

EPITÁCIO PEDRO DA SILVA JÚNIOR

**Controle Coordenado de Múltiplos Dispositivos FACTS com
vistas à Estabilidade Transitória de SEE**

Ilha Solteira
2014



EPITÁCIO PEDRO DA SILVA JÚNIOR

**Controle Coordenado de Múltiplos Dispositivos FACTS com
vistas à Estabilidade Transitória de SEE**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação.

Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara
Orientador

Ilha Solteira
2014

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586c Silva Júnior, Epitácio Pedro.
Controle coordenado de múltiplos dispositivos facts com vistas à estabilidade transitória de SEE / Epitácio Pedro da Silva Júnior. - - Ilha Solteira: [s.n.], 2014
125 f.:il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2014

Orientador: Laurence Duarte Colvara

Inclui bibliografia

1. Estabilidade transitória. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Sistemas flexíveis de transmissão CA. 4. Máquinas síncronas.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Controle Coordenado de Múltiplos Dispositivos FACTS com vistas à Estabilidade Transitória de SEE

AUTOR: EPITACIO PEDRO DA SILVA JUNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

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

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

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

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

Prof. Dr. IGOR KOPCAK
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação - Eeec / Universidade Federal de Goiás

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

Data da realização: 16 de maio de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à minha esposa Rosimeire Oenning da Silva, aos meus filhos Epitácio Neto e Maria Clara, aos meus pais Epitácio e Adiles e aos meus irmãos e irmãs.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a todos os familiares, amigos, colegas, professores e funcionários da FEIS-UNESP e da UNEMAT, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, dedico meus agradecimentos:

- A Deus pela minha vida e pela oportunidade de realizar este trabalho;
- Ao Prof. Dr. *Laurence Duarte Colvara* por sua atenção e orientação na elaboração do trabalho;
- À minha esposa *Rosimeire Oenning da Silva*, pela companhia, pela compreensão e ajuda nos momentos difíceis;
- Ao meu filho *Epitácio Pedro da Silva Neto* e minha filha *Maria Clara Oenning da Silva* pelo carinho e compreensão, se privando da minha companhia;
- Ao meu pai *Epitácio Pedro da Silva*, falecido durante o doutorado, pelo orgulho de me ter como filho e a minha adorada mãe *Adiles Ribeiro da Silva*, pelo carinho e pelas orações em favor da minha família.
- Aos meus irmãos e irmãs por sempre acreditarem, confiarem e torcerem por mim;
- À UNEMAT - Universidade do Estado de Mato Grosso, pelo apoio à qualificação de seus docentes e em especial aos colegas professores *Flávio Teles Cavalcante* e *Francisco Ledo Santos* pela idealização do DINTER juntamente com o Prof. Dr. *Ruben Romero*;
- A todos os professores do DINTER - UNESP - UNEMAT, pelo empenho e dedicação ao programa;
- Aos meus colegas do DINTER, pelos momentos de estudos, compartilhamento de conhecimento e pelas ajudas oportunas. Em especial *Inédio Arcari*, um amigo que sempre me ajudou na parte de programação.
- Aos meus colegas do GAEESEE cuja convivência estimulou ao trabalho e dedicação à pesquisa. Em especial *João Luiz Bergamo Zamperin* por contribuir de forma importante para a realização deste trabalho.
- À CAPES e FAPEMAT pelo financiamento deste DINTER.

- À banca examinadora pelas correções, idéias e sugestões apresentadas.

EPÍGRAFE

"Ninguém ignora tudo.

Ninguém sabe tudo.

Todos nós sabemos alguma coisa.

Todos nós ignoramos alguma coisa.

Por isso aprendemos sempre." Paulo

Freire

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre análise e controle coordenado de múltiplos dispositivos FACTS com vistas à melhoria da estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica, considerando especificamente os efeitos dos dispositivos em derivação (SVC) e em série (TCSC). As análises são feitas por métodos baseados na função energia do sistema mais especificamente na energia potencial avaliada no espaço das posições angulares dos rotores das máquinas em torno de um ponto de equilíbrio estável. A influência e a alocação dos dispositivos FACTS são avaliadas por um índice de efeito de atuação sobre a capacidade de sincronização entre os pares de máquinas, denominado fator de efeito. O controle coordenado dos múltiplos dispositivos FACTS se dá mediante sua compensação dinâmica por meio de cada uma das três leis de controle que objetivam elevar a superfície gerada pela função energia potencial do sistema que circunda o ponto de equilíbrio estável durante a primeira oscilação, denominada de vale energético, e direcionar sua trajetória para um caminho mais íngreme, idealmente na mesma orientação do gradiente da energia potencial na direção de um ponto de máximo local dificultando sua ultrapassagem pela cordilheira energética e, conseqüentemente, proporcionando ao sistema, melhoria das condições de estabilidade transitória observada pela elevação do tempo crítico de eliminação de uma falta. As simulações feitas nos três sistemas testes (Sistema Kundur, Sistema IEEE 14 Barras e Sistema New England) foram usadas para avaliar o controle proposto. Conclui-se que cada uma das leis de controle proposta contribui, de forma similar, na melhoria da estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Estabilidade transitória. Sistemas de energia elétrica. Sistemas flexíveis de transmissão CA. Máquinas síncronas.

ABSTRACT

This thesis presents a study about coordinated analysis and control over multiple FACTS devices with the objective of improving the transient stability of Electric Power Systems, considering specifically, the effects of the devices in derivation (SVC) and in series (TCSC). The analysis are made by methods based on the system energy function, more specifically on the potential energy evaluated in the angular positions' space from the rotors of machines around a stable balance position. The influence and location of FACTS devices are evaluated by a performance effect index over the synchronization capacity between pairs of machines, called effect factor. The coordinated control over multiple FACTS devices is possible through it's dynamic compensation by means of each one of the three laws of control whose objective is to elevate the surface generated by the system potential energy function of the system which surrounds the stable balance point during the first oscillation, named energy valley. The system trajectory is conducted to a steeper way, ideally on the same orientation as the gradient of the potential energy towards a single point of a function local max so hardening it's passage through the energy barrier. The improvements on the transient stability's conditions observed by elevation of the critical time of a fault elimination. The simulations done on the three test systems (Kundur System, IEEE 14 Bars System and New England) System were used to evaluate the proposed control. It follows that each of the proposed control laws contributes similarly, improving transient stability of Electric Electric Systems.

Keywords: Transient stability. Electric power systems. Flexible AC transmission systems. Synchronous machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Modelo π da linha de transmissão.	35
Figura 2	Modelo π da linha de transmissão com conversão adotada para o cálculo de fluxo de potência.	36
Figura 3	Diagrama esquemático de uma máquina síncrona trifásica.	38
Figura 4	Diagrama fasorial de uma máquina síncrona no período transitório.	39
Figura 5	Sistema de referência síncrona.	40
Figura 6	Sistema Multimáquinas.	41
Figura 7	Sistema multimáquinas com carga e barras internas adicionadas à rede. . . .	42
Figura 8	Sistema reduzido aos nós internos das máquinas síncronas.	44
Figura 9	Sistema de três máquinas. Linhas equipotenciais de energia representada por linhas sólidas e contorno de superfície potencial, por linhas pontilhadas. . .	52
Figura 10	Esquema básico de um SVC.	54
Figura 11	Esquema básico de um TCSC.	55
Figura 12	Sistema Multimáquinas com um TCSC instalado entre as barras k e l na forma de admitância.	56
Figura 13	Sistema Multimáquinas reduzido às barras internas dos geradores e terminais da linha compensada.	57
Figura 14	Variação da admitância de transferência entre as máquinas devida as variações de reatância dos TCSC.	59
Figura 15	Matriz admitância adicionada o SVC.	60
Figura 16	Matriz admitância reduzida às barras de interesse.	60
Figura 17	Impedância do SVC, em série, equivalente à admitância, em paralelo, do SVC.	62
Figura 18	Ângulo entre gradiente e trajetória do sistema.	71
Figura 19	Sistema multimáquinas de duas áreas e quatro máquinas.	78

Figura 20	Ângulos das máquinas: Sistema estável (a) e Sistema instável (b).	79
Figura 21	Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares $\delta_{1,2}$ e $\delta_{1,3}$, trajetória estável (Traj. Est.) e trajetória instável (Traj. Inst.) do sistema sem compensação. O ponto de eliminação da falta (P. E. F.) pertence à trajetória de mesma cor.	80
Figura 22	Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares $\delta_{1,2}$ e $\delta_{1,3}$, e trajetórias com compensação fixa e com compensação dinâmica.	82
Figura 23	Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares $\delta_{1,3}$ e $\delta_{1,4}$, e trajetórias com compensação fixa e com compensação dinâmica.	83
Figura 24	Energia potencial do sistema com compensação fixa e dinâmica conforme as três leis de controle.	84
Figura 25	Derivada temporal do sistema com compensação fixa e dinâmica por meio das três leis de controle.	85
Figura 26	Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do sistema com compensação fixa e dinâmica por meio das três leis de controle.	85
Figura 27	Sistema IEEE: 14 Barras e 5 Máquinas.	86
Figura 28	Oscilações dos ângulos das máquinas do Sistema IEEE 14 Barras sem compensação: (a) curto-circuito Barra 02; (b) curto-circuito Barra 04 e (c) curto-circuito Barra 05.	87
Figura 29	Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-3 e 2-3 do Sistema IEEE 14 Barras: (a) LC01, (b) LC02 e (c) LC03.	89
Figura 30	Trajetoórias das defasagens angulares 1-3 e 2-3 do sistema IEEE 14 Barras.	90
Figura 31	Energia potencial do sistema versus defasagem angular na primeira oscilação, com $t_{ch} = 0,08$ segundo.	90
Figura 32	Derivada temporal da energia potencial do Sistema IEEE 14 Barras.	91
Figura 33	Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do Sistema IEEE 14 Barras.	91
Figura 34	Primeira oscilação do sistema IEEE 14 barras: (a) Energia potencial máxima, (b) Defasagem angular máxima, (c) Tempo de duração da primeira oscilação.	93
Figura 35	Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do Sistema IEEE 14 Barras: (a) Curto-circuito Barra 04, (b) Curto-circuito Barra 05.	94

Figura 36	Diagrama unifilar do Sistema New England.	94
Figura 37	Curvas equipotenciais e trajetórias das defasagens angulares entre os pares de máquinas (1,3) e (1,10), com $t_{ch} = 0,40$ s.	96
Figura 38	Energia potencial do sistema, com $t_{ch} = 0,40$ s.	97
Figura 39	Defasagem angular entre os pares de máquinas (8,10), com $t_{ch} = 0,40$ s.	97
Figura 40	Ângulo entre o vetor gradiente da energia potencial e o vetor defasagens das velocidades angulares entre os pares de máquinas do sistema, com $t_{ch} = 0,40$ s.	98
Figura 41	Tempo da primeira oscilação do Sistema New England.	99
Figura 42	Energia potencial máxima da primeira oscilação do Sistema New England.	100
Figura 43	Defasagem entre as máquinas de maior e menor aceleração no ponto de $E_{p_{max}}$ da primeira oscilação do Sistema New England.	100
Figura 44	Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do Sistema New England com curto-circuito Barra: (a) 02, (b) 03, (c) 04, (d) 06, (e) 07 e (f) 08.	101
Figura 45	Energia potencial versus defasagem do par de máquinas mais afetado pelo curto-circuito na Barra: (a) 05, (b) 09 e (c) 10.	102
Figura 46	Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares $\delta_{2,10}$ e $\delta_{1,10}$, trajetórias do Sistema New England com curto-circuito na Barra 10 e com $t_{ch} = 0,45$ s.	103
Figura 47	Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do sistema New England com curto-circuito barra: (a) 05, (b) 09.	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Fator de Efeito e Coeficiente de Eficácia dos Pares de Máquinas do Sistema Kundur.	81
Tabela 2	Tempo Crítico de Eliminação da Falta do Sistema Kundur.	83
Tabela 3	Fator de Efeito do SVC (Barra 09) e do TCSC (LT:01 – 05), Sistema IEEE 14 Barras.	88
Tabela 4	Tempo Crítico de Eliminação da Falta na Barra 02, Sistema IEEE 14 Barras.	92
Tabela 5	Tempo crítico de eliminação da falta nas Barras 04 e 05, Sistema IEEE 14 Barras.	93
Tabela 6	Tempo crítico de eliminação do curto-circuito na Barra 01, Sistema New England.	98
Tabela 7	Dispositivos FACTS alocados, pares de máquinas usados na LC02 e valor do tempo de duração da falta (t_{ch}), para cada curto-circuito. Sistema New England.	99
Tabela 8	Tempo crítico de eliminação da falta do Sistema New England, com alocação FACTS específica para cada falta.	104
Tabela 9	Tempo crítico de eliminação da falta do Sistema New England, com alocação geral.	105
Tabela 10	Valores dos coeficientes, fator de efeito, do SVC alocado na Barra 15 sobre os pares de máquinas do Sistema New England com alocação específica (A. Esp.) e alocação geral (A. Ger.) de dispositivos FACTS.	106
Tabela 11	Dados de linhas do Sistema Kundur.	115
Tabela 12	Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do Sistema Kundur.	115
Tabela 13	Parâmetros das máquinas do Sistema Kundur.	116

Tabela 14	Tensões internas (atrás de $X'd$) do Sistema Kundur em regime permanente.	116
Tabela 15	Dados de linhas do Sistema IEEE 14 Barras.	117
Tabela 16	Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do Sistema IEEE 14 Barras.	118
Tabela 17	Parâmetros das máquinas do Sistema IEEE 14 Barras.	119
Tabela 18	Tensões internas (atrás de $X'd$) do Sistema IEEE 14 Barras em regime permanente.	119
Tabela 19	Dados de linhas do Sistema New England.	120
Tabela 20	Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do Sistema New England.	121
Tabela 21	Parâmetros das máquinas do Sistema New England.	123
Tabela 22	Tensões internas (atrás de $X'd$) do Sistema New England em regime permanente.	123

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System (Sistema de Transmisso Flexível em Corrente Alternada)
SVC	Static Var Compensator
SEE	Sistema de Energia Elétrica
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
UPFC	Unified Power Flow Controller
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
LT	Linha de Transmisso
STATCOM	Static Compensator
MBI	Máquina versus Barra Infinita
PS	Phase Shifter Transformer
PMU	Phasor Measurement Unit
PSS	Power System Stabilizers
POD	Power Oscillation Damping
f.e.m.	Força Eletromotriz
L.I.	Linearmente Independente
COI	Center of Inertia
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
TCR	Thyristor-Controlled Reactor
TSC	Thyristor-Switched Capacitor
LC01	Lei de Controle 01
LC02	Lei de Controle 02
LC03	Lei de Controle 03
P.E.E.	Ponto de Equilíbrio Estável
P.E.F.	Ponto de Eliminao de Falta
C. Fixa	Compensaco Fixa
C. Din.	Compensaco Dinâmica

LISTA DE SÍMBOLOS

Z_{ij}	Impedância série da linha $i - j$
r_{ij}	resistência da linha $i - j$
x_{ij}	Reatância da linha $i - j$
y_{ij}	Admitância da linha $i - j$
g_{ij}	Condutância da linha $i - j$
b_{ij}	Susceptância da linha $i - j$
b_{ij}^{sh}	Susceptância shunt da linha $i - j$
b_i^{sh}	Susceptância shunt na barra i
G	Matriz de condutância
B	Matriz de susceptância
G_{ij}	Condutância de transferência entre os barramentos i e j
G_{ii}	Condutância própria do barramento i
B_{ij}	Susceptância de transferência entre os barramentos i e j
Y	Matriz admitância de barras do sistema
I	Vetor injeção de corrente de barras do sistema
\bar{I}_{ij}	Fasor corrente da barra i em direção a j
I_g	Vetor injeção de corrente dos geradores(barras fictícias)
V	Vetor tensão de barra
\bar{V}_i	Fasor tensão da barra i
V_i	Magnitude da tensão da barra i
θ_i	Ângulo de fase da tensão da barra i
\bar{S}	Matriz potência complexa
\bar{S}_{ij}	Fluxo de potência complexa na linha $i - j$
P_{ij}	Fluxo de potência ativa na linha $i - j$
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa na linha $i - j$
λ_{ij}	Defasagem do ângulo de fase entre as barras i e j
Y_{ij}	Elemento da matriz admitância de barras
y_{ij}	Admitância da linha ij

Ω_k	Conjunto das barras vizinhas à barra k
\bar{S}_i	Injeção de potência complexa na barra i
P_i	Injeção de potência ativa na barra i
Q_i	Injeção de potência reativa na barra i
d	Eixo direto da máquina síncrona
q	Eixo em quadratura da máquina síncrona
E'_d	Componente da tensão interna no eixo direto da máquina síncrona
E'_q	Componente da tensão interna no eixo em quadratura da máquina síncrona
V_d	Componente da tensão terminal no eixo direto da máquina síncrona
V_q	Componente da tensão terminal no eixo em quadratura da máquina síncrona
I_d	Componente da corrente no eixo direto da máquina síncrona
I_q	Componente da corrente no eixo em quadratura da máquina síncrona
T'_{d0}	Constante de tempo de circuito aberto transitório de eixo direto
T'_{q0}	Constante de tempo de circuito aberto transitório de eixo em quadratura
x_d	Reatância do eixo direto da máquina síncrona
x_q	Reatância do eixo em quadratura da máquina síncrona
x'_d	Reatância transitória do eixo direto da máquina síncrona
x'_q	Reatância transitória do eixo em quadratura da máquina síncrona
r	Resistência da máquina síncrona
Re	Eixo real da máquina síncrona
Im	Eixo imaginário da máquina síncrona
F	Variável fasorial
ω	Velocidade angular
ω_m	Velocidade angular mecânica
δ_i	Posição angular do rotor da máquina i
δ_{ij}	Defasagem angular entre as máquinas i e j
$\dot{\delta}$	Derivada temporal da variável δ
$\ddot{\delta}$	Derivada temporal da variável δ

Os símbolos "''" e "'''" sobre uma variável denotam sua derivada temporal de primeira e segunda ordem, respectivamente.

M_i	Constante de inércia da máquina i
P_{m_i}	Potência mecânica da máquina i
P_{e_i}	Potência elétrica da máquina i
D_i	Coefficiente de amortecimento da máquina i
pu	Por unidade
Y_{bus}	Matriz admitância da rede aumentada as barras terminais e internas dos geradores
Y_{aum}	Matriz admitância da rede aumentada as barras internas dos geradores (as barras terminais já estão na rede)
Y_{red}^{int}	Matriz admitância da rede reduzida às barras de interesse
Y_{red}	Matriz admitância da rede reduzida às barras de internas dos geradores
Y_{gg}^{red0}	Matriz admitância da rede reduzida as barras de internas dos geradores em regime permanente
Y_{gg}	Matriz admitância entre as barras internas dos geradores
Y_{gr}	Matriz admitância entre as barras internas dos geradores e as barras da rede
Y_{rg}	Matriz transposta de Y_{gr}
Y_{rr}	Matriz admitância entre as barras da rede
n	Número de geradores da rede
m	Número de barras da rede
y_k	Admitância transitória da máquina k
y_l	Admitância constante equivalente ao carregamento da barra
E	Vetor tensão interna dos geradores (barras fictícias)
E_i	Fasor tensão interna do gerador i (barra fictícia)
E_i	Magnitude da tensão interna do gerador i (barra fictícia)
δ_{CI}	Referência angular centro inercial
ω_{CI}	Referência velocidade centro inercial
M_T	Soma das constantes de inércia das máquinas do sistema
t_{cr}	Tempo crítico de chaveamento(interrupção da falta)
δ_{cr}	Ângulo crítico de chaveamento (interrupção da falta)
$\tilde{\theta}_i$	Ângulo rotor da máquina i referido ao centro inercial
$\tilde{\omega}_i$	Velocidade angular da máquina i referida ao centro inercial
$\tilde{\theta}_{ij}$	Defasagem angular entre as máquinas i e j , referida ao centro inercial
X_T	Reatância total do sistema MBI
x_{csc}^0	Reatância fixa (de equilíbrio) do TCSC
Z_{ef}	Impedância efetiva na linha de transmissão
Δx_{csc}	Variação da reatância do TCSC
Δy_{csc}	Variação da admitância do TCSC

y_{kl}^0	Valor estático da admitância da linha de transmissão
Z_{kl}^0	Valor estático da impedância da linha de transmissão
$Y_{csc,csc}$	Matriz admitância das barras referentes a linha de instalação do TCSC
Det	Determinante da matriz $Y_{csc,csc}$
det^0	Determinante da matriz $Y_{csc,csc}$, em regime permanente
ΔY_{csc}	Matriz das variações da admitância devido a ação do TCSC
ΔY_{csc}^0	Matriz das variações da admitância, em regime permanente, devido a ação do TCSC
ΔX_{svc}	Reatância variante do SVC
$\bar{K}_{csc;ij}$	Coefficientes de sensibilidade da ação do TCSC entre as máquinas i e j
$K_{csc;ij}$	Magnitude do coeficiente de sensibilidade do TCSC
$\varphi_{csc;ij}$	Ângulo do coeficiente de sensibilidade do TCSC
K_{csc}^{ef}	Matriz dos coeficientes de eficácia do TCSC
Y_{ij}	Magnitude da admitância de transferência entre os barramentos i e j
Θ_{ij}	Ângulo da admitância de transferência entre os barramentos i e j
Θ_{ij}^0	Ângulo da admitância de transferência entre os barramentos i e j em condição de regime permanente
y_{svc}	Susceptância do SVC
y_{svc}^0	Susceptância do SVC em regime permanente
Δy_{svc}	Variação da susceptância do SVC
ΔY_{svc}	Matriz das variações da admitância devido a ação do SVC
$\Delta y_{svc;ij}$	Parcela de admitância de transferência variante entre as máquinas i e j devido a ação do SVC
ΔY_{svc}^0	Matriz das variações da admitância, em regime permanente, devido a ação do SVC
Z_{svc}	Impedância do SVC
Z_{svc}^0	Impedância do SVC em regime permanente
ΔZ_{svc}	Variação da Impedância do SVC
ΔB_{svc}	Susceptância variante do SVC
$\bar{K}_{svc;ij}$	Coefficientes de sensibilidade da ação do SVC entre as máquinas i e j
$K_{svc;ij}$	Magnitude do coeficiente de sensibilidade do SVC
$\varphi_{svc;ij}$	Ângulo do coeficiente de sensibilidade do SVC
K_{svc}^{ef}	Matriz dos coeficientes de eficácia do SVC
$F_{svc\ ij}^{ef}$	Fator de efeito entre as máquinas i e j devido a ação do SVC
$F_{csc\ ij}^{ef}$	Fator de efeito entre as máquinas i e j devido a ação do TCSC

ns	Número de SVC instalados na rede
nc	Número de TCSC instalados na rede
F_{ij}	Fator associado a contribuição dos múltiplos FACTS, na admitância transitória
ΔY_{ij}^{ef}	Varição efetiva da admitância de transferência entre as máquinas i e j devido a ação dos múltiplos FACTS
$\Delta facts$	Vetor formado pelas variações de susceptâncias dos SVCs e de reatâncias dos TCSCs
α_{ij}	Complemento do ângulo de admitância de transferência entre os barramentos i e j
α_{ij}^0	Complemento do ângulo de admitância de transferência entre os barramentos i e j , em regime permanente
$\Delta \alpha_{ij}$	Varição do complemento do ângulo de admitância de transferência entre os barramentos i e j
ΔY_{facts}	Matriz da variação da admitância de transferência devido a ação dos múltiplos FACTS
P_{eij}	Potência elétrica transferida entre as máquinas i e j
ΔP_{e_i}	Varição da potência elétrica da i -ésima máquina
φ_{ij}	Defasagem angular somado com o ângulo de admitância de transferência referido ao eixo em quadratura
φ_{ij}^0	Ângulo φ_{ij} em condição de regime permanente
σ_k	Varição da posição angular em relação ao equilíbrio
$V(x)$	Função de Lyapunov
$K_{facts_{ij}}$	Fator de contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS sobre a admitância de transferência entre as máquinas i e j
$E_p(\sigma)$	Função energia potencial do sistema
\bar{T}	Vetor torque do sistema
∇E_p	Gradiente da função energia potencial ($\partial E_p / \partial \sigma$)
f_k	Componente do vetor gradiente da função energia potencial
\dot{E}_p	Derivada temporal da função energia potencial (dE_p/dt)
ζ	Ângulo formado entre o vetor gradiente e o vetor velocidade
$\dot{\sigma}_k$	Derivada temporal de σ_k ($d\sigma_k/dt = \omega_k$)
\dot{f}_k	Derivada temporal de f_k (df_k/dt)
ω_k	Defasagem da velocidade angular entre as máquinas i e j
$\dot{\omega}_k$	Derivada temporal de ω_k ($d\omega_k/dt$)
W	Vetor defasagem da velocidade angular entre os pares de máquinas do sistema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Revisão Bibliográfica	26
1.2	Motivação e Proposta da Tese	30
1.3	Objetivos do Trabalho	31
1.4	Organização do Trabalho	32
2	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	34
2.1	Introdução	34
2.2	Equação da Rede	34
2.3	Máquina Síncrona	37
2.3.1	Equações Eletromagnéticas	38
2.3.2	Equação de Oscilação	39
2.4	Sistema Multimáquinas	41
2.5	Conclusões	46
3	ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	47
3.1	Estabilidade	47
3.2	Estabilidade Transitória	48
3.3	Análise de Estabilidade Transitória de SEE	49
3.4	Análise de Estabilidade Transitória Através da Função Energia	50
4	INCLUSÃO DE DISPOSITIVOS FACTS NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS	53
4.1	Introdução	53
4.2	FACTS	53
4.2.1	Modelo Dinâmico do SVC	54
4.2.2	Modelo Dinâmico do TCSC	55

4.3	Inclusão de um TCSC em Sistemas Multimáquinas	56
4.4	Inclusão de um SVC no Sistema Multimáquinas	59
4.5	Fator de Efeito	62
4.6	Inclusão de Múltiplos Dispositivos FACTS em Sistemas Multimáquinas	63
4.7	Conclusões	65
5	CONTROLE DE SEE EM REGIME TRANSITÓRIO POR MEIO DE DISPOSITIVOS FACTS	66
5.1	Introdução	66
5.2	Modelagem dos Múltiplos Dispositivos FACTS na Energia Transitória no Sistema Multimáquinas	66
5.3	Análise Transitória da Energia Potencial	69
5.4	Controle Coordenado de Múltiplos Dispositivos FACTS	70
5.4.1	Lei de Controle (LC01)	70
5.4.2	Lei de Controle (LC02)	73
5.4.3	Lei de Controle (LC03)	75
5.5	Conclusões	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6.1	Sistema Kundur: 4 Máquinas e 11 Barras	78
6.1.1	Simulação do Sistema Kundur	79
6.2	Sistema IEEE: 5 Máquinas e 14 Barras	85
6.2.1	Curto-Circuito na Barra 02.	88
6.2.2	Curto-Circuitos: Barra 04 e Barra 05	92
6.3	Sistema New England: 10 Máquinas e 39 Barras	94
6.3.1	Curto-Circuito na Barra 01	95
6.3.2	Curto-Circuito nas outras Barras de Geração	98
7	CONCLUSÃO	107

REFERÊNCIAS	110
ANEXO A - DADOS DO SISTEMA KUNDUR	115
ANEXO B - DADOS DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS	117
ANEXO C - DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND	120

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros Sistemas de Energia Elétrica (SEE), também denominados de sistemas elétricos de potência, operavam de forma isolada, transmitindo energia elétrica para os centros regionais mais "próximos" de sua geração. Com o desenvolvimento industrial aumentou-se o consumo de energia elétrica e por consequência, a necessidade da construção de mais usinas elétricas que em geral se localizam "longe" dos centros consumidores e então os sistemas elétricos passam a assumir dimensões cada vez maiores e com grande complexidade.

O uso crescente dos recursos de transmissão de energia elétrica aliado à necessidade de alto investimento econômico para ampliação física do setor e as cada vez mais fortes restrições de ordem ambiental, tem mostrado ser necessária a exploração de novas tecnologias para maximizar a utilização dos sistemas de transmissão já existentes, mantendo ao mesmo tempo níveis seguros e estáveis de operação do sistema elétrico de potência (TORTELLI, 2010).

Com isso os desafios das empresas do setor elétrico para produzir e fornecer energia elétrica de forma segura e eficiente para seus consumidores são cada vez maiores. Pois os Sistemas de Energia Elétrica devem atender a demanda dos consumidores com qualidade e confiabilidade, traduzidos em adequados níveis de tensão e frequência, assim como minimização de interrupções do fornecimento, mediante operação com equilíbrio e margens de segurança que propiciem a absorção de eventuais perturbações, sejam variações normais de carga (pequenas perturbações) sejam os grandes impactos como os curtos-circuitos, por exemplo.

Já diziam Vittal et al. (1988), que nos campos de operações e planejamento do sistema de energia elétrica, o aumento do consumo de energia provocaria necessidade de desenvolvimento de ferramentas analíticas sofisticadas para medir precisamente a capacidade do sistema e exibir estas informações em tempo real para os operadores.

Neste sentido têm evoluído os trabalhos desenvolvidos nesta linha de pesquisa com abordagens de análise de estabilidade dinâmica e transitória e também no ajuste de parâmetros para a estabilidade do sistema. Têm-se tratado os SEE representados por diversos níveis de detalhamento de modelos, desde o modelo linearizado de Heffron-Philips para análise de estabilidade dinâmica até o modelo de Park de sexta ordem representando fenômenos subtransitórios para análise de estabilidade transitória e mesmo além, considerando efeitos de saturação e outros.

Os problemas relativos à flexibilização dos sistemas de energia elétrica eram solucionados com a utilização de equipamentos tradicionais como, por exemplo, controladores de potência e compensadores de reativos. Tais equipamentos se caracterizavam pela utilização de capacitores

e indutores – componentes passivos – chaveados mecanicamente. Com o avanço da eletrônica de potência no início dos anos setenta surgiram os tiristores e os controladores começaram a ser chaveados eletronicamente.

Os avanços tecnológicos alcançados nos últimos anos pela eletrônica de potência possibilitaram o desenvolvimento de dispositivos que permitem não apenas compensar a linha de transmissão dotando-a de maior capacidade, mas também por meio de controle rápido efetuar variações da compensação de modo a favorecer a estabilidade do sistema. Estes dispositivos proporcionam uma nova característica ao sistema que muito apropriadamente é qualificada como flexibilidade e assim foram designados como FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) (SONG; JOHNS, 1999).

Dispositivos de controle e compensação têm sido considerados, desde o Regulador Automático de Tensão, presente em trabalhos já tidos como clássicos e são ainda hoje importantes como matéria de pesquisa, até os recentemente introduzidos controladores FACTS que vêm se apresentando como importantes recursos para a estabilização de SEE.

A inclusão destes dispositivos na rede de energia elétrica ganha importância na medida em que o aumento do consumo da energia é mais acelerado que os investimentos nos setores de geração e transmissão. Estes equipamentos proporcionam maior flexibilidade de operação, fornecendo mais opções aos operadores do sistema de energia e ajudam a aumentar os limites de operação do sistema (CHATTERJEE; GHOSH, 2007a).

Estes equipamentos são pesquisados com dois objetivos principais: aumentar a capacidade de transmissão de potência das redes de energia elétrica e controlar o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão (WATANABE et al., 1998).

Os compensadores controlados eletronicamente, via tiristores, como o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) e o SVC (*Static Var Compensator*) são considerados como pertencentes à primeira geração dos dispositivos FACTS. O Controlador de Fluxo de Potência Unificado (UPFC - *Unified Power Flow Controller*) e o Compensador Estático de Reativos (STATCOM - *Static Compensator*) e seu equivalente série, o SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) são considerados pertencentes à segunda geração de controladores FACTS.

Há praticamente um consenso de que os dispositivos FACTS são os substitutos ideais para as soluções convencionais baseadas em tecnologia eletromecânica que, em termos operativos, apresentam tempos de resposta mais lentos além de terem manutenção mais custosa quando comparadas com a tecnologia eletrônica (IEEE/CIGRE, ; TORTELLI, 2010).

Há algumas décadas, muitas ideias sobre o conceito FACTS foram formuladas e com o grande avanço na área de eletrônica de potência possibilitaram o desenvolvimento de conversores ligados ao lado da alta tensão da rede elétrica, com atuação tanto em regime permanente como em regime transitório, permitindo que o sistema elétrico de potência seja eletronicamente

controlável (TORTELLI, 2010).

Os controladores FACTS atuam também na melhoria da produtividade por meio de uma distribuição adequada de cargas entre os geradores, na redução do fluxo de potência reativa e no auxílio da estabilidade atuando sobre o amortecimento das oscilações transitórias (SILVA, 2010; HAQUE, 2006).

Para sistemas de energia de grandes dimensões, mais de um compensador pode ser necessário para atingir o desempenho desejado. Portanto, o conhecimento prévio sobre o efeito da aplicação simultânea de mais do que um dispositivo FACTS em locais diferentes de um sistema é necessário (CHATTERJEE; GHOSH, 2007b).

A inclusão de dispositivos FACTS em SEE introduz maior grau de liberdade para a operação do sistema, pois possibilitam ajustes independentes de algumas variáveis do sistema, que normalmente não são controláveis, permitindo maior controle sobre o fluxo de potência e magnitude de tensão (GALIANA et al., 1996).

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre a compensação e controle coordenado de múltiplos dispositivos FACTS com vistas à estabilidade transitória em sistemas multimáquinas, considerando especificamente os efeitos da compensação dos dispositivos em derivação (SVC) e em série (TCSC).

Observa-se que não há relatos na literatura especializada do uso de controle coordenado de múltiplos dispositivos FACS considerando seus coeficientes de efeitos, sendo essa uma das contribuições relevantes deste trabalho.

1.1 Revisão Bibliográfica

Esta seção tem como objetivo descrever os estudos que tratam da estabilidade dos SEE na presença dos dispositivos FACTS.

Os estudos do desempenho dos SEE, sob atuação de dispositivos FACTS, têm aumentado nos últimos anos, encontrando-se na literatura especializada um número considerável de trabalhos (SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 2000). Apresentam-se em seguida alguns desses trabalhos desenvolvidos.

Song e Johns (1999) mostram, por meio do método de áreas iguais, os benefícios trazidos à margem de segurança para estabilidade transitória de cada um dos dispositivos FACTS: Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), Static Var Compensator (SVC) e Phase Shifter Transformer (PS). Tais benefícios foram observados em sistemas Máquina versus Barra Infinita (MBI) e em sistemas de duas máquinas. Já Festrants (2002) mostra que tais dispositivos contribuem para a estabilização dos SEE usando o método de Lyapunov sendo que esse estudo se

aplica ao sistema MBI.

Em Colvara, Festrants e Araujo (2003), os autores enfatizam que os dispositivos FACTS aumentam a capacidade de transmissão do sistema elétrico de potência em condições estáticas ou dinâmicas. Em particular, é mostrado, por meio da função energia, que os dispositivos TCSC e SVC afetam o desempenho dinâmico (pequenas perturbações) e transitório do sistema de potência.

Em estudos recentes são abordados a localização e contribuição do SVC na melhoria da estabilidade do sistema multimáquinas com vistas à primeira oscilação. Haque (2006) evidencia a contribuição adicional da compensação de reativos na função energia empregando métodos que consideram o contorno da superfície da energia potencial na primeira oscilação, proporcionando acréscimo nos valores da energia crítica.

No trabalho de Colvara e Marques (2009), os autores analisam o desempenho dinâmico e transitório de um SEE multimáquinas por meio do estudo das interações entre máquinas do sistema quando são afetadas pela atuação de um SVC, mostrando que a ação do SVC exerce um efeito sobre a admitância de transferência entre as máquinas do sistema, que pode ser avaliado por meio dos coeficientes de eficácia e fator de efeito (COLVARA; MARQUES, 2009). Com isso pode-se determinar quais pares de máquinas são mais ou menos afetados pela atuação do SVC localizado em determinada barra do sistema e assim escolher a melhor localização para instalação de SVC com vistas à eliminação/mitigação de problemas de estabilidade entre máquinas e/ou áreas dos SEE.

Haque (2005) usou o método da função energia transitória para analisar a estabilidade de um sistema de potência multimáquinas considerando os efeitos do SVC cujo controle tinha o objetivo de maximizar o limite de estabilidade na primeira oscilação.

Em Yanjuan e Linchuan (2011), os autores usam uma estratégia de controle discreto de um TCSC inserido no sistema multimáquinas por meio da função energia transitória e os resultados mostram que o controle discreto do TCSC aumenta significativamente a capacidade de transferência de potência na linha de transmissão, em comparação com modelos convencionais de controle do TCSC.

Em pesquisas recentes, estudaram-se os efeitos dos dispositivos FACTS na melhoria da estabilidade transitória, utilizando sinais remotos com o auxílio da tecnologia Phasor Measurement Units (PMU's) (SKOK; IVANKOVIC; CERINA, 2007). Esta tecnologia é utilizada para medir em tempo real sinais remotos e assim transferi-los para a entrada do controlador FACTS, tais como a variação angular, velocidade angular dos geradores (NGUYEN; HERTEM; DRIESEN, 2010; CVETKOVIC; ILIC, 2011; VARMA; AUDDY, 2006; TABRIZI; RADMAN, 2010).

Nguyen, Hertem e Driesen (2010), concluíram em seu trabalho que sinais remotos, tais

como a velocidade angular dos geradores, são mais eficazes que os sinais locais quando utilizados como entrada do estabilizador suplementar, visando melhoria da estabilidade transitória.

Cvetkovic e Ilic (2011) afirmam que a combinação da tecnologia FACTS e PMU tem grande potencial para estabilizar grandes perturbações nos SEE, a combinação de ambas as tecnologias resultam em uma poderosa e quase real detecção e controle, muito próximo do tempo real, capaz de monitorar e contrabalancear grandes perturbações.

Colvara (2005) mostra uma formulação para a energia transitória de Sistemas de Potências incluindo a ação do TCSC. Mostra também que o dispositivo atua na composição do torque sincronizante elevando a barreira da energia potencial. Os resultados encontrados são válidos tanto para pequenas perturbações em sistemas de uma máquina como para análise de grandes impactos em sistemas multimáquinas.

Miotto e Covacic (2010) apresentam a análise do comportamento dinâmico de um sistema multimáquinas com a presença do dispositivo TCSC em conjunto com os controladores adicionais (POD - *Power Oscillation Damper*) e Estabilizadores de Sistemas de Potência (PSS - *Power System Stabilizers*), através de técnica de controle clássico de compensação de fase no domínio da frequência. Concluíram que a instalação simultânea de dispositivos TCSC / POD e PSS resultou em melhorias consideráveis no amortecimento das oscilações eletromecânicas tanto de modos locais como interárea.

O trabalho de Silva (2010) identifica a contribuição do TCSC na composição do torque de sincronização de SEE multimáquinas com vista à análise de estabilidade transitória, focando na admitância de transferência entre máquinas. A exemplo de Colvara e Marques (2009), esse trabalho também mostrou que o TCSC exerce um efeito sobre a admitância de transferência entre as máquinas do sistema e que pode ser avaliado por meio dos coeficientes de eficácia e fator de efeito. Tais coeficientes poderão ser utilizados em análise que visam a melhor localização de dispositivos de compensação série em linhas de transmissão, com o objetivo de eliminar ou mitigar efeitos de perturbações entre máquinas ou áreas do sistema, além de auxiliar no ajuste de controle do dispositivo.

Peraro (2010) abordou o problema da estabilidade transitória de Sistemas Elétricos de Potência sob o ponto de vista da capacidade de sincronização intermáquinas e mostrou que o transformador de relação de transformação variável (PS - *Phase Shift*), quando inserido entre duas barras de um sistema multimáquinas pode influenciar na capacidade de sincronização intermáquinas e interárea. Nesse trabalho foi analisada a influência da ação do PS sobre as admitâncias de transferência entre os pares de máquinas por meio do Coeficiente de Eficácia, que indica a participação efetiva das variações da relação de transformação do PS sobre a admitância de transferência entre cada par de máquina do sistema multimáquinas, e do Fator de Efeito que indica a variação de admitância de transferência comparada com a admitância original.

O trabalho de Martins (2012) considera a inclusão do dispositivo FACTS SVC no sistema multimáquinas e faz uma análise da estabilidade transitória do sistema considerando seus efeitos sobre a capacidade de sincronização entre as máquinas, com base nos estudos preliminares dos coeficientes de eficácia e fator de efeito, provenientes de Marques (2009) e Colvara e Marques (2009). A contribuição do SVC fica evidenciada no estudo de estabilidade por meio das curvas equipotenciais de função energia do sistema representada pelo contorno da superfície da energia potencial em torno do ponto de equilíbrio estável.

Capellette (2012) analisa a influência do dispositivo FACTS TCSC na função energia potencial do sistema multimáquinas e mostra que a compensação dinâmica do TCSC afeta a trajetória do sistema frente a uma grande perturbação, visando à melhoria da estabilidade transitória do sistema. A análise dos efeitos da atuação do TCSC sobre a capacidade de sincronização entre as máquinas foi feita com base nos estudos preliminares dos coeficientes de eficácia e fator efeito, provenientes de (COLVARA; MARQUES, 2009).

Minussi e Filho (1998) desenvolveram uma metodologia de análise e controle de estabilidade transitória de SEE por meio da margem de sensibilidade, expressa como uma função de energia total que pode ser interpretada como uma distância relativa à condição de instabilidade do sistema.

Uma análise da estabilidade transitória de um SEE foi proposta no trabalho de Ferreira (2005) utilizando-se de um método que combina algoritmos baseados na integração numérica das equações que descrevem o comportamento dinâmico de um SEE com critério das áreas iguais. Neste método reduz-se o sistema multimáquinas a um modelo equivalente MBI. A avaliação da estabilidade transitória é determinada por meio de índices de detecção de instabilidade ou estabilidade e as margens de estabilidade transitória são calculadas aplicando o critério de áreas iguais do sistema equivalente.

Nguyen, Nguyen e Karimishad (2011) apresentam um método de análise de estabilidade transitória e otimização das entradas de referência dos dispositivos FACTS na melhoria da estabilidade. Este método baseia-se na análise de sensibilidade no domínio do tempo e são usados multiplicadores de Lagrange para representar o conjunto de restrições de desigualdades de estabilidade e o método de Newton para cálculo do fluxo de potência ótimo.

Sobre a alocação e operação de dispositivos FACTS do tipo SVC e TCSC, Aghaei, Giti-zadet e Kaji (2012) apresentam um método baseado em programação quadrática sequencial. Este método apresenta uma formulação para determinar a margem de segurança do sistema de energia na presença dos dispositivos FACTS e a influência destes dispositivos.

Tang et al. (2012) utilizam um método de controle robusto para controlar um SVC e um TCSC em um sistema de potência. A estratégia de controle robusto é simulada por um *software* em um sistema de quatro máquinas e os resultados mostram que essa estratégia pode melhorar

a estabilidade de pequenas perturbações do sistema de energia elétrica.

Tortelli (2010) apresenta um estudo relativo ao problema de alocação, operação e a análise de desempenho de controladores FACTS em sistemas elétricos de potência. É apresentada uma rotina computacional para o cálculo do fluxo de potência baseada no método de Newton-Raphson incluindo a representação de diversos controladores FACTS, sendo o problema da alocação dos dispositivos tratado por técnicas de algoritmos genéticos e a otimização dos parâmetros dos controladores, por meio do método do Gradiente Reduzido.

Siqueira (2012) utiliza a função de energia generalizada de controle para síntese de leis de controle estabilizantes para dispositivos TCSC, considerando as perdas na modelagem do sistema.

1.2 Motivação e Proposta da Tese

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) devem atender a demanda dos consumidores com qualidade e confiabilidade, traduzidos em adequados níveis de tensão e de frequência, assim como a minimização de interrupções do fornecimento, mediante operação com equilíbrio e margens de segurança que propiciem a absorção de eventuais perturbações, sejam variações normais de carga (pequenas perturbações) sejam os grandes impactos como os curtos-circuitos.

As perturbações decorrentes dos impactos provenientes dos ajustes ocorridos em operação considerada normal do sistema são tratadas nos chamados estudos de estabilidade de pequenas perturbações e as contingências de maior impacto são tratadas sob o título de estudos de estabilidade transitória. Em ambos os casos, muitos têm sido os avanços de pesquisa seja na abordagem pela proposição de novas técnicas, seja pela evolução tecnológica de novos equipamentos incorporados aos sistemas que implicam também na necessidade de desenvolvimento de técnicas de projeto (ajustes de parâmetros) e análise de desempenho. Neste sentido, tem evoluído o trabalho desenvolvido nesta linha de Pesquisa com abordagens de análise de estabilidade de pequenas perturbações e transitória e também no ajuste de parâmetros para a estabilidade do sistema.

As diversas funções associadas aos dispositivos FACTS no sentido de aumentar o grau de controlabilidade do sistema elétrico têm despertado interesse na utilização eficiente desta tecnologia.

Assim, para que essas várias funcionalidades possam ser usadas ao mesmo tempo em um SEE, torna-se necessário aprimorar as ferramentas computacionais usadas na análise de estabilidade dos SEE com a inclusão de um controle coordenado de múltiplos dispositivos FACTS.

A resposta a essa questão envolve basicamente dois interesses principais. Um de natureza econômica, que não é objeto deste trabalho e outro associado a aspectos de estabilidade do

sistema elétrico, que é o assunto de interesse deste trabalho.

O controle de dispositivos FACTS numa rede de transmissão tem despertado interesse de muitos pesquisadores. No entanto, muitos deles focam numa variedade limitada de compensadores restringindo-se a apenas uma tecnologia em particular.

Os efeitos da atuação dos dispositivos FACTS podem ser verificados por meio da admitância de transferência entre as máquinas com base em estudos preliminares provenientes de Colvara e Marques (2009) e Silva (2010), sobre os coeficientes de eficácia e fator de efeito desses dispositivos.

Segundo Martins (2012), a influência da compensação em derivação no estudo de estabilidade transitória em SEE fica evidente quando sua participação é visualizada no retrato das curvas equipotenciais da função energia em justaposição com a trajetória do sistema. Estas curvas representam os contornos da superfície da energia potencial em torno de um ponto de equilíbrio estável. Capelletto (2012) faz a mesma análise com o FACTS TCSC.

Percebe-se que a estabilidade transitória está diretamente relacionada com a capacidade de sincronização, a qual depende da admitância de transferência entre as máquinas que por sua vez são influenciadas pela variação da susceptância do SVC e pela variação da reatância do TCSC.

Neste trabalho, considera-se a inclusão de múltiplos dispositivos FACTS em um sistema multimáquinas, para a análise do problema de estabilidade transitória, considerando os efeitos da atuação do SVC e do TCSC sobre a capacidade de sincronização entre as máquinas.

Tendo em vista o exposto, a presente proposta é concentrada na modelagem e na aplicação de um controle coordenado entre os múltiplos dispositivos FACTS com vista à estabilidade transitória de SEE, supondo implicitamente a operação adequada do sistema de telemidas fasoriais online (PMU - Phasor Measurement Unit).

As análises realizadas neste trabalho visam examinar o sincronismo das máquinas durante a primeira oscilação, que ocorre nos primeiros instantes após uma contingência e a análise do tempo crítico de eliminação de um curto-circuito será tomada como parâmetro de avaliação da margem de estabilidade.

1.3 **Objetivos do Trabalho**

O objetivo deste trabalho é estabelecer um controle coordenado de múltiplos dispositivos FACTS com vistas à estabilidade transitória, no sentido de que se pode direcionar a trajetória natural do sistema quando o mesmo evolui no sentido de energia crescente como nos instantes iniciais após a eliminação de um curto-circuito, para o ponto de maior energia potencial, minimizando o ângulo entre o vetor gradiente da energia potencial e a derivada temporal da trajetória

do sistema, ou, equivalentemente, maximizando a derivada temporal da energia potencial.

Para alcançar os objetivos propostos no trabalho, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a participação efetiva dos dispositivos FACTS na admitância de transferência entre as máquinas por meio dos coeficientes de eficácia;
- Definir os dispositivos a serem alocados na rede elétrica, com maior influência sobre a admitância de transferência entre as máquinas usando as informações extraídas do fator de efeito;
- Determinar os efeitos desses dispositivos na energia potencial do sistema, e analisar seu desempenho mediante a alteração que ele provoca na energia potencial;
- Avaliar as máquinas (tomadas em pares) sobre as quais uma ação de controle pode ser mais efetiva diante de um determinado transitório;
- Estabelecer uma ação de controle para cada dispositivo FACTS;
- Com base na energia potencial, desenvolver controle coordenado para os múltiplos dispositivos FACTS a fim de que a trajetória do sistema assuma direção de subida.

1.4 Organização do Trabalho

Os demais Capítulos deste trabalho estão organizados da seguinte forma:

O Capítulo 2, **Sistema Elétrico de Potência**, trata da representação do sistema multimáquinas, pois é nesse ambiente que os múltiplos dispositivos FACTS serão inseridos. Será apresentada a equação de oscilação que representa as unidades geradoras, enquanto que as unidades consumidoras são dadas pelo modelo de cargas com impedância constante. A representação da rede é feita, convenientemente, pela matriz admitância de barra.

No Capítulo 3, **Estabilidade de Sistemas de Energia Elétrica**, serão abordados conceitos de estabilidade de sistemas elétricos de potência e métodos de análise de estabilidade transitória com vistas ao sincronismo entre as máquinas do sistema.

No Capítulo 4, **Inclusão de Dispositivos FACTS no sistema multimáquinas**, apresenta-se um modelo simplificado do SVC e do TCSC e em seguida os dispositivos são inseridos no sistema multimáquinas de modo que a redução para as barras internas dos geradores do sistema mantenha os efeitos da ação dos dispositivos por meio dos coeficientes de eficácia e fator de efeito. A inclusão dos múltiplos dispositivos será estabelecida por meio de uma função das variações de cada dispositivo inserido no sistema.

No Capítulo 5, **Controle de SEE em Regime Transitório por Meio de Dispositivos FACTS**, será desenvolvido o equacionamento da influência dos múltiplos dispositivos FACTS na energia transitória do sistema multimáquinas e uma análise dessa influência é apresentada por meio da função energia transitória. Será apresentado o desenvolvimento de três leis de controle coordenado dos múltiplos dispositivos.

No Capítulo 6, **Simulações e Resultados**, serão apresentados resultados de simulações sobre a influência dos múltiplos dispositivos FACTS na estabilidade transitória de sistemas multimáquinas. Serão usados três sistemas testes: o Sistema "Kundur" composto por 4 máquinas e 11 barras, o Sistema "IEEE 14 barras" composto por 5 máquinas e 14 barras e o Sistema "New England" composto por 10 máquinas e 39 barras.

No Capítulo 7, apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Para finalizar, apresentam-se, nesta ordem, as referências bibliográficas, um apêndice com a relação dos artigos desenvolvidos durante a pesquisa e os anexos referentes aos dados dos sistemas elétricos usados nas simulações deste trabalho.

2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

2.1 Introdução

Um Sistema Elétrico de Potência, cuja finalidade é fornecer energia elétrica aos seus consumidores, constitui-se basicamente de unidades geradoras, linhas de transmissão e cargas. As linhas de transmissão fazem a conexão entre as unidades geradoras e as cargas (STEVENSON, 1986).

Este capítulo dedica-se a representação do sistema elétrico de potência, apresentando o equacionamento relativo ao fluxo de potência, tendo como abordagem principal a modelagem da equação de oscilação das máquinas geradoras do sistema. A rede elétrica do sistema multi-máquinas será representada por matriz admitância de barras de modo a facilitar a inclusão dos dispositivos FACTS. Como neste trabalho há um interesse em reduzir a matriz admitância da rede, as cargas serão descritas como admitâncias constantes.

2.2 Equação da Rede

Considera-se como hipótese que as linhas de transmissão são modeladas via parâmetros concentrados (modelo π) e são desconsideradas as indutâncias mútuas.

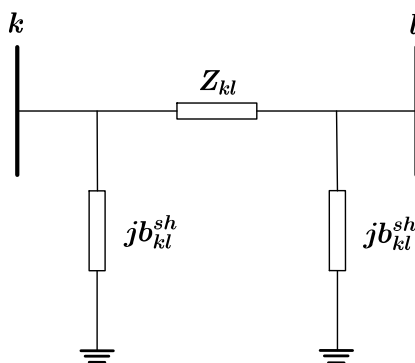
Geralmente, na análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência, considera-se que a rede elétrica opera em regime permanente senoidal e admite-se que os elementos passivos do circuito (resistores, indutores e capacitores) sejam constantes (ELGERD, 1976). Assim, para o estudo de estabilidade angular, as dinâmicas da rede são negligenciadas e segundo Kundur (1994), sua representação pode ser feita pela matriz admitância de barras.

O modelo empregado para representar as linhas de transmissão será o modelo π de modo a permitir a construção e utilização da matriz admitância de barras.

Inicialmente considera-se uma linha de transmissão genérica $k - l$, conforme Figura 1 (MONTICELLI, 1983).

Na Figura 1 é apresentado o modelo π de uma linha de transmissão entre duas barras, k e l , onde Z_{kl} representa a impedância série e b_{kl}^{sh} a susceptância shunt da linha $k - l$. A impedância série pode ser dada por:

$$Z_{kl} = r_{kl} + jx_{kl}, \quad (1)$$

Figura 1 - Modelo π da linha de transmissão.

Fonte: Monticelli (1983).

sendo r_{kl} e x_{kl} a resistência e a reatância da linha $k-l$, respectivamente.

A admitância é dada por:

$$y_{kl} = \frac{1}{Z_{kl}} = g_{kl} + jb_{kl}, \quad (2)$$

sendo g_{kl} e b_{kl} a condutância e a susceptância da linha $k-l$, respectivamente. A condutância e a susceptância podem ser calculadas da seguinte forma:

$$g_{kl} = \frac{r_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \quad b_{kl} = -\frac{x_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2}. \quad (3)$$

A linha de transmissão ilustrada na Figura 1 será representada pela matriz admitância de barras \mathbf{Y} , conforme expressão (4):

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} (g_{kl} + jb_{kl}) + jb_{kl}^{sh} & -(g_{kl} + jb_{kl}) \\ -(g_{kl} + jb_{kl}) & (g_{kl} + jb_{kl}) + jb_{kl}^{sh} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Para o cálculo do fluxo de potência ativa e reativa da linha de transmissão $k-l$, considera-se a Figura 2 sendo que as correntes elétricas fasoriais \bar{I}_{kl} e \bar{I}_{lk} são expressas por Monticelli (1983), como segue:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{kl} \\ \bar{I}_{lk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (g_{kl} + jb_{kl}) + jb_{kl}^{sh} & -(g_{kl} + jb_{kl}) \\ -(g_{kl} + jb_{kl}) & (g_{kl} + jb_{kl}) + jb_{kl}^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_k \\ \bar{V}_l \end{bmatrix}, \quad (5)$$

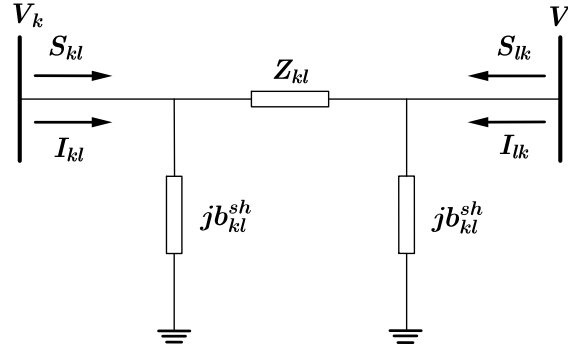
sendo que \bar{V}_k e \bar{V}_l são as tensões fasoriais das barras k e l , respectivamente, dadas por:

$$\bar{V}_k \triangleq V_k \angle \theta_k = V_k e^{j\theta_k} \quad \bar{V}_l \triangleq V_l \angle \theta_l = V_l e^{j\theta_l} \quad (6)$$

que são a magnitude e o ângulo do fasor tensão da barra k são V_k e θ_k , respectivamente.

A potência complexa é definida como $\bar{S} = \mathbf{V}^T \mathbf{I}^*$, sendo que \mathbf{V} é o vetor tensão de barras e \mathbf{I} o vetor injeção de corrente das barras, logo a potência da linha de transmissão $k-l$ pode ser

Figura 2 - Modelo π da linha de transmissão com convensão adotada para o cálculo de fluxo de potência.



Fonte: Monticelli (1983).

escrita da forma:

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{kl} \\ \bar{S}_{lk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k e^{j\theta_k} & 0 \\ 0 & V_l e^{j\theta_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (g_{kl} - jb_{kl}) - jb_{kl}^{sh} & -(g_{kl} - jb_{kl}) \\ -(g_{kl} - jb_{kl}) & (g_{kl} - jb_{kl}) - jb_{kl}^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k e^{-j\theta_k} \\ V_l e^{-j\theta_l} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

A equação (7) pode ser escrita na forma complexa:

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{kl} \\ \bar{S}_{lk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{kl} \\ P_{lk} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} Q_{kl} \\ Q_{lk} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

sendo que,

$$\begin{bmatrix} P_{kl} \\ P_{lk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{kl} V_k^2 - g_{kl} V_k V_l \cos(\theta_{kl}) - b_{kl} V_k V_l \sin(\theta_{kl}) \\ g_{kl} V_l^2 - g_{kl} V_k V_l \cos(\theta_{kl}) + b_{kl} V_k V_l \sin(\theta_{kl}) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{kl} \\ Q_{lk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(b_{kl} + b_{kl}^{sh}) V_k^2 + b_{kl} V_k V_l \cos(\theta_{kl}) - g_{kl} V_k V_l \sin(\theta_{kl}) \\ -(b_{kl} + b_{kl}^{sh}) V_l^2 + b_{kl} V_k V_l \cos(\theta_{kl}) + g_{kl} V_k V_l \sin(\theta_{kl}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

e $\theta_{kl} = \theta_k - \theta_l$.

As equações (9) e (10) expressam, respectivamente, o fluxo de potência ativa e fluxo de potência reativa na linha de transmissão.

Considerando um sistema formado por m barras, a injeção de potência nas barras pode ser calculada com a generalização da equação (7). De modo que,

$$\bar{\mathbf{S}} = \text{diag}(\mathbf{V})(\mathbf{Y}_{bus} \mathbf{V})^*, \quad (11)$$

sendo que, $\text{diag}(V)$ é uma matriz diagonal formada pelas tensões nas barras e \mathbf{Y} é a matriz admitância de barras do sistema:

$$\mathbf{Y} = [Y_{kl}], \quad \text{com } k, l = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

de modo que

$$\begin{cases} Y_{kl} = -y_{kl}, & \text{para } k \neq l, \\ Y_{kk} = jb_k^{sh} + \sum_{k \in \Omega_k} (jb_{kl}^{sh} + y_{kl}) \end{cases} \quad (13)$$

em que, Ω_k é o conjunto composto pelas barras vizinhas à barra k , b_k^{sh} é a susceptância shunt da barra k e b_{kl}^{sh} é a susceptância shunt da linha $k-l$.

Assim, a injeção de potência complexa \bar{S}_k em uma barra genérica k pode ser calculada da seguinte forma:

$$\bar{S}_k = \bar{V}_k \left(\sum_{l=1}^m Y_{kl} \bar{V}_l \right)^* = V_k e^{j\theta_k} \sum_{l=1}^m (G_{kl} - jB_{kl}) V_l e^{-j\theta_l}. \quad (14)$$

Desenvolvendo a equação (14), tem-se:

$$\bar{S}_k = V_k \sum_{l=1}^m \{V_l [G_{kl} \cos(\theta_{kl}) + B_{kl} \sin(\theta_{kl})] + jV_l [G_{kl} \sin(\theta_{kl}) - B_{kl} \cos(\theta_{kl})]\}. \quad (15)$$

Logo, a injeção de potência ativa e reativa na barra genérica k são, respectivamente:

$$P_k = V_k \sum_{l=1}^m \{V_l [G_{kl} \cos(\theta_{kl}) + B_{kl} \sin(\theta_{kl})]\} \quad (16)$$

e

$$Q_k = V_k \sum_{l=1}^m \{V_l [G_{kl} \sin(\theta_{kl}) - B_{kl} \cos(\theta_{kl})]\}. \quad (17)$$

Reescrevendo (16) e (17), tem-se:

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^m \{V_l [G_{kl} \cos(\theta_{kl}) + B_{kl} \sin(\theta_{kl})]\} \quad (18)$$

e

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^m \{V_l [G_{kl} \sin(\theta_{kl}) - B_{kl} \cos(\theta_{kl})]\}. \quad (19)$$

Nesta seção foi apresentado o cálculo dos fluxos de potência nas linhas de transmissão e das injeções de potência nas barras de um sistema elétrico de potência. Para mais detalhes, vide (MONTICELLI, 1983).

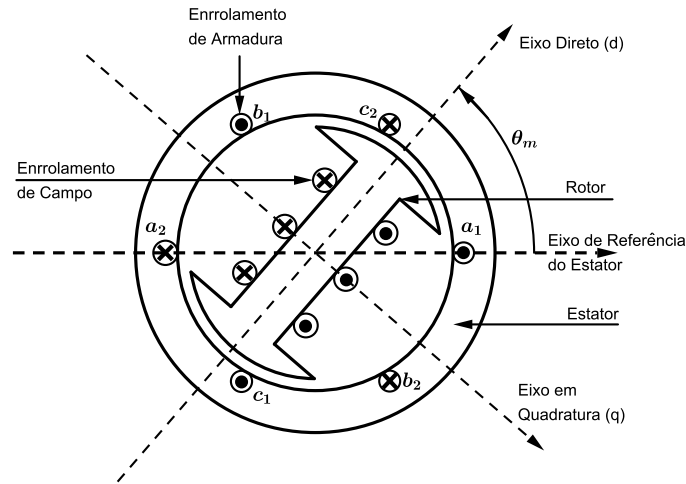
2.3 Máquina Síncrona

Nesta seção será apresentado o modelo matemático da máquina síncrona a partir de suposições que estabelecem relações básicas entre seus elementos, caracterizando o comportamento

da máquina durante um determinado tipo de perturbação.

Considera-se uma máquina síncrona de dois polos, representada na Figura 3, formada por um conjunto de enrolamentos trifásico no estator e por enrolamentos de campo no rotor. Autores como Kundur (1994), Anderson e Fouad (1997), desenvolveram técnicas de aproximação reduzindo a máquina a modelos matemáticos simplificados.

Figura 3 - Diagrama esquemático de uma máquina síncrona trifásica.



Fonte: Kundur (1994).

2.3.1 Equações Eletromagnéticas

A seguir são apresentadas as equações algébricas e diferenciais referentes ao comportamento elétrico da máquina síncrona. A dedução desse conjunto de equações pode ser encontrada em (KUNDUR, 1994).

$$\dot{E}'_d = \frac{-1}{T'_{q0}} [E'_d + (x_q - x'_q) I_q] \quad (20)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d) I_d] \quad (21)$$

$$V_d = E'_d - r I_d + x'_q I_q \quad (22)$$

$$V_q = E'_q - r I_q + x'_d I_d \quad (23)$$

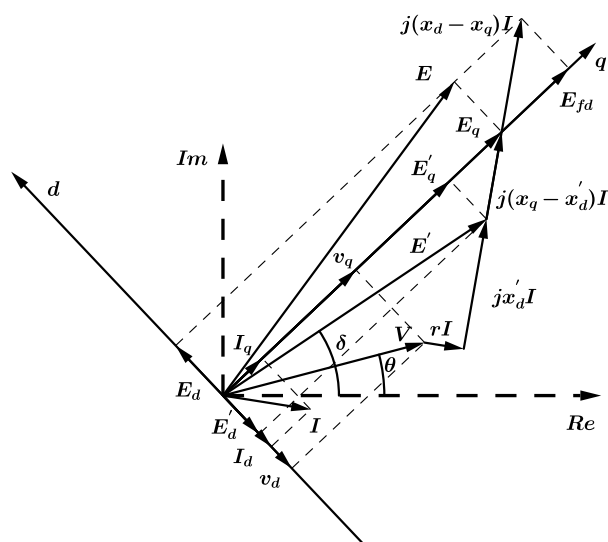
$$P_e = E'_q I_q + (x'_d - x'_q) I_d I_q. \quad (24)$$

O conjunto de equações (20–24) está representado para referência síncrona $d - q$, de modo que, E'_d e E'_q são os componentes da tensão interna da máquina síncrona; V_d e V_q , os componentes da tensão terminal da máquina síncrona; I_d e I_q , os componentes da corrente da máquina síncrona; E_{fd} é a tensão de campo da máquina; T'_{d0} e T'_{q0} são constantes de tempo de circuito

(estator) aberto transitório de eixo direto e em quadratura, respectivamente; x_d , x_q , x'_d e x'_q são as reatâncias síncronas e transitórias, respectivamente, na referência (d, q) e r é a resistência dos enrolamentos do estator da máquina síncrona. O símbolo " ' " sobre uma variável denota sua derivada temporal de primeira ordem.

As equações algébricas (22) e (23) traduzem as relações entre as grandezas fasoriais representadas na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama fasorial de uma máquina síncrona no período transitório.



Fonte: Mota (2006).

Na Figura 4 estão representados os eixos de referência do sistema (Re, Im) e os eixos de referência da máquina síncrona (d, q) . A transformação de coordenadas entre os dois eixos de referência é dada pelas equações matriciais (SAUER; PAI, 1998):

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta & -\text{cos} \delta \\ \text{cos} \delta & \text{sen} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Re} \\ F_{Im} \end{bmatrix} \quad (25)$$

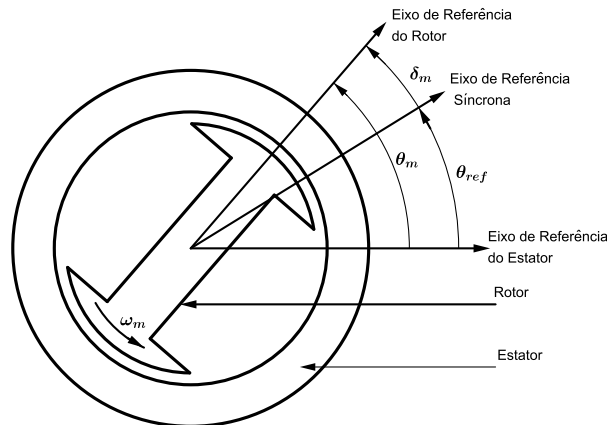
$$\begin{bmatrix} F_{Re} \\ F_{Im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta & \text{cos} \delta \\ -\text{cos} \delta & \text{sen} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} \quad (26)$$

onde F representa a variável fasorial.

2.3.2 Equação de Oscilação

Além das propriedades elétricas, a análise do comportamento dinâmico da máquina síncrona envolve propriedades mecânicas. Estas relações são caracterizadas pela conversão de energia mecânica em energia elétrica referente ao movimento rotacional da máquina. A Figura 5 mostra um modelo de máquina síncrona onde está estabelecido o sistema de referência.

Figura 5 - Sistema de referência síncrona.



Fonte: Kundur (1994).

A equação que descreve o movimento do rotor de uma máquina síncrona está baseada no princípio elementar da dinâmica que diz ser o torque de aceleração igual ao produto do momento de inércia do rotor pela sua aceleração angular (STEVENSON, 1986).

Conforme mostrado em Stevenson (1986), Kundur (1994), a aceleração do deslocamento angular do rotor da máquina, a partir do eixo de referência do estator, é igual à aceleração do deslocamento angular do rotor da máquina a partir do eixo de referência síncrona, ou seja, o sistema de referência girante é um sistema inercial para o qual são válidas as leis de Newton. A equação que descreve o comportamento de δ_m (ângulo do rotor da máquina em relação à referência síncrona), em função do tempo, é a mesma que descreve o comportamento de θ_m (ângulo do rotor da máquina em relação à referência do estator), em função do tempo.

Considerando a máquina funcionando como gerador, o torque mecânico que tem origem na fonte "primária", originado do fluxo d'água em hidrelétrica, por exemplo, atua no sentido de acelerar o rotor da máquina e o torque elétrico, gerado por meio do campo magnético, é responsável pela desaceleração do mesmo (ANDERSON; FOUAD, 1997).

Considere uma máquina i , de um sistema elétrico com n máquinas. O gerador recebe por meio do eixo da turbina a "entrada" mecânica, ou potência da turbina p_{m_i} , e fornece a "saída" elétrica, ou potência do gerador, p_{e_i} , à rede, por meio das barras deste sistema. Caso essas duas potências sejam iguais, isto é, desprezando as perdas relativamente insignificantes do gerador, o gerador funcionará com sua velocidade síncrona constante (ELGERD, 1976).

$$\dot{\delta} = \omega_i \quad (27)$$

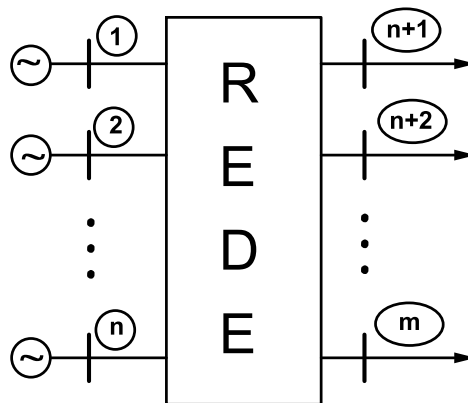
$$\ddot{\delta} = \frac{1}{M_i} [p_{m_i} - p_{e_i} - D_i \cdot \omega_i]. \quad (28)$$

As equações (27) e (28) modelam o comportamento dinâmico da máquina síncrona i do sistema multimáquinas, onde $\delta[rad]$ é a posição angular do rotor da máquina, $\omega[rad/s]$ é sua velocidade angular, $M[s^2]$ é a constante de inércia, $D[s]$ é a constante de amortecimento da máquina, $p_e[pu]$ é a potência elétrica e $p_m[pu]$ é a potência mecânica. Os símbolos "''" e "'''' sobre uma variável denotam sua derivada temporal de primeira e de segunda ordem, respectivamente.

2.4 Sistema Multimáquinas

Considera-se um sistema com n máquinas conectadas a uma rede de m barras, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Sistema Multimáquinas.

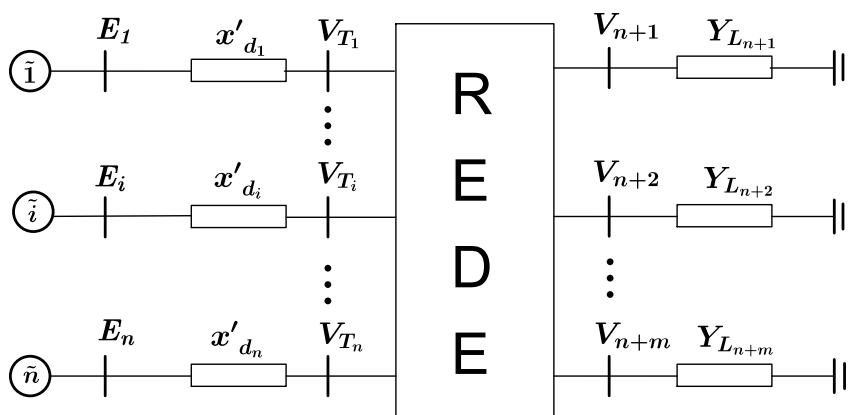


Fonte: Silva (2010).

De acordo com Anderson e Fouad (1997), as várias máquinas interligadas em um sistema exercem influência uma sobre as outras tornando complexa a realização do estudo de estabilidade. No entanto, considerações usadas no sistema MBI podem ser empregadas na análise de um sistema multimáquinas. Trata-se, portanto, do modelo clássico que consiste em considerar: potência mecânica constante, a rede operando em regime senoidal, a máquina síncrona representada pelo conjunto de equações (20) – (24), (27) e (28), ou seja, uma fonte de tensão em série com reatância transitória do eixo direto, as cargas consideradas admitâncias constantes e o ângulo do rotor coincidente com o ângulo da tensão interna atrás da reatância transitória.

Considerando as cargas como admitância constante e adicionando-se à rede as barras internas das máquinas, a rede aumentada será conforme a Figura 7:

Figura 7 - Sistema multimáquinas com carga e barras internas adicionadas à rede.



Fonte: Colvara (2005).

De acordo com Pai (1981), assume-se que a rede é composta por $m + n$ barras, onde as n primeiras barras são as barras onde os geradores estão conectados e as m barras restantes são barras onde as cargas estão conectadas.

Deste modo, a matriz admitância de barras da rede aumentada é uma matriz quadrada de ordem $m + n$. Acrescentando à rede de transmissão os nós internos dos geradores, como barras fictícias, matriz admitância aumentada é quadrada de ordem $m + 2n$ dada por:

$$\mathbf{Y}_{bus} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{gr} \\ \mathbf{Y}_{rg} & \mathbf{Y}_{rr} \end{bmatrix} \quad (29)$$

sendo que:

- a submatriz $[\mathbf{Y}_{gg}]$ é uma matriz diagonal quadrada de ordem n , cujos elementos da diagonal são as admitâncias transitórias dos geradores, dadas por:

$$y_k = -j \frac{1}{x'_{d_k}} \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (30)$$

- a submatriz $[\mathbf{Y}_{gr}] = [\mathbf{Y}_{rg}]^T$ é uma matriz $n \times (m + n)$ dada por: $[\mathbf{Y}_{gr}] = \begin{bmatrix} -\mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$;
- a submatriz $[\mathbf{Y}_{rr}]$ é uma matriz quadrada de ordem $m + n$, cujos elementos são as admitâncias da rede aumentada, sem as barras fictícias, somadas com as admitâncias constantes y_l .

As admitâncias constantes y_l são expressas pela equação:

$$y_l = \frac{P_l - jQ_l}{V^2} \quad (31)$$

sendo que a expressão $P_l - jQ_l$ representa o conjugado da potência de carga e V , o módulo do fasor tensão \vec{V} , no barramento k .

As submatrizes da matriz \mathbf{Y}_{bus} podem ser determinadas através da relação estabelecida na equação (13).

Sabe-se que as injeções de corrente nas barras são dadas pela equação matricial:

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} \quad (32)$$

sendo que:

- $\mathbf{I} \rightarrow$ vetor injeção de corrente de barra;
- $\mathbf{V} \rightarrow$ vetor de tensão de barra;
- $\mathbf{Y} \rightarrow$ matriz admitância de barra descrita pela equação (29).

Como as cargas foram inseridas como admitâncias constantes na matriz admitância, a injeção de corrente em todas as barras é igual a zero, exceto naquelas barras fictícias que estão conectadas às f.e.m. dos geradores (ANDERSON; FOUAD, 1997).

Portanto, a equação (32) pode ser reescrita da forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{gr} \\ \mathbf{Y}_{rg} & \mathbf{Y}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

sendo \mathbf{I}_g , o vetor injeção de corrente dos geradores (barras fictícias), \mathbf{V} e \mathbf{E} o vetor fasor tensão das barras da rede aumentada e das barras fictícias, respectivamente. O fasor tensão $\vec{E} = E \angle \delta$ na barra fictícia corresponde a tensão interna da máquina síncrona inserida na barra.

Manipulando algebricamente a equação (33) obtém-se:

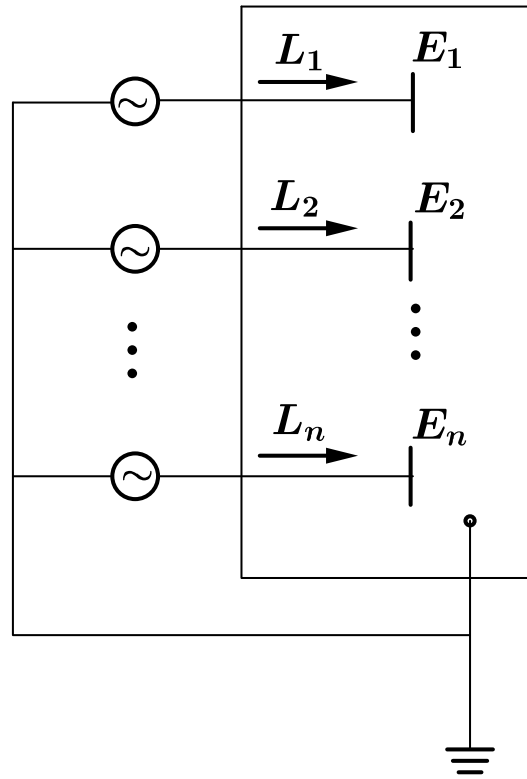
$$[\mathbf{I}_g] = [\mathbf{Y}_{Red}] \cdot [\mathbf{E}], \quad (34)$$

sendo que $[\mathbf{Y}_{gg}]$ é a matriz de admitância de transferência reduzida às barras internas do representado pela Figura 8, definida por:

$$[\mathbf{Y}_{Red}] = [\mathbf{Y}_{gg}] - [\mathbf{Y}_{gr}] \cdot [\mathbf{Y}_{rr}]^{-1} \cdot [\mathbf{Y}_{gr}]^T. \quad (35)$$

A equação (33) representa o sistema multimáquinas reduzido aos nós internos das máquinas conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 - Sistema reduzido aos nós internos das máquinas síncronas.



Fonte: Martins (2012).

A redução de ordem da equação matricial aos nós internos dos geradores permite obter expressões analíticas simples para o cálculo da potência elétrica produzida por cada máquina (FERREIRA, 2005; ANDERSON; FOUAD, 1997). Assim, a partir da equação (34) determina-se o valor da potência ativa P_{e_i} produzida pela máquina síncrona i . Para isto, basta proceder de forma análoga ao desenvolvimento da equação (11) (ANDERSON; FOUAD, 1997). Assim:

$$P_{e_i} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)], \quad (36)$$

sendo que:

- $E_i \rightarrow$ módulo da força eletromatriz da máquina i ;
- $\delta_i \rightarrow$ posição angular do rotor da máquina síncrona i medida em relação ao eixo que gira à velocidade síncrona;
- $G_{ij} \rightarrow$ condutância de transferência entre os barramentos i e j ;
- $G_{ii} \rightarrow$ condutância própria do barramento i ;

- $B_{ij} \rightarrow$ susceptância de transferência entre os barramentos i e j .

Destaca-se que G_{ij} , G_{ii} e B_{ij} são elementos da matriz admitância reduzida às barras internas das máquinas do sistema \mathbf{Y}_{Red} .

O comportamento dinâmico eletromecânico da i -ésima máquina é dado por:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i, \quad (37)$$

$$\ddot{\delta}_i = \frac{1}{M_i} [p_{m_i} - p_{e_i} - D_i \cdot \omega_i], \quad (38)$$

com $i = 1, 2, \dots, n$.

Substituindo a equação (36) na equação (38), obtêm-se as equações dinâmicas eletromecânicas do sistema multimáquinas:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i, \quad (39)$$

$$\ddot{\delta}_i = \frac{1}{M_i} \left\{ p_{m_i} - E_i^2 G_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] - D_i \cdot \omega_i \right\}, \quad (40)$$

com $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Desconsiderando o efeito dos amortecimentos mecânicos presente na equação (40), obtém-se:

$$\ddot{\delta}_i = \frac{1}{M_i} \left\{ p_{m_i} - E_i^2 G_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})] \right\}, \quad (41)$$

sendo que $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, com $i, j = 1, 2, \dots, n$.

O sistema de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem, formado pelas equações (39) e (40) constitui o modelo matemático utilizado para a análise de estabilidade transitória.

Para se determinar se após a ocorrência de uma perturbação, o sistema permanecerá estável, é necessário analisar a evolução temporal dos desvios angulares.

A literatura especializada mostra que se estuda o sincronismo entre as máquinas através dos desvios angulares e estes podem ser medidos em relação à máquina de maior constante de inércia ou relativamente ao centro de inércia do sistema (*Center of Inertia* - COI) que é definido como a média dos ângulos de todos os geradores, ponderada pelas constantes de inércia das máquinas (SAUER; PAI, 1998; TAVORA; SMITH, 1971).

$$\delta_{CI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad \text{e} \quad \omega_{CI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (42)$$

sendo

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i.$$

Assim, definindo $\tilde{\theta}_i = \delta_i - \delta_{CI}$ e $\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_{CI}$, o sistema é descrito como:

$$\dot{\tilde{\theta}}_i = \tilde{\omega}_i, \quad (43)$$

$$\ddot{\tilde{\theta}}_i = \frac{1}{M_i} \left\{ p_{m_i} - E_i^2 G_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [C_{ij} \cos(\tilde{\theta}_{ij}) + D_{ij} \sin(\tilde{\theta}_{ij})] \right\}, \quad (44)$$

sendo $C_{ij} = E_i E_j G_{ij}$, $D_{ij} = E_i E_j B_{ij}$ e $\tilde{\theta}_{ij} = \tilde{\theta}_i - \tilde{\theta}_j$ com $i \neq j$ e $i, j = 1, 2, \dots, n$,

- $\tilde{\theta}_i \rightarrow$ ângulo rotórico referido ao centro inercial;
- $\tilde{\omega}_i \rightarrow$ velocidade angular referida ao centro inercial;
- $\tilde{\theta}_{ij} \rightarrow$ defasagem angular entre as máquinas i e j referida ao centro inercial.

Como os desvios angulares relativos ao centro de inércia do sistema são referidos aos desvios angulares das máquinas, constata-se que a aplicação do COI como referencial, equivale ao sistema em que uma máquina é tomada como referência.

2.5 Conclusões

Este capítulo foi dedicado à representação do sistema elétrico de potência, apresentando o equacionamento relativo ao fluxo de potência e a equação de oscilação que descreve o funcionamento das máquinas síncronas de um sistema multimáquinas. As considerações feitas neste capítulo são necessárias para aplicação do modelo de análise de estabilidade transitória desenvolvido nos próximos capítulos.

O comportamento das grandezas mecânicas da máquina síncrona, que aqui é compreendido como gerador, estão em função das grandezas elétricas, o qual é obtido a partir da equação de oscilação da máquina síncrona.

A matriz admitância de barra representa a rede elétrica do sistema multimáquinas e o desenvolvimento de sua redução para matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores foi apresentado porque nos capítulos posteriores será feita a análise da admitância de transferência entre duas máquinas genéricas por meio da matriz admitância de barra reduzida.

3 ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 Estabilidade

O termo estabilidade é definido como sendo a capacidade do sistema, para uma dada condição de operação inicial, de recuperar o estado de equilíbrio operacional após ter sido submetido a perturbações físicas, com todas suas grandezas dentro dos limites operacionais, de modo que praticamente todo sistema continue intacto (KUNDUR et al., 2004). São exemplos de perturbações: curtos-circuitos em linhas de transmissão, perda de componentes do sistema, variações normais de cargas, etc.

Devido a grande complexidade nos problemas de estabilidade de sistemas elétricos de potência, diferentes cenários são usados para sua análise. Para viabilizar a análise de estabilidade destes sistemas, os engenheiros classificam o problema de acordo com a natureza física e o tamanho da perturbação considerada, segundo as variáveis de interesse e, também, de acordo com o intervalo de tempo a que a estabilidade deva ser avaliada (SIQUEIRA, 2012).

A análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência está associada a três categorias: estabilidade angular do rotor, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência, que segundo Kundur et al. (2004), em qualquer situação, qualquer uma das formas de instabilidade acarreta sempre outras formas, mas este trabalho dará enfoque à estabilidade transitória relacionada a oscilação dos rotores das máquinas síncronas.

Estabilidade angular do rotor refere-se à capacidade das máquinas síncronas, de um sistema interligado, de permanecerem em sincronismo depois deste ter sido submetido a uma perturbação. A instabilidade pode resultar sob a forma de aumento das oscilações angulares de alguns geradores que conduz a perda de sincronismo com outros geradores.

O problema da estabilidade angular envolve o estudo das oscilações eletromecânicas do sistema de potência e o fator fundamental é a maneira como o torque eletromagnético de cada máquina síncrona varia de acordo com a variação dos ângulos rotores. A análise de estabilidade angular é dividida em estabilidade a pequenas perturbações e estabilidade transitória, que é a de grandes perturbações.

A análise de estabilidade de pequenas perturbações é feita por meio da linearização das equações do sistema em torno de um ponto de operação e a instabilidade pode resultar no aumento do ângulo do rotor (modo não oscilatório) devido a falta de sincronização do sistema ou do aumento das oscilações do ângulo rotor devido a falta de amortecimento.

A estabilidade de grandes perturbações ou estabilidade transitória (KUNDUR et al., 2004) diz respeito à capacidade do sistema de energia para manter o sincronismo quando submetido a uma perturbação grave, tal como um curto-circuito sobre uma linha de transmissão. A resposta do sistema resultante envolve grandes excursões dos ângulos rotores dos geradores e é influenciada pela relação não-linear de potência e ângulo.

3.2 Estabilidade Transitória

A estabilidade transitória está relacionada com a capacidade do sistema de energia de manter o sincronismo quando submetido a uma grave perturbação como, por exemplo, curto-circuito sobre uma linha de transmissão. O sistema é considerado instável quando ao menos uma de suas máquinas perde o sincronismo em relação às demais máquinas do sistema que se dá com a separação angular devido a insuficiente torque de sincronização, manifestada como instabilidade na primeira oscilação. No entanto, Kundur (1994), afirma que em grandes sistemas de potência, a instabilidade transitória pode ser resultado da sobreposição de modos de oscilação local e interárea ou da não-linearidade dos efeitos que afetam um único modo de oscilação, causando instabilidade para além da primeira oscilação.

O sistema de potência elétrica permanecerá indefinidamente em um ponto de operação estável, até que uma perturbação o remova desse estado. Quando isso ocorrer, será necessário verificar se o sistema se aproximará de um novo ponto de equilíbrio, ou seja, encontrará uma situação estável ou se tornará instável afastando-se indefinidamente de um possível ponto de operação (PAI, 1981).

Os fenômenos durante e após a ocorrência de uma grande e súbita perturbação em um sistema de potência são normalmente estudados e/ou analisados sob a denominação "estabilidade transitória" (PAI, 1981).

Em publicações como Sauer e Pai (1998), Fouad e Vittal (1992), encontram-se que as soluções para o regime durante a perturbação são tradicionalmente obtidas no domínio do tempo mediante simulação digital, o que significa a integração numérica das equações de estado do sistema a partir das condições iniciais dadas pelo regime permanente antes da perturbação. Da mesma forma, o movimento do sistema no período pós-falta é obtido pela integração numérica das equações do sistema a partir da condição inicial definida pelo estado do sistema no final do período da perturbação.

De acordo com Pai (1981), o intervalo de tempo sob estudo de estabilidade pode variar de uma fração de segundo, quando a estabilidade da primeira oscilação é determinada, até o período em torno de 10 segundos ou superior, nos casos em que a estabilidade para múltiplas oscilações deve ser examinada.

A caracterização da análise do comportamento dinâmico dos sistemas elétricos em condições de regime permanente e/ou em condições transitórias é feita através de modelos matemáticos. Dependendo do objetivo do trabalho, simplificações na modelagem são feitas.

3.3 Análise de Estabilidade Transitória de SEE

A análise da estabilidade transitória é importante na avaliação de sistemas de energia elétrica. Trata-se de um procedimento que avalia os efeitos das perturbações que causam grandes oscilações no sincronismo dos ângulos das máquinas síncronas, por exemplo, falhas do tipo curto-circuito. (PAI, 1981).

Análise de estabilidade transitória em sistemas de potência é considerada equivalente à análise de sincronismo entre as máquinas e não necessariamente de estabilidade do sistema no estrito sentido do termo (PAI, 1981). Em sistemas de potência diz-se que as máquinas estão em sincronismo se seus ângulos permanecerem oscilando juntos dentro de certos limites (SAUER; PAI, 1998).

Quando todas as máquinas do sistema aceleram (ou desaceleram) juntas, ou seja, quando as diferenças entre suas velocidades e ângulos de fase permanecem limitadas indefinidamente em valor aceitável após a eliminação do defeito, o sistema é considerado transitoriamente estável. Se uma máquina acelerar (desacelerar) mais do que as outras fazendo com que as diferenças entre os ângulos de fase se afastem definitivamente dos valores de equilíbrio, diz-se que o sistema é transitoriamente instável (ALBERTO; BRETAS, 2000). De acordo com Alberto e Bretas (2000), a análise de estabilidade transitória em sistemas de potência é uma análise de sincronismo entre as máquinas e pode ser feita por meios de métodos energéticos.

Com vistas ao sincronismo de um sistema de potência, consideram-se estudos de estabilidade de primeira oscilação e de múltiplas oscilações. A análise de estabilidade da primeira oscilação é considerada quando o estudo é feito durante um curto espaço de tempo, após uma perturbação, com o objetivo de identificar por meio das diferenças entre os ângulos de fase, o sincronismo, ou a perda dele, entre as máquinas do sistema. Neste caso, o intervalo de tempo considerado é uma fração de segundo, levando-se em conta apenas a dinâmica mecânica das máquinas descritas pelo chamado modelo clássico. A estabilidade de múltiplas oscilações é considerada quando o estudo é feito durante um 'longo' intervalo de tempo após uma perturbação.

Muitos avanços ocorreram na utilização de métodos diretos para a análise de estabilidade transitória em sistemas elétricos de potência, sendo que uma tendência bem estabelecida é a consideração da Função de Lyapunov com forma de energia transitória, conforme já previa Elgerd (1976). A função energia largamente empregada em diversas abordagens de análise de

estabilidade de sistemas de potência encontra-se formalmente estabelecida, considerando as máquinas representadas pelo chamado modelo clássico, segundo o qual somente a dinâmica mecânica é efetivamente considerada, sendo o sistema conservativo. A propriedade de conservação da energia ensejou os métodos de análise denominados diretos, que, desse ponto de vista (modelo clássico, sistema conservativo) produzem resultados de alta qualidade. Por outro lado, nos sistemas reais as máquinas têm outras dinâmicas além da mecânica, e por decorrência dessas dinâmicas, estes sistemas não são conservativos (BARBAZELLI, 2005).

A análise da estabilidade transitória do SEE pode ser feita por meio dos Métodos de Integração Numérica ou dos Métodos Diretos.

O Método de Integração Numérica é um método tradicional na literatura (PAI, 1981), que consiste na integração numérica no domínio do tempo das equações não-lineares que descrevem o SEE e seus resultados são reproduzidos em gráficos e analisados posteriormente por um analista (especialista da área).

Os Métodos Diretos são capazes de concluir sobre estabilidade transitória do SEE sem conhecer a solução das equações diferenciais que descrevem o sistema, podendo ser aplicados até mesmo em tempo real. A dificuldade desse método é a criação das funções auxiliares que permitam a análise da estabilidade, pois são de desenvolvimento não-trivial (ALBERTO; BRETAS, 2000; SAUER; PAI, 1998).

3.4 Análise de Estabilidade Transitória Através da Função Energia

A estabilidade transitória é observada quando ocorre um distúrbio significativo como, faltas no sistema de transmissão, variações rápidas de cargas, perda de unidades geradoras ou chaveamento de linhas de transmissão. O estudo de estabilidade transitória, devido a magnitude das perturbações consideradas, não permite procedimentos de linearização das equações algébricas e diferenciais não-lineares que envolvem o problema (STEVENSON, 1986). Sua análise pode ser feita por meio da solução de suas equações por meio de métodos numéricos conhecidos como métodos indiretos, ou por métodos de análise direta sem resolver realmente as equações diferenciais (ELGERD, 1976).

Os métodos diretos são capazes de realizar a avaliação da estabilidade on-line utilizando a configuração atual do sistema de energia, sem a necessidade do conhecimento da solução das equações diferenciais que envolvem o problema (CHIANG; CHU; CAULEY, 1995; BOSE, 1984) e, principalmente, sem a necessidade da intervenção de um analista. Baseiam-se fundamentalmente na agregação das informações sobre o desempenho dinâmico em uma função, dita Função de Lyapunov (PAI, 1981), e a questão da estabilidade/instabilidade do movimento do

sistema, que pode ser de grande dimensão, fica reduzida à verificação de condições sobre esta função e sua derivada temporal (PAI, 1981).

Na busca de metodologias alternativas para simulação numérica de métodos no domínio do tempo, foram propostos métodos diretos, cujo uso de funções de energia, ofereceu melhores possibilidades de análise de estabilidade transitória de sistemas de potências reais (PAI, 1981; FOUAD; VITTAL, 1992; ATHAY; PODMORE; VIRMANI, 1979).

Segundo Chiang, Chu e Cauley (1995), uma boa alternativa para a função de Lyapunov, são as funções de energias provenientes dos conceitos físicos relacionado a cada sistema. Para SEE, na maioria das vezes, a Função de Lyapunov considerada é a chamada energia transitória do sistema, que é composta pela energia cinética e pela energia potencial.

Grande parte dos métodos diretos criados para a análise da estabilidade de SEE foi baseada no Teorema de Lyapunov e definido por (PAI, 1981) como função de Lyapunov:

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 + \sum_{k=1}^m \int_0^{\sigma_k} f_k(\tau_k) d\tau_k. \quad (45)$$

sendo que: σ_k é a variação angular do par de máquinas $k = (i, j)$ em relação ao equilíbrio, f_k é o desvio do fluxo de potência entre o par de máquinas k , τ_k é a variável de integração e $V(x)$ é a função na variável x .

A rigor, a expressão (45) atende a definição de função de Lyapunov quando se desconsideram as condutâncias de transferência entre as máquinas do sistema, ou seja, $\alpha_{ij} = 0, \forall i, j$, sendo que α_{ij} é o complemento do ângulo de admitância de transferência entre os barramentos i e j .

A primeira parcela de $V(x)$ corresponde a energia cinética que é armazenada nos rotores das máquinas em função dos desvios das velocidades em relação ao valor de operação normal, ω_i .

A segunda parcela de $V(x)$ representa a energia potencial, denotada por E_p , que é armazenada em campos magnéticos, principalmente no sistema de transmissão e será dada em função dos desvios angulares dos pares de máquinas σ_k . Estas variáveis são responsáveis pelo torque $\bar{\mathbf{T}}$ que restaura (torque de restauração) o equilíbrio do sistema em torno do ponto de operação (PAI, 1981):

$$\bar{\mathbf{T}} = -\frac{\partial E_p}{\partial \delta} \quad (46)$$

O vetor representado possui (46) tem direção contrária ao vetor gradiente de E_p . Sabendo-se que o vetor gradiente é ortogonal às curvas equipotenciais da energia potencial e possui direção e sentido de máximo crescimento da função.

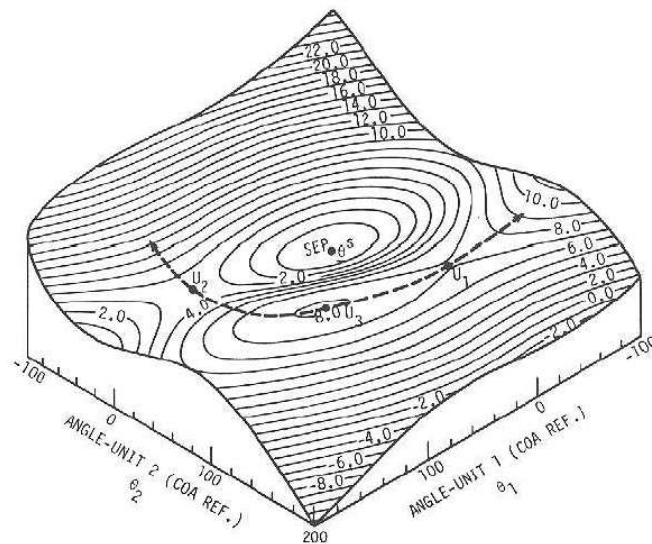
Neste trabalho, a estabilidade transitória será considerada em termos da função energia

transitória, sendo que a energia potencial é utilizada para estimar uma região de estabilidade em torno do ponto de operação estável.

Este critério consiste em determinar se, dada uma perturbação, o sistema tem ou não energia suficiente para ultrapassar a barreira de energia potencial na fronteira da região de torque restaurativo.

A análise da contribuição na estabilidade transitória proveniente dos múltiplos dispositivos será através do mapeamento da região de estabilidade definida no subespaço angular em torno do ponto de equilíbrio estável considerando a energia potencial do sistema, como ilustrado em (PAI, 1981).

Figura 9 - Sistema de três máquinas. Linhas equipotenciais de energia representada por linhas sólidas e contorno de superfície potencial, por linhas pontilhadas.



Fonte: Pai (1981).

Analisando o comportamento do sistema representado na Figura 9 observe-se que o ponto de equilíbrio estável (origem do espaço de estado) é o ponto de menor energia potencial da região de estabilidade caracterizada por um vale ou depressão energética que é circundada por uma cordilheira de elevações cujos picos estão contidos na linha pontilhada.

O sistema será considerado estável se sua trajetória não ultrapassar a cordilheira que circunda o vale energético.

Sabe-se que o tempo crítico de eliminação de uma falta no sistema corresponde ao máximo tempo de duração da falta sem implicar em instabilidade do SEE. Comparativamente com a Figura 9, seria o tempo de evolução da trajetória do sistema, imediatamente após uma falta, desde o ponto de equilíbrio estável (origem do sistema de coordenadas) até a cordilheira (linha pontilhada) que circunda o vale energético.

O tempo crítico de eliminação de um curto-circuito será usado como parâmetro de avaliação da margem de estabilidade do sistema.

Para aumentar a margem de estabilidade do sistema deseja-se aumentar a profundidade do vale energético para que a trajetória do sistema fique mais longa e idealmente, fazer com que a trajetória do sistema tome a direção de um ponto de máximo da cordilheira.

4 INCLUSÃO DE DISPOSITIVOS FACTS NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS

4.1 Introdução

Uma vez que um dos propósitos deste trabalho é estudar a estabilidade transitória de um sistema multimáquinas e de acordo com Machado (2003), a utilização de dispositivos FACTS pode aumentar a controlabilidade e a capacidade de transferência de potência de um sistema elétrico. Propõe-se um procedimento de inclusão de múltiplos dispositivos FACTS no sistema.

A capacidade de transferência de potência afeta a sincronização entre as máquinas de um sistema multimáquinas e esta capacidade, conforme descrito por Silva (2010), está diretamente relacionada às admitâncias de transferências entre as máquinas. Por esta razão, neste trabalho, a admitância de transferência entre as máquinas é associada à contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS.

Em estudos de estabilidade transitória, as admitâncias de transferência entre máquinas do sistema são definidas na matriz admitância de barras da rede reduzida às barras internas das máquinas, com as cargas incorporadas à matriz como admitâncias constantes (PAI, 1981).

Apresenta-se um procedimento segundo o qual a matriz reduzida final (Capítulo 2), embora contenha unicamente a representação das barras internas dos geradores, mantém em seus elementos a influência da ação de compensador(es) série instalado(s) em uma certa linha de transmissão da rede elétrica e/ou em compensador(es) em derivação instalado(s) em determinada(s) barra(s) dessa rede.

Portanto, este capítulo dedica-se à inclusão dos controladores FACTS, enfocando por ora o TCSC e o SVC, no sistema multimáquinas e seus efeitos sobre as admitâncias de transferência através dos coeficientes de eficácia e fator de efeito (SILVA, 2010; MARQUES, 2009). Apresenta uma modelagem de sua estrutura e a função de transferência que caracteriza seu desempenho dinâmico (SONG; JOHNS, 1999). Dedicar-se também ao desenvolvimento de um fator de contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS sobre as admitâncias de transferência entre as máquinas do sistema multimáquinas.

4.2 FACTS

A capacidade de transferência de potência dos sistemas elétricos é em grande parte restringida pelos limites de estabilidade (WATANABE et al., 1998). Estes limites podem ser

significativamente estendidos com o uso dos controladores FACTS devido ao grande avanço na eletrônica de alta potência. Hingorani (1988) em seu artigo (*Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems; IEEE, 1988*) definiu uma série de equipamentos que utilizam a eletrônica de potência e que permitem obter um sistema mais confiável, flexível e eficaz.

A realização de compensação de reativos tem sido largamente utilizada para aumentar a capacidade de transmissão (FURINI; ARAUJO, 2008). Em geral, a implantação dos controladores FACTS no SEE objetiva um controle rápido e contínuo de grandezas elétricas tais como impedância, tensão, corrente e ângulo fase. Observa-se também que o auxílio da compensação dinâmica de cada dispositivo pode trazer uma melhora significativa na estabilidade do sistema (HINGORANI; GYUGYI, 2000; MARTINS, 2012).

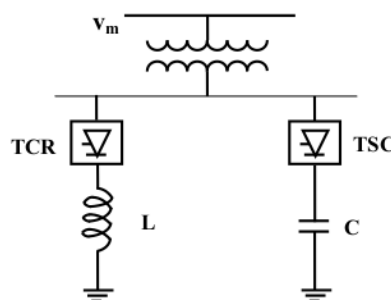
4.2.1 Modelo Dinâmico do SVC

Os primeiros SVCs foram utilizados no final da década de 1960 para a compensação reativa de grandes cargas industriais, tais como fornos a arcos e na redução de perdas energéticas no acionamento de motores de indução. No final da década de 1970, o SVC começou a ser aplicado em sistemas de transmissão com o propósito de melhorar o controle dinâmico de tensão resultando na melhoria da capacidade de transmissão (LERCH; POVH; XU, 1991). Começou a ser comercializado em 1974 pela GE (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Os controladores estáticos de reativos (SVC) são usados estrategicamente em grandes sistemas de transmissão com elevadas distâncias das unidades geradoras para melhorar a estabilidade do sistema (PADIYAR; IMMANUEL, 1994).

A configuração mais comum de um compensador estático de reativos é constituída por um reator controlado a tiristores (TCR - *Thyristor-Controlled Reactor*) ligado em paralelo com um banco de capacitores chaveado por tiristores (TSC - *Thyristor-Switched Capacitor*), como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema básico de um SVC.



Fonte: Song e Johns (1999).

Através de uma coordenação adequada do chaveamento dos capacitores e do controle do reator, a potência reativa injetada ou absorvida pelo SVC na barra em que é conectado pode ser variada continuamente para o controle da tensão, em condições normais de operação, bem como em condições de perturbações ou contingências (SONG; JOHNS, 1999; MARTINS, 2012).

Para o estudo de estabilidade transitória, o modelo dinâmico do SVC será representado por uma função de transferência de primeira ordem similar aos modelos existentes na maioria dos programas de estabilidade (IEEE, 1994):

$$\Delta B_{svc}(s) = \frac{K_{svc}}{1 + s.T_{svc}} u(s). \quad (47)$$

A variação da susceptância do SVC ΔB_{svc} depende do ganho K_{svc} , da constante de tempo T_{svc} que representa o atraso do circuito de disparo dos tiristores, geralmente este muito pequeno (WANG, 2000), e do sinal de entrada u que será definido pelas leis de controle.

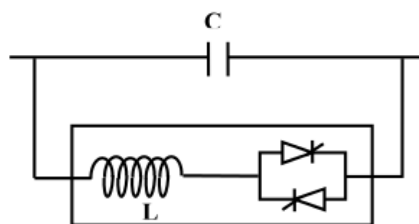
4.2.2 Modelo Dinâmico do TCSC

Os controladores FACTS são ferramentas importantes para melhor aproveitamento dos SEE existentes. O uso desses controladores aumenta a flexibilidade de operação do sistema, fornecendo mais opções aos operadores das redes de energia (CHATTERJEE; GHOSH, 2007a).

Para Chatterjee e Ghosh (2007a), o uso dos controladores FACTS TCSC ajuda controlar e aumentar o fluxo de energia através de uma linha de transmissão. No entanto, outro aspecto importante destes controladores é a sua utilização durante grandes perturbações devido à sua capacidade para melhorar a condição de estabilidade transitória de um sistema de energia (PADDIYAR; RAO, 1995).

A configuração mais comum de um TCSC consiste em um banco de capacitores em série com a linha de transmissão, em paralelo com um banco de reatores controlados a tiristores (TCR - *Thyristor-Controlled Reactor*), como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Esquema básico de um TCSC.



Fonte: Song e Johns (1999).

O TCSC é um controlador que é instalado em série com a linha de transmissão, com-

pensando parte de sua reatância indutiva e inserindo uma reatância capacitiva, ou seja, este equipamento cancela parte da linha, tornando-a "virtualmente" mais curta (SONG; JOHNS, 1999).

Para o estudo de estabilidade transitória, o modelo dinâmico do TCSC será representado por uma função de transferência de primeira ordem (SONG; JOHNS, 1999):

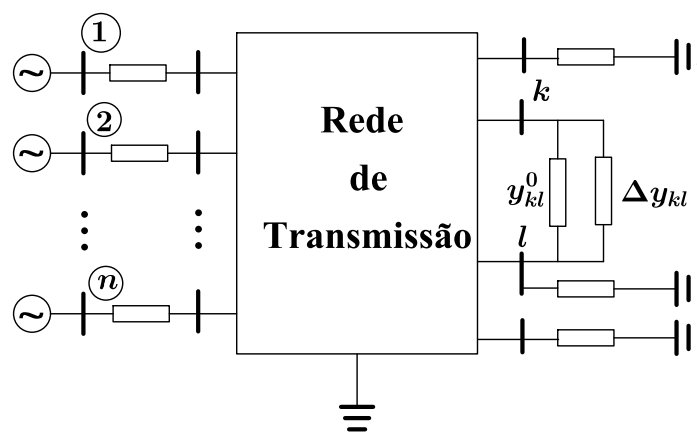
$$\Delta X_{csc}(s) = \frac{K_{csc}}{1 + s.T_{csc}} u(s). \quad (48)$$

A variação da reatância do TCSC ΔX_{csc} depende do ganho K_{csc} , da constante de tempo T_{csc} que representa o atraso do circuito de disparo dos tiristores e do sinal de entrada u que será definido pelas leis de controle.

4.3 Inclusão de um TCSC em Sistemas Multimáquinas

De estudos anteriores desenvolvidos por Silva e Colvara (2009), percebe-se que a energia potencial de um sistema de energia elétrica sofre influência direta da admitância de transferência entre as máquinas do sistema, que por sua vez, são afetadas pela ação do dispositivo TCSC. Assim, considera-se um dispositivo TCSC instalado em uma linha genérica $k - l$, da rede e posteriormente far-se-á a redução da rede às barras internas dos geradores como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Sistema Multimáquinas com um TCSC instalado entre as barras k e l na forma de admitância.



Fonte: Colvara (2005).

Incluindo as barras fictícias, observa-se que a rede tem $2n + m$ barras, de modo que a matriz admitância que a representa tem dimensão $2n + m$.

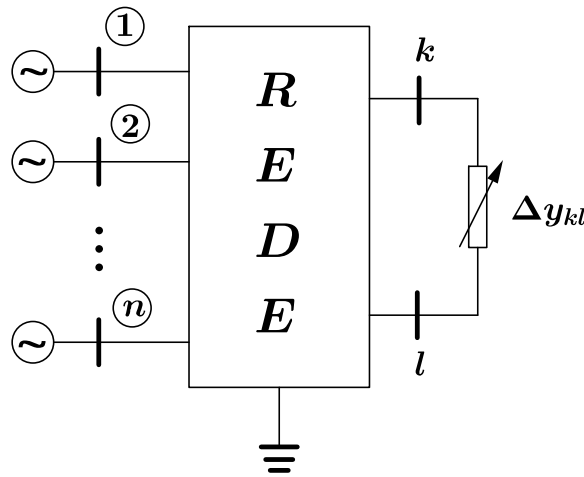
A admitância da linha de transmissão $k-l$ afetada pela ação do TCSC é dada por

$$y_{kl} = y_{kl}^0 + \Delta y_{csc} \quad (49)$$

sendo que, y_{kl}^0 representa o valor da admitância da linha $k-l$ sem compensação e Δy_{csc} , as variações impostas pelo compensador série.

Uma vez que este capítulo objetiva a análise dos efeitos causados pela ação dos dispositivos FACTS nas interações entre máquinas do sistema, deve-se reduzir o sistema às barras internas dos geradores, fazendo-se inicialmente a redução para as barras de interesse que são compostas pelas barras internas dos geradores acrescidas das barras entre as quais o TCSC encontra-se instalado, conforme Figura 13.

Figura 13 - Sistema Multimáquinas reduzido às barras internas dos geradores e terminais da linha compensada.



Fonte: Silva (2010).

Partindo da matriz admitância aumentada correspondente à rede representada pela Figura 12, obtém-se a matriz admitância da rede reduzida às barras de interesse Silva e Colvara (2009):

$$\mathbf{Y}_{red}^{int} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{g,csc} \\ \mathbf{Y}_{csc,g} & \mathbf{Y}_{csc,csc} \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} \quad (50)$$

sendo que a submatriz \mathbf{Y}_{gg} é uma matriz quadrada de ordem n , $\mathbf{Y}_{g,csc}$ é uma submatriz de ordem $n \times 2$ e $\mathbf{Y}_{csc,g}$ é sua transposta.

A submatriz $\mathbf{Y}_{csc,csc}$ é uma matriz quadrada de ordem 2 dada por:

$$\mathbf{Y}_{csc,csc} = \begin{bmatrix} y_{kk}^0 + \Delta y_{kl} & y_{kl}^0 - \Delta y_{kl} \\ y_{kl}^0 - \Delta y_{kl} & y_{ll}^0 + \Delta y_{kl} \end{bmatrix} \quad (51)$$

A matriz admitância \mathbf{Y}_{red} referente ao sistema reduzido às barras internas dos geradores

considerando a atuação do TCSC, fazendo-se a redução de ordem da matriz da equação (50) para uma matriz de ordem n é dada por (SILVA; COLVARA, 2009):

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{g,csc} \mathbf{Y}_{csc,csc}^{-1} \mathbf{Y}_{csc,g} \quad (52)$$

que pode ser reescrita como:

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_{gg}^{red0} + \Delta \mathbf{Y}_{csc} \quad (53)$$

sendo que $\Delta \mathbf{Y}_{csc}$ corresponde a matriz das variações da admitância devido a ação do TCSC.

A matriz \mathbf{Y}_{gg}^{red0} é a matriz de rede reduzida às barras internas dos geradores para a condição de regime permanente, ou seja, esta matriz representa a rede reduzida sem a atuação de controle do TCSC. Logo, seus elementos são admitâncias complexas constantes de magnitude Y_{ij}^0 e ângulo Θ_{ij}^0 .

Silva e Colvara (2009), Silva (2010) mostram que os elementos da matriz $\Delta \mathbf{Y}_{csc}$ dependem unicamente de Δy_{kl} . Portanto as variações de admitância de transferência entre as máquinas i e j e a admitância própria das barras da rede são afetadas pelas variações do TCSC, e esta relação pode ser representada por intermédio do coeficiente de sensibilidade dado por (SILVA; COLVARA, 2009; SILVA, 2010):

$$\bar{K}_{cscij} = \left. \frac{d\Delta \mathbf{Y}_{cscij}}{d(\Delta x_{csc})} \right|_{\Delta x_{csc}=0} \quad (54)$$

que é uma grandeza complexa composta de magnitude K_{cscij} e ângulo φ_{cscij} como segue na equação (55).

$$\bar{K}_{cscij} = K_{cscij} \angle \varphi_{cscij}. \quad (55)$$

Tanto a magnitude quanto o ângulo do coeficiente de sensibilidade são constantes, pois vêm de um procedimento algébrico envolvendo valores fixos (admitância de transferência da rede e compensação fixa do TCSC), logo as variações de admitância de transferência Δy_{ij} dependem diretamente das variações da reatância do TCSC ΔX_{csc} e ocorrem sobre a inclinação de coeficiente de sensibilidade no plano complexo das admitância, conforme mostra a Figura 14.

As variações de admitância de transferência entre as máquinas i e j são dadas por (SILVA, 2010):

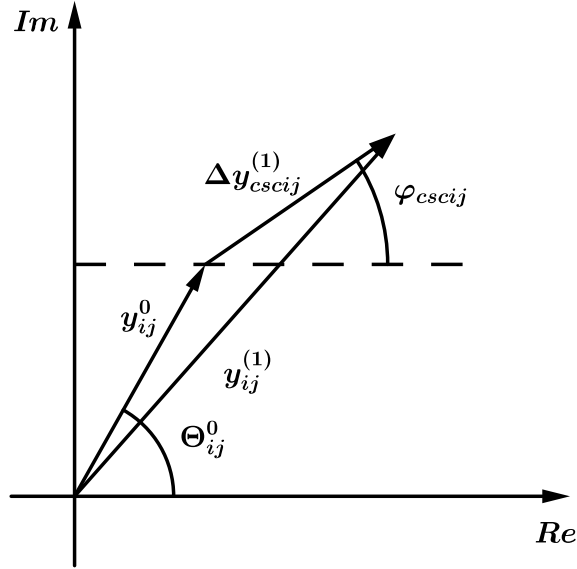
$$\Delta y_{cscij} = \bar{K}_{cscij} \Delta X_{csc}. \quad (56)$$

Definindo a variação efetiva da magnitude da admitância de transferência entre as máquinas i e j por (SILVA; COLVARA, 2009):

$$\Delta y_{cscij}^{ef} = K_{cscij}^{ef} \Delta X_{csc}. \quad (57)$$

De modo que o termo K_{cscij}^{ef} é definido como coeficiente de eficácia do TCSC e expressa a

Figura 14 - Variação da admitância de transferência entre as máquinas devida as variações de reatância dos TCSC.



Fonte: Marques (2009).

eficácia da ação do TCSC sobre a magnitude da admitância de transferência entre as máquinas i e j é dado pela equação (58) (SILVA; COLVARA, 2009).

$$K_{cscij}^{ef} = K_{cscij} \cos(\Theta_{ij}^0 - \varphi_{cscij}). \quad (58)$$

Este coeficiente expressa a participação efetiva do dispositivo TCSC na admitância de transferência entre duas máquinas genéricas do sistema multimáquinas, e este dado é de extrema importância, pois mesmo em uma rede de grande complexidade é possível analisar a eficácia do dispositivo na mesma (SILVA; COLVARA, 2009; SILVA, 2010).

Assim, a admitância de transferência entre as máquinas i e j pode ser escrita a partir da equação (57), sendo y_{ij}^0 a admitância correspondente à condição de regime permanente e δy_{cscij} as variações impostas pela ação do TCSC (SILVA; COLVARA, 2009; SILVA, 2010). De modo que:

$$y_{ij} = y_{ij}^0 + \Delta y_{cscij} = \left(Y_{ij}^0 + \Delta y_{cscij}^{ef} \right) \angle \left(\Theta_{ij}^0 + \Delta \Theta_{cscij} \right) \quad (59)$$

sendo

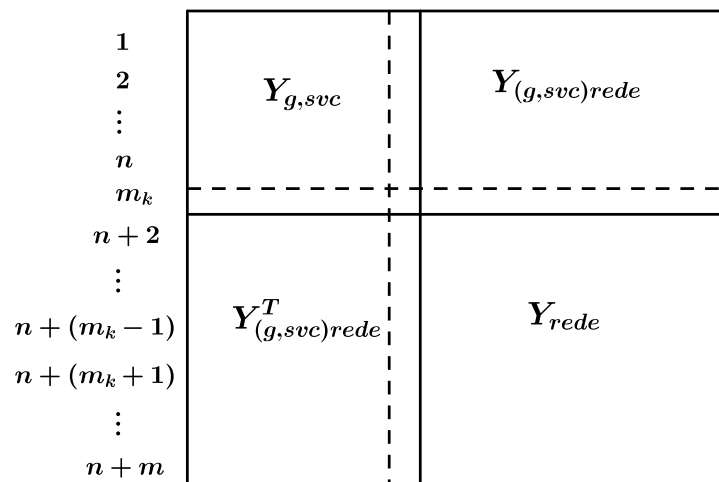
$$\Delta \Theta_{cscij} = \arctan \left[\frac{K_{cscij} \Delta X_{csc} \operatorname{sen}(\varphi_{cscij} - \Theta_{ij}^0)}{Y_{ij}^0 + K_{cscij} \Delta X_{csc} \cos(\varphi_{cscij} - \Theta_{ij}^0)} \right]. \quad (60)$$

Observa-se que tanto a magnitude (57) quanto o ângulo (60) das variações de admitância de transferência entre as máquinas i e j dependem exclusivamente das variações da reatância do TCSC ΔX_{csc} .

4.4 Inclusão de um SVC no Sistema Multimáquinas

Esta seção será baseada em estudos desenvolvidos por (COLVARA; MARQUES, 2009; MARQUES, 2009). Assim, considera-se um SVC alocado em uma barra genérica m_k de um sistema multimáquinas composto por n máquinas e m barras. A matriz admitância aumentada de dimensão $m + n$ será apresentada de tal forma que a $(n + 1)$ -ésima linha e coluna são correspondentes ao nó m_k que representa a barra de alocação do SVC conforme Figura 15.

Figura 15 - Matriz admitância adicionada o SVC.



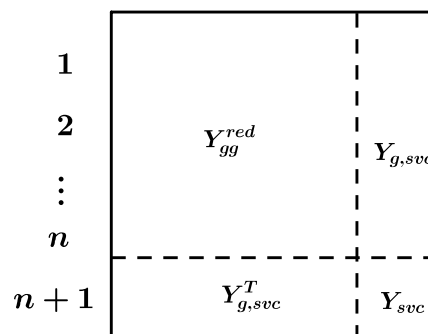
Fonte: Marques (2009).

Conforme seção 4.3, faz-se a redução da matriz admitância aumentada para matriz admitância reduzida às barras de interesse \mathbf{Y}_{red}^{int} de ordem $n + 1$ dada por (MARQUES, 2009):

$$\mathbf{Y}_{red}^{int} = \mathbf{Y}_{g,svc} - \mathbf{Y}_{(g,svc)rede} \mathbf{Y}_{rede}^{-1} \mathbf{Y}_{rede(g,svc)}. \quad (61)$$

A matriz da equação (61) pode ser representada pela Figura 16.

Figura 16 - Matriz admitância reduzida às barras de interesse.



Fonte: Colvara e Marques (2009).

O elemento \mathbf{Y}_{svc} é a admitância própria da barra onde o SVC está instalado, o vetor $\mathbf{Y}_{g,svc}$ tem dimensão n .

Como a admitância equivalente do SVC foi incorporada à rede, a corrente que circula na barra é interna à rede. Portanto, a injeção de corrente na respectiva barra é nula, de modo que a matriz reduzida às barras internas dos geradores é dada por (COLVARA; MARQUES, 2009):

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_{g,svc}^{red} - \mathbf{Y}_{g,svc} \mathbf{Y}_{svc}^{-1} \mathbf{Y}_{svc,g}. \quad (62)$$

A matriz reduzida às barras internas dos geradores da equação (62) pode ser dada por:

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_{red}^0 + \Delta \mathbf{Y}_{svc} \quad (63)$$

sendo

$$\mathbf{Y}_{red}^0 = \left[\mathbf{Y}_{gg}^{red} + \Delta \mathbf{Y}_{svc}^0 \right] \quad (64)$$

com

$$\Delta \mathbf{Y}_{svc}^0 = -\mathbf{Z}_{svc}^0 \left[\mathbf{Y}_{g,svc} \mathbf{Y}_{g,svc}^T \right]. \quad (65)$$

Destaca-se que \mathbf{Y}_{red}^0 é a matriz admitância de barra da rede reduzida às barras internas dos geradores, incorporando a admitância equivalente do SVC em regime permanente e a variação da matriz admitância $\Delta \mathbf{Y}_{svc}$ é dada pela parcela de admitância variante.

Colvara e Marques (2009), Marques (2009) mostram que as variações das admitâncias de transferência entre as máquinas do sistema dependem unicamente das variações da susceptância do SVC ΔB_{svc} . Portanto as variações de admitância de transferência entre as máquinas i e j e a admitância própria das barras da rede são afetadas pelas variações do SVC, e esta relação pode ser representada por intermédio do coeficiente de sensibilidade dado por (COLVARA; MARQUES, 2009; MARQUES, 2009):

$$\bar{K}_{svcij} = j \frac{y_{g,svc_i} y_{g,svc_j}}{(y_{svc}^0)^2} \quad (66)$$

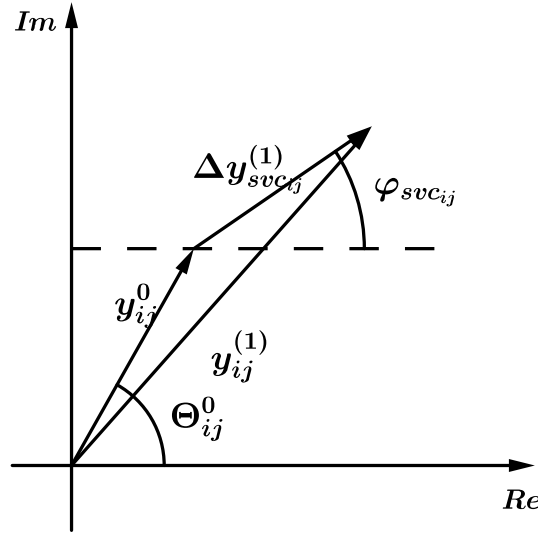
onde \bar{K}_{svcij} tem valor complexo e pode ser expresso na forma polar pela magnitude K_{svcij} e ângulo φ_{svcij} .

A variação de admitância entre as barras internas das máquinas i e j é dada por (COLVARA; MARQUES, 2009):

$$\Delta y_{svcij} = \bar{K}_{svcij} \Delta B_{svc}. \quad (67)$$

Observa-se em 66, que tanto a magnitude quanto o ângulo do coeficiente de sensibilidade são constantes, logo as variações de admitância de transferência Δy_{ij} dependem diretamente das variações da susceptância ΔB_{svc} do SVC e ocorrem sobre a inclinação de coeficiente de sensibilidade no plano complexo da admitância, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Impedância do SVC, em série, equivalente à admitância, em paralelo, do SVC.



Fonte: Colvara e Marques (2009).

Assim, a variação efetiva de admitância de transferência entre as máquinas é dada por:

$$\Delta y_{svcij}^{ef} = K_{svcij}^{ef} \Delta B_{svc} = K_{svcij} \cos(\Theta_{ij}^0 - \varphi_{svcij}) \Delta B_{svc} \quad (68)$$

sendo K_{svcij}^{ef} definido como coeficiente de eficácia que expressa a participação efetiva das variações da susceptância do SVC na magnitude da admitância de transferência entre duas máquinas genéricas i e j de um sistema multimáquinas.

Assim, a admitância de transferência entre as máquinas i e j pode ser escrita conforme a equação (69), sendo y_{ij}^0 a admitância correspondente à condição de regime permanente e Δy_{svcij} as variações impostas pela ação SVC (MARQUES, 2009). De modo que:

$$y_{ij} = y_{ij}^0 + \Delta y_{svcij} = \left(Y_{ij}^0 + \Delta y_{svcij}^{ef} \right) \angle \left(\Theta_{ij}^0 + \Delta \Theta_{svcij} \right) \quad (69)$$

sendo

$$\Delta \Theta_{svcij} = \arctan \left[\frac{K_{svcij} \Delta B_{svc} \operatorname{sen}(\varphi_{svcij} - \Theta_{ij}^0)}{Y_{ij}^0 + K_{svcij} \Delta B_{svc} \cos(\varphi_{svcij} - \Theta_{ij}^0)} \right]. \quad (70)$$

Observa-se que tanto a magnitude (68) quanto o ângulo (70) das variações de admitância de transferência entre as máquinas i e j dependem exclusivamente das variações da susceptância do TCSC ΔB_{svc} .

4.5 Fator de Efeito

Deve-se considerar que uma determinada variação de admitância de transferência pode ter maior ou menor importância quando comparada com a magnitude original da mesma. Portanto,

além da contribuição absoluta dada pelo coeficiente de eficácia, é também significativa a informação da contribuição relativa das variações da susceptância, no caso do SVC, e da reatância, no caso do TCSC, para a admitância de transferência entre as máquinas. Com esse objetivo, Colvara e Marques (2009), Silva e Colvara (2009) definiram o fator de efeito dado por:

$$F_{svcij}^{ef} \triangleq \frac{K_{svcij}^{ef}}{y_{ij}^0} \quad (71)$$

para o caso de SVC e,

$$F_{cscij}^{ef} \triangleq \frac{K_{cscij}^{ef}}{y_{ij}^0} \quad (72)$$

para o caso do TCSC.

Este fator pode ser usado ainda para avaliar entre os pares de máquinas quais serão mais ou menos afetados pela atuação de um dispositivo FACTS em determinada localização no sistema. Este fator é denominado Fator de Efeito da atuação dos FACTS sobre a capacidade de sincronização das máquinas do sistema, uma vez que ele possui a influência direta sobre a potência sincronizante entre as máquinas (COLVARA; MARQUES, 2009; SILVA; COLVARA, 2009).

4.6 Inclusão de Múltiplos Dispositivos FACTS em Sistemas Multimáquinas

Através das equações (57) e (68) observa-se que a variação efetiva da magnitude da admitância de transferência entre os pares genéricos de máquinas i e j de um sistema multimáquinas provocada por um dispositivo FACTS depende apenas do seu coeficiente de eficácia e da variação da susceptância ΔB_{svc} para o caso do SVC e da reatância ΔX_{csc} para o caso do TCSC. Logo, os efeitos de múltiplos dispositivos FACTS, do tipo SVC e TCSC, incorporados a essa rede podem ser considerados como uma combinação linear das variações da susceptância ΔB_{svc} de cada SVC e das variações da reatância ΔX_{csc} de cada TCSC.

Assim, considere ns dispositivos FACTS do tipo SVC, cada um deles, instalado em uma determinada barra do sistema, denotando-as por n_1, n_2, \dots, n_{ns} e considere também nc dispositivos FACTS do tipo TCSC, cada um deles instalado em uma linha de transmissão diferente do sistema multimáquinas.

O cálculo do coeficiente de eficácia e do fator de efeito de cada dispositivo é independente e se dá de forma análoga ao desenvolvimento mostrado nas seções 4.3, 4.4 e 4.5, no entanto deve-se considerar a contribuição fixa de todos os dispositivos na rede original, ou seja, considerar o sistema em regime permanente.

Então, da generalidade das equações (56) e (67) e da hipótese de que a rede de transmissão

é linear, obtém-se:

$$\Delta y_{ij} = \sum_{s=1}^{ns} \bar{K}_{svc\ ij(s)} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} \bar{K}_{csc\ ij(c)} \Delta X_{csc(c)}, \quad (73)$$

sendo que

- $\bar{K}_{svc\ ij(s)}$ é definido pela equação (66) e representa o coeficiente de sensibilidade das variações da admitância de transferência entre as máquinas i e j em relação às variações da susceptância $\Delta B_{svc(s)}$, do SVC instalado na barra s (COLVARA; MARQUES, 2009);
- $\bar{K}_{csc\ ij(c)}$ é definido pela equação (54) e representa o coeficiente de sensibilidade das variações da admitância de transferência entre as máquinas i e j em relação às variações da reatância $\Delta X_{csc(c)}$, do TCSC de índice c , instalado na linha de transmissão do sistema multimáquinas (SILVA, 2010).

Os coeficientes de eficácia associados a cada um dos dispositivos FACTS SVC $K_{svc\ ij(s)}^{ef}$, com $s = 1, 2, \dots, ns$, são definidos pela equação (68) desenvolvida por Colvara e Marques (2009) e os associados a cada um dos dispositivos FACTS TCSC $K_{csc\ ij(c)}^{ef}$, com $c = 1, 2, \dots, nc$, são definidos pela equação (58), desenvolvida por Silva e Colvara (2009):

$$K_{svc\ ij(s)}^{ef} = K_{svc\ ij(s)} \cos(\Theta_{ij}^0 - \varphi_{svc\ ij(s)}) \quad (74)$$

$$K_{csc\ ij(c)}^{ef} = K_{csc\ ij(c)} \cos(\Theta_{ij}^0 - \varphi_{csc\ ij(c)}). \quad (75)$$

Assim, a variação efetiva da admitância de transferência entre as máquinas do sistema multimáquinas em regime transitório pode ser expressa por:

$$\Delta y_{ij}^{ef} = \sum_{s=1}^{ns} K_{svc\ ij(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} K_{csc\ ij(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)}. \quad (76)$$

Os coeficientes "fator de efeito" $F_{svc\ ij(s)}^{ef}$, com $k = 1, 2, \dots, ns$ associados a cada um dos ns SVC e $F_{csc\ ij(c)}^{ef}$, com $k = 1, 2, \dots, nc$ associados a cada um dos nc TCSC, são definidos pelas equações (71) e (72), respectivamente. Assim:

$$F_{svc\ ij(s)}^{ef} = \frac{K_{svc\ ij(s)}^{ef}}{y_{ij}^0} \quad \text{e} \quad F_{csc\ ij(c)}^{ef} = \frac{K_{csc\ ij(c)}^{ef}}{y_{ij}^0}. \quad (77)$$

Das equações (76) e (77), pode-se definir:

$$F_{ij} \triangleq \frac{\Delta y_{ij}}{y_{ij}^0} = \sum_{s=1}^{ns} F_{svc\ ij(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} F_{csc\ ij(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)} \triangleq F_{ij}(\Delta_{facts}). \quad (78)$$

O fator F_{ij} está associado à contribuição, de todos os dispositivos FACTS instalados na

rede elétrica, na admitância de transferência entre as máquinas do sistema multimáquinas e pode ser considerado como uma função denotada por $F_{ij}(\Delta_{facts})$ cujas variáveis são $\Delta_{facts} = (\Delta B_{svc(s)}, \Delta X_{csc(c)})$.

Observa-se que os efeitos de cada um dos dispositivos aparecem separados na equação (78). Isto enseja controles de modo a obter desempenhos desejados para o sistema, o que vai ser explorado no próximo capítulo.

4.7 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a inclusão de dispositivos FACTS do tipo SVC e TCSC no sistema multimáquinas, bem como o desenvolvimento da redução da matriz admitância de barras, considerando as cargas como admitância constantes, para posterior análise da admitância de transferência entre duas máquinas genéricas através da matriz reduzida às barras internas dos geradores.

Com o intuito de analisar os efeitos do TCSC e do SVC sobre a capacidade de sincronização entre pares de máquinas genéricas do sistema foi apresentado o coeficiente de eficácia e o fator de efeito desses dispositivos, desenvolvidos por (SILVA; COLVARA, 2009; COLVARA; MARQUES, 2009).

Observou-se que o coeficiente de sensibilidade de cada um dos dispositivos FACTS, equações (54) e (66), tem valor complexo com magnitude e ângulo constantes. Portanto, as variações de admitância de transferência entre as máquinas do sistema que dependem diretamente das variações da reatância do TCSC e/ou das variações de susceptância do SVC conforme equações (58) e (68).

O coeficiente de eficácia expressa a participação efetiva dos dispositivos FACTS na admitância de transferência entre as máquinas e segundo Marques (2009), Peraro (2010), Silva (2010), Capellette (2012), este dado é de extrema importância, pois mesmo em rede de grande complexidade é possível analisar a eficácia do dispositivo na mesma.

O fator de efeito tem informação mais significativa dessa contribuição, pois se pode comparar a magnitude das variações da admitância de transferência entre as máquinas com a magnitude original da mesma e com isso pode-se definir a localização de instalação do dispositivo, na rede, com maior influência sobre a admitância de transferência entre as máquinas.

Para analisar os efeitos dos múltiplos dispositivos FACTS sobre a capacidade de sincronização entre pares de máquinas genéricas do sistema foi desenvolvida uma modelagem matemática para o cálculo da variação de admitância de transferência entre as máquinas do sistema em regime permanente através de uma combinação linear das variações da susceptância ΔB_{svc} de cada SVC e das variações da reatância ΔX_{csc} de cada TCSC com seus respectivos coeficientes

de eficácia.

5 CONTROLE DE SEE EM REGIME TRANSITÓRIO POR MEIO DE DISPOSITIVOS FACTS

5.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a modelagem dos múltiplos dispositivos FACTS e seus efeitos na energia transitória do sistema multimáquinas, através da variação da admitância de transferência entre as máquinas síncronas do sistema. Será apresentada a análise da energia potencial considerando a inserção da contribuição dos múltiplos dispositivos na função energia e apresenta-se o desenvolvimento de controle desses múltiplos dispositivos de modo a obter uma melhoria na estabilidade transitória do sistema.

O controle coordenado dos múltiplos dispositivos FACTS será desenvolvido por meio de três leis de controle que atuam na entrada de cada um de seus respectivos dispositivos (SVC e/ou TCSC). Estas leis não atuarão simultaneamente no sistema e será uma das contribuições deste trabalho.

5.2 Modelagem dos Múltiplos Dispositivos FACTS na Energia Transitória no Sistema Multimáquinas

A presença dos dispositivos FACTS na rede altera a matriz admitância de barra do sistema reduzido às barras internas dos geradores conforme equacionamento desenvolvido no capítulo anterior. Assim, a matriz admitância pode ser escrita como:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_{red}^0 + \Delta\mathbf{Y}_{facts} \quad (79)$$

sendo \mathbf{Y}_{red}^0 a matriz reduzida correspondente à condição de regime permanente e $\Delta\mathbf{Y}_{facts}$ a matriz das variações imposta pela ação dos múltiplos dispositivos FACTS.

Os elementos das matrizes \mathbf{Y} e \mathbf{Y}_{red}^0 são y_{ij} e y_{ij}^0 , respectivamente, e os correspondentes em $\Delta\mathbf{Y}_{facts}$ são dados por:

$$\Delta Y_{ij}^{ef} = F_{ij} (\Delta_{facts}) y_{ij}^0 \quad (80)$$

A potência elétrica transferida entre as máquinas do sistema multimáquinas, desenvolvida por Anderson e Fouad (1997), Pai (1981) é expressa por:

$$P_{e\ ij} = E_i Y_{ij} E_j \cos(\delta_{ij} - \Theta_{ij}) \quad (81)$$

sendo:

- E_i → módulo da força eletromatriz da máquina i ;
- δ_{ij} → defasagem angular entre os rotores das máquinas síncronas i e j medida em relação ao eixo que gira à velocidade síncrona;
- Y_{ij} → magnitude da admitância de transferência entre os barramentos i e j ;
- Θ_{ij} → ângulo da admitância de transferência entre os barramentos i e j .

Considerando $\Theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij}$, pode-se escrever:

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \sen(\delta_{ij} - \alpha_{ij}). \quad (82)$$

Considerando que a admitância de transferência entre as máquinas seja afetada por ação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS na rede, pode-se expressar:

$$y_{ij} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}) \angle [\Theta_{ij}^0 + \Delta \Theta_{ij}]. \quad (83)$$

Considerando a variação efetiva dada pela equação (76) e o complemento do ângulo admittância, tem-se:

$$y_{ij} = (Y_{ij}^0 + \Delta y_{ij}^{ef}) \angle \left[\frac{\pi}{2} - (\alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \right]. \quad (84)$$

Assim, a potência transferida entre as máquinas pode ser expressa por:

$$P_{eij} = E_i (Y_{ij}^0 + \Delta y_{ij}^{ef}) E_j \sen(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \quad (85)$$

ou, utilizando a equação (78), tem-se:

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 [1 + F_{ij}(\Delta_{facts})] \quad (86)$$

e

$$P_{eij} = [1 + F_{ij}(\Delta_{facts})] E_i Y_{ij}^0 E_j \sen(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}). \quad (87)$$

Considerando como referência o centro inercial apresentado na equação (42) tomada a partir do sincronismo das máquinas, tem-se a potência elétrica de transferência entre as máquinas dada por:

$$P_{ei} = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i Y_{ij} E_j \sen(\delta_{ij} + \alpha_{ij}). \quad (88)$$

Definindo $\varphi_{ij} = \delta_{ij} + \alpha_{ij}$, a variação de potência elétrica da i -ésima máquina é dada por:

$$\Delta P_{ei} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Delta P_{eij} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i Y_{ij} E_j (\text{sen} \varphi_{ij} - \text{sen} \varphi_{ij}^0). \quad (89)$$

Com vistas a se obter uma representação em que o ponto de equilíbrio estável do sistema se encontre na origem do sistema de eixos σ_k , define-se que $\sigma_k = \varphi_k - \varphi_k^0$, sendo que o índice k da variável σ representa o par de máquinas (ij) . Assim:

$$\Delta P_{ei} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i Y_{ij} E_j [\text{sen}(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \text{sen} \delta_{ij}^0] \triangleq \sum_{k=1}^m f_k(\sigma_k), \quad (90)$$

com $m = \frac{n(n-1)}{2}$.

Considerando a função $V(x)$ representada pela equação (45), conhecida como função de Lyapunov (PAI, 1981) e reescrevendo-a em termos das variáveis originais do sistema, tem-se:

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{ E_i Y_{ij} E_j [-\cos(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0) - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \text{sen}(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0)] \}. \quad (91)$$

A primeira parcela do segundo membro da equação (91) representa a energia cinética e a segunda parcela representa a energia potencial e a rigor esta função é válida com função de Lyapunov somente se $\alpha_{ij} = 0, \forall(i, j)$, o que equivale a desconsiderar a condutância de transferência entre as máquinas i e j .

Definindo o fator de contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS no sistema multimáquinas como:

$$K_{factsij} = 1 + F_{ij}(\Delta_{facts}) \quad (92)$$

e lembrando que a transferência de potência entre as máquinas i e j é afetada pela ação da dinâmica dos múltiplos FACTS como expressa na equação (87), pode-se determinar os desvios de potência elétrica entre as máquinas i e j como:

$$\Delta P_{eij} = K_{factsij} f_k^0(\sigma_k). \quad (93)$$

A função $f_k^0(\sigma_k)$ representa o desvio do fluxo de potência ativa entre as máquinas em relação ao regime permanente.

Assim, pode-se determinar a função energia do sistema afetada pela contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS no sistema multimáquinas como:

tiplos dispositivos FACTS:

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{K_{facts\ ij} E_i Y_{ij}^0 E_j [-\cos(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0) - (\delta_{ij} - \delta_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}) \text{sen}(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0)]\}. \quad (94)$$

A localização dos dispositivos FACTS pode produzir maior ou menor influência na admitância de transferência entre as máquinas (COLVARA; MARQUES, 2009). Tendo a função energia modelada considerando a contribuição dos dispositivos FACTS, é possível compreender sua maior ou menor contribuição nos contornos da superfície da energia potencial (MARTINS, 2012).

5.3 Análise Transitória da Energia Potencial

Considera-se a função energia como função de Lyapunov, compreendida como uma parcela de energia cinética e a outra como energia potencial (PAI, 1981). Sendo que a parcela referente a energia potencial, afetada pelos dispositivos FACTS presentes na rede, é dada por:

$$E_p = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{1 + F_{ij}(\Delta_{facts})\} \left\{ E_i Y_{ij}^0 E_j [-\cos(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0)] \right\} - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \{1 + F_{ij}(\Delta_{facts})\} \left\{ E_i Y_{ij}^0 E_j [(\delta_{ij} - \delta_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}) \text{sen}(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0)] \right\}, \quad (95)$$

sendo:

- E_i e $E_j \rightarrow$ magnitude da tensão interna das máquinas i e j ;
- δ_{ij} e $\delta_{ij}^0 \rightarrow$ defasagem angular entre os pares de máquinas i e j , em regime transitório e em equilíbrio, respectivamente;
- Y_{ij}^0 e $\alpha_{ij}^0 \rightarrow$ magnitude e complemento do ângulo da admitância de transferência entre os barramentos i e j , respectivamente, em regime permanente;
- α_{ij} e $\Delta\alpha_{ij} \rightarrow$ complemento angular e variação do complemento angular da admitância de transferência entre os barramentos i e j , respectivamente, em regime transitório;
- $F_{ij}(\Delta_{facts}) \rightarrow$ a função (78) que define a contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS.

Seguindo Capellette (2012) e Martins (2012) este estudo considera uma severa falta com o objetivo de observar como a atuação de cada um dos dispositivos FACTS influencia sobre a energia potencial e sobre a trajetória do sistema, visando o emprego destas informações em procedimentos de estabilização do sistema sob a atuação dos múltiplos dispositivos FACTS.

Segundo Haque (2004), após uma grande perturbação, o SVC pode contribuir para o aumento da estabilidade na primeira oscilação por meio do aumento da capacidade de transferência de energia do sistema, enquanto que Machowski e Nelles (1992) apresentaram um estudo da contribuição do SVC no acréscimo da área de desaceleração, fazendo comparativo com o critério das áreas iguais, e demonstraram que uma estratégia adequada de controle proporciona contribuições positivas nos critérios de estabilidade.

Para Mahajan (2008), o controlador TCSC pode proporcionar uma ação muito rápida para aumentar o poder de sincronização através de troca rápida de reatância nos primeiros ciclos após uma falha. Em seu trabalho foi observado que o controlador TCSC inserido em um sistema multimáquinas pode melhorar significativamente a margem de estabilidade.

A análise da contribuição na estabilidade proveniente dos múltiplos dispositivos será através do mapeamento da região de estabilidade definida no subespaço angular em torno do ponto de equilíbrio estável considerando a energia potencial do sistema representada pela equação (95).

5.4 Controle Coordenado de Múltiplos Dispositivos FACTS

Capellette (2012) e Martins (2012) mostraram que tanto o TCSC como o SVC podem elevar a cordilheira que circunda o vale energético e também mudar a direção da trajetória do sistema depois da eliminação de uma falta. O objetivo desse trabalho é mostrar que se pode direcionar a trajetória do sistema para um ponto de máxima energia potencial dessa cordilheira. Matematicamente isto se traduz em maximizar a derivada temporal da função energia potencial, ou seja, a trajetória do sistema e o vetor gradiente da energia potencial tenham direção e sentido coincidentes, na primeira oscilação.

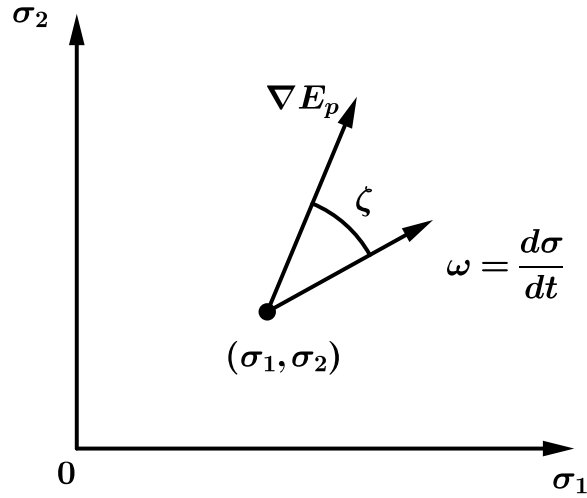
Desenvolvem-se, a seguir, três leis de controle que atuam, não simultaneamente, na entrada de cada dispositivo FACTS alocado no sistema.

5.4.1 Lei de Controle (LC01)

Para aumentar a estabilidade do sistema, deseja-se elevar a profundidade da depressão energética para que a trajetória do sistema fique mais longa e/ou, idealmente, fazer com que a trajetória do sistema, quando subindo a borda da região, tome uma direção de subida mais íngreme na cordilheira energética.

Observando a Figura 18, a derivada temporal $d\sigma/dt$, denotada por $\dot{\sigma}$, representa a velocidade do sistema formando um ângulo ζ com o vetor gradiente da função energia potencial $\Delta E_p = \partial E_p / \partial \sigma$. Admitindo-se um regime pós-falta iniciado com energia potencial crescente, como é genericamente o caso após um curto-circuito, objetiva-se maximizar a derivada tempo-

Figura 18 - Ângulo entre gradiente e trajetória do sistema.



Fonte: Elaboração do autor.

ral da função energia potencial dE_p/dt que será denotada por \dot{E}_p . Para isto, pode-se minimizar o ângulo ζ . Assim, da equação (45), tem-se que a energia potencial é dada por:

$$E_p(\sigma) = \sum_{k=1}^m \int_0^{\sigma_k} f_k(\tau_k) d\tau_k, \quad (96)$$

sendo que $f_k(\sigma_k)$ está definida na equação (90). Daí o gradiente é dado por:

$$\nabla E_p = \frac{\partial E_p}{\partial \sigma_k} = \begin{bmatrix} f_1(\sigma_1) \\ f_2(\sigma_2) \\ \vdots \\ f_m(\sigma_m) \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix}. \quad (97)$$

A derivada temporal da energia potencial é:

$$\dot{E}_p = \frac{dE_p}{dt} = \left[\frac{\partial E_p}{\partial (\sigma_k)} \right]^T \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} = [\nabla E_p]^T \cdot \dot{\sigma}_k. \quad (98)$$

Desenvolvendo o produto interno, tem-se:

$$\dot{E}_p = \sum_{k=1}^m f_k \cdot \dot{\sigma}_k = \sum_{k=1}^m f_k \cdot \omega_k. \quad (99)$$

Como o interesse está na primeira oscilação depois da falta, e sabe-se que a energia potencial cresce nesse intervalo. Portanto, impondo-se da condição:

$$\frac{d^2 E_p}{dt^2} \triangleq \ddot{E}_p = 0 \quad (100)$$

leva-se a que se tenha crescimento máximo na energia potencial do sistema.

Substituindo (100) em (99) obtém-se:

$$\sum_{k=1}^m (\dot{f}_k \omega_k + f_k \dot{\omega}_k) = 0. \quad (101)$$

Mas,

$$\dot{f}_k = \frac{df_k}{dt} = \frac{df_k}{d\sigma_k} \cdot \frac{d\sigma_k}{dt} = \frac{df_k}{d\sigma_k} \cdot \omega_k. \quad (102)$$

Das equações (101) e (102), vem:

$$\sum_{k=1}^m \left(\frac{df_k}{d\sigma_k} \omega_k^2 + f_k \dot{\omega}_k \right) = 0. \quad (103)$$

Desenvolvendo a equação (103), chega-se a seguinte equação:

$$\sum_{k=1}^m E_i Y_{ij} E_j \{ \omega_k^2 \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) + \dot{\omega}_k [\sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \sin(\delta_{ij}^0)] \} = 0. \quad (104)$$

Observa-se que todas as variáveis da equação (104) são determinadas pelas equações de estado do sistema. Portanto, com a inserção da contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS na matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores, tem-se:

$$\sum_{k=1}^m \{ 1 + F_{ij}(\Delta_{facts}) \} \underbrace{E_i Y_{ij}^0 E_j \{ \omega_k^2 \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) + \dot{\omega}_k [\sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \sin(\delta_{ij}^0)] \}}_{h_{ij}^0} = 0. \quad (105)$$

Considera-se inicialmente, apenas a ação de um único dispositivo FACTS do tipo SVC ou TCSC, de modo que $F_{ij}(\Delta B_s, \Delta X_c) = F_{svc\ ij}^{ef} \Delta B_{svc}$ ou $F_{ij}(\Delta B_s, \Delta X_c) = F_{csc\ ij}^{ef} \Delta X_{csc}$. Assim, ΔB_{svc} ou ΔX_{csc} é definido por:

$$\Delta B_{svc} = - \frac{\sum_{k=1}^m h_k^0}{\sum_{k=1}^m F_{svc\ k}^{ef} h_k^0}; \quad \Delta X_{csc} = - \frac{\sum_{k=1}^m h_k^0}{\sum_{k=1}^m F_{csc\ k}^{ef} h_k^0}. \quad (106)$$

Considerando a contribuição de múltiplos dispositivos FACTS, cada variável $\Delta B_{svc(i)}$ e $\Delta X_{csc(i)}$ é definida por:

$$-\Delta B_{svc(i)} = \frac{\sum_{k=1}^m \left[1 + \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq i}}^{ns} F_{svc\ k(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} F_{csc\ k(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)} \right] h_k^0}{\sum_{k=1}^m F_{svc\ (i)k}^{ef} h_k^0} \quad (107)$$

$$-\Delta X_{csc(i)} = \frac{\sum_{k=1}^m \left[1 + \sum_{s=1}^{ns} F_{svc\ k(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{\substack{c=1 \\ c \neq i}}^{nc} F_{csc\ k(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)} \right] h_k^0}{\sum_{k=1}^m F_{csc\ (i)k}^{ef} h_k^0}. \quad (108)$$

Desconsiderando a contribuição que cada dispositivo recebe dos demais, as parcelas que contém as variáveis no segundo membro de (107) e (108) serão nulas. Assim, cada variável $\Delta B_{svc(i)}$ e $\Delta X_{csc(i)}$ é definida por (106).

Espera-se que se a contribuição de cada dispositivo FACTS for de acordo com (106), haja uma elevação na cordilheira que circunda o vale energético em torno do ponto de equilíbrio estável e/ou uma mudança de direção da trajetória do sistema no sentido de aumentar a estabilidade transitória do sistema multimáquinas.

A variável de entrada u , no domínio do tempo, correspondente a cada dispositivo FACTS instalado no sistema multimáquinas será idealmente definida pela condição estabelecida por (106). Assim,

$$u_s \triangleq \left| \frac{\sum_{k=1}^m h_k^0}{\sum_{k=1}^m F_{svc\ k(s)}^{ef} h_k^0} \right|, \quad \text{para } s = 1, 2, \dots, ns$$

$$u_c \triangleq \left| \frac{\sum_{k=1}^m h_k^0}{\sum_{k=1}^m F_{csc\ k(c)}^{ef} h_k^0} \right|, \quad \text{para } c = 1, 2, \dots, nc$$
(109)

A lei de controle dinâmico dos múltiplos dispositivos FACTS (**LC01**) está definida pelas funções de transferências (47) e (48) associada a cada SVC e TCSC, respectivamente, com suas respectivas entradas definidas por (109).

5.4.2 Lei de Controle (LC02)

Deseja-se elaborar uma lei de controle com o propósito de influenciar na trajetória do sistema para que ela tenha a mesma orientação do gradiente da energia potencial. Daí consideram-se dois pares de máquinas, sendo um deles com a máquina k de maior aceleração e o outro com a máquina l de menor aceleração do sistema.

O ângulo ζ entre o vetor gradiente da energia potencial ∇E_p equivalente aos dois pares de máquinas do sistema e seu vetor defasagem da velocidade angular, denotado por \mathbf{W} , é dado por:

$$\cos \zeta = \frac{\langle \nabla E_p, \mathbf{W} \rangle}{\|\nabla E_p\|_2 \|\mathbf{W}\|_2}. \quad (110)$$

Supondo que a trajetória do sistema tenha a mesma direção do gradiente da energia poten-

cial, vem:

$$\langle \nabla E_p, \mathbf{W} \rangle = \|\nabla E_p\|_2 \|\mathbf{W}\|_2 \Rightarrow \langle (f_{bk}, f_{al}), (\omega_{bk}, \omega_{al}) \rangle = \sqrt{(f_{bk}^2 + f_{al}^2)(\omega_{bk}^2 + \omega_{al}^2)}. \quad (111)$$

Desenvolvendo algebricamente (111), obtém-se:

$$f_{bk} \omega_{al} = f_{al} \omega_{bk} \quad (112)$$

sendo f_{bk} e ω_{bk} o fluxo de potência e defasagem da velocidade angular dos pares de máquinas (b, k) .

Substituindo gradativamente (93), (92) e (78) em (112), obtém-se:

$$\begin{pmatrix} 1 + \sum_{s=1}^{ns} F_{svc\ bk(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} F_{csc\ bk(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)} \\ 1 + \sum_{s=1}^{ns} F_{svc\ al(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} F_{csc\ al(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{bk}^0 \omega_{al} \\ f_{al}^0 \omega_{bk} \end{pmatrix} = \quad (113)$$

Considerando a contribuição de múltiplos dispositivos FACTS, cada variável $\Delta B_{svc(i)}$ e $\Delta X_{csc(i)}$ é definida por:

$$\Delta B_{svc(i)} = \frac{\left(1 + \sum_{s=1 \neq i}^{ns} F_{svc\ al(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} F_{csc\ al(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)}\right) f_{al}^0 \omega_{bk} - F_{svc\ bk(i)}^{ef} f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{svc\ al(i)}^{ef} f_{al}^0 \omega_{bk}}{\left(1 + \sum_{s=1 \neq i}^{ns} F_{svc\ bk(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} F_{csc\ bk(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)}\right) f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{svc\ bk(i)}^{ef} f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{svc\ al(i)}^{ef} f_{al}^0 \omega_{bk}} \quad (114)$$

$$\Delta X_{csc(i)} = \frac{\left(1 + \sum_{s=1}^{ns} F_{svc\ al(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1 \neq i}^{nc} F_{csc\ al(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)}\right) f_{al}^0 \omega_{bk} - F_{csc\ bk(i)}^{ef} f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{csc\ al(i)}^{ef} f_{al}^0 \omega_{bk}}{\left(1 + \sum_{s=1}^{ns} F_{svc\ bk(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1 \neq i}^{nc} F_{csc\ bk(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)}\right) f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{csc\ bk(i)}^{ef} f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{csc\ al(i)}^{ef} f_{al}^0 \omega_{bk}} \quad (115)$$

Desconsiderando a contribuição que cada dispositivo recebe dos demais, as parcelas que contém as variáveis ΔB e ΔX , no segundo membro de (114) e (115) serão nulas. Assim, cada variável $\Delta B_{svc(i)}$ e $\Delta X_{csc(i)}$ é definida por (116):

$$\Delta B_{svc(i)} = \frac{f_{al}^0 \omega_{bk} - f_{bk}^0 \omega_{al}}{F_{svc\ bk(i)}^{ef} f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{svc\ al(i)}^{ef} f_{al}^0 \omega_{bk}}, \quad \Delta X_{csc(i)} = \frac{f_{al}^0 \omega_{bk} - f_{bk}^0 \omega_{al}}{F_{csc\ bk(i)}^{ef} f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{csc\ al(i)}^{ef} f_{al}^0 \omega_{bk}} \quad (116)$$

A variável de entrada u , no domínio do tempo, correspondente a cada dispositivo FACTS

instalado no sistema multimáquinas será definida pela condição estabelecida por (116). Assim,

$$u(s) \triangleq \left| \frac{f_{al}^0 \omega_{bk} - f_{bk}^0 \omega_{al}}{F_{svc\ bk(s)}^{ef} f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{svc\ al(s)}^{ef} f_{al}^0 \omega_{bk}} \right|, \text{ para } s = 1, 2, \dots, ns \quad (117)$$

$$u(c) \triangleq \left| \frac{f_{al}^0 \omega_{bk} - f_{bk}^0 \omega_{al}}{F_{csc\ bk(c)}^{ef} f_{bk}^0 \omega_{al} - F_{csc\ al(c)}^{ef} f_{al}^0 \omega_{bk}} \right|, \text{ para } c = 1, 2, \dots, nc$$

A lei de controle dinâmico dos múltiplos dispositivos FACTS (**LC02**) está definida pelas funções de transferências (47) e (48) associada a cada SVC e TCSC, respectivamente, com suas respectivas entradas definidas por (117).

5.4.3 Lei de Controle (LC03)

A variação da energia potencial será máxima se a direção e sentido do vetor defasagem da velocidade angular dos pares de máquinas do sistema, \mathbf{W} , coincidirem com o vetor gradiente da função energia potencial ∇E_p , ou seja, se o ângulo entre os dois vetores for nulo. Daí,

$$\langle \nabla E_p, \mathbf{W} \rangle = \|\nabla E_p\|_{\infty} \|\mathbf{W}\|_{\infty}. \quad (118)$$

O vetor gradiente corresponde ao vetor fluxo de potência representado por (90), logo (118) é uma função das variações dos dispositivos FACTS ΔB_s e ΔX_c definida implicitamente por (119):

$$\sum_{k=1}^m [1 + F_{ij}(\Delta B_s, \Delta X_c)] f_k^0(\sigma_k) \omega_k = |f_{max}^0| |\omega_{max}| \quad (119)$$

com $s = 1, 2, \dots, ns$ e $c = 1, 2, \dots, nc$.

Em (119) usou-se a norma infinita em $|\nabla E_p| |\mathbf{W}|$ desconsiderando a contribuição dos dispositivos FACTS no cálculo de $|\nabla E_p|$.

Considera-se inicialmente, apenas a ação de um único dispositivo FACTS do tipo SVC ou TCSC, de modo que $F_{ij}(\Delta B_s, \Delta X_c) = F_{svc\ ij}^{ef} \Delta B_{svc}$ ou $F_{ij}(\Delta B_s, \Delta X_c) = F_{csc\ ij}^{ef} \Delta X_{csc}$. Assim, ΔB_{svc} e ΔX_{csc} serão definidos por:

$$\Delta B_{svc} = \frac{|f_{max}^0| |\omega_{max}| - \sum_{k=1}^m f_k^0 \omega_k}{\sum_{k=1}^m F_{svc\ k}^{ef} f_k^0}; \quad \Delta X_{csc} = \frac{|f_{max}^0| |\omega_{max}| - \sum_{k=1}^m f_k^0 \omega_k}{\sum_{k=1}^m F_{csc\ k}^{ef} f_k^0} \quad (120)$$

Considerando a contribuição de múltiplos dispositivos FACTS, cada variável $\Delta B_{svc(i)}$ e

$\Delta X_{csc(i)}$ é definida por:

$$\Delta B_{svc(i)} = \frac{|f_{max}^0| |\omega_{max}| - \sum_{k=1}^m \left(1 + \sum_{s=1 \neq i}^{ns} F_{svc\ ij(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1}^{nc} F_{csc\ ij(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)} \right) f_k^0 \omega_k}{\sum_{k=1}^m F_{svc\ k(i)}^{ef} f_K^0} \quad (121)$$

$$\Delta X_{csc(i)} = \frac{|f_{max}^0| |\omega_{max}| - \sum_{k=1}^m \left(1 + \sum_{s=1}^{ns} F_{svc\ ij(s)}^{ef} \Delta B_{svc(s)} + \sum_{c=1 \neq i}^{nc} F_{csc\ ij(c)}^{ef} \Delta X_{csc(c)} \right) f_k^0 \omega_k}{\sum_{k=1}^m F_{csc\ k(i)}^{ef} f_K^0} \quad (122)$$

Desconsiderando a contribuição que cada dispositivo recebe dos demais, as parcelas que contem as variáveis no segundo membro de (121) e (122) serão nulas. Assim, cada variável $\Delta B_{svc(i)}$ e $\Delta X_{csc(i)}$ é definida por (120).

Espera-se que se a contribuição de cada dispositivo FACTS for de acordo com (120), haja uma elevação na cordilheira que circunda o vale energético em torno do ponto de equilíbrio estável e/ou uma mudança de direção da trajetória do sistema no sentido de aumentar a estabilidade transitória do sistema multimáquinas.

A variável de entrada, no domínio do tempo, correspondente a cada dispositivo FACTS instalado no sistema multimáquinas será definida pela condição estabelecida por (120). Assim,

$$u(s) = \left| \frac{|f_{max}^0| |\omega_{max}| - \sum_{k=1}^m f_k^0 \omega_k}{\sum_{k=1}^m F_{svc\ k(s)}^{ef} f_K^0} \right|, \text{ para } s = 1, 2, \dots, ns \quad (123)$$

$$u(c) = \left| \frac{|f_{max}^0| |\omega_{max}| - \sum_{k=1}^m f_k^0 \omega_k}{\sum_{k=1}^m F_{csc\ k(c)}^{ef} f_K^0} \right|, \text{ para } c = 1, 2, \dots, nc$$

A lei de controle dinâmico dos múltiplos dispositivos FACTS (**LC03**) está definida pelas funções de transferências (47) e (48) associada a cada SVC e TCSC, respectivamente, com suas respectivas entradas definidas por (123).

5.5 Conclusões

Através da modelagem dos múltiplos dispositivos FACTS, por meio do fator $F_{ij}(\Delta_{facts})$ presente na equação (80) é possível perceber a ação dos múltiplos dispositivos FACTS sobre as variações na admitância de transferência entre as máquinas i e j , em regime transitório. Esta variação afeta a potência transferida entre as máquinas conforme equação (90), por conseguinte, as parcelas da energia potencial são afetadas pela ação dos múltiplos dispositivos FACTS como determinado pelo Fator de Participação $K_{facts\ ij}$ na equação (92).

Assim, é possível determinar os efeitos desses dispositivos na energia potencial do sistema,

e analisar seu desempenho mediante a alteração que ele provoca na energia potencial. Isto implica em observar como é afetado o torque de sincronização do sistema.

Uma vez que se tem a informação da intensidade com que os dispositivos afetam diferentes parcelas da energia potencial, têm-se a possibilidade de avaliar as máquinas (tomadas em pares) sobre as quais uma ação de controle pode ser mais efetiva diante de um determinado transitório.

Tendo em vista a influência dos múltiplos dispositivos FACTS na energia potencial do sistema desenvolveu-se uma modelagem, embasada na energia potencial, que possibilita o controle desses dispositivos de tal maneira que a trajetória do sistema assuma uma direção de subida, e que a trajetória percorra um caminho mais íngreme, e/ou idealmente assuma a mesma orientação do gradiente da energia potencial na direção de um ponto de máximo local, o que significa que o sistema tenha um torque restaurativo mais efetivo.

A proposição da primeira lei de controle partiu do princípio de que o sinal de entrada do controle dinâmico de cada dispositivo fosse carregado com a condição de que a derivada temporal de segunda ordem da função energia fosse nula, ou seja, valor máximo da função energia.

A proposição da segunda lei de controle partiu do princípio de que sinal de entrada do controle dinâmico de cada dispositivo fosse carregado com a condição de que o ângulo entre o vetor gradiente de energia potencial e o vetor velocidade, de um sistema desacoplado do sistema original considerando os dois pares de máquinas mais afetados durante um transitório, seja nulo.

A terceira lei de controle é uma generalização da segunda lei, ou seja, considera-se o sistema original e impõe-se a condição de que o ângulo entre o vetor gradiente de energia potencial e o vetor velocidade seja nulo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

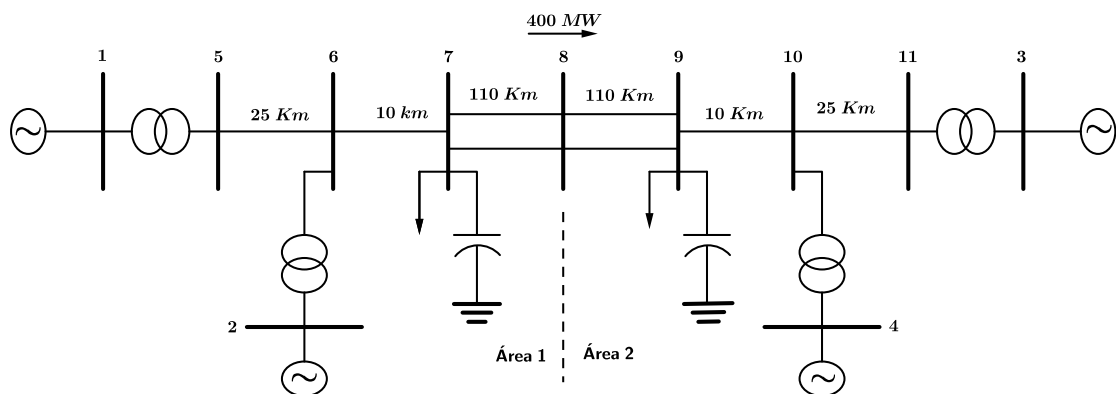
Neste capítulo apresentam-se resultados de simulações de três sistemas testes visando validar e clarificar o estudo feito nos capítulos 5 e 6. Os testes são feitos em sistemas de 4, 5 e 10 máquinas e os resultados obtidos de simulações, cuja implementação foi realizada utilizando o software MATLAB/SIMULINK, são apresentados e discutidos.

Não foi usado nenhum método de otimização para alocação dos dispositivos FACTS de modo a garantir a melhor localização e o número de dispositivos alocados. A alocação procede com base na análise preliminar dos coeficientes de eficácia e fator de efeito e simulações testes para confirmar a eficácia da ação dos dispositivos sobre a melhoria da estabilidade transitória do sistema.

6.1 Sistema Kundur: 4 Máquinas e 11 Barras

Esse sistema consiste de duas áreas simétricas, sendo essas conectadas por duas linhas de intercâmbio paralelas longas, ou seja, com alta reatância indutiva, constituindo uma interligação eletricamente fraca entre as duas áreas do sistema. Cada área consiste de duas unidades de geração em que a Área 1 transfere para a Área 2 uma potência ativa de 400 MW, conforme Figura 19.

Figura 19 - Sistema multimáquinas de duas áreas e quatro máquinas.



Fonte: Kundur (1994).

O sistema representado na Figura 19, por ser encontrado em Kundur (1994), será denominado de "Sistema Kundur". Este sistema é considerado de pequeno porte e possui estrutura e

parâmetros baseados em equipamentos reais, favorecendo assim uma análise dos efeitos dos modos de oscilação eletromecânicos.

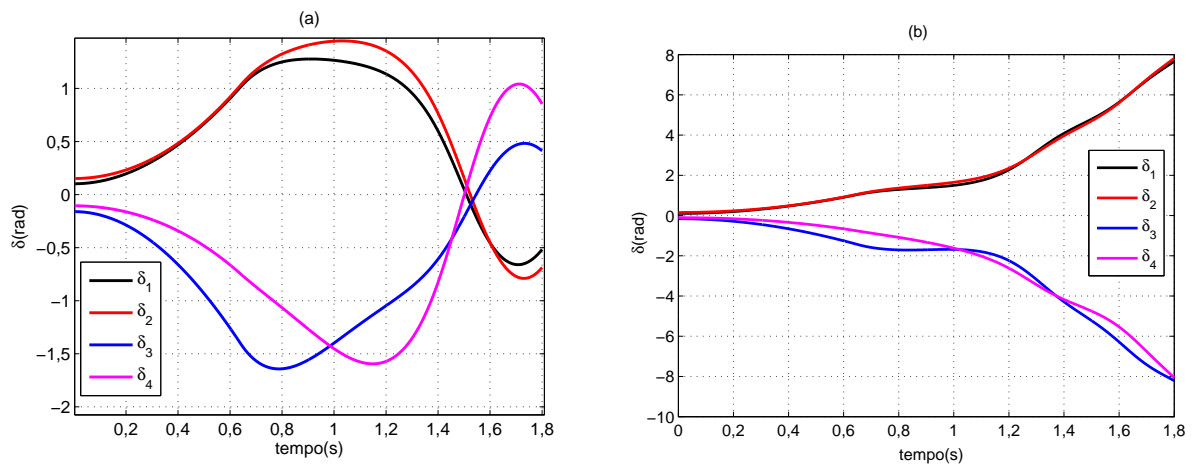
Os dados de linhas, de barras e de máquinas do sistema Kundur, sem compensação de dispositivos FACTS, constam no Anexo A.

6.1.1 Simulação do Sistema Kundur

A fim de se fazer um estudo sobre o efeito da compensação de dispositivos FACTS inseridos no sistema Kundur e a aplicação das leis de controle estabelecidas neste trabalho com vistas à melhoria da estabilidade transitória, considera-se uma contingência neste sistema que consiste num curto-circuito trifásico na linha 9–10 tão próxima da Barra 9 que se considera que o curto-circuito tenha ocorrido na própria barra. A contingência será eliminada sem chaveamento.

Na Figura 20(a) são mostrados as oscilações dos ângulos das máquinas diante da contingência especificada no instante de tempo igual a zero com duração de 0,64 segundo, mostrando que o sistema é estável para primeira oscilação, enquanto que as curvas da Figura 20(b) correspondem as oscilações da mesma falta com duração de 0,65 segundo e neste caso o sistema é instável.

Figura 20 - Ângulos das máquinas: Sistema estável (a) e Sistema instável (b).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

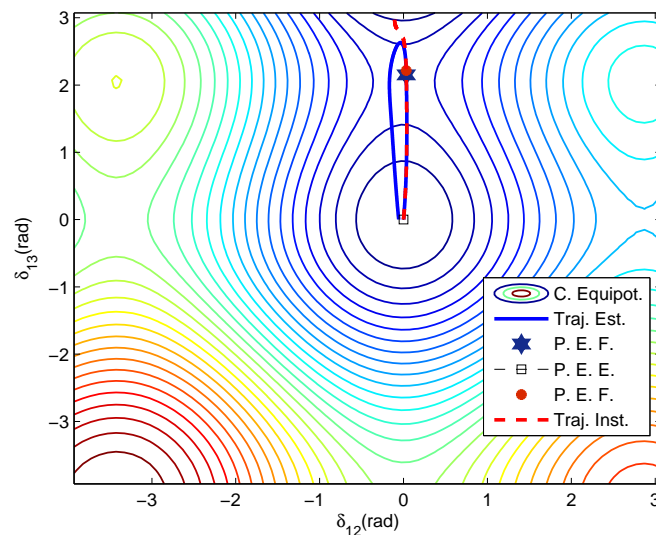
O tempo crítico de eliminação da falta será representado por um intervalo que contém o tempo máximo de duração da falta sem implicar em instabilidade. Sendo assim o tempo crítico de eliminação desta falta no sistema situa-se no intervalo 0,64 – 0,65 segundo.

Percebe-se na 20(b) que os geradores da área 1 perdem o sincronismo em relação aos geradores da área 2. Portanto, a ação dos dispositivos FACTS deve ser no sentido de estabelecer melhor sincronismo nas oscilações interáreas. Antes de analisar a influência da compensação

dinâmica dos dispositivos FACTS, primeiramente ilustram-se as curvas equipotenciais referentes ao caso base do sistema (Figura 21), juntamente com a trajetória estável, em preto, e instável, em vermelho, do SEE.

Sabe-se que o ponto de equilíbrio estável (P. E. E.) situa-se no ponto de mínima energia potencial (energia potencial nula) (PAI, 1981) situado em um vale energético circundado por elevações energéticas onde se localizam os picos energéticos e entre eles "passagens", tais como passos entre montanhas como ilustrado na Figura 21. Os pontos de equilíbrio instável e os pontos de equilíbrio instável do tipo sela são caracterizados por picos e passos, respectivamente, na borda da depressão energética.

Figura 21 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares $\delta_{1,2}$ e $\delta_{1,3}$, trajetória estável (Traj. Est.) e trajetória instável (Traj. Inst.) do sistema sem compensação. O ponto de eliminação da falta (P. E. F.) pertence à trajetória de mesma cor.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As trajetórias sobrepostas às curvas equipotenciais ilustradas na Figura 21 são descritas pelas defasagens angulares entre os pares de máquinas $\delta_{1,2}$ e $\delta_{1,3}$. A trajetória originada da falta de duração 0,64 segundo está em azul e é estável, pois observando o gráfico percebe-se que o ponto de eliminação da falta (P. E. F.) está muito próximo do equilíbrio instável, mas a trajetória retorna para uma vizinha do P. E. E. Porém, isso não acontece na trajetória vermelha em que a falta durou 0,65 segundo, notando que embora também tangencie o ponto de sela, posteriormente a trajetória afasta-se indefinidamente do ponto de equilíbrio estável, caracterizando a instabilidade do sistema.

Na Figura 21, observa-se que o sistema perdeu a estabilidade, saindo por um ponto de sela (passo energético). É de se notar que este é o caminho que exige menos esforço para deixar a região de atração entre os dois pontos de máxima energia potencial (picos energéticos).

Desejando-se que o sistema não abandone esta região, seria conveniente que a trajetória assumisse uma direção de "subida" mais íngreme (na direção do pico energético), ou, idealmente, que a trajetória tivesse direção coincidente com o vetor gradiente da energia potencial.

Através das análises dos coeficientes de eficácia e do fator de efeito apresentados na Tabela 1, percebe-se que a alocação do SVC nas Barras 6, 7 e 8 contribui com elevação da magnitude da admitância de transferência entre as máquinas interárea. Os valores relativos mostrados pelo fator de efeito, indicam que a melhor contribuição será quando o mesmo for instalado na Barra 08. Porém os dados da tabela foram extraídos do sistema em regime permanente e pode ser que a contribuição do dispositivo seja negativa em regime transitório e que outro dispositivo tenha melhor contribuição sobre a estabilidade transitória. De todo modo foi considerado o dispositivo SVC instalado na Barra 8 também pelo fato de que as linhas que passam por essa barra constituem um caminho obrigatório para o fluxo de potência interárea.

Tabela 1 - Fator de Efeito e Coeficiente de Eficácia dos Pares de Máquinas do Sistema Kundur.

Par de Máquinas	SVC na Barra 06		SVC na Barra 07		SVC na Barra 08	
	K_{svc}^{ef}	F_{svc}^{ef}	K_{svc}^{ef}	F_{svc}^{ef}	K_{svc}^{ef}	F_{svc}^{ef}
1 – 2	0,1044	0,1052	0,0970	0,0978	0,0632	0,0637
1 – 3	0,0541	0,1052	0,0553	0,1074	0,0590	0,1147
1 – 4	0,0584	0,1052	0,0596	0,1074	0,0637	0,1147
2 – 3	0,0584	0,1052	0,0596	0,1074	0,0637	0,1147
2 – 4	0,0630	0,1052	0,0643	0,1074	0,0686	0,1147
3 – 4	0,0312	0,0321	0,0350	0,0360	0,0614	0,0631

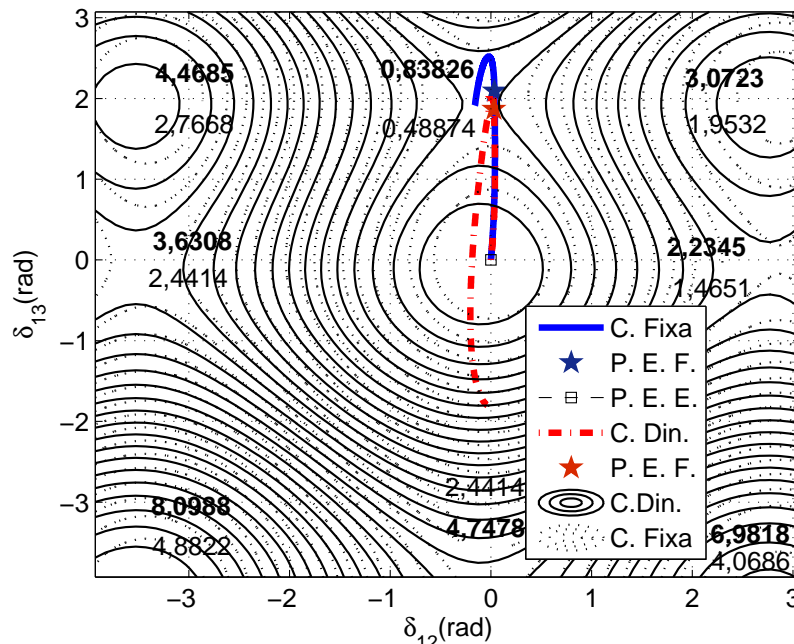
Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Tabela 1, pode-se observar a efetiva contribuição do SVC na capacidade de sincronização entre máquinas do sistema, uma vez que esta depende diretamente das admitâncias de transferência entre máquinas. Sabendo-se que essa contribuição pode ter maior ou menor participação quando comparada com a magnitude da admitância inicial, tem-se a participação do SVC na admitância de transferência entre máquinas dado pelo fator de efeito, em que se observa que a sua atuação é representativamente igual nos pares de pares interárea. Tal contribuição é possível devido à localização do SVC na Barra 8, barra central do sistema.

Para as contribuições fixas, têm-se a susceptância do SVC ajustada de modo a regular a tensão na sua barra de instalação e nas contribuições dinâmicas, as variações da susceptância do SVC serão ajustadas pela lei de controle LC01 considerando os parâmetros do dispositivo $K_{svc} = 5,0$ e $T_{svc} = 0,01$ s.

Nas simulações a seguir considera-se a falta descrita anteriormente com duração de 0,63 segundo, tempo esse próximo do tempo crítico de eliminação da falta.

Figura 22 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares $\delta_{1,2}$ e $\delta_{1,3}$, e trajetórias com compensação fixa e com compensação dinâmica.

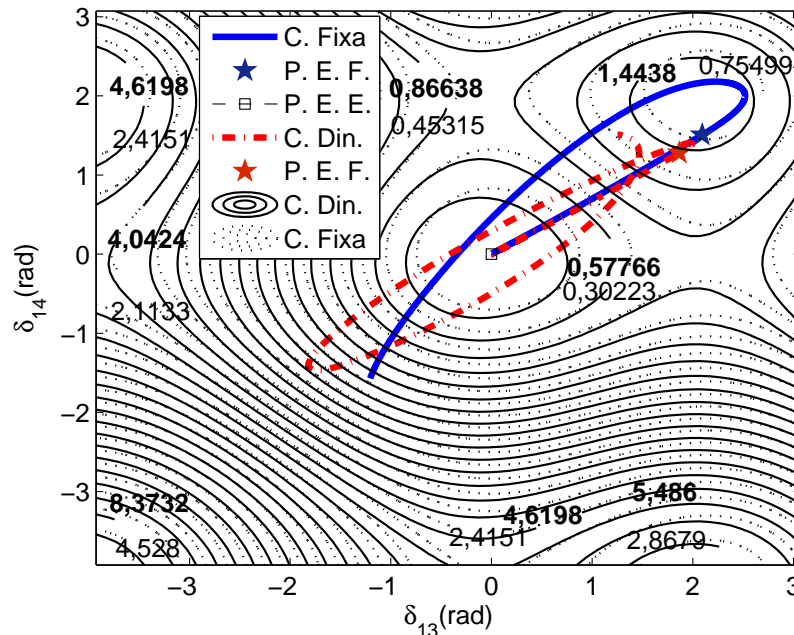


As curvas equipotenciais representadas na Figura 22 constituem-se em um retrato do sistema, depois da eliminação da falta, no instante de maior variação da susceptância controlada pelo SVC, visto que o controle é dinâmico e variante no tempo. Os níveis dados em cada contorno do ponto de equilíbrio são considerados alturas da energia potencial de modo que os valores em negrito representam o sistema com máxima compensação dinâmica (C. Din.) e os valores sem negrito representam o sistema com compensação fixa (C. Fixa) provinda da compensação estática do SVC.

Observando a Figura 22, nota-se que a trajetória do subsistema, formado pelos pares de máquinas (1,2) e (1,3), caminha em direção ao passo energético muitas vezes referido como ponto de sela, ponto esse de menor elevação da cordilheira situada entre dois picos energéticos, enquanto que na Figura 23 a trajetória dos pares de máquinas escolhidos caminha em direção do pico energético. Estes comportamentos diferentes se devem ao fato de que um dos pares de máquinas da Figura 22 pertence à mesma área e sua defasagem é sempre próxima de zero e na Figura 23 as máquinas de cada um dos pares são de áreas diferentes, por isso tem uma defasagem maior.

Nas duas figuras observa-se que as contribuições dinâmicas do SVC atuam no aumento da magnitude das cordilheiras energéticas, o que se pode observar comparando os valores da energia potencial destacados nos pontos extremos da cordilheira energética. A elevação da altura do passo e do pico energético proporcionou que o sistema suportasse a contingência por

Figura 23 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares $\delta_{1,3}$ e $\delta_{1,4}$, e trajetórias com compensação fixa e com compensação dinâmica.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

um período maior de tempo conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Tempo Crítico de Eliminação da Falta do Sistema Kundur.

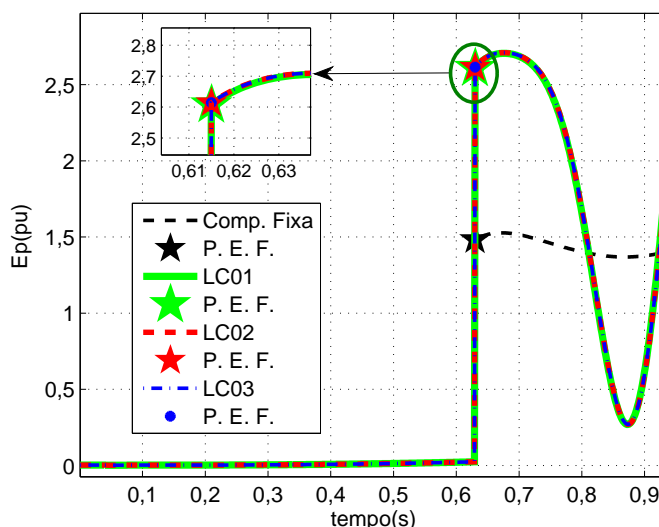
Compensação	Caso Base	LC01	LC02	LC03
Tempo Crítico (s)	0,64 – 0,65	0,74 – 0,75	0,74 – 0,75	0,74 – 0,75

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 2 mostra que a compensação dinâmica do SVC com sua susceptância ajustada pelas leis de controle LC01, LC02 e LC03 melhora significativamente a estabilidade transitória do sistema para a contingência especificada, aumentando o tempo crítico em aproximadamente 100 ms (milissegundos) equivalente a 15% em relação à compensação fixa.

Nas Figuras 22 e 23 são mostrados o comportamento da energia potencial através das curvas equipotenciais e da trajetória de dois pares de máquinas do sistema. Sabe-se que a superfície energética é variável no tempo e as curvas equipotenciais das figuras representam a situação instantânea (uma fotografia) no instante de máxima compensação dos dispositivos FACTS depois da eliminação da falta. Portanto, para analisar o comportamento do sistema original, com m pares de máquinas e comparar as leis de controle aplicadas na simulação, observa-se o comportamento da energia potencial do sistema, de sua derivada temporal e do ângulo formado entre o vetor gradiente da energia potencial e o vetor defasagem das velocidades angulares entre as máquinas do sistema.

Figura 24 - Energia potencial do sistema com compensação fixa e dinâmica conforme as três leis de controle.



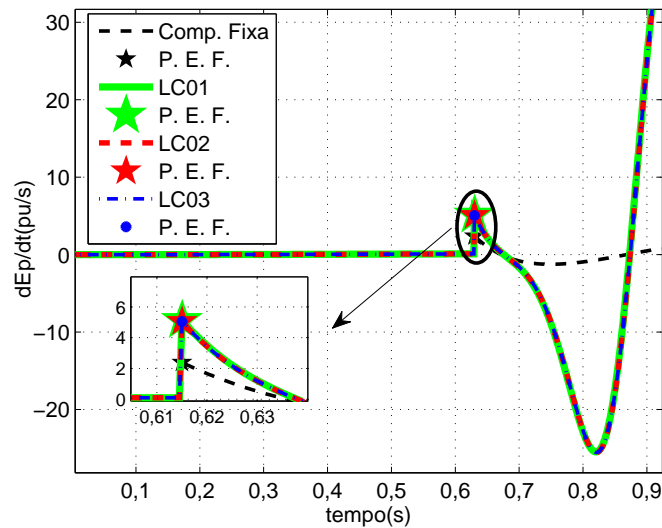
Observa-se em relação à Figura 24 que o sistema com compensação dinâmica teve um aumento significativo da energia potencial imediatamente após a eliminação da falta em comparação com a compensação fixa. Observa-se também que quando a compensação dinâmica do SVC foi ajustada tanto pela lei de controle LC01, como LC02 e LC03, a energia potencial teve comportamento idêntico.

Na Figura 25 observa-se que a variação da energia potencial do sistema com compensação dinâmica é positiva e decrescente no momento imediatamente após a eliminação da falta e que esse comportamento é idêntico nas três leis de controle.

Observa-se na Figura 26 que o ângulo entre o vetor gradiente da energia potencial do sistema e o vetor velocidade das defasagens angulares dos pares de máquinas é menor quando o sistema opera com compensação dinâmica, durante a primeira oscilação. Logo se conclui que além da elevação da energia potencial, fato confirmado pela Figura 25, a direção da trajetória do sistema com compensação dinâmica se afasta do ponto de sela da superfície energética e tende a se aproximar de um de seus picos.

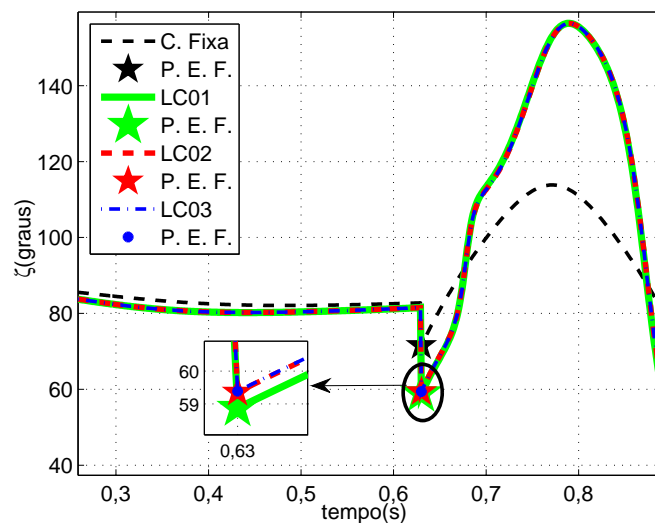
As simulações mostram que as três leis de controle atuaram nesse sistema de forma similar e isso justifica seus princípios, pois elas foram desenvolvidas com os mesmos objetivos. Sendo que os pares de máquinas usados na lei de controle LC02 foram (1,2) e (1,3), e o resultado não seria o mesmo, usando outros pares. Por exemplo, se usar os pares de máquinas (1,3) e (1,4), o tempo crítico de eliminação da falta com aplicação da LC02 situa-se no intervalo 0,70 – 0,71 segundo.

Figura 25 - Derivada temporal do sistema com compensação fixa e dinâmica por meio das três leis de controle.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 26 - Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do sistema com compensação fixa e dinâmica por meio das três leis de controle.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

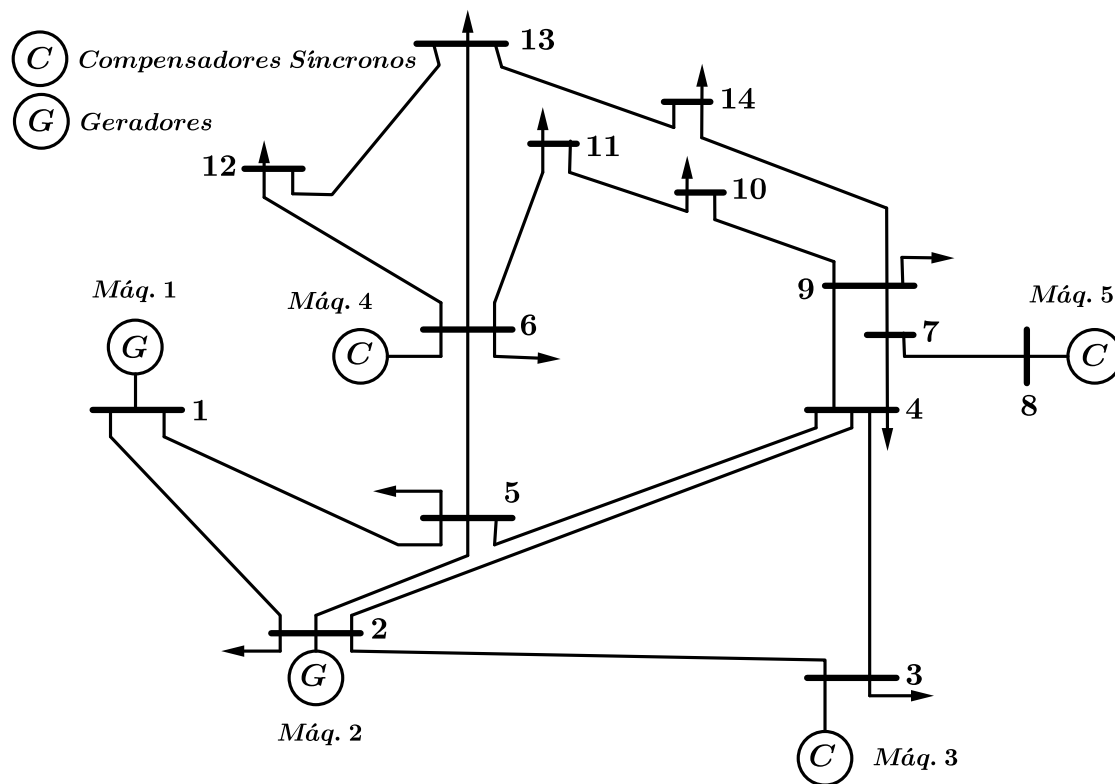
6.2 Sistema IEEE: 5 Máquinas e 14 Barras

O sistema que será denominado por "Sistema IEEE 14 Barras" é composto por 14 barras e 5 máquinas, sendo que duas dessas máquinas são compensadores síncronos, e está representado pelo diagrama unifilar na Figura 27. Os dados das linhas, das barras e das máquinas do Sistema IEEE, sem compensação de dispositivos FACTS, constam no Anexo B.

Este sistema teste é importante no contexto deste estudo porque, diferentemente do Sistema

Kundur, não se identificam áreas ou grupos de máquinas coerentes.

Figura 27 - Sistema IEEE: 14 Barras e 5 Máquinas.



Fonte: Unsuhay e Saavedra (2003).

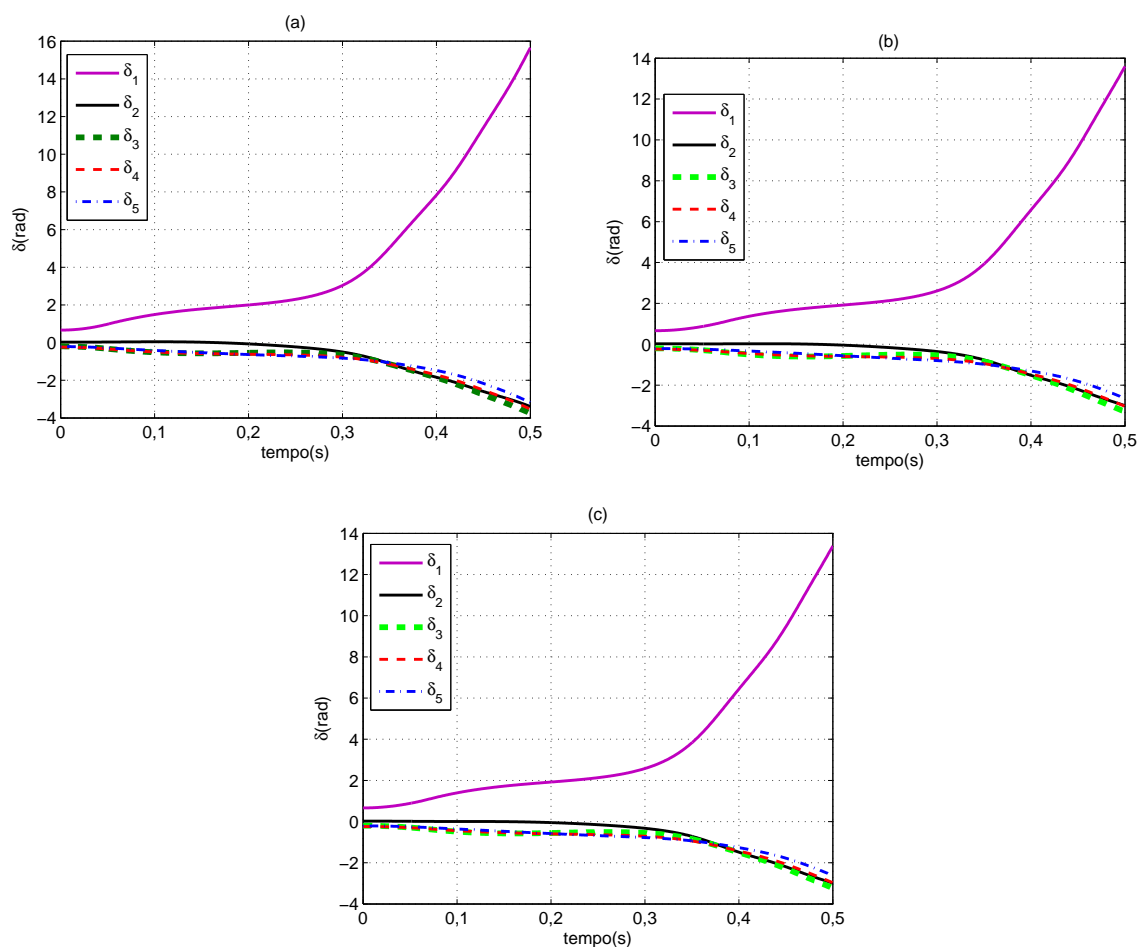
A fim de se fazer um estudo sobre o efeito da compensação de dispositivos FACTS inseridos no Sistema IEEE 14 Barras e a aplicação das leis de controle estabelecidas neste trabalho com vistas à melhoria da estabilidade transitória, consideram-se três contingências do tipo curto-circuito trifásico que serão eliminadas sem chaveamento.

Serão considerados os três curtos-circuitos mais graves, do ponto de vista do tempo crítico de eliminação da falta: curto-circuito na Barra 02, curto-circuito na Barra 04 e curto-circuito na Barra 05.

Nos três casos, a máquina de menor aceleração é a máquina 05 e a de maior é a máquina 01, sendo que máquina 01 perde o sincronismo em relação às demais, conforme Figura 28.

Na Figura 28(a), mostra-se as oscilações dos ângulos das máquinas diante de um curto-circuito na Barra 02, no instante de tempo igual a zero com duração de 0,10 segundo. As curvas da Figura 28(b) correspondem às oscilações das máquinas diante de um curto-circuito na Barra 04, no instante de tempo igual a zero com duração de 0,15 segundo, enquanto que as curvas da Figura 28(c) correspondem as oscilações das máquinas diante de um curto-circuito na Barra 05, no instante de tempo igual a zero com duração de 0,14 segundo.

Figura 28 - Oscilações dos ângulos das máquinas do Sistema IEEE 14 Barras sem compensação: (a) curto-circuito Barra 02; (b) curto-circuito Barra 04 e (c) curto-circuito Barra 05.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se por meio da Figura 28 que a máquina 01 perde o sincronismo nos três casos de curto-circuito. Logo, a ação dos dispositivos FACTS deve ser no sentido de estabelecer o sincronismo entre a máquina 01 e as demais máquinas do sistema. Assim, dentre as possíveis alocações de dispositivos FACTS, considera-se um SVC instalado na Barra 09 e um TCSC instalado na LT: 01 – 05 para os três casos de curto-circuito. A escolha desses dispositivos se justifica pelo fato de que os coeficientes fator de efeito, mostrados na Tabela 3, apresentam melhores índices na Máquina 01 para o caso do TCSC e na Máquina 05 (menor aceleração) para o caso do SVC.

Nas simulações a seguir, considera-se a susceptância, em regime permanente, do SVC ajustada de modo a regular a tensão na sua barra de instalação e a contribuição fixa do TCSC anulando 20% da reatância da LT. As contribuições dinâmicas serão ajustadas pelas leis de controle LC01, LC02 e LC03 considerando os parâmetros do dispositivo $K_{svc} = 1,0$, $T_{svc} = 0,01s$, $K_{csc} = 1,0$ e $T_{csc} = 0,01s$. Sendo que os pares de máquinas usados na LC02 foram (1,3) e (2,3).

Tabela 3 - Fator de Efeito do SVC (Barra 09) e do TCSC (LT:01 – 05), Sistema IEEE 14 Barras.

Pares de Máquinas	Fator de Efeito	
	SVC(Barra 09)	TCSC (LT:01 – 05)
1 – 2	0,0161	-0,3582
1 – 3	0,0243	0,6321
1 – 4	0,0678	2,3417
1 – 5	0,0968	1,8720
2 – 3	0,0223	0,0916
2 – 4	0,0697	0,3887
2 – 5	0,0963	0,2981
3 – 4	0,0752	-0,4623
3 – 5	0,0950	-0,3245
4 – 5	0,1304	-0,6172

Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.2.1 Curto-Circuito na Barra 02.

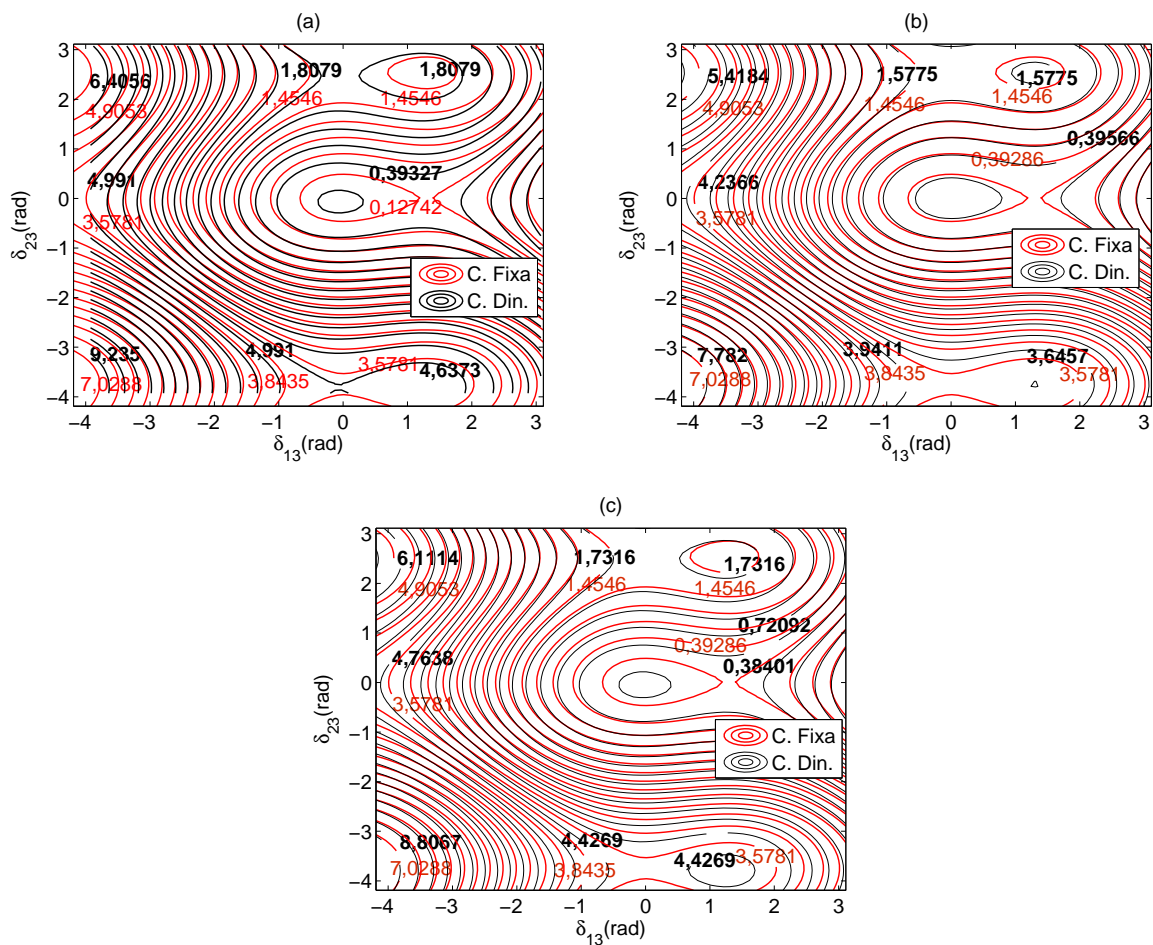
Considera-se um curto-circuito na Barra 02 no instante de tempo igual a zero com duração de 0,08 segundo, tempo esse próximo ao tempo crítico de eliminação da falta do sistema sem compensação que se encontra no intervalo 0,09 – 0,10 segundo. A eliminação da falta se dá sem chaveamento.

As curvas equipotenciais representadas na Figura 29 constituem-se em um retrato do sistema no instante de maior variação dos dispositivos FACTS, visto que o controle é dinâmico e variante no tempo. Os níveis dados em cada contorno do ponto de equilíbrio são consideradas alturas da energia potencial. Os níveis em azul representam o sistema com compensação fixa (C. Fixa) enquanto que os valores em preto representam os níveis da energia potencial do sistema com compensação dinâmica.

Observa-se que a compensação dinâmica (C. Din.) dos dispositivos FACTS através das leis de controle LC01, LC02 e LC03 elevou os níveis da cordilheira energética do sistema representado pelos pares de máquinas (1,3) e (2,3), em relação à compensação fixa (C. Fixa), sendo que a lei LC01 apresentou uma ligeira vantagem em relação às demais.

Na Figura 30 é mostrado que as defasagens angulares dos pares de máquinas (1,3) e (2,3) tiveram menor variação durante a primeira oscilação nos casos de compensação dinâmica (LC01, LC02 e LC03) em relação à compensação fixa, ou seja, aumentou a dificuldade da trajetória ultrapassar a cordilheira energética do sistema. Observa-se também que houve um desvio mais acentuado da trajetória em compensação dinâmica (LC01) tomando uma direção mais íngreme no vale energético, porém as variações de suas defasagens angulares são ligeiramente maiores em relação à compensação dinâmica das leis de controle LC02 e LC03.

Figura 29 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares 1-3 e 2-3 do Sistema IEEE 14 Barras: (a) LC01, (b) LC02 e (c) LC03.

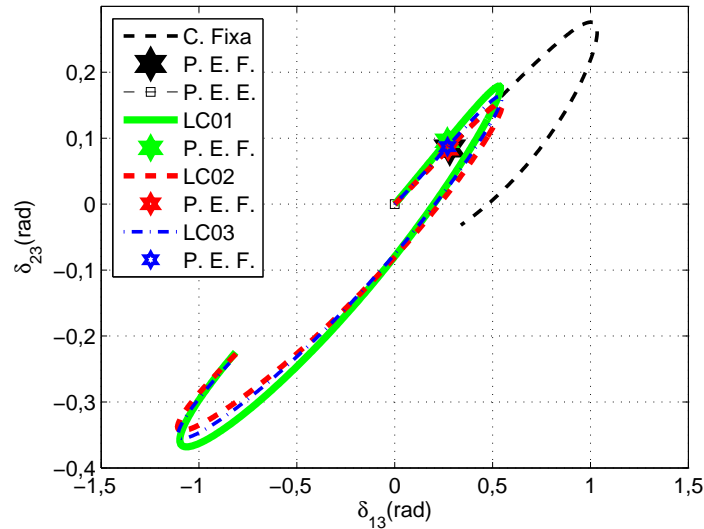


Fonte: Elaboração do próprio autor.

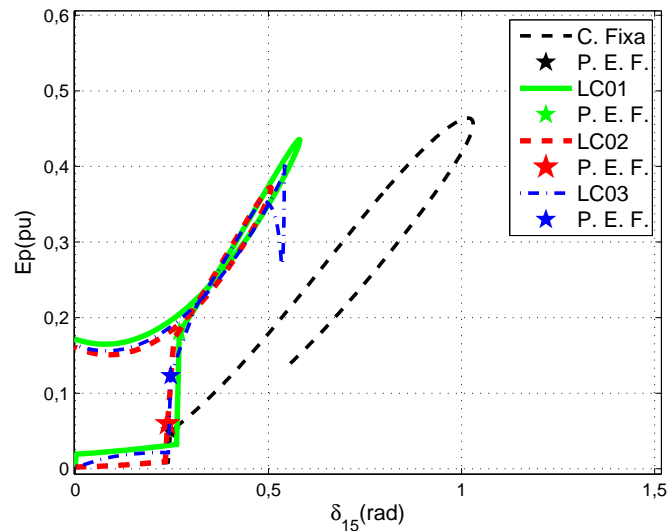
Observa-se na Figura 31 que a energia potencial máxima na primeira oscilação do sistema com compensação fixa e com compensação dinâmica apresenta valores bem próximos, o que já era de se esperar, pois a energia cinética que os rotores das máquinas adquirem durante a falta é similar e é convertida em energia potencial depois da eliminação da falta. Um fato importante que deve ser observado nesta figura é que a defasagem entre as máquinas de maior e de menor aceleração diminui quando o sistema está dotado de compensação dinâmica. Isto significa que a trajetória do sistema ficou mais distante da cordilheira energética.

Na Figura 31 mostra-se que a energia potencial máxima da primeira oscilação do sistema com compensação dinâmica através da lei de controle (LC01) é maior que as demais, enquanto que a Figura 32 mostra que a desaceleração da energia potencial do sistema após a eliminação da falta também é maior quando ele é submetido à compensação dinâmica da lei de controle (LC01), mostra também que o período de desaceleração é praticamente o mesmo nos três casos de compensação dinâmica e inferior ao caso de compensação fixa.

Figura 30 - Trajetórias das defasagens angulares 1-3 e 2-3 do sistema IEEE 14 Barras.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

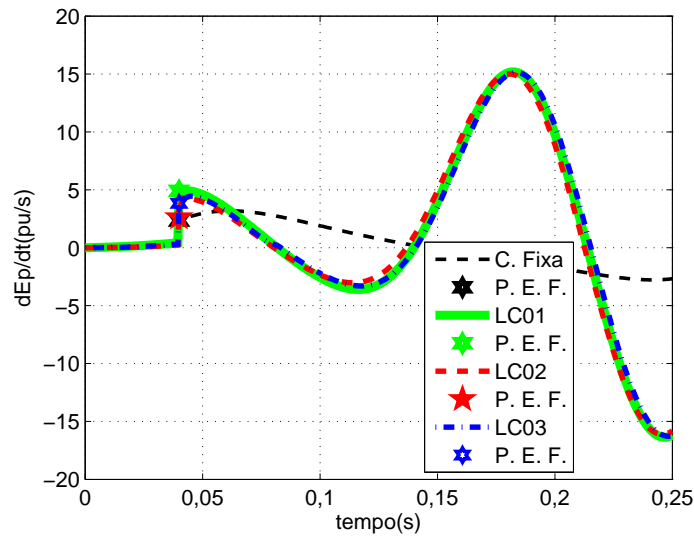
Figura 31 - Energia potencial do sistema versus defasagem angular na primeira oscilação, com $t_{ch} = 0,08$ segundo.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

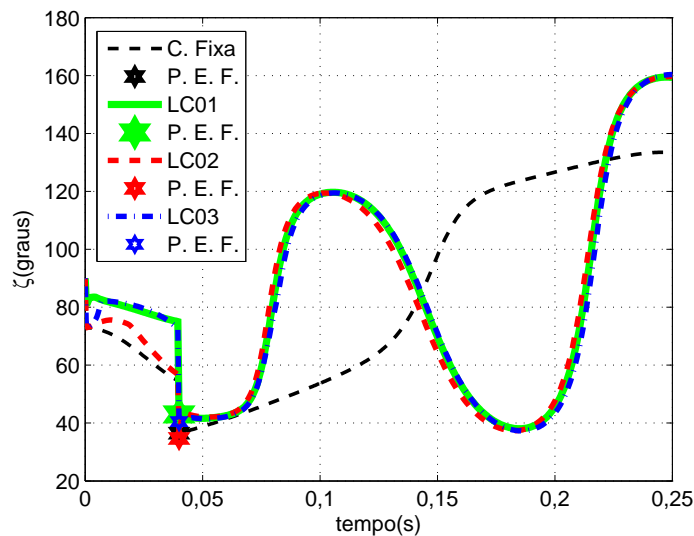
Percebe-se também, através da Figura 32, que a primeira oscilação durou aproximadamente 0,15 segundo quando o sistema recebia a compensação dinâmica dos dispositivos FACTS por meio das leis de controle enquanto que a primeira oscilação do sistema com compensação fixa foi de aproximadamente 0,30 segundo.

Na Figura 33, também mostra-se o comportamento idêntico das três leis de controle, através do gráfico que representa a oscilação do ângulo entre o vetor gradiente da energia potencial do sistema e o vetor velocidade das defasagens angulares dos pares de máquinas, durante a

Figura 32 - Derivada temporal da energia potencial do Sistema IEEE 14 Barras.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 33 - Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do Sistema IEEE 14 Barras.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

primeira oscilação. Observa-se também que imediatamente após a eliminação da falta, o ângulo do sistema com compensação dinâmica se mantém quase constante enquanto que com compensação fixa, aumenta nesse intervalo de tempo. Isto significa que a trajetória do sistema com compensação dinâmica se mantém numa direção em relação ao ponto de máximo local enquanto que a trajetória do sistema com compensação fixa se aproxima do ponto de sela.

Pode-se concluir, neste caso, que a compensação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS estabelecidas pelas leis de controle LC01, LC02 e LC03 durante a primeira oscilação, elevou a cordilheira energética do sistema tornando sua trajetória mais íngreme; direcionou a trajetória

do sistema imediatamente após a falta para aproximadamente 40 graus da direção do gradiente e diminuiu o tempo da primeira oscilação tornando o sistema mais estável conforme valores dos tempos críticos de eliminação da falta mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tempo Crítico de Eliminação da Falta na Barra 02, Sistema IEEE 14 Barras.

Curto-Circuito	Tempo Crítico (s)			
	S. Comp.	LC01	LC02	LC03
Barra 02	0,09 – 0,10	0,13 – 0,14	0,13 – 0,14	0,13 – 0,14

Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.2.2 Curtos-Circuitos: Barra 04 e Barra 05

Considera-se um curto-circuito instalado no instante de tempo igual a zero com duração de 0,12 segundo, tempo esse próximo do tempo crítico de eliminação da falta do sistema sem compensação que é igual a 0,14 – 0,15 segundo na Barra 04 e 0,13 – 0,14 segundo, na Barra 05. A eliminação da falta se dá sem chaveamento de linha.

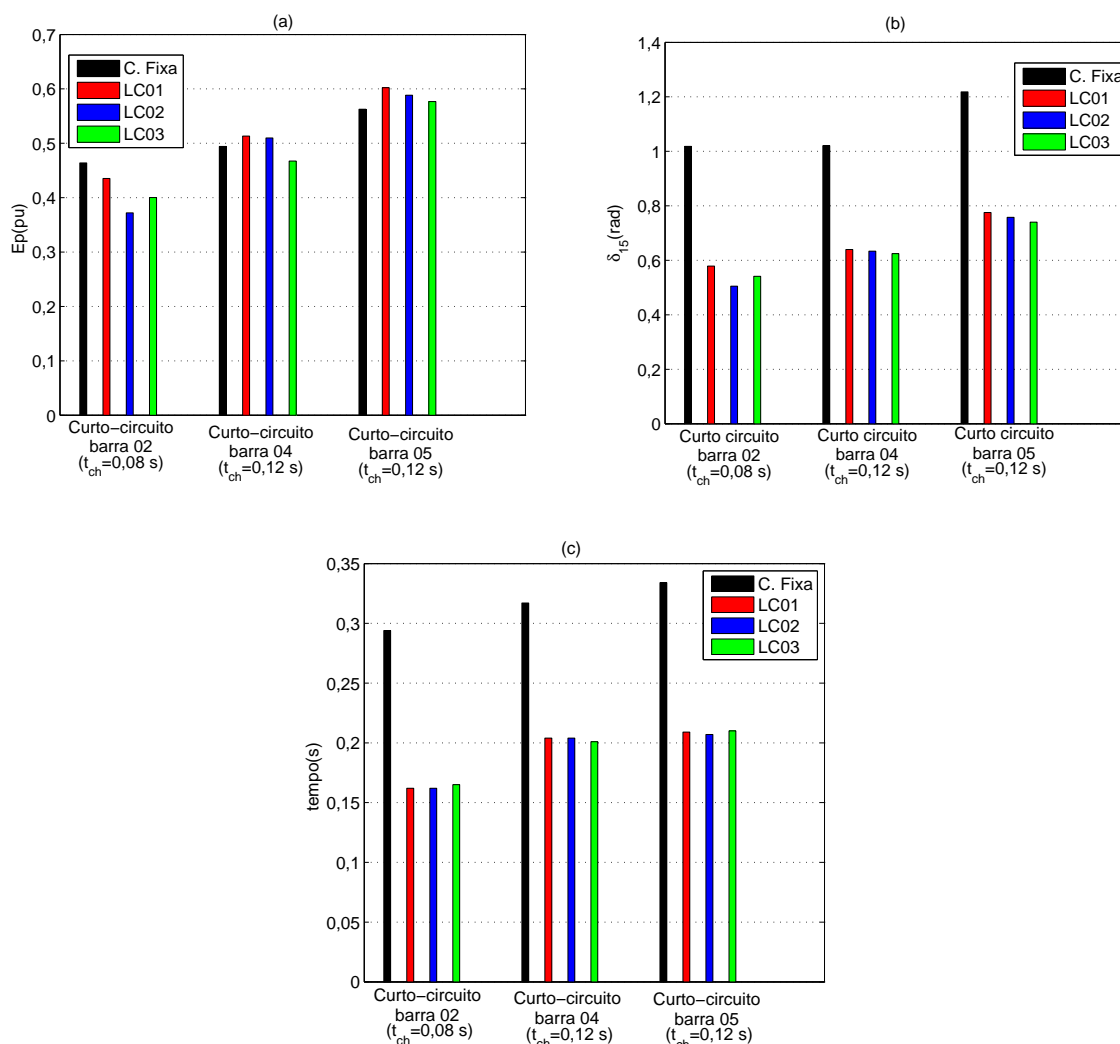
Na Figura 34(a) é mostrado que não há uma diferença significativa da energia potencial máxima na primeira oscilação do sistema entre os casos com compensação dinâmica e a compensação fixa tanto para o caso do curto-circuito na Barra 02, mostrado anteriormente, como nos casos do curto-circuito nas Barras 04 e 05. A Figura 34(b) mostra que a compensação dinâmica proporcionou uma redução significativa na defasagem angular entre as máquinas 1 e 5 enquanto que a Figura 34(c) mostra que a mesma compensação proporcionou uma redução no tempo de elevação da energia potencial durante a primeira oscilação.

Observa-se na Figura 35, que imediatamente após a eliminação da falta, o ângulo do sistema com compensação dinâmica se mantém quase constante enquanto que com compensação fixa, aumenta nesse intervalo de tempo. Isto significa que a trajetória do sistema com compensação dinâmica se mantém numa direção em relação ao ponto de máximo local enquanto que a trajetória do sistema com compensação fixa se aproxima do ponto de sela.

Portanto, conclui-se que a compensação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS estabelecida pelas leis de controle, elevou a superfície energética do sistema de modo que sua trajetória tomou uma direção mais íngreme, diminuiu o valor máximo da defasagem angular entre os pares de máquinas aumentando o sincronismo entre elas e diminuiu o tempo da primeira oscilação tornando o sistema mais estável conforme valores dos tempos críticos de eliminação da falta mostrados na Tabela 5.

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram a equivalência entre as três leis de controle e sua contribuição significativa com vistas à estabilidade transitória do Sistema IEEE 14 Barras,

Figura 34 - Primeira oscilação do sistema IEEE 14 barras: (a) Energia potencial máxima, (b) Defasagem angular máxima, (c) Tempo de duração da primeira oscilação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

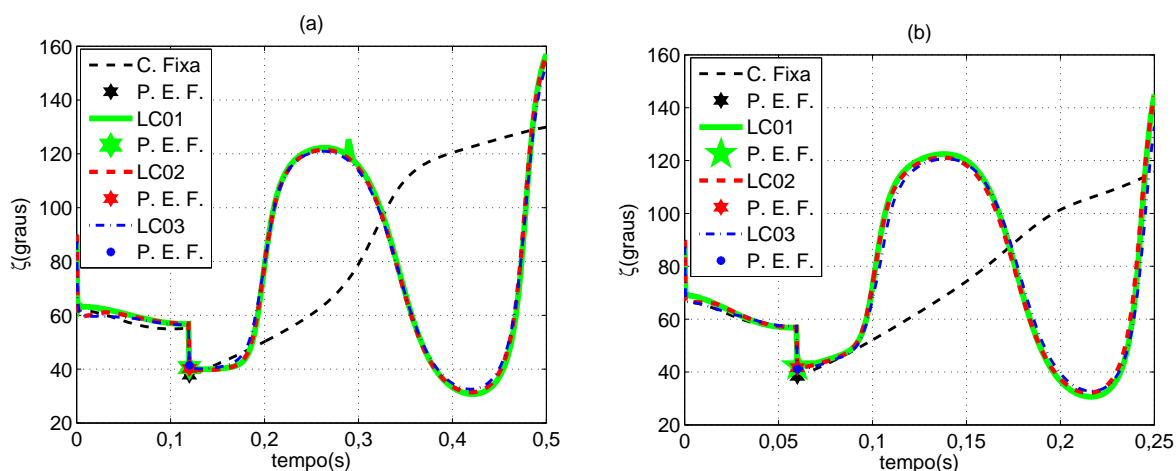
Tabela 5 - Tempo crítico de eliminação da falta nas Barras 04 e 05, Sistema IEEE 14 Barras.

Curto-Circuito	Tempo Crítico (s)			
	S. Comp.	LC01	LC02	LC03
Barra 04	0,14 – 0,15	0,17 – 0,18	0,17 – 0,18	0,17 – 0,18
Barra 05	0,13 – 0,14	0,17 – 0,18	0,16 – 0,17	0,17 – 0,18

Fonte: Elaboração do próprio autor.

promovendo um aumento no tempo crítico de aproximadamente 21% para o curto-circuito na Barra 04 e 30% para curto-circuito na Barra 05, enquanto que a Tabela 4 mostra que a compensação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS através das três leis de controle promoveu um aumento no tempo crítico de aproximadamente 44% para o curto-circuito na Barra 02.

Figura 35 - Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do Sistema IEEE 14 Barras: (a) Curto-circuito Barra 04, (b) Curto-circuito Barra 05.

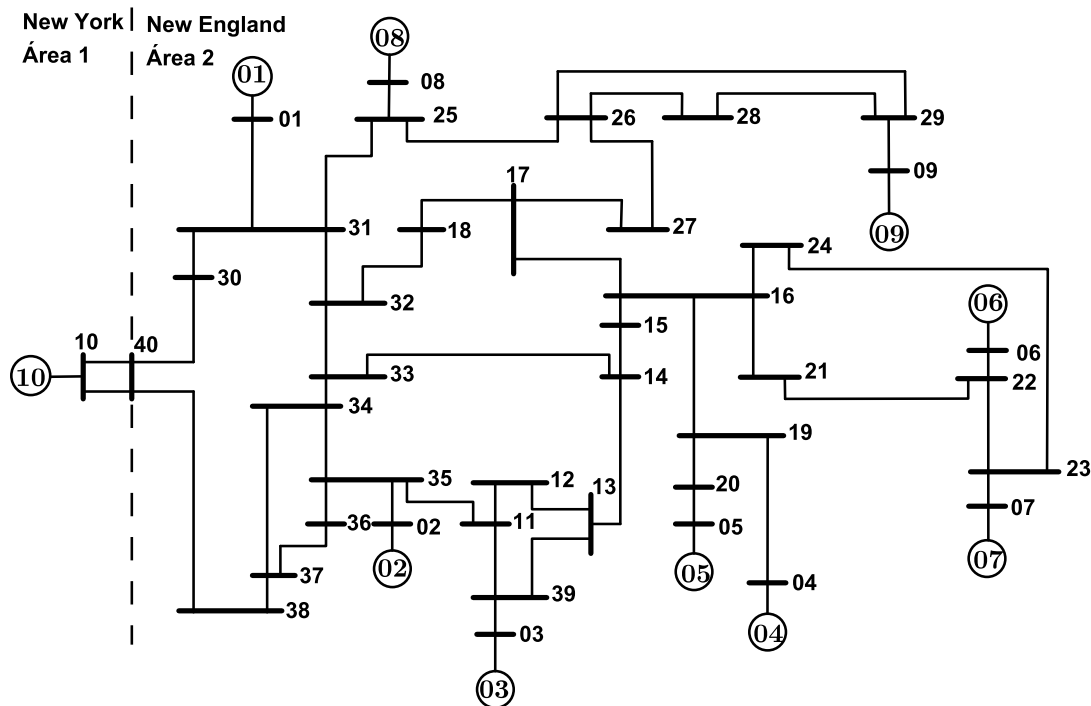


Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.3 Sistema New England: 10 Máquinas e 39 Barras

O sistema que será denominado por "Sistema New England" é composto por 10 geradores, 39 barras e 46 linhas de transmissão, representado na Figura 36. Os dados de cargas e de linhas, em regime permanente, constam no Anexo C.

Figura 36 - Diagrama unifilar do Sistema New England.



Fonte: Mac-Leod (1992).

A fim de se fazer um estudo sobre o efeito da compensação de dispositivos FACTS inseridos no Sistema New England e a aplicação das leis de controle estabelecidas neste trabalho com vistas à melhoria da estabilidade transitória, consideram-se contingências, nas barras de geração, do tipo curto-circuito trifásico que serão eliminadas sem chaveamento. Para cada contingência considera-se a alocação de múltiplos dispositivos FACTS e aplicam-se as leis de controle estabelecidas neste trabalho. Inicialmente, considera-se um curto-circuito na Barra 01 com eliminação da falta sem chaveamento.

Nas simulações deste sistema, consideram-se as contribuições dinâmicas dos dispositivos FACTS ajustadas pelas leis de controle LC01, LC02 e LC03, estabelecidas neste trabalho, com parâmetros atribuídos conforme valores típicos: $T_{csc} = T_{svc} = 0,001s$, $K_{csc} = K_{svc} = 1$ e a compensação do TCSC em regime permanente é de 20% da LT em que está alocado.

6.3.1 Curto-Circuito na Barra 01

No sistema apresentado sem compensação, quando submetido a um curto-circuito na Barra 01 com eliminação da falta sem chaveamento, a máquina 10 perde o sincronismo em relação às outras máquinas do sistema. Portanto a ação de controle deve ser voltada para os $(n-1)$ pares de máquinas Linearmente Independentes (L.I.) que contém a máquina 10.

Com vistas à melhoria da estabilidade transitória do Sistema New England devido, especificamente, ao curto-circuito na Barra 01, considera-se a alocação de dois SVCs, sendo um na Barra 15 e outro na Barra 36, e um TCSC na linha 30–31. Pois, de acordo com a análise preliminar dos fatores de efeito correspondentes aos dispositivos FACTS, observou-se que os dispositivos SVCs inseridos nas Barras 15 e 36 apresentaram "bons" índices para os pares de máquinas em questão. Observou-se também a contribuição positiva do TCSC instalado na linha 30–31, em relação ao sincronismo da máquina 10.

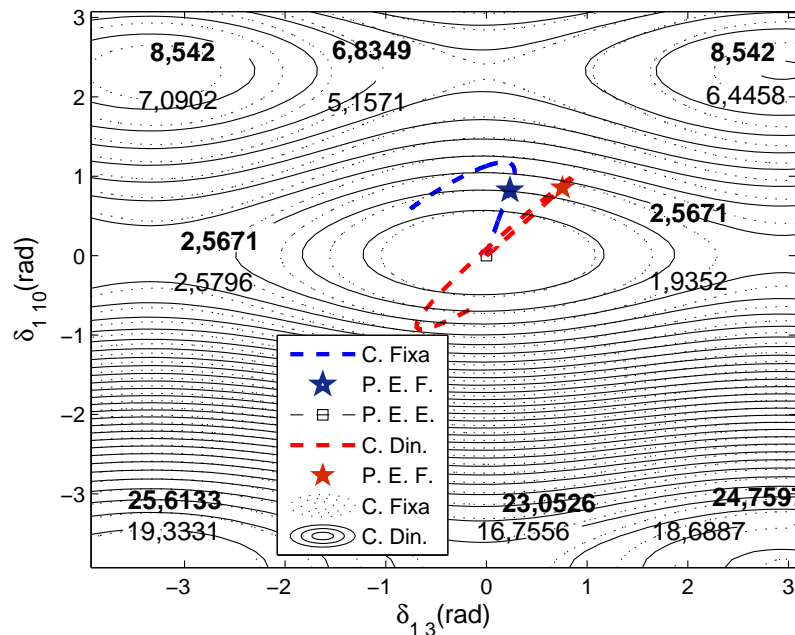
Considera-se um curto-circuito no instante de tempo igual a zero com duração de 0,40 segundo, tempo esse próximo do tempo crítico de eliminação da falta do sistema sem compensação que é igual a 0,42 – 0,43 segundo na Barra 01.

De acordo com simulação, a alocação de múltiplos dispositivos FACTS dotados do controle LC01 resultou em um aumento significativo na estabilidade transitória do sistema, pois o tempo crítico de eliminação da falta foi de 0,42 – 0,43 segundo, sem compensação e com compensação dinâmica esse tempo passou para 0,69 – 0,70 segundo.

As curvas equipotenciais da Figura 37 mostram que houve uma elevação na cordilheira da superfície energética tornando o caminho da trajetória com a Compensação Dinâmica (C. Din.) mais íngreme em relação à trajetória com a Compensação Fixa (C. Fixa), além disso, a trajetória com a compensação dinâmica durante e imediatamente após a falta, representada pela

linha sólida, está em uma direção de um ponto de máximo local, indicando que a variação da energia potencial é próxima de máxima, ou seja, o ângulo entre a trajetória e o vetor gradiente, está próximo de zero.

Figura 37 - Curvas equipotenciais e trajetórias das defasagens angulares entre os pares de máquinas (1,3) e (1,10), com $t_{ch} = 0,40$ s.

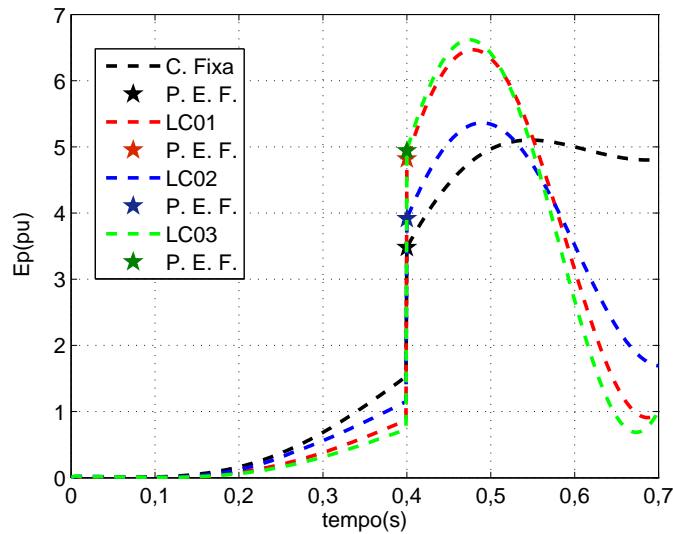


Fonte: Elaboração do próprio autor.

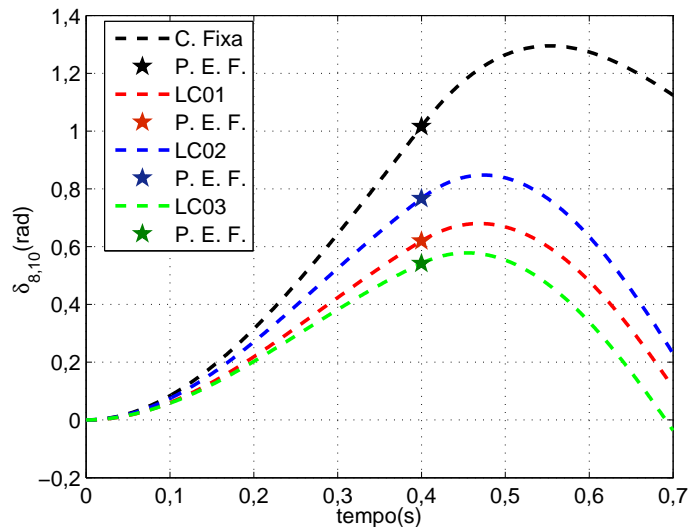
Observa-se que a Figura 37 está em um subespaço de dimensão dois, enquanto que o problema original que tem dimensão m (número de pares de máquinas) e não se pode esperar que exposto no parágrafo anterior ocorresse com todos os subespaços de dimensão dois. O que não pode ser considerado como uma limitação do método.

Nas Figuras 38, 39 e 40 mostram-se o comportamento da energia potencial de todo o sistema e do ângulo entre o vetor gradiente de energia potencial total e o vetor defasagens das velocidades angulares entre os pares de máquinas quando é submetido à compensação fixa dos múltiplos dispositivos FACTS e a compensação dinâmica através das leis de controle LC01, LC01 e LC03.

De acordo com a Figura 38, a energia potencial do sistema com compensação dinâmica, imediatamente após a eliminação da falta durante a primeira oscilação, teve um crescimento maior e mais rápido, em relação ao sistema com compensação fixa, enquanto que a Figura 39 mostra que a defasagem angular entre as máquinas de maior e menor aceleração do sistema, durante a primeira oscilação, atingiu valores menores quando o sistema foi submetido a compensação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS através das leis de controle LC01, LC01 e LC03.

Figura 38 - Energia potencial do sistema, com $t_{ch} = 0,40$ s.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

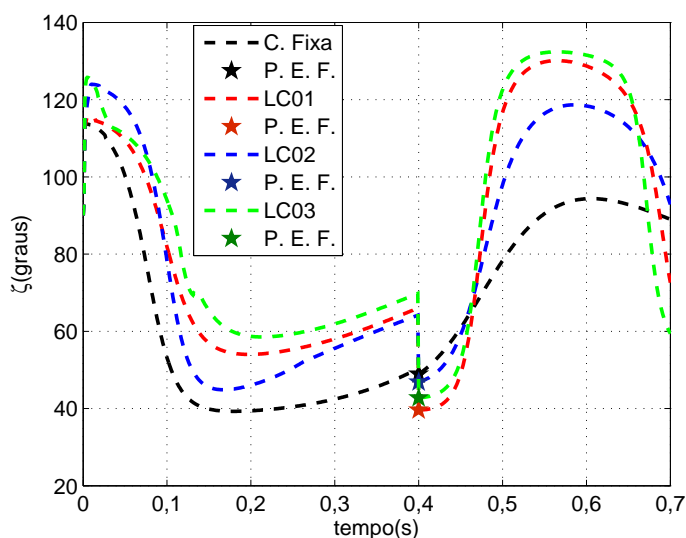
Figura 39 - Defasagem angular entre os pares de máquinas (8,10), com $t_{ch} = 0,40$ s.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 40 mostra-se que durante a primeira oscilação, o ângulo entre o vetor gradiente da energia potencial do sistema e o vetor das defasagens das velocidades angulares entre os pares de máquinas imediatamente após a eliminação da falta, é menor para o sistema com compensação dinâmica.

Portanto conclui-se que, neste caso, a compensação dinâmica dos múltiplos FACTS com controle estabelecido pelas leis propostas, durante a primeira oscilação, elevou a cordilheira do vale energético que circunda o ponto de equilíbrio estável (P. E. E.) do sistema multimáquinas e alterou a trajetória do sistema para uma direção próxima do gradiente dificultando a ultrapassa-

Figura 40 - Ângulo entre o vetor gradiente da energia potencial e o vetor defasagens das velocidades angulares entre os pares de máquinas do sistema, com $t_{ch} = 0,40$ s.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

gem pela cordilheira energética, tornando o sistema mais estável conforme valores dos tempos críticos de eliminação da falta mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Tempo crítico de eliminação do curto-circuito na Barra 01, Sistema New England.

Curto-Circuito	Tempo Crítico (s)			
	S. Comp.	LC01	LC02	LC03
Barra 01	0,42 – 0,43	0,69 – 0,70	0,68 – 0,69	0,69 – 0,70

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Tabela 6 mostra que as três leis de controle obtiveram resultados semelhantes justificando o mesmo princípio de ação. Usaram-se os pares de máquinas (2,9) e (1,10) na aplicação da lei de controle LC02, que é um caso particular da lei LC03.

6.3.2 Curto-Circuito nas outras Barras de Geração

As simulações representadas pelas figuras a seguir correspondem aos curtos-circuitos nas barras de geração (02,03,...,10) do Sistema New England no instante de tempo igual a zero com duração de tempo inferior e próximo ao tempo crítico de eliminação de cada curto-circuito do sistema sem compensação. A alocação dos múltiplos dispositivos FACTS para cada curto-circuito se dá mediante análise dos coeficientes de eficácia e fator de efeito com vistas ao sincronismo dos $n - 1$ pares de máquinas L. I. que contém a máquina que perde o sincronismo quando o sistema torna-se instável, conforme Tabela 7.

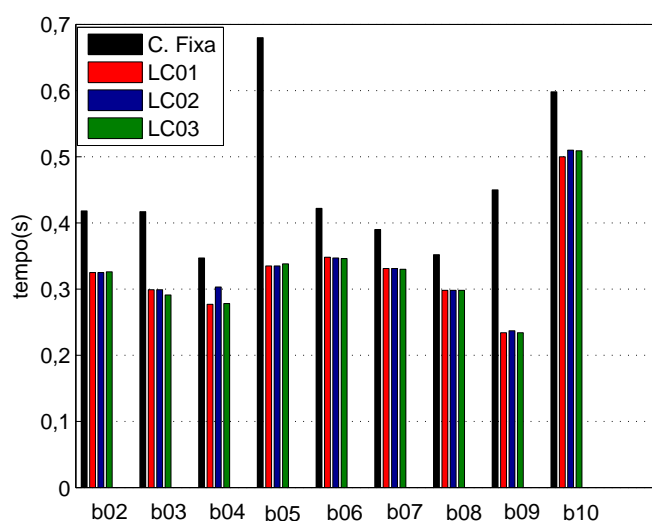
Tabela 7 - Dispositivos FACTS alocados, pares de máquinas usados na LC02 e valor do tempo de duração da falta (t_{ch}), para cada curto-circuito. Sistema New England.

Falta	Alocação de FACTS		Máquinas	$t_{ch}(s)$
	SVC	TCSC		
Barra01	B15, B36	LT(30-31)	(2,9) e (1,10)	0,40
Barra02		LT(02-35), LT(26-29), LT(32-33)	(2,3) e (2,10)	0,17
Barra03	B14, B35, B39	LT(03-39), LT(14-15), LT(32-33)	(2,3) e (2,10)	0,20
Barra04	B16	LT(04-19), LT(05-20)	(2,3) e (2,10)	0,17
Barra05	B19	LT(05-20)	(5,6) e (1,10)	0,17
Barra06	B16	LT(23-24), LT(38-40)	(4,6) e (1,10)	0,20
Barra07	B16	LT(23-24), LT(38-40)	(4,7) e (1,10)	0,20
Barra08	B26	LT(08-25), LT(17-27)	(4,8) e (1,10)	0,20
Barra09	B27	LT(26-29)	(4,9) e (1,10)	0,10
Barra10	B13	LT(02-35), LT(26-29), LT(32-33)	(4,5) e (1,10)	0,45

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A simulação de cada curto-circuito será independente uma da outra, considerando o sistema com compensação fixa dos múltiplos dispositivos FACTS e com compensação dinâmica dos dispositivos regida pelas leis de controle LC01, LC02 e LC03.

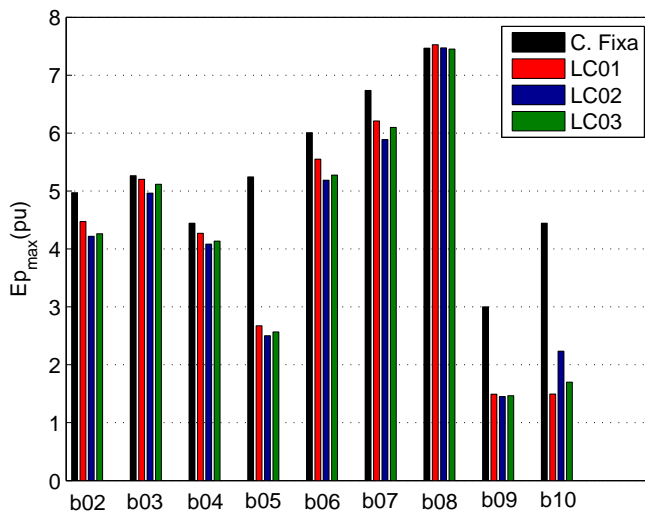
Figura 41 - Tempo da primeira oscilação do Sistema New England.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 41 observa-se que quando o sistema é submetido à compensação dinâmica por meio das leis de controle, o tempo de evolução da primeira oscilação é menor em relação à compensação fixa em todos os casos de curto-circuito apresentados. Observa-se também que para os casos de curto-circuito na Barra 05 e na Barra 09, esse tempo é aproximadamente 50% menor.

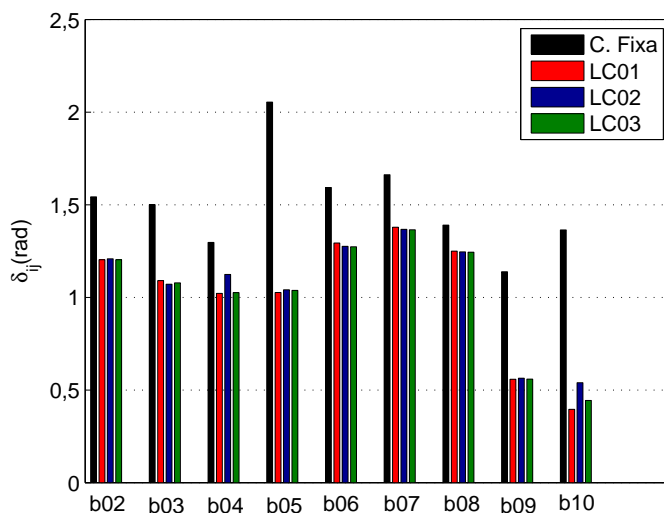
Figura 42 - Energia potencial máxima da primeira oscilação do Sistema New England.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se através da Figura 42 que o valor da energia potencial máxima atingida durante a primeira oscilação do sistema com compensação dinâmica é bem próximo do valor com compensação fixa, exceto para os casos de curto-circuito nas Barras 05, 09 e 10 que apresentam valores superiores para o sistema com compensação fixa.

Figura 43 - Defasagem entre as máquinas de maior e menor aceleração no ponto de $E_{p_{max}}$ da primeira oscilação do Sistema New England.

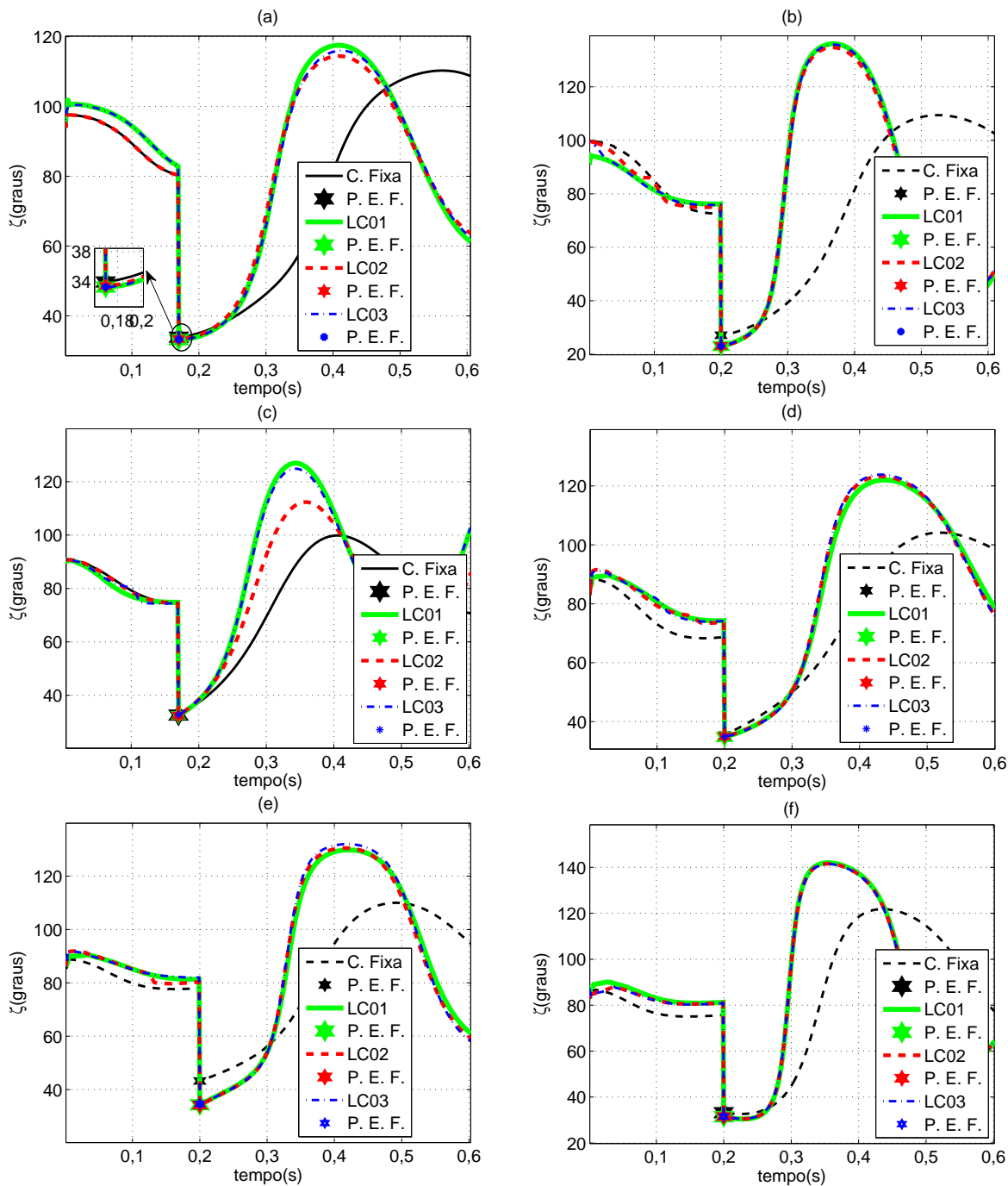


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se por meio da Figura 43 que a defasagem angular entre as máquinas de maior e menor aceleração é sempre menor quando o sistema atua com compensação dinâmica e a diferença é mais acentuada exatamente nos casos onde a energia potencial máxima é menor.

Portanto conclui-se que, nos casos de curto-circuito nas Barras 02, 03, 04, 06, 07 e 08, a compensação dinâmica dos múltiplos FACTS com controle estabelecido pelas leis propostas, durante a primeira oscilação, elevou a superfície do vale energético que circunda o ponto de equilíbrio estável (P. E. E.) do SM diminuindo a defasagem angular entre os pares de máquinas e mantendo a energia potencial máxima da primeira oscilação.

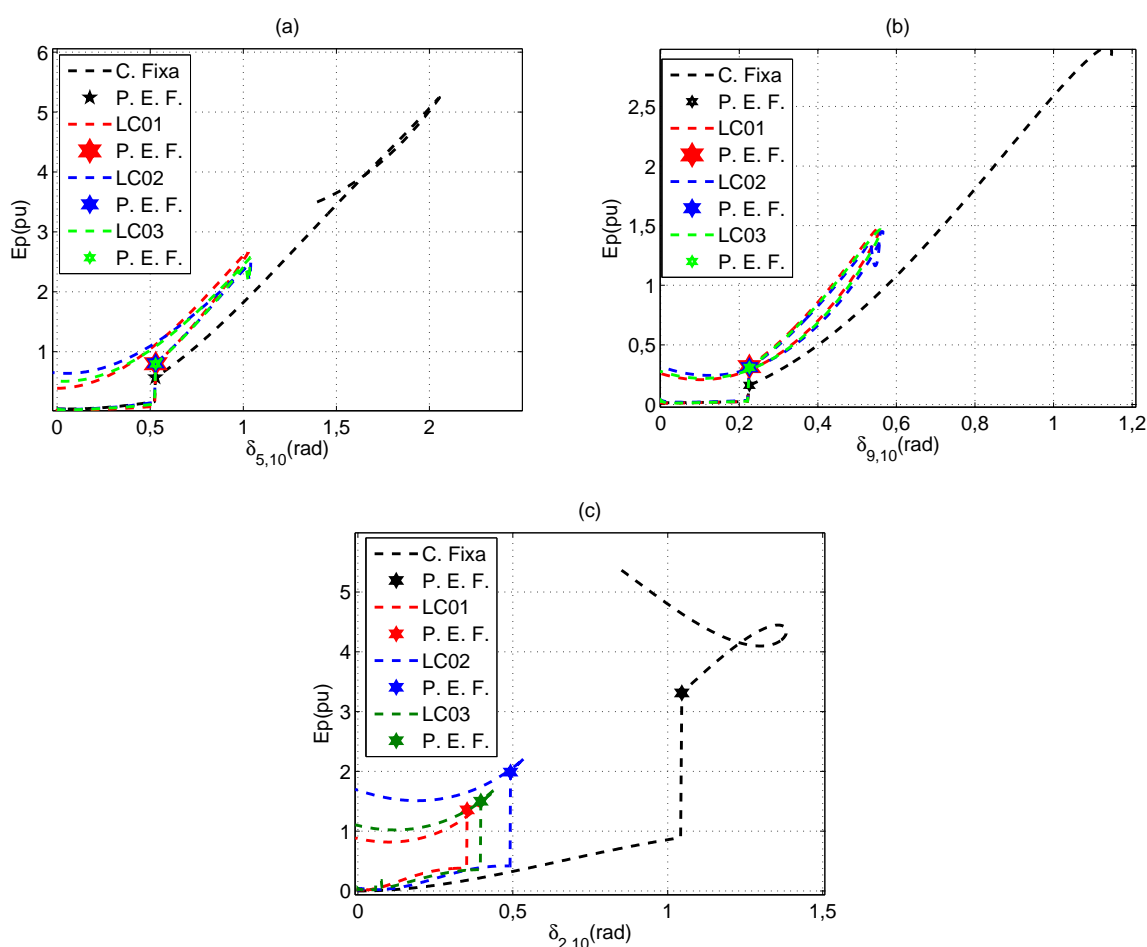
Figura 44 - Ângulo entre ∇Ep e \mathbf{W} do Sistema New England com curto-circuito Barra: (a) 02, (b) 03, (c) 04, (d) 06, (e) 07 e (f) 08.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se na Figura 44, que imediatamente após a eliminação da falta, o ângulo entre a trajetória do sistema com compensação dinâmica e o vetor gradiente da energia potencial diminuiu em relação a compensação fixa, isto significa que a ação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS alterou a trajetória do sistema para uma posição mais próxima do gradiente para os casos de curto-circuito nas Barras 02, 03, 06, 07, e 08, dificultando sua ultrapassagem pela cordilheira energética, tornando o sistema mais estável conforme valores dos tempos críticos de eliminação da falta mostrados na Tabela 8. No caso de curto-circuito na Barra 04, o referido ângulo se manteve quase que inalterado em relação a compensação fixa.

Figura 45 - Energia potencial versus defasagem do par de máquinas mais afetado pelo curto-circuito na Barra: (a) 05, (b) 09 e (c) 10.



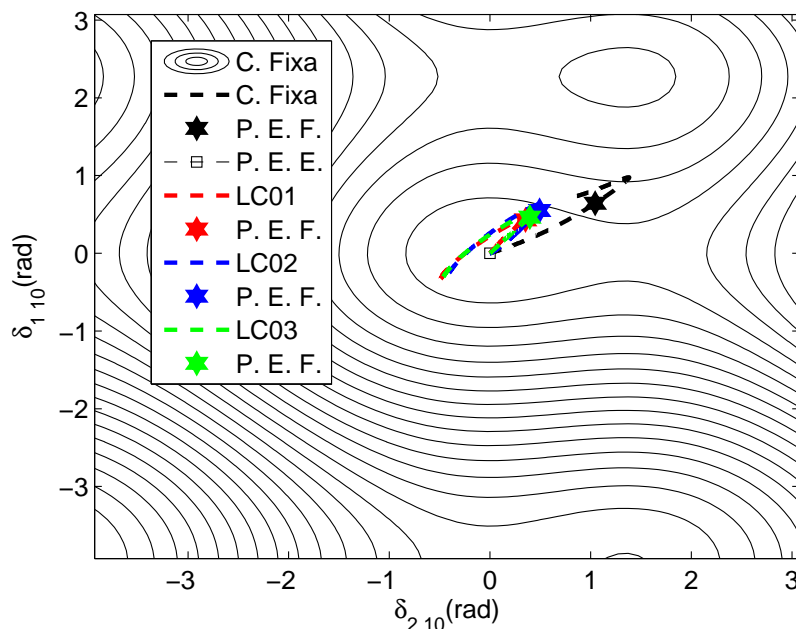
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nos casos de curto-circuito nas Barras 05, 09 e 10, houve uma redução significativa de energia potencial máxima da primeira oscilação do sistema com compensação dinâmica em relação à compensação fixa, mas também houve uma redução, aproximadamente na mesma proporção, na defasagem angular. A Figura 45 mostra que houve uma elevação na superfície do vale energético que circunda o ponto de equilíbrio estável (P. E. E.) do sistema multimáquinas, pois observa-se que imediatamente após a eliminação da falta a energia potencial é superior quando

o sistema está em compensação dinâmica e a defasagem angular é inferior em relação á compensação fixa, confirmando uma melhora significativa na estabilidade transitória do sistema, conforme Tabela 8.

Observando a Figura 45(c), percebe-se que a ação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS atuou de forma significativa no período de falta diminuindo a defasagem angular e alterando a trajetória do sistema quando submetido a um curto-circuito na Barra 10. Depois da eliminação da falta, essa defasagem foi quase nula. A alteração da trajetória para uma posição mais íngreme, próxima do gradiente, é confirmada pela Figura 46.

Figura 46 - Curvas equipotenciais vistas no plano das defasagens angulares $\delta_{2,10}$ e $\delta_{1,10}$, trajetórias do Sistema New England com curto-circuito na Barra 10 e com $t_{ch} = 0,45$ s.



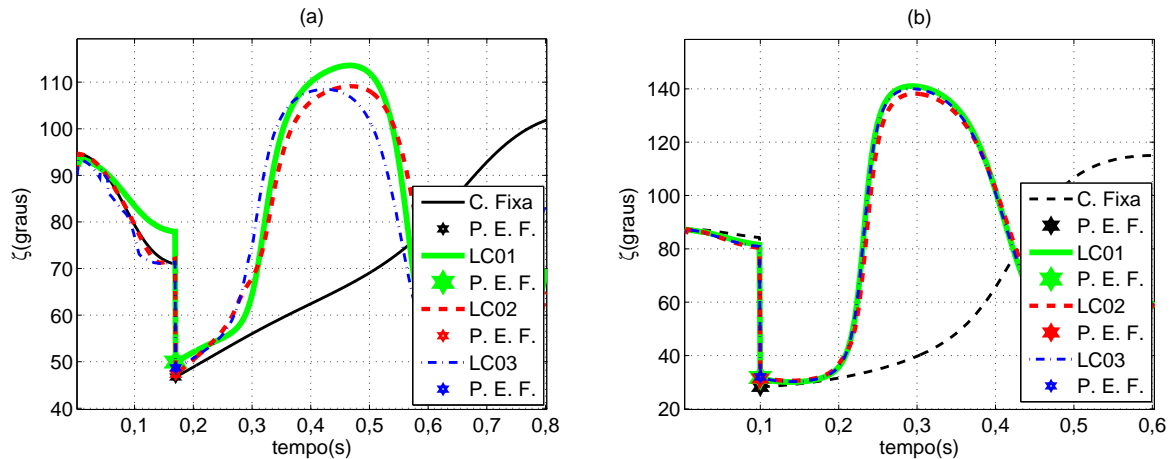
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nos casos de curto-circuito nas Barras 05 e 09, a Figura 45(a) e (b), mostra que a compensação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS elevou a superfície do vale energético que circunda o ponto de equilíbrio estável (P. E. E.) do sistema multimáquinas, enquanto que a Figura 47(a) mostra que a compensação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS não contribuiu para aproximação da trajetória com um ponto de máximo local durante a primeira oscilação do sistema quando submetido a um curto-circuito na Barra 05. A figura 47(b) mostra que o ângulo entre a trajetória do sistema o vetor gradiente do sistema com compensação dinâmica quando submetido a um curto-circuito na Barra 09, é levemente superior em relação à compensação fixa durante a primeira oscilação após a eliminação da falta, mas em compensação, este ângulo tem um valor relativamente baixo, pois varia em torno de 30 graus.

Conclui-se que a contribuição dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS através das leis

de controle LC01, LC02 e LC03 elevou a superfície potencial do Sistema New England nos casos das faltas estudadas e alterou a trajetória do sistema no sentido de se aproximar da máxima variação da energia potencial durante a primeira oscilação. Estes fatos contribuíram significativamente para a melhora da estabilidade transitória do sistema, conforme tabela de valores do tempo crítico de eliminação da falta.

Figura 47 - Ângulo entre ∇E_p e \mathbf{W} do sistema New England com curto-circuito barra: (a) 05, (b) 09.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 8 - Tempo crítico de eliminação da falta do Sistema New England, com alocação FACTS específica para cada falta.

Falta	Tempo Crítico(s)			
	C. Fixa	LC01	LC02	LC03
Barra01	0,42 – 0,43	0,69 – 0,70	0,68 – 0,69	0,69 – 0,70
Barra02	0,17 – 0,18	0,22 – 0,23	0,22 – 0,23	0,22 – 0,23
Barra03	0,22 – 0,23	0,29 – 0,30	0,30 – 0,31	0,29 – 0,30
Barra04	0,19 – 0,20	0,24 – 0,25	0,24 – 0,25	0,24 – 0,25
Barra05	0,19 – 0,20	0,22 – 0,23	0,23 – 0,24	0,24 – 0,25
Barra06	0,21 – 0,22	0,27 – 0,28	0,27 – 0,28	0,27 – 0,28
Barra07	0,21 – 0,22	0,25 – 0,26	0,25 – 0,26	0,25 – 0,26
Barra08	0,22 – 0,23	0,26 – 0,27	0,26 – 0,27	0,26 – 0,27
Barra09	0,11 – 0,12	0,18 – 0,19	0,17 – 0,18	0,18 – 0,19
Barra10	0,48 – 0,49	1,01 – 1,02	0,91 – 0,92	0,98 – 0,99

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostram a equivalência entre as três leis de controle e a contribuição significativa com vistas à estabilidade transitória do Sistema New England, porém vale ressaltar que para cada falta foi considerado uma alocação específica dos múltiplos dispositivos FACTS, sem levar em consideração as outras faltas. Para este processo de alocação denominado neste trabalho de "Alocação Específica". Por exemplo, no caso do curto-circuito

na Barra 05 só considerou-se a alocação dos TCSC na linha 05–20 e um SVC na Barra 19, cuja injeção de potência reativa é obviamente, concentrada na Barra 19.

Tabela 9 - Tempo crítico de eliminação da falta do Sistema New England, com alocação geral.

Falta	Tempo Crítico(s)			
	C. Fixa	LC01	LC02	LC03
Barra01	0,42 – 0,43	0,70 – 0,71	0,70 – 0,71	0,71 – 0,72
Barra02	0,17 – 0,18	0,20 – 0,21	0,20 – 0,21	0,20 – 0,21
Barra03	0,23 – 0,24	0,29 – 0,30	0,29 – 0,30	0,29 – 0,30
Barra04	0,19 – 0,20	0,22 – 0,23	0,22 – 0,23	0,22 – 0,23
Barra05	0,17 – 0,18	0,21 – 0,22	0,22 – 0,23	0,21 – 0,22
Barra06	0,21 – 0,22	0,27 – 0,28	0,27 – 0,28	0,27 – 0,28
Barra07	0,22 – 0,23	0,25 – 0,26	0,25 – 0,26	0,25 – 0,26
Barra08	0,23 – 0,24	0,25 – 0,26	0,25 – 0,26	0,25 – 0,26
Barra09	0,12 – 0,13	0,17 – 0,18	0,17 – 0,18	0,18 – 0,19
Barra10	0,48 – 0,49	0,81 – 0,82	0,74 – 0,75	0,79 – 0,80

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Considerando-se que todos os dispositivos FACTS da Tabela ?? estejam alocados no sistema com compensação fixa e que sua compensação dinâmica esteja relacionada com o local da falta. Para este processo de alocação denominado neste trabalho de "Alocação Geral". Por exemplo, no caso do curto-circuito na Barra 05, a injeção de potência reativa será distribuída para todas as barras da alocação dos SVCs (Barras: 13, 14, 15, 16, 19, 26, 27, 35 e 39). Os resultados apresentados na Tabela 9 mostram o tempo crítico de eliminação da falta do sistema com alocação geral dos múltiplos dispositivos FACTS.

Comparando as Tabelas 8 e 9 observa-se que, exceto no caso do curto-circuito na Barra 01, o tempo crítico de eliminação da falta do sistema com compensação dinâmica através das três leis de controle é ligeiramente inferior no caso em que todos os dispositivos estão inseridos no sistema com compensação fixa. Um dos motivos para essa redução do tempo crítico é que a potência reativa injetada pela compensação fixa de cada SVC em sua barra de alocação é, em geral, menor que a potência reativa do mesmo SVC quando se considera apenas a alocação dos dispositivos específicos para cada falta.

No caso de curto-circuito na Barra 10, o tempo crítico de eliminação da falta que consta na Tabela 8, onde se considera a alocação geral dos FACTS, é significativamente inferior que o tempo crítico da Tabela 9, onde se considera a alocação específica dos FACTS para cada falta. Pois a injeção de potência reativa no sistema devido a alocação específica de um único SVC alocado para este curto-circuito, na Barra 13, é igual a 4,2229 pu enquanto que a injeção de potência reativa do mesmo dispositivo quando se considera a alocação geral é significativamente inferior e igual a 1,2229 pu, proporcionando uma redução nos valores dos coeficientes "fator de efeito".

No caso de curto-circuito na Barra 01, considerando a alocação específica dos FACTS, a injeção de potência reativa em uma das barras de alocação do SVC, Barra 15, é igual a 1,2290 pu e inferior a injeção de potência reativa distribuída na mesma Barra, 1,6900 pu, quando se considera o sistema com alocação geral dos FACTS. A Tabela 10 mostra que os coeficientes "fator de efeito" relativos ao SVC em questão são maiores quando se considera a alocação geral, pois a injeção de potência distribuída, nesse caso, é maior. Como o SVC alocado na Barra 15 exerce maior influência sobre os pares de máquinas afetadas pelo curto-circuito na Barra 01, em relação aos outros dispositivos alocados, o tempo crítico de eliminação da falta foi superior para o caso do sistema com alocação geral dos dispositivos.

Tabela 10 - Valores dos coeficientes, fator de efeito, do SVC alocado na Barra 15 sobre os pares de máquinas do Sistema New England com alocação específica (A. Esp.) e alocação geral (A. Ger.) de dispositivos FACTS.

		A. Ger.									
Máq.		1	2	3	4	5	6	7	7	9	10
A.	1		0,0077	0,0090	0,0114	0,0114	0,0114	0,0114	0,0016	0,0037	0,0028
	2	0,0070		0,0045	0,0149	0,0149	0,0149	0,0149	0,0083	0,0107	0,0042
	3	0,0081	0,0036		0,0154	0,0154	0,0154	0,0154	0,0096	0,0118	0,0058
	4	0,0109	0,0146	0,0151		0,0027	0,0095	0,0095	0,0111	0,0102	0,0132
E	5	0,0109	0,0146	0,0151	0,0026		0,0095	0,0095	0,0111	0,0102	0,0132
	6	0,0109	0,0146	0,0151	0,0092	0,0092		0,0038	0,0111	0,0102	0,0132
s	7	0,0109	0,0146	0,0151	0,0092	0,0092	0,0033		0,0111	0,0102	0,0132
	8	0,0013	0,0075	0,0087	0,0106	0,0106	0,0106	0,0106		0,0028	0,0031
	9	0,0030	0,0100	0,0110	0,0099	0,0099	0,0099	0,0099	0,0023		0,0061
	10	0,0023	0,0035	0,0049	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0025	0,0051	

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Comparando as Tabelas 8 e 9 observa-se que no caso de curto-circuito na Barra 02 só há atuação dinâmica de TCSC, logo não se pode comparar injeção potencia reativa entre os casos de alocação específica e alocação geral, mas observa-se que os valores algébricos dos coeficientes "fator de efeito" dos dispositivos TCSC alocados, são inferiores no caso em que a alocação dos dispositivos é geral e por esta razão, o tempo crítico de eliminação da falta (Tabela 9) é também inferior ao tempo crítico de eliminação da falta (Tabela 8).

7 CONCLUSÃO

Os estudos realizados nesta pesquisa evoluíram no sentido de proporcionar melhores condições de estabilidade transitória do sistema elétrico de potência e de sua análise, considerando o sistema multimáquinas com compensação de múltiplos dispositivos FACTS, especificamente, compensação em derivação proveniente do SVC e compensação série proveniente do TCSC.

A contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS no sistema multimáquinas, pode ter maior ou menor influência dependendo de sua localização e pode ser observada através do coeficiente de eficácia e fator de efeito, que expressam a participação do dispositivo na admitância de transferência entre máquinas. A análise desses coeficientes propiciam informações que auxiliam na alocação dos dispositivos no sentido de obter melhor torque sincronizante entre os pares de máquinas mais afetados em uma possível contingência.

A função energia foi descrita com a influência dos múltiplos dispositivos FACTS manifestada pela admitância de transferência entre máquinas através do fator de contribuição desses dispositivos.

A modelagem considerando a inclusão dos dispositivos FACTS no sistema multimáquinas mostra que as variações na admitância de transferência entre os pares de máquinas do sistema é função da variação de admitância do dispositivo em regime transitório e, mediante judiciosas considerações sobre o processo de redução da matriz admitância de barra, estabeleceu-se uma relação direta com a variação da reatância para o caso do TCSC e com a variação da susceptância para o caso do SVC.

Com a inclusão dos múltiplos dispositivos FACTS no sistema multimáquinas ficou estabelecido que a variação da admitância de transferência entre as máquinas do sistema depende de uma combinação linear das variações da susceptância de cada SVC e das variações das reatâncias de cada TCSC por meio de seus respectivos Fatores de Efeito.

Como a análise de estabilidade transitória está voltada para sincronização entre máquinas do SEE durante a primeira oscilação, procurou-se uma grandeza que propiciasse informação de sincronização. Assim, propôs-se que o sinal de saída dos dispositivos FACTS fosse ajustado para estabelecer uma relação direta com o vetor gradiente da energia potencial e a trajetória do sistema.

Neste trabalho, desenvolveram-se três leis de controle coordenado entre os múltiplos dispositivos FACTS alocados no sistema, diferenciando-se apenas a função que define o sinal de entrada dos dispositivos de modo a garantir o mesmo princípio.

A lei de controle LC01 foi desenvolvida através da função energia potencial por intermédio da maximização de sua derivada temporal, estabelecendo uma relação entre o fator de efeito de cada dispositivo. Esta relação na lei de controle LC02 foi desenvolvida através do menor ângulo entre o vetor gradiente da energia potencial do sistema formado por dois pares de máquinas supostamente mais afetados e o vetor de suas defasagens de velocidades. A lei de controle LC03 é uma generalização de LC02, pois considera o menor ângulo entre o vetor gradiente da energia potencial do sistema original e o vetor das defasagens de velocidades de seus pares de máquinas.

As condições impostas nas três leis de controle possibilitam que a atuação dinâmica dos múltiplos dispositivos FACTS eleve a cordilheira que circunda o ponto de equilíbrio estável localizado na depressão energética do sistema e que sua trajetória assuma uma direção de subida mais íngreme dificultando sua ultrapassagem na cordilheira do vale energético.

A modelagem de função energia, considerando a participação dos múltiplos dispositivos FACTS permitiu analisar a contribuição dinâmica dos dispositivos, e com as leis de controle propostas, evidenciou-se a capacidade de contribuição na estabilidade transitória através das simulações realizadas em três sistemas testes.

Assim como em Martins (2012), as ilustrações dos relevos energéticos proporcionaram compreender a devida influência nas superfícies energéticas, no sentido de dificultar o caminho da trajetória do sistema para abandonar o vale energético, e tal contribuição resulta no acréscimo do tempo crítico de eliminação da falta, assim ampliando a segurança do sistema.

Nas simulações realizadas em três sistemas testes, os controles coordenados dos múltiplos dispositivos FACTS proporcionaram melhores condições de estabilidade por meio das três leis de controle propostas. Estas leis mostraram um comportamento equivalente em todas as simulações, confirmando seus objetivos.

Os resultados encontrados através da simulação dos sistemas testes foram satisfatórios, ratificando os objetivos do trabalho e ensejando a expectativa de bom desempenho das leis de controle especificadas, aplicadas em sistemas reais e de grande porte.

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento das três leis de controle coordenado de múltiplos dispositivos FACTS cuja atuação se dá na entrada de cada um deles. Outra contribuição relevante é o desenvolvimento do fator de contribuição dos múltiplos dispositivos FACTS na admitância de transferência entre as máquinas de um sistema. Estas contribuições poderão ajudar a outros estudantes e pesquisadores no desenvolvimento de outros trabalhos.

De acordo com a pesquisa desenvolvida e os resultados obtidos neste trabalho, têm-se como sugestões para futuros trabalhos:

- Desenvolver Métodos para analisar a melhor alocação dos múltiplos dispositivos FACTS

com vistas à atender o maior número de faltas de um SEE;

- Implantar os controladores dos dispositivos FACTS e desenvolver métodos de otimização de seus parâmetros.

REFERÊNCIAS

- AGHAEI, J.; GITIZADET, M.; KAJI, M. Placement and operation strategy of FACTS devices using optimal continuous power flow. *Scientia Iranica, Transactions D: Computer Science & Engineering and Electrical Engineering*, Shiraz, v. 19, n. 6, p. 1683–1690, 2012.
- ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. *Estabilidade transitória em sistema eletroenergéticos*. São Paulo: EESC/USP, 2000. 154 p.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *System control and stability*. U. S. A.: LTC, 1997. 464 p.
- ATHAY, T.; PODMORE, R.; VIRMANI, S. A practical method for the direct analysis of transient stability. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, Palo Alto, PAS-98, n. 2, p. 573–584, 1979.
- BARBAZELLI, R. C. *Estudo de função de Lyapunov para a estabilidade de sistemas de potência*. 2005. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2005.
- BOSE, A. Application of direct methods to transient stability analysis of power systems. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, Dalas, PAS-103, n. 7, p. 1629–1636, 1984.
- CAPELLETTE, R. F. *Estudo dos efeitos da compensação série no desempenho transitório dos sistemas de energia elétrica sob o enfoque da energia*. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.
- CHATTERJEE, D.; GHOSH, A. TCSC control design for transient stability improvement of a multi-machine power system using trajectory sensitivity. *Electric Power Systems Research*, Suíça, v. 77, n. 5–6, p. 470 – 483, 2007.
- CHATTERJEE, D.; GHOSH, A. Transient stability assessment of power systems containing series and shunt compensators. *Power Systems, IEEE Transactions on*, Piscataway, v. 22, n. 3, p. 1210–1220, 2007.
- CHIANG, H.-D.; CHU, C.-C.; CAULEY, G. Direct stability analysis of electric power systems using energy functions: theory, applications, and perspective. *Proceedings of the IEEE*, New York, v. 83, n. 11, p. 1497 –1529, nov 1995.
- COLVARA, L.; FESTRAITS, E.; ARAUJO, S. Effects of FACTS devices on power system performance in view of small-signal or great disturbances. In: POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2003. v. 3, p. 8.
- COLVARA, L. C. Influência do TCSC na energia transitória dos sistemas de potência. *IEEE Latin American Transactions*, América latina, v. 3, n. 3, p. 284–289, July 2005.

- COLVARA, L. D.; MARQUES, M. M. Efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas em sistema de potência multimáquinas. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE, 8., 2009, Ubatuba. *Proceedings...* Guaratinguetá: FDTC, 2009. p. 6.
- CVETKOVIC, M.; ILIC, M. PMU based transient stabilization using FACTS. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION - PSCE, 2011, Phoenix. *Proceedings...* Piscataway: IEEE/PES, 2011. p. 1–6.
- ELGERD, O. I. *Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica*. São Paulo: McGraw-Hill, 1976. 604 p.
- FERREIRA, C. M. B. M. *Análise de estabilidade transitória de sistemas elétricos de energia utilizando formulações híbridas*. 2005. 290 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto, 2005.
- FESTRAITS, E. B. *Consideração da ação de dispositivos FACTS em um método automático de análise de estabilidade de sistemas de energia elétrica*. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2002.
- FOUAD, A. A.; VITTAL, V. *Power system transient stability analysis: using the transient energy function method*. New Jersey: Prentice Hall, 1992. 352 p.
- 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. *Sba Controle & Automação*, Campinas, v. 19, n. 2, p. 214–225, 2008.
- GALIANA, F.; ALMEIDA, K.; TOUSSAINT, M.; GRIFFIN, J.; ATANACKOVIC, D.; OOI, B.; MCGILLIS, D. Assessment and control of the impact of FACTS devices on power system performance. *Power Systems, IEEE Transactions on*, Piscataway, v. 11, n. 4, p. 1931–1936, 1996.
- HAQUE, M. H. Improvement of first swing stability limit by utilizing full benefit of shunt FACTS devices. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 19, n. 4, November 2004.
- HAQUE, M. H. Application of energy function to assess the first-swing stability of a power system with a SVC. *Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings*, Reino Unido, v. 152, n. 6, p. 806–812, 2005.
- HAQUE, M. H. Best location of SVC to improve first swing stability limit of a power system. *Electric Power Systems Research*, Suíça, v. 77, n. 10, p. 1402–1409, 2006.
- HINGORANI, N. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. *Proceedings of the IEEE*, New York, v. 76, n. 4, p. 481–482, 1988.
- HINGORANI, N.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS : concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York: INC, 2000. 452 p.
- IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY/CIGRE - IEEE/CIGRE. FACTS applications. *IEEE Service Center*, Piscataway, 96TP1, p. 16, 1996. (Special Issue).

- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. Special stability controls working group. Static Var compensator model for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*. Piscataway, v. 9, n. 1, p. 229-240, 1994.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 p.
- KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; CUTSEM, T. V.; VITTAL, V. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *Power Systems, IEEE Transactions on*, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1387 – 1401, aug. 2004.
- LERCH, E.; POVH, D.; XU, L. Advanced SVC control for damping power system oscillations. *Power Systems, IEEE Transactions on*, Piscataway, v. 6, n. 2, p. 524–535, 1991.
- MAC-LEOD, H. E. P. *Controle ótimo descentralizado para o projeto e coordenação de sinais estabilizadores em sistemas elétricos de potência*. 1992. 217 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 1992.
- MACHADO, R. L. *Aplicação de dispositivos FACTS no sistema de transmissão da eletrosul*. 2003. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2003.
- MACHOWSKI, J.; NELLES, D. Power system transient stability enhancement by optimal control of static VAR compensators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Madrid, v. 14, n. 6, p. 411 – 421, 1992.
- MAHAJAN, V. Power system stability improvement with flexible AC transmission system (FACTS) controller. In: POWER SYSTEM TECHNOLOGY AND IEEE POWER INDIA CONFERENCE - POWERCON, 2008, Nova Delhi. *Conference...* Nova Delhi: [s.n.], 2008. p. 1–7.
- MARQUES, M. M. *Um estudo dos efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas de um sistema de potência multimáquinas*. 2009. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2009.
- MARTINS, R. V. F. *Estudo dos efeitos da compensação em derivação no desempenho dinâmico e transitório dos SEE sob o enfoque de energia transitória*. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.
- MINUSSI, C.; FILHO, W. Sensitivity analysis for transient stability studies. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, Reino Unido, v. 145, n. 6, p. 669–674, 1998.
- MIOTTO, E.; COVACIC, M. Analysis of impacts of PSS controllers and TCSC FACTS devices at dynamic stability of a multimachine system power. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA- TCED - LA, 9., 2010, São Paulo. *Proceedings...* Piscataway: IEEE/PES, 2010. p. 359–365.

- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. 164 p.
- MOTA, W. S. *Simulação de transitórios eletromecânicos em sistemas de potência*. Campina Grande: EPGRAF, 2006. 368 p.
- NGUYEN, T.; NGUYEN, V.; KARIMISHAD, A. Transient stability-constrained optimal power flow for online dispatch and nodal price evaluation in power systems with flexible AC transmission system devices. *Generation, Transmission Distribution, IET*, Reino Unido, v. 5, n. 3, p. 332–346, 2011.
- NGUYEN, T. A.; HERTEM, D. V.; DRIESEN, J. Transient stability enhancement by TCSC controllers using remote input signals. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AC AND DC POWER TRANSMISSION, 9., 2010, Londres. *Proceedings...* Reino Unido: IET, 2010. p. 1–5.
- PADIYAR, K.; IMMANUEL, V. Modelling of SVC for stability evaluation using structure preserving energy function. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Madrid, v. 16, n. 5, p. 339 – 348, 1994.
- PADIYAR, K. R.; RAO, K. U. Discrete control of TCSC for stability improvement in power systems. In: CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 4., 1995, Albany. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 1995. p. 246–251.
- PAI, M. A. *Power system stability-analysis by direct of lyapunov*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1981. 251 p.
- PERARO, N. R. *Estudo do efeito dos transformadores de relação de transformação variável sobre a capacidade de sincronização intermáquinas*. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2010.
- SAUER, P. W.; PAI, M. A. *Power system dynamics and stability*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 367 p.
- SILVA, J. C. *Efeitos da Compensação Série na Capacidade de Sincronização em Sistemas Multimáquinas*. 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia - FE, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2010.
- SILVA, J. C.; COLVARA, L. D. O TCSC em um sistema de energia elétrica multimáquinas: Os efeitos sobre a potência sincronizante. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE, 8., 2009, Ubatuba. *Proceedings...* Guaratinguetá: FDTC, 2009. p. 6.
- SIQUEIRA, D. P. *Controle não-linear aplicado a dispositivos FACTS em sistemas elétricos de potência*. 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2012.
- SKOK, S.; IVANKOVIC, I.; CERINA, Z. Applications based on PMU technology for improved power system utilization. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2007, Florida. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2007. p. 1–8.

- SONG, Y. H.; JOHNS, A. *Flexible ac transmission systems - FACTS*. [S.l.]: IEEE, 1999. 592 p.
- STEVENSON, W. D. J. *Elementos de análise de sistemas de potência*. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 458 p.
- TABRIZI, M.; RADMAN, G. PMU-based multi-input SVC supplementary controller for damping inter-area oscillation. In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM - NAPS, 2010, Arlington. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2010. p. 6 pp.
- TANG, Y.; HU, W.; HUANG, Y.; XU, F.; MIN, R. Coordinated control of multi-FACTS to enhance the small disturbance stability of the power system. In: INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES - ISGT, 2012, Tianjin. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2012. p. 1–6.
- TAVORA, C. J.; SMITH, O. Stability analysis of power systems. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Palo Alto, v. 19, n. PAS-91, p. 1138–1147, 1971.
- TORTELLI, O. L. *Alocação e operação de controladores FACTS em sistemas elétricos de potência*. 2010. 157 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2010.
- UNSIHUAY, C.; SAAVEDRA, O. Comparative studies on transmission loss allocation methods for competitive electricity markets. In: POWER TECH CONFERENCE, 4., 2003. *Proceedings...* [S.l.]: IEEE Bologna, 2003. v. 3, p. 7.
- VARMA, R.; AUDDY, S. Mitigation of subsynchronous resonance by SVC using PMU - acquired remote generator speed. In: POWER INDIA CONFERENCE, 2006, Nova Delhi. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2006. p. 8.
- VITTAL, V.; RAJAGOPAL, S.; FOUAD, A. A.; EL-KADY, M. A.; VAAHEDI, E.; CARVALHO, V. F. Transient stability analysis of stressed power systems using the energy function method. *Power Systems, IEEE Transactions on*, Piscataway, v. 3, n. 1, p. 239–244, 1988.
- WANG, H. Interaction analysis and co-ordination of SVC voltage and damping control. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES, 2000, Londres. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2000. p. 361–365.
- WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO, G. N. Tecnologia FACTS - tutorial. *SBA Controle e Automação*, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.
- YANJUAN, W.; LINCHUAN, L. Transfer capability study of tie-line installed TCSC considering transient stability constraints. In: POWER ENGINEERING AND AUTOMATION CONFERENCE - PEAM, 2011, Wuhan. *Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2011. v. 2, p. 260–263.

ANEXO A - DADOS DO SISTEMA KUNDUR

Neste anexo, será apresentado os dados do Sistema Kundur em regime permanente, sem compensação.

Tabela 11 - Dados de linhas do Sistema Kundur.

Nº da Linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância Série (pu)		Admitância Paralela (pu)	
			R	X	G	B
01	1	5	0,0000	0,0167	0,0000	0,0000
02	2	6	0,0000	0,0167	0,0000	0,0000
03	3	11	0,0000	0,0167	0,0000	0,0000
04	4	10	0,0000	0,0167	0,0000	0,0000
05	5	6	0,0025	0,0250	0,0000	0,0437
06	6	7	0,0010	0,0100	0,0000	0,0175
07	7	8	0,0110	0,1100	0,0000	0,1925
08	7	8	0,0110	0,1100	0,0000	0,1925
09	8	9	0,0110	0,1100	0,0000	0,1925
10	8	9	0,0110	0,1100	0,0000	0,1925
11	9	10	0,0010	0,0100	0,0000	0,0175
12	10	11	0,0025	0,0250	0,0000	0,0437

Fonte: (KUNDUR, 1994).

Tabela 12 - Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do Sistema Kundur.

Nº da Barra	Nome da Barra	Tensão de Barra		Potência de Barra (pu)	
		Módulo (pu)	Ângulo (graus)	Ativa	Reativa
01	Barra 01	1,0300	7,2781	1,0000	0,2335
02	Barra 02	1,0100	5,9656	1,0000	-0,4963
03	Barra 03	1,0300	0,0000	0,4787	0,3067
04	Barra 04	1,0100	-0,5098	0,5767	-0,3622
05	Barra 05	1,0263	6,3730	0,0000	0,0000
06	Barra 06	1,0183	5,0353	0,0000	0,0000

Continua na próxima página

N ^o da Barra	Nome da Barra	Tensão de Barra		Potência de Barra (pu)	
		Módulo (pu)	Ângulo (graus)	Ativa	Reativa
07	Barra 07	1,0192	3,9177	-1,0744	-0,1111
08	Barra 08	1,0269	1,0855	0,0000	0,0000
09	Barra 09	1,0153	-1,6344	-1,9633	-0,2778
10	Barra 10	1,0160	-1,0475	0,0000	0,0000
11	Barra 11	1,0251	-0,4338	0,0000	0,0000

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 13 - Parâmetros das máquinas do Sistema Kundur.

Máquina	Barra	Xd	X'd	M	D	Tld0	Tlq0	Kr	Tr
1	01	1,800	0,300	0,0345	0,000	8,000	0,400	25,000	0,100
2	02	1,800	0,300	0,0345	0,000	8,000	0,400	25,000	0,100
3	03	1,800	0,300	0,0328	0,000	8,000	0,400	25,000	0,100
4	04	1,800	0,300	0,0328	0,000	8,000	0,400	25,000	0,100

Fonte: (MARQUES, 2009).

Tabela 14 - Tensões internas (atrás de X'd) do Sistema Kundur em regime permanente.

Máquina	Módulo (pu)	Ângulo (rad)
1	1,1360	0,3863
2	0,9123	0,4357
3	1,1280	0,1239
4	0,9185	0,1787

Fonte: Elaboração do próprio autor.

ANEXO B - DADOS DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS

Neste anexo, será apresentado os dados do Sistema IEEE 14 Barras em regime permanente, sem compensação.

O Sistema IEEE 14 Barras é composto por 5 máquinas sendo que três delas são compensadores síncronos e 14 barras.

Tabela 15 - Dados de linhas do Sistema IEEE 14 Barras.

Nº da Linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância Série (pu)		Admitância Paralela (pu)	
			R	X	G	B
01	01	02	0,0194	0,0592	0,0000	0,0528
02	01	05	0,0540	0,2230	0,0000	0,0492
03	02	03	0,0470	0,1980	0,0000	0,0438
04	02	04	0,0581	0,1763	0,0000	0,0374
05	02	05	0,0569	0,1739	0,0000	0,0340
06	03	04	0,0670	0,1710	0,0000	0,0346
07	04	05	0,0133	0,0421	0,0000	0,0128
08	04	07	0,0000	0,2091	0,0000	0,0000
09	04	09	0,0000	0,5562	0,0000	0,0000
10	05	06	0,0000	0,2520	0,0000	0,0000
11	06	11	0,0950	0,1989	0,0000	0,0000
12	06	12	0,1229	0,2558	0,0000	0,0000
13	06	13	0,0662	0,1303	0,0000	0,0000
14	07	08	0,0000	0,1761	0,0000	0,0000
15	07	09	0,0000	0,1100	0,0000	0,0000
16	09	10	0,0318	0,0845	0,0000	0,0000
17	09	14	0,1271	0,2704	0,0000	0,0000
18	10	11	0,0821	0,1921	0,0000	0,0000
19	12	13	0,2209	0,1999	0,0000	0,0000
20	13	14	0,1709	0,2784	0,0000	0,0000

Continua na próxima página

N ^o da Linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância Série (pu)		Admitância Paralela (pu)	
			R	X	G	B
21	02	15	0,0000	0,1000	0,0000	0,0000
22	03	16	0,0000	0,1000	0,0000	0,0000
23	06	17	0,0000	0,1000	0,0000	0,0000
24	08	18	0,0000	0,1000	0,0000	0,0000

Fonte: (MARQUES, 2009).

Tabela 16 - Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do Sistema IEEE 14 Barras.

N ^o da Barra	Nome da Barra	Tensão de Barra		Potência de Barra (pu)	
		Módulo (pu)	Ângulo (graus)	Ativa	Reativa
01	Barra 01	1,0000	3,4681	2,3200	-0,0155
02	Barra 02	0,9765	-2,0712	-0,2170	-0,1270
03	Barra 03	0,9560	-11,0785	-0,9420	-0,1900
04	Barra 04	0,9493	-7,9660	-0,4780	0,0000
05	Barra 05	0,9560	-6,2408	-0,0076	-0,0160
06	Barra 06	0,9649	-13,3015	-0,1120	-0,0756
07	Barra 07	0,9489	-11,6647	0,0000	0,0000
08	Barra 08	0,9815	-11,6647	0,0000	0,0000
09	Barra 09	0,9299	-13,6501	-0,2950	-0,1660
10	Barra 10	0,9278	-13,9433	-0,0900	-0,0580
11	Barra 11	0,9423	-13,7752	-0,0350	-0,0180
12	Barra 12	0,9467	-14,3208	-0,0610	-0,0160
13	Barra 13	0,9403	-14,4594	-0,1350	-0,0580
14	Barra 14	0,9161	-15,1577	-0,1490	-0,0500
15	Barra 15	1,0000	0,0000	0,3529	0,2413
16	Barra 16	1,0000	-11,0785	0,0000	0,4398
17	Barra 17	1,0000	-13,3015	0,0000	0,3509
18	Barra 18	1,0000	-11,6647	0,0000	0,1851

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observação: As barras 15 a 18 foram inseridas como barras terminais das máquinas 2 a 5, respectivamente

Tabela 17 - Parâmetros das máquinas do Sistema IEEE 14 Barras.

Máquina	Barra	Xd	X'd	M	D	Tld0	Tlq0	Kr	Tr
1	1	0,2995	0,2995	0,0273	0,000	7,400	0,200	50,000	0,050
2	15	0,0850	0,0850	0,0347	0,000	6,100	0,300	20,000	0,050
3	16	0,0850	0,0850	0,0347	0,000	6,100	0,300	20,000	0,050
4	17	0,1320	0,1320	0,0268	0,000	4,750	1,500	20,000	0,050
5	18	0,1320	0,1320	0,0268	0,000	4,750	1,500	20,000	0,050

Fonte: (MARQUES, 2009).

Tabela 18 - Tensões internas (atrás de X'd) do Sistema IEEE 14 Barras em regime permanente.

Máquina	Módulo (pu)	Ângulo (rad)
1	1,2139	0,6700
2	1,0209	0,0294
3	1,0374	-0,1934
4	1,0463	-0,2322
5	1,0244	-0,2036

Fonte: Elaboração do próprio autor.

ANEXO C - DADOS DO SISTEMA NEW ENGLAND

Os dados apresentados neste anexo serão referentes ao Sistema New England, composto por 10 máquinas e 39 barras, em regime permanente e sem compensação.

Tabela 19 - Dados de linhas do Sistema New England.

Nº da Linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância Série (pu)		Admitância Paralela (pu)	
			R	X	G	B
01	30	31	0,0035	0,0411	0,0000	0,6987
02	30	40	0,0010	0,0250	0,0000	0,7500
03	31	32	0,0013	0,0151	0,0000	0,2572
04	31	25	0,0070	0,0086	0,0000	0,1460
05	32	33	0,0013	0,0213	0,0000	0,2214
06	32	18	0,0011	0,0133	0,0000	0,2138
07	33	34	0,0008	0,0128	0,0000	0,1342
08	33	14	0,0008	0,0129	0,0000	0,1382
09	34	35	0,0002	0,0026	0,0000	0,0434
10	34	37	0,0008	0,0112	0,0000	0,1476
11	35	36	0,0006	0,0092	0,0000	0,1130
12	35	11	0,0007	0,0082	0,0000	0,1389
13	36	37	0,0004	0,0046	0,0000	0,0780
14	37	38	0,0023	0,0363	0,0000	0,3804
15	38	40	0,0010	0,0250	0,0000	1,2000
16	39	11	0,0004	0,0043	0,0000	0,0729
17	39	13	0,0004	0,0043	0,0000	0,0729
18	13	14	0,0009	0,0101	0,0000	0,1723
19	14	15	0,0018	0,0217	0,0000	0,3660
20	15	16	0,0009	0,0094	0,0000	0,1710
21	16	17	0,0007	0,0089	0,0000	0,1342
22	16	19	0,0016	0,0195	0,0000	0,3040
23	16	21	0,0008	0,0135	0,0000	0,2548

Continua na próxima página

Nº da Linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância Série (pu)		Admitância Paralela (pu)	
			R	X	G	B
24	16	24	0,0003	0,0059	0,0000	0,0680
25	17	18	0,0007	0,0082	0,0000	0,1319
26	17	27	0,0013	0,0173	0,0000	0,3216
27	21	22	0,0008	0,0140	0,0000	0,2565
28	22	23	0,0006	0,0096	0,0000	0,1846
29	23	24	0,0022	0,0350	0,0000	0,3610
30	25	26	0,0032	0,0323	0,0000	0,5130
31	26	27	0,0014	0,0147	0,0000	0,2396
32	26	28	0,0043	0,0474	0,0000	0,7802
33	26	29	0,0057	0,0625	0,0000	1,0290
34	28	29	0,0014	0,0151	0,0000	0,2490
35	12	11	0,0016	0,0435	0,0000	0,0000
36	12	13	0,0016	0,0435	0,0000	0,0000
37	35	2	0,0000	0,0250	0,0000	0,0000
38	39	3	0,0000	0,0200	0,0000	0,0000
39	19	4	0,0007	0,0142	0,0000	0,0000
40	20	5	0,0009	0,0180	0,0000	0,0000
41	22	6	0,0000	0,0143	0,0000	0,0000
42	23	7	0,0005	0,0272	0,0000	0,0000
43	25	8	0,0006	0,0232	0,0000	0,0000
44	31	1	0,0000	0,0181	0,0000	0,0000
45	29	9	0,0008	0,0156	0,0000	0,0000
46	19	20	0,0007	0,0138	0,0000	0,0000
47	10	40	0,0000	0,0010	0,0000	0,0000

Fonte: (MAC-LEOD, 1992).

Tabela 20 - Resultado do cálculo do fluxo de potência para o caso sem compensação do Sistema New England.

Nº da Barra	Nome da Barra	Tensão de Barra		Potência de Barra (pu)	
		Módulo (pu)	Ângulo (graus)	Ativa	Reativa
01	Barra 01	1,0000	-6,7423	2,5000	0,9058
02	Barra 02	1,0000	0,0000	6,7967	2,5989
03	Barra 03	1,0000	0,0129	6,5000	2,4262
04	Barra 04	1,0000	0,7914	6,3200	1,4163

Continua na próxima página

Nº da Barra	Nome da Barra	Tensão de Barra		Potência de Barra (pu)	
		Módulo (pu)	Ângulo (graus)	Ativa	Reativa
05	Barra 05	1,0000	-0,5361	5,0800	1,3463
06	Barra 06	1,0000	3,6575	6,5000	1,9542
07	Barra 07	1,0000	6,9246	5,6000	1,3317
08	Barra 08	1,0000	-0,6454	5,4000	0,3742
09	Barra 09	1,0000	5,4348	8,3000	0,6603
10	Barra 10	1,0000	-15,1836	10,0000	2,1225
11	Barra 11	0,9556	-8,6329	0,0000	0,0000
12	Barra 12	0,9351	-8,6941	-0,0850	-0,8800
13	Barra 13	0,9557	-8,6086	0,0000	0,0000
14	Barra 14	0,9495	-10,5982	0,0000	0,0000
15	Barra 15	0,9466	-11,2680	-3,2000	-1,5300
16	Barra 16	0,9615	-9,7331	-3,2900	-0,3230
17	Barra 17	0,9649	-10,9711	0,0000	0,0000
18	Barra 18	0,9634	-11,9613	-1,5800	-0,3000
19	Barra 19	0,9795	-4,4073	0,0000	0,0000
20	Barra 20	0,9754	-5,8439	-6,8000	-1,0300
21	Barra 21	0,9587	-6,9523	-2,7400	-1,1500
22	Barra 22	0,9765	-1,8047	0,0000	0,0000
23	Barra 23	0,9729	-2,0435	-2,4750	-0,8460
24	Barra 24	0,9667	-9,5934	-3,0860	0,9200
25	Barra 25	0,9960	-7,8587	-2,2400	-0,4720
26	Barra 26	0,9870	-9,0702	-1,3900	-0,1700
27	Barra 27	0,9703	-11,2574	-2,8100	-0,7550
28	Barra 28	0,9891	-5,1258	-2,0600	-0,2760
29	Barra 29	0,9915	-2,0383	-2,8350	-0,2690
30	Barra 30	1,0016	-13,4161	0,0000	0,0000
31	Barra 31	0,9846	-9,3763	0,0000	0,0000
32	Barra 32	0,9651	-12,2812	-3,2200	-0,0240
33	Barra 33	0,9417	-12,7652	-5,0000	-1,8400
34	Barra 34	0,9472	-11,1872	0,0000	0,0000
35	Barra 35	0,9503	-10,2996	0,0000	0,0000
36	Barra 36	0,9396	-12,9918	-2,3380	-0,8400
37	Barra 37	0,9390	-13,6704	-5,2200	-1,7600
38	Barra 38	0,9851	-14,9908	0,0000	0,0000
39	Barra 39	0,9603	-7,7673	0,0000	0,0000

Continua na próxima página

Nº da Barra	Nome da Barra	Tensão de Barra		Potência de Barra (pu)	
		Módulo (pu)	Ângulo (graus)	Ativa	Reativa
40	Barra 40	0,9979	-15,7577	-12,1400	-2,5000

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 21 - Parâmetros das máquinas do Sistema New England.

Máquina	Barra	Xd	X'd	M	D	Tld0	Tlq0	Kr	Tr
1	1	0,0310	0,0310	0,2228	0,0530	10,200	1,000	100,0	0,010
2	2	0,0697	0,0697	0,1607	0,0258	6,560	1,500	100,0	0,010
3	3	0,0531	0,0531	0,1899	0,0301	5,700	1,500	100,0	0,010
4	4	0,0436	0,0436	0,1517	0,0246	6,560	1,500	100,0	0,010
5	5	0,1320	0,1320	0,1379	0,0224	5,400	0,440	100,0	0,010
6	6	0,0500	0,0500	0,1846	0,0299	7,330	0,400	100,0	0,010
7	7	0,0490	0,0490	0,1401	0,0227	5,660	1,500	100,0	0,010
8	8	0,0570	0,0570	0,1289	0,0209	6,700	0,410	100,0	0,010
9	9	0,0570	0,0570	0,1839	0,0297	4,790	1,960	100,0	0,010
10	10	0,0050	0,0050	2,6525	0,0362	7,000	0,700	100,0	0,010

Fonte: (MARTINS, 2012).

Tabela 22 - Tensões internas (atrás de X'd) do Sistema New England em regime permanente.

Máquina	Módulo (pu)	Ângulo (rad)
1	1,0310	-0,0424
2	1,2726	0,3814
3	1,1804	0,2970
4	1,0969	0,2677
5	1,3552	0,5082
6	1,1448	0,3517
7	1,1000	0,3730
8	1,0667	0,2815
9	1,1404	0,5226
10	1,0118	-0,2156

Fonte: Elaboração do próprio autor.