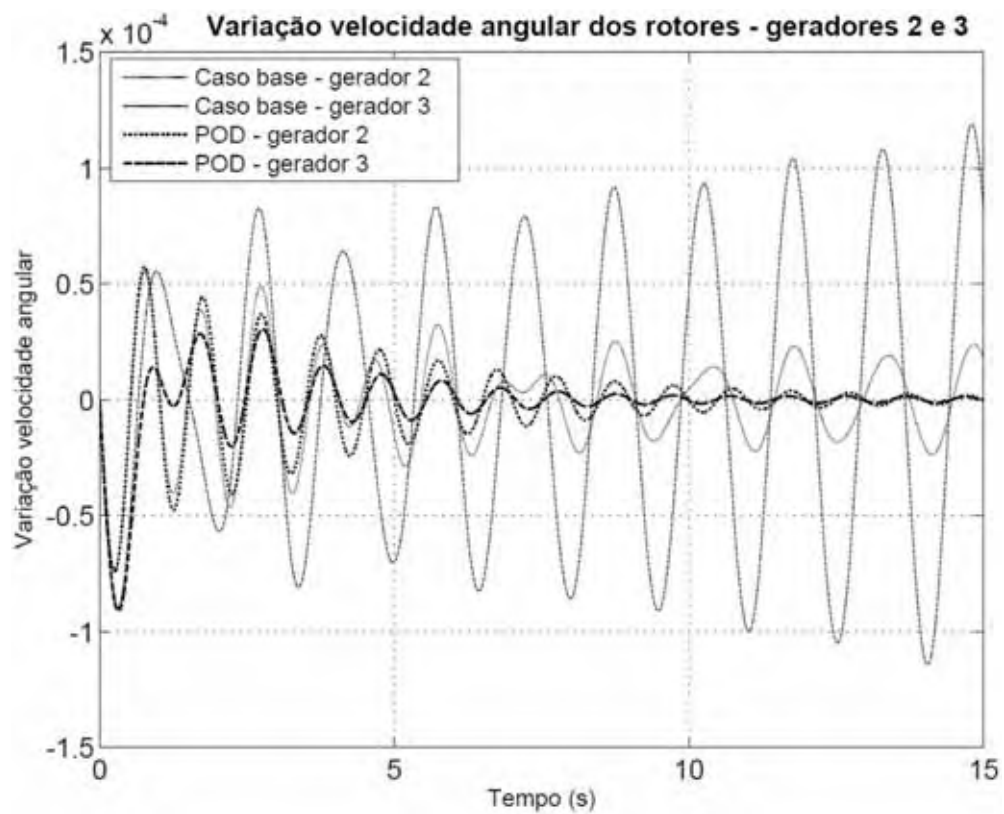


Figura 5.14 – Variação velocidade angular – Comparação entre POD e Caso base.

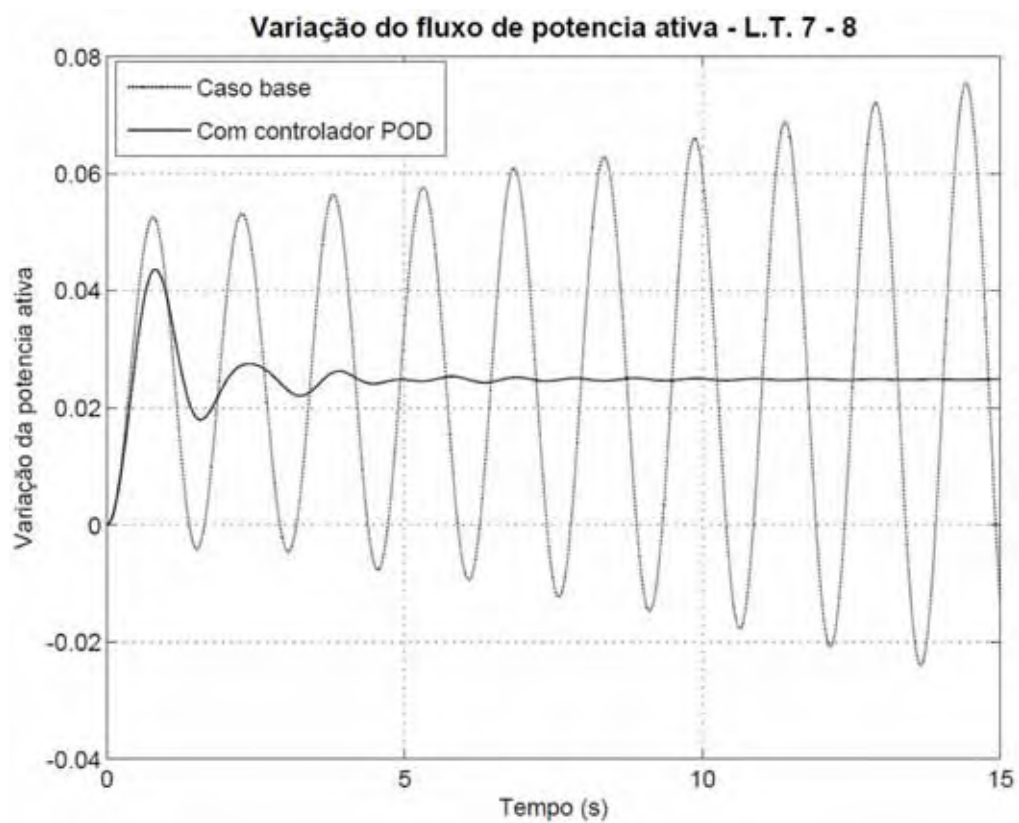


Figura 5.15 – Variação do fluxo potência ativa – Comparação entre POD e Caso base.

A primeira constatação é que a inclusão do SSSC/POD torna o sistema simétrico estável às pequenas perturbações para o ponto de operação considerado.

Com relação ao comportamento dos desvios angulares, as curvas mostradas indicam que o gerador 2, em regime permanente, terá um menor desvio quando comparado com o gerador 3. As curvas referentes ao comportamento das variações da velocidade angular dos rotores seguem o mesmo padrão, sendo possível observar que a amplitude da primeira oscilação é maior para o gerador 3 que para o gerador 2. Um bom resultado é o apresentado com relação ao fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras 7 e 8 (Figura 5.15), de onde se conclui pela grande eficiência no controle do fluxo de potência exercido pelo conjunto SSSC/POD.

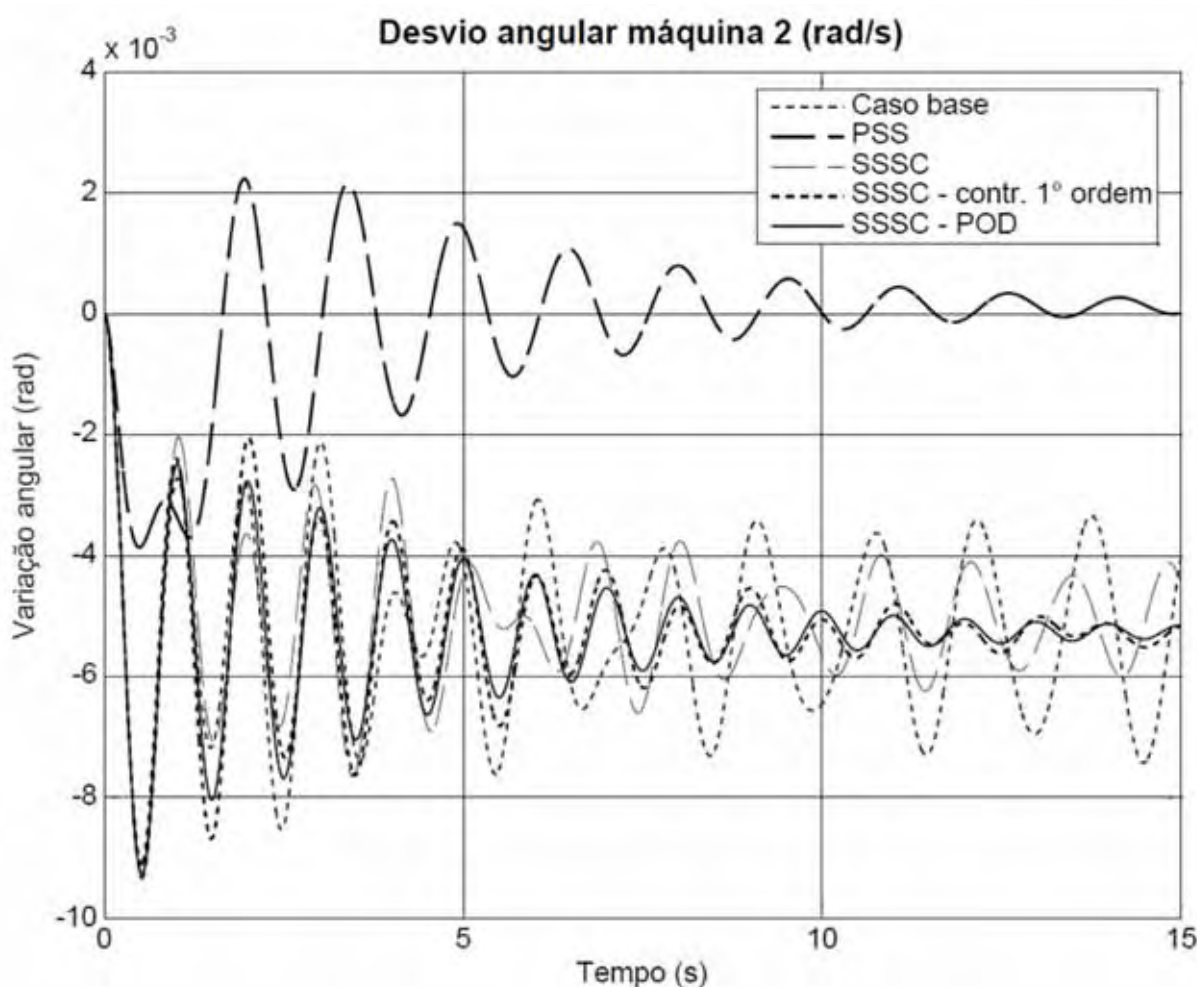


Figura 5.16 – Variação do ângulo interno da máquina 2 – Comparação entre os resultados.

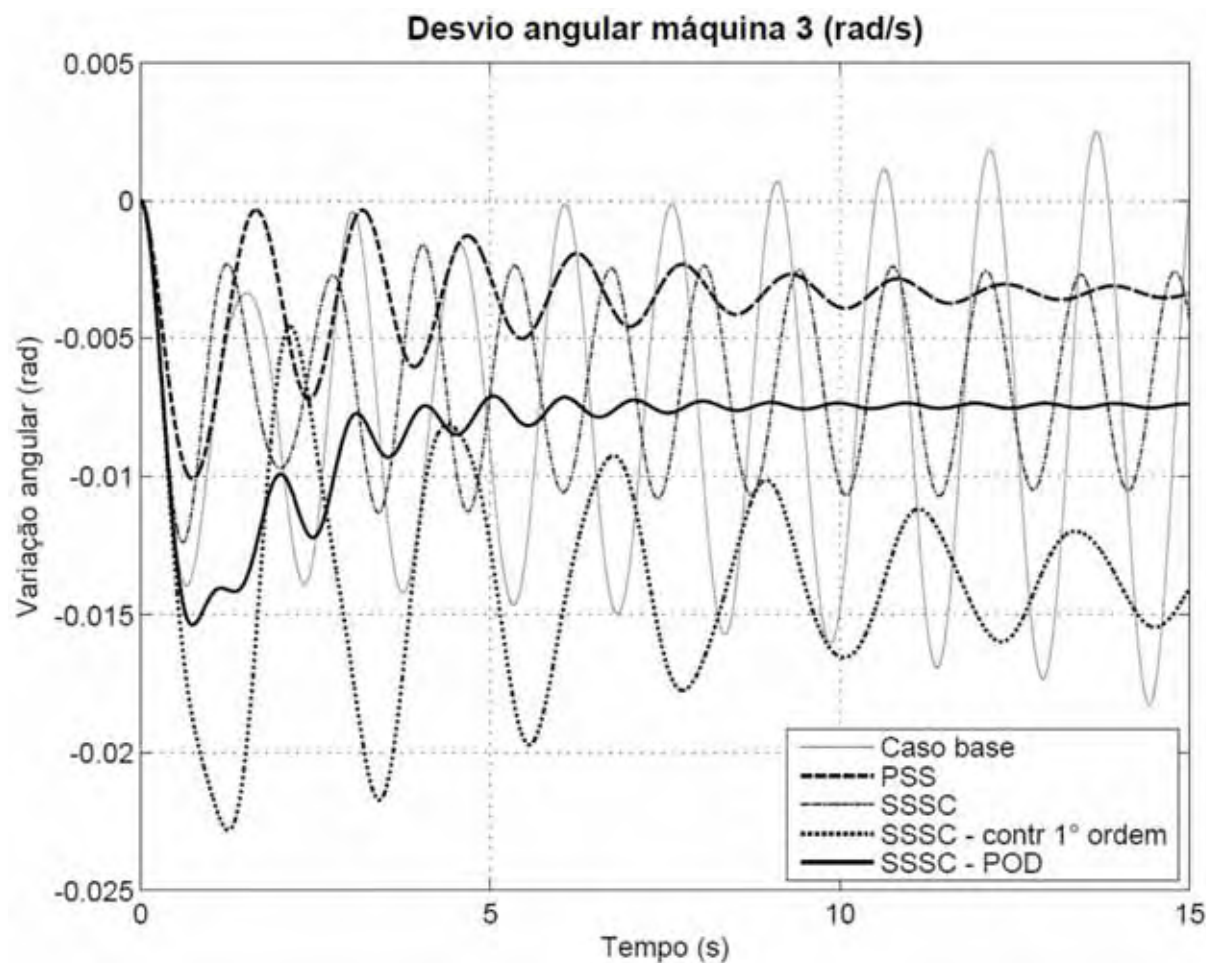


Figura 5.17 – Variação do ângulo interno da máquina 3 – Comparação entre os resultados.

Nas Figuras 5.16 e 5.17 são mostrados os melhores ajustes (obtidos através de simulações e posterior análise das curvas encontradas) para o sistema elétrico simétrico considerado. São mostradas as curvas das variações dos desvios angulares dos geradores 2 e 3 para o sistema em seu caso base, com o controlador PSS ( $K_{PSS} = 15,0951$ ), com o dispositivo FACTS SSSC sem controlador (60% de compensação reativa), com controlador de primeira ordem ( $K_{SSSC} = 0,2$ ) e o controlador POD ( $K_{SSSC} = 0,42716$ ). Para as conclusões seguintes é escolhida a máquina geradora 3 na representação do desvio angular ( $\Delta\delta_3 - \Delta\delta_1$ ), por ser mais fácil a distinção das curvas para esta máquina, quando comparadas com as curvas obtidas para a máquina 2.

Da análise das curvas apresentadas pode-se concluir que a utilização do PSS é responsável pelo menor desvio na variação do ângulo interno da máquina geradora 3, além de ter acrescentado um significativo amortecimento aos modos oscilatórios de baixa frequência. A atuação do controlador de primeira ordem provocou o maior desvio em regime permanente,

e, além disso, o amortecimento por ele introduzido aos modos oscilatórios não é bom quando comparado com os obtidos com o PSS e o controlador POD. O controlador POD por outro lado acrescentou maior amortecimento ao sistema elétrico, principalmente ao modo interárea, que era o modo problemático do sistema simétrico.

### 5.3. Sistema New England: 10 Geradores e 39 Barras

O sistema elétrico de potência conhecido como New England [7,33,38,39,40] também é muito utilizado no estudo das oscilações eletromecânicas de baixa frequência. Por ser um sistema de porte relativamente elevado, existe uma grande quantidade de interações entre as máquinas de uma mesma área (modos locais de oscilação) e também com as máquinas de outra área (modos interárea de oscilação).

Este sistema é composto de 10 geradores e seus principais dados, bem como o diagrama unifilar são mostrados no Apêndice IV.

#### 5.3.1 Sistema New England – Caso Base

A partir do ponto de operação que será considerado como caso base (resultados do fluxo de potência listados no Apêndice IV) é possível realizar a representação na forma de espaço de estados do sistema New England e se obtém total de 40 autovalores, sendo que 22 deles são reais e negativos enquanto que os outros 18 autovalores restantes correspondem a 9 modos oscilatórios de baixa frequência (9 pares complexos conjugados). Da mesma forma que o realizado no estudo do sistema teste anterior, são de interesse apenas os 9 modos oscilatórios (modos dominantes), já que os demais autovalores representam exponenciais decrescentes (em regime permanente tendem a zero) no domínio do tempo.

Na Tabela 5.12 são listados os autovalores dominantes, assim como a frequência natural de oscilação e o respectivo amortecimento associado a cada modo oscilatório presente no Sistema New England em seu caso base (equações (2.37) e (2.38)).

Dos autovalores dominantes três são estáveis (possuem parte real negativa), enquanto que seis modos oscilatórios são instáveis (apresentam parte real positiva).

Tabela 5.12 – Autovalores dominantes.

|                | <b>Autovalores</b>    | $\xi$   | $\omega_n$ (rad/s) | $\omega_n$ (Hz) |
|----------------|-----------------------|---------|--------------------|-----------------|
| Modo Local 1   | $-0,2631 \pm j8,2037$ | 0,0321  | 8,2079             | 1,3063          |
| Modo Local 2   | $-0,2368 \pm j8,1597$ | 0,0291  | 8,1631             | 1,2992          |
| Modo Local 3   | $-0,2219 \pm j8,0388$ | 0,0276  | 8,0419             | 1,2799          |
| Modo Local 4   | $0,1334 \pm j7,3146$  | -0,0182 | 7,3159             | 1,1644          |
| Modo Local 5   | $0,1872 \pm j7,0244$  | -0,0266 | 7,0269             | 1,1184          |
| Modo Local 6   | $0,3520 \pm j6,2683$  | -0,0561 | 6,2782             | 0,9992          |
| Modo Local 7   | $0,3155 \pm j6,6775$  | -0,0472 | 6,6850             | 1,0639          |
| Modo Local 8   | $0,1388 \pm j6,6887$  | -0,0207 | 6,6902             | 1,0648          |
| Modo Interárea | $0,0016 \pm j3,9096$  | -0,0004 | 3,9096             | 0,6222          |

Com isto, pode-se concluir pela instabilidade à pequenas perturbações do sistema elétrico New England para o ponto de operação considerado. Importante ressaltar que a instabilidade ocorre devido à existência de cinco modos locais (chamados de 4, 5, 6, 7 e 8 na Tabela 5.12) e um modo interárea não amortecidos.

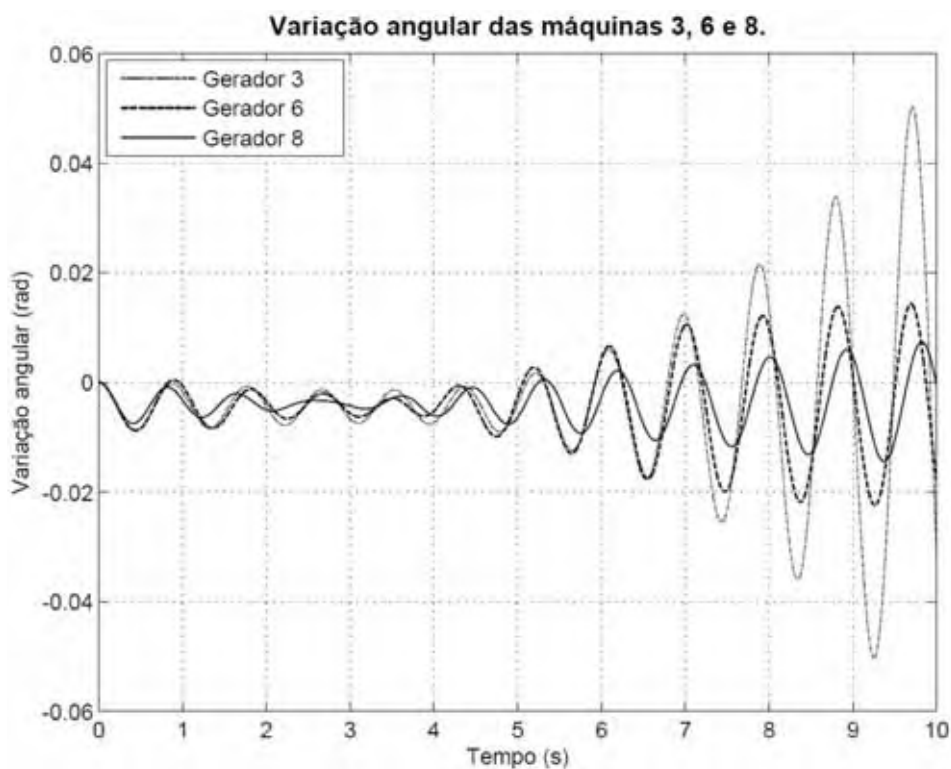


Figura 5.18 – Desvio do ângulo interno das máquinas 3, 6 e 8.

Na Figura 5.18 são apresentados os comportamentos dinâmicos dos desvios angulares dos geradores 3, 6 e 8 (de um total de dez máquinas, escolheu-se estas três para a representação), após a aplicação de uma perturbação do tipo degrau de intensidade 0,05 pu na potência mecânica de entrada do gerador 1 (mesma máquina utilizada como referência angular do sistema).

Como era de se esperar, a instabilidade é caracterizada por oscilações de amplitude crescente, o que indica falta de torque de amortecimento no sistema New England para o ponto de operação considerado.

Para uma melhor compreensão dos problemas oscilatórios que ocorrem no sistema New England, foram calculados os fatores de participação para cada modo, tanto estáveis quanto instáveis. As Figuras 5.19(a) a 5.19(i) apresentam os fatores de participação de cada modo, conforme nomeados na Tabela 5.12.

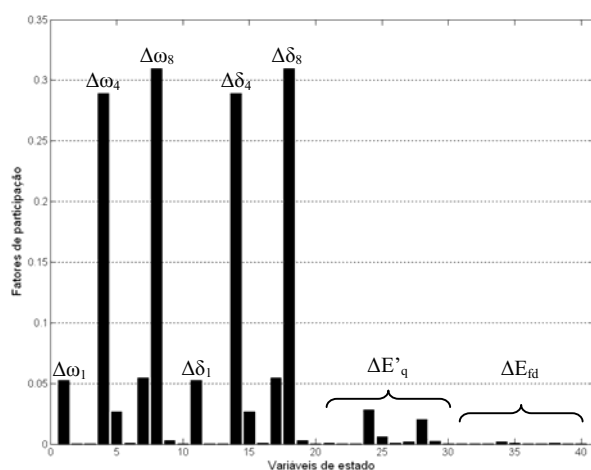


Figura 5.19(a) – Modo local 1.

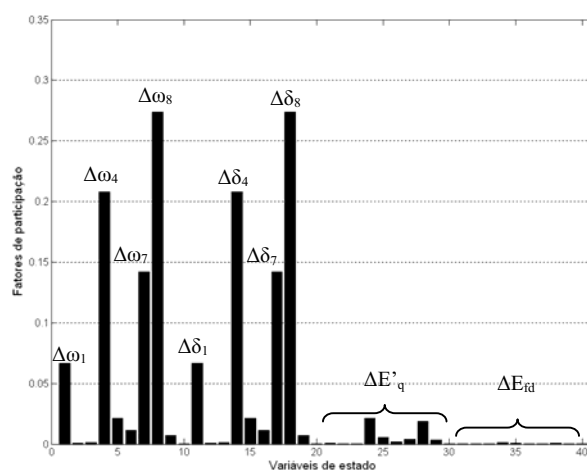


Figura 5.19(b) – Modo local 2.

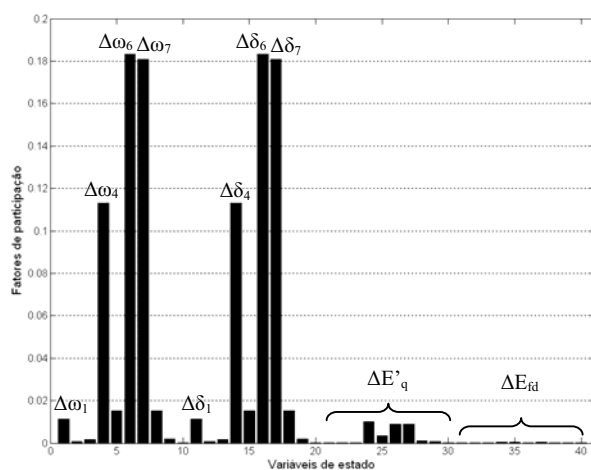


Figura 5.19(c) – Modo local 3.

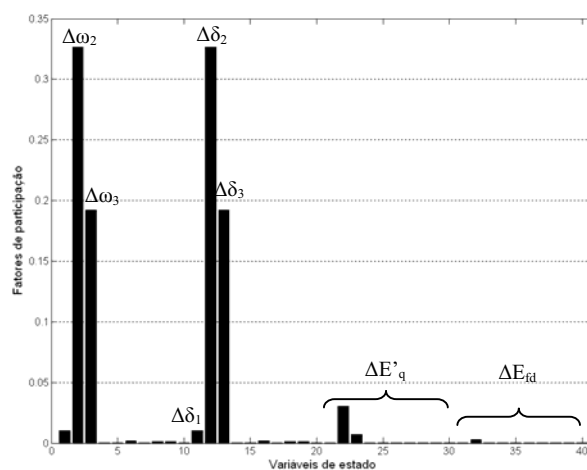


Figura 5.19(d) – Modo local 4.

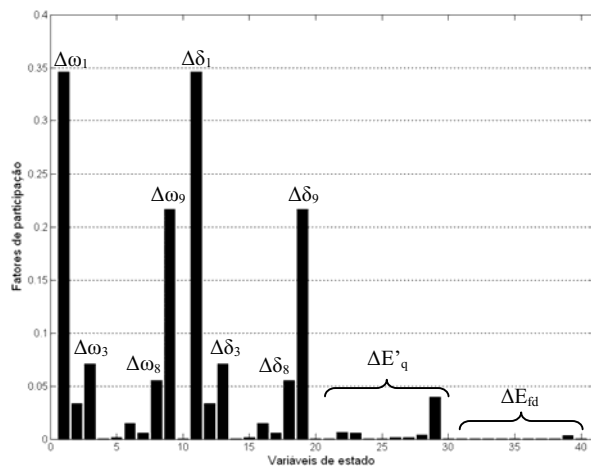


Figura 5.19(e) – Modo local 5.

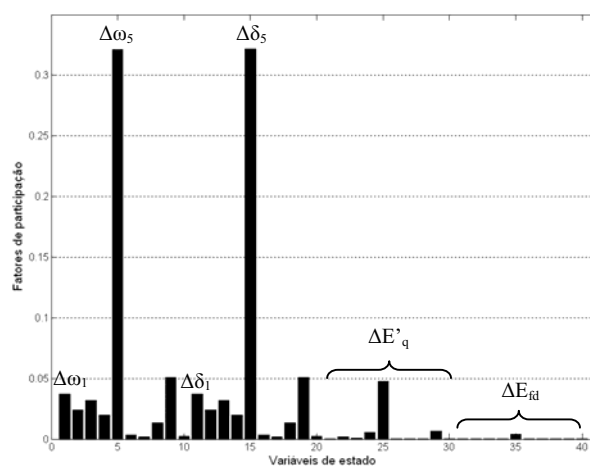


Figura 5.19(f) – Modo local 6.

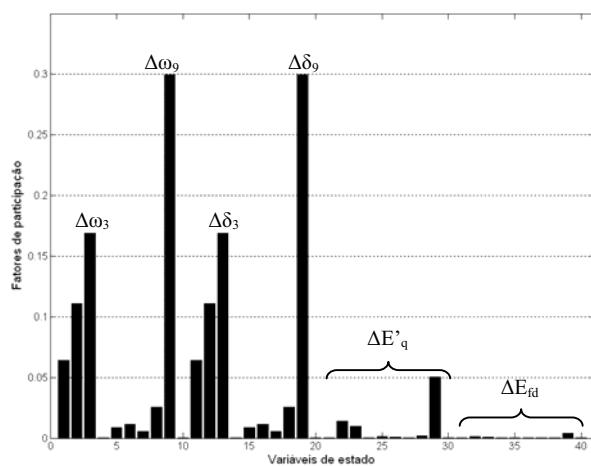


Figura 5.19(g) – Modo local 7.

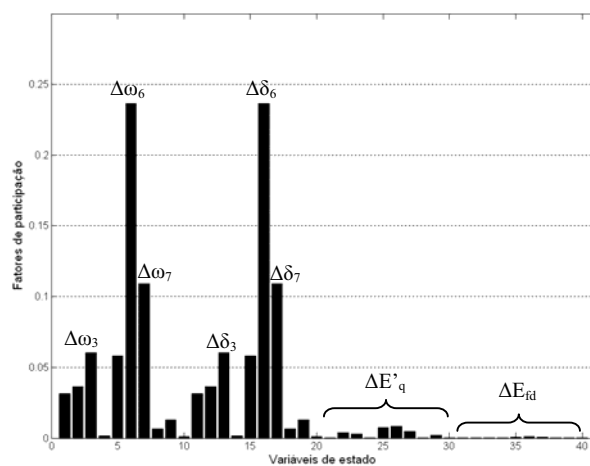


Figura 5.19(h) – Modo local 8.

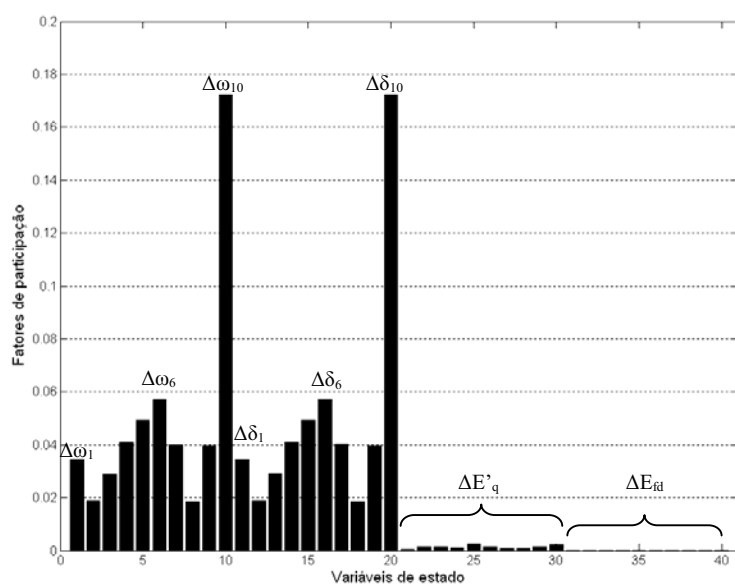


Figura 5.19(i) – Modo interárea.

O modo local 1 tem maior participação das máquinas 4 e 8; estas mesmas máquinas têm grande atuação no modo local 2 e uma pequena participação no modo local 3. A consideração de um dispositivo PSS instalado em alguma dessas duas máquinas teria significativa participação nos dois modos oscilatórios citados, mas neste ponto de operação os dois modos são estáveis (amortecimento positivo) e assim, não é necessária a instalação do dispositivo. A mesma idéia é válida para o modo local 3 que é estável (amortecido).

A mesma afirmação não pode ser feita a respeito dos modos locais 4, 5, 6, 7 e 8 e do modo interárea, que são modos instáveis.

A literatura especializada apresenta resultados que mostram que mais de um modo oscilatório podem ser corrigidos com a introdução de um único controlador [10,41]. O modo local 4 por exemplo, tem grande participação das máquinas 2 e 3 e as mesmas máquinas participam, mesmo que fracamente, no modo 7.

Pensando desta forma é proposta a utilização de dois dispositivos PSS a serem instalados no sistema elétrico: um PSS instalado na máquina geradora 2 (atuação nos modos locais 4 e 7) e outro dispositivo PSS na máquina geradora 9 (grande participação nos modos locais 5 e 7).

Como a atuação de qualquer controlador no sistema elétrico de potência sofre e exerce influência sobre o sistema como um todo, é possível que estes dois dispositivos possam deslocar os autovalores associados ao modo local 8 e ao modo interárea para o semiplano esquerdo do plano complexo tornando o sistema estável.

### 5.3.2 Sistema New England – Dispositivo PSS em Operação

Os dispositivos PSSs foram projetados pela teoria de controle clássico (item 4,4, Capítulo 4), de forma similar à realizada para o sistema teste anterior. O valor da constante de tempo  $T_w$  foi considerado igual a 1,0 segundo, enquanto que as constantes de tempo dos blocos lead-lag  $T_2 = T_4$  foram alteradas para 0,05 segundos (foram escolhidos estes valores por apresentarem melhores resultados em simulações preliminares). Os parâmetros ganho do PSS ( $K_{PSS}$ ) e as demais constantes de tempo ( $T_1 = T_3$ ) foram calculados e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.13 (considerando que a instalação do PSS poderia ser feita em qualquer máquina do sistema). Para a determinação destes parâmetros foram utilizadas as equações (4.39) a (4.41), do Capítulo 4.

Tabela 5.13 – Parâmetros de atuação do PSS – Sistema New England.

| Máquina<br>Geradora | Ganho ( $K_{PSS}$ ) |                   | $T_w$ (s) | $T_1 = T_3$ (s) | $T_2 = T_4$ (s) |
|---------------------|---------------------|-------------------|-----------|-----------------|-----------------|
|                     | $\xi_{des} = 0,2$   | $\xi_{des} = 0,6$ |           |                 |                 |
| 1                   | 16,2504             | 48,7510           | 1,0       | 0,2016          | 0,0500          |
| 2                   | 3,0281              | 9,0842            | 1,0       | 0,2102          | 0,0500          |
| 3                   | 3,3843              | 10,1529           | 1,0       | 0,1734          | 0,0500          |
| 4                   | 1,6829              | 5,0487            | 1,0       | 0,2316          | 0,0500          |
| 5                   | 1,3690              | 4,1070            | 1,0       | 0,3523          | 0,0500          |
| 6                   | 1,9874              | 5,9621            | 1,0       | 0,2645          | 0,0500          |
| 7                   | 3,0842              | 9,2527            | 1,0       | 0,1461          | 0,0500          |
| 8                   | 1,9168              | 5,7505            | 1,0       | 0,2190          | 0,0500          |
| 9                   | 1,7348              | 5,2044            | 1,0       | 0,2219          | 0,0500          |
| 10                  | 32,5066             | 97,5199           | 1,0       | 0,1000          | 0,0500          |

Considerando a atuação dos dois PSSs instalados nas máquinas 2 e 9 e fazendo a inserção de suas equações no modelo do sistema elétrico (equações (4.28) e (4.29)) , são obtidos os autovalores da matriz de estados “A”, conforme apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Autovalores dominantes – PSS nas máquinas 2 e 9 ( $\xi_{des} = 0,6$ ).

|                | Autovalores             | $\xi$   | $\omega_n$ (rad/s) | $\omega_n$ (Hz) |
|----------------|-------------------------|---------|--------------------|-----------------|
| Modo Local 1   | $-0,2772 \pm j8,2129$   | 0,0337  | 8,2176             | 1,3079          |
| Modo Local 2   | $-0,2537 \pm j8,1345$   | 0,0312  | 8,1385             | 1,2953          |
| Modo Local 3   | $-0,2286 \pm j8,0279$   | 0,0285  | 8,0312             | 1,2782          |
| Modo Local 4   | $-1,3728 \pm j5,6578$   | 0,2358  | 5,8219             | 0,9266          |
| Modo Local 5   | $-0,0245 \pm j6,9224$   | 0,0035  | 6,9225             | 1,1017          |
| Modo Local 6   | $0,2395 \pm j6,3885$    | -0,0375 | 6,3929             | 1,0175          |
| Modo Local 7   | $-0,2650 \pm j5,7826$   | 0,0458  | 5,7887             | 0,9213          |
| Modo Local 8   | $0,0316 \pm j6,6982$    | -0,0047 | 6,6983             | 1,0661          |
| Modo 9         | $-19,0398 \pm j18,8478$ | 0,7107  | 26,7909            | 4,2639          |
| Modo 10        | $-16,4750 \pm j18,1473$ | 0,6722  | 24,5102            | 3,9009          |
| Modo Interárea | $-0,0237 \pm j3,8753$   | 0,0061  | 3,8754             | 0,6168          |

Analisando-se os dados da Tabela 5.14 pode-se concluir que os dois PSSs instalados

foram capazes de deslocar os autovalores associados aos modos locais 4, 5, 7 e interárea do semiplano direito do plano complexo para o semiplano esquerdo. O modo local 8 permaneceu no semiplano direito mas, da análise do amortecimento deste modo oscilatório nota-se que houve inserção de amortecimento porém não o suficiente para estabilizar este modo, provavelmente pela pequena participação da máquina 2 neste modo local. O modo local 6 permaneceu instável (isto se deve à participação exclusiva da máquina 5 neste modo oscilatório (Figura 5.19(f))).

Como ocorrido para o sistema simétrico, surgem novos modos oscilatórios (chamados de modo 9 e 10) que são associados a introdução dos dispositivos PSS nas máquinas 2 e 9 respectivamente.

Para inserir amortecimento efetivo aos modos locais 6 e 8 é proposta a utilização de mais um dispositivo PSS instalado na máquina 5 pois esta máquina 5 atua principalmente no modo local 6, mas também tem uma pequena participação no modo local 8, conforme as Figuras 5.20(a) e (b) (estas figuras foram obtidas considerando os dois PSSs instalados nas máquinas 2 e 9).

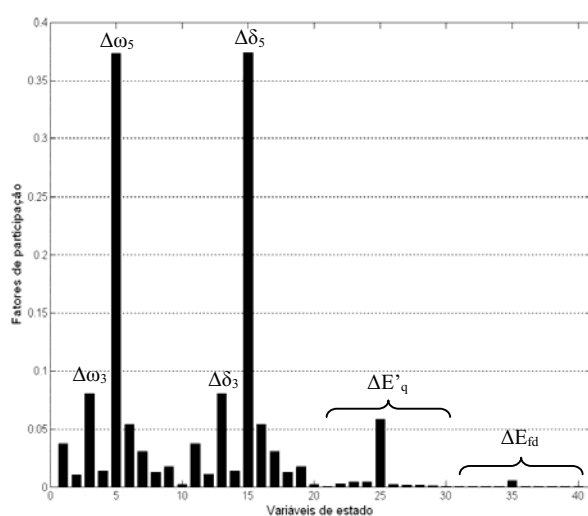


Figura 5.20(a) – Modo local 6.

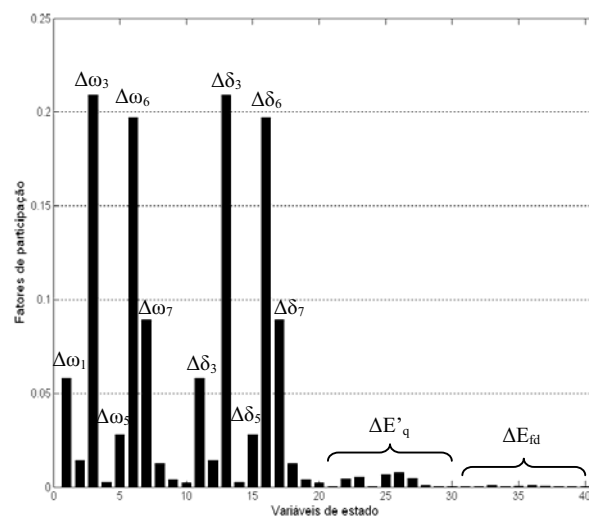


Figura 5.20(b) – Modo local 8.

Utilizando novamente dos valores dos parâmetros dos PSSs apresentados na Tabela 5.13 (considerando  $\xi_{des} = 0,6$ ) e inserindo mais um controlador PSS na máquina 5, obteve-se os novos autovalores dominantes para o sistema New England, juntamente com o coeficiente de amortecimento e frequência a eles associados, conforme apresentado na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Autovalores dominantes – PSS nas máquinas 2, 5 e 9 ( $\xi_{des} = 0,6$ ).

|                | <b>Autovalores</b>     | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|----------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1   | $-0,2659 \pm j8,1814$  | 0,0325                  | 8,1857                               | 1,3028                            |
| Modo Local 2   | $-0,2479 \pm j8,0861$  | 0,0306                  | 8,0899                               | 1,2876                            |
| Modo Local 3   | $-0,4075 \pm j7,8449$  | 0,0519                  | 7,8555                               | 1,2502                            |
| Modo Local 4   | $-1,3530 \pm j5,6901$  | 0,2313                  | 5,8487                               | 0,9309                            |
| Modo Local 5   | $-0,0248 \pm j6,9225$  | 0,0035                  | 6,9225                               | 1,1018                            |
| Modo Local 6   | $-0,4741 \pm j5,0215$  | 0,0940                  | 5,0438                               | 0,8027                            |
| Modo Local 7   | $-0,3763 \pm j5,8592$  | 0,0641                  | 5,8713                               | 0,9344                            |
| Modo Local 8   | $-0,0079 \pm j6,6953$  | 0,0012                  | 6,6953                               | 1,0656                            |
| Modo 9         | $-19,4185 \pm j18,999$ | 0,7148                  | 27,1669                              | 4,3237                            |
| Modo 10        | $-16,459 \pm j18,238$  | 0,6700                  | 24,5669                              | 3,9099                            |
| Modo 11        | $-17,0031 \pm j20,999$ | 0,6293                  | 27,0199                              | 4,3004                            |
| Modo Interárea | $-0,0380 \pm j3,8263$  | 0,0099                  | 3,8265                               | 0,6090                            |

Considerando a atuação dos três dispositivos PSSs foi possível alcançar a estabilidade para o sistema New England (para o ponto de operação considerado), já que todos os autovalores dominantes possuem parte real negativa. O par complexo conjugado que representa o modo oscilatório 8 migrou do semiplano direito para o semiplano esquerdo do plano complexo, mas permaneceu com coeficiente de amortecimento muito pequeno.

Também deve ser observado que a introdução dos PSSs no sistema fez com que três novos modos oscilatórios fossem excitados (chamados de modos 9, 10 e 11, na Tabela 5.15). Deve-se notar que não são modos preocupantes com relação à estabilidade a pequenas perturbações, pois possuem valores elevados para os coeficientes de amortecimento associados.

O comportamento dinâmico das variações dos ângulos internos das máquinas 3, 6 e 8 são apresentados na Figura 5.21 para o caso de  $\xi_{des} = 0,6$  e se conclui que a resposta transitória do sistema fica caracterizada por oscilações de amplitudes decrescentes.

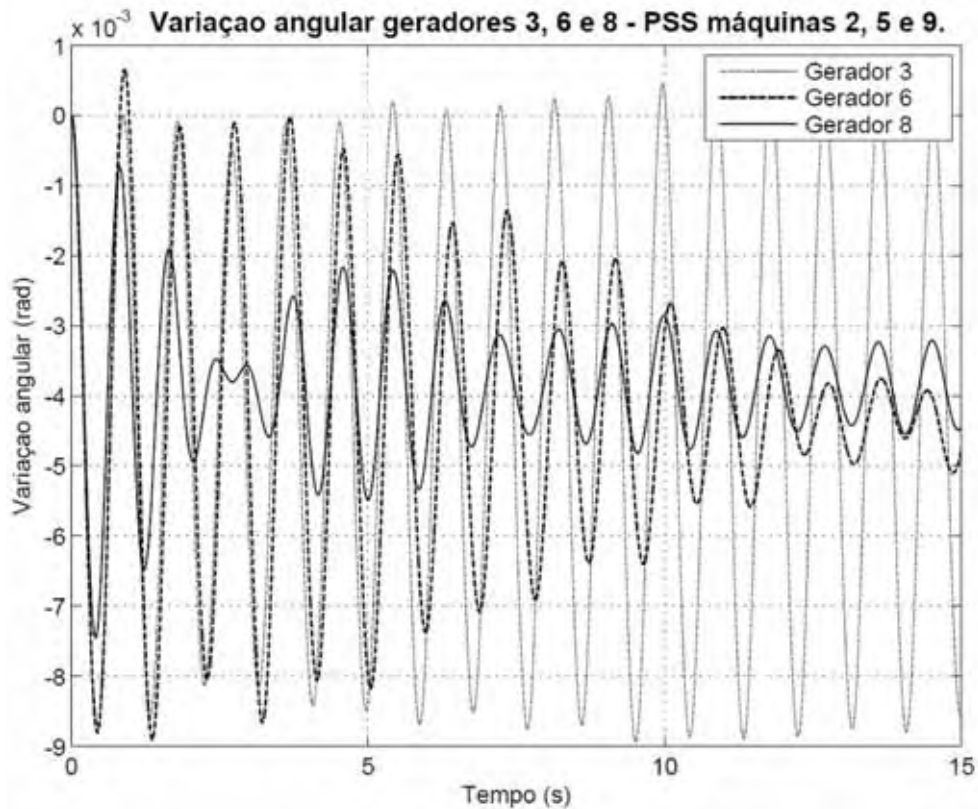


Figura 5.21 – Desvio angular das máquinas 3, 6, 8 – PSS instalado nas máquinas 2, 5 e 9.

Das análises realizadas pode-se afirmar que apesar de tornar o sistema estável, o uso de dispositivos PSSs não acrescentou uma taxa de amortecimento suficiente para a segura operação do sistema elétrico (modos locais 5 e 8 permaneceram fracamente amortecidos). O aumento do ganho dos controladores pode acrescentar mais amortecimento, mas outros modos oscilatórios tendem a se deslocar para o semiplano direito do plano complexo conforme mostraram simulações adicionais. A proposta para se acrescentar amortecimento ao sistema New England é a utilização do controlador POD acoplado ao FACTS SSSC.

### 5.3.3 Sistema New England – Dispositivo SSSC e POD em Operação

O sistema New England se tornou estável a pequenas perturbações para o ponto de operação considerado com a inclusão de três controladores PSSs ajustados de acordo com os parâmetros mostrados na Tabela 5.13.

Na tentativa de se obter um ponto de operação mais seguro é avaliada a inclusão do dispositivo FACTS SSSC equipado com um controlador POD ao sistema New England.

O SSSC será instalado para uma maior atuação no modo interárea do sistema abordado e, pelo estudo dos fatores de participação (Figuras 5.19) conclui-se pela predominante participação da máquina 10 neste modo oscilatório.

Do diagrama unifilar do sistema New England (Apêndice IV) observa-se que as linhas de transmissão que fazem a ligação da máquina geradora 10 com o restante do sistema elétrico são as mais propensas a receberem o dispositivo SSSC para a atuação no modo interárea.

Para a validação desta linha de pensamento são calculados os resíduos da função de transferência considerando o SSSC nas duas linhas de transmissão que fazem ligação com a máquina 10 (linha de transmissão entre as barras 10 e 30 e entre 10 e 38). Os resíduos obtidos nas diferentes situações são mostrados na Tabela 5.16 de onde se conclui que a melhor localização é a linha de transmissão entre as barras 10 e 30.

Tabela 5.16 – Resíduos – SSSC com controlador POD.

| Linha de Transmissão |             | Resíduo        |
|----------------------|-------------|----------------|
| Barra Inicial        | Barra Final | Modo Interárea |
| 30                   | 10          | 7,8544         |
| 38                   | 10          | 2,9346         |

Considerando a instalação do dispositivo SSSC equipado com o controlador adicional POD entre as barras 10 – 30, são calculados os parâmetros do controlador mostrados na Tabela 5.17, para três diferentes casos de amortecimento desejado (0,1, 0,2 e 0,4).

Como sinal de entrada para o POD foi considerado as variações do fluxo de potência ativa da linha de transmissão entre as barras 30 e 10. A constante de tempo  $T_{SSSC}$  foi fixada em 0,001 segundos e o dispositivo SSSC foi ajustado para fornecer 10% de compensação reativa fixa.

Tabela 5.17 – Parâmetros do controlador POD – amortecimento do modo interárea.

| $K_{SSSC}$ | $\xi_{des}$ | $T_w$ (s) | $T_1 = T_3$ (s) | $T_2 = T_4$ (s) |
|------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|
| 0,2797     | 0,100       | 1,00      | 0,10837         | 0,59773         |
| 0,54576    | 0,200       | 1,00      | 0,10837         | 0,59773         |
| 1,0476     | 0,400       | 1,00      | 0,10837         | 0,59773         |

As Tabelas 5.18, 5.19 e 5.20 fornecem os autovalores dominantes para os três casos considerados (estes resultados foram obtidos por meio das equações 4.28 e 4.29, deduzidas no Capítulo 4).

Em todas as situações consideradas o conjunto SSSC/POD foi capaz de atuar ativamente no modo interárea, inserindo amortecimento considerável, deslocando-o para o semiplano esquerdo do plano complexo.

Tabela 5.18 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea  $\xi_{des} = 0,1$ .

|                  | <b>Autovalores</b>    | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1     | $-0,2647 \pm j8,2037$ | 0,0322                  | 8,2080                               | 1,3063                            |
| Modo Local 2     | $-0,2365 \pm j8,1582$ | 0,0290                  | 8,1616                               | 1,299                             |
| Modo Local 3     | $-0,2218 \pm j8,0387$ | 0,0276                  | 8,0418                               | 1,2799                            |
| Modo Local 4     | $0,1330 \pm j7,3149$  | -0,0182                 | 7,3161                               | 1,1644                            |
| Modo Local 5     | $0,1845 \pm j6,9943$  | -0,0264                 | 6,9968                               | 1,1136                            |
| Modo Local 6     | $0,3411 \pm j6,2641$  | -0,0544                 | 6,2734                               | 0,9984                            |
| Modo Local 7     | $0,3023 \pm j6,6882$  | -0,0452                 | 6,6950                               | 1,0655                            |
| Modo Local 8     | $0,1341 \pm j6,6906$  | -0,0200                 | 6,6920                               | 1,0651                            |
| Modo Interárea   | $-0,3073 \pm j3,7439$ | 0,0818                  | 3,7565                               | 0,5979                            |
| Modo Controlador | $-2,2827 \pm j1,9826$ | 0,7550                  | 3,0235                               | 0,4812                            |

Considerando o modo interárea, a primeira situação (valores mostrados na Tabela 5.18) foi a que mais se aproximou do amortecimento desejado ( $\xi_{des} = 0,1$ ). Além disso, foi pequena a variação sofrida pela frequência natural de oscilação se comparada ao caso base. Os demais modos oscilatórios sofreram pequenas alterações em relação ao caso base.

Para as demais situações simuladas (valores mostrados nas Tabelas 5.19 e 5.20), o coeficiente de amortecimento obtido ficou bem abaixo do esperado e, no caso de  $\xi_{des} = 0,4$  o coeficiente calculado foi menor que na situação de  $\xi_{des} = 0,2$  (isto se deve às diversas interações entre as máquinas geradoras e seus controladores presentes no sistema multimáquinas).

Tabela 5.19 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea  $\xi_{des} = 0,2$ .

|                  | <b>Autovalores</b>    | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1     | $-0,2658 \pm j8,2030$ | 0,0324                  | 8,2074                               | 1,3062                            |
| Modo Local 2     | $-0,2358 \pm j8,1571$ | 0,0289                  | 8,1605                               | 1,2988                            |
| Modo Local 3     | $-0,2217 \pm j8,0387$ | 0,0276                  | 8,0417                               | 1,2799                            |
| Modo Local 4     | $0,1327 \pm j7,3149$  | -0,0181                 | 7,3161                               | 1,1644                            |
| Modo Local 5     | $0,1974 \pm j6,9727$  | -0,0283                 | 6,9755                               | 1,1102                            |
| Modo Local 6     | $0,3352 \pm j6,2576$  | -0,0535                 | 6,2666                               | 0,9974                            |
| Modo Local 7     | $0,2884 \pm j6,6900$  | -0,0431                 | 6,6962                               | 1,0657                            |
| Modo Local 8     | $0,1288 \pm j6,6896$  | -0,0193                 | 6,6908                               | 1,0649                            |
| Modo Interárea   | $-0,4111 \pm j3,4781$ | 0,1174                  | 3,5023                               | 0,5574                            |
| Modo Controlador | $-2,7066 \pm j2,7192$ | 0,7055                  | 3,8366                               | 0,6106                            |

Tabela 5.20 – Autovalores dominantes – amortecimento desejado para o modo interárea  $\xi_{des} = 0,4$ .

|                  | <b>Autovalores</b>    | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1     | $-0,2668 \pm j8,2018$ | 0,0325                  | 8,2061                               | 1,3060                            |
| Modo Local 2     | $-0,2343 \pm j8,1561$ | 0,0287                  | 8,1595                               | 1,2986                            |
| Modo Local 3     | $-0,2215 \pm j8,0387$ | 0,0275                  | 8,0417                               | 1,2799                            |
| Modo Local 4     | $0,1323 \pm j7,3148$  | -0,0181                 | 7,3160                               | 1,1644                            |
| Modo Local 5     | $0,2245 \pm j6,9583$  | -0,0322                 | 6,9619                               | 1,1080                            |
| Modo Local 6     | $0,3311 \pm j6,2475$  | -0,0529                 | 6,2562                               | 0,9957                            |
| Modo Local 7     | $0,2714 \pm j6,6838$  | -0,0406                 | 6,6893                               | 1,0646                            |
| Modo Local 8     | $0,1231 \pm j6,6833$  | -0,0184                 | 6,6844                               | 1,0639                            |
| Modo Interárea   | $-0,3198 \pm j3,2163$ | 0,0989                  | 3,2321                               | 0,5144                            |
| Modo Controlador | $-3,5854 \pm j3,4240$ | 0,7232                  | 4,9577                               | 0,7890                            |

Da análise do autovalor associado ao modo interárea pode-se concluir que o melhor ajuste ocorreu para  $\xi_{des}$  igual a 0,2 pois é o que fornece o maior coeficiente de amortecimento associado. Outra conclusão importante é que não se pode aumentar o ganho do POD pois este coeficiente tende a diminuir.

O FACTS SSSC mostrou-se eficiente em inserir amortecimento ao modo oscilatório para o qual foi projetado. Apesar disto o sistema elétrico continua instável, devido à existência de cinco modos locais de oscilação com amortecimento negativo, que não obtiveram amortecimento necessário com a inclusão de um POD acoplado a um dispositivo SSSC.

Para tentar sanar este problema, é introduzido ao sistema New England os controladores suplementares do tipo PSS para atuação conjunta com o SSSC/POD.

### 5.3.4 Sistema New England – Dispositivos SSSC, POD e PSS em Operação

A instalação de um único dispositivo SSSC acoplado a um controlador POD não foi suficiente para deslocar todos os modos oscilatórios do sistema multimáquinas para o semiplano esquerdo do plano complexo. Uma possível solução é a introdução de controladores PSSs para atuarem nos modos locais.

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.22 são os fatores de participação dos modos oscilatórios instáveis depois da instalação do dispositivo SSSC acoplado a um POD na linha de transmissão que interliga as barras 10 e 30 do sistema elétrico.

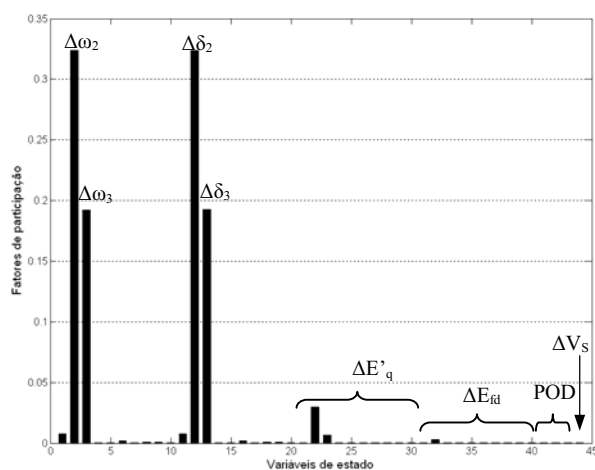


Figura 5.22(a) – Modo local 4.

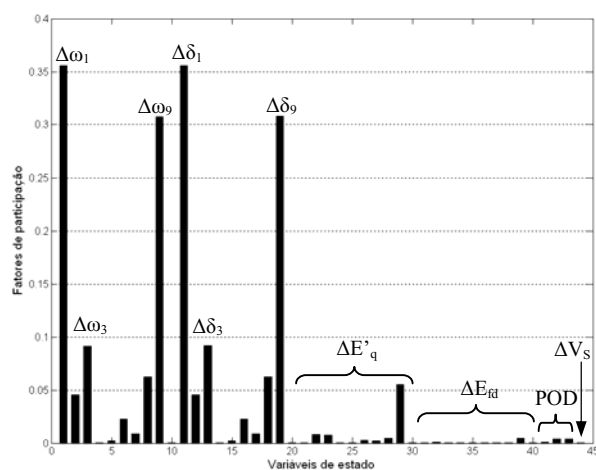


Figura 5.22(b) – Modo local 5.

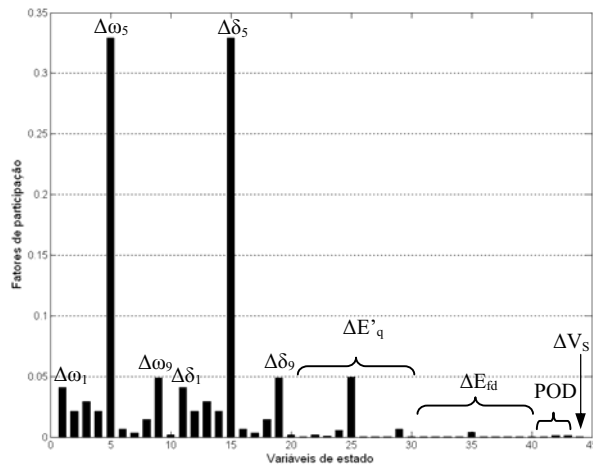


Figura 5.22(c) – Modo local 6.

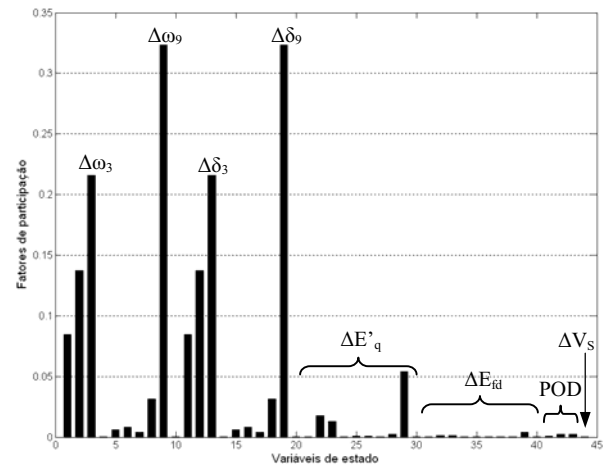


Figura 5.22(d) – Modo local 7.

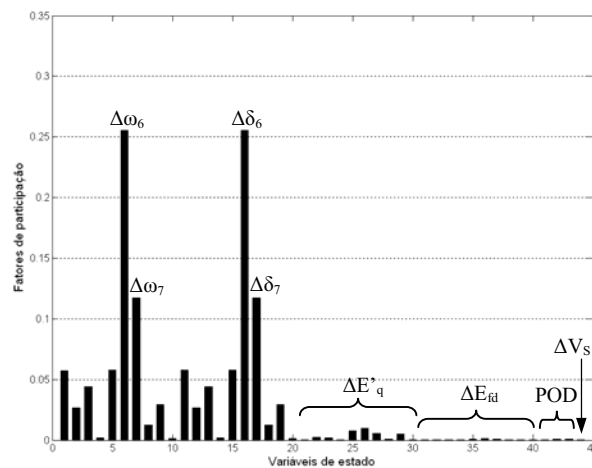


Figura 5.22(e) – Modo Local 8.

Da análise dos fatores de participação apresentados nas Figuras 5.22 é possível afirmar que a introdução do conjunto SSSC/POD para atuação no modo interárea, causa pequenas alterações aos fatores de participação dos demais modos oscilatórios, conclusão semelhante à obtida para o sistema teste anterior (sistema simétrico).

Dos fatores de participação nota-se a grande participação da máquina 9 nos modos locais 5 e 7. Sendo assim, pode-se esperar que a instalação de um controlador PSS possa atuar simultaneamente nestes dois modos oscilatórios.

Pelos resultados das simulações anteriores (sistema New England com a atuação dos controladores PSS) é proposta a introdução de dispositivos PSSs nas máquinas geradoras 2, 5 e 9, para atuação nos modos locais 4, 5, 6 e 7, com o conjunto SSSC/POD inserido no sistema elétrico com o intuito de compensar a linha de transmissão que entrega a potência do gerador

10 para o sistema elétrico (barras 10 e 30) e ao mesmo tempo fornecer maior amortecimento ao modo interárea.

Utilizando a teoria de resíduos (item 4.6 – Capítulo 4) foram obtidos os parâmetros dos PSSs e também do POD para dois diferentes valores de  $\xi_{des}$ , cujos valores são mostrados nas Tabelas 5.21 e 5.22, respectivamente.

Tabela 5.21 – Parâmetros de atuação do PSS, calculado pelo método de resíduos – Sistema New England.

| Máquina geradora | Ganho ( $K_{PSS}$ ) |                    | $T_w$ (s) | $T_1 = T_3$ (s) | $T_2 = T_4$ (s) |
|------------------|---------------------|--------------------|-----------|-----------------|-----------------|
|                  | $\xi_{des} = 0,01$  | $\xi_{des} = 0,05$ |           |                 |                 |
| 2                | 22,862              | 39,367             | 1,0       | 0,2723          | 0,068616        |
| 5                | 21,822              | 31,862             | 1,0       | 0,24684         | 0,10274         |
| 9                | 9,4667              | 14,221             | 1,0       | 0,15651         | 0,14294         |

Tabela 5.22 – Parâmetros de atuação do POD, calculado pelo método de resíduos – Sistema New England.

| Linha de Transmissão | Ganho ( $K_{SSSC}$ ) |                    | $T_w$ (s) | $T_1 = T_3$ (s) | $T_2 = T_4$ (s) |
|----------------------|----------------------|--------------------|-----------|-----------------|-----------------|
|                      | $\xi_{des} = 0,01$   | $\xi_{des} = 0,05$ |           |                 |                 |
| 10 – 30              | 0,1418               | 0,27906            | 1,0       | 0,10842         | 0,59776         |

A taxa de compensação reativa fixa realizada pelo dispositivo SSSC foi fixada 10% da reatância indutiva da linha de transmissão entre as barras 10 – 30. O valor da constante de tempo dos blocos *washout* ( $T_w$ ) foi considerada 1,0 segundo.

Considerando o conjunto SSSC/POD e os três PSSs atuando ao mesmo tempo, foram calculados os autovalores dominantes da matriz de estados (para  $\xi_{des} = 0,01$ ), utilizando-se as equações (4.28) e (4.29) desenvolvidas no Capítulo 4. Os valores numéricos são mostrados na Tabela 5.23.

Da mesma forma que ocorrido para o sistema simétrico teste, nota-se que para cada dispositivo PSS atuando no sistema surge um novo modo oscilatório, o mesmo ocorrendo pela atuação do controlador POD (modo controlador). Estes modos foram chamados de modos 9, 10, 11 e controlador na Tabela 5.23, e para o ponto de operação considerado, não causam problemas com respeito à estabilidade a pequenas perturbações (observe que os coeficientes de amortecimento a eles associados é bem elevado).

Dos valores mostrados na Tabela 5.23 é possível concluir pela estabilidade do sistema

teste, pois todos os autovalores têm parte real negativa. O modo local 4 sofreu uma grande variação na frequência natural não amortecida e isto se deve ao elevado ganho do PSS instalado na máquina 2, que é a máquina com maior participação no modo local 4. O mesmo ocorre com o modo local 6, devido a presença do PSS na máquina 5.

Comparando-se os valores dos coeficientes de amortecimento associados aos modos 4, 5, 6, 7, 8 e interárea apresentados nas Tabelas 5.23 e 5.15 pode-se afirmar que os modos 4, 5, 6 e interárea se tornaram mais amortecidos, enquanto que os modos 7 e 8 perderam amortecimento. Este é o “preço” a ser pago pelo maior amortecimento introduzido ao modo interárea.

Tabela 5.23 – Autovalores dominantes ( $\xi_{des} = 0,01$ ) – SSSC/POD em atuação e PSS nas máquinas 2, 5 e 9.

|                  | <b>Autovalores</b>      | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1     | $-0,2362 \pm j8,2265$   | 0,0287                  | 8,2299                               | 1,3098                            |
| Modo Local 2     | $-0,2431 \pm j8,0828$   | 0,0301                  | 8,0864                               | 1,2870                            |
| Modo Local 3     | $-0,4838 \pm j7,7193$   | 0,0626                  | 7,7344                               | 1,2310                            |
| Modo Local 4     | $-1,4487 \pm j4,8839$   | 0,2844                  | 5,0942                               | 0,8108                            |
| Modo Local 5     | $-0,0803 \pm j7,2729$   | 0,0110                  | 7,2734                               | 1,1576                            |
| Modo Local 6     | $-2,6346 \pm j4,2914$   | 0,5232                  | 5,0357                               | 0,8015                            |
| Modo Local 7     | $-0,0332 \pm j6,7854$   | 0,0049                  | 6,7855                               | 1,0799                            |
| Modo Local 8     | $-0,0018 \pm j6,6276$   | 0,0003                  | 6,6276                               | 1,0548                            |
| Modo 9           | $-11,5133 \pm j17,5401$ | 0,5487                  | 20,9812                              | 3,3393                            |
| Modo 10          | $-6,4414 \pm j11,7022$  | 0,4822                  | 13,3579                              | 2,1260                            |
| Modo 11          | $-8,0266 \pm j0,7687$   | 0,9955                  | 8,0633                               | 1,2833                            |
| Modo Interárea   | $-0,1426 \pm j3,8938$   | 0,0366                  | 3,8964                               | 0,6201                            |
| Modo Controlador | $-1,8500 \pm j0,7575$   | 0,9254                  | 1,9991                               | 0,3182                            |

Quando se considera os controladores ajustados para obtenção de  $\xi_{des} = 0,05$ , os autovalores de interesse para o sistema New England são os mostrados na Tabela 5.24.

Com o aumento do ganho dos controladores (para se obter  $\xi_{des} = 0,05$  - Tabelas 5.21 e 5.22), o amortecimento do modo local 8 voltou ao patamar do sistema com a atuação de três PSSs (sem SSSC/POD) (Tabela 5.15). Os modos com atuação direta dos controladores PSS e

POD (modos locais 4, 6 e 7 e interárea) tiveram seus coeficientes de amortecimento aumentados, quando comparados com os obtidos na Tabela 5.23.

Em contrapartida, o modo local 5 perdeu amortecimento com o aumento do ganho dos controladores quando comparado com o mostrado na Tabela 5.23, mas ainda é maior que no caso de apenas três PSSs em operação (Tabela 5.15).

Tabela 5.24 – Autovalores dominantes ( $\xi_{des} = 0,05$ ) – SSSC/POD em atuação e PSS nas máquinas 2, 5 e 9.

|                  | <b>Autovalores</b>     | <b><math>\xi</math></b> | <b><math>\omega_n</math> (rad/s)</b> | <b><math>\omega_n</math> (Hz)</b> |
|------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Modo Local 1     | $-0,2745 \pm j8,2510$  | 0,0333                  | 8,2555                               | 1,3139                            |
| Modo Local 2     | $-0,2425 \pm j8,0847$  | 0,0300                  | 8,0883                               | 1,2873                            |
| Modo Local 3     | $-0,4482 \pm j7,7178$  | 0,0580                  | 7,7308                               | 1,2304                            |
| Modo Local 4     | $-1,3214 \pm j3,2632$  | 0,3753                  | 3,5206                               | 0,5603                            |
| Modo Local 5     | $-0,0512 \pm j6,8252$  | 0,0075                  | 6,8254                               | 1,0863                            |
| Modo Local 6     | $-2,4996 \pm j2,9127$  | 0,6513                  | 3,8382                               | 0,6109                            |
| Modo Local 7     | $-0,4067 \pm j7,4173$  | 0,0548                  | 7,4284                               | 1,1823                            |
| Modo Local 8     | $-0,0080 \pm j6,6674$  | 0,0012                  | 6,6674                               | 1,0612                            |
| Modo 9           | $-9,4250 \pm j27,0796$ | 0,3287                  | 28,673                               | 4,5634                            |
| Modo 10          | $-6,2937 \pm j15,5239$ | 0,3757                  | 16,751                               | 2,6660                            |
| Modo 11          | $-7,5975 \pm j1,5184$  | 0,9806                  | 7,7477                               | 1,2331                            |
| Modo Interárea   | $-0,3590 \pm j3,8782$  | 0,0922                  | 3,8948                               | 0,6199                            |
| Modo Controlador | $-2,0851 \pm j1,4683$  | 0,8176                  | 2,5502                               | 0,4059                            |

Da análise dos fatores de participação (Figuras 5.21) se concluiu que a instalação de um controlador PSS na máquina 9 atuaria significativamente nos modos locais 5 e 7. Como o ajuste do PSS da máquina 9 foi projetado para atuar sobre o modo local 7, este agregou amortecimento e, pelo mesmo motivo, foi retirado amortecimento do modo local 5.

Isto se deve ao projeto do PSS para atuação específica no modo local 7; para que o PSS injetasse grandes taxas de amortecimento no modo local 5 seria necessário o projeto de novo parâmetros. Resumindo, o projeto utilizado injeta amortecimento ao modo local 7, mas para altos valores de ganhos sua atuação prejudica o modo local 5. Para solucionar este problema o ideal seria a utilização de métodos de ajuste coordenados, isto é, todos os

parâmetros de todos os controladores seriam calculados ao mesmo tempo. Com isto, as diversas interações entre as máquinas e os controladores seriam consideradas no projeto. A utilização destas técnicas de ajuste mais sofisticadas não faz parte do escopo deste trabalho.

Na Figura 5.23 são apresentadas as curvas da variação do ângulo interno dos geradores 3, 6 e 8 para o caso discriminado na Tabela 5.24, que permite “visualizar” que o sistema é estável.

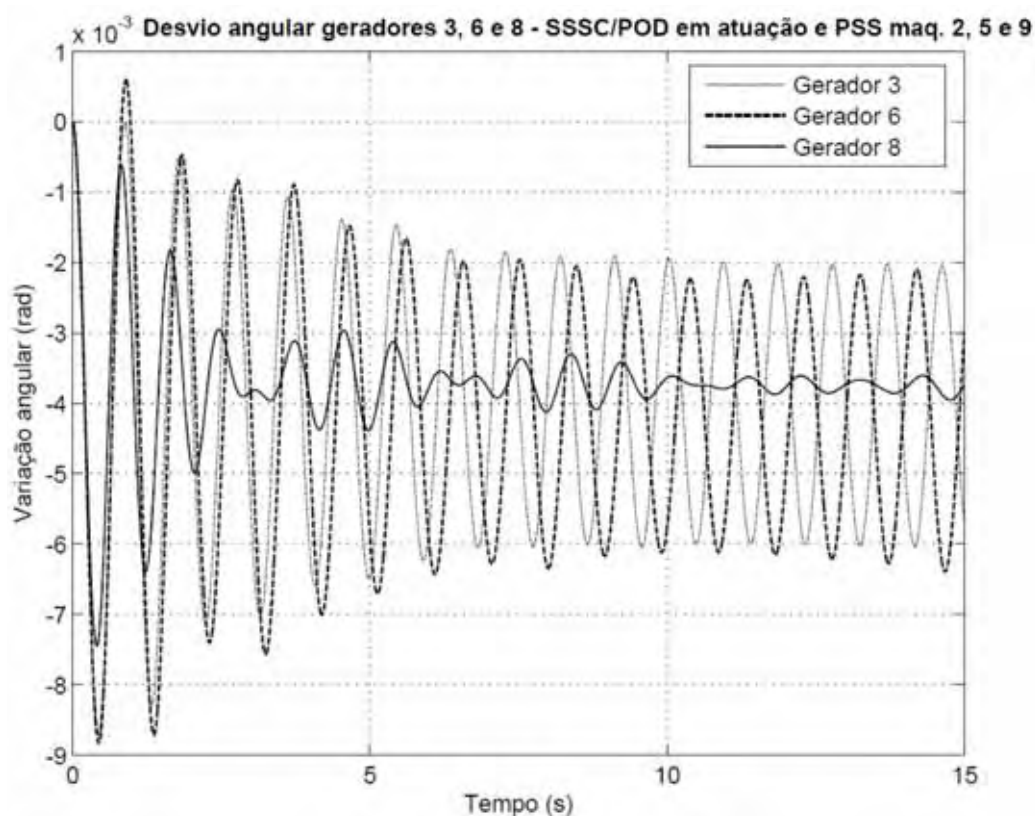


Figura 5.23 – Desvio angular – SSSC/POD em atuação e PSS nas máquinas 2, 5 e 9.

Valores maiores de amortecimento desejado não foram considerados por não apresentarem bons resultados, conforme se observou de simulações adicionais.

Os valores dos ganhos dos PSSs para  $\xi_{des} = 0,01$  (mostrados na Tabela 5.21) (valores estes obtidos pela teoria de resíduos) têm valores muito superiores aos obtidos no item 5.3.2 (Tabela 5.13, para  $\xi_{des} = 0,6$ ). Isto significa que maior esforço de controle será exigido dos PSSs ajustados de acordo com a Tabela 5.21, quando comparado com os ajustes apresentados na Tabela 5.13.

A comparação entre o caso do item 5.3.2 (três controladores PSS, ajustados com os

valores mostrados na Tabela 5.13) com o caso atual (três PSS e um SSSC/POD) pode ser feita analisando-se os gráficos mostrados na Figura 5.24, onde são apresentadas as curvas referentes às variações do ângulo interno da máquina 3 nas duas situações.

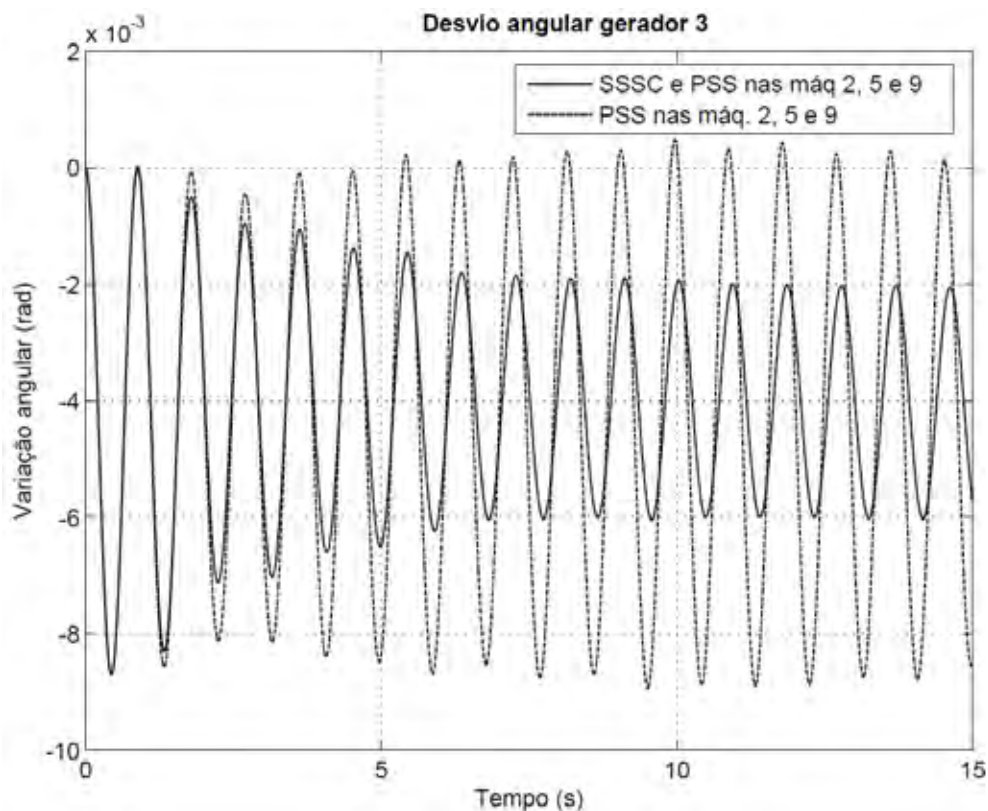


Figura 5.24 – Desvio angular do gerador 3 – comparação de resultados.

A partir da Figura 5.24 fica clara a diferença entre as respostas obtidas nos dois casos estudados: no caso do sistema com três PSSs e um SSSC/POD as variações angulares são mais amortecidas que no caso com três PSSs (máquinas 2, 5 e 9), indicando que a primeira situação exigirá um menor tempo para o sistema elétrico atingir a condição de regime permanente.

## 5.4. Conclusões

Neste Capítulo foram apresentados os resultados obtidos através de simulações para dois sistemas multimáquinas testes, utilizando a formulação desenvolvida nos Capítulos 2, 3 e 4.

Foi concluída a instabilidade do sistema multimáquinas simétrico em seu caso base (a análise foi realizada no domínio do tempo e no domínio da frequência).

O sistema mostrou ter três modos de oscilação, sendo dois deles estáveis caracterizados como modos locais de oscilação (autovalores pares complexos conjugados situados no semiplano esquerdo do plano complexo) e um modo oscilatório instável com frequência característica de modo de oscilação interárea (o par complexo conjugado responsável por este modo tinha parte real positiva, indicando a instabilidade do sistema elétrico para este ponto de operação).

Foi proposta a inclusão do dispositivo PSS na máquina 1, na tentativa de inserir amortecimento ao modo interárea. Através de simulações constatou-se que o sistema alcançou a estabilidade para esta nova configuração, pois o autovalor associado ao modo interárea migrou do semiplano direito para o semiplano esquerdo.

Como o objetivo principal do estudo era a inclusão do dispositivo FACTS do tipo SSSC e avaliar sua influência na estabilidade a pequenas perturbações, este foi introduzido no sistema elétrico (que foi remodelado para esta nova situação).

Iniciou-se com a inclusão do dispositivo FACTS entre as barras 7 e 8 (linhas de transmissão que interligam as duas áreas) e este se mostrou eficaz, sendo capaz de inserir amortecimento positivo (apesar de bastante fraco) ao modo interárea.

Com a finalidade de melhorar o desempenho do sistema simétrico frente à estabilidade a pequenas perturbações, foram avaliados dois tipos de controladores adicionais acoplados ao dispositivo SSSC: um controlador de primeira ordem e o controlador POD. Na comparação realizada entre os resultados obtidos conclui-se da melhor atuação do controlador POD, já que significativas taxas de amortecimento foram inseridas ao modo oscilatório de interesse.

O outro sistema teste avaliado foi o New England que, em seu caso base, apresentava modos locais e interárea instáveis.

A melhor localização do dispositivo SSSC e controladores foi realizada a partir dos fatores de participação e, na sequência, foram projetados e inseridos no sistema dois controladores do tipo PSS, atuando nas máquinas 2 e 9. Através das simulações realizadas concluiu-se que esta configuração não era satisfatória, já que a instabilidade do sistema persistiu.

Para resolver o problema, uma primeira situação foi proposta: a inclusão de mais um controlador PSS na máquina 5. Em uma segunda configuração, foi instalado um conjunto

SSSC/POD na linha de transmissão que liga a máquina 10 ao restante do sistema para atuação simultânea com os três controladores PSSs já instalados.

O sistema New England foi novamente simulado e concluiu-se pela sua estabilidade nas duas situações. Além disso, observou-se que a segunda configuração (conjunto SSSC/POD e três PSSs) fornecia melhor desempenho do sistema à pequenas perturbações.

## 6. Conclusões

Os principais objetivos deste trabalho foram a modelagem, estudo e simulações de sistemas elétricos multimáquinas com a inclusão de dispositivo FACTS do tipo SSSC.

O trabalho se inicia com o desenvolvimento matemático do Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) para o ambiente multimáquinas.

Com as equações diferenciais (que descrevem o comportamento dinâmico do gerador síncrono) e das equações do fluxo de potência de um sistema de transmissão (equações algébricas), desenvolveu-se o modelo matemático que representa o sistema elétrico, obtendo a sua representação no domínio do tempo e no domínio da frequência.

No domínio do tempo o sistema multimáquinas ficou representado por variáveis de estado e variáveis algébricas. A partir da eliminação das variáveis algébricas, foi possível obter a matriz de estados do sistema multimáquinas, bem como a matriz de entradas.

A aplicação da Transformada de Laplace nas equações diferenciais e algébricas permitiu representar o sistema multimáquinas no domínio da frequência (diagrama de blocos). Nesta representação do sistema elétrico este ficou subdividido em subsistemas ativo e reativo. Outra subdivisão observada foi a de subsistema rápido (contendo as variáveis algébricas) e subsistema lento (abrangendo as variáveis de estado).

Feita a representação do sistema multimáquinas, é realizada a modificação do modelo para a inclusão do SSSC. Discute-se a atuação do SSSC considerando-o conectado em uma linha de transmissão que interliga duas barras genéricas  $i$  e  $j$  do sistema elétrico de potência. A atuação do SSSC baseia-se no controle sobre a injeção de uma tensão série em apropriada fase, para compensação da linha de transmissão ao qual foi acoplado.

Definiram-se as duas formas de atuação do SSSC, realizando compensação reativa capacitiva (tensão  $V_s$  atrasada em relação a corrente na linha) ou compensação indutiva (tensão  $V_s$  adiantada em relação a corrente na linha).

Convencionou-se o SSSC atuando no modo capacitivo, e a partir disso as equações de potência ativa e reativa foram desenvolvidas e devidamente relacionadas às equações deduzidas no Capítulo 2 (modelo do sistema elétrico sem a atuação do SSSC).

O modelo até então desenvolvido permitia a inclusão do SSSC a um sistema elétrico multimáquinas sem uma dinâmica de controle sobre a variável de saída do SSSC. Para aprimorar este modelo desenvolveu-se no Capítulo 4 a modelagem do SSSC com dois tipos de controladores: o controlador dinâmico de primeira ordem e o controlador POD.

Em ambos os casos foram obtidas as equações dinâmicas dos controladores, que

resultaram em variáveis de estado, estas equações são inseridas na matriz que representa o sistema elétrico. Ficou evidente a facilidade de recepção de novos componentes e controladores ao MSP multimáquinas, cuja modelagem obtida no Capítulo 2 foi totalmente aproveitada para a inclusão das equações do SSSC com o controlador.

A dinâmica de atuação do dispositivo PSS também foi desenvolvida para sua atuação isolada e em conjunto com o dispositivo SSSC.

Com a modelagem completa de um sistema elétrico multimáquinas foram iniciadas as simulações utilizando dois sistemas testes, para estudo da estabilidade a pequenas perturbações.

No primeiro sistema teste (Sistema Simétrico), em seu caso base este se mostrou instável devido à presença de um modo interárea de oscilação representado por um autovalor com parte real positiva.

Na primeira tentativa de alcançar a estabilidade deste sistema teste, instalou-se o controlador PSS em uma máquina geradora. O sistema se mostrou estável para o novo ponto de operação. Como uma segunda opção foi instalado o FACTS SSSC entre duas barras do Sistema Simétrico. Para estudar a atuação do SSSC optou-se por três formas distintas de operação: a atuação do SSSC sem controlador, quando acoplado ao SSSC um controlador de primeira ordem e na última situação, o SSSC operando com o controlador POD.

Dos resultados obtidos concluiu-se que conforme mais elaborado o tipo de controlador acoplado ao SSSC menor é a exigência de compensação reativa na linha de transmissão e, conseqüentemente, menor é a magnitude da tensão série inserida pelo SSSC.

Em todas as situações abordadas o sistema se mostrou estável para o novo ponto de operação, pois todos os seus autovalores ficaram situados no semiplano esquerdo do plano complexo. Além disso, uma análise no domínio da frequência dos modos oscilatórios mostrou que foi possível tornar o modo interárea estável com coeficiente de amortecimento positivo.

Os resultados foram analisados no domínio do tempo e no domínio da frequência. Em ambas as situações se concluiu pela boa atuação do conjunto SSSC/POD, que propiciou altas taxas de amortecimento ( $\xi$ ) ao modo interárea.

O controlador POD acoplado ao dispositivo SSSC mostrou ser a melhor configuração entre os resultados obtidos, já que alcançou o amortecimento desejado para o modo oscilatório de interesse, além de ter causado pequena alteração na frequência natural de oscilação.

As simulações no domínio do tempo foram realizadas para o sistema simétrico considerando o mesmo tipo de perturbação do caso base. As curvas da variação angular dos

geradores foram apresentadas com a inclusão do SSSC e do PSS e observou-se que os gráficos são compostos por oscilações amortecidas que tendem assintoticamente a um valor de regime.

O segundo sistema elétrico simulado foi o “New England”, por ser um sistema de maior porte e muito utilizado na literatura. Este sistema também apresentou inúmeros problemas relacionados com a estabilidade a pequenas perturbações. Em uma situação denominada caso base, o sistema New England apresentou um total de 9 modos oscilatórios, sendo que 6 deles instáveis (5 modos locais e 1 modo interárea).

Com o uso dos fatores de participação foram localizadas as máquinas que participavam ativamente dos modos oscilatórios e a partir dos resultados obtidos foi feita uma projeção dos melhores locais de instalação dos dispositivos PSS.

O sistema foi então simulado com dois PSSs acoplados aos geradores 2 e 9. Novas simulações mostraram que o sistema permanecia instável e, a partir disso, duas propostas foram implementadas: a instalação de mais um PSS para atuar no modo oscilatório restante e a inserção do dispositivo FACTS SSSC com controlador POD.

Nas duas situações consideradas o objetivo inicial foi alcançado, pois o sistema se tornou estável.

Apesar do deslocamento do autovalor instável para o semiplano esquerdo, pouco amortecimento foi agregado aos modos oscilatórios restantes do sistema (os dispositivos inseridos atuaram positivamente nos modos oscilatórios para os quais foram projetados; em contrapartida, os demais modos se aproximaram demasiadamente do semiplano direito).

Outra conclusão obtida a respeito dos parâmetros dos dispositivos de controle é que seu ajuste, feito de forma isolada para atender um determinado critério de desempenho (no caso deste trabalho,  $\xi_{des}$ ) não é totalmente eficaz quando acoplado à todo o sistema multimáquinas, devido às diversas interações que ocorrem (e que não foram consideradas no projeto dos controladores).

O uso dos fatores de participação e resíduos se mostrou muito importante no desenrolar do trabalho, pois graças a estes estudos foi possível obter informações valiosas sobre a mais efetiva localização destes dispositivos para atuação no sistema elétrico quando este sofre uma pequena perturbação. A mesma importância dos fatores de participação e resíduos se reflete no ajuste propriamente dito dos parâmetros dos dispositivos de controle.

Finalmente, pode-se concluir pela satisfatória eficácia do modelo desenvolvido para o dispositivo FACTS do tipo SSSC, para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência em sistemas elétricos de potência.

## 6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como propostas para trabalhos futuros são apresentadas algumas sugestões:

- o modelo desenvolvido para o dispositivo SSSC pode ser expandido para a atuação na compensação de potência ativa da linha de transmissão (permitir a variação do ângulo da tensão série do SSSC, considerando a componente em fase com a corrente da linha de transmissão -  $V_p$ );
- se considerada a atuação conjunta de vários dispositivos SSSC em um sistema elétrico, este seria o início do desenvolvimento de um modelo para o FACTS do tipo IPFC (Interline Power Flow Controller) para o estudo das oscilações eletromecânicas de baixa frequência;
- a utilização de melhores técnicas de ajuste e localização dos dispositivos no sistema elétrico, pois as técnicas apresentadas partem da consideração de um ponto de operação fixo e na operação real dos sistemas de energia o ponto de operação é variável, de acordo com as solicitações da carga;
- desenvolvimento de técnicas de ajuste dos parâmetros dos controladores PSS e POD baseadas no controle adaptativo e redes neurais (por exemplo), visando tornar os controladores mais robustos e assim, melhorar o desempenho do sistema elétrico de potência quando submetido a pequenas perturbações.

## Referências

- [1] PROGRAMA de aceleração do crescimento-PAC: balanço 2 anos. [S.l.: s.n.], 2009. 141p. (Parte 3 – Infraestrutura Energética). Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/pac/balancos/balanco2anos/>>. Acesso em: 14 abr. 2009.
- [2] KUNDUR, P. et al. Definition and Classification of Power System Stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 18 n. 2, pp. 1387-1401.
- [3] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Indicadores de desempenho do sistema interligado nacional-SIN**. [S.l.: s.n., 2008?] 1p. Disponível em: <<http://www.ons.com.br>>. Acesso em: 4 abr. 2009.
- [4] ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. **Power system control and stability**. EUA: IEEE PRESS, 1993. 464p. (IEEE Power Systems Engineering Series).
- [5] KUNDUR, P. **Power system stability and control electrical**. EUA: MacGraw-Hill, 1994. 1176p. (Power Research Institute).
- [6] YU, Y. N. **Electric power system dynamic**. EUA: Academic Press, 1983. 255p.
- [7] SAUER P. W.; PAI M. A. **Power system dynamics and stability**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357p.
- [8] 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.
- [9] BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. **Estabilidade transitória em sistemas eletroenergéticos**. São Carlos: EESC-USP, São Carlos, 2000. 155p.
- [10] MOUSSA, H. A. M.; YU, Y. Dynamic interaction of multimachine power system and excitation control. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 93, n. 4, July/Aug. p 1150-1158, 1974.

- [11] DECKMANN, S. M.; 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.
- [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] SONG Y. H.; JOHNS A. T. **Flexible AC transmission system (FACTS)**. England: The Institute of Electrical Engineers, TJ International, 1999. 592p.
- [14] HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. New York: IEEE Press- John Wiley, 1999. 452p.
- [15] Heffron, W. G.; PHILLIPS, R. A. Effect of a modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators. **AIEE Trans.**, New York, v.71, n1, p. 692–697, 1952.
- [16] DECKMANN, S. M.; COSTA, V. F. **Synchronizing and damping torques obtained from a power sensitivity model**. Florianópolis: CIGRÉ, 1993. (Colloquium of Cigré Study Committee, 38).
- [17] FURINI, M. A. **Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob a ação dos controladores FACTS TCSC e UPFC**. 2008. 153f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Ilha Solteira, 2008.
- [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] 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.

- [20] 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, v. 2, p. 1-6, 2003.
- [21] 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.
- [22] CASTRO, M. S. **A Influência de controladores FACTS na estabilidade de ângulo a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência**. 2005. 124f. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas, 2005.
- [23] VORAPHONPIPUT, N.; BUNYAGUL, T.; CHATRATANA, S. Power flow control with static synchronous series compensator (SSSC). **International Energy Journal**, v. 9, n. 2, June 2008. Disponível: < [http://www.energy-based.nrct.go.th/Article/Ts-3%20power%20flow%20control%20with%20static%20synchronous%20series%20compensator%20\(sssc\).pdf](http://www.energy-based.nrct.go.th/Article/Ts-3%20power%20flow%20control%20with%20static%20synchronous%20series%20compensator%20(sssc).pdf)>. Acesso em: 20 out. 2008.
- [24] MATHUR, R. M.; VARMA, R.K. **Thyristor based FACTS controllers for electrical transmission systems**. New York: Wiley-IEEE, 2002. 495 p.
- [25] UZUNOVIC, E. **EMTP, transient stability and power flow models and controls of VSC based FACTS controllers**. 2001. 225f. Tese (Doutorado) – Department of Electrical & Computer Engineering, University Of Waterloo, Waterloo, 2001.
- [26] AYRES, H. M. **Aplicação do controlador UPFC para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas elétricos de potência**. 2005. 127f. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas, 2005.
- [27] 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.

- [28] 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.
- [29] SADIKOVIC, R. **Damping controller design for power system oscillations**. Zurich: Technical Report, Power Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, 2004. 14p.
- [30] 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.
- [31] ZIMMERMAN R.; GAN D. MATPOWER. **A MATLAB power system simulation package**. [S.l.: s.n.], 1997. 1p. Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>>. Acesso em: 05 abr. 2009.
- [32] CASTRO, M. S.; AYRES, H. M.; KOPCAK, I.; SILVA, L. C. P.; DA COSTA, V. F. A Influência do modo de operação do SSSC na estabilidade de ângulo de sistemas elétricos de potência. **Controle & Automação**, Natal, v. 18, n 3, p. 347-360, 2007.
- [33] Rogers G. **Power system oscillations**. Norwell: Kluwer, 2000. 344p.
- [34] 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**. Dissertação (Doutorado)-Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas, 2005.
- [35] HAWLEY J. C. **The Modeling and simulation of a cascaded three-level converter-based SSSC**. 2004. 202f. Dissertação (Mestrado)-Virginia Polytechnic Institute, Virginia State University, Blacksburg, 2004.

- [36] MAGALHÃES, A.S. **Aplicação do transformador defasador para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência em sistemas de energia elétrica**. 2006. 108f. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas, 2006.
- [37] PILLAI G. N.; GHOSH A., JOSHI A. Torsional interaction studies on a power system compensated by SSSC and fixed capacitor. **IEEE Transaction on Power Delivery**, New York, v. 18, n. 3, p 988-993, July 2003.
- [38] MARTINS, N. Efficient eigenvalue and frequency response methods applied to power system small-signal stability studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 1, PWRS-1, n. 1, 217-226, 1986.
- [39] 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.
- [40] ARAUJO P. B.; ZANETTA JUNIOR, L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. **Electrical Power and Energy Systems**, Oxford, v. 23, n.3, p. 173-178, 2001.
- [41] FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Melhora da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas usando o dispositivo FACTS thyristor controlled series capacitor – TCSC. **Revista Controle e Automação da Sociedade Brasileira de Automática – SBA**, Natal, v. 19, n. 2, p. 214-225, 2008.

## Apêndice I. Matriz de Transformação de Coordenadas

Considere dois sistemas de coordenadas distintos, conforme Figura I.1, onde tem-se um sistema fixo, determinado pelos eixos real (r) e imaginário (m), e outro rotativo, determinado pelos eixos direto (d) e em quadratura (q).

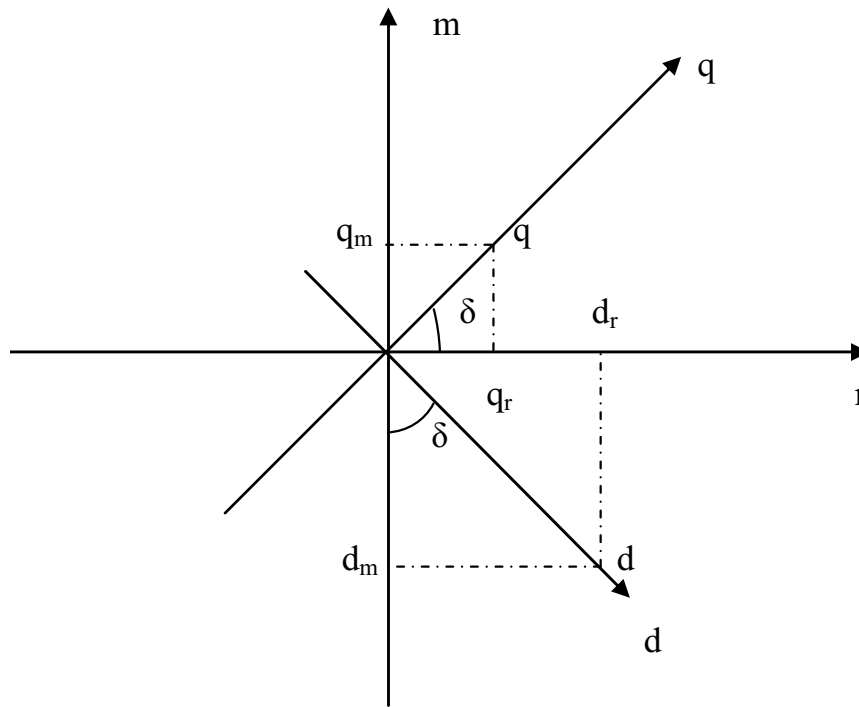


Figura I.1 – Sistemas de coordenadas r,m e d,q.

Da Figura I.1 pode-se expressar uma grandeza sobre o eixo real (r), como na equação (I.1).

$$r = d_r + q_r \quad (\text{I.1})$$

De maneira semelhante, para uma grandeza no eixo imaginário (m), tem-se a equação (I.2).

$$m = -d_m + q_m \quad (\text{I.2})$$

Da Figura I.1 também podem ser obtidas as relações trigonométricas de interesse,

descritas pelas equações (I.3).

$$\begin{aligned}\cos \delta &= \frac{q_r}{q} \\ \sin \delta &= \frac{q_m}{q} \\ \cos \delta &= \frac{d_m}{d} \\ \sin \delta &= \frac{d_r}{d}\end{aligned}\tag{I.3}$$

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 (I.4)).

$$\begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix}\tag{I.4}$$

De maneira similar, obtém-se a transformada inversa entre os sistemas de coordenadas (d,q) e (r,m) (equação (I.5)).

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix}\tag{I.5}$$

## Apêndice II. Coeficientes de Sensibilidade de Potência para uma Linha de Transmissão com o SSSC

Este apêndice contém o desenvolvimento dos coeficientes de sensibilidade de potência citados no Capítulo 3 provenientes da linearização das equações de fluxo de potência entre duas barras genéricas  $i$  e  $j$  com inserção de um controlador SSSC. Estes coeficientes são obtidos a partir da derivada parcial da expressão da potência ativa e reativa em relação às variáveis de estado e algébricas.

### II.A. Coeficientes de Sensibilidade de Potência Ativa

$$A1_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_{ij}} = \frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_i V_j \sin \theta_{ij} + \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_i V_j \cos \theta_{ij} + \frac{2R_{ij}X_T}{|Z_T|^3} \frac{V_i V_j V_S \sin \theta_{ij} (V_j^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2) V_i V_j V_S}{|Z_T|^3} \left[ \frac{\cos \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} - \frac{V_i V_j \sin^2 \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} \right] \quad (II.1)$$

$$A2_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = \frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} (2V_i - V_j \cos \theta_{ij}) + \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_j \sin \theta_{ij} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2) V_j V_S \sin \theta_{ij} (V_j^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} + \frac{2R_{ij}X_T V_S}{|Z_T|^3} \left[ \frac{V_i - V_j \cos \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} + \frac{V_i V_j^2 \sin^2 \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} \right] \quad (II.2)$$

$$A3_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_i \cos \theta_{ij} + \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_i \sin \theta_{ij} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2) V_i V_S \sin \theta_{ij} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} - \frac{2R_{ij}X_T V_i V_S}{|Z_T|^3} \left[ \frac{\cos \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} + \frac{(V_j - V_i \cos \theta_{ij})(V_i - V_j \cos \theta_{ij})}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} \right] \quad (II.3)$$

$$A4_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_S} = \frac{2R_{ij}X_T (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2) V_i V_j \sin \theta_{ij}}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} \quad (II.4)$$

## II.B. Coeficientes de Sensibilidade de Potência Reativa

$$R1_{ij} = \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_{ij}} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_i V_j \cos \theta_{ij} + \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_i V_j \sin \theta_{ij} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2) V_i V_j V_S \sin \theta_{ij} (V_j^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} - \frac{2R_{ij} X_T V_i V_j V_S}{|Z_T|^3} \left[ \frac{\cos \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} - \frac{V_i V_j \sin^2 \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} \right] \quad (II.5)$$

$$R2_{ij} = \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_j \sin \theta_{ij} + \frac{X_T}{|Z_T|^2} (2V_i - V_j \cos \theta_{ij}) - \frac{2R_{ij} X_T V_j V_S \sin \theta_{ij} (V_j^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2)}{|Z_T|^3} V_S \left[ \frac{V_i - V_j \cos \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} + \frac{V_i V_j^2 \sin^2 \theta_{ij}}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} \right] \quad (II.6)$$

$$R3_{ij} = \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -\frac{R_{ij}}{|Z_T|^2} V_i \sin \theta_{ij} - \frac{X_T}{|Z_T|^2} V_i \cos \theta_{ij} - \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2) V_i^2 V_j V_S \sin^2 \theta_{ij}}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} - \frac{2R_{ij} X_T V_i V_S \sin \theta_{ij}}{|Z_T|^3} \left[ \frac{1}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} - \frac{V_j (V_j - V_i \cos \theta_{ij})}{\sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}^3} \right] \quad (II.7)$$

$$R4_{ij} = \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_S} = -\frac{2R_{ij} X_T V_i V_j \sin \theta_{ij}}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} + \frac{(-R_{ij}^2 + X_T^2) (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})}{|Z_T|^3 \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}}} \quad (II.8)$$

### Apêndice III. Dados do Sistema Multimáquinas Simétrico (4 Geradores e 10 Barras)

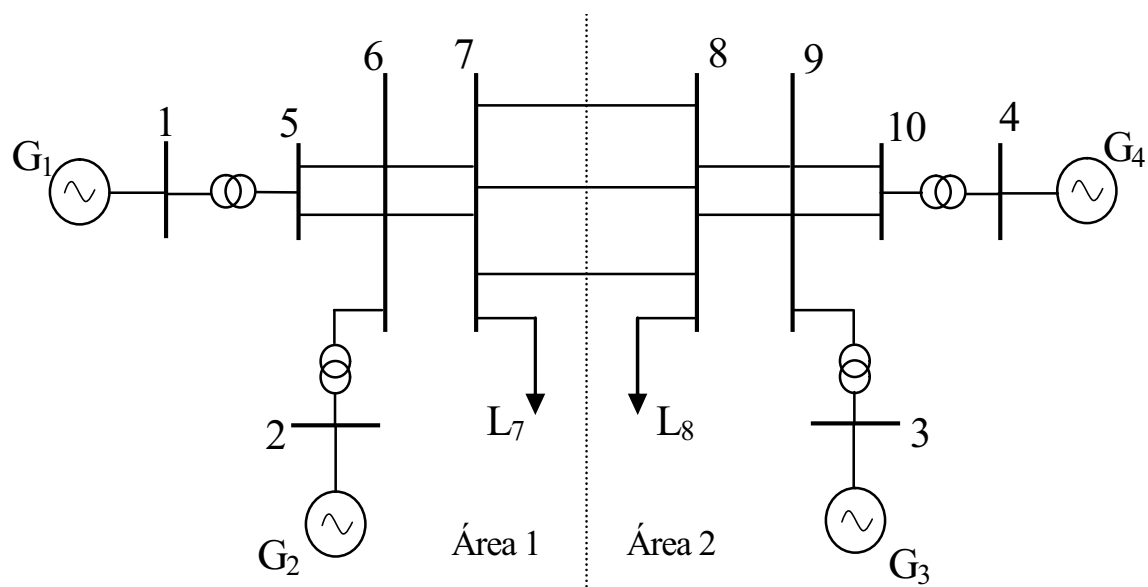


Figura III.1 – Diagrama Unifilar – Sistema de 2 Áreas, 4 Geradores e 10 Barras.

Tabela III.1 – Dados das Barras.

| Barra | Tensão (pu) | Ângulo (graus) | Potência Ativa (pu) | Potência Reativa (pu) |
|-------|-------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| 1     | 1,0         | 8,683          | 7,0000              | 1,9597                |
| 2     | 1,0         | -2,088         | 7,0000              | 5,0525                |
| 3     | 1,0         | -11,924        | 7,0000              | 6,0155                |
| 4     | 1,0         | 0              | 7,4369              | 2,3608                |
| 5     | 0,973       | 3,846          | -                   | -                     |
| 6     | 0,936       | -6,928         | -                   | -                     |
| 7     | 0,886       | -16,162        | -11,59              | -2,12                 |
| 8     | 0,865       | -26,575        | -15,75              | -2,88                 |
| 9     | 0,924       | -16,765        | -                   | -                     |
| 10    | 0,968       | -5,149         | -                   | -                     |

Tabela III.2 – Dados das Linhas de Transmissão.

| Linha | Barra Inicial | Barra Final | R (série)<br>(pu) | X (série)<br>(pu) | G (shunt)<br>(pu) | B (shunt)<br>(pu) |
|-------|---------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1     | 1             | 5           | 0,001             | 0,012             | -                 | -                 |
| 2     | 2             | 6           | 0,001             | 0,012             | -                 | -                 |
| 3     | 7             | 8           | 0,022             | 0,22              | -                 | 0,33              |
| 4     | 7             | 8           | 0,022             | 0,22              | -                 | 0,33              |
| 5     | 7             | 8           | 0,022             | 0,22              | -                 | 0,33              |
| 6     | 6             | 7           | 0,002             | 0,02              | -                 | 0,03              |
| 7     | 6             | 7           | 0,002             | 0,02              | -                 | 0,03              |
| 8     | 4             | 10          | 0,001             | 0,012             | -                 | -                 |
| 9     | 3             | 9           | 0,001             | 0,012             | -                 | -                 |
| 10    | 9             | 8           | 0,002             | 0,02              | -                 | 0,03              |
| 11    | 9             | 8           | 0,002             | 0,02              | -                 | 0,03              |
| 12    | 5             | 6           | 0,005             | 0,05              | -                 | 0,075             |
| 13    | 5             | 6           | 0,005             | 0,05              | -                 | 0,075             |
| 14    | 10            | 9           | 0,005             | 0,05              | -                 | 0,075             |
| 15    | 10            | 9           | 0,005             | 0,05              | -                 | 0,075             |

Tabela III.3 – Dados dos Geradores.

| Unidade Geradora | H (s) | T' <sub>do</sub> (s) | x' <sub>d</sub> (pu) | x <sub>q</sub> (pu) | x <sub>d</sub> (pu) | D    |
|------------------|-------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|------|
| 1                | 54,0  | 8,0                  | 0,033                | 0,19                | 0,2                 | 0,01 |
| 2                | 54,0  | 8,0                  | 0,033                | 0,19                | 0,2                 | 0,01 |
| 3                | 63,0  | 8,0                  | 0,033                | 0,19                | 0,2                 | 0,01 |
| 4                | 63,0  | 8,0                  | 0,033                | 0,19                | 0,2                 | 0,01 |

Tabela III.4 – Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão.

| Unidade Geradora | T <sub>r</sub> (s) | K <sub>r</sub> |
|------------------|--------------------|----------------|
| 1                | 0,001              | 200            |
| 2                | 0,001              | 200            |
| 3                | 0,001              | 200            |
| 4                | 0,001              | 200            |

## Apêndice IV. Dados do Sistema Multimáquinas New England (10 Geradores e 39 Barras)

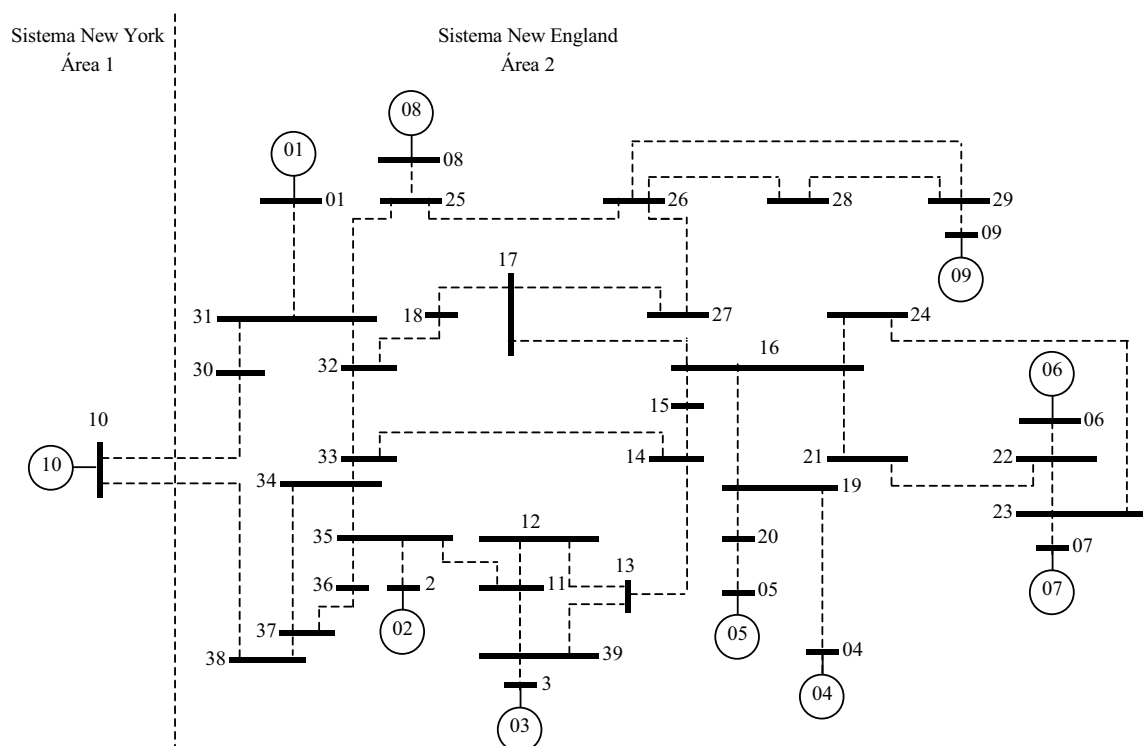


Figura IV.1 – Diagrama Unifilar New England – Sistema de 2 Áreas, 10 Geradores e 39 Barras.

Tabela IV.1 – Dados dos Geradores.

| Gerador | $x'_d$ (pu) | $x_d$ (pu) | $x_q$ (pu) | H (s)  | D (pu) | $T'_{do}$ (s) |
|---------|-------------|------------|------------|--------|--------|---------------|
| 1       | 0,0310      | 0,1000     | 0,0609     | 42,00  | 6,82   | 10,20         |
| 2       | 0,0697      | 0,2950     | 0,2820     | 30,30  | 4,87   | 6,56          |
| 3       | 0,0531      | 0,2495     | 0,2370     | 35,80  | 5,68   | 5,70          |
| 4       | 0,0436      | 0,2620     | 0,2580     | 28,60  | 4,64   | 6,56          |
| 5       | 0,1320      | 0,6700     | 0,6200     | 26,00  | 4,22   | 5,40          |
| 6       | 0,0500      | 0,2540     | 0,2410     | 34,80  | 5,65   | 7,30          |
| 7       | 0,0490      | 0,2950     | 0,2920     | 26,40  | 4,28   | 5,66          |
| 8       | 0,0570      | 0,2900     | 0,2800     | 24,30  | 3,94   | 6,70          |
| 9       | 0,0570      | 0,2106     | 0,2050     | 34,50  | 5,60   | 4,79          |
| 10      | 0,0060      | 0,0200     | 0,0190     | 500,00 | 10,00  | 7,00          |

Tabela IV.2 – Dados dos Reguladores Automáticos de Tensão.

| Gerador | Kr (pu) | Tr (s) |
|---------|---------|--------|
| 1       | 100     | 0,01   |
| 2       | 100     | 0,01   |
| 3       | 100     | 0,01   |
| 4       | 100     | 0,01   |
| 5       | 100     | 0,01   |
| 6       | 100     | 0,01   |
| 7       | 100     | 0,01   |
| 8       | 100     | 0,01   |
| 9       | 100     | 0,01   |
| 10      | 100     | 0,01   |

Tabela IV.3 – Dados das Linhas de Transmissão.

| Barra Inicial | Barra Final | R (pu) | X (pu) | B (pu) |
|---------------|-------------|--------|--------|--------|
| 30            | 31          | 0,0035 | 0,0411 | 0,6987 |
| 30            | 10          | 0,0010 | 0,0250 | 0,7500 |
| 31            | 32          | 0,0013 | 0,0151 | 0,2572 |
| 31            | 25          | 0,0070 | 0,0086 | 0,1406 |
| 32            | 33          | 0,0013 | 0,0213 | 0,2214 |
| 32            | 18          | 0,0011 | 0,0133 | 0,2138 |
| 33            | 34          | 0,0008 | 0,0128 | 0,1342 |
| 33            | 14          | 0,0008 | 0,0129 | 0,1382 |
| 34            | 35          | 0,0002 | 0,0026 | 0,0434 |
| 34            | 37          | 0,0008 | 0,0112 | 0,1476 |
| 35            | 36          | 0,0006 | 0,0092 | 0,1130 |
| 35            | 11          | 0,0007 | 0,0082 | 0,1389 |
| 36            | 37          | 0,0004 | 0,0046 | 0,0780 |
| 37            | 38          | 0,0023 | 0,0363 | 0,3804 |
| 38            | 10          | 0,0010 | 0,0250 | 1,2000 |
| 39            | 11          | 0,0004 | 0,0043 | 0,0729 |

Tabela IV.3 – Dados das Linhas de Transmissão (continuação).

| Barra Inicial | Barra Final | R (pu) | X (pu) | B (pu) |
|---------------|-------------|--------|--------|--------|
| 39            | 13          | 0,0004 | 0,0043 | 0,0729 |
| 13            | 14          | 0,0009 | 0,0101 | 0,1723 |
| 14            | 15          | 0,0018 | 0,0217 | 0,3660 |
| 15            | 16          | 0,0009 | 0,0094 | 0,1710 |
| 16            | 17          | 0,0007 | 0,0089 | 0,1342 |
| 16            | 19          | 0,0016 | 0,0195 | 0,3040 |
| 16            | 21          | 0,0008 | 0,0135 | 0,2548 |
| 16            | 24          | 0,0003 | 0,0059 | 0,0680 |
| 17            | 18          | 0,0007 | 0,0082 | 0,1319 |
| 17            | 27          | 0,0013 | 0,0173 | 0,3216 |
| 21            | 22          | 0,0008 | 0,0140 | 0,2565 |
| 22            | 23          | 0,0006 | 0,0096 | 0,1846 |
| 23            | 24          | 0,0022 | 0,0350 | 0,3610 |
| 25            | 26          | 0,0032 | 0,0323 | 0,5130 |
| 26            | 27          | 0,0014 | 0,0147 | 0,2396 |
| 26            | 28          | 0,0043 | 0,0474 | 0,7802 |
| 26            | 29          | 0,0057 | 0,0625 | 1,0290 |
| 28            | 29          | 0,0014 | 0,0151 | 0,2490 |
| 12            | 11          | 0,0016 | 0,0435 | 0      |
| 12            | 13          | 0,0016 | 0,0435 | 0      |
| 35            | 2           | 0      | 0,0250 | 0      |
| 39            | 3           | 0      | 0,0200 | 0      |
| 19            | 4           | 0,0007 | 0,0142 | 0      |
| 20            | 5           | 0,0009 | 0,0180 | 0      |
| 22            | 6           | 0      | 0,0143 | 0      |
| 23            | 7           | 0,0005 | 0,0272 | 0      |
| 25            | 8           | 0,0006 | 0,0232 | 0      |
| 31            | 1           | 0      | 0,0181 | 0      |
| 29            | 9           | 0,0008 | 0,0156 | 0      |

Tabela IV.3 – Dados das Linhas de Transmissão (continuação).

| Barra Inicial | Barra Final | R (pu) | X (pu) | B (pu) |
|---------------|-------------|--------|--------|--------|
| 19            | 20          | 0,0007 | 0,0138 | 0      |

Tabela IV.4 – Dados das Barras.

| 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     | 1,0000  | -6,1418      | 250                 | 89,896                | -                   | -                     |
| 2     | 1,0000  | 0            | 664,32              | 258,080               | 9                   | 5                     |
| 3     | 1,0000  | 0,45861      | 650                 | 240,790               | -                   | -                     |
| 4     | 1,0000  | 2,1954       | 632                 | 141,960               | -                   | -                     |
| 5     | 1,0000  | 1,2983       | 508                 | 133,100               | -                   | -                     |
| 6     | 1,0000  | 4,1935       | 650                 | 194,590               | -                   | -                     |
| 7     | 1,0000  | 7,3774       | 560                 | 133,000               | -                   | -                     |
| 8     | 1,0000  | -0,025173    | 540                 | 36,996                | -                   | -                     |
| 9     | 1,0000  | 6,0937       | 830                 | 66,321                | -                   | -                     |
| 10    | 1,0000  | -15,259      | 1000                | 206,650               | 1214,4              | 250                   |
| 11    | 0,95599 | -8,2062      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 12    | 0,93551 | -8,2379      | -                   | -                     | 8                   | 88                    |
| 13    | 0,9561  | -8,1368      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 14    | 0,94986 | -10,068      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 15    | 0,9466  | -10,561      | -                   | -                     | 320                 | 153                   |
| 16    | 0,96138 | -8,9504      | -                   | -                     | 329                 | 32                    |
| 17    | 0,96484 | -10,251      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 18    | 0,96343 | -11,284      | -                   | -                     | 158                 | 30                    |
| 19    | 0,97945 | -3,0035      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 20    | 0,97565 | -4,0088      | -                   | -                     | 628                 | 103                   |
| 21    | 0,95885 | -6,2905      | -                   | -                     | 274                 | 115                   |
| 22    | 0,97661 | -1,268       | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 23    | 0,97292 | -1,5902      | -                   | -                     | 275                 | 85                    |
| 24    | 0,96673 | -8,8594      | -                   | -                     | 309                 | -92                   |
| 25    | 0,99606 | -7,2379      | -                   | -                     | 224                 | 48                    |

Tabela IV.4 – Dados das Barras (continuação).

| 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) |
|-------|---------|--------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 26    | 0,98702 | -8,4038      | -                   | -                     | 139                 | 17                    |
| 27    | 0,97023 | -10,566      | -                   | -                     | 281                 | 76                    |
| 28    | 0,98906 | -4,4651      | -                   | -                     | 206                 | 28                    |
| 29    | 0,99144 | -1,3795      | -                   | -                     | 284                 | 27                    |
| 30    | 1,0029  | -12,883      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 31    | 0,98477 | -8,7754      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 32    | 0,96524 | -11,675      | -                   | -                     | 322                 | 2                     |
| 33    | 0,94212 | -12,265      | -                   | -                     | 500                 | 184                   |
| 34    | 0,94782 | -10,787      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 35    | 0,95095 | -9,9204      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 36    | 0,94032 | -12,592      | -                   | -                     | 233                 | 84                    |
| 37    | 0,93978 | -13,264      | -                   | -                     | 522                 | 176                   |
| 38    | 0,98667 | -14,529      | -                   | -                     | -                   | -                     |
| 39    | 0,96068 | -7,3186      | -                   | -                     | -                   | -                     |

## **Anexo I. Artigo Aceito e Submetido**

PUPIN, Carlos E.; PINA Aline P.; ARAUJO, Percival B. Estudo da estabilidade a pequenas perturbações com a atuação do dispositivo FACTS SSSC em sistemas multimáquinas. In: **BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND APPLICATIONS – DINCON, 8**, Bauru, 2009. (no prelo)

PUPIN, Carlos E.; PINA Aline P.; ARAUJO, Percival B. Atuação do SSSC na estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas. In: **CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – CBQEE, 8**, Blumenau, 2009 (Submetido)