



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE A PEQUENAS PERTURBAÇÕES DO
SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA CONSIDERANDO A ATUAÇÃO
DO TCSC E CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE
AMORTECIMENTO: REPRESENTAÇÃO PELO MODELO DE
SENSIBILIDADE DE CORRENTE**

ANDRÉ LUIZ MIYAHARA TAKAHASHI

Orientador: Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Amorielle Furini

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

Área de Conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência

Ilha Solteira, 29 de Novembro de 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

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

- T136a Takahashi, André Luiz Miyahara.
Análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência considerando a atuação do TCSC e controladores suplementares de amortecimento : representação pelo modelo de sensibilidade de corrente / André Luiz Miyahara
Takahashi. – Ilha Solteira : [s.n.], 2013
129 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas Elétricos de Pótença, 2013
- Orientador: Percival Bueno de Araújo
Coorientador: Marcos Amorielle Furini
Inclui bibliografia
1. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 2. Estabilidade a pequenas perturbações. 3. Sistemas multimáquinas. 4. FACTS. 5. TCSC. 6. Modelo de sensibilidade de corrente.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações do Sistema Elétrico de Potência
Considerando a Atuação do TCSC e Controladores Suplementares de Amortecimento:
Representação pelo Modelo de Sensibilidade de Corrente

AUTOR: ANDRÉ LUIZ MIYAHARA TAKAHASHI

ORIENTADOR: Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCOS AMORIELLE FURINI

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

Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ANDRÉ LUIZ SILVA PEREIRA

Departamento de Áreas Acadêmicas / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia IFG -
Câmpus de Jataí

Aos meus avós, Toshio e Clarice

À minha mãe, dona Nancy

Dedico

Aos meus orientadores, Percival Bueno de Araujo

e Marcos Amorielle Furini

Ao meu amigo e irmão Marco Nagai

Ofereço

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha querida e amada avó Clarice por toda dedicação e amor. Uma grande parte dessa conquista é de sua responsabilidade.

Agradeço também ao meu avô Toshio, que mesmo à distância, sempre procurou colaborar no que fosse preciso, não medindo esforços para que mais essa realização se concretizasse.

À minha mãe, por na medida do possível, sempre me ajudar no que fosse preciso.

À minha querida Tia Denise e ao meu caro Tio Paulo, por suas broncas e incentivos.

Ao meu orientador, Percival Bueno de Araújo pelas inúmeras dúvidas sanadas ao longo desses quase cinco anos de trabalho, pelas brincadeiras e confraternizações de final de semestre e enfim, pela amizade.

Ao meu co-orientador, Marcos Amorielle Furini, por toda a colaboração na elaboração desse trabalho mesmo nos horários mais inóspitos da madrugada.

Ao meu bom amigo Marco Nagai pelos conselhos e por toda a ajuda no que diz respeito à minha carreira profissional.

Aos meus bons amigos Roger, Fernando, Nilton , Rodrigo, Aska, Leandro, Bruno, Akemy e Claudia e a todos os demais aqui não citados, agradeço por estarem sempre presentes nas horas boas e principalmente nas horas ruins para me apoiarem.

Ao meu querido cão, por sempre me receber de braços (nesse caso patas) abertos em todas as situações.

A todos vocês, o meu mais sincero,

Muito Obrigado!

*“ Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada.
Apenas dê o primeiro passo...Mesmo as noites totalmente sem estrelas podem
anunciar a aurora de uma grande realização”*

Martin Luther King

RESUMO

O advento da energia elétrica e seu uso, ainda no final do século XIX, foram sem dúvida os grandes responsáveis pelo avanço tecnológico conquistado desde então. A oferta de energia para a população permitiu agregar maior conforto às pessoas e maior eficiência aos processos produtivos. Nos primórdios, os sistemas de energia eram compostos por unidades geradoras conectadas próximas aos consumidores. Essa proximidade era consequência direta do uso de transmissão em corrente contínua, o que naquela época inviabilizava a transmissão de energia elétrica através de longas distâncias. Com a invenção e utilização de máquinas de corrente alternada e transformadores, as características dos sistemas de energia passaram a ser de unidades geradoras cada vez mais distantes dos centros de consumo, sendo conectadas por longas linhas de transmissão de alta tensão. Pela metade do século XX, vislumbrou-se que a interligação de unidades geradoras, antes operando de maneira isolada, permitiria um melhor aproveitamento do potencial elétrico dos sistemas. Da mesma forma, a interligação dos consumidores permitiria maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. Tais vantagens motivaram a interligação do sistema elétrico de potência. O que os visionários não poderiam imaginar era que a interconexão dos sistemas também traria novos problemas atrelados às oscilações de baixa frequência dos sistemas elétricos. Tais oscilações, em especial as relacionadas com os modos interárea, foram responsáveis por grandes blecautes ocorridos nos anos 1950 nos Estados Unidos e Canadá. Tornava-se evidente a necessidade de estudar e analisar tais oscilações, tal como o comportamento do sistema elétrico interligado como um todo quando submetido às contingências de grande e pequeno porte. Com as interligações os sistemas elétricos de potência se tornaram um dos mais complexos sistemas já desenvolvidos pelo homem. Tal complexidade é estendida para sua análise e estudo. Tornava-se então necessário criar modelos para seu estudo e obter ferramentas para sua análise de forma mais simples sem perda da confiabilidade dos resultados obtidos. No que diz respeito ao estudo das pequenas perturbações sofridas pelo sistema elétrico ao longo do dia, em geral como resposta às variações normais de carga, são utilizados modelos lineares baseados no Controle Clássico e nos teoremas de Lyapunov. Nessa dissertação de mestrado é proposto um modelo linear para estudo da estabilidade a pequenas perturbações baseado na lei de Kirchhoff das correntes, denominado de Modelo de Sensibilidade de Corrente. Na sequencia é incorporado o dispositivo FACTS TCSC acoplado a um controlador suplementar, com a função de fornecer amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência do

sistema elétrico de potência. Simulações são realizadas e os resultados obtidos são analisados para se obter melhor compreensão sobre o comportamento do sistema elétrico de potência quando submetido a uma pequena perturbação.

Palavras-chave: Estabilidade a pequenas perturbações. Sistemas multimáquinas. FACTS. TCSC. Modelo de sensibilidade de corrente.

ABSTRACT

The arising of electrical energy and its use in the end of 19th century are, for sure, one of the major responsible for the technology improvements conquered since then. The available of electrical energy for population also improved people's welfare and the production process efficiency. In the early days, electrical systems were composed by generator units connected close to consumers. This proximity was a straight consequence of DC (direct current) transmission, which one did not allow the transmission of power over large distances due to physical and economic constraints. With the development and use of AC (alternate current) machines and transformers, the electrical systems became composed of generator units far even more from consumer's centers, being connected to them by high voltage transmission lines. By the 1950's, it was noted that the interconnection of generators units, which was operating isolated from each other, would allow a better use of electric power system. From the same way, the interconnection of consumers allow more reliability in the electrical energy supply. Those advantages led to the interconnection of Electric Power Systems. What the visionaries could not imagine was that the interconnection would also bring to surface some new problems linked to the system's low frequency oscillations. Those oscillations, in special those related to the interarea mode, were responsible for big blackouts occurred in the 1950's in the USA and Canada. It was evident the necessity of study and analysis of those oscillations, also as the interconnected Power System behavior when under big and small contingencies. With the system's interconnection, Power Systems became one of the most complex systems already built by the man. Such complexity is extended for its analysis and study. Due to this, it was necessary create models to simplify the analysis without a loss in the results reliability. As regards to the study of small variations suffered by the system during the day, in general as a response to the normal load variations, linear models based in Classic Control and in Lyapunov Theorem's are used. In this Master's degree dissertation a linear model based for small signal stability based in Kirchoff's Law, denominated as Current Sensitivity Model is proposed. In the next Chapters the model's deduction is done and then is done a comparison with the Power Sensitivity Model, which is one of the most used models for small signal stability studies. Once the comparison is done, next step is to represent other equipments through the Current Sensitivity Model, showing this way the possibilities offered by the model for power system stability studies.

Keywords: Small-signal stability. Multi-machine systems. FACTS. TCSC. Current Sensitivity Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Barra Genérica do Sistema Elétrico de Potência	10
Figura 2:	Diagrama de Blocos: Regulador Automático de Tensão	21
Figura 3:	Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente – Sistema Multimáquinas : Representação do Gerador Síncrono k	32
Figura 4:	Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente – Sistema Multimáquinas : Representação das barras do sistema de transmissão	33
Figura 5:	Sistema Teste - Sistema Simétrico de duas áreas : 4 geradores e 10 barras	34
Figura 6:	Fatores de Participação - Autovalor associado ao Modo Interárea	38
Figura 7:	Fatores de Participação - Autovalor associado ao Modo Local dos Geradores 1 e 2	39
Figura 8:	Fatores de Participação - Autovalor associado ao Modo Local dos Geradores 3 e 4	39
Figura 9:	TCSC instalado entre as barras k e m	42
Figura 10:	Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente – Sistema Multimáquinas com TCSC instalado entre as barras j e m : Representação das barras do sistema de transmissão	46
Figura 11:	Sistema Simétrico de duas áreas com TCSC instalado	47
Figura 12:	Trajetória dos Autovalores associados ao modo interárea	60
Figura 13:	Diagrama de blocos: Controlador de 1ª ordem da variação de xTCSC	62
Figura 14:	Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente - Sistemas Multimáquinas com TCSC e seu controlador de 1ª ordem: Representação do sistema de Transmissão	69
Figura 15:	Diagrama de Blocos – Controlador POD: Estrutura geral	71
Figura 16:	Diagrama de Blocos – Controlador POD - TCSC	72
Figura 17:	Diagrama de Blocos – Controlador POD – TCSC : Filtro washout	72

- Figura 18: Diagrama de Blocos – Controlador POD – TCSC : 1º Bloco compensador lead-lag
73
- Figura 19: Diagrama de Blocos – Controlador POD – TCSC : 2º Bloco compensador lead-lag
73
- Figura 20: Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente – Sistema Multimáquinas com TCSC e seu controlador POD : Representação das barras do sistema de transmissão
85
- Figura 21: Variação angular do Gerador 1 em relação ao Gerador de Referência
90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de barra do sistema teste	34
Tabela 2: Dados dos ramos do sistema teste	35
Tabela 3: Autovalores do sistema teste	37
Tabela 4: Dados de barra do sistema teste – Caso 1	48
Tabela 5: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 1	48
Tabela 6: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 1	49
Tabela 7: Dados de barra do sistema teste – Caso 2	50
Tabela 8: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 2	51
Tabela 9: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 2	52
Tabela 10: Dados de barra do sistema teste – Caso 3	53
Tabela 11: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 3	53
Tabela 12: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 3	54
Tabela 13: Dados de barra do sistema teste – Caso 4	55
Tabela 14: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 4	56
Tabela 15: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 4	56
Tabela 16: Dados de barra do sistema teste – Caso 5	57
Tabela 17: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 5	58
Tabela 18: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 5	58
Tabela 19: Autovalores do sistema teste : TCSC equipado com controlador de 1ª ordem	87
Tabela 20: Parâmetros do Controlador POD	88
Tabela 21: Autovalores do sistema teste: TCSC equipado com controlador POD	89

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ESP	Estabilizadores do Sistema de Potência
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
MSP	Modelo de Sensibilidade de Potência
MSC	Modelo de Sensibilidade de Corrente
PQ	Barras do sistema de Potência Ativa e Reativa conhecidas, geralmente associadas à barras de cargas
PSS	Power System Stabilizers
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
POD	Power System Oscillation Damping

δ_k	Ângulo interno do k-ésimo gerador síncrono
θ_k	Ângulo do fasor tensão da barra k
ω_0	Velocidade síncrona da rede elétrica
ω_k	Velocidade angular do rotor do k-ésimo gerador síncrono
$C_{1TCSC}, C_{2TCSC}, C_{3TCSC}, C_{4TCSC}, C_{5TCSC}$	Coefficientes associados ao sinal de entrada do controladores adicionais do TCSC
D_k	Coefficiente de amortecimento do k-ésimo gerador síncrono
$\tilde{E}_{ak}$	Fasor tensão em fase com o eixo de quadratura do k-ésimo gerador síncrono
E_{ak}	Magnitude do fasor tensão em fase com o eixo de quadratura do k-ésimo gerador síncrono
$\tilde{E}'_k$	Fasor tensão interna da k-ésima máquina síncrona

Lista de Símbolos e Siglas

E'_{rk}	Componente de eixo real do fasor tensão interna do k-ésimo gerador síncrono
E'_{mk}	Componente de eixo real do fasor tensão interna do k-ésimo gerador síncrono
E'_{dk}	Componente de eixo direto do fasor tensão interna do k-ésimo gerador síncrono
E'_{qk}	Componente de eixo de quadratura do fasor tensão interna do k-ésimo gerador síncrono
E_{fdk}	Magnitude da tensão de enrolamento de campo do k-ésimo gerador síncrono
G_k	k-ésimo gerador síncrono
$\tilde{I}_{gk}$	Fasor corrente terminal do k-ésimo gerador
I_{grk}	Componente de eixo real do fasor corrente terminal do k-ésimo gerador
I_{gm_k}	Componente de eixo imaginário do fasor corrente terminal do k-ésimo gerador
I_{gd_k}	Componente de eixo direto do fasor corrente terminal do k-ésimo gerador síncrono
I_{gq_k}	Componente de eixo de quadratura do fasor corrente terminal do k-ésimo gerador síncrono
$\tilde{I}_{km}$	Fasor corrente que circula através da linha de transmissão entre as barras k e m
$I_{r_{km}}$	Componente de eixo real do fasor corrente que circula através da linha de transmissão entre as barras k e m

Lista de Símbolos e Siglas

$I_{m_{km}}$	Componente de eixo imaginário do fasor corrente que circula através da linha de transmissão entre as barras k e m
$\tilde{I}_{c_k}$	Fasor corrente drenada pela carga conectada à barra k
$I_{c_{rk}}$	Componente de eixo real do fasor corrente drenada pela carga conectada à barra k
$I_{c_{mk}}$	Componente de eixo imaginário do fasor corrente drenada pela carga conectada à barra k
$K_{1k}, K_{2k}, K_{3k}, K_{4k}$	Coefficientes do MSC associados à potência elétrica do k-ésimo gerador síncrono
$K_{5k}, K_{6k}, K_{7k}, K_{8k}$	Coefficientes do MSC associados à equação diferencial da tensão do enrolamento de campo do k-ésimo gerador síncrono
K_{rk}	Ganho do regulador de tensão acoplado ao k-ésimo gerador síncrono
$M_{1g_k}, M_{2g_k}, M_{3g_k}, M_{4g_k}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente imaginários da corrente terminal do k-ésimo gerador síncrono
$M_{1km}, M_{2km}, M_{3km}, M_{4km}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente imaginários da corrente que circula pela linha de transmissão que interliga as barras k e m
M_{5km}	Coefficiente de sensibilidade de corrente imaginário da corrente que circula pela linha de transmissão que interliga as barras k e m associado à inclusão do TCSC
$M_{1c_k}, M_{2c_k}, M_{3c_k}, M_{4c_k}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente imaginários da corrente drenada pela carga conectada à barra k

Lista de Símbolos e Siglas

$M_k = 2 H_k$	Constante de inércia do k-ésimo gerador síncrono
P_{ck}	Potência ativa drenada pela carga conectada à barra k
P_{gk}	Potência elétrica gerada pelo k-ésimo gerador síncrono
P_{mk}	Potência mecânica entregue à máquina primária do k-ésimo gerador síncrono
P_{km}	Fluxo de potência ativa entre as barras k e m
Q_{ck}	Potência reativa drenada pela carga conectada à barra k
$R_{1gk}, R_{2gk}, R_{3gk}, R_{4gk}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente reais da corrente terminal do k-ésimo gerador síncrono
$R_{1km}, R_{2km}, R_{3km}, R_{4km}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente reais da corrente que circula pela linha de transmissão que interliga as barras k e m
R_{5km}	Coefficiente de sensibilidade de corrente real da corrente que circula pela linha de transmissão que interliga as barras k e m associado à inclusão do TCSC
$R_{1ck}, R_{2ck}, R_{3ck}, R_{4ck}$	Coefficientes de sensibilidade de corrente reais da corrente drenada pela carga conectada à barra k
r_{km}	Resistência da linha de transmissão que interliga as barras k e m
S_{ck}	Potência aparente drenada pela carga conectada à barra k
T	Matriz de transformação de coordenadas (r,m) para coordenadas (d,q)

Lista de Símbolos e Siglas

T^{-1}	Matriz inversa de transformação de coordenadas (r,m) para coordenadas (d,q)
T'_{d0k}	Constante de tempo transitória de circuito de eixo direto do k-ésimo gerador síncrono
T_{rk}	Constante de tempo do regulador automático de tensão
T_{TCSC}	Constante de tempo do controlador de 1ª ordem do TCSC
U	Vetor de variáveis de entrada do MSC
$\tilde{V}_k$	Fasor tensão da barra k
V_k	Magnitude do fasor tensão da barra k
V_{rk}	Componente de eixo real do fasor tensão da barra k
V_{mk}	Componente de eixo imaginário do fasor tensão da barra k
V_{dk}	Componente de eixo direto do fasor tensão da barra k
V_{qk}	Componente de eixo de quadratura do fasor tensão da barra k
V_{refk}	Tensão de referência do regulador automático de velocidade
x'_{dk}	Reatância transitória de eixo direto do k-ésimo gerador síncrono
x_{qk}	Reatância síncrona de eixo de quadratura do k-ésimo gerador síncrono
Z	Vetor de variáveis algébricas do MSC
X	Vetor de variáveis de estado do MSC

Lista de Símbolos e Siglas

x_{km}	Reatância da linha de transmissão que interliga as barras k e m
$x_{km_{ef}}$	Reatância efetiva da linha de transmissão que interliga as barras k e m
x_{TCSC}	Reatância equivalente do TCSC
X_{ref}	Reatância de referência para o controlador de 1ª ordem do TCSC
Z_{km}	Impedância da linha de transmissão que interliga as barras k e m
$ Z_{km} $	Módulo da impedância da linha de transmissão que interliga as barras k e m
Z'_{km}	Impedância da linha de transmissão que interliga as barras k e m e com TCSC instalado
$ Z'_{km} $	Módulo da impedância da linha de transmissão que interliga as barras k e m e com TCSC instalado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	O MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	Erro! Indicador não definido.
2.1	Introdução	9
2.2	Modelo de Sensibilidade de Corrente	9
2.3	Equações básicas do Modelo de Sensibilidade de Corrente	10
2.4	Correntes no Sistema Elétrico Multimáquinas	13
2.4.1	<i>Corrente Terminal do Gerador Síncrono</i>	13
2.4.2	<i>Correntes nas Linhas de Transmissão</i>	14
2.4.3	<i>Corrente Drenada pelas Cargas</i>	15
2.5	Balanço Nodal de Correntes	16
2.6	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente	16
2.6.1	<i>Coefficientes do Gerador Síncrono</i>	17
2.6.2	<i>Coefficientes das Linhas de Transmissão</i>	17
2.6.3	<i>Coefficientes da Carga</i>	17
2.7	Equações Diferenciais do Modelo de Sensibilidade de Corrente	18
2.7.1	<i>Equações Eletromecânicas das Máquinas Síncronas</i>	18
2.7.2	<i>Dinâmica do Circuito de Campo da Máquina Síncrona</i>	19
2.7.3	<i>Dinâmica do Sistema de Excitação dos Geradores Síncronos</i>	20
2.8	Representações do Modelo de Sensibilidade de Corrente	21
2.9	Simulações e Resultados	33
3	INCLUSÃO DO FACTS TCSC AO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	Erro! Indicador não definido.
3.1	Introdução	41
3.2	Inclusão do TCSC ao Modelo de Sensibilidade de Corrente	41
3.3	Representações do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do TCSC	43
3.4	Simulações e Resultados	46
3.4.1	<i>Caso 1: Compensação do TCSC ajustada em 15%</i>	47
3.4.2	<i>Caso 2: Compensação do TCSC ajustada em 30%</i>	50
3.4.3	<i>Caso 3: Compensação do TCSC ajustada em 50%</i>	52
3.4.4	<i>Caso 4: Compensação do TCSC ajustada em 75%</i>	54
3.4.5	<i>Caso 5: Compensação do TCSC ajustada em 90%</i>	56

4	INCLUSÃO E MODELAGEM DE CONTROLADORES ADICIONAIS AO TCSC E SUAS REPRESENTAÇÕES ATRAVÉS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE POTÊNCIA	Erro! Indicador não definido.
4.1	Introdução	61
4.2	Controlador de 1º ordem do TCSC	62
4.2.1	<i>Representações do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do controlador de 1ª ordem do TCSC</i>	633
4.3	Controlador POD – Power Oscillating Damping Controller	690
4.3.1	<i>Inclusão do Controlador POD junto ao TCSC</i>	711
4.3.2	<i>Projeto do Controlador POD</i>	766
4.3.3	<i>Representações do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do controlador POD acoplado ao TCSC</i>	787
4.4	Simulações e Resultados	876
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	Erro! Indicador não definido.0
	REFERÊNCIAS	Erro! Indicador não definido.2
	APÊNDICE A - TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS	1010
	APÊNDICE B - COEFICIENTES DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	1032
	B.1 Coeficientes do Gerador Síncrono	1032
	B.2 Coeficientes das Linhas de Transmissão	1032
	B.3 Coeficientes das Linhas de Transmissão considerando a instalação do TCSC	1043
	B.4 Coeficientes da Carga	1054
	APÊNDICE C - DADOS DO SISTEMA TESTE	10706
	ANEXO A – ARTIGOS PUBLICADOS	10908

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha atualmente papel vital na sociedade humana. Seja para o desenvolvimento de novas tecnologias, armazenamento e tráfego de dados e informações, por permitir o funcionamento dos mais diversos tipos de aparelhos ou simplesmente pelo conforto e praticidade proporcionados à sociedade, pode-se afirmar, sem sombra de dúvidas, que o mundo do século XXI é totalmente dependente desta forma de energia. Isso fica claro quando notamos os diversos aparelhos movidos à eletricidade em seu funcionamento, mas torna-se ainda mais claro quando, por qualquer razão que seja, deixam de funcionar devido a uma interrupção no fornecimento de energia elétrica.

Desta forma, o planejamento, operação, manutenção e proteção de sistemas elétricos de potência (SEPs) representam um enorme e importante desafio, de maneira a permitir que a energia elétrica gerada, em geral, em locais distantes dos centros de consumo, chegue ao seu destino final, às suas, às minhas e às tomadas de inúmeras residências e indústrias mundo afora, dentro de rígidos padrões de qualidade estabelecidos e, idealmente, sem interrupções em seu fornecimento, com os menores custos e perdas possíveis. Para que tudo isso ocorra, é necessário um minucioso estudo das diversas componentes de um sistema de energia, de maneira a prever, evitar ou ao menos minimizar os efeitos de possíveis contingências sobre o SEP.

Aliado ao estudo das contingências que atingem o SEP, deve-se também planejar a sua expansão, de maneira a suprir o aumento no consumo. Dentre os diversos estudos necessários para a operação do SEP, será abordada neste trabalho a questão da estabilidade, com foco na estabilidade a pequenas perturbações. Define-se como estabilidade a capacidade do SEP de permanecer atuando dentro de seus limites operativos quando submetido a algum tipo de perturbação, sendo a estabilidade a pequenas perturbações, como o próprio nome sugere, o estudo da estabilidade do SEP quando sujeito a perturbações de menor magnitude, as quais em geral, são mais comuns, visto que ocorrem a cada momento (BRETAS; ALBERTO, 2000; IEEE/CIGRÉ JOINT TASK FORCE, 2003).

Um dos objetivos do estudo da estabilidade é exatamente este: através da análise de certas condições operacionais, prever qual o impacto de uma dada perturbação sobre o SEP, se haverá necessidade de desligamento de linhas de transmissão, unidades geradores e corte no fornecimento de carga aos centros consumidores.

De acordo com Kundur (1994), o estudo da estabilidade de sistemas elétricos engloba três diferentes análises: a estabilidade de ângulo, a qual analisa a capacidade do sistema de permanecer em sincronismo; a estabilidade de tensão, que verifica a capacidade do sistema de manter níveis de tensão aceitáveis além de analisar o balanço de potência reativa do sistema e, por fim, a estabilidade de médio e longo prazo, a qual analisa os efeitos de grandes perturbações sobre o sistema de potência após decorridas as primeiras oscilações.

Para o estudo da estabilidade de ângulo e da estabilidade de tensão, deve-se considerar ainda a magnitude da perturbação. As perturbações são, nesse caso, classificadas como grandes perturbações e pequenas perturbações. Como o próprio nome diz, grandes perturbações correspondem a perturbações de grande magnitude, tais como faltas e variações bruscas na potência gerada e/ou consumida. A análise de grandes perturbações envolve o estudo de equações diferenciais não lineares. Já o conceito de pequena perturbação é aplicado a qualquer distúrbio cuja ocorrência possa ser analisada através da linearização das equações que representam a resposta do sistema.

Embora de pequena magnitude, os efeitos das pequenas perturbações no sistema podem ir desde pequenas alterações no ponto de operação do sistema até a evolução para quadros de instabilidade. Neste trabalho, é analisada a estabilidade em ângulo, sendo assim, ocorrida uma pequena perturbação, um sistema é dito instável quando após uma contingência, seu comportamento se caracterizar pelo aumento no ângulo interno do rotor das máquinas síncronas devido à ausência de torque sincronizante ou oscilações de amplitude crescente na velocidade angular do rotor, causadas pela ausência de amortecimento no sistema (KUNDUR, 1994; ROGERS, 2000).

Das causas citadas acima, ausência de torque sincronizante e ausência de amortecimento no sistema, esta última tem sido objeto de estudo, sobretudo em sistemas multimáquinas em que existam áreas distintas de geradores conectados entre si através de longas linhas de transmissão. Explica-se: a interligação de unidades geradoras agrega uma série de vantagens operacionais, tais como o melhor aproveitamento do potencial energético disponível, a capacidade de se optar pela fonte de energia de menor custo e permitir uma maior confiabilidade ao sistema, visto que para determinadas contingências em uma unidade geradora, outra poderia atender emergencialmente a carga suprida. Entretanto, a interconexão também produziu efeitos negativos, na época desconhecidos, relacionados com o fraco amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema relacionadas com os modos oscilatórios denominados de modos locais e modos interáreas (ANDERSON; FOUAD, 2003;

KUNDUR, 1994; ROGERS, 2000; YU, 1983).

As oscilações de modo local estão associadas às oscilações dos rotores de um grupo de geradores próximos com o restante do sistema elétrico e possuem frequências típicas na faixa de 0,7 Hz a 2,0 Hz. As oscilações de modo interárea (frequência de ocorrência entre 0,1 Hz a 0,8 Hz) estão relacionadas com as oscilações de grupos de geradores de uma área com os geradores de outra área (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994; LARSEN; SWAN, 1981; MELLO; CONCORDIA, 1969).

O estudo da influência destas oscilações de baixa frequência, que surgem na operação em regime permanente dos sistemas elétricos, no comportamento dinâmico dos sistemas de potência é objeto de estudos da chamada “estabilidade a pequenas perturbações” (KUNDUR, 2004).

No início, os sistemas de potência eram caracterizados por geradores atuando de maneira isolada, suprindo suas respectivas cargas (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994). Dessa forma, não ocorriam modos oscilatórios interárea, de maneira que quando se teve início a interligação do sistema, este não era um problema esperado. Foi necessária a ocorrência de grandes blecautes nos EUA e Canadá no século passado, mais precisamente na década de 50 e início da década de 60, para que se tomasse nota do problema. Desde então diversos estudos e soluções tem sido propostos, analisados e colocados em prática de maneira a tornar mais eficiente e segura a operação dos SEPs.

Além da questão do amortecimento dos modos eletromecânicos, outro ponto de estrangulamento atualmente passa pelas restrições econômicas e principalmente pelas restrições ambientais. Em um cenário em que a população humana é cada vez maior e as melhorias socioeconômicas permitem a compra de mais equipamentos movidos a eletricidade, é natural que ocorra um crescimento constante na demanda por energia elétrica. Para acompanhar o aumento da demanda se faz necessário o aumento da geração de energia e o aumento na capacidade de transmissão do sistema. Exatamente nesse ponto da equação entram as restrições. Embora necessária, a construção de unidades geradoras e linhas de transmissão possuem um alto custo de implementação. Além disso, a pressão recente pela redução nos impactos humanos sobre o meio ambiente faz com que tais obras enfrentem uma série de restrições ambientais, em alguns casos inclusive, atrasando ou inviabilizando, sua construção.

Nestes tempos de dificuldades para a expansão da rede de transmissão e para o aumento no parque gerador de energia elétrica (devido aos altos investimentos financeiros necessários),

os FACTS surgem como um fator paliativo para suprir o aumento da demanda por energia, ao permitir um melhor aproveitamento do potencial instalado, sobretudo através do controle dos fluxos de potência (estes dispositivos foram concebidos para direcionar o fluxo de potência para rotas pré-determinadas e assim, aumentar os limites de transmissão dos sistemas elétricos) (HINGORANI; GYUGYI, 1998, 1999; PASERBA, 2003; SONG; JOHNS, 1999; WATANABE et al., 1998).

Em se tratando dos dispositivos FACTS duas classificações são possíveis e comumente usadas, sendo estas em grupos e gerações (VALLE, 2010).

A classificação em grupos depende de como os dispositivos FACTS encontram-se instalados na rede. É possível classificá-los em quatro grupos distintos: Dispositivos série; Dispositivos *shunt* ou em derivação; Combinação de Dispositivos série-*shunt* e Combinação de Dispositivos série-série (HINGORANI;GYUGYI, 2000; PASERBA, 2003).

Outra forma de classificá-los é segundo sua geração. De acordo com a utilização dos dispositivos semicondutores para o seu controle os FACTS são comumente classificados em quatro gerações diferentes.

A primeira geração é dos controladores a base de tiristores, como o TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor – Capacitor Série Controlado à Tiristor), dispositivo série, e o SVC (*Static VAR Compensator*), dispositivo *shunt* (ACHA et al., 2004; FURINI; ARAUJO, 2008; MATHUR; VARMA, 2002; MENEZES; ARAUJO, 2012).

A segunda geração dos dispositivos FACTS é composta por equipamentos que utilizam tiristores do tipo IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ou GTO's (*Gate Turn Off Thyristor*) e conversores fonte de tensão (VSC). Dentre os mais encontrados estão o SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*), dispositivo série (PUPIN, 2009; PUPIN et al., 2009), e o STATCOM (*Static Synchronous Shunt Compensator*), dispositivo *shunt* (PINA; ARAUJO, 2010).

A terceira geração dos dispositivos FACTS é composta pela integração dos equipamentos série e em derivação numa mesma linha de transmissão. O dispositivo que se utiliza dessa configuração e instalado nos sistemas elétricos de potência é o Controlador de Fluxo de Potência Unificado (UPFC), o qual é visto como a combinação de um SSSC com um STATCOM (AYRES, 2005; FURINI et al., 2011; MOURA et al., 2012; VALLE; ARAUJO, 2012). As principais atribuições de um UPFC no sistema de potência são o controle de potência, o controle de tensão na barra onde o controlador encontra-se instalado e

a compensação de reativos (FURINI, 2008).

Considera-se a existência de uma quarta geração de equipamentos FACTS. Nesta, a integração dos equipamentos série e em derivação é feita em linhas diferentes (GYUGYI et al., 1999; VALLE et al., 2010). Um exemplo de dispositivo da quarta geração é o conhecido como IPFC (*Interline Power Flow Controller*) que é composto pela combinação de dois ou mais controladores SSSCs em linhas distintas. Esse dispositivo, dependendo de sua configuração, controla tanto fluxos de potência ativa quanto fluxos de potência reativa; e também pode fazer compensação série reativa nas linhas onde se encontra instalado. Além dessas qualidades, o IPFC torna-se uma opção para melhoria da estabilidade dinâmica quando equipado com sinais estabilizadores suplementares em sua malha de controle (KAZEMI; KARIMI, 2006; PARIMI et al., 2008; ZHANG; YOKOYAMA, 2008).

Um dispositivo que alia as qualidades do UPFC e IPFC é o chamado Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC) que pode ser descrito como a combinação de um STATCOM (Static Synchronous Compensator) com n controladores SSSCs (Static Synchronous Series Compensator) trabalhando simultaneamente. Desta forma, ele pode controlar a tensão do barramento de instalação e n fluxos de potência ativa e reativa em n linhas de transmissão do sistema elétrico. Por essa razão o GUPFC possui uma capacidade de gerenciamento e controle de fluxos de potência muito superior a do UPFC, porque além de controlar a tensão no barramento de instalação pode controlar fluxos de potência ativa e reativa de mais de uma linha de transmissão em uma dada subestação do sistema elétrico (HUANG et al., 2000; LUBIS et al., 2011; ZHANG; YOKOYAMA, 2008).

A partir de estudos realizados posteriormente concluiu-se que os FACTS podiam também ser utilizados para amortecer as oscilações de baixa frequência do sistema elétrico, desde que dotados de um controle suplementar com a função de introduzir amortecimento (AMBAFI et al., 2012; BATI, 2010; CHANG; XU, 2007; DEL ROSSO et al., 2003; FURINI; ARAUJO, 2008; FURINI et al., 2011; GU et al., 2007; KUMAR et al., 2007; MAJUNDER et al., 2006; MARTINS; LIMA, 1990; MHASKAR; KULKARNI, 2006; MÍNGUES et al., 2007; MOURA et al., 2010; NGUYEN; GIANITO, 2008; PELLANDA et al., 2006; RAY; VENAYAGAMOORTHY, 2008; WANG et al., 1997). Este controle suplementar, comumente denominado POD (do inglês, *Power Oscillation Damping*) possui estrutura idêntica ao do Estabilizador de Sistema de Potência e quando seus parâmetros estão adequadamente ajustados podem amortecer modos de oscilação interárea (CAI; ERLICH,

2003; MOURA et al., 2010; VALLE et al., 2010; WANG; SWIFT, 1998; YANG et al., 1998).

Dentre os diversos FACTS existentes, aborda-se neste trabalho o TCSC. A opção por analisar o TCSC se baseia no fato de o mesmo possuir uma ampla base de dados na literatura e por ser empregado em diversos sistemas elétricos reais, inclusive em nosso país, onde se encontra instalado na interligação dos sistemas Norte-Sul com o objetivo de amortecer as oscilações eletromecânicas de modo interárea (GAMA et al., 1998).

Para a realização de todos estes estudos, são necessários modelos para o SEP e, para o caso de sistemas do tipo máquina síncrona barra infinita, o modelo linear de Heffron e Phillips (MHP) e o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) têm sido amplamente utilizados (LARSEN; SWANN, 1981; MELLO; CONCORDIA, 1969; DECKMANN; COSTA, 1994).

No MHP o sistema elétrico fica representado apenas por variáveis de estado. No MSP, que é baseado no balanço nodal de potências, o SEP é representado por variáveis de estado e variáveis algébricas.

Em se tratando de sistemas multimáquinas, existe a expansão do MHP (MOTA; NASCIMENTO, 2008; MOUSSA; YU, 1974), que em seu desenvolvimento possui como característica particular a necessidade de representação de um barramento infinito e a não representação do sistema de transmissão externo. Uma alternativa para contornar a perda da informação do sistema de transmissão é o emprego do MSP expandido para sistemas multimáquinas (AYRES, 2005; CASTRO, 2005; DECKMANN; COSTA, 1994; FURINI; ARAUJO, 2008; FURINI et al., 2011). Este modelo é de fácil implementação e se presta muito bem para a inclusão de dispositivos modelados por injeções de potência (BENABID et al., 2012; LUBIS et al., 2011; NOROOZIAN et al., 1997; VALLE et. al., 2010; ZHANG et al., 2006a, 2006b).

Uma contribuição deste trabalho é a utilização do Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) que é aqui proposto. O modelo linear é assim denominado em alusão ao MSP visto que sua dedução é baseada também em um conceito de igualdade de variáveis nodais, neste caso os fluxos de corrente nodais (PÁDUA JÚNIOR et al., 2013; TAKAHASHI et al., 2013).

A importância de um modelo baseado no balanço nodal de correntes pode ser compreendida observando-se que muitos dispositivos do SEP são modelados como injeções de corrente. Por exemplo, para alguns dispositivos FACTS verifica-se que o uso de um

modelo baseado em injeções de correntes pode apresentar uma série de vantagens em relação aos modelos baseados em injeções de potência, sobretudo no que diz respeito à velocidade de convergência dos problemas de fluxo de potência (ADEPOJU; KOMOLAFE, 2011; FREITAS; MORELATO, 2001; SON; LASSETER, 2004; VINKOVIC; MIHALIC, 2008).

Além da obtenção e estudo de um modelo linear baseado no balanço nodal de correntes, outra proposta deste trabalho é analisar o dispositivo FACTS TCSC, acoplado com um controlador adicional POD e os efeitos de sua inclusão sobre o SEP.

O estudo de sistemas de potência possui o inconveniente de não ser possível efetuar testes em sistemas reais. Dessa forma são propostos e estudados modelos matemáticos equivalentes do SEP que possam ser analisados através de ferramentas computacionais de simulação. Neste trabalho, utiliza-se para simular o SEP o software MATLAB[®]. A escolha do software foi baseada em três fatores principais: facilidade e domínio deste por parte do autor, a grande quantidade de bibliotecas e funções de controle presentes e a interface e programação amigável, reduzindo assim o tempo utilizado para modelar o SEP.

Quanto à apresentação do trabalho, no Capítulo 2 é apresentada a dedução do Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) para Sistemas Multimáquinas considerando as máquinas síncronas equipadas com reguladores automáticos de tensão de 1ª ordem. São apresentadas as equações diferenciais e algébricas que compõem o modelo. Ao final do Capítulo são apresentadas simulações nas quais a estabilidade a pequenas perturbações de um sistema teste adaptado de Kundur (1994) é analisada através do MSC.

Na sequência, apresenta-se no Capítulo 3 a modelagem do TCSC e a representação de sua incorporação ao sistema elétrico através do MSC. Novamente são apresentadas as equações de interesse, com a representação obtida sendo avaliada ao final do capítulo através de simulações computacionais.

Feita a análise da inclusão do TCSC, é realizado o estudo de controladores adicionais instalados junto ao dispositivo, com o objetivo de fornecer amortecimento adicional ao SEP. São abordadas duas estruturas para o controlador: uma estrutura de 1ª ordem e outra baseada em um compensador de avanço-atraso (lead-lag) de fase. Para ambas são deduzidas representações para o MSC, as quais são avaliadas ao final do Capítulo através de simulações.

Por fim, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5, sendo apresentadas na sequência as Referências (Capítulo 6) e os Apêndices, onde são apresentadas as transformações de coordenadas, expressões dos coeficientes do MSC e dados

do sistema teste utilizado para análise do modelo estudado. Finalizando, um Anexo com os trabalhos publicados durante o desenvolvimento do projeto de pesquisa nível Mestrado.

2 O MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a dedução do Modelo de Sensibilidade de Corrente (PÁDUA et. al., 2013; TAKAHASHI et. al., 2013) para sistemas elétricos compostos por mais de um gerador síncrono, definidos como Sistemas Multimáquinas.

O Modelo de Sensibilidade de Corrente é uma alternativa para o estudo da estabilidade do sistema elétrico de potência quando submetido à pequenas perturbações.

Serão apresentadas as equações que regem o modelo, assim como suas representações nos domínios do tempo (através de um conjunto de equações diferenciais e algébricas) e da frequência (representação em diagrama de blocos).

Para dedução do modelo assumem-se condições de operação simétricas e equilibradas.

2.2 Modelo de Sensibilidade de Corrente

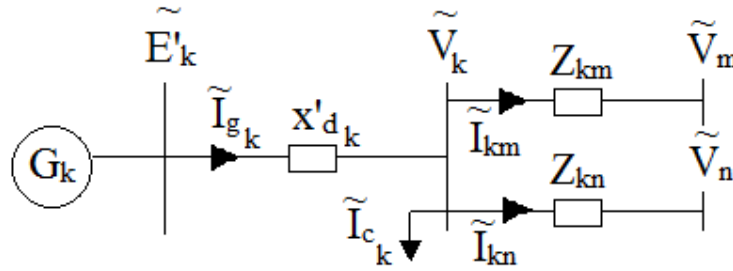
O Modelo de Sensibilidade de Corrente é assim denominado por ter sua dedução inspirada no Modelo de Sensibilidade de Potência, diferindo deste, como seu próprio nome indica, por ser baseado em um balanço de correntes enquanto que o MSP se baseia no balanço nodal de potências (DECKMANN; COSTA, 1994).

O emprego de modelos lineares baseado na igualdade de correntes para estudo da estabilidade de sistemas elétricos não é um fato inédito. Sauer e Pai (1998) apresentam um modelo baseado na igualdade do fluxo de correntes nas barras do sistema. Entretanto, suas equações são obtidas puramente da divisão das potências ativa e reativa pela magnitude da tensão, diferindo dessa forma da modelagem empregada no MSC.

2.3 Equações básicas do Modelo de Sensibilidade de Corrente

Para dedução do Modelo de Sensibilidade de Corrente, considere o diagrama unifilar apresentado na Figura 1 representando uma barra genérica k , na qual se encontram conectados um gerador G_K , representado por sua tensão interna $\tilde{E}'_k$ em série com a sua reatância transitória de eixo direto x'_{dk} , duas linhas de transmissão responsáveis por interligar a barra k com as barras m e n , representadas pela impedâncias Z_{km} e Z_{kn} .

Figura 1: Barra Genérica do Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Elaboração do próprio autor

Também na Figura 1 são apresentadas a corrente terminal do gerador síncrono k , $\tilde{I}_{g_k}$, as correntes que circulam através das linhas de transmissões conectando as barras m e n com a barra k , $\tilde{I}_{km}$ e $\tilde{I}_{kn}$. Por fim, $\tilde{I}_{c_k}$ é a corrente drenada pela carga conectada à barra k . As tensões nas barras são representadas pelas variáveis $\tilde{V}_k$, $\tilde{V}_m$ e $\tilde{V}_n$.

Aplicando a lei de Kirchoff das correntes nos nós à barra k , tem-se a expressão (1) :

$$\tilde{I}_{g_k} - \tilde{I}_{km} - \tilde{I}_{kn} - \tilde{I}_{c_k} = 0 \quad (1)$$

Para escrever as equações de balanço de correntes, serão analisadas separadamente as correntes envolvidas em (1). Iniciando a análise pela corrente fornecida pelo gerador k , temos que esta é expressa por (2):

$$\tilde{I}_{g_k} = \frac{(\tilde{E}'_k - \tilde{V}_k)}{jX'_{dk}} = I_{g_{rk}} + j I_{g_{mk}} \quad (2)$$

Sejam as tensões $\tilde{E}'_k$ e $\tilde{V}_k$ representadas pelas expressões (3) e (4) :

$$\tilde{E}'_k = E'_{rk} + jE'_{mk} \quad (3)$$

$$\tilde{V}_k = V_k(\cos \theta_k + j \sin \theta_k) = V_{rk} + jV_{mk} \quad (4)$$

Nas equações (2), (3) e (4), os índices r e m se referem às componentes de eixo real e de eixo imaginário da corrente fornecida pelo gerador, da tensão na barra k e da tensão interna do gerador, respectivamente. Essa notação será adotada daqui em diante sempre que forem especificadas componentes de eixo real e imaginário de algum fasor. Para as variáveis escritas em coordenadas de eixo direto e eixo de quadratura serão associados os índices d e q.

Combinando as equações (2), (3) e (4) e, com as devidas manipulações algébricas, obtém-se a equação matricial apresentada em (5).

$$\begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{rk} \\ E'_{mk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x'_{dk} \\ -x'_{dk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g_{rk}} \\ I_{g_{mk}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

As variáveis da equação (5) estão expressas em um sistema de coordenadas fixo (r,m). Por outro lado, em estudos envolvendo a dinâmica de máquinas síncronas, é comum a representação da tensão de campo (ou qualquer outra grandeza ligada ao rotor do gerador síncrono) em um sistema de referência rotativo denominado sistema de coordenadas (d,q), ou seja, eixo direto e eixo em quadratura.

Para obter a representação da equação (5) em termos das coordenadas (d,q), aplica-se uma transformação de coordenadas, representada pela multiplicação de uma matriz de transformação T, a qual é apresentada, em conjunto com sua inversa, nas equações (6) e (7), respectivamente.

$$T_k = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & -\cos \delta_k \\ \cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T^{-1}_k = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & \cos \delta_k \\ -\cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

Em (6) e (7), δ_k corresponde ao ângulo interno do k-ésimo gerador síncrono.

Pré-multiplicando (5) pela matriz de Transformação T_k obtém-se:

$$T_k \begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = T_k \begin{bmatrix} E'_{rk} \\ E'_{mk} \end{bmatrix} + T_k \begin{bmatrix} 0 & x'_{dk} \\ -x'_{dk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{grk} \\ I_{gmk} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_k \begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} \quad (8.1)$$

$$T_k \begin{bmatrix} E'_{rk} \\ E'_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{dk} \\ E'_{qk} \end{bmatrix} \quad (8.2)$$

$$T_k \begin{bmatrix} I_{grk} \\ I_{gmk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{gdk} \\ I_{gqk} \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

Substituindo as equações obtidas em (8), escreve-se:

$$\begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{dk} \\ E'_{qk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x'_{dk} \\ -x'_{dk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{gdk} \\ I_{gqk} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Em [1,3] define-se uma tensão em fase com o eixo em quadratura da máquina síncrona representada pela equação (10).

$$\tilde{E}_{ak} = \tilde{V}_k + j\tilde{I}_{gk} x_{qk} = E_{ak} (\cos \delta_k + j \sin \delta_k) \quad (10)$$

Em (10) x_{qk} é a reatância síncrona de eixo em quadratura da máquina síncrona. Esta equação pode ser reescrita, assumindo a forma mostrada em (11).

$$\begin{bmatrix} V_{rk} \\ V_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ak} \cos \delta_k \\ E_{ak} \sin \delta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x_{qk} \\ -x_{qk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{grk} \\ I_{gmk} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Aplicando a matriz de transformação de coordenadas de maneira a expressar as variáveis de (11) em coordenadas (d,q) obtém-se, com a devida manipulação algébrica, a equação (12).

$$\begin{bmatrix} V_{dk} \\ V_{qk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{ak} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x_{qk} \\ -x_{qk} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{gdk} \\ I_{gqk} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Combinando as equações (9) e (12), são obtidas as relações mostradas em (13) e (14).

$$V_{dk} = x_{qk} I_{gqk} \quad (13)$$

$$V_{q_k} = E'_{q_k} - x'_{d_k} I_{g_{d_k}} \quad (14)$$

Reescrevendo (13) e (14) obtém-se as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente fornecida pelo gerador síncrono apresentadas nas equações (15) e (16).

$$I_{g_{d_k}} = \frac{(E'_{q_k} - V_{q_k})}{x'_{d_k}} \quad (15)$$

$$I_{g_{q_k}} = \frac{V_{d_k}}{x_{q_k}} \quad (16)$$

2.4 Correntes no Sistema Elétrico Multimáquinas

O Modelo de Sensibilidade de corrente tem como princípio básico o balanço nodal de correntes nas barras do sistema elétrico. Para tanto, a utilização das componentes de eixo direto e eixo de quadratura dos geradores refletiria em uma análise errônea. Para analisar o balanço de correntes, poderiam ser adotados dois métodos: aplicar a matriz de transformação de coordenadas T de um gerador qualquer a todas as correntes do sistema ou utilizar o sistema de coordenadas fixo (r,m). Entretanto, a primeira opção implica em um aumento considerável na dedução das expressões. Dessa forma, optou-se por representar as correntes do Sistema de Potência através de suas componentes de eixo real e eixo imaginário.

2.4.1 Corrente Terminal do Gerador Síncrono

À primeira vista, imagina-se que a corrente fornecida pelo gerador síncrono deva ser representada pela decomposição da equação (2). Entretanto, ao se utilizar tal equação teríamos as expressões resultantes em função das componentes (r,m) da tensão interna do gerador síncrono. De maneira a ter as expressões das correntes como sendo funções da componente de eixo em quadratura da tensão interna, E'_q , aplica-se a matriz de transformação inversa de coordenadas às equações (15) e (16), resultando em (17):

$$\begin{bmatrix} I_{grk} \\ I_{gmk} \end{bmatrix} = T^{-1}_k \begin{bmatrix} I_{gd_k} \\ I_{gq_k} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Substituindo (7), (15) e (16) em (17) é obtida a equação (18).

$$\begin{bmatrix} I_{grk} \\ I_{gmk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & \cos \delta_k \\ -\cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{(E'_{q_k} - V_{q_k})}{x'_{dk}} \\ \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Efetuada a multiplicação das matrizes do lado direito da igualdade, chega-se às equações das componentes de eixo real e imaginário (r,m) da corrente fornecida pelo gerador síncrono.

$$I_{grk} = \frac{1}{x'_{dk}} (E'_{q_k} - V_{q_k}) \sin \delta_k + \frac{1}{x_{qk}} V_{dk} \cos \delta_k \quad (19)$$

$$I_{gmk} = -\frac{1}{x'_{dk}} (E'_{q_k} - V_{q_k}) \cos \delta_k + \frac{1}{x_{qk}} V_{dk} \sin \delta_k \quad (20)$$

2.4.2 Correntes nas Linhas de Transmissão

Obtidas as componentes que representam a corrente fornecida pelo gerador à barra k, o próximo passo é analisar as correntes $\tilde{I}_{km}$ e $\tilde{I}_{kn}$, as quais circulam pelas linhas de transmissão entre a barra k e as barras m e n. Analisando o diagrama unifilar apresentado na Figura 1, tem-se que a corrente nessas linhas são representadas pelas expressões (21) e (22) :

$$\tilde{I}_{km} = \frac{1}{Z_{km}} (\tilde{V}_k - \tilde{V}_m) = I_{r_{km}} + j I_{m_{km}} \quad (21)$$

$$\tilde{I}_{kn} = \frac{1}{Z_{kn}} (\tilde{V}_k - \tilde{V}_n) = I_{r_{kn}} + j I_{m_{kn}} \quad (22)$$

As tensões nas barras m e n são representadas pelas expressões (23) e (24).

$$\tilde{V}_m = V_m (\cos \theta_m + j \sin \theta_m) = V_{r_m} + j V_{m_m} \quad (23)$$

$$\tilde{V}_n = V_n (\cos \theta_n + j \sin \theta_n) = V_{r_n} + j V_{m_n} \quad (24)$$

Já as impedâncias das linhas de transmissão, Z_{km} e Z_{kn} são representadas pelas expressões (25) e (26) :

$$Z_{km} = r_{km} + j x_{km} \quad (25)$$

$$Z_{kn} = r_{kn} + j x_{kn} \quad (26)$$

Substituindo as equações (23) e (25) em (21) e as equações (24) e (26) em (22) e a equação (4) em ambas, obtém-se as expressões dos fasores corrente $\tilde{I}_{km}$ e $\tilde{I}_{kn}$.

$$\tilde{I}_{km} = \frac{V_k(\cos \theta_k + j \sin \theta_k) - V_m(\cos \theta_m + j \sin \theta_m)}{r_{km} + j x_{km}} \quad (27)$$

$$\tilde{I}_{kn} = \frac{V_k(\cos \theta_k + j \sin \theta_k) - V_n(\cos \theta_n + j \sin \theta_n)}{r_{kn} + j x_{kn}} \quad (28)$$

As componentes no sistema de coordenadas (r,m) das correntes que circulam pelas linhas são dadas pelas equações (29) a (32).

$$I_{km_r} = \frac{r_{km}(V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m) + x_{km}(V_k \sin \theta_k - V_m \sin \theta_m)}{|Z_{km}|^2} \quad (29)$$

$$I_{km_m} = \frac{r_{km}(V_k \sin \theta_k - V_m \sin \theta_m) - x_{km}(V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m)}{|Z_{km}|^2} \quad (30)$$

$$I_{kn_r} = \frac{r_{kn}(V_k \cos \theta_k - V_n \cos \theta_n) + x_{kn}(V_k \sin \theta_k - V_n \sin \theta_n)}{|Z_{kn}|^2} \quad (31)$$

$$I_{kn_m} = \frac{r_{kn}(V_k \sin \theta_k - V_n \sin \theta_n) - x_{kn}(V_k \cos \theta_k - V_n \cos \theta_n)}{|Z_{kn}|^2} \quad (32)$$

Nas equações (29) a (32), $|Z_{km}|$ e $|Z_{kn}|$ correspondem ao modulo do número complexo associado à impedância das linhas de transmissão. Matematicamente, o módulo da impedância é dado por:

$$|Z_{kj}|^2 = r_{kj}^2 + x_{kj}^2 \quad , \quad j = m, n \quad (33)$$

2.4.3 Corrente Drenada pelas Cargas

Para representar a corrente drenada pelas cargas conectada à barra genérica k, representada no diagrama unifilar da Figura 1 pela variável $\tilde{I}_{ck}$, considere as cargas

modeladas como sendo de potência constante. Feita essa consideração, pode-se escrever então que:

$$\tilde{I}_{c_k} = \left(\frac{S_{c_k}}{\tilde{V}_k} \right)^* = \frac{(P_{c_k} - j Q_{c_k})}{\tilde{V}_k} \quad (34)$$

Separando a equação (34) em suas componentes real e imaginária, obtém-se:

$$I_{c_{rk}} = \frac{(P_{c_k} \cos \theta_k + Q_{c_k} \sin \theta_k)}{V_k} \quad (35)$$

$$I_{c_{mk}} = \frac{(P_{c_k} \sin \theta_k - Q_{c_k} \cos \theta_k)}{V_k} \quad (36)$$

2.5 Balanço Nodal de Correntes

Definidas as expressões das correntes do sistema elétrico, pode-se reescrever a equação (1) separando a em termos de sua componentes real e imaginária:

$$I_{g_{rk}} - I_{km_r} - I_{kn_r} - I_{c_{rk}} = 0 \quad (37)$$

$$I_{g_{mk}} - I_{km_m} - I_{kn_m} - I_{c_{mk}} = 0 \quad (38)$$

Considerando a ocorrência de pequenas variações em torno do ponto de operação do sistema elétrico de potência, as equações (37) e (38) assumem a forma de (39) e (40) :

$$\Delta I_{g_{rk}} - \Delta I_{km_r} - \Delta I_{kn_r} - \Delta I_{c_{rk}} = 0 \quad (39)$$

$$\Delta I_{g_{mk}} - \Delta I_{km_m} - \Delta I_{kn_m} - \Delta I_{c_{mk}} = 0 \quad (40)$$

2.6 Coeficientes de Sensibilidade de Corrente

A partir da linearização das equações do balanço nodal de corrente, definem-se os coeficientes de sensibilidade de corrente para cada uma das correntes envolvidas na equação (38).

2.6.1 Coeficientes do Gerador Síncrono

Os coeficientes do gerador síncrono são obtidos através da linearização das componentes de eixo real e imaginário da corrente I_{g_k} . Para realizar a linearização é feita a expansão em série de Taylor das equações (19) e (20). Com isso, tem-se que:

$$\Delta I_{g_{rk}} = R_{1g_k} \Delta E'_{q_k} + R_{2g_k} \Delta \delta_k + R_{3g_k} \Delta V_k + R_{4g_k} \Delta \theta_k \quad (41)$$

$$\Delta I_{g_{mk}} = M_{1g_k} \Delta E'_{q_k} + M_{2g_k} \Delta \delta_k + M_{3g_k} \Delta V_k + M_{4g_k} \Delta \theta_k \quad (42)$$

R_{1g_k} , R_{2g_k} , R_{3g_k} , R_{4g_k} são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real enquanto que M_{1g_k} , M_{2g_k} , M_{3g_k} e M_{4g_k} são os coeficientes de sensibilidade da componente imaginária do fasor corrente terminal do gerador síncrono. As expressões detalhadas de cada um desses componentes são apresentadas no Apêndice B deste trabalho.

2.6.2 Coeficientes das Linhas de Transmissão

Aplicando a expansão em série de Taylor às equações das componentes (r,m) das correntes nas linhas de transmissão(equações (29), (30), (31) e (32)) , obtém-se (43) e (44) .

$$\Delta I_{kj_r} = R_{1kj} \Delta V_k + R_{2kj} \Delta \theta_k + R_{3kj} \Delta V_j + R_{4kj} \Delta \theta_j \quad (43)$$

$$\Delta I_{kj_m} = M_{1kj} \Delta V_k + M_{2kj} \Delta \theta_k + M_{3kj} \Delta V_j + M_{4kj} \Delta \theta_j \quad (44)$$

R_{1kj} , R_{2kj} , R_{3kj} , R_{4kj} são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real enquanto que M_{1kj} , M_{2kj} , M_{3kj} e M_{4kj} são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente imaginária do fasor corrente que circula através da linha de transmissão que conecta as barras k e j, sendo j = m,n.

2.6.3 Coeficientes da Carga

De maneira análoga ao procedimento realizado para linearizar as correntes do gerador

e das linhas de transmissão, efetua-se a linearização da corrente de carga apresentada pelas equações (35) e (36).

$$\Delta I_{c_{rk}} = R_{1_{ck}} \Delta V_k + R_{2_{ck}} \Delta \theta_k + R_{3_{ck}} \Delta P_{ck} + R_{4_{ck}} \Delta Q_{ck} \quad (45)$$

$$\Delta I_{c_{mk}} = M_{1_{ck}} \Delta V_k + M_{2_{ck}} \Delta \theta_k + M_{3_{ck}} \Delta P_{ck} + M_{4_{ck}} \Delta Q_{ck} \quad (46)$$

$R_{1_{ck}}, R_{2_{ck}}, R_{3_{ck}}, R_{4_{ck}}$ são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real enquanto que $M_{1_{ck}}, M_{2_{ck}}, M_{3_{ck}}$ e $M_{4_{ck}}$ são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente imaginária do fasor corrente drenada pela carga conectada à barra k.

ΔP_{ck} e ΔQ_{ck} representam a variação das potências ativa e reativa nas barras de carga (barras PQ) do sistema.

O conjunto formado pelas equações (41), (42), (43), (44), (45) e (46) representam as equações algébricas do MSC. Para completar a formulação do MSC, além das equações algébricas é necessário considerar as equações que representam a dinâmica da máquina síncrona.

2.7 Equações Diferenciais do Modelo de Sensibilidade de Corrente

Para completar a representação do SEP através do MSC é necessário considerar as equações diferenciais que regem a dinâmica das variáveis das máquinas síncronas. Tais equações são apresentadas na sequência.

2.7.1 Equações Eletromecânicas das Máquinas Síncronas

As equações diferenciais (47) e (48) representam a interação dinâmica entre as variáveis elétricas e mecânicas da máquina síncrona, recebendo por tal razão, o nome de equações eletromecânicas da máquina síncrona (Kundur, 1994; Anderson, Fouad, 2000).

$$M_k \Delta \dot{\omega}_k = \Delta P_{m_k} - \Delta P_{g_k} - D_k \Delta \omega_k \quad (47)$$

$$\Delta \dot{\delta}_k = \omega_{0k} \Delta \omega_k \quad (48)$$

Em (47), M_k representa a constante de inércia da máquina síncrona, P_{mk} é potência mecânica de entrada, P_{gk} é a potência elétrica gerada, D_k é o coeficiente de amortecimento das oscilações na velocidade angular do rotor, ω_k .

Em (48), ω_{0k} corresponde à velocidade angular de operação da rede elétrica. No Brasil, cujo sistema elétrico opera em 60 Hz, ω_{0k} corresponde a 377 rad/s.

A variação na potência elétrica gerada pela máquina síncrona é representada pela expressão (49).

$$\Delta P_{gk} = V_{dk} \Delta I_{gd_k} + I_{gd_k} \Delta V_{dk} + V_{qk} \Delta I_{gq_k} + I_{gq_k} \Delta V_{qk} \quad (49)$$

Linearizando as equações (13), (14), (15) e (16) e substituindo a expressão obtida em (40), tem-se :

$$\Delta P_{gk} = K_{1k} \Delta \delta_k + K_{2k} \Delta E'_{qk} + K_{3k} \Delta V_k + K_{4k} \Delta \theta_k \quad (50)$$

K_{1k} , K_{2k} , K_{3k} e K_{4k} são coeficientes associados à potência elétrica do gerador, sendo expressos pelo conjunto de equações (50).

$$K_{1k} = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} V_k \cos(\delta_k - \theta_k) + \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) (V_k^2 \cos(2(\delta_k - \theta_k))) \quad (50.1)$$

$$K_{2k} = \left(\frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (50.2)$$

$$K_{3k} = \left(\frac{1}{x'_{dk}} \right) E'_{qk} \sin(\delta_k - \theta_k) + \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) (V_k \sin(2(\delta_k - \theta_k))) \quad (50.3)$$

$$K_{4k} = -K_{1k} \quad (50.4)$$

Substituindo (50) em (47), permite reescrever a equação diferencial referente à variação da velocidade angular da máquina síncrona na forma de (51) :

$$M_k \Delta \dot{\omega}_k = \Delta P_{mk} - K_{1k} \Delta \delta_k - K_{2k} \Delta E'_{qk} - K_{3k} \Delta V_k - K_{4k} \Delta \theta_k - D_k \Delta \omega_k \quad (51)$$

2.7.2 Dinâmica do Circuito de Campo da Máquina Síncrona

A variação da tensão interna da máquina síncrona (em sua forma incremental) é dada

pela equação (52), onde T'_{d0k} é a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto e E_{fdk} é a tensão aplicada ao enrolamento de campo do gerador síncrono (ANDERSON, FOUAD, 2000; KUNDUR, 1994).

$$T'_{d0k} \Delta \dot{E}_{qk} = \Delta E_{fdk} - \Delta E'_{qk} - (x_{dk} - x'_{dk}) \Delta I_{gdk} \quad (52)$$

Com os devidos arranjos algébricos, obtém-se a equação (53) onde K_{5k} , K_{6k} , K_{7k} e K_{8k} são coeficientes associados à variação da tensão interna do gerador síncrono. As expressões dos coeficientes K_{5k} , K_{6k} , K_{7k} e K_{8k} são apresentadas nas equações (53.1), (53.2), (53.3) e (53.4) respectivamente.

$$T'_{d0k} \Delta \dot{E}_{qk} = \Delta E_{fdk} + K_{5k} \Delta E'_{qk} + K_{6k} \Delta \delta_k + K_{7k} \Delta V_k + K_{8k} \Delta \theta_k \quad (53)$$

$$K_{5k} = - \left(\frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \right) \quad (53.1)$$

$$K_{6k} = - (x_{dk} - x'_{dk}) \left(\frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (53.2)$$

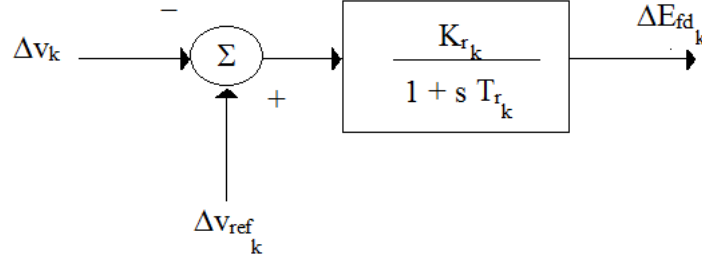
$$K_{7k} = (x_{dk} - x'_{dk}) \left(\frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (53.3)$$

$$K_{8k} = -K_{6k} \quad (53.4)$$

2.7.3 Dinâmica do Sistema de Excitação dos Geradores Síncronos

Considerando que os geradores estejam equipados com reguladores automáticos de tensão do tipo estático (controlador de 1ª ordem), cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 2, a variação da tensão de campo, em sua forma linearizada, é dada pela equação (54).

$$T_{rk} \Delta \dot{E}_{fdk} = -\Delta E_{fdk} + K_{rk} (\Delta V_{refk} - \Delta V_k) \quad (54)$$

Figura 2: Diagrama de Blocos: Regulador Automático de Tensão

Fonte: Elaboração do próprio autor

2.8 Representações do Modelo de Sensibilidade de Corrente

O conjunto de equações formado pelas equações algébricas (39) e (40) e pelas equações diferenciais (48), (51), (53) e (54) constituem a representação do MSC no domínio do tempo, cuja forma matricial é representada pela equação (55).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \Delta U \quad (55)$$

Em (55), ΔX representa o vetor das variáveis de estado, ΔZ o vetor das variáveis algébricas e ΔU o vetor das variáveis de entrada do sistema. Cada um desses vetores é definido na sequência:

$$\Delta X = [\Delta \omega \ \Delta \delta \ \Delta E'_q \ \Delta E_{fd}]^T \quad (55.1)$$

$$\Delta Z = [\Delta \theta \ \Delta V]^T \quad (55.2)$$

$$\Delta U = [\Delta P_m \ \Delta v_{ref} \ \Delta P_c \ \Delta Q_c]^T \quad (55.3)$$

Analisando o conjunto de expressões (55) conclui-se que, considerando a inclusão de reguladores automáticos de tensão de 1ª ordem em todos os geradores do SEP, o número de variáveis de estado é igual a quatro vezes o número de geradores e que a quantidade de variáveis algébricas é o dobro do número de barras do sistema de transmissão (não considerando as barras internas dos geradores). O número de entradas do sistema equivale a duas vezes o número de geradores acrescido de duas vezes o número de barras do tipo PQ

(barras de carga).

As submatrizes apresentadas em (55) são formadas de acordo com as equações (56) a (61).

$$J_1 = \begin{bmatrix} J1_{\omega\omega} & J1_{\omega\delta} & J1_{\omega Eq} & J1_{\omega Efd} \\ J1_{\delta\omega} & J1_{\delta\delta} & J1_{\delta Eq} & J1_{\delta Efd} \\ J1_{Eq\omega} & J1_{Eq\delta} & J1_{Eq Eq} & J1_{Eq Efd} \\ J1_{Efd\omega} & J1_{Efd\delta} & J1_{Efd Eq} & J1_{Efd Efd} \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$J1_{\omega\omega} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{D_2}{M_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -\frac{D_{ng}}{M_{ng}} \end{bmatrix} \quad (56.1.1)$$

$$J1_{\omega\delta} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{11}}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{K_{12}}{M_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -\frac{K_{1ng}}{M_{ng}} \end{bmatrix} \quad (56.1.2)$$

$$J1_{\omega Eq} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{21}}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{K_{22}}{M_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -\frac{K_{2ng}}{M_{ng}} \end{bmatrix} \quad (56.1.3)$$

$$J1_{\omega Efd} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (56.1.4)$$

$$J1_{\delta\omega} = \begin{bmatrix} \omega_{01} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_{02} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \omega_{0ng} \end{bmatrix} \quad (56.2.1)$$

$$J1_{\delta\delta} = J1_{\delta Eq} = J1_{\delta Efd} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (56.2.2)$$

$$J1_{Eq\omega} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (56.3.1)$$

$$J1_{Eq\delta} = \begin{bmatrix} \frac{K_{61}}{T'_{d01}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{K_{62}}{T'_{d02}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{K_{6ng}}{T'_{d0ng}} \end{bmatrix} \quad (56.3.2)$$

$$J1_{EqEq} = \begin{bmatrix} \frac{K_{51}}{T'_{d01}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{K_{52}}{T'_{d02}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{K_{5ng}}{T'_{d0ng}} \end{bmatrix} \quad (56.3.3)$$

$$J1_{EqEfd} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{d01}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{T'_{d02}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{1}{T'_{d0ng}} \end{bmatrix} \quad (56.3.4)$$

$$J1_{Efd\omega} = J1_{Efd\delta} = J1_{EfdEq} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (56.4.1)$$

$$J1_{\text{EfdEq}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{r1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{r2}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{1}{T_{rng}} \end{bmatrix} \quad (56.4.2)$$

A submatriz J_1 é formada por submatrizes quadradas de ordem n_g , ou seja, que possuem n_g linhas e n_g colunas, onde n_g representa o número de geradores do sistema multimáquinas em análise. Dessa forma, J_1 é uma matriz quadrada de ordem $4n_g$.

Observando as expressões das submatrizes que compõem J_1 , nota-se que as submatrizes que possuem elementos não nulos são matrizes diagonais, isso é, apenas os elementos de sua diagonal principal são diferentes de zero.

$$J_2 = \begin{bmatrix} J2_{\omega\theta} & J2_{\omega v} \\ J2_{\delta\theta} & J2_{\delta v} \\ J2_{\text{Eq}\theta} & J2_{\text{Eq}v} \\ J2_{\text{Efd}\theta} & J2_{\text{Efd}v} \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$J2_{\omega\theta} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{41}}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{K_{42}}{M_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -\frac{K_{4ng}}{M_{ng}} \end{bmatrix} \quad (57.1.1)$$

$$J2_{\omega v} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{31}}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{K_{32}}{M_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -\frac{K_{3ng}}{M_{ng}} \end{bmatrix} \quad (57.1.2)$$

$$J2_{\delta\theta} = J2_{\delta v} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (57.2)$$

$$J_{2_{Eq\theta}} = \begin{bmatrix} \frac{K_{81}}{T'_{d01}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{K_{82}}{T'_{d02}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{K_{8ng}}{T'_{d0ng}} \end{bmatrix} \quad (57.3.1)$$

$$J_{2_{Eqv}} = \begin{bmatrix} \frac{K_{71}}{T'_{d01}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{K_{72}}{T'_{d02}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{K_{7ng}}{T'_{d0ng}} \end{bmatrix} \quad (57.3.2)$$

$$J_{2_{Efd\theta}} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (57.4.1)$$

$$J_{2_{Efdv}} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{r1}}{T_{r1}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{K_{r2}}{T_{r2}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -\frac{K_{rng}}{T_{rng}} \end{bmatrix} \quad (57.4.2)$$

A submatriz J_2 é, por sua vez, formada por submatrizes com n_g linhas e n_b colunas, onde n_b representa o número de barras do sistema de transmissão.

Por conveniência, o mesmo índice numérico utilizado para nomear os geradores foi atribuído também à numeração de sua barra terminal, resultando em equações que se assemelham as de uma matriz diagonal. Como em geral n_b é maior do que n_g , nenhuma das submatrizes que compõe J_2 pode ser uma matriz do tipo diagonal.

Assim, tem-se que os elementos não nulos das submatrizes que compõem J_2 correspondem aos do ângulo ou tensão da barra terminal do gerador síncrono a cuja equação diferencial estão atrelados. Por exemplo, para a equação diferencial do gerador k , apenas as

expressões dos elementos do ângulo e da tensão da barra terminal desse gerador serão diferentes de zero nas submatrizes não nulas do conjunto de equações (57).

Feitas essas considerações, conclui-se que a submatriz J_2 possui $4 n_g$ linhas, assim como a submatriz J_1 , porém diferentemente desta, J_2 possui $2 n_b$ colunas.

$$J_3 = \begin{bmatrix} J3_{r\omega} & J3_{r\delta} & J3_{rEq} & J3_{rEfd} \\ J3_{m\omega} & J3_{m\delta} & J3_{mEq} & J3_{mEfd} \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$J3_{r\omega} = J3_{rEfd} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (58.1.1)$$

$$J3_{r\delta} = \begin{bmatrix} R_{2g_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{2g_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & R_{2g_{ng}} \end{bmatrix} \quad (58.1.2)$$

$$J3_{rEq} = \begin{bmatrix} R_{1g_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{1g_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & R_{1g_{ng}} \end{bmatrix} \quad (58.1.3)$$

$$J3_{m\omega} = J3_{mEfd} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (58.2.1)$$

$$J3_{m\delta} = \begin{bmatrix} M_{2g_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_{2g_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & M_{2g_{ng}} \end{bmatrix} \quad (58.2.2)$$

$$J3_{mEq} = \begin{bmatrix} M_{1g_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_{1g_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & M_{1g_{ng}} \end{bmatrix} \quad (58.2.3)$$

Para a submatriz J_3 tem-se agora que, ao contrário de J_2 que era constituída por submatrizes compostas por n_g linhas e n_b colunas, esta matriz é formada por submatrizes que possuem n_b linhas e n_g colunas. As demais considerações feitas para J_2 são válidas aqui, logo, também em J_3 não existem submatrizes que sejam matrizes diagonais (exceto para o caso em que o número de barras do sistema de transmissão seja exatamente igual ao número de geradores).

Logo, verifica-se que J_3 possui $2 n_b$ linhas e $4 n_g$ colunas.

$$J_4 = \begin{bmatrix} J_{4_{r\theta}} & J_{4_{rv}} \\ J_{4_{m\theta}} & J_{4_{mv}} \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$J_{4_{r\theta}} = \begin{bmatrix} R_{4g_1} - \sum R_{21j} - R_{2c_1} & -R_{412} & \cdots & -R_{41nb} \\ -R_{421} & R_{4g_2} - \sum R_{22j} - R_{2c_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ -R_{4nb1} & & & R_{4g_{nb}} - \sum R_{2nbj} - R_{2c_{nb}} \end{bmatrix} \quad (59.1.1)$$

$$J_{4_{rv}} = \begin{bmatrix} R_{3g_1} - \sum R_{11j} - R_{1c_1} & -R_{312} & \cdots & -R_{31nb} \\ -R_{321} & R_{3g_2} - \sum R_{12j} - R_{1c_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ -R_{3nb1} & & & R_{3g_{nb}} - \sum R_{1nbj} - R_{1c_{nb}} \end{bmatrix} \quad (59.1.2)$$

$$J_{4_{m\theta}} = \begin{bmatrix} M_{4g_1} - \sum M_{21j} - M_{2c_1} & -M_{412} & \cdots & -M_{41nb} \\ -M_{421} & M_{4g_2} - \sum M_{22j} - M_{2c_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ -M_{4nb1} & & & M_{4g_{nb}} - \sum M_{2nbj} - M_{2c_{nb}} \end{bmatrix} \quad (59.2.1)$$

$$J_{4_{mv}} = \begin{bmatrix} M_{3g_1} - \sum M_{1_{1j}} - M_{1c_1} & -M_{3_{12}} & \dots & -M_{3_{1nb}} \\ & -M_{3_{21}} & M_{3g_2} - \sum M_{1_{2j}} - M_{1c_2} & \\ & \vdots & & \ddots \\ & -M_{3_{nb1}} & & M_{3g_{nb}} - \sum M_{1_{nbj}} - M_{1c_{nb}} \end{bmatrix} \quad (59.2.2)$$

Já a submatriz J_4 é composta por submatrizes quadradas de ordem n_b . Dessa forma, J_4 corresponde a uma matriz quadrada de ordem $2 n_b$. Em geral, as submatrizes que compõem J_4 serão matrizes esparsas, tal como a própria matriz de admitância do sistema.

Seja J a matriz formada pelo agrupamento das submatrizes J_1 , J_2 , J_3 e J_4 , teremos então que J terá $4 n_g + 2 n_b$ linhas e colunas.

$$B_1 = \begin{bmatrix} B1_{\omega Pm} & B1_{\omega Vref} & B1_{\omega Pc} & B1_{\omega Qc} \\ B1_{\delta Pm} & B1_{\delta Vref} & B1_{\delta Pc} & B1_{\delta Qc} \\ B1_{EqPm} & B1_{EqVref} & B1_{EqPc} & B1_{EqQc} \\ B1_{EfdPm} & B1_{EfdVref} & B1_{EfdPc} & B1_{EfdQc} \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$B1_{\omega Pm} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{1}{M_{ng}} \end{bmatrix} \quad (60.1.1)$$

$$B1_{\omega Vref} = B1_{\omega Pc} = B1_{\omega Qc} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (60.1.2)$$

$$B1_{\delta Pm} = B1_{\delta Vref} = B1_{\delta Pc} = B1_{\delta Qc} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (60.2)$$

$$B1_{EqPm} = B1_{EqVref} = B1_{EqPc} = B1_{EqQc} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (60.3)$$

$$B1_{EfdPm} = B1_{EfdPc} = B1_{EfdQc} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (60.4.1)$$

$$B1_{EfdVref} = \begin{bmatrix} \frac{K_{r1}}{T_{r1}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{K_{r2}}{T_{r2}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & \frac{K_{rng}}{T_{rng}} \end{bmatrix} \quad (60.4.2)$$

A submatriz B_1 , ao contrário das submatrizes J_1 , J_2 , J_3 e J_4 é composta por submatrizes que possuem dimensões distintas. As submatrizes de B_1 relacionadas com a potência mecânica de entrada P_m e a tensão de referência da barra terminal V_{ref} são matrizes quadradas de ordem n_g . Já as matrizes relacionadas com a potência das cargas P_c e Q_c possuem n_g linhas e n_b colunas. Dessa forma, a submatriz B_1 apresenta $4 n_g$ linhas e $2 n_g + 2 n_b$ colunas.

$$B_2 = \begin{bmatrix} B2_{rPm} & B2_{rVref} & B2_{rPc} & B2_{rQc} \\ B2_{mPm} & B2_{mVref} & B2_{mPc} & B2_{mQc} \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$B2_{rPm} = B2_{rVref} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (61.1.1)$$

$$B2_{rPc} = \begin{bmatrix} -R_{3c1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -R_{3c2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -R_{3c_{nb}} \end{bmatrix} \quad (61.1.2)$$

$$B2_{rQc} = \begin{bmatrix} -R_{4c1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -R_{4c2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -R_{4c_{nb}} \end{bmatrix} \quad (61.1.3)$$

$$B2_{mPm} = B2_{mVref} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & 0 \end{bmatrix} \quad (61.2.1)$$

$$B2_{mPc} = \begin{bmatrix} -M_{3c1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -M_{3c2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -M_{3c_{nb}} \end{bmatrix} \quad (61.2.2)$$

$$B2_{mQc} = \begin{bmatrix} -M_{4c1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -M_{4c2} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & & & -M_{4c_{nb}} \end{bmatrix} \quad (61.2.3)$$

A submatriz B_2 , assim como B_1 também é composta por submatrizes de ordens distintas. Entretanto, diferentemente de B_1 , em B_2 são as submatrizes relacionadas com a potência das cargas P_c e Q_c que são do tipo quadradas, possuindo n_b igual de linhas e colunas. Já as matrizes relacionadas com a potência mecânica de entrada P_m e a tensão de referência da barra terminal V_{ref} são matrizes possuem n_b linhas e n_g colunas. Dessa forma, B_2 possui $4 n_b$ linhas e $2 n_b + 2 n_g$ colunas.

Aplicando a transformada de Laplace às equações diferenciais (48), (51), (53) e (54) e

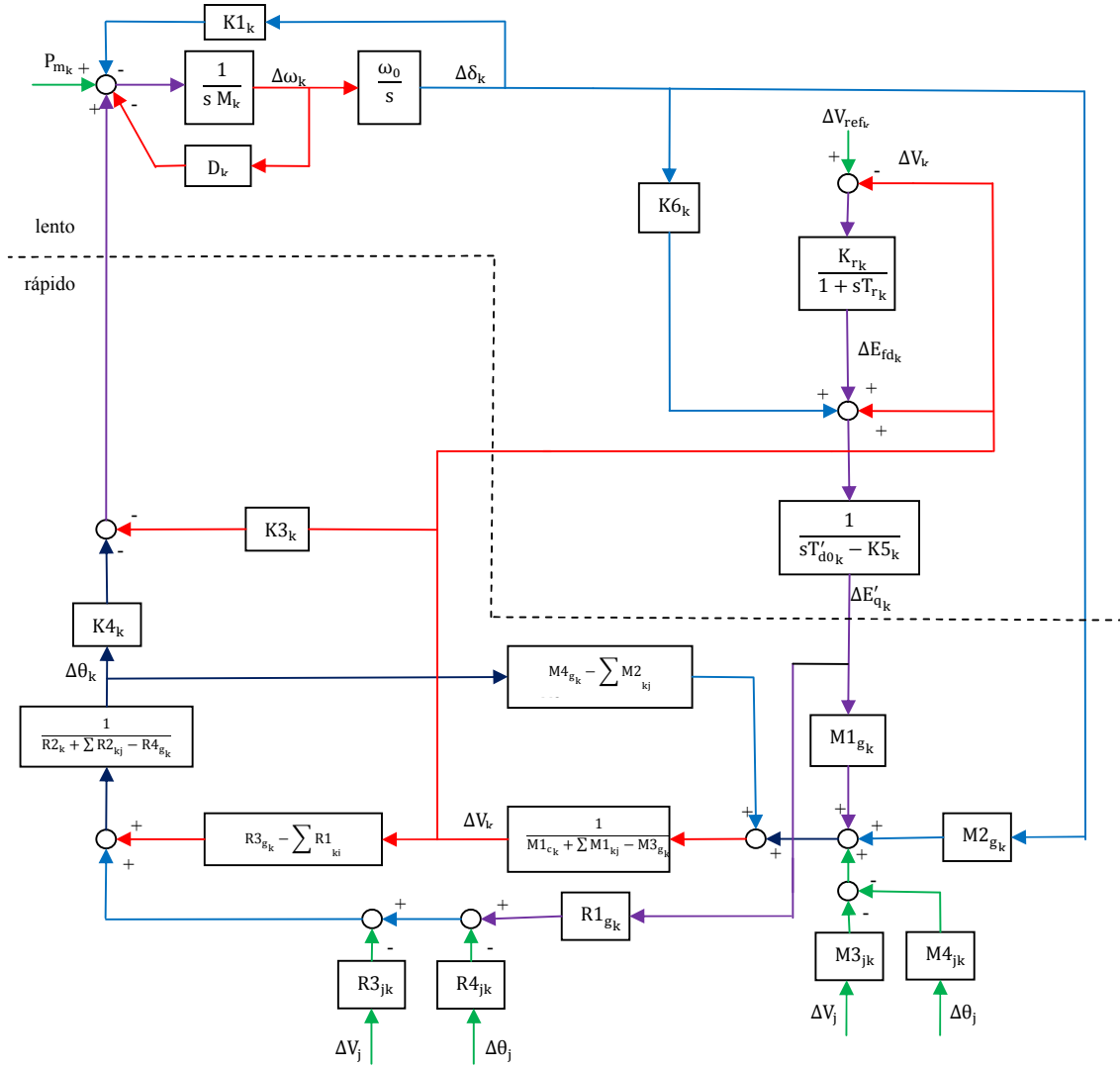
representando as expressões como sendo funções da frequência complexa, $F(s)$, obtém-se a representação do Sistema Elétrico de Potência Multimáquinas no domínio da frequência, representada pelo diagrama de blocos da Figura 3.

O MSC pode ser decomposto em uma escala de tempo, sendo separado em um subsistema de dinâmica mais lenta, composto pelas variáveis de estado, e um subsistema de dinâmica mais rápida, associado às variáveis da rede (magnitude e ângulo das tensões nas barras dos sistemas).

Na Figura 3, por conveniência as interações da máquina síncrona k com as variáveis da rede de uma barra externa à qual a sua barra terminal k esteja conectada através de uma linha de transmissão são representada apenas pelos sinais $\Delta\theta_j$ e ΔV_j . A representação das variáveis do sistema de transmissão é apresentada na Figura 4 onde são apresentadas as variáveis de duas barras fictícias do SEP, j e m , ambas interligadas entre si por uma linha de transmissão.

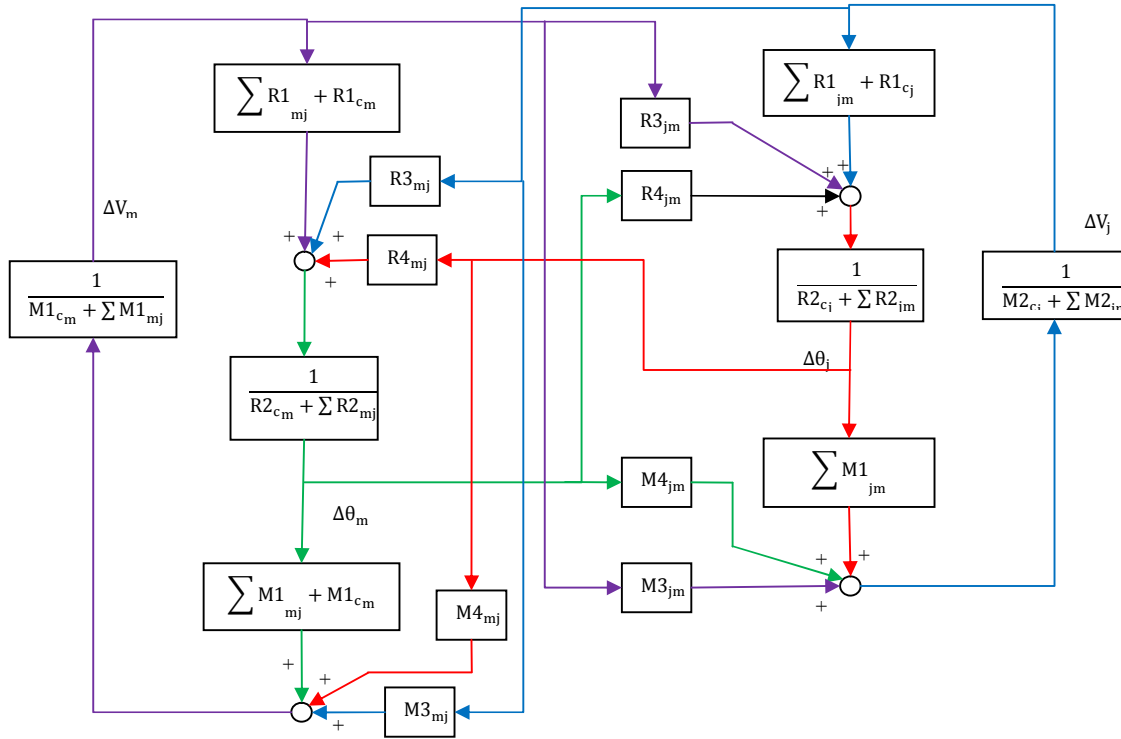
Analisando a Figura 3, nota-se o gerador k sente os efeitos dos demais geradores apenas de maneira indireta, através das alterações causadas ao sistema de transmissão, uma vez que as variáveis de estado da máquina síncrona k não dependem diretamente de uma variável de estado de outra máquina.

Figura 3: Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente – Sistema Multimáquinas : Representação do Gerador Síncrono k



Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 4: Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente – Sistema Multimáquinas : Representação das barras do sistema de transmissão

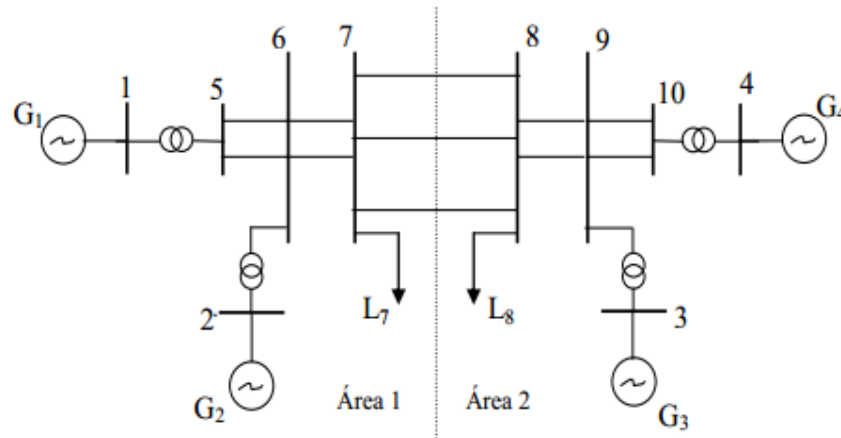


Fonte: Elaboração do próprio autor

2.9 Simulações e Resultados

A representação do Modelo de Sensibilidade de Corrente obtida é analisada a partir de simulações computacionais utilizando o software MATLAB®. Para sistema teste é escolhido o sistema simétrico de duas áreas apresentado por Kundur (1994) e representado pelo diagrama unifilar da Figura 5. A razão da escolha desse sistema reside no fato de que, apesar de sua configuração simples, o mesmo possibilita o estudo das oscilações interáreas, as quais serão o foco da análise nos capítulos seguintes.

Inicialmente é resolvido o fluxo de potência do sistema teste, permitindo assim obter as condições iniciais do sistema. Utilizando a biblioteca MathPower do MATLAB®, são calculados os fluxos de potência no sistema, assim como a magnitude da tensão e o ângulo das barras. Os dados do sistema teste são apresentados no Apêndice C.

Figura 5: Sistema Teste - Sistema Simétrico de duas áreas : 4 geradores e 10 barras

Fonte : Adaptado de Kundur (1994)

Executando o MathPower e resolvendo o fluxo de potência do sistema teste são obtidos os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Dados de barra do sistema teste

Barra #	Tensão		Geração		Carga	
	Magnitude (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MW)
1	1,000	8,683	700	195,97	-	-
2	1,000	-2,088	700	505,25	-	-
3	1,000	-11,924	700	601,55	-	-
4	1,000	0 *	743,69	236,08	-	-
5	0,973	3,846	-	-	-	-
6	0,936	-6,928	-	-	1159	212
7	0,886	-16,162	-	-	1575	288
8	0,865	-26,575	-	-	-	-
9	0,924	-16,765	-	-	-	-
10	0,968	-5,149	-	-	-	-
Total			2843,69	1538,85	2734	500

Fonte: Elaboração do próprio autor

Na Tabela 1 são apresentados os dados da barras do sistema teste obtidos após a resolução do fluxo de potência. A barra 4, cujo ângulo apresenta um asterisco ao lado, é a barra de referência angular (barra slack) do sistema. Analisando os dados da Tabela 1, nota-se um grande afundamento no nível da tensão no sistema, sobretudo nas barras de intercâmbio

entre as áreas 1 (composta pelos geradores 1 e 2) e 2 (composta pelos geradores 3 e 4). São apresentados também os dados de geração e consumo de potência do sistema, de onde verifica-se que a quantidade de potência reativa gerada é consideravelmente maior do que a quantidade demandada pelas cargas.

Tabela 2: Dados dos ramos do sistema teste

Ramo #	Barra		Injeção Barra Inicial		Injeção Barra Final		Perdas	
	Inicial	Final	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	5	700,00	195,97	-694,72	-132,56	5,284	63,41
2	2	6	700,00	505,25	-692,55	-415,82	7,453	89,43
3	7	8	63,77	-4,84	-62,61	-8,88	1,157	11,57
4	7	8	63,77	-4,84	-62,61	-8,88	1,157	11,57
5	7	8	63,77	-4,84	-62,61	-8,88	1,157	11,57
6	6	7	687,00	214,72	-675,15	-98,74	11,847	118,47
7	6	7	687,00	214,72	-675,15	-98,74	11,847	118,47
8	4	10	743,69	236,08	-737,61	-163,02	6,088	73,06
9	3	9	700,00	601,55	-691,48	-499,32	8,519	102,00
10	9	8	706,90	261,47	-693,58	-130,68	13,320	133,20
11	9	8	706,90	261,47	-693,58	-130,68	13,320	133,20
12	5	6	347,36	66,28	-340,73	-6,81	6,631	66,31
13	5	6	347,36	66,28	-340,73	-6,81	6,631	66,31
14	10	9	368,80	81,51	-361,16	-11,81	7,641	76,41
15	10	9	368,80	81,51	-361,16	-11,81	7,641	76,41
Total							109,694	1151,63

Fonte: Elaboração do próprio autor

Na Tabela 2 são apresentados os dados dos ramos do sistema. São apresentados os fluxos de potência que incidem nas barras inicial e final do ramo. As perdas são obtidas através da soma dessas injeções. As perdas ativas representam as perdas por aquecimento dos condutores representada pela potência dissipada pela resistência equivalente da linha (efeito Joule) enquanto que as perdas reativas representam a energia utilizada nas interações entre os campos elétrico e magnético dos elementos capacitivos e indutivos, respectivamente, durante a transmissão de potência através da linha.

Os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 representam o ponto de operação do sistema. Obtidas as condições de operação, procede-se para a análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema através do emprego do Modelo de Sensibilidade de Corrente. São calculadas as submatrizes apresentadas em (55).

Para análise da estabilidade a pequenas perturbações, faz-se a representação do sistema no espaço de estados, através da obtenção da matriz de estados A. A obtenção da matriz de estados é feita através da eliminação do vetor de variáveis algébricas. O primeiro passo é reescrever a equação (55) da seguinte forma:

$$\Delta \dot{X} = J_1 [\Delta X] + J_2 [\Delta Z] + B_1 [\Delta U] \quad (62.1)$$

$$0 = J_3 [\Delta X] + J_4 [\Delta Z] + B_2 [\Delta U] \quad (62.2)$$

Da equação (62.2) se obtém a expressão para o vetor de variáveis algébricas. Isolando-o do lado esquerdo da igualdade, tem-se:

$$[\Delta Z] = -J_4^{-1} J_3 [\Delta X] - J_4^{-1} B_2 [\Delta U] \quad (63)$$

Substituindo (63) em (62.1):

$$\Delta \dot{X} = J_1 [\Delta X] + J_2 (-J_4^{-1} J_3 [\Delta X] - J_4^{-1} B_2 [\Delta U]) + B_1 [\Delta U] \quad (64)$$

Reescrevendo (64):

$$\Delta \dot{X} = A [\Delta X] + B [\Delta U] \quad (65)$$

$$A = J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3 \quad (65.1)$$

$$B = B_1 - J_2 J_4^{-1} B_2 \quad (65.2)$$

A equação (65) é chamada de representação no espaço de estados do SEP representado através do MSC.

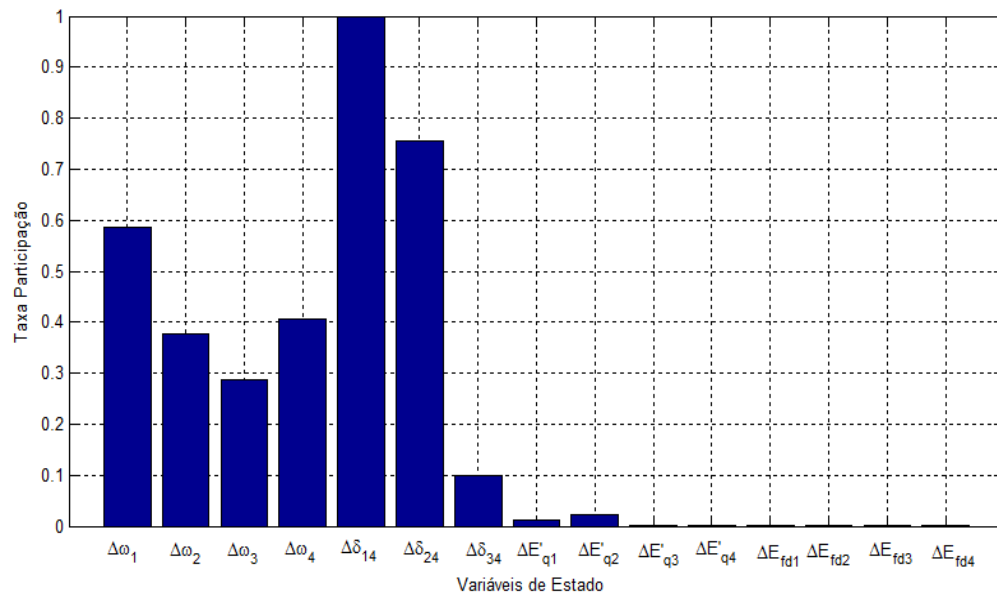
Calculada a matriz A, são obtidos os seus autovalores, os quais são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Autovalores do sistema teste

Autovalores	ω_n (Hz)	ξ
-929,7211	-	-
-980,2614	-	-
-990,8975	-	-
-991,0687	-	-
-69,5826	-	-
-20,0839	-	-
$-8,5 \times 10^{-5}$	-	-
-9,1886	-	-
-8,8926	-	-
$0,0476 \pm j4,1822$	0,6631	-0,0114
$-0,2356 \pm j6,2957$	1,0049	0,0374
$-0,1572 \pm j5,8912$	0,9362	0,0267

Fonte: Elaboração do próprio autor

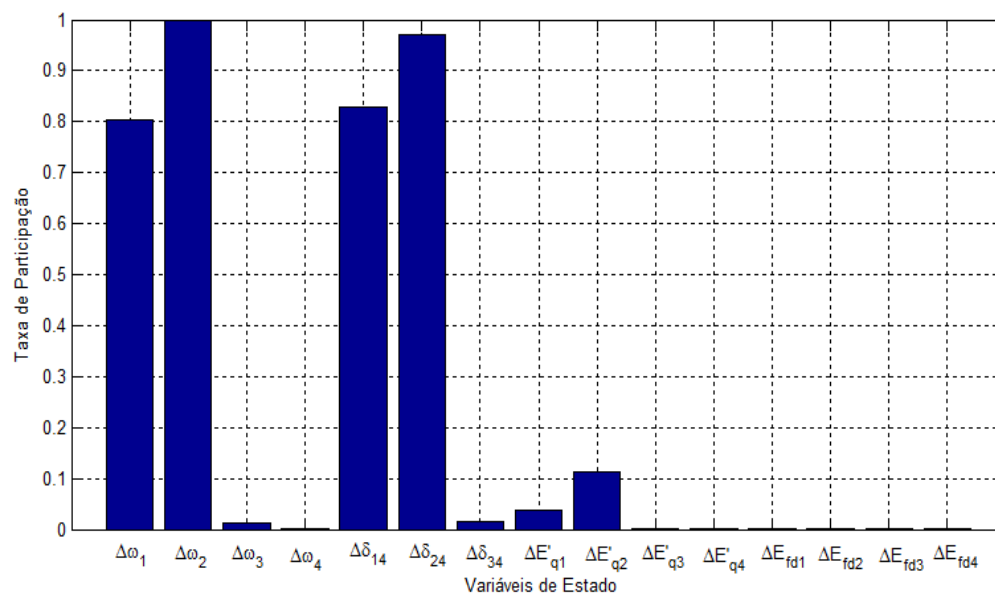
Analisando os autovalores do sistema teste apresentados na Tabela 3 observa-se a existência de 3 modos oscilatórios, representados por pares complexos conjugados de autovalores. Nota-se também que um dos pares possui parte real positiva, sendo portanto um modo oscilatório instável. Observando a frequência natural não amortecida ω_n associada aos pares complexos conjugados, conclui-se que o modo instável possui características de um modo interárea (ω_n entre 0,1 e 0,7 Hz) enquanto que os demais modos oscilatórios se caracterizam como modos locais (ω_n entre 0,8 e 2,0 Hz). Tais conclusões ficam claras quando são analisados os fatores de participação das variáveis de estado nestes pares de autovalores apresentados nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6: Fatores de Participação - Autovalor associado ao Modo Interárea

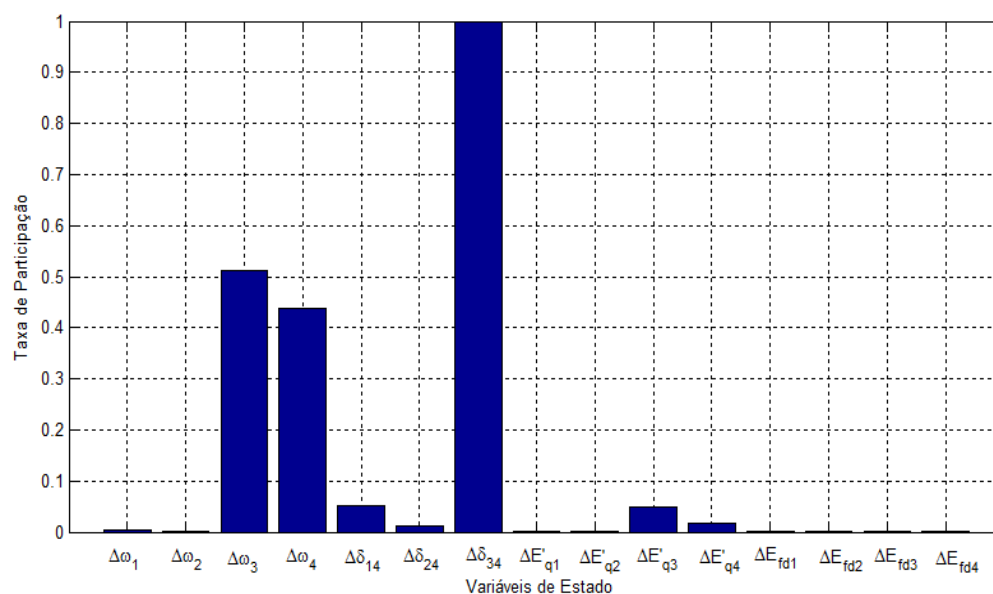
Fonte: Elaboração do próprio autor

Na Figura 6 é apresentado o fator de participação das variáveis de estado na formação do par de autovalores complexos conjugados que possuem parte real positiva. Pode-se observar que as variáveis eletromecânicas das 4 máquinas síncronas tem participação significativa sobre o autovalor. Tal comportamento caracteriza autovalores que estejam associados com modos oscilatórios interáreas, ou seja, associados com as oscilações de um grupo de geradores de uma área contra outro grupo de geradores de uma área distinta, nesse caso dos geradores 1 e 2 oscilando contra os geradores 3 e 4.

Já na Figura 7 nota-se que apenas as variáveis eletromecânicas dos geradores 1 e 2 possuem participação significativa sobre o 1^a par complexo conjugado de autovalores com parte real negativa apresentado na Tabela 3. Assim, fica evidente que este par complexo está associado com as oscilações de modo local dos geradores 1 e 2. Tal modo oscilatório é constituído pelas oscilações do gerador 1 contra o gerador 2, o qual se encontra situado na mesma área.

Figura 7: Fatores de Participação - Autovalor associado ao Modo Local dos Geradores 1 e 2

Fonte: Elaboração do próprio autor

Figura 8: Fatores de Participação - Autovalor associado ao Modo Local dos Geradores 3 e 4

Fonte: Elaboração do próprio autor

Por fim, a análise da Figura 8 permite concluir que trata-se de um par complexo conjugado associado às oscilações de modo local dos geradores 3 e 4, visto que apenas as

variáveis eletromecânicas destes geradores influenciam significativamente o par de autovalores.

Dessa forma, feitas as simulações, tem-se que o sistema teste para o ponto de operação analisado é instável quando submetido a uma pequena perturbação devido à presença de um modo oscilatório interárea instável. A instabilidade é uma consequência direta do fato de a conexão do sistema ser feita através de linhas de transmissão com indutâncias elevadas, o que torna a ligação eletricamente fraca (DOMINGUES, 2005; KUNDUR et. al., 1989; SAUER; PAI, 1998).

Assim, é interessante realizar uma compensação da reatância da linha, de maneira a reduzir a sua indutância equivalente e permitindo dessa forma um aumento na potência que pode ser transmitida de uma área para a outra. Para isso, propõe-se a inclusão de um FACTS TCSC para efetuar a compensação série da linha que conecta as barras 7 e 8.

No Capítulo 3 é proposta a inclusão do FACTS TCSC ao SEP modelado através do MSC. São apresentadas as equações de interesse bem como as representações no domínio do tempo e da frequência. Por fim, o modelo obtido é então avaliado através de novas simulações computacionais que visam avaliar os efeitos da inclusão do TCSC sobre o sistema simétrico de duas áreas.

3 INCLUSÃO DO FACTS TCSC AO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

3.1 Introdução

Atualmente, os sistemas elétricos de potência operam próximos aos seus limites de estabilidade. As restrições para construção de novas linhas de transmissão e unidades geradoras faz com que o uso de dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems – Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada) seja uma alternativa paliativa para aumentar os limites operacionais do SEP (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999). Isso só é possível pelo fato de os FACTS terem como característica principal permitir o controle do fluxo de potência nas linhas e/ou barras em que se encontram instalados (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999). Dessa forma, instalando o FACTS em um local adequado, pode-se obter uma significativa melhora na distribuição do fluxo de potência do sistema.

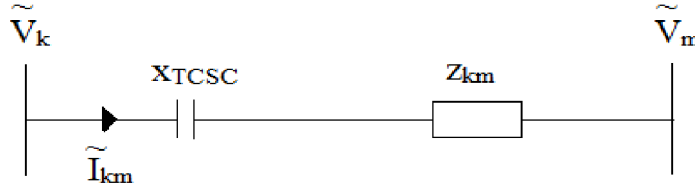
Neste trabalho é proposta a inclusão e modelagem do FACTS TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator – Compensador Série Controlador por Tiristor) através do MSC. A razão da escolha do TCSC se baseia no fato de o mesmo já ter uma ampla base de estudos realizada, permitindo inclusive efetuar comparações quanto aos resultados obtidos, além do fato do mesmo ser bastante empregado na compensação de potência mundo afora.

3.2 Inclusão do TCSC ao Modelo de Sensibilidade de Corrente

Como todo FACTS, o objetivo do TCSC é basicamente permitir um melhor controle e aproveitamento do fluxo de potência (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999). Por ser um dispositivo conectado em série com a linha de transmissão, ele tem por característica influenciar na impedância da linha através da possibilidade de variação da reatância da linha. Com isso, permite controlar e aumentar a quantidade de potência transmitida através da linha de transmissão até valores próximos de seus limites físicos (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999). O TCSC pode ser visto, em uma forma simplificada, como uma reatância capacitiva variável inserida em série com a reatância

da linha de transmissão (HINGORANI; GYUGYI, 1999), conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9: TCSC instalado entre as barras k e m



Fonte: Elaboração do próprio autor

Analisando a linha de transmissão apresentada na Figura 9, tem-se que a reatância efetiva da linha será dada por:

$$x_{km_{ef}} = x_{km} - x_{TCSC} \quad (66)$$

Em geral, a reatância associada ao TCSC, x_{TCSC} , é determinada em valores percentuais do valor da reatância da linha x_{km} . Sendo assim, (66) também pode ser escrita na forma de (67) :

$$x_{km_{ef}} = x_{km}(1 - k) \quad (67)$$

Com a alteração na reatância da linha, tem-se que a impedância entre as barras k e m passa a valer:

$$Z'_{km} = r_{km} + j x_{km_{ef}} \quad (68)$$

O sobrescrito ' é utilizado para diferenciar a impedância da linha com o TCSC instalado da impedância z_{km} definida anteriormente.

A inclusão do TCSC faz com que equação das componentes (r,m) da corrente na linha de transmissão necessite ser reescrita, assumindo a forma das equações (69) e (70) :

$$I_{km_r} = \frac{r_{km}(V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m) + x_{km}(V_k \sin \theta_k - V_m \sin \theta_m)}{|Z'_{km}|^2} \quad (69)$$

$$I_{km_m} = \frac{r_{km}(V_k \sin \theta_k - V_m \sin \theta_m) - x_{km}(V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m)}{|Z'_{km}|^2} \quad (70)$$

Aplicando a expansão em série de Taylor às expressões (69) e (70) de maneira a

linearizá-las para pequenas perturbações em torno do ponto de operação tem-se:

$$\Delta I_{kmr} = R_{1km} \Delta V_k + R_{2km} \Delta \theta_k + R_{3km} \Delta V_m + R_{4km} \Delta \theta_m + R_{5km} \Delta x_{TCSC} \quad (71)$$

$$\Delta I_{kmm} = M_{1km} \Delta V_k + M_{2km} \Delta \theta_k + M_{3km} \Delta V_m + M_{4km} \Delta \theta_m + M_{5km} \Delta x_{TCSC} \quad (72)$$

Com a inclusão do TCSC, os coeficientes de sensibilidade de corrente definidos no Capítulo 2 pertencentes à linha de transmissão na qual se encontra instalado o FACTS sofrem ligeiras alterações em suas equações. Ao se aplicar a expansão em série de Taylor, surgem também dois novos coeficientes de sensibilidade de corrente associados à reatância equivalente do TCSC, R_{5km} e M_{5km} . As expressões desses coeficientes, assim como as expressões contemplando as alterações sofridas pelos demais, são apresentadas no Apêndice B deste trabalho.

3.3 Representações do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do TCSC

A inclusão do TCSC no MSC faz com que seja adicionada uma nova variável de entrada, referente à variação na reatância do TCSC, Δx_{TCSC} . A alteração da equação da corrente na linha de transmissão requer também uma atualização das equações algébricas. Substituindo (71) e (72) nas equações do balanço de corrente e agrupando as com o conjunto de equações diferenciais, ambos apresentados no Capítulo 2, tem-se a representação do MSC no domínio do tempo considerando a inclusão do TCSC.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1TCSC} \\ B_{2TCSC} \end{bmatrix} \Delta U \quad (73)$$

$$\Delta X = [\Delta \omega \ \Delta \delta \ \Delta E'_q \ \Delta E_{fd}]^T \quad (73.1)$$

$$\Delta Z = [\Delta \theta \ \Delta V]^T \quad (73.2)$$

$$\Delta U = [\Delta P_m \ \Delta V_{ref} \ \Delta P_{ck} \ \Delta Q_{ck} \ \Delta x_{TCSC}]^T \quad (73.3)$$

A inclusão do TCSC resulta na inclusão de uma nova variável de entrada, representando a variação na reatância equivalente do TCSC, Δx_{TCSC} . Entretanto, a inclusão da nova variável não altera as submatrizes J_1 , J_2 , J_3 e J_4 , visto que não existe alteração na

relação das variáveis de estado e das variáveis algébricas entre si. Por outro lado as matrizes B_1 e B_2 que relacionam as variáveis de estado e as variáveis algébricas, respectivamente, com as variáveis de entrada são alteradas, passando a serem definidas como B_{1TCSC} e B_{2TCSC} .

Em relação às submatrizes B_1 e B_2 , são incluídas as submatrizes $B1_{\omega xtcsc}$, $B1_{\delta xtcsc}$, $B1_{Eqxtcsc}$, $B1_{Efdxtcsc}$, $B2_{rxtcsc}$ e $B2_{mxtcsc}$. Tais submatrizes são representadas pelas equações (74) e (75).

$$B_{1TCSC} = \begin{bmatrix} B_1 & \vdots & B1_{\omega xtcsc} \\ & & B1_{\delta xtcsc} \\ & & B1_{Eqxtcsc} \\ & & B1_{Efdxtcsc} \end{bmatrix} \quad (74)$$

$$B1_{\omega xtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (74.1)$$

$$B1_{\delta xtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (74.2)$$

$$B1_{Eqxtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (74.3)$$

$$B1_{Efdxtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (74.4)$$

$$B_{2TCSC} = \begin{bmatrix} & \vdots & B2_{rxtcsc} \\ B_2 & & \\ & & B2_{mxtcsc} \end{bmatrix} \quad (75)$$

$$B2_{rxtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ -R_{5km} \\ -R_{5mk} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (75.1)$$

$$B2_{mxtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_{5km} \\ -M_{5mk} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (75.2)$$

As submatrizes $B1_{\omega xtcsc}$, $B1_{\delta xtcsc}$, $B1_{Eqxtcsc}$ e $B1_{Efdxtcsc}$ são matrizes que possuem n_g linhas e n_{TCSC} colunas, onde n_{TCSC} representa a quantidade de TCSCs instalados no sistema. Dessa forma, a ordem da submatriz $B1_{TCSC}$ que anteriormente à inclusão do TCSC era de $4 n_g$ linhas e $2 n_g + 2 n_b$ colunas passa a ser de $4 n_g$ linhas e $2 n_g + 2 n_b + n_{TCSC}$.

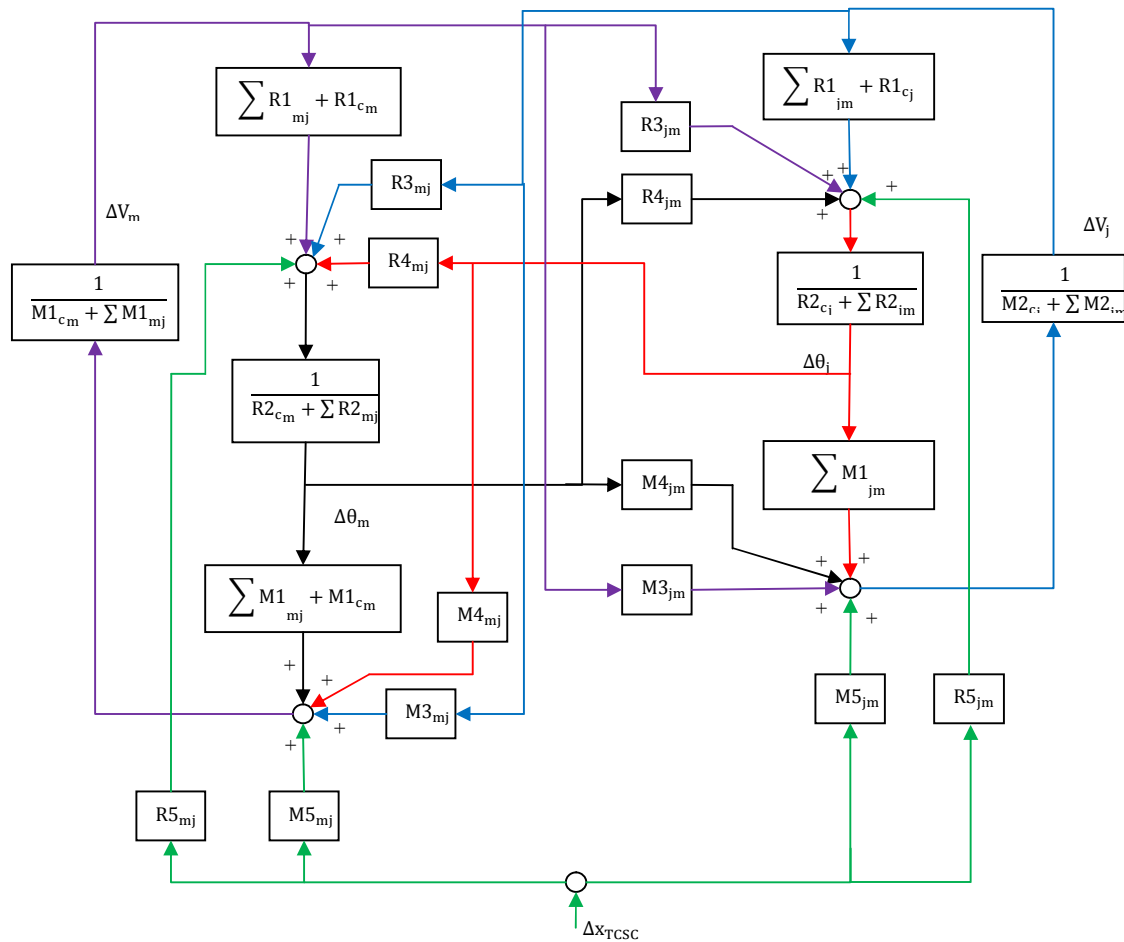
Por sua vez, as submatrizes $B2_{rxtcsc}$ e $B2_{mxtcsc}$ são de ordem n_b linhas e n_{TCSC} colunas. Assim, a ordem da submatriz $B2$ passa de $2 n_b$ linhas e $2 n_g + 2 n_b$ colunas para $2 n_b$ linhas e $2 n_g + 2 n_b + n_{TCSC}$ colunas. Dessa forma, conclui-se que a inclusão do TCSC resulta num aumento do número de colunas das matrizes $B1$ e $B2$, cuja quantidade de colunas acrescida é exatamente igual ao número de TCSCs instalados no sistema.

A representação no domínio da frequência do MSC após a inclusão do TCSC é obtida através da aplicação da Transformada de Laplace às equações diferenciais que compõem o modelo. Visto que a inclusão do TCSC não altera as equações diferenciais e considerando que o mesmo seja instalado em uma barra do sistema de transmissão a qual não estejam conectados geradores, tem-se que o diagrama de blocos da Figura 3, representando a máquina síncrona e suas interações com o restante do SEP, não sofre alterações em relação ao diagrama de blocos da máquina síncrona obtido anteriormente à inclusão do FACTS.

Por outro lado, a inclusão do TCSC faz com que seja necessário alterar o diagrama de

blocos referente ao sistema de transmissão apresentado na Figura 4, passando a ser representado pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 10. Note que a inclusão do TCSC faz com que a ocorrência de uma variação na sua reatância equivalente representada por x_{TCSC} cause variações na magnitude e no ângulo das barras nas quais se encontra instalado o FACTS. Por sua vez, as variações em tais variáveis fazem com que todas as variáveis do sistema se alterem, modificando dessa forma o ponto de operação do sistema.

Figura 10: Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente – Sistema Multimáquinas com TCSC instalado entre as barras j e m : Representação das barras do sistema de transmissão



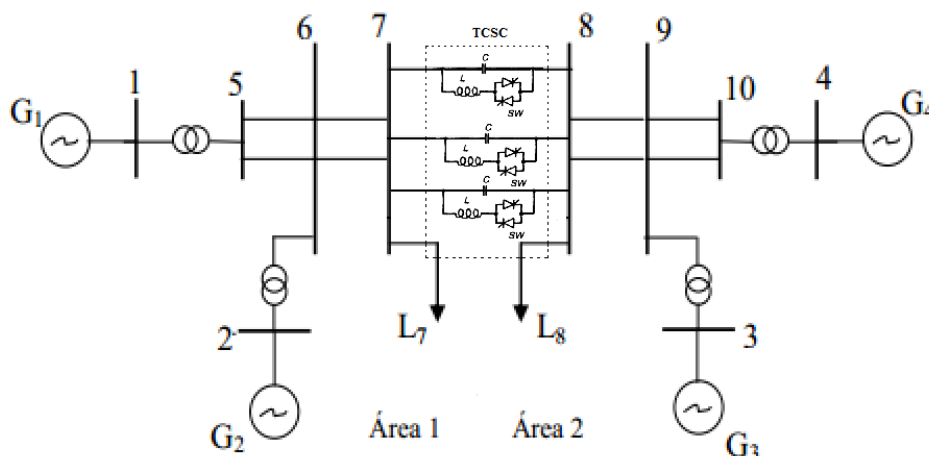
Fonte: Elaboração do próprio autor

3.4 Simulações e Resultados

A representação do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do TCSC é analisada através de simulações computacionais. Para tal, será considerada a inclusão de um TCSC de maneira a efetuar a compensação série da reatância das linhas de transmissão que conectam as áreas do sistema simétrico. O sistema teste com o TCSC instalado é representado pela Figura 11.

Novamente é utilizada a ferramenta MathPower do MATLAB® para se calcular as condições de operação do sistema. A inclusão do TCSC é feita ao se alterar o valor da reatância das linhas que conectam as barras 7 e 8 no banco de dados do sistema teste. Serão considerados 5 níveis de compensação para análise: 15%, 30%, 50%, 75% e 90%.

Figura 11: Sistema Simétrico de duas áreas com TCSC instalado



Fonte: Adaptado de Kundur (1994)

3.4.1 Caso 1: Compensação do TCSC ajustada em 15%

Ajustando a compensação série da reatância do TCSC para 15% do valor da reatância das linhas que conectam as barras 7 e 8 e resolvendo o fluxo de potência através do MathPower, são obtidos os dados das Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Dados de barra do sistema teste – Caso 1

Barra	Tensão		Geração		Carga	
	Magnitude (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MW)
1	1,000	7,103	700,00	195,29	-	-
2	1,000	-3,665	700,00	503,19	-	-
3	1,000	-11,913	700,00	597,71	-	-
4	1,000	0*	743,45	234,76	-	-
5	0,973	2,266	-	-	-	-
6	0,936	-8,505	-	-	-	-
7	0,887	-17,733	-	-	1159,00	212,00
8	0,866	-26,550	-	-	1575,00	288,00
9	0,925	-16,754	-	-	-	-
10	0,968	-5,147	-	-	-	-
Total			2843,50	1530,95	2734,00	500,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 5: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 1

Ramo	Barra		Injeção Barra Inicial		Injeção Barra Final		Perdas	
	Inicial	Final	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	5	700,00	195,29	-694,72	-131,91	5,281	63,38
2	2	6	700,00	503,19	-692,57	-414,00	7,432	89,18
3	7	8	63,79	-5,52	-62,64	-10,01	1,154	9,81
4	7	8	63,79	-5,52	-62,64	-10,01	1,154	9,81
5	7	8	63,79	-5,52	-62,64	-10,01	1,154	9,81
6	6	7	687,02	213,52	-675,19	-97,72	11,830	118,30
7	6	7	687,02	213,52	-675,19	-97,72	11,830	118,30
8	4	10	743,05	234,76	-737,38	-161,82	6,078	72,94
9	3	9	700,00	597,71	-691,53	-496,04	8,473	101,67
10	9	8	706,82	259,36	-693,54	-128,98	13,278	132,78
11	9	8	706,82	259,36	-693,54	-128,98	13,278	132,78
12	5	6	347,36	65,96	-340,73	-6,52	6,627	66,27
13	5	6	347,36	65,96	-340,73	-6,52	6,627	66,27
14	10	9	368,69	80,91	-361,06	-11,34	7,629	76,29
15	10	9	368,69	80,91	-361,06	-11,34	7,629	76,29
Total							109,454	1143,87

Fonte: Elaboração do próprio autor

Comparando os dados das Tabelas 4 e 5 com os obtidos através da simulação do caso base apresentado no Capítulo 2, verifica-se uma redução nas perdas reativas do sistema, na quantidade de potência ativa e reativa gerada e um aumento discreto no valor da magnitude

das tensões nas barras 7 e 8. Tal fato é esperado, visto que com a compensação série da linha, permite-se transmitir maior potência através dessa, com menor quantidade de energia não aproveitada durante o processo de transmissão de potência, resultando assim em uma menor quantidade de potência gerada para suprir as cargas.

Na sequência, é feita a análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema através da análise dos autovalores da matriz de estados A, a qual é representada pela equação (65.1). Os autovalores do sistema, sua frequência natural não amortecida e seus coeficientes de amortecimento são apresentados na Tabela 6.

Analisando os dados da Tabela 6 verifica-se que o sistema permanece sendo instável devido ao fato do par complexo de autovalores associados ao modo de oscilação interárea possuírem parte real positiva. Em relação ao caso base, nota-se uma redução no valor do coeficiente de amortecimento do modo interárea. Dessa forma, verifica-se que a compensação série efetuada aumentou a quantidade de amortecimento necessária para estabilizar o modo interárea.

Tabela 6: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 1

Autovalores	ω_n (Hz)	ξ
-927,2195	-	-
-981,1312	-	-
-990,8627	-	-
-991,0885	-	-
-72,0395	-	-
-19,2406	-	-
$-8,5 \times 10^{-5}$	-	-
-9,2193	-	-
-8,8712	-	-
$0,0506 \pm j 4,2941$	0,6835	-0,0178
$-0,2367 \pm j 6,2982$	1,0031	0,0376
$-0,1598 \pm j 5,8856$	0,9371	0,0271

Fonte: Elaboração do próprio autor

3.4.2 Caso 2: Compensação do TCSC ajustada em 30%

Dando sequência a análise, é considerada agora uma compensação de 30% da reatância das linhas que conectam as barras 7 e 8 do sistema teste. Os dados são obtidos de maneira análoga ao Caso 1 e são apresentados nas Tabelas 7 e 8 .

Tabela 7: Dados de barra do sistema teste – Caso 2

Barra #	Tensão		Geração		Carga	
	Magnitude (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MW)
1	1,000	5,534	700,00	194,67	-	-
2	1,000	-5,232	700,00	501,30	-	-
3	1,000	-11,902	700,00	593,74	-	-
4	1,000	0*	743,22	233,40	-	-
5	0,973	0,697	-	-	-	-
6	0,936	-10,072	-	-	-	-
7	0,887	-19,294	-	-	1159,00	212,00
8	0,866	-26,524	-	-	1575,00	288,00
9	0,925	-16,742	-	-	-	-
10	0,968	-5,145	-	-	-	-
Total			2843,22	1523,11	2734,00	500,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 8: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 2

Ramo	Barra		Injeção Barra Inicial		Injeção Barra Final		Perdas	
	Inicial	Final	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	5	700,00	194,67	-694,72	-131,32	5,279	63,35
2	2	6	700,00	501,30	-692,59	-412,34	7,413	88,96
3	7	8	63,81	-6,14	-62,66	-11,18	1,151	8,06
4	7	8	63,81	-6,14	-62,66	-11,18	1,151	8,06
5	7	8	63,81	-6,14	-62,66	-11,18	1,151	8,06
6	6	7	687,03	213,43	-675,22	-96,79	11,814	118,14
7	6	7	687,03	213,43	-675,22	-96,79	11,814	118,14
8	4	10	743,22	233,40	-737,15	-160,58	6,068	72,82
9	3	9	700,00	593,74	-691,57	-492,64	8,425	101,10
10	9	8	706,75	257,17	-693,51	-127,23	13,235	132,35
11	9	8	706,75	257,17	-693,51	-127,23	13,235	132,35
12	5	6	347,36	65,66	-340,74	-6,26	6,624	66,24
13	5	6	347,36	65,66	-340,74	-6,26	6,624	66,24
14	10	9	368,57	80,29	-360,96	-10,85	7,616	76,16
15	10	9	368,57	80,29	-360,96	-10,85	7,616	76,16
Total							109,217	1136,19

Fonte: Elaboração do próprio autor

Analisando os dados obtidos, verifica-se novamente uma redução na quantidade de potência gerada assim como nas perdas do sistema. Partindo para a análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema, simula-se então a representação do MSC e calcula-se a matriz de estados A, cujos autovalores são apresentados na Tabela 9.

Observando os dados da Tabela 9 verifica-se que o sistema permanece instável devido ao par complexo de autovalores associado ao modo interárea possuir parte real positiva. Quando comparado com os dados do Caso 1 nota-se um pequeno aumento no valor do coeficiente de amortecimento dos autovalores do modo interárea. Entretanto, ainda longe de fornecer o amortecimento necessário para estabilizar o sistema.

Tabela 9: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 2

Autovalores	ω_n (Hz)	ξ
-928,0118	-	-
-982,2116	-	-
-990,8681	-	-
-991,1413	-	-
-71,2609	-	-
-18,1864	-	-
$-8,5 \times 10^{-5}$	-	-
-9,2065	-	-
-8,8212	-	-
$0,0506 \pm j 4,4479$	0,7079	-0,0114
$-0,2386 \pm j 6,3034$	1,0039	0,0378
$-0,1621 \pm j 5,8887$	0,9376	0,0275

Fonte: Elaboração do próprio autor

3.4.3 Caso 3: Compensação do TCSC ajustada em 50%

Para o Caso 3 é considerada uma compensação de 50% da reatância das linhas que conectam as barras 7 e 8. Os dados do sistema teste, obtidos após a resolução do fluxo de potência, são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10: Dados de barra do sistema teste – Caso 3

Barra	Tensão		Geração		Carga	
	Magnitude (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MW)
1	1,000	3,458	700,00	193,67	-	-
2	1,000	-7,305	700,00	499,17	-	-
3	1,000	-11,886	700,00	588,13	-	-
4	1,000	0*	742,91	231,48	-	-
5	0,973	-1,379	-	-	-	-
6	0,936	-12,145	-	-	-	-
7	0,888	-21,361	-	-	1159,00	212,00
8	0,868	-26,489	-	-	1575,00	288,00
9	0,926	-16,727	-	-	-	-
10	0,969	-5,143	-	-	-	-
Total			2842,91	1512,74	2734,00	500,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 11: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 3

Ramo	Barra		Injeção Barra Inicial		Injeção Barra Final		Perdas	
	Inicial	Final	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	5	700,00	193,97	-694,72	-130,65	5,276	63,31
2	2	6	700,00	499,17	-692,61	-410,47	7,392	88,70
3	7	8	63,83	-6,84	-62,69	-12,85	1,148	5,74
4	7	8	63,83	-6,84	-62,69	-12,85	1,148	5,74
5	7	8	63,83	-6,84	-62,69	-12,85	1,148	5,74
6	6	7	687,05	211,19	-675,25	-95,74	11,796	117,96
7	6	7	687,05	211,19	-675,25	-95,74	11,796	117,96
8	4	10	742,91	231,48	-736,85	-158,82	6,055	72,66
9	3	9	700,00	588,13	-691,64	-487,82	8,359	100,31
10	9	8	706,65	254,06	-693,47	-124,72	13,176	131,76
11	9	8	706,65	254,06	-693,47	-124,72	13,176	131,76
12	5	6	347,36	65,33	-340,74	-5,96	6,620	66,20
13	5	6	347,36	65,33	-340,74	-5,96	6,620	66,20
14	10	9	368,43	79,41	-360,83	-10,15	7,599	75,99
15	10	9	368,43	79,41	-360,83	-10,15	7,599	75,99
Total							108,907	1126,02

Fonte: Elaboração do próprio autor

Analisando os dados das Tabelas 10 e 11 nota-se o mesmo fenômeno já visto para os casos 1 e 2: redução na quantidade de potência gerada pelas máquinas síncronas, ligeiro

aumento na magnitude das tensões nas barras do sistema e redução nas perdas de potência no sistema.

Partindo para a análise da estabilidade a pequenas perturbações, apresentam-se os autovalores da matriz de estados A na Tabela 12. Observa-se que o sistema permanece instável, uma vez que os autovalores associados ao modo interárea permanecem situados na parte direita do semiplano complexo. Por outro lado, nota-se que o aumento na taxa de compensação série introduz maior amortecimento ao sistema, porém em quantidade insuficiente para permitir estabilizar o sistema. Essa informação permite prever que o aumento na taxa de compensação deve permitir obter um ponto de operação do sistema teste em que o mesmo seja estável quando submetido a uma pequena variação.

Tabela 12: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 3

Autovalores	ω_n (Hz)	ξ
-929,1280	-	-
-983,6551	-	-
-990,8760	-	-
-991,2442	-	-
-70,1633	-	-
-16,7660	-	-
$-8,5 \times 10^{-5}$	-	-
-9,1880	-	-
-8,7243	-	-
$0,0452 \pm j 4,6647$	0,7424	-0,0097
$-0,2418 \pm j 6,3128$	1,0055	0,0383
$-0,1659 \pm j 5,8946$	0,9385	0,0281

Fonte: Elaboração do próprio autor

3.4.4 Caso 4: Compensação do TCSC ajustada em 75%

As análises do Caso 3 sugere que o aumento na taxa de compensação série realizada pelo TCSC permita estabilizar o sistema. Dando sequência aos estudos, é feita agora a análise

do sistema teste para o caso em que a reatância das linhas de transmissão conectando as barras 7 e 8 são compensadas em 75%.

O ponto de operação do sistema é obtido através da resolução do fluxo de potência. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 13 e 14.

De posse do ponto de operação, calculam-se os autovalores da matriz de estados A, os quais são apresentados na Tabela 15.

Analizando a Tabela 15 verifica-se que apesar do alto valor de compensação série realizada na linha, o sistema permanece instável. Assim, conclui-se que o TCSC atuando isoladamente, embora forneça amortecimento aos modos oscilatórios do SEP, o faz de maneira insuficiente para resolver o problema das oscilações eletromecânicas dos modos interárea. Embora o aumento da compensação seja capaz de tornar o sistema estável (como pode ser visto no Caso 5, apresentado na sequência), deve-se ressaltar que o emprego de altas taxas de compensação série no sistema de potência é na prática inviável, uma vez que torna o sistema altamente limitado no que diz respeito à sua margem de manobra.

Tabela 13: Dados de barra do sistema teste – Caso 4

Barra #	Tensão		Geração		Carga	
	Magnitude (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MW)
1	1,000	0,885	700,00	193,41	-	-
2	1,000	-9,876	700,00	497,48	-	-
3	1,000	-11,865	700,00	580,19	-	-
4	1,000	0*	742,52	228,78	-	-
5	0,973	-3,952	-	-	-	-
6	0,937	-14,716	-	-	-	-
7	0,888	-23,927	-	-	1159,00	212,00
8	0,870	-26,441	-	-	1575,00	288,00
9	0,927	-16,706	-	-	-	-
10	0,969	-5,140	-	-	-	-
Total			2842,52	1499,85	2734,00	500,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 14: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 4

Ramo	Barra		Injeção Barra Inicial		Injeção Barra Final		Perdas	
	Inicial	Final	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	5	700,00	193,41	-694,73	-130,12	5,274	63,29
2	2	6	700,00	497,48	-692,63	-408,98	7,375	88,50
3	7	8	63,85	-7,40	-62,71	-15,24	1,146	2,86
4	7	8	63,85	-7,40	-62,71	-15,24	1,146	2,86
5	7	8	63,85	-7,40	-62,71	-15,24	1,146	2,86
6	6	7	687,06	210,22	-675,28	-94,90	11,781	117,81
7	6	7	687,06	210,22	-675,28	-94,90	11,781	117,81
8	4	10	742,52	228,78	-736,49	-156,34	6,037	72,44
9	3	9	700,00	580,19	-691,73	-480,99	8,266	99,19
10	9	8	706,53	249,65	-693,44	-121,14	13,093	130,93
11	9	8	706,53	249,65	-693,44	-121,14	13,093	130,93
12	5	6	347,36	65,06	-340,75	-5,73	6,618	66,18
13	5	6	347,36	65,06	-340,75	-5,73	6,618	66,18
14	10	9	368,24	78,17	-360,67	-9,15	7,576	75,76
15	10	9	368,24	78,17	-360,67	-9,15	7,576	75,76
Total							109,217	1113,37

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 15: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 4

Autovalores	ω_n (Hz)	ξ
-930,6863	-	-
-985,3766	-	-
-990,8864	-	-
-991,4699	-	-
-68,6301	-	-
-15,0216	-	-
$-8,5 \times 10^{-6}$	-	-
-9,1634	-	-
-8,5097	-	-
$0,0162 \pm j 4,9446$	0,7872	-0,0033
$-0,2489 \pm j 6,3309$	1,0084	0,0393
$-0,1728 \pm j 5,9065$	0,9404	0,0292

Fonte: Elaboração do próprio autor

3.4.5 Caso 5: Compensação do TCSC ajustada em 90%

No Caso 5 é considerada que a taxa de compensação realizada nas linhas que interligam as áreas 1 e 2 corresponde a 90%, ou seja, que a reatância equivalente da linha após a compensação passa a ser 10% do valor da reatância original da linha. Tal nível de compensação tem interesse apenas para estudos, não sendo realizados na prática por limitarem a margem de operação do sistema elétrico.

Para essa configuração, a solução do fluxo de potência fornece os resultados apresentados nas Tabelas 16 e 17.

Em relação ao caso base, verifica-se uma considerável redução nas perdas do sistema, além de uma ligeira redução na geração de potência elétrica e um ligeiro aumento na magnitude das tensões das barras. Como dito anteriormente, tais fatos são consequência direta da redução da reatância das linhas que interligam as duas áreas existentes no sistema teste.

Ao analisarmos os autovalores do sistema, obtidos através de sua representação do MSC no espaço de estados e apresentados na Tabela 18, nota-se que o sistema teste é estável quando submetido a pequenas perturbações, visto que todos os seus autovalores se encontram no semiplano esquerdo do plano complexo. Por outro lado, verifica-se que o modo interárea é fracamente amortecido, sendo seu coeficiente de amortecimento bem próximo de zero.

Tabela 16: Dados de barra do sistema teste – Caso 5

Barra	Tensão		Geração		Carga	
	Magnitude (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MW)
1	1,000	-0,647	700,00	193,38	-	-
2	1,000	-11,407	700,00	497,40	-	-
3	1,000	-11,851	700,00	574,48	-	-
4	1,000	0*	742,30	226,85	-	-
5	0,973	-5,484	-	-	-	-
6	0,937	-16,247	-	-	-	-
7	0,888	-25,458	-	-	1159,00	212,00
8	0,871	-26,407	-	-	1575,00	288,00
9	0,927	-16,692	-	-	-	-
10	0,969	-5,138	-	-	-	-
Total			2842,30	1492,11	2734,00	500,00

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 17: Dados dos ramos do sistema teste – Caso 5

Ramo	Barra		Injeção Barra Inicial		Injeção Barra Final		Perdas	
	Inicial	Final	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	5	700,00	193,38	-694,73	-130,10	5,274	63,35
2	2	6	700,00	497,40	-692,63	-408,91	7,374	88,96
3	7	8	63,85	-7,43	-62,71	-16,97	1,145	8,06
4	7	8	63,85	-7,43	-62,71	-16,97	1,145	8,06
5	7	8	63,85	-7,43	-62,71	-16,97	1,145	8,06
6	6	7	687,06	210,17	-675,28	-94,86	11,781	118,14
7	6	7	687,06	210,17	-675,28	-94,86	11,781	118,14
8	4	10	743,30	226,85	-736,27	-154,55	6,025	72,82
9	3	9	700,00	574,48	-691,80	-476,08	8,200	101,10
10	9	8	706,47	246,46	-693,44	-118,54	13,034	132,35
11	9	8	706,47	246,46	-693,44	-118,54	13,034	132,35
12	5	6	347,36	65,05	-340,75	-5,72	6,618	66,24
13	5	6	347,36	65,05	-340,75	-5,72	6,618	66,24
14	10	9	368,14	77,28	-360,58	-8,42	7,560	76,16
15	10	9	368,14	77,28	-360,58	-8,42	7,560	76,16
Total							108,296	1105,77

Fonte: Elaboração do próprio autor

Tabela 18: Autovalores do Sistema Teste com TCSC instalado – Caso 5

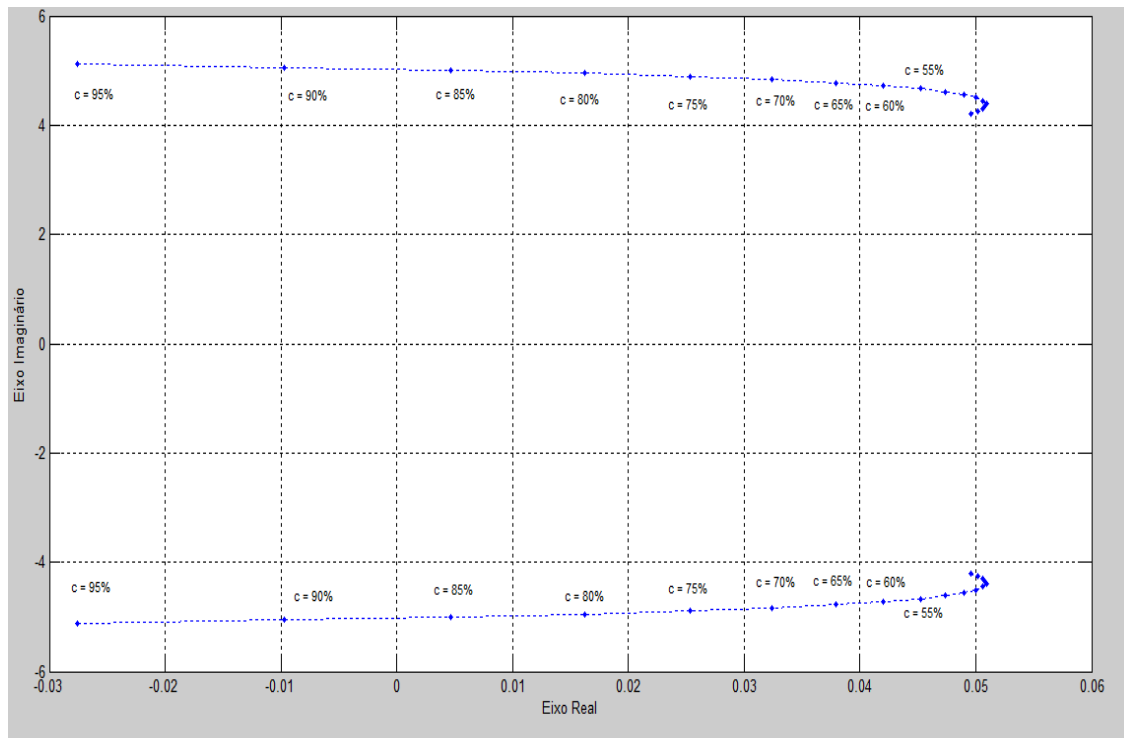
Autovalores	ω_n (Hz)	ξ
-931,7689	-	-
-986,2795	-	-
-990,8930	-	-
-991,6967	-	-
-67,5667	-	-
- 8,5 x 10 ⁻⁵	-	-
-14,0438	-	-
-9,1486	-	-
-8,2826	-	-
-0,0276 ± j 5,1109	0,8134	0,0054
-0,2588 ± j 6,3461	1,0109	0,0407
-0,1804 ± j 5,9169	0,9421	0,0305

Fonte: Elaboração do próprio autor

A atuação do TCSC sobre os autovalores associados ao modo interárea é sintetizada pela Figura 12, onde é apresentada a trajetória do par complexo de autovalores de acordo com o valor da compensação série realizada.

Observa-se que inicialmente o TCSC atua sobre o par complexo deslocando-o ligeiramente para direita de sua posição original, e por conseguinte, reduzindo ainda mais o amortecimento do modo interárea. Conforme se aumenta o valor da compensação série efetuada, a trajetória sofre uma inflexão, de maneira que conforme se aumenta a taxa de compensação (representada na Figura 12 pela letra c) se fornece maior amortecimento ao modo interárea à medida que os autovalores se deslocam em direção ao semiplano esquerdo. Verifica-se que o sistema se torna estável para uma compensação da linha em torno de 85%, valor este bastante elevado e de pouca aplicação em sistemas reais de transmissão, visto que utilizá-lo representaria uma alta restrição na margem de operação do sistema (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999).

Sendo assim, fica evidente a necessidade de acoplar ao TCSC um controlador adicional que permita fornecer amortecimento ao sistema sem que seja necessária a realização de um alto nível de compensação série da linha. No que diz respeito aos baixos níveis de tensão do sistema, embora não seja o foco deste trabalho, uma solução seria o emprego de outros controladores FACTS para suprir a falta de reativos do sistema e assim obter níveis de tensão dentro dos padrões de qualidade (em geral, estabelece-se que a tensão nas barras deve oscilar entre 0,95 e 1,05 pu).

Figura 12: Trajetória dos Autovalores associados ao modo interárea

Fonte: Elaboração do próprio autor

4 INCLUSÃO E MODELAGEM DE CONTROLADORES ADICIONAIS AO TCSC E SUAS REPRESENTAÇÕES ATRAVÉS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

4.1 Introdução

A função dos dispositivos FACTS são, em via de regra, permitir controlar de maneira mais eficiente o fluxo de potência no sistema elétrico, regular os níveis de tensão nas barras e prover compensação de potência reativa no sistema (DOMINGUES, 2005; KUNDUR et. al., 1989). Entretanto, a inclusão isolada de FACTS no SEP, em geral, não é suficiente para solucionar problemas de estabilidade relacionados à falta de amortecimento das oscilações eletromecânicas. Para que dispositivos FACTS sejam capazes de fornecer o amortecimento desejado ao sistema de potência é necessário o uso de controladores adicionais (HINGORANI; GYUGYI, 1998, 1999; PASERBA, 2003; SONG; JOHNS, 1999; WATANABE et. al., 1998).

No Capítulo 3 mostrou-se que a inclusão do TCSC ao sistema elétrico, embora tenha fornecido amortecimento, não o faz de maneira suficiente para tornar o sistema estável sem que seja necessário utilizar valores elevados de compensação série na linha em que se encontra instalado. De maneira a solucionar este problema, é proposta a inclusão de controladores adicionais ao TCSC de maneira a suprir o amortecimento necessário das oscilações eletromecânicas do modo interárea com uma taxa de compensação série da linha relativamente baixa. Para isso, são apresentados dois controladores distintos para o TCSC: Um controlador de 1ª ordem, com resposta proporcional ao ganho, e um controlador POD (Power Oscillating Damping – Amortecimento Oscilações Sistema Potência), realizando a compensação de fase do sinal desejado.

Para o controlador de 1ª ordem é apresentada uma estrutura de controle proporcional (DEL ROSO et al., 2003; YANG et. al., 1998), sendo obtida uma representação do TCSC com este controlador instalado através do Modelo de Sensibilidade de Corrente.

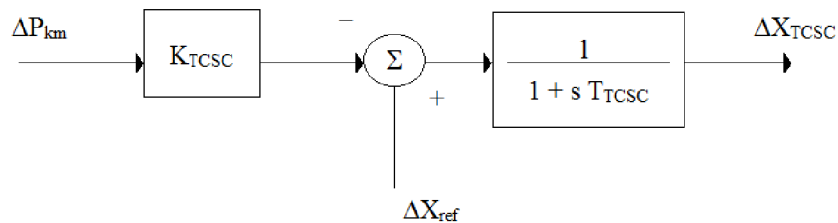
Trabalho análogo é feito para o controlador POD, que além da representação do MSC tem seu projeto e escolha de parâmetros também apresentados neste capítulo.

4.2 Controlador de 1º ordem do TCSC

Em geral, os FACTS não possuem como função principal o amortecimento de oscilações eletromecânicas do sistema. Para se obter essa função é, em via de regra, necessário acoplar ao FACTS um controlador adicional (HINGORANI; GYUGYI, 1998, 1999; PASERBA, 2003; SONG; JOHNS, 1999; WATANABE et. al., 1998). Dentre os vários controladores existentes, pode-se utilizar um controlador de 1ª ordem.

Na Figura 13 é apresentado o modelo de um controlador de 1ª ordem (DEL ROSO et. al, 2003; YANG et. al.,1998) da variação da reatância equivalente do TCSC, onde P_{km} é o fluxo de potência ativa na linha entre as barras k e m, entre as quais se encontra instalado o TCSC, X_{ref} é o valor de referência para a reatância série do TCSC, K_{TCSC} corresponde ao ganho do controlador e T_{TCSC} é a constante de tempo do controlador. A escolha do sinal P_{km} como sinal de entrada deve-se pelo fato deste ser um sinal local que pode ser facilmente obtido. Outro sinal que poderia ser utilizado é o módulo da própria corrente da linha de transmissão em que se encontra instalado o TCSC.

Figura 13: Diagrama de blocos: Controlador de 1ª ordem da variação de x_{TCSC}



Fonte: Adaptado de Furini (2008)

Antes de apresentar a dedução da equação diferencial referente à dinâmica da reatância do TCSC à partir da inspeção do diagrama de blocos da Figura 13, é feita uma análise do sinal de entrada adotado para o controlador, de maneira a apresentar sua expressão.

Da análise do diagrama unifilar da Figura 9, tem-se que o fluxo de potência P_{km} é definido por (76):

$$P_{km} = \frac{1}{|Z'_{km}|^2} V_k^2 r_{km} + \left(\frac{1}{|Z'_{km}|^2} \right) V_k V_m (-r_{km} \cos \theta_{km} + x_{km\text{ef}} \sin \theta_{km}) \quad (76)$$

onde $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$.

Linearizando (76) considerando a ocorrência de pequenos desvios em torno de um ponto de operação, obtém-se:

$$\begin{aligned} \Delta P_{km} = & C_{1\text{TCSC}} \Delta V_k + C_{2\text{TCSC}} \Delta \theta_k + C_{3\text{TCSC}} \Delta V_m + C_{4\text{TCSC}} \Delta \theta_m \\ & + C_{5\text{TCSC}} \Delta x_{\text{TCSC}} \end{aligned} \quad (77)$$

$C_{1\text{TCSC}}$, $C_{2\text{TCSC}}$, $C_{3\text{TCSC}}$, $C_{4\text{TCSC}}$ e $C_{5\text{TCSC}}$ são coeficientes relacionados com a variação do fluxo de potência ativa P_{km} . Suas expressões são apresentadas na sequência:

$$C_{1\text{TCSC}} = \left(\frac{2}{|Z'_{km}|^2} \right) V_k r_{km} - \left(\frac{V_m}{|Z'_{km}|^2} \right) (r_{km} \cos \theta_{km} - x_{km\text{ef}} \sin \theta_{km}) \quad (77.1)$$

$$C_{2\text{TCSC}} = \left(\frac{V_k V_m}{|Z'_{km}|^2} \right) (r_{km} \sin \theta_{km} + x_{km\text{ef}} \cos \theta_{km}) \quad (77.2)$$

$$C_{3\text{TCSC}} = - \left(\frac{V_k}{|Z'_{km}|^2} \right) (r_{km} \cos \theta_{km} - x_{km\text{ef}} \sin \theta_{km}) \quad (77.3)$$

$$C_{4\text{TCSC}} = -C_{2\text{TCSC}} \quad (77.4)$$

$$C_{5\text{TCSC}} = \left(-\frac{V_k V_m \sin \theta_{km}}{|Z'_{km}|^2} \right) (r_{km} - x_{km\text{ef}}) + \left(\frac{2 r_{km} x_{km\text{ef}}}{|Z'_{km}|^4} \right) (V_k^2 - V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (77.5)$$

Uma vez definida a equação referente ao sinal ΔP_{km} , a equação diferencial que rege a variação da reatância do TCSC é dada pela expressão (78) :

$$\frac{T_{\text{TCSC}}}{K_{\text{TCSC}}} \Delta \dot{x}_{\text{TCSC}} = \frac{\Delta X_{\text{ref}}}{K_{\text{TCSC}}} - C_{1\text{TCSC}} \Delta V_k - C_{2\text{TCSC}} \Delta \theta_k - C_{3\text{TCSC}} \Delta V_m - C_{4\text{TCSC}} \Delta \theta_m - (C_{5\text{TCSC}} + 1) \Delta x_{\text{TCSC}} \quad (78)$$

4.2.1 Representações do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do controlador de 1ª ordem do TCSC

A representação do MSC considerando a inclusão do controlador de 1ª ordem ao TCSC é feita através da inclusão da equação diferencial (78) ao conjunto de equações diferenciais formados pelas equações (48), (51), (53) e (54). As equações algébricas

permanecem sendo as mesmas apresentadas no Capítulo 2, apenas atentando para o fato de que as expressões utilizadas para as componentes (r,m) da corrente da linha de transmissão na qual se encontra instalado o TCSC são as apresentadas em (71) e (72). Além disso, a inclusão do controlador de 1ª ordem faz com que a variável Δx_{TCSC} que antes era classificada como uma variável de entrada passe a ser classificada como variável de estado. Feitas essas considerações, a representação do MSC considerando a inclusão do controlador adicional ao TCSC é representada pelas equações (79) a (84).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1c} & J_{2c} \\ J_{3c} & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1c} \\ B_{2c} \end{bmatrix} \Delta U \quad (79)$$

$$\Delta X = [\Delta \omega \quad \Delta \delta \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{fd} \quad \Delta x_{TCSC}]^T \quad (79.1)$$

$$\Delta Z = [\Delta \theta \quad \Delta V]^T \quad (79.2)$$

$$\Delta U = [\Delta P_m \quad \Delta V_{ref} \quad \Delta P_{ck} \quad \Delta Q_{ck} \quad \Delta x_{ref}]^T \quad (79.3)$$

$$J_{1c} = \begin{bmatrix} & & & & J1_{\omega xtcsc} \\ & & & & J1_{\delta xtcsc} \\ & & J_1 & & J1_{Eqxtcsc} \\ & & & & J1_{Efdxtcsc} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ J1_{xtcsc\omega} & J1_{xtcsc\delta} & J1_{xtcscEq} & J1_{xtcscEfd} & J1_{xtcscxtcsc} \end{bmatrix} \quad (80)$$

$$J1_{\omega xtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (80.1)$$

$$J1_{\delta xtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (80.2)$$

$$J1_{Eqxtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (80.3)$$

$$J1_{Efdxtcsc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (80.4)$$

$$J1_{xtcsc\omega} = J1_{xtcsc\delta} = J1_{xtcscEq} = J1_{xtcscEfd} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (80.5.1)$$

$$J1_{xtcscxtcsc} = \left[-\frac{K_{TCSC}C_{5TCSC}}{T_{TCSC}} \right] \quad (80.5.2)$$

A inclusão do controlador de 1ª ordem faz com que a matriz J_1 seja expandida, sendo inclusas as submatrizes $J1_{\omega t c s c}$, $J1_{\delta t c s c}$, $J1_{E q t c s c}$, $J1_{E f d t c s c}$, $J1_{x t c s c \omega}$, $J1_{x t c s c \delta}$, $J1_{x t c s c E q}$, $J1_{x t c s c E f d}$ e $J1_{x t c s c x t c s c}$ apresentadas nas equações (80). As submatrizes $J1_{\omega t c s c}$, $J1_{\delta t c s c}$, $J1_{E q t c s c}$ e $J1_{E f d t c s c}$ possuem n_g linhas e n_c colunas, onde n_c é o número de controladores de 1ª ordem inseridos no sistema, sendo necessariamente igual ou menor ao número de TCSCs instalados. Já as submatrizes $J1_{x t c s c \omega}$, $J1_{x t c s c \delta}$, $J1_{x t c s c E q}$ e $J1_{x t c s c E f d}$ possuem n_c linhas e n_g colunas. Por fim, a submatriz $J1_{x t c s c x t c s c}$ é composta por n_c linhas e n_c colunas.

Dessa forma, a submatriz J_{1c} é representada por uma matriz quadrada de ordem $4 n_g + n_c$ linhas, ou seja, a inclusão do controlador resulta em uma expansão da ordem da matriz J_1 exatamente igual ao número de controladores de 1ª ordem inseridos no sistema.

$$J_{2c} = \left[\begin{array}{c|c} J_2 & \\ \hline J2_{xtcsc\theta} & J2_{xtcscv} \end{array} \right] \quad (81)$$

$$J2_{xtcsc\theta} = \left[0 \quad -\frac{K_{TCSC}C_{2TCSC}}{T_{TCSC}} \quad -\frac{K_{TCSC}C_{4TCSC}}{T_{TCSC}} \quad 0 \right] \quad (81.1)$$

$$J2_{xtcscv} = \left[0 \quad -\frac{K_{TCSC}C_{1TCSC}}{T_{TCSC}} \quad -\frac{K_{TCSC}C_{3TCSC}}{T_{TCSC}} \quad 0 \right] \quad (81.2)$$

A inclusão do controlador de 1ª ordem da reatância do TCSC faz com que a submatriz J_2 seja expandida, sendo a ela acrescentadas as submatrizes $J2_{xtcsc\theta}$ e $J2_{xtcscv}$. Ambas possuem n_c linhas e n_b colunas. Assim, nota-se que como consequência da inclusão do controlador a submatriz J_2 é expandida em n_c linhas.

As submatrizes inclusas em J_2 tem uma peculiaridade: com exceção dos elementos relacionados com a barra de instalação do TCSC, todos os demais são nulos. São, portanto, matrizes esparsas.

$$J_{3c} = \left[\begin{array}{c|c} J_3 & \\ \hline J3_{rxtcsc} & J3_{mxtcsc} \end{array} \right] \quad (82)$$

$$J_{3_{\text{rxtcsc}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -R5_{\text{km}} \\ -R5_{\text{mk}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (82.1)$$

$$J_{3_{\text{mxtcsc}}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -M5_{\text{km}} \\ -M5_{\text{mk}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (82.2)$$

Já para a submatriz J_3 a inclusão do controlador de 1ª ordem resulta na inclusão das submatrizes $J_{3_{\text{rxtcsc}}}$ e $J_{3_{\text{mxtcsc}}}$. Tais submatrizes são constituídas por n_b linhas e n_c colunas. Uma vez incluídas, fazem com que a ordem da submatriz J_{3_c} seja de $2 n_b$ linhas e $4 n_g + n_c$ colunas. Logo, a inclusão do controlador resulta em um aumento no número de colunas da matriz J_3 equivalente ao número de controladores.

A inclusão do controlador de 1ª ordem faz com que a variável Δx_{TCSC} , antes uma variável de entrada passe a ser uma variável de estado. Entretanto, essa alteração não influencia a submatriz J_4 , uma vez que esta representa as interações das equações algébricas com as variáveis algébricas, as quais não sofrem mudanças com a inclusão do controlador da reatância do TCSC. Portanto, a submatriz J_4 de um SEP contando com um TCSC e seu controlador de 1ª ordem instalados é idêntica à submatriz J_4 de um SEP genérico em que não se encontram conectados nenhum equipamento adicional (dispositivos FACTS e/ou controladores adicionais).

$$B_{1_c} = \left[\begin{array}{cccc|c} & & & & B1_{\omega \text{xref}} \\ & & & & B1_{\delta \text{xref}} \\ & & & & B1_{E \text{qxref}} \\ & & & & B1_{E \text{fdxref}} \\ \hline B1_{\text{xtcscPm}} & B1_{\text{xtcscVref}} & B1_{\text{xtcscPc}} & B1_{\text{xtcscQc}} & B1_{\text{xtcscxref}} \end{array} \right] \quad (83)$$

$$B1_{\omega \text{xref}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (83.1)$$

$$B1_{\delta xref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (83.2)$$

$$B1_{Eqxref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (83.3)$$

$$B1_{Efdxref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (83.4)$$

$$B1_{xtcscPm} = B1_{xtcscVref} = B1_{xtcscPc} = B1_{xtcscQc} = [0] \quad (83.5.1)$$

$$B1_{xtcscxref} = \left[\frac{1}{T_{TCSC}} \right] \quad (83.5.2)$$

A inclusão do controlador de 1ª ordem resulta em duas alterações no conjunto de variáveis de entrada em relação à estrutura apresentada no Capítulo 3. A variável Δx_{TCSC} , antes uma variável de entrada, passa a ser uma variável de estado. Já a variável Δx_{ref} é incluída no conjunto de variáveis de entrada. Assim, em relação à submatriz $B1_{TCSC}$ apresentada no Capítulo 3, são eliminadas as submatrizes relacionadas com a variável de entrada Δx_{TCSC} e inclusas as submatrizes $B1_{\omega xref}$, $B1_{\delta xref}$, $B1_{Eqxref}$, $B1_{Efdxref}$. As submatrizes $B1_{\omega xref}$, $B1_{\delta xref}$, $B1_{Eqxref}$ e $B1_{Efdxref}$ são matrizes compostas por n_g linhas e n_c colunas. Além dessas, são inclusas também as submatrizes que relacionam a equação diferencial do controlador com as variáveis de entrada do sistema: $B1_{xtcscPm}$, $B1_{xtcscVref}$, $B1_{xtcscPc}$, $B1_{xtcscQc}$ e $B1_{xtcscxref}$. As submatrizes $B1_{xtcscPm}$ e $B1_{xtcscVref}$, possuem n_c linhas e n_g colunas, enquanto que as submatrizes $B1_{xtcscPc}$ e $B1_{xtcscQc}$ são compostas por n_c linhas e n_b colunas. Por sua vez, a submatriz $B1_{xtcscxref}$ é uma matriz quadrada de ordem n_c .

Assim, tem-se que a submatriz $B1_c$ possui $2 n_g + n_c$ linhas e $2 n_g + 2 n_b + n_c$ colunas.

$$B2_c = \left[\begin{array}{c|c} B2 & \begin{bmatrix} B2_{rxref} \\ B2_{mxref} \end{bmatrix} \end{array} \right] \quad (84)$$

$$B2_{rxref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (84.1)$$

$$B2_{mxref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (84.2)$$

Para a submatriz B_2 , as alterações causadas pela inclusão do controlador de 1ª ordem ao MSC são semelhantes às alterações sofridas pela submatriz B_1 . Em B_2 , após a exclusão das submatrizes referentes à reatância equivalente do TCSC, são incluídas as submatrizes que relacionam as equações algébricas com a variável de entrada Δx_{ref} , $B2_{rxref}$ e $B2_{mxref}$, formando dessa forma a submatriz B_{2c} . Tais submatrizes são compostas por n_b linhas e n_c colunas de elementos nulos.

A partir da análise das equações que compõem a representação do MSC contemplando o acoplamento do controlador de 1ª ordem ao TCSC verifica-se que a inclusão da equação diferencial impacta no modelo de maneira a expandir as submatrizes que estejam relacionadas com variáveis de estado, devido à inclusão de Δx_{TCSC} ao conjunto de variáveis de estado, e variáveis de entrada, devido à inclusão de Δx_{ref} ao conjunto de variáveis de entrada.

A representação no domínio da frequência, obtida através da aplicação da transformada de Laplace nas equações diferenciais (48), (51), (53), (54) e (78), é representada pelas Figuras 04 e 14, uma vez que a inclusão do controlador, assim como a própria inclusão do TCSC, não altera a representação do gerador síncrono através do Modelo de Sensibilidade de Corrente, bastando dessa forma modificar o diagrama de blocos referente ao sistema de transmissão (essa afirmação é válida, se e somente se, o TCSC não estiver instalado em uma barra a qual esteja conectado um gerador síncrono, o que na prática, é verdadeiro).

Fonte: Elaboração do próprio autor

4.3 Controlador POD – Power Oscillating Damping Controller

Em sistemas elétricos, um dos objetivos da inclusão de controladores adicionais está em fornecer amortecimento em quantidade suficiente para modos oscilatórios, seja para estabilizá-los, quando instáveis, ou para torná-los mais amortecidos (HINGORANI; GUYGYI, 1998, 1999; PASERBA, 2003; SONG; JOHNS, 1999; WATANABE et. al., 1998).

Controladores com resposta proporcional ao ganho, tal como o controlador de 1ª ordem apresentado na Figura 13 embora possam fornecer amortecimento ao sistema, permitindo inclusive estabilizar sistemas de potência que para mesmas condições de operação eram instáveis, possuem como inconveniente o fato de gerar desvios de regime permanente nas variáveis do sistema quando este é submetido a uma pequena perturbação. Além disso, devido à sua estrutura simples não permitem efetuar a compensação de fase de algum modo oscilatório (um modo oscilatório instável, por exemplo) em especial.

Uma alternativa para efetuar o controle dos modos oscilatórios do SEP de maneira a fornecer amortecimento ao sistema é a utilização de um controlador POD (Power Oscillating Damping Controller) (CAI; ERLICH, 2003; DEL ROSO et. al., 2003; FURINI, 2008; KISS; ZERÉNYI, 2003; OLIVEIRA, 1994; WANG et. al., 1997; WANG; SWIFT, 1998; YANG et. al. 1998). Controladores POD são controladores baseados na estrutura dos PSSs (Power System Stabilizers – Estabilizadores de Sistemas de Potência ou ESPs), diferenciando-se deste pela escolha do sinal de entrada e seu local de instalação nos SEP.

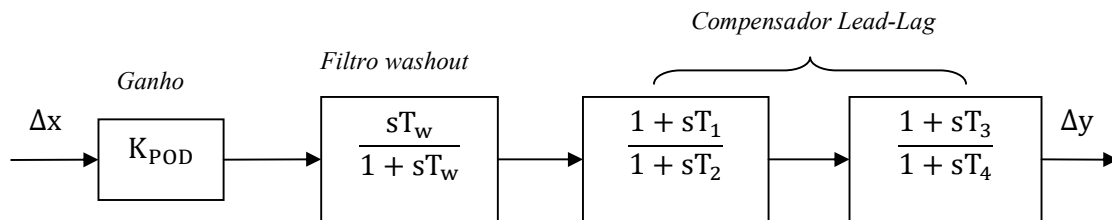
De maneira geral, os PSSs são instalados juntos às máquinas síncronas dos sistemas com o objetivo de prover amortecimento aos modos locais de oscilação. Também poderiam ser utilizados com o intuito de amortecer modos interáreas através da escolha do sinal de entrada adequado, entretanto isso afetaria sua performance sobre os modos locais (KISS; ZERÉNYI, 2003). Já os controladores POD possuem maior liberdade quanto ao seu local de instalação, sendo em geral utilizados para aumentar o amortecimento das oscilações dos modos interáreas. Essa é uma característica importante uma vez que, com a interligação dos sistemas elétricos, o fraco amortecimento das oscilações de modo interárea tem sido responsável pela instabilidade do sistema quando submetido a pequenas perturbações (DOMINGUES, 2005; KUNDUR et. al., 1989; SAUER; PAI, 1998).

A diferença entre a região de atuação entre o PSS e POD influencia diretamente no conjunto de sinais que podem ser adotados como sinais de entrada dos controladores.

Enquanto que nos PSSs adotam-se em geral sinais fornecidos pelos geradores, os sinais de entrada do controlador POD correspondem a sinais disponíveis localmente no ponto de instalação do controlador, em geral, sinais de potência ativa, reativa, a magnitude da tensão da barra de instalação ou a corrente que flui através do controlador ou dispositivo ao qual se encontra instalado.

A estrutura genérica de um controlador POD é apresentada na Figura 15 (GAMA et. al., 1998; HINGORANI; GYUGYI, 1998; ROUCO; PAGOLA, 2001; SIMÕES et. al., 2009):

Figura 15: Diagrama de Blocos – Controlador POD: Estrutura geral



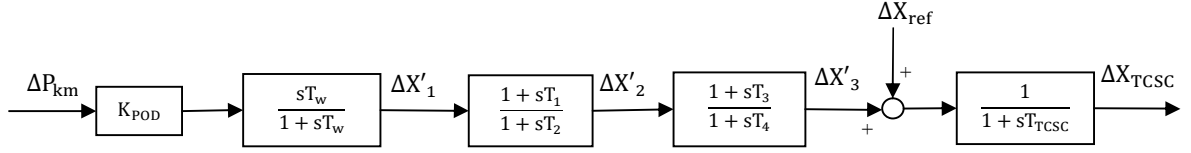
Fonte: Adaptado de Valle (2010)

Na Figura 15 observa-se que o controlador POD é composto por um ganho, representado por K_{POD} , um filtro washout e um compensador de avanço-atraso (lead-lag) de fase. O filtro washout tem por função amenizar a variação do sinal de entrada e zerar a resposta do controlador em regime permanente. Já o compensador é o responsável pela compensação de fase do modo oscilatório de interesse, de maneira a fornecer o amortecimento desejado.

4.3.1 Inclusão do Controlador POD junto ao TCSC

O acoplamento do controlador POD ao TCSC é representado pela Figura 16.

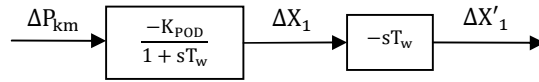
Figura 16: Diagrama de Blocos – Controlador POD - TCSC



Fonte: Adaptado de Valle (2010)

As equações diferenciais resultantes da inclusão do controlador POD são obtidas através da inspeção do diagrama de blocos da Figura 16. Para simplificar a análise, o bloco do controlador POD é dividido em partes. Para deduzir a expressão de $\Delta X'_1$, considere o bloco do filtro *washout* representado da seguinte forma:

Figura 17: Diagrama de Blocos – Controlador POD – TCSC : Filtro washout



Fonte: Adaptado de Valle (2010)

Do diagrama de blocos da Figura 17, tem-se que:

$$\Delta \ddot{X}_1 = -\frac{1}{T_w} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) \quad (85)$$

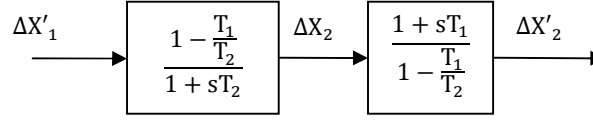
$$\Delta X'_1 = -T_w \Delta \ddot{X}_1 \quad (86)$$

Substituindo (85) em (86):

$$\Delta X'_1 = K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1 \quad (87)$$

O primeiro bloco do compensador de avanço/atraso (*lead/lag*) pode ser também representado conforme a Figura 18.

Figura 18: Diagrama de Blocos – Controlador POD – TCSC : 1º Bloco compensador lead-lag



Fonte: Adaptado de Valle (2010)

Por inspeção da Figura 18, obtêm-se as equações (88) e (89):

$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{1}{T_2} \left[\left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \Delta X'_1 - \Delta X_2 \right] \quad (88)$$

$$\Delta X'_2 = \left(\frac{T_2}{T_2 - T_1} \right) (\Delta X_2 + \Delta \dot{X}_2) \quad (89)$$

Substituindo (87) em (88):

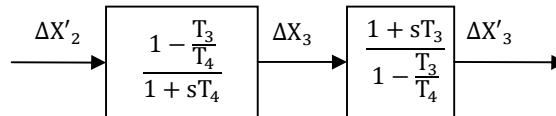
$$\Delta \dot{X}_2 = \frac{1}{T_2} \left[\left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) - \Delta X_2 \right] \quad (90)$$

Utilizando a expressão (90), pode-se reescrever (89) como sendo:

$$\Delta X'_2 = \Delta X_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) \quad (91)$$

Para o segundo bloco do compensador de avanço/atraso pode-se fazer procedimento análogo. O diagrama de blocos equivalente é apresentado na Figura 19:

Figura 19: Diagrama de Blocos – Controlador POD – TCSC : 2º Bloco compensador lead-lag



Fonte: Adaptado de Valle (2010)

À partir do diagrama de blocos da Figura 19 e com as devidas manipulações algébricas chega-se às expressões (92) e (93):

$$\Delta \dot{X}_3 = \frac{1}{T_4} \left[\left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \left(\Delta X_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_{POD} \Delta P_{km} + \Delta X_1) \right) - \Delta X_3 \right] \quad (92)$$

$$\Delta X'_3 = \Delta X_3 + \frac{T_3}{T_4} \left(\Delta X_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_{\text{POD}} \Delta P_{\text{km}} + \Delta X_1) \right) \quad (93)$$

Por fim, a variação da reatância do TCSC é dada pela equação (94):

$$\Delta \dot{x}_{\text{TCSC}} = \frac{1}{T_{\text{TCSC}}} (\Delta X'_3 + \Delta X_{\text{ref}} - \Delta x_{\text{TCSC}}) \quad (94)$$

Substituindo (93) em (94) tem-se:

$$\Delta \dot{x}_{\text{TCSC}} = \frac{1}{T_{\text{TCSC}}} \left[\Delta X_3 + \frac{T_3}{T_4} \left(\Delta X_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_{\text{POD}} \Delta P_{\text{km}} + \Delta X_1) \right) + \Delta X_{\text{ref}} - \Delta x_{\text{TCSC}} \right] \quad (99)$$

A inclusão do controlador POD faz com que sejam inclusas 4 novas variáveis de estado ao MSC, $\Delta \dot{X}_1$, $\Delta \dot{X}_2$, $\Delta \dot{X}_3$ e $\Delta \dot{x}_{\text{TCSC}}$. Utilizando a expressão (76) que representa o fluxo de potência na linha de transmissão em que é instalado o TCSC, pode-se reescrever as equações diferenciais (85), (90), (92) e (95):

$$\Delta \dot{X}_1 = C_{11} \Delta V_k + C_{12} \Delta \theta_k + C_{13} \Delta V_m + C_{14} \Delta \theta_m + C_{15} \Delta x_{\text{TCSC}} + C_{16} \Delta X_1 \quad (96)$$

$$C_{11} = -\frac{1}{T_w} K_{\text{POD}} C_{1\text{TCSC}} \quad (96.1)$$

$$C_{12} = -\frac{1}{T_w} K_{\text{POD}} C_{2\text{TCSC}} \quad (96.2)$$

$$C_{13} = -\frac{1}{T_w} K_{\text{POD}} C_{3\text{TCSC}} \quad (96.3)$$

$$C_{14} = -\frac{1}{T_w} K_{\text{POD}} C_{4\text{TCSC}} \quad (96.4)$$

$$C_{15} = -\frac{1}{T_w} K_{\text{POD}} C_{5\text{TCSC}} \quad (96.5)$$

$$C_{16} = -\frac{1}{T_w} \quad (96.6)$$

$$\Delta \dot{X}_2 = C_{21} \Delta V_k + C_{22} \Delta \theta_k + C_{23} \Delta V_m + C_{24} \Delta \theta_m + C_{25} \Delta x_{\text{TCSC}} + C_{26} \Delta X_1 + C_{27} \Delta X_2 \quad (97)$$

$$C_{21} = \frac{1}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) K_{\text{POD}} C_{1\text{TCSC}} \quad (97.1)$$

$$C_{22} = \frac{1}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) K_{\text{POD}} C_{2\text{TCSC}} \quad (97.2)$$

$$C_{23} = \frac{1}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) K_{\text{POD}} C_{3\text{TCSC}} \quad (97.3)$$

$$C_{24} = \frac{1}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) K_{\text{POD}} C_{4\text{TCSC}} \quad (97.4)$$

$$C_{25} = \frac{1}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) K_{\text{POD}} C_{5\text{TCSC}} \quad (97.5)$$

$$C_{26} = \frac{1}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (97.6)$$

$$C_{27} = -\frac{1}{T_2} \quad (97.7)$$

$$\Delta \dot{X}_3 = C_{31} \Delta V_k + C_{32} \Delta \theta_k + C_{33} \Delta V_m + C_{34} \Delta \theta_m + C_{35} \Delta x_{\text{TCSC}} + C_{36} \Delta X_1 + C_{37} \Delta X_2 + C_{38} \Delta X_3 \quad (98)$$

$$C_{31} = \frac{T_1}{T_2 T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) K_{\text{POD}} C_{1\text{TCSC}} \quad (98.1)$$

$$C_{32} = \frac{T_1}{T_2 T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) K_{\text{POD}} C_{1\text{TCSC}} \quad (98.2)$$

$$C_{33} = \frac{T_1}{T_2 T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) K_{\text{POD}} C_{3\text{TCSC}} \quad (98.3)$$

$$C_{34} = \frac{T_1}{T_2 T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) K_{\text{POD}} C_{4\text{TCSC}} \quad (98.4)$$

$$C_{35} = \frac{T_1}{T_2 T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) K_{\text{POD}} C_{1\text{TCSC}} \quad (98.5)$$

$$C_{36} = \frac{T_1}{T_2 T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \quad (98.6)$$

$$C_{37} = \frac{1}{T_4} \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \quad (98.7)$$

$$C_{38} = -\frac{1}{T_4} \quad (98.8)$$

$$\Delta \dot{x}_{TCSC} = C_{41}\Delta V_k + C_{42}\Delta \theta_k + C_{43}\Delta V_m + C_{44}\Delta \theta_m + C_{45}\Delta x_{TCSC} + C_{46}\Delta X_1 + C_{47}\Delta X_2 + C_{48}\Delta X_3 + C_{49}\Delta X_3 \quad (99)$$

$$C_{41} = \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} K_{POD} C_{1TCSC} \quad (99.1)$$

$$C_{42} = \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} K_{POD} C_{2TCSC} \quad (99.2)$$

$$C_{43} = \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} K_{POD} C_{3TCSC} \quad (99.3)$$

$$C_{44} = \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} K_{POD} C_{4TCSC} \quad (99.4)$$

$$C_{45} = \frac{1}{T_{TCSC}} \left(\frac{T_1 T_3}{T_2 T_4} K_{POD} C_{1TCSC} - 1 \right) \quad (99.5)$$

$$C_{46} = \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4 T_{TCSC}} \quad (99.6)$$

$$C_{47} = \frac{T_3}{T_4 T_{TCSC}} \quad (99.7)$$

$$C_{48} = \frac{1}{T_{TCSC}} \quad (99.8)$$

$$C_{49} = \frac{1}{T_{TCSC}} \quad (99.9)$$

4.3.2 Projeto do Controlador POD

No projeto de controladores de sistema de potência é utilizada, predominantemente, as técnicas de controle clássico (HINGORANI; GYUGYI, 1998), sendo as técnicas mais utilizadas aquelas baseadas na resposta em frequência e na sensibilidade dos autovalores (CASTRO, 2005).

O projeto de um controlador como o POD envolve basicamente duas etapas (VALLE, 2010):

- Determinar a fase a ser compensada pelo controlador
- Estimar o valor do ganho de maneira a se obter o coeficiente de amortecimento desejado

Para o projeto dos blocos de compensação de fase, utilizam-se as seguintes equações:

$$\alpha = \frac{1 - \sin(\emptyset/n)}{1 + \sin(\emptyset/n)} \quad (100)$$

$$T = \frac{1}{\omega_n \sqrt{\alpha}} \quad (101)$$

sendo $\emptyset$ a fase a ser compensada pelo controlador, ω_n a frequência natural não amortecida do modo oscilatório a ser controlado, n o número de blocos de compensação de fase e T a constante de tempo do controlador, considerando que $T_1 = T_2 = T_3 = T_4$. Em geral, utilizam-se 1 ou 2 blocos de compensação, ou seja, $n = 1$ ou 2 . O ganho do controlador, tal como dito anteriormente, é ajustado de maneira a se obter o amortecimento desejada para o modo oscilatório escolhido.

Outro fator importante para o projeto de controladores é a escolha do sinal de entrada. O sinal de entrada e a controlabilidade exercida pelo controlador sobre os modos oscilatórios dependem da localização do FACTS. Para o caso estudado até aqui, em que o TCSC é instalado na região de interligação entre as áreas do sistema teste, tem-se que o controlador terá significativa controlabilidade sobre o modo de oscilação interárea (HINGORANI; GYUGYI, 1998).

O sinal de entrada para o controlador deve ser, de preferência, um sinal disponível localmente, ou que possa ser obtido à partir de medidas locais. Com isso, evita-se a necessidade de utilizar canais de telecomunicação para envio/recepção de dados à distância, aumentando a confiabilidade e reduzindo os custos de implantação do controlador (PUPIN, 2009; AYRES, 2005).

Em geral, os sinais mais utilizados na literatura são a potência ativa na linha de transmissão e a magnitude da corrente. A escolha do sinal de entrada interfere diretamente nos parâmetros de um controlador POD para um mesmo FACTS (CASTRO, 2005).

Neste trabalho, o projeto do controlador POD é realizado utilizando-se o método de resposta em frequência baseado no critério de estabilidade de Nyquist de uma função de transferência de malha aberta. Para a realocação dos polos utiliza-se a ferramenta *rltool* do MATLAB®. O critério de estabilidade de Nyquist permite analisar a estabilidade de um sistema de malha fechada através do conhecimento dos polos do sistema de malha aberta e

através da resposta em frequência deste (MARTINS et. al., 2000; MARTINS; PAGOLA, 1997).

4.3.3 Representações do Modelo de Sensibilidade de Corrente considerando a inclusão do controlador POD acoplado ao TCSC

A representação do MSC considerando a inclusão do controlador POD ao TCSC é feita através da inclusão das equações diferenciais (96), (97), (98) e (99) ao conjunto de equações diferenciais formados pelas equações (48), (51), (53) e (54). As equações algébricas permanecem sendo as mesmas apresentadas no Capítulo 2, apenas atentando para o fato de que as expressões utilizada para as componentes (r,m) da corrente da linha de transmissão na qual se encontra instalado o TCSC são as apresentadas em (71) e (72).

A inclusão do controlador POD faz com que surjam quatro novas variáveis de estado, três a mais, portanto, que a representação do MSC obtida para o controlador de 1ª ordem. Em ambas, Δx_{ref} representa uma variável de entrada. As matrizes e submatrizes que compõem a representação do MSC no domínio do tempo são apresentadas na sequência, pelas equações (102) a (106).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{X} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1p} & J_{2p} \\ J_{3p} & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1p} \\ B_{2p} \end{bmatrix} [\Delta U] \quad (102)$$

$$\Delta X = [\Delta \omega \quad \Delta \delta \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{fd} \quad \Delta x_{TCSC} \quad \Delta X_1 \quad \Delta X_2 \quad \Delta X_3]^T \quad (102.1)$$

$$\Delta Z = [\Delta \theta \quad \Delta V]^T \quad (102.2)$$

$$\Delta U = [\Delta P_m \quad \Delta V_{ref} \quad \Delta P_{Ck} \quad \Delta Q_{Ck} \quad \Delta x_{ref}]^T \quad (102.3)$$

$$J_{1p} = \begin{bmatrix} & & & & J_{1\omega\text{xtcsc}} & J_{1\omega X1} & J_{1\omega X2} & J_{1\omega X3} \\ & & & & J_{1\delta\text{xtcsc}} & J_{1\delta X1} & J_{1\delta X2} & J_{1\delta X3} \\ & & & & J_{1E_q\text{xtcsc}} & J_{1E_qX1} & J_{1E_qX2} & J_{1E_qX3} \\ & & & & J_{1E_{fd}\text{xtcsc}} & J_{1E_{fd}X1} & J_{1E_{fd}X2} & J_{1E_{fd}X3} \\ \text{-----} & & & & & & & \\ J_{1\text{xtcsc}\omega} & J_{1\text{xtcsc}\delta} & J_{1\text{xtcsc}E_q} & J_{1\text{xtcsc}E_{fd}} & J_{1\text{xtcscxtcsc}} & J_{1\text{xtcsc}X1} & J_{1\text{xtcsc}X2} & J_{1\text{xtcsc}X3} \\ J_{1X1\omega} & J_{1X1\delta} & J_{1X1E_q} & J_{1X1E_{fd}} & J_{1X1\text{xtcsc}} & J_{1X1X1} & J_{1X1X2} & J_{1X1X3} \\ J_{1X2\omega} & J_{1X2\delta} & J_{1X2E_q} & J_{1X2E_{fd}} & J_{1X2\text{xtcsc}} & J_{1X2X1} & J_{1X2X2} & J_{1X2X3} \\ J_{1X3\omega} & J_{1X3\delta} & J_{1X3E_q} & J_{1X3E_{fd}} & J_{1X3\text{xtcsc}} & J_{1X3X1} & J_{1X3X2} & J_{1X3X3} \end{bmatrix} \quad (103)$$

$$J_{1\omega\text{xtcsc}} = J_{1\omega X1} = J_{1\omega X2} = J_{1\omega X3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (103.1)$$

$$J_{1\delta\text{xtcsc}} = J_{1\delta X1} = J_{1\delta X2} = J_{1\delta X3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (103.2)$$

$$J_{1E_qX1} = J_{1E_qX2} = J_{1E_qX3} = J_{1E_q\text{xtcsc}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (103.3)$$

$$J_{1E_{fd}X1} = J_{1E_{fd}X2} = J_{1E_{fd}X3} = J_{1E_{fd}\text{xtcsc}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (103.4)$$

$$J_{1\text{xtcsc}\omega} = J_{1\text{xtcsc}\delta} = J_{1\text{xtcsc}E_q} = J_{1\text{xtcsc}E_{fd}} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (103.5.1)$$

$$J_{1\text{xtcsc}X1} = [C_{46}] \quad (103.5.2)$$

$$J_{1\text{xtcsc}X2} = [C_{47}] \quad (103.5.3)$$

$$J_{1\text{xtcsc}X3} = [C_{48}] \quad (103.5.4)$$

$$J_{1\text{xtcscxtcsc}} = [C_{45}] \quad (103.5.5)$$

$$J_{1X1\omega} = J_{1X1\delta} = J_{1X1E_q} = J_{1X1E_{fd}} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (103.6.1)$$

$$J_{1X1\text{xtcsc}} = [C_{15}] \quad (103.6.2)$$

$$J_{1X1X1} = [C_{16}] \quad (103.6.3)$$

$$J_{1X_1X_2} = J_{1X_1X_3} = [0] \quad (103.6.4)$$

$$J_{1X_2\omega} = J_{1X_2\delta} = J_{1X_2E_q} = J_{1X_2E_{fd}} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (103.7.1)$$

$$J_{1X_2xtcsc} = [C_{25}] \quad (103.7.2)$$

$$J_{1X_2X_1} = [C_{26}] \quad (103.7.3)$$

$$J_{1X_2X_2} = [C_{27}] \quad (103.7.4)$$

$$J_{1X_2X_3} = [0] \quad (103.7.5)$$

$$J_{1X_3\omega} = J_{1X_3\delta} = J_{1X_3E_q} = J_{1X_3E_{fd}} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (103.8.1)$$

$$J_{1X_3xtcsc} = [C_{35}] \quad (103.8.2)$$

$$J_{1X_3X_1} = [C_{36}] \quad (103.8.3)$$

$$J_{1X_3X_2} = [C_{37}] \quad (103.8.4)$$

$$J_{1X_3X_3} = [C_{38}] \quad (103.8.5)$$

A inclusão do controlador POD faz com que sejam inclusas novas submatrizes referentes às novas variáveis de estado, ΔX_1 , ΔX_2 , ΔX_3 e Δx_{TCSC} , na submatriz J_1 , formando a submatriz J_{1p} .

As submatrizes $J_{1\omega X_1}$, $J_{1\delta X_1}$, $J_{1E_q X_1}$, $J_{1E_{fd} X_1}$, $J_{1\omega X_2}$, $J_{1\delta X_2}$, $J_{1E_q X_2}$, $J_{1E_{fd} X_2}$, $J_{1\omega X_3}$, $J_{1\delta X_3}$, $J_{1E_q X_3}$, $J_{1E_{fd} X_3}$, $J_{1\omega xtcsc}$, $J_{1\delta xtcsc}$, $J_{1E_q xtcsc}$ e $J_{1E_{fd} xtcsc}$ possuem n_g linhas e n_p colunas, onde n_p é o número de controladores POD inseridos no sistema, sendo necessariamente igual ou menor ao número de TCSCs instalados. Já as submatrizes $J_{1X_1\omega}$, $J_{1X_1\delta}$, $J_{1X_1E_q}$, $J_{1X_1E_{fd}}$, $J_{1X_2\omega}$, $J_{1X_2\delta}$, $J_{1X_2E_q}$, $J_{1X_2E_{fd}}$, $J_{1X_3\omega}$, $J_{1X_3\delta}$, $J_{1X_3E_q}$, $J_{1X_3E_{fd}}$, $J_{1xtcsc\omega}$, $J_{1xtcsc\delta}$, $J_{1xtcscE_q}$ e $J_{1xtcscE_{fd}}$ possuem n_p linhas e n_g colunas. Por fim, as submatrizes $J_{1X_1X_1}$, $J_{1X_1X_2}$, $J_{1X_1X_3}$, J_{1X_1xtcsc} , $J_{1X_2X_1}$, $J_{1X_2X_2}$, $J_{1X_2X_3}$, J_{1X_2xtcsc} , $J_{1X_3X_1}$, $J_{1X_3X_2}$, $J_{1X_3X_3}$, J_{1X_1xtcsc} , $J_{1xtcscX_1}$, $J_{1xtcscX_2}$, $J_{1xtcscX_3}$ e $J_{1xtcscxtcsc}$ é composta por n_p linhas e n_p colunas.

Dessa forma, a submatriz J_1 antes representada por uma matriz quadrada de ordem $4n_g$ é expandida, passando a ser representada por J_{1p} , uma matriz quadrada de ordem $4(n_g + n_p)$ linhas, ou seja, para um controlador POD composto por dois blocos de compensação de

fase, a matriz J_1 é expandida em $4 n_p$ linhas e colunas.

$$J_{2p} = \begin{bmatrix} & & & & J_{2p} \\ & & & & \\ \hline J_{2_{X1\theta}} & J_{2_{X1v}} & & & \\ J_{2_{X2\theta}} & J_{2_{X2v}} & & & \\ J_{2_{X3\theta}} & J_{2_{X3v}} & & & \\ J_{2_{xtcsc\theta}} & J_{2_{xtcscv}} & & & \end{bmatrix} \quad (104)$$

$$J_{2_{xtcsc\theta}} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{T_1 T_3}{T_{TCSC} T_2 T_4} K_{POD} C_{2TCSC} & \frac{T_1 T_3}{T_{TCSC} T_2 T_4} K_{POD} C_{4TCSC} & 0 \end{bmatrix} \quad (104.1.1)$$

$$J_{2_{xtcscv}} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{T_1 T_3}{T_{TCSC} T_2 T_4} K_{POD} C_{1TCSC} & \frac{T_1 T_3}{T_{TCSC} T_2 T_4} K_{POD} C_{3TCSC} & 0 \end{bmatrix} \quad (104.1.2)$$

$$J_{2_{X1\theta}} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_{POD} C_{2TCSC}}{T_w} & -\frac{K_{POD} C_{4TCSC}}{T_w} & 0 \end{bmatrix} \quad (104.2.1)$$

$$J_{2_{X1v}} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_{POD} C_{1TCSC}}{T_w} & -\frac{K_{POD} C_{3TCSC}}{T_w} & 0 \end{bmatrix} \quad (104.2.2)$$

$$J_{2_{X2\theta}} = \begin{bmatrix} 0 & \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right) K_{POD} C_{2TCSC} & \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right) K_{POD} C_{4TCSC} & 0 \end{bmatrix} \quad (104.3.1)$$

$$J_{2_{X2v}} = \begin{bmatrix} 0 & \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right) K_{POD} C_{1TCSC} & \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right) K_{POD} C_{3TCSC} & 0 \end{bmatrix} \quad (104.3.2)$$

$$J_{2_{X3\theta}} = \begin{bmatrix} 0 & \left(\frac{T_4 - T_3}{T_4^2} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) K_{POD} C_{2TCSC} & \left(\frac{T_4 - T_3}{T_4^2} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) K_{POD} C_{4TCSC} & 0 \end{bmatrix} \quad (104.4.1)$$

$$J_{2_{X3v}} = \begin{bmatrix} 0 & \left(\frac{T_4 - T_3}{T_4^2} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) K_{POD} C_{1TCSC} & \left(\frac{T_4 - T_3}{T_4^2} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right) K_{POD} C_{3TCSC} & 0 \end{bmatrix} \quad (104.4.2)$$

A inclusão do controlador POD faz com que a submatriz J_2 seja expandida, sendo a ela acrescentadas as submatrizes $J_{2_{X1\theta}}$, $J_{2_{X1v}}$, $J_{2_{X2\theta}}$, $J_{2_{X2v}}$, $J_{2_{X3\theta}}$, $J_{2_{X3v}}$, $J_{2_{xtcsc\theta}}$ e $J_{2_{xtcscv}}$.

As submatrizes inclusas tem como característica serem compostas por elementos nulos, exceção aos elementos relacionados com as barras em que se encontra instalado o TCSC. São, portanto, matrizes esparsas. Todas possuem n_p linhas e n_p colunas. Dessa forma, a

submatriz resultante, J_{2p} , é formada por $4 n_g + n_p$ linhas e n_b colunas.

$$J_{3p} = \begin{bmatrix} J_3 & J_{3_{rxtcsc}} & J_{3_{rX1}} & J_{3_{rX2}} & J_{3_{rX3}} \\ J_{3_{mxtcsc}} & J_{3_{mX1}} & J_{3_{mX2}} & J_{3_{mX3}} \end{bmatrix} \quad (105)$$

$$J_{3_{rxtcsc}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -R5_{km} \\ -R5_{mk} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (105.1.1)$$

$$J_{3_{rX1}} = J_{3_{rX2}} = J_{3_{rX3}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (105.1.2)$$

$$J_{3_{mxtcsc}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -M5_{km} \\ -M5_{mk} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (105.2.1)$$

$$J_{3_{mX1}} = J_{3_{mX2}} = J_{3_{mX3}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (105.2.2)$$

Já para a submatriz J_3 a inclusão do controlador POD resulta na inclusão das submatrizes $J_{3_{rX1}}$, $J_{3_{rX2}}$, $J_{3_{rX3}}$, $J_{3_{rxtcsc}}$, $J_{3_{mX1}}$, $J_{3_{mX2}}$, $J_{3_{mX3}}$ e $J_{3_{mxtcsc}}$. Tais submatrizes são constituídas por n_b linhas e n_p colunas. As submatrizes $J_{3_{rX1}}$, $J_{3_{rX2}}$, $J_{3_{rX3}}$, $J_{3_{mX1}}$, $J_{3_{mX2}}$ e $J_{3_{mX3}}$ são submatrizes compostas apenas por elementos nulos. Já $J_{3_{rxtcsc}}$ e $J_{3_{mxtcsc}}$ possuem apenas os elementos referentes às barras de instalação do TCSC sendo diferentes de zero.

Uma vez inclusas, fazem com que a ordem da submatriz J_{3p} seja de $2 n_b$ linhas e $4 (n_g + n_p)$ colunas.

A inclusão do controlador POD não resulta em alterações na submatriz J_4 uma vez que o vetor de variáveis algébricas não sofre alteração. Dessa forma, a submatriz J_4 de um SEP contando com um controlador POD acoplado ao TCSC é idêntica à submatriz J_4 de um SEP genérico em que não se encontram conectados nenhum equipamento adicional (dispositivos FACTS e/ou controladores adicionais).

$$B_{1p} = \begin{bmatrix} & & & & B1_{\omega xref} \\ & & & & B1_{\delta xref} \\ & & & & B1_{Eqxref} \\ & & & & B1_{Efdxref} \\ \hline B1_{xtcscPm} & B1_{xtcscVref} & B1_{xtcscPc} & B1_{xtcscQc} & B1_{xtcscxref} \\ B1_{X1Pm} & B1_{X1Vref} & B1_{X1Pc} & B1_{X1Qc} & B1_{X1xref} \\ B1_{X2Pm} & B1_{X2Vref} & B1_{X2Pc} & B1_{X2Qc} & B1_{X2xref} \\ B1_{X3Pm} & B1_{X3Vref} & B1_{X3Pc} & B1_{X3Qc} & B1_{X3xref} \end{bmatrix} \quad (106)$$

$$B1_{\omega xref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (106.1)$$

$$B1_{\delta xref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (106.2)$$

$$B1_{Eqxref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (106.3)$$

$$B1_{Efdxref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (106.4)$$

$$B1_{xtcscPm} = B1_{xtcscVref} = B1_{xtcscPc} = B1_{xtcscQc} = [0] \quad (106.5.1)$$

$$B1_{xtcscxref} = \left[\frac{1}{T_{TCSC}} \right] \quad (106.5.2)$$

$$B1_{X1Pm} = B1_{X1Vref} = B1_{X1Pc} = B1_{X1Qc} = B1_{X1xref} = [0] \quad (106.6)$$

$$B1_{X2Pm} = B1_{X2Vref} = B1_{X2Pc} = B1_{X2Qc} = B1_{X2xref} = [0] \quad (106.7)$$

$$B1_{X3Pm} = B1_{X3Vref} = B1_{X3Pc} = B1_{X3Qc} = B1_{X3xref} = [0] \quad (106.8)$$

A inclusão do controlador POD resulta no acréscimo de 4 n_p linhas e uma n_p coluna na submatriz B_1 em relação à versão básica do MSC. As linhas adicionais são resultado direto da inclusão de novas variáveis de estado ao modelo, enquanto que a coluna adicional refere-se a inclusão de Δx_{ref} ao conjunto de variáveis de entrada.

As submatrizes $B1_{\omega xref}$, $B1_{\delta xref}$, $B1_{Eqxref}$ e $B1_{Efdxref}$ são matrizes compostas por n_g linhas e n_p colunas. Já as submatrizes que relacionam a equação diferencial do controlador POD com as variáveis de entrada do sistema podem assumir três dimensões distintas entre si: as submatrizes relacionadas às variáveis ΔP_m , ΔV_{ref} possuem n_p linhas e n_g colunas. Já as submatrizes relacionadas com as variáveis ΔP_c e ΔQ_c possuem n_p linhas e n_b colunas. Por fim, as submatrizes relacionadas com a variável Δx_{ref} são matrizes quadradas de ordem n_p . Assim, a submatriz B_1 possui $2 n_g + 4 n_p$ linhas e $2 n_g + 2 n_b + n_p$ colunas.

$$B_{2p} = \left[\begin{array}{c|c} B_2 & \begin{matrix} B2_{rxref} \\ B2_{mxref} \end{matrix} \end{array} \right] \quad (107)$$

$$B2_{rxref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (107.1)$$

$$B2_{mxref} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (107.2)$$

Para a submatriz B_2 , as alterações causadas pela inclusão POD ao MSC são semelhantes às alterações sofridas pela submatriz B_1 . Em B_2 são incluídas as submatrizes que relacionam as equações algébricas com a variável de entrada Δx_{ref} , $B2_{rxref}$ e $B2_{mxref}$. Tais submatrizes são compostas por n_b linhas e n_p colunas de elementos nulos.

A partir da análise das equações que compõem a representação do MSC contemplando o acoplamento do controlador POD ao TCSC verifica-se que as submatrizes que formam a representação do MSC no domínio do tempo, com exceção da submatriz J_4 , sofrem uma expansão em sua estrutura de maneira a comportar as novas variáveis de estado adicionadas e

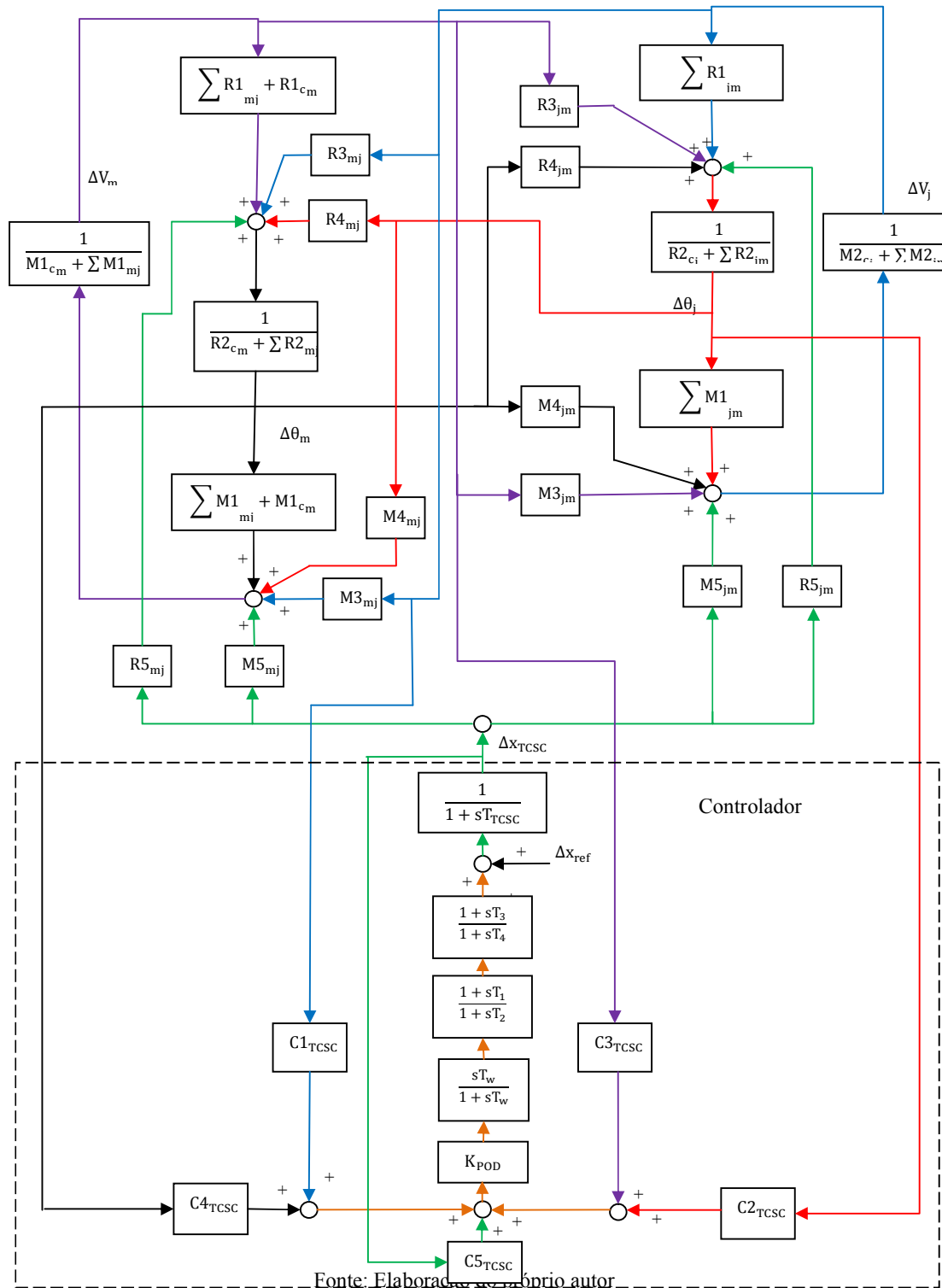
a variável de entrada Δx_{ref} ,

A representação no domínio da frequência, obtida através da aplicação da transformada de Laplace nas equações diferenciais (48), (51), (53), (54) e (90), (95), (97) e (100) é apresentada nas Figura 22 e 23. Nota-se que, considerando a instação do TCSC em um barra do sistema de transmissão (e por consequência, a qual não esteja conectado um gerador síncrono), tal como foi verificado para o controlador de 1ª ordem, a inclusão do controlador POD não altera a estrutura do diagrama de blocos representando o gerador síncrono. Dessa forma, o gerador síncrono permanece representado pela Figura 4, ao passo que o sistema de transmissão pode ser genericamente representado pela Figura 20.

Figura 20: Diagrama de Blocos - Modelo de Sensibilidade de Corrente – Sistema Multimáquinas com TCSC e seu controlador POD : Representação das barras do sistema de transmissão

4 - Inclusão e Modelagem de Controladores Adicionais ao TCSC e suas representações através do Modelo de Sensibilidade de Corrente

86



4.4 Simulações e Resultados

A inclusão dos controladores adicionais é avaliada através de simulações computacionais realizadas com o uso do MATLAB®. Iniciando a análise pelo controlador de 1ª ordem, são feitas as seguintes considerações: O TCSC permanece instalado entre as barras 7 e 8, conforme apresentado na Figura 12. Conforme visto no Capítulo 3, apenas para valores elevados de compensação série o TCSC era capaz de fornecer amortecimento suficiente ao sistema, permitindo-o se manter estável após uma pequena perturbação. Uma vez que o objetivo é analisar os efeitos e as potencialidades dos controladores adicionais, é fixada a compensação série da linha em 15%. Para esse valor de compensação, sem o uso de controladores adicionais, tem-se que o sistema teste é instável. Os testes realizados consistem em variar-se o ganho do controlador de 1ª ordem, mantendo fixa a compensação realizada pelo TCSC. A constante de tempo do controlador T_{TCSC} é estipulada em 0,01 segundos.

Para cada valor do ganho, é feita a simulação da representação do MSC, obtendo-se dessa forma os autovalores da matriz de estados do sistema. Os autovalores obtidos são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Autovalores do sistema teste : TCSC equipado com controlador de 1ª ordem

Ganho	Autovalores		
	Modo Local 1	Modo Local 2	Modo Interárea
K_{TCSC}			
0	-0,2367 + j6,2982	-0,1598 + j5,8856	0,0506 + j4,2941
0,005	-0,2376 + j6,2912	-0,1618 - j5,8853	0,0219 + j4,2583
0,01	-0,2380 - j6,2863	-0,1633 + j5,8850	0,0021 + j4,2324
0,0125	-0,2380 + j6,2844	-0,1639 + j5,8849	-0,0057 + j4,2219
0,015	-0,2380 + j6,2827	-0,1643 + j5,8847	-0,0124 + j4,2128
0,0175	-0,2380 + j6,2813	-0,1648 + j5,8846	-0,0182 + j4,2046
0,02*	-0,2380 + j6,2800	-0,1652 + j5,8845	-0,0234 + j4,1974

* Embora os autovalores apresentados indiquem que o sistema é estável, este é instável devido à existência de um par complexo de autovalores $\lambda = 0,000024 + j0,2903$.

Fonte: Elaboração do próprio autor

Analizando os autovalores da Tabela 19, nota-se que com o aumento do ganho do controlador de 1ª ordem o autovalor associado ao modo interárea, responsável pela instabilidade do sistema, torna-se estável. Verifica-se também que o controlador exerce

pequena influência sobre os modos locais. Dessa forma, verifica-se que o sistema teste pode ser estabilizado mesmo para um nível de compensação relativamente baixo (principalmente quando comparado com os níveis necessários para tornar o sistema estável quando não é considerada a inclusão do controlador adicional ao TCSC) através do emprego de um controlador simples, desde que com a escolha adequada para o valor do ganho.

Quando se fala sobre escolha adequada do ganho, baseia-se no fato de que, conforme se aumenta o ganho, o sistema pode voltar a se tornar instável. Isso ocorre porque o controlador excita outros autovalores além do modo interárea, fazendo com que alguns deles se tornem instáveis. Na Tabela 19, na linha referente ao ganho K_{TCSC} igual a 0,02 a análise isolada dos autovalores apresentados leva a conclusão aparente de que o sistema é estável. Entretanto, verifica-se que um outro autovalor (ver nota de rodapé), sob ação do controlador, desloca-se em direção ao semiplano direito do plano complexo, tornando-se assim instável.

De toda forma, mostra-se o potencial do controlador de 1ª ordem em fornecer o amortecimento necessário para o sistema, permitindo que o mesmo torne-se estável a pequenas perturbações somente com a utilização de um controlador baseado em uma estrutura simples de ganho proporcional. Por outro lado, a simplicidade da estrutura faz com que exista uma deficiência no que diz respeito à definição de valores específicos para o coeficiente de amortecimento desejado para o modo interárea (ou outro modo oscilatório de interesse). Para que, além de estabilizar o sistema, seja fornecido amortecimento em quantidade desejada ao sistema, lança-se mão de um controlador POD.

Na sequência é avaliada a inclusão de um controlador POD com estrutura semelhante à apresentada na Figura 16. Utilizando a ferramenta gráfica *rltool* do MATLAB® para projetar os parâmetros do controlador de maneira a se obter um coeficiente de amortecimento de 10% para o autovalor associado ao modo interárea, são obtidos os seguintes valores:

Tabela 20: Parâmetros do Controlador POD

Ganho K_{POD}	38
$T_w(s)$	3
$T_1(s)$	0,2958
$T_2(s)$	1,7549
$T_3(s)$	0,2958
$T_4(s)$	1,7549

Fonte: Elaboração do próprio autor

Simulando o sistema representado através do MSC, são obtidos os seguintes autovalores para a matriz de estados:

Tabela 21: Autovalores do sistema teste: TCSC equipado com controlador POD

Autovalores	ω_n (Hz)	ξ
-1021,2323	-	-
-951,1431	-	-
-991,6613	-	-
-990,8670	-	-
-13,4381 ± j242,9879	38,7318	0,055
-38,7205	-	-
-9,2068	-	-
-8,5351	-	-
-0,2454 ± j6,2623	0,9974	0,039
-0,1477 ± j5,8477	0,9310	0,025
-0,3452 ± j3,5041	0,5604	0,098
-3,2169 ± j0,6972	0,5239	0,977
-8,5x10 ⁻⁵	-	-
-0,0009	-	-

Fonte: Elaboração do próprio autor

Analisando os dados da Tabela 21, verifica-se que o controlador POD projetado torna o sistema estável (vale lembrar que conforme visto no Capítulo 3, para um grau de compensação do TCSC de 15%, o sistema teste apresentava comportamento instável quando submetido a pequenas perturbações), assim como o controlador de 1ª ordem.

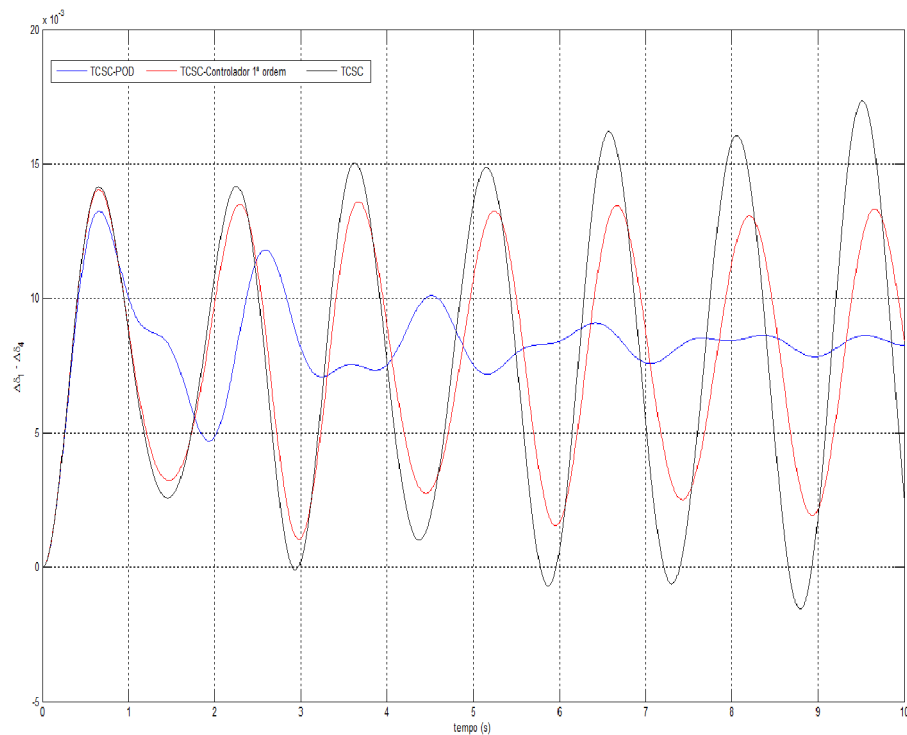
Com isso, a primeira constatação é que o uso de controladores adicionais de fato permitem ao TCSC fornecer uma maior quantidade de amortecimento ao sistema, resolvendo dessa forma a falta de amortecimento de alguns de seus modos oscilatórios.

Na Tabela 21 verifica-se também que o autovalor associado ao modo oscilatório interárea, representado pelo par complexo -0,3452 ± j3,5041, possui coeficiente de amortecimento de 0,098 ou, em valores percentuais, 9,8%, bem próximos dessa forma do valor

Assim, verifica-se que a representação do sistema através do MSC permite efetuar o projeto de controladores, de maneira a especificar o coeficiente de amortecimento desejado para um determinado modo oscilatório, permitindo melhorar a estabilidade a pequenas perturbações do sistema.

Na Figura 21 é apresentado o comportamento da variação do ângulo do gerador 1 do em relação ao gerador de referência para as três configurações do sistema teste equipado com um TCSC. Note que a configuração contemplando a inclusão do controlador POD é aquela que fornece maior amortecimento ao sistema.

Figura 21: Variação angular do Gerador 1 em relação ao Gerador de Referência



Fonte: Elaboração do próprio autor

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizado o estudo da estabilidade a pequenas perturbações do Sistema Elétrico de Potência para Sistemas Multimáquinas considerando a inclusão do TCSC e seus controladores suplementares de amortecimento. Para isso, utilizou-se o Modelo de Sensibilidade de Corrente, proposto por Takahashi et. al. (2013) e Pádua et. al. (2013) para a representação e análise do sistema, onde verifica-se que o fraco amortecimento das oscilações do modo interárea leva o sistema a instabilidade, sendo esse fenômeno, consequência direta da interligação dos sistemas elétricos.

Na sequência, mostra-se que a inclusão de dispositivos FACTS, nesse caso o TCSC, podem contribuir para o fornecimento de amortecimento ao sistema, porém em quantidade insuficiente para apresentar melhorias significativas da estabilidade a pequenas perturbações. Para solucionar a questão, empregam-se controladores adicionais, cuja função é permitir ao FACTS fornecer amortecimento em quantidade necessária para estabilizar o sistema de potência. São apresentados dois controladores: o primeiro, formado por uma estrutura de 1ª ordem com ganho e constante de tempo, também conhecido como controlador de ganho proporcional, e o segundo, um controlador POD, cujos parâmetros são obtidos através de ajustes baseados na compensação de fase dos modos oscilatórios instáveis, ou seja, cujo projeto baseia-se na Teoria do Controle Clássico.

Verifica-se que ambos os controladores permitem estabilizar o sistema, porém o controlador POD, por possuir uma estrutura mais complexa, embora com maior dificuldade no que diz respeito ao seu projeto e ajuste de seus parâmetros, permite um maior controle do ponto de operação do sistema. Com isso atinge-se o objetivo principal deste trabalho, apresentar o potencial do Modelo de Sensibilidade de Corrente para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações de Sistemas Multimáquinas, visto que foi representada e analisada a inclusão de diversos dispositivos adicionais, como o regulador automático de tensão e sua dinâmica, dispositivos FACTS e seus controladores adicionais, sendo abordadas estruturas simples (como o controlador de 1ª ordem) e mais robustas (tal como o controlador POD).

Com isso, abre-se uma nova possibilidade para representação e estudo de SEPs no que diz respeito à sua estabilidade, uma vez que a representação de alguns equipamentos e suas características é de maior simplicidade através de uma abordagem usando modelos baseados em correntes (assim como para outros, é vantajoso utilizar a representação baseada em injeções de potência).

Para trabalhos futuros sugere-se uma análise matemática detalhada do Modelo, buscando refiná-lo, explorar outras possibilidades de utilização e apresentar a representação de outros FACTS e/ou controladores baseados em técnicas de controle adaptativo, como redes neurais, por exemplo.

REFERÊNCIAS

ACHA, E.; ESQUIVEL, C. F.; PÉREZ, H. A.; CAMACHO, C. A. *FACTS: modelling and simulation in power networks*. Hoboken: J. Wiley, 2004. 403 p.

ADEPOJU, G. A.; KOMOLAFE, O. A. Analysis and modelling of static synchronous compensator (STATCOM): a comparison of power injection and current injection models in power flow study. *International Journal of Advanced Science and Technology*, Daejeon, v. 36, p. 65-76, 2011.

AMBAFI, J. G.; NWOHU, M. N.; OHIZE H. O.; TOLA, O. J. Performance evaluation of PSS and STATCOM on oscillation damping of a north-central power network of Nigeria grid system. *International Journal of Engineering and Technology*, Stevenage, v. 2, n. 2, p. 209–219, 2012.

ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. 2. ed. Piscataway: IEEE Press, 2003. 658 p. (IEEE Power System Engineering Series).

AYRES, H. M. *Aplicação do controlador UPFC para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas elétricos de potência*. 2005. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BATI, A. F. Damping of power systems oscillations by using genetic algorithm-based optimal controller. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, Basra, v. 6, n. 1, p. 50–55, 2010.

BENABID, R.; BOUDOUR, M.; ABIDO, M. A. Development of a new power injection model with embedded multi-control functions for static synchronous series compensator. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Stevenage, v. 6, n. 7, p. 680-692, 2012.

BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. *Estabilidade transitória em sistemas eletromagnéticos*. São Carlos: USP/EESC, 2000. 155 p.

CAI, L. J.; ERLICH, I. Simultaneous coordinate tuning of PSS and facts controller for damping power systems oscillations in multi-machine systems. In: IEEE BOLOGNA POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2003. v. 2, 6 p.

CASTRO, M. S. *A influência de controladores FACTS na estabilidade de ângulo a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência*. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

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

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

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

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

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*. 2005. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

FREITAS, W.; MORELATO, A. A generalised current injection approach for modelling of FACTS in power system dynamic simulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AC-DC POWER TRANSMISSION, 7., 2001, London. *Proceedings...* Stevenage: IET, 2001. p. 175-180. (Conference Publication, n. 485).

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

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

FURINI, M. A.; PEREIRA, A. L. S.; ARAUJO, P. B. Pole placement by coordinated tuning of power system stabilizers and FACTS-POD stabilizers. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 624-631, 2011.

- GAMA, C.; LEONI, R. L.; SALOMÃO, J. C.; GRIBEL, J. B.; FRAGA, R.; EIRAS, M. J. X.; PING, W.; RICARD, A.; CAVALCANTI, J. Brazilian North-South interconnection application of thyristor controlled series compensator to damp interarea oscillation mode. In: SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING – SEPOPE, 6., 1998, Salvador. *Proceedings...* Salvador: [s.n.], 1998.
- GU, W.; MILANO, F.; JANG, P.; TANG, G. Hopf bifurcations induced by SVC controllers: a didactic example. *Electric Power Systems Research*, Lausanne, v. 77, n. 3-4, p. 234-240, 2007.
- GYUGYI, L.; SE, K. K.; SCHAUDER, C. D. The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1115-1123, 1999.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. High power electronics and flexible AC transmission systems. *IEEE Power Engineering Review*, Piscataway, v. 76, n. 4, p. 3-4, 1998.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission system. New York: IEEE, 1999. 452 p.
- HUANG, Z.; NI, Y.; SHEN, C. M.; WU, F. F.; CHEN, S.; ZHANG, B. Application of unified power flow controller in interconnected power systems: modeling, interface, control strategy, and case study. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 15, n. 2, p. 817-824, 2000.
- IEEE/CIGRE JOINT TASK FORCE. Definition and classification of power system stability. *Electra*, Paris, n. 208, p. 74-80, 2003.
- KAZEMI, A.; KARIMI, E. The effect of interline power flow controller (IPFC) on damping interarea oscillations in the interconnected power systems. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 41., 2006. *Proceedings...* 2006. p. 769-773.
- KISS, L.; ZERÉNYI, J. A new conception for constructing and tuning power system stabilizer (PSS). IEEE POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2003. v. 1, 5 p.
- KUMAR, B. K.; SINGH, S. N.; SRIVASTAVA, S. C. Placement of FACTS controllers using modal controllability indices to damp out power system oscillations. *IET Generation, Transmission & Distribution*, London, v. 1, n. 2, p. 209-217, 2007.

- 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*, Piscataway, v. 4, n. 2, p. 614-626, 1989.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. New York: MacGraw-Hill, 1994. 1167 p.
- KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability, IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1387-1401, 2004.
- 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 Transactions on PAS*, Piscataway, v. 100, n. 6, p. 3017–3046, 1981.
- LUBIS, R. S.; HADI, S. P.; TUMIRAN. Modeling of the generalized unified power flow controller for optimal power flow. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATICS, 2011, Bandung. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2011. 6 p.
- MAJUMDER, R.; PAL, B. C.; DUFOUR, C.; KORBA, P. Design and real-time implementation of robust FACTS controller for damping inter-area oscillation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 21, n. 2, p. 809-816, 2006.
- MARTINS, L.; PAGOLA, F. L. An eigenvalue sensitivity approach to location and controller design of controllable series capacitor for damping power system oscillations. *IEEE Transaction on Power System*, Piscataway, v. 12, n. 4, p. 1660-1666, Nov. 1997.
- 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*, Piscataway, v. 5, n. 4, p. 74–82, 1990.
- MARTINS, N.; PINTO, H. J. C. P.; PASERBA, J. J. Using a TCSC for line power scheduling and system oscillation damping-small-signal and transient stability studies. IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY (PES) WINTER MEETING, 2000, Singapore. *Conference Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2000. v. 2, p. 1455-1461.
- MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2002. 495 p.

- MENEZES, M. M.; ARAUJO, P. B. Ajuste coordenado de parâmetros dos controladores ESP e TCSC-POD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 4., 2012, Goiânia. *Anais...* Goiânia: [s.n.], 2012. 1 Cd-rom, 6 p.
- MHASKAR, U. P.; KULKARNI, A. M. Power oscillation damping using FACTS devices: modal controllability, observability in local signals, and location of transfer function zeros. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 21, n. 1, p. 285-294, 2006.
- MÍNGUEZ, R.; MILANO, F.; ZÁRATE MIÑANO, R.; CONEJO, A. Optimal network placement , of SVC devices. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 22, n. 4, p. 1851-1860, 2007.
- MOTA, W. S.; NASCIMENTO, J. A. Projeto de estabilizadores de sistemas de potência por controle clássico e algoritmos genéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 14., 2002, Natal. *Anais...* Natal: UFRN, 2008.
- MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Análise de resíduos e zeros da função de transferência de controladores suplementares de amortecimento de dispositivos FACTS UPFC para diferentes sinais de entrada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 18., 2010, Bonito. *Anais ...* Bonito: [s.n.], 2010. 6 p.
- MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Estudo das limitações impostas ao amortecimento de oscilações eletromecânicas pelos zeros da FTMA de controladores suplementares. *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 23, n. 2, p. 188-200, 2012.
- MOUSSA, H. A. M.; YU, Y. Dynamic interaction of multimachine power system and excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, v. 93, n. 4, p. 1150-1158, 1974.
- NGUYEN, T. T.; GIANITO, R. Neural networks for adaptive control coordination of PSSs and FACTS devices in multimachine power system. *IET Generation, Transmission and Distribution*, London, v. 2, n. 3, p. 355-372, 2008.
- NOROOZIAN, M.; ÄNGQUIST, L.; GHANDHARI, M.; ANDERSSON, G. Use of UPFC for optimal power flow control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 12, n. 4, p. 1629-1634, 1997.
- OLIVEIRA, S. E. M. de. Synchronizing and damping torque coefficients and power system steady-state stability as affected by static VAR compensators. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 9, n. 1, p. 109-119, 1994.

PÁDUA JÚNIOR, C. R.; TAKAHASHI, A. L. M.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na Lei de Kirchoff para correntes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE - SBAI, 11., 2013, Fortaleza. Fortaleza: SBA, 2013. 6 p.

PARIMI, A. M.; ELAMVAZUTHI, I.; SAAD, N. Interline power flow controller (IPFC) based damping controllers for damping low frequency oscillations in a power system. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES – ICSET, 2008, Singapore. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2008. p. 334-339.

PASERBA, J. J. How facts controller benefits AC transmission systems. In: IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2003, New York. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2003. v. 3, p. 991-998.

PELLANDA, P. C.; SAVELLI, D. C.; MACEDO, N. J. P.; MARTINS, N.; LUZ, G. S. Síntese de sinais e escolha de estrutura dos estabilizadores dos TCSCs da interligação norte-sul considerando robustez a perturbações externas. In: SIMPÓSIO DE PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA - SEPOPE, 10., 2006, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: [s.n.], 2006. 12 p.

PINA, A. P.; ARAUJO, P. B. Comparison of FACTS STATCOM models for damping oscillations in power system due to small perturbations. In: IEEE PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2010, São Paulo. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2010. 1 Cd-rom, 7 p.

PUPIN, C. E. *Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos multimáquinas com dispositivos FACTS do tipo SSSC e controladores suplementares (POD e PSS)*. 2009. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

PUPIN, C. E.; PINA, A. P.; ARAUJO, P. B. Atuação do SSSC na estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA- CBQEEE, 7., 2009, Blumenau. *Anais...* Blumenau: UFSC, 2009. 6 p.

RAY, S.; VENAYAGAMOORTHY, G. K. Wide-area signal-based optimal neurocontroller for a UPFC. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 23, n. 3. p. 1597-1605, 2008.

ROGERS, G. *Power system oscillations*. Boston: Kluwer Academic, 2000. 344 p.

ROUCO, L.; PAGOLA, F. L. On the sign of feedback applied by power system damping controllers. In: IEEE POWER TECH CONFERENCE, 2001, Porto. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2001. 7 p.

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

SIMÕES, A. M.; SAVELLI, D. C.; PELLANDA, D.C.; MARTINS, N.; APKHARIAN, P. Robust design of a TCSC oscillation damping controller in a Weak 500kV interconnection considering multiple power flow scenarios and external disturbances. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 24, n. 1, p. 226-236, 2009.

SON, K. M.; LASSETER, R. H. A newton-type current injection model of UPFC for studying low-frequency oscillations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 694-701, 2004.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC transmission systems- FACTS*. London: IEE, 1999. 592 p.

TAKAHASHI, A. L. M.; PADUA JUNIOR, C. R.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Estudo dos efeitos da inclusão do FACTS TCSC sobre a estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas modelados através do modelo de sensibilidade de correntes. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION – CLAGTEE, 10., 2013, Viña del Mar. *Book of Abstracts and Proceedings...* Viña del Mar: CLAGTEE, 2013. 9 p.

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

VALLE, D. B.; KOPCAK, I.; COSTA, V. F. da. Modelagem do Interline Power Flow Controller (IPFC) no fluxo de carga e análise de carregamento do sistema. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 3., 2010, Belém. *Anais...* Belém: SBE, 2010. 7 p.

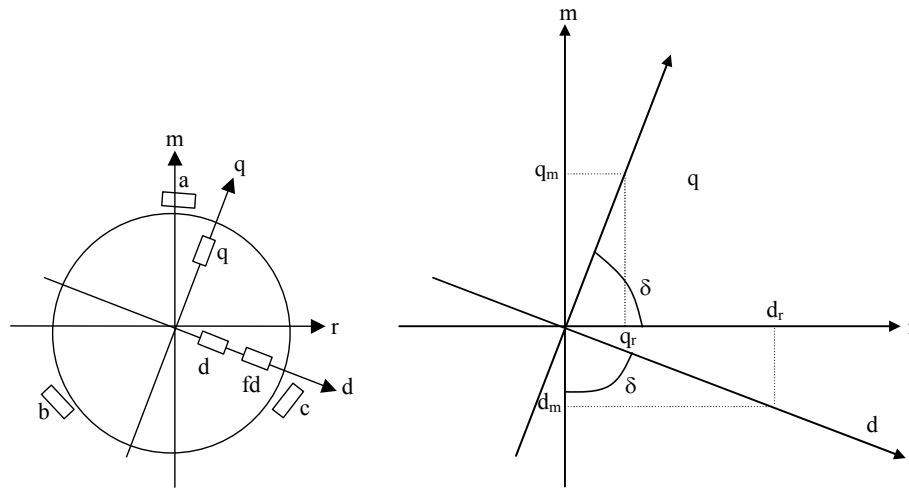
VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B. Análise de estruturas de controle do UPFC no amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema elétrico de potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 4., 2012, Goiânia. *Anais...* Goiânia: SBE, 2012. 1 Cd-rom, 6 p.

- VINKOVIC, A.; MIHALIC, R. A current-based model of the static synchronous series compensator (SSSC) for Newton-Raphson power flow. *Electric Power Systems Research*, Lausanne, v. 78, p. 1806-1813, 2008.
- WANG, H. F.; SWIFT, F. J.; LI, M. FACTS-based stabilizer designed by phase compensation method part II: multi machine power systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT - APSCOM, 4., 1997, Hong Kong. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 1997. p. 644-649.
- WANG, H. F.; SWIFT, F. J. An unified model for the analysis of FACTS device in damping power system oscillations part II: multi-machine power systems. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 1352-1362, 1998.
- WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO G. N. Tecnologia FACTS - tutorial. *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39-55, 1998.
- YANG, N.; LIU, Q.; MCCALLEY, J. D. TCSC controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 13, n. 14, p. 1304-1310, 1998.
- YU, Y. N. *Electric power system dynamic*. New York: Academic Press, 1983. 255 p.
- ZHANG, Y., ZHANG, Y., CHEN, C. A novel power injection model of IPFC for power flow analysis inclusive of practical constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 21, n. 4, p. 1550-1556, Nov. 2006.
- ZHANG, Y., ZHANG, Y., WU, B., ZHOU, J. Power injection model of STATCOM with control and operating limit for power flow and voltage stability analysis. *Electric Power Systems Research*, Lausanne, v. 76, p. 1003-1010, 2006.
- ZHANG, J.; YOKOYAMA, A. Power system transient stability improvement by the interline power flow controller (IPFC). *IEEE Transactions on Power and Energy*, Piscataway, v. 128, n. 1, p. 208-215, 2008.

APÊNDICE A - TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS

Considere a Figura 22, representando os sistemas de coordenadas (r,m) e (d,q) de uma máquina síncrona genérica:

Figura 22: Sistemas de coordenadas (r,m) e (d,q)



Fonte: Elaboração do próprio autor

Da Figura 22, tem-se que as componentes do eixo r podem ser escritas, em função dos eixos d e q, da seguinte forma:

$$r = d_r + q_r \quad (108)$$

Analogamente, as componentes do eixo m, são representadas por:

$$m = -d_m + q_m \quad (109)$$

Observa-se ainda que entre as variáveis dos eixos (d,q) e suas correspondentes nos eixos (r,m) são válidas as seguintes relações:

$$d_r = d \sin \delta \quad (110)$$

$$d_m = d \cos \delta \quad (111)$$

$$q_r = q \cos \delta \quad (112)$$

$$q_m = q \operatorname{sen} \delta \quad (113)$$

Substituindo (xx) em (xx):

$$r = d \operatorname{sen} \delta + q \cos \delta \quad (114)$$

$$m = -d \cos \delta + q \operatorname{sen} \delta \quad (115)$$

Reescrevendo na forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{sen} \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \operatorname{sen} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \quad (116)$$

T^{-1} é definida como a transformação inversa das coordenadas (d,q). A transformação de coordenadas (d,q) é dada pela inversa de T^{-1} , isso é, a matriz T, dada por (117):

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{sen} \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \operatorname{sen} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r \\ m \end{bmatrix} \quad (117)$$

A matriz T permite representar em coordenadas (d,q) variáveis antes representadas em coordenadas (r,m). Para análise de sistemas de potência, sobretudo de máquinas síncronas, é conveniente representar as variáveis em termos das coordenadas (d,q).

APÊNDICE B - COEFICIENTES DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

B.1 Coeficientes do Gerador Síncrono

$$R_{1g_k} = \frac{\partial I_{gr_k}}{\partial E'_{q_k}} = \frac{1}{x'_{dk}} \sin \delta_k \quad (118)$$

$$R_{2g_k} = \frac{\partial I_{gr_k}}{\partial \delta_k} = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{q_k} \cos \delta_k + \left(\frac{1}{x_{q_k}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \cos(2\delta_k - \theta_k) \quad (119)$$

$$R_{3g_k} = \frac{\partial I_{gr_k}}{\partial V_k} = -\frac{1}{x'_{dk}} \cos(\delta_k - \theta_k) \sin \delta_k + \frac{1}{x_{q_k}} \sin(\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k \quad (120)$$

$$R_{4g_k} = \frac{\partial I_{gr_k}}{\partial \theta_k} = -\left(\frac{1}{x'_{dk}} \right) v_k \sin(\delta_k - \theta_k) \sin \delta_k - \left(\frac{1}{x_{q_k}} \right) V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k \quad (121)$$

$$M_{1g_k} = \frac{\partial I_{gm_k}}{\partial E'_{q_k}} = \frac{1}{x'_{dk}} \cos \delta_k \quad (122)$$

$$M_{2g_k} = \frac{\partial I_{gm_k}}{\partial \delta_k} = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{q_k} \sin \delta_k + \left(\frac{1}{x_{q_k}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \sin(2\delta_k - \theta_k) \quad (123)$$

$$M_{3g_k} = \frac{\partial I_{gm_k}}{\partial V_k} = -\frac{1}{x'_{dk}} \sin(\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k + \frac{1}{x_{q_k}} \sin(\delta_k - \theta_k) \sin \delta_k \quad (124)$$

$$M_{4g_k} = \frac{\partial I_{gm_k}}{\partial \theta_k} = \left(\frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k - \left(\frac{1}{x_{q_k}} \right) V_k \cos(\delta_k - \theta_k) \sin \delta_k \quad (125)$$

B.2 Coeficientes das Linhas de Transmissão

$$R_{1kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial V_k} = \frac{1}{|Z_{kj}|^2} (r_{kj} \cos \theta_k + x_{kj} \sin \theta_k) \quad (126)$$

$$R_{2kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial \theta_k} = - \left(\frac{V_k}{|Z_{kj}|^2} \right) (r_{kj} \sin \theta_k - x_{kj} \cos \theta_k) \quad (127)$$

$$R_{3kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial V_j} = - \frac{1}{|Z_{kj}|^2} (r_{kj} \cos \theta_j + x_{kj} \sin \theta_j) \quad (128)$$

$$R_{4kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial \theta_j} = \left(\frac{V_j}{|Z_{kj}|^2} \right) (r_{kj} \sin \theta_j - x_{kj} \cos \theta_j) \quad (129)$$

$$M_{1kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial V_k} = \frac{1}{|Z_{kj}|^2} (r_{kj} \sin \theta_k - x_{kj} \cos \theta_k) \quad (130)$$

$$M_{2kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial \theta_k} = \left(\frac{V_k}{|Z_{kj}|^2} \right) (r_{kj} \cos \theta_k + x_{kj} \sin \theta_k) \quad (131)$$

$$M_{3kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial V_j} = - \frac{1}{|Z_{km}|^2} (r_{kj} \sin \theta_m - x_{kj} \cos \theta_m) \quad (132)$$

$$M_{4kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial \theta_j} = - \left(\frac{V_j}{|Z_{kj}|^2} \right) (r_{kj} \cos \theta_m + x_{kj} \sin \theta_m) \quad (133)$$

sendo $j = m, n$.

B.3 Coeficientes das Linhas de Transmissão considerando a instalação do TCSC

$$R_{1kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial V_k} = \frac{1}{|Z'_{kj}|^2} (r_{kj} \cos \theta_k + x_{kj_{ef}} \sin \theta_k) \quad (134)$$

$$R_{2kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial \theta_k} = - \left(\frac{V_k}{|Z'_{kj}|^2} \right) (r_{kj} \sin \theta_k - x_{kj_{ef}} \cos \theta_k) \quad (135)$$

$$R_{3kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial V_j} = - \frac{1}{|Z'_{kj}|^2} (r_{kj} \cos \theta_j + x_{kj_{ef}} \sin \theta_j) \quad (136)$$

$$R_{4kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial \theta_j} = \left(\frac{V_j}{|Z'_{kj}|^2} \right) (r_{kj} \sin \theta_j - x_{kj_{ef}} \cos \theta_j) \quad (137)$$

$$R_{5kj} = \frac{\partial I_{kj_r}}{\partial x_{TCSC}} = \frac{1}{|Z'_{kj}|^4} (V_j \sin \theta_j - V_k \sin \theta_k) \times (r_{kj}^2 - x_{kj_{ef}}^2) \quad (138)$$

$$M_{1kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial V_k} = \frac{1}{|Z'_{kj}|^2} (r_{kj} \sin \theta_k - x_{kj_{ef}} \cos \theta_k) \quad (139)$$

$$M_{2kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial \theta_k} = \left(\frac{V_k}{|Z'_{kj}|^2} \right) (r_{kj} \cos \theta_k + x_{kj_{ef}} \sin \theta_k) \quad (140)$$

$$M_{3kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial V_j} = -\frac{1}{|Z'_{kj}|^2} (r_{kj} \sin \theta_j - x_{kj_{ef}} \cos \theta_j) \quad (141)$$

$$M_{4kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial \theta_j} = -\left(\frac{V_j}{|Z'_{kj}|^2} \right) (r_{kj} \cos \theta_j + x_{kj_{ef}} \sin \theta_j) \quad (142)$$

$$M_{5kj} = \frac{\partial I_{kj_m}}{\partial x_{TCSC}} = \frac{1}{|Z'_{kj}|^4} (v_j \cos \theta_j - v_k \cos \theta_k) (r_{kj}^2 - x_{kj_{ef}}^2) \quad (143)$$

B.4 Coeficientes da Carga

$$R_{1_{ck}} = \frac{\partial I_{c_{rk}}}{\partial V_k} = \left(-\frac{1}{V_k^2} \right) (P_k \cos \theta_k + Q_k \sin \theta_k) \quad (144)$$

$$R_{2_{ck}} = \frac{\partial I_{c_{rk}}}{\partial \theta_k} = \left(-\frac{1}{V_k} \right) (P_k \sin \theta_k - Q_k \cos \theta_k) \quad (145)$$

$$R_{3_{ck}} = \frac{\partial I_{c_{rk}}}{\partial P_k} = \frac{1}{V_k} \cos \theta_k \quad (146)$$

$$R_{4_{ck}} = \frac{\partial I_{c_{rk}}}{\partial Q_k} = \frac{1}{V_k} \sin \theta_k \quad (147)$$

$$M_{1_{ck}} = \frac{\partial I_{c_{mk}}}{\partial V_k} = \left(-\frac{1}{V_k^2} \right) (P_k \sin \theta_k - Q_k \cos \theta_k) \quad (148)$$

$$M_{2_{c_k}} = \frac{\partial I_{c_{mk}}}{\partial \theta_k} = \left(\frac{1}{V_k} \right) (P_k \cos \theta_k + Q_k \sin \theta_k) \quad (149)$$

$$M_{3_{c_k}} = \frac{\partial I_{c_{mk}}}{\partial P_k} = \frac{1}{V_k} \sin \theta_k \quad (150)$$

$$M_{4_{c_k}} = \frac{\partial I_{c_{mk}}}{\partial Q_k} = -\frac{1}{V_k} \cos \theta_k \quad (151)$$

APÊNDICE C - DADOS DO SISTEMA TESTE: SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

Tabela 22: Dados de Barra do Sistema Teste

ID	Tipo	Carga		ID Área	kV base
		Ativa (MW)	Reativa (MVar)		
1	PV	0	0	1	230
2	PV	0	0	1	230
3	PV	0	0	2	230
4	Vθ	0	0	2	230
5	PQ	0	0	1	230
6	PQ	0	0	1	230
7	PQ	1159	212	1	230
8	PQ	1575	288	2	230
9	PQ	0	0	2	230
10	PQ	0	0	2	230

Fonte: Kundur (1994)

Tabela 23: Dados dos Geradores do Sistema Teste

ID Barra	Potência Gerada		MVA Base	Tensão	
	P (MW)	Q (MVar)		Magnitude (pu)	Ângulo
1	700	-	100	1	-
2	700	-	100	1	-
3	700	-	100	1	-
4	-	-	100	1	0°

Fonte: Kundur (1994)

Tabela 24: Dados das Linhas de Transmissão do Sistema Teste

Barra		Parâmetros Elétricos		
Inicial	Final	R (pu)	X (pu)	B _{total} (pu)
1	5	0.001	0.012	0
2	6	0.001	0.012	0
7	8	0.022	0.22	0.33
7	8	0.022	0.22	0.33
7	8	0.022	0.22	0.33
6	7	0.002	0.02	0.03
6	7	0.002	0.02	0.03
4	10	0.001	0.012	0
3	9	0.001	0.12	0
9	8	0.002	0.02	0.03
9	8	0.002	0.02	0.03
5	6	0.005	0.05	0.075
5	6	0.005	0.05	0.075
10	9	0.005	0.05	0.075
10	9	0.005	0.05	0.075

Fonte: Kundur (1994)

ANEXO A - ARTIGOS PUBLICADOS

TAKAHASHI, A. L. M.; PADUA JUNIOR, C. R.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Estudo dos efeitos da inclusão do FACTS TCSC sobre a estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas modelados através do modelo de sensibilidade de correntes. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION – CLAGTEE, 10., 2013, Viña del Mar. *Book of abstracts and proceedings...* Viña del Mar: [s.n.], 2013. 9 p.

PÁDUA JÚNIOR, C. R.; TAKAHASHI, A. L. M.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na Lei de Kirchoff para correntes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE - SBAI, 11., 2013, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: [s.n.], 2013.