

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

**Estudo dos efeitos da compensação série no desempenho
transitório dos sistemas de energia elétrica sob o enfoque da
energia**

Renan Fernandes Capellette

Orientador: Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara

Ilha Solteira – SP Maio de 2012



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

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

“Estudo dos efeitos da compensação série no desempenho transitório dos sistemas de energia elétrica sob o enfoque da energia”

RENAN FERNANDES CAPELETTE

Orientador: Laurence Duarte Colvara

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

Área do conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP

Maio de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

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

C238e Capellette, Renan Fernandes.
Estudo dos efeitos da compensação série no desempenho transitório dos sistemas de energia elétrica sob o enfoque da energia / Renan Fernandes Capellette. – Ilha Solteira : [s.n.], 2012
71 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2012

Orientador: Laurence Duarte Colvara
Inclui bibliografia

1. Estabilidade transitória. 2. Energia potencial. 3. Compensador série controlado a tiristor (TCSC). 4. Área de atração. 5. Trajetória.



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

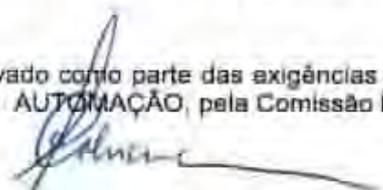
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo dos efeitos da compensação série no desempenho transitório dos sistemas de energia elétrica sob o enfoque da energia

AUTOR: RENAN FERNANDES CAPELETTE

ORIENTADOR: Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre 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. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. GEORGE LAURO RIBEIRO DE BRITO
Departamento de Ciências da Computação / Universidade Federal de Tocantins

Data da realização: 25 de maio de 2012.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus por dar-me sabedoria e força para enfrentar os momentos difíceis...

Aos meus pais e familiares, os quais são meus verdadeiros mestres e exemplos de vida, parceiros e a base que me sustenta!

E aos meus amigos por seu companheirismo.

Aos meus pais Naor e Aparecida...

A minha irmã Caroline e meus avós Dória e Antônio Fernandes (I n memoriam).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a todos que me ajudaram a concretizar este sonho que não foi uma tarefa fácil, porém o problema do agradecimento seletivo é justamente deixar de incluir um nome de um amigo. Sendo assim, a todos que de certa forma contribuíram de forma positiva e significativa para este trabalho, expresso minha imensa gratidão.

Agradeço em especial ao professor Dr. Laurence Duarte Colvara, o qual abriu as portas e acolheu-me. A este orientador/amigo expresso minha profunda gratidão por todos os ensinamentos e experiências transmitidas e pela grande ajuda nos momentos difíceis. A este excelente orientador deixo minha incontável gratidão.

Ao professor Dr. Percival Bueno de Araújo, que sempre esteve ao meu lado, ensinando-me e apoiando-me sempre com ideias extremamente construtivas, desde a minha chegada neste departamento até o presente momento, muito obrigado!

Ao meu amigo/irmão Raphael Martins, que esteve ao meu lado desde o início dessa jornada de estudos, não tenho palavras para agradecer. À minha querida e inesquecível amiga Maria Elisa, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis de serem superados, sempre com palavras de conforto, e aos meus primos Rodrigo e Tatiane pela contribuição nesse trabalho.

Ao grande amigo e professor Dr. Ricardo Moura, vulgo Bico Doce, meus sinceros agradecimentos pelas opiniões e contribuições para o trabalho e para a vida.

Ao querido amigo Danilo do Valle, que sempre esteve ao meu lado desde o início até o fim desta jornada, não é possível expressar minha gratidão com palavras por todas as contribuições.

Aos meus pais Naor e Aparecida não existem palavras para agradecê-los, nada do que digo ou faço é suficiente para demonstrar minha eterna gratidão!

Agradeço aos companheiros de laboratório Naryane, João, Aline, Maxwell, Marcos Furini, dentre outros, muito obrigado!

Aos amigos de República Ápio, Edilson, Pedro e Juliano, agradeço fortemente pelo companheirismo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pelos sete meses de apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho analisa a influência do FACTS TCSC na função energia do sistema, mais especificamente na energia potencial. Também é abordada a influência da compensação dinâmica do TCSC na trajetória do sistema frente a uma grande perturbação, visando a melhoria da estabilidade transitória. A energia potencial é avaliada no espaço das posições angulares dos rotores das máquinas em torno de um ponto de equilíbrio estável levando em conta os efeitos da ação do TCSC. A trajetória do sistema é sobrepostas às curvas equipotenciais, e com isso é possível a avaliar os efeitos da compensação dinâmica do dispositivo nas mesmas. Através das simulações de dois sistemas testes, um sistema considerado de pequeno porte (Sistema de Quatro Máquinas) e outro de maior porte (New England) quando expostos a uma grande perturbação avalia-se a estabilidade de primeira oscilação com o intuito de determinar o tempo crítico de eliminação de uma falta no sistema. Posteriormente verifica-se a possibilidade de deslocar a trajetória do sistema com o propósito de que ela percorra um caminho mais íngreme na superfície da energia potencial, ou seja, idealmente que ela tenha orientação coincidente do gradiente da energia potencial, e analisa-se qual a influência da compensação série na energia potencial, com o intuito de obter tal direcionamento.

Palavras chave: Estabilidade transitória. Energia potencial. TCSC. Área de atração. Trajetória.

ABSTRACT

This dissertation examines the influence of TCSC FACTS on the power system energy function, specifically on the potential energy. The influence of dynamic compensation of the TCSC in the trajectory of the system after a major disruption in order to improve transient stability is also approached. The potential energy is evaluated in the space of machines rotor angular positions around stable equilibrium point taking into account effects of the TCSC action and the trajectory of the system is superimposed with equipotential curves and so it is possible to evaluate the effects of the dynamic compensation. Simulations are performed with two test systems, one being a (four machines system) and the other being the well-know New England system submitted to great disturbances. The stability of the first oscillation in order to determine the critical fault clearing time, is assessed. It is possible to change the system trajectory in order to traverse a more steeply path, i.e. ideally matching orientation with the potential energy gradient. The influence of series compensation in potential energy is taken into account, in order to conduct the system trajectory to the potential energy gradient orientation.

Keywords: Transient stability. Potential energy. TCSC. Attraction area. System trajectory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Sistema Multimáquinas	18
Figura 2 -	SM com as barras internas e cargas adicionadas à rede	19
Figura 3 -	Esquema básico de uma TCSC	21
Figura 4 -	Análogo de um SM	23
Figura 5 -	Ângulos internos dos rotores de um sistema estável	24
Figura 6 -	Ângulos internos dos rotores de um sistema instável	24
Figura 7 -	Curvas equipotenciais de um sistema de 3 máquinas (linhas sólidas) e limite da área de atração (linhas pontilhadas)	26
Figura 8 -	Curva $P \times \delta$	27
Figura 9 -	Influência do TCSC na A_{TSM}	27
Figura 10 -	Representação análoga da área de atração	28
Figura 11 -	SM com um TCSC instalado entre as barra k e ℓ	29
Figura 12 -	SM com um TCSC instalado entre as barras k e ℓ na forma de admitância	31
Figura 13 -	Matriz de rede aumentada	32
Figura 14 -	Matriz de rede aumentada após a reordenação de barras	32
Figura 15 -	Submatrizes após a reordenação de barras	33
Figura 16 -	Variação da admitância de transferência entre as máquinas i e j devida às variações da reatância do TCSC	38
Figura 17 -	Representação dinâmica do TCSC	39
Figura 18 -	Diagrama de blocos do TCSC equipado com um estabilizador complementar	40
Figura 19 -	Diagrama de blocos da função de transferência do compensador	41
Figura 20 -	Diagrama fasorial para a máquina i	43
Figura 21 -	ângulos das admitância de transferência	43
Figura 22 -	Diagrama de blocos do estabilizador suplementar	48
Figura 23 -	Sistema de quatro máquinas e duas áreas	50
Figura 24 -	Ângulos internos dos geradores com falta de 0,35 segundos	51
Figura 25 -	Ângulos internos dos geradores com falta de 0,36 segundos	52

Figura 26 -	Curvas equipotenciais caso base e trajetórias	53
Figura 27 -	Superfície caso base	54
Figura 28 -	Curvas equipotenciais e trajetórias afetadas pelo TCSC	55
Figura 29 -	Comparação entra as curvas equipotenciais e a trajetória caso base e dinâmica	56
Figura 30 -	Sistema New England	57
Figura 31 -	Ângulos internos dos geradores com duração da falta de 0,43 segundos	58
Figura 32 -	Ângulos internos dos geradores com duração da falta de 0,44 segundos	58
Figura 33 -	Curvas equipotenciais e trajetórias caso base	59
Figura 34 -	Curvas equipotenciais e trajetórias afetadas pelo TCSC	61
Figura 35 -	Comparação entre curvas equipotenciais e trajetória	62
Figura 36 -	Ângulos internos dos geradores influenciados pela ação dinâmica do TCSC com falta de 0,61 segundos	63
Figura 37 -	Ângulos internos dos geradores influenciados pela ação dinâmica do TCSC com falta de 0,62 segundos	63
Figura 38 -	Ângulos internos dos geradores com duração de falta de 0,74 segundos	64
Figura 39 -	Ângulos internos dos geradores com duração de falta de 0,75 segundos	65
Figura 40 -	Curva equipotencial e trajetórias influenciadas pela ação de dois dispositivos TCSC's	65
Figura 41 -	Comparação das curvas equipotenciais e trajetórias do sistema	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Constantes de tempo do controlador suplementar	49
Quadro 2 -	Dados das linhas de transmissão	50
Quadro 3 -	Dados de barra	51
Quadro 4 -	Dados das máquinas	51
Quadro 5 -	Fator de efeito para as máquinas i e j	52
Quadro 6 -	Comparação do tempo crítico	55
Quadro 7 -	Fator de efeito para as máquinas i e j	59
Quadro 8 -	Tempo Crítico de abertura do sistema	61
Quadro 9 -	Fator de efeito para as máquinas i e j	64
Quadro 10 -	Comparação do tempo crítico de abertura do sistema	67

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	13
1.1 Introdução	13
1.2 Apresentação do Trabalho	14
CAPÍTULO 2 - SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA E DISPOSITIVOS FACTS	
FACTS	16
2.1 O Sistema de Energia Elétrica	16
2.1.1 Rede Elétrica	16
2.1.2 Cargas	17
2.2 Sistema Multimáquinas	18
2.3 Dispositivos FACTS	20
2.4 TCSC	20
CAPÍTULO 3 - ESTABILIDADE DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	22
3.1 Estabilidade do Sistema de Energia Elétrica	22
3.2 Estabilidade Transitória	22
3.3 Método de Lyapunov	25
3.4 Influência dos Dispositivos FACTS na Estabilidade Transitória do Sistema de Energia Elétrica	26
CAPÍTULO 4 - REPRESENTAÇÃO DE UM TCSC NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS E SEU EFEITO NO DESEMPENHO DINÂMICO/TRANSITÓRIO	29
4.1 Inclusão de um TCSC no Sistema Multimáquinas	29
4.1.1 Redução às Barras de Interesse	31
4.1.2 Redução para as Barras Internas do Geradores Considerando a Atuação do TCSC	34
4.2 Representação Dinâmica do TCSC Equipado com um Estabilizador Suplementar	39

CAPÍTULO 5 - INFLUÊNCIA DO TCSC NA FUNÇÃO ENERGIA DE UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS	42
5.1 Efeitos de um Dispositivo FACTS TCSC na Energia Transitória de um Sistema Multimáquinas	42
5.2 Sistema Multimáquinas com as Máquinas Descritas pelo Modelo Clássico	45
5.3 Efeito do Controlador FACTS na Energia do Sistema	46
5.4 Lei de Controle para o Estabilizador Suplementar	48
CAPÍTULO 6 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS	50
6.1 Simulações, Resultados	50
6.1.1 <i>Sistema de Quatro Máquinas</i>	50
6.1.2 <i>Sistema New England</i>	57
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	68
7.1 Conclusões	68
REFERÊNCIAS	70

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1 Introdução

A função de um Sistema de Energia Elétrica (SEE) é fornecer energia elétrica aos seus consumidores com qualidade e confiabilidade. Qualidade se relaciona com a manutenção em níveis adequados da tensão e frequência necessária para o pleno funcionamento dos equipamentos elétricos e confiabilidade é a expectativa da entrega da energia elétrica com o mínimo de interrupções possível (ELGERD, 1976).

A crescente expansão do mercado consumidor aumentou a demanda de energia elétrica nos últimos anos, tornando o sistema sobrecarregado, ou seja, o crescimento das cargas sem o correspondente crescimento das capacidades de geração e transmissão devido a restrições de ordens técnicas, econômicas e ambientais tornam o sistema mais vulnerável a oscilações e contingências de operação (COLVARA, 2005).

Em face às restrições apresentadas e frente aos recentes avanços proporcionados na área da eletrônica de alta potência, uma alternativa efetiva é a utilização de controladores FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*). Esses equipamentos têm a capacidade de interferir controladamente nas características de transmissão, dotando o sistema de novas habilidades que se caracterizam como flexibilidade. Estes controladores proporcionam rápido controle dos fluxos de potência na rede de transmissão, mantendo-os em rotas estabelecidas, aumentam a capacidade de transmissão e, adequadamente controlados, podem contribuir significativa e positivamente ao desempenho dinâmico e/ou transitório do sistema (JOHNS; SONG, 1999).

Este trabalho aborda a influência da compensação série, mais especificamente o equipamento TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*), na energia potencial e na trajetória do sistema.

Ao longo dos anos o dispositivo TCSC tem sido estudado com o propósito de melhorar a estabilidade transitória dos SEE's. Em pesquisas mais recentes, estudaram-se os efeitos do TCSC na melhoria da estabilidade transitória, utilizando sinais remotos com o auxílio da tecnologia *Phasor Measurement Units* (PMU's). Esta

tecnologia é utilizada para medir em tempo real sinais remotos e assim transferi-los para a entrada do controlador TCSC, tais como a variação angular, velocidade angular dos geradores (AHN; HERTEN; DRIESEN, 2011; CVETKOVIC; ILIC, 2011). Ahn, Herten e Driesen (2011), 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. Já Cvetkovic e Ilic (2011) afirma que a combinação da tecnologia FACTS e PMU tem grande potencial para estabilizar grandes perturbações no SEE, a combinação de ambas as tecnologias resulta em uma poderosa e quase real detecção e controle em tempo capaz de monitorar e contrabalancear grandes perturbações.

Moslemi e Shayanfar (2011) propuseram a utilização do TCSC para o descongestionamento da linha de transmissão, visando a minimização do custo de geração e a melhoria da estabilidade transitória. Silva (2010) estudou a influência do dispositivo TCSC nas admitâncias de transferência entre máquinas, discriminando quais pares de máquinas são mais e menos afetados pelo TCSC.

Colvara (2005), analisou a influência do TCSC na energia potencial de um Sistema Máquinas Barra Infinita (SMBI). Posteriormente estendeu-se o estudo para Sistemas Multimáquinas (SM). Shizawa et al. (2004) propuseram um método para determinar a alocação ótima do TCSC, visando a melhoria da estabilidade transitória.

Capellette, Martins e Colvara (2012) abordaram a influência do controlador TCSC equipado com um estabilizador suplementar na energia potencial e na trajetória do sistema quando este exposto a uma grande perturbação, visando a melhoria da estabilidade transitória.

Neste trabalho será abordada a influência do FACTS TCSC na trajetória e na energia potencial do sistema, e com base nas curvas equipotenciais deseja-se elaborar uma lei de controle, com o intuito de que a trajetória do sistema tenha orientação coincidente com o gradiente da energia potencial.

1.2 Apresentação do Trabalho

Este estudo está estruturado em sete capítulos descritos a seguir:

No Capítulo 2 é apresentada a estrutura do SEE, o modelamento da rede elétrica e o modelo utilizado para a representação das cargas. Logo mais, é feita uma breve descrição dos dispositivos FACTS e do dispositivo que será utilizado neste trabalho, especificando algumas de suas características.

O Capítulo 3 apresenta a classificação do estudo da estabilidade de um sistema de acordo com a contingência sofrida, que pode ser pequena ou grande perturbação. Posteriormente será descrito em poucas palavras o que é estabilidade transitória e sobre o método de análise conhecido como método de Lyapunov, depois será discutido a influência de um FACTS na estabilidade transitória de um SEE.

No Capítulo 4 é apresentado o sistema multimáquinas com preservação da estrutura da rede, depois é feita a inclusão do equipamento TCSC e a redução para as barras internas dos geradores do sistema, mantendo os efeitos da ação do dispositivo. Posteriormente mostra-se o coeficiente de sensibilidade e o fator de efeito que são muito importantes para o desenvolvimento desse trabalho. Neste capítulo também são apresentadas as equações dinâmicas do TCSC equipado com um estabilizador suplementar.

O Capítulo 5 é dedicado ao desenvolvimento do equacionamento da influência do equipamento TCSC na energia transitória de um sistema multimáquinas (SM). Nesse capítulo são apresentadas as equações que descrevem os geradores pelo modelo clássico e a lei de controle baseada nas curvas equipotenciais do sistema.

O Capítulo 6 é dedicado às simulações e resultados e por fim no Capítulo 7 as conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2: SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA E DISPOSITIVOS FACTS

2.1 O Sistema de Energia Elétrica

Um SEE, 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 unidades geradoras e as cargas (STEVENSON, 1974).

O sistema brasileiro se destaca pela grande quantidade de usinas hidroelétricas, que geralmente se encontram distantes de seus consumidores, levando a necessidade de transmitir a energia elétrica até eles. O transporte da energia elétrica até o usuário final, que a utilizará de acordo com a sua necessidade, se dá por meio de linhas de transmissão, e este, deverá ser feito com altos padrões de qualidade e confiabilidade, o que significa operar em níveis aceitáveis mantendo a tensão e frequência constantes (ELGERD, 1976).

O SEE deverá ser capaz de operar em regime permanente e ser flexível quando sofrer grandes ou pequenas perturbações, de forma a garantir a continuidade da prestação do serviço. Muitas são as perturbações que o SEE pode sofrer, dentre elas podendo-se citar, curto-circuito, desligamento de linhas de transmissão, entrada ou saída de cargas e/ou geradores (ANDERSON; FOUAD, 1977; KUNDUR, 1994).

2.1.1 Rede Elétrica

Considera-se a rede elétrica em regime permanente, assim sua representação genérica é dada pela Equação 1 (ANDERSON; FOUAD, 1977):

$$I = YV \quad (1)$$

onde

I é o vetor das injeções de correntes nas barras da rede;

Y é a matriz admitância de barra;

V é o vetor das tensões nas barras (condição pré-falta).

A matriz admitância de barra fornece a relação entre corrente e tensão de barras da rede. A estrutura desta matriz para uma rede com m barras é dada pela Equação 2.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1m} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2m} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & Y_{m3} & \dots & Y_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

As expressões para o cálculo dos elementos da matriz admitância de barra para o caso em que não existam na rede acoplamentos mútuos entre elementos ou transformadores defasadores são dadas pelas Equações 3 e 4 (KUNDUR, 1994):

$$Y_{mk} = Y_{km} = -y_{km} \quad (3)$$

$$Y_{mm} = jb_m^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (jb_{mk}^{sh} + y_{mk}) \quad (4)$$

os termos b_m^{sh} e b_{km}^{sh} na Equação 4 são as admitâncias *shunt* da barra m e da linha $m - k$ respectivamente.

$$y_{mk} = (z_{mk})^{-1} = \frac{r_{mk}}{r_{mk}^2 + x_{mk}^2} - j \frac{x_{mk}}{r_{mk}^2 + x_{mk}^2} \quad (5)$$

onde Y_{mk} e Y_{km} são as admitâncias de transferência entre as barras m e k e Y_{mm} são as admitâncias próprias de barra m como definidas na Equação 4.

2.1.2 Cargas

Em geral as cargas referem-se aos equipamentos ou ao conjunto de equipamentos que retiram energia do sistema (ELGERD, 1976).

O comportamento de uma carga pode ser descrito por vários modelos em função da tensão aplicada entre seus terminais, dentre os quais se destacam as

cargas de corrente constante, cargas de potência constante, cargas de impedância (admitância) constante (OLIVEIRA et al. 2000). Neste trabalho será usado o modelo de carga de admitância constante que é dada pela Equação 6.

$$Y_L = \frac{P_L - jQ_L}{|V|^2} \quad (6)$$

onde:

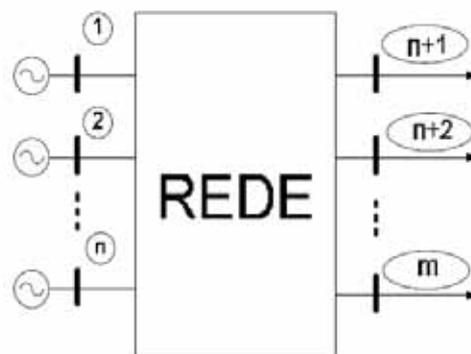
$(P_L - jQ_L)$ – conjugado da potência de carga no barramento (condição pré-falta)

$|V|$ – módulo do fasor tensão no barramento na condição pré-falta.

2.2 Sistema Multimáquinas

Em um ambiente real existem várias máquinas conectadas através de um sistema de transmissão, e nesse caso não se podem considerar as máquinas ou subsistemas como barramentos infinitos (ALBERTO; BRETAS, 2000). Assim, considere-se um sistema com n máquinas conectadas a uma rede de m barras, como ilustrado na Figura 1:

Figura 1 - Sistema Multimáquinas



Fonte: Colvara (2005).

Os geradores são representados por fontes de tensão E_i ($i = 1, 2, \dots, n$) (não necessariamente constante) conectadas à rede através das respectivas reatâncias transitórias de eixo direto (X'_{di}). Apenas para facilidade de notação, as máquinas são

consideradas instaladas nas n primeiras barras da rede e as cargas estão conectadas às demais m barras do SEE.

Assim, a rede pode ser descrita pela Equação 1. Consideram-se os geradores do Sistema dinâmico Multimáquinas (SM) descrito pelo modelo clássico, então:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (7)$$

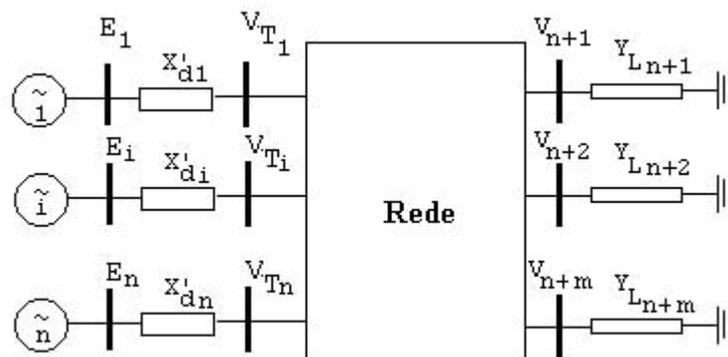
$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_i] \quad (8)$$

$$P_{ei} = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n [E_i G_{ij} E_j \cos \delta_{ij} + E_i B_{ij} E_j \sin \delta_{ij}] \quad (9)$$

$$i \text{ e } j = 1, 2, \dots, n$$

Adicionando as barras internas dos geradores à rede, ela terá $m + n$ barras. Além disto, sendo as cargas representadas como admitâncias constantes e incorporadas à rede, o sistema é representada preservando a estrutura como ilustrado na figura seguir (COLVARA, 2005).

Figura 2 - SM com as barras internas e cargas adicionadas à rede



Fonte: Colvara (2005).

2.3 Dispositivos FACTS

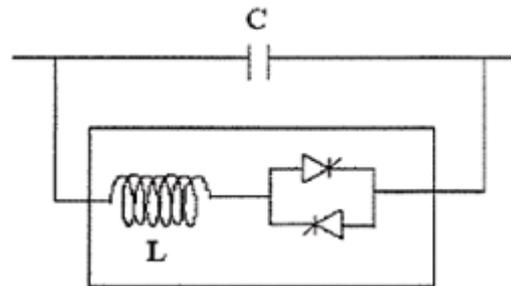
O termo **FACTS** vem da denominação em língua inglesa *Flexible Alternating Current Transmission System* ou “*Sistema de Transmissão Flexível de Corrente Alternada*” em português. Os dispositivos FACTS são equipamentos baseados na eletrônica de potência que oferecem novas possibilidades, controlando o fluxo de potência e aumentando a capacidade de potência transmitida nas linhas de transmissão. Tais possibilidades se dão pelo fato de que os controladores FACTS podem controlar os parâmetros que afetam diretamente a operação do sistema de transmissão, tais como a impedância série, admitância shunt, corrente, tensão e ângulo de fase (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Os dispositivos FACTS são distribuídos em grupos. O primeiro grupo é constituído pelos controladores chaveados a tiristores. Neste grupo encontram-se os seguintes FACTS: **Static Var Compensator (SVC)**, **Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)** e **Phase Shifter (PS)**. O segundo grupo trata de controladores baseados em conversores. Neste grupo têm-se os controladores auto comutáveis baseados em conversores e encontram-se os controladores **STATic synchronous COMPensator (STATCOM)**, **Static Synchronous Series Compensator (SSSC)**, **Unified Power Flow Controller (UPFC)** e o **Interline Power Flow Controller (IPFC)** (JOHNS; SONG, 1999).

2.4 TCSC

Um esquema básico para a compensação da linha de transmissão a este equipamento foi proposto em 1986 por Vithayathil e é ilustrado na Figura 3 (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Figura 3 - Esquema básico de um TCSC



Fonte: Johns e Song (1999)

O TCSC é um controlador que é instalado em série com a linha de transmissão, compensando parte de sua reatância indutiva e inserindo uma reatância capacitiva, ou seja, este equipamento cancela parte da linha, tornando-a “virtualmente” mais curta (JOHNS; SONG, 1999).

CAPÍTULO 3: ESTABILIDADE DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 Estabilidade do Sistema de Energia Elétrica

Um sistema de energia elétrica é dito estável se este for capaz de encontrar um novo ponto de operação aceitável ou voltar para seu ponto de operação após ser submetido a uma perturbação, seja ela de pequena ou grande magnitude (KUNDUR, 1994).

De acordo com o tipo de perturbação ocorrida define-se uma importante classificação no estudo da estabilidade de um SEE. Assim, se um sistema sofre pequenos distúrbios (perturbações) provocados pelas variações que ocorrem continuamente nas cargas e geradores, que bem podem ser interpretadas como perturbações, o estudo da estabilidade é chamado de estabilidade dinâmica. Nos dias atuais o problema da estabilidade dinâmica está associado à falta de amortecimento, dessa forma, a instabilidade do sistema é caracterizada por oscilações angulares com amplitudes crescentes. Um distúrbio é considerado pequeno se as equações que descrevem o comportamento do sistema podem ser linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio estável com o objetivo de analisar a estabilidade do sistema em um determinado ponto de operação.

O estudo da estabilidade de um sistema quando sujeito a variações bruscas nas condições de operação devido a grandes distúrbios é conhecido como análise da estabilidade transitória. Consideram-se grandes distúrbios queda de linha de transmissão, saída brusca de uma carga e/ou gerador, curtos-circuitos, dentre outras anomalias no sistema que causam grandes variações angulares dos rotores, neste caso, a instabilidade do sistema é caracterizada por oscilações angulares monotônicas devido à falta de torque sincronizante, geralmente manifestada na primeira oscilação (ANDERSON; FOUAD, 1977; KUNDUR, 1994, KUNDUR et al, 2004).

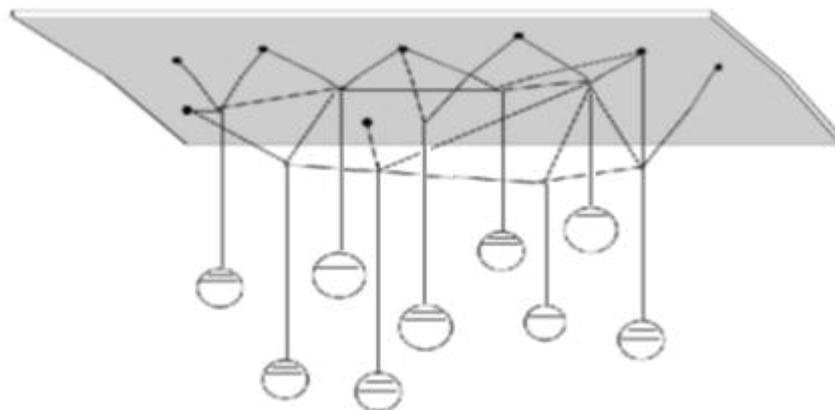
3.2 Estabilidade Transitória

Quando o sistema sofre uma grande e súbita perturbação, os ângulos internos dos geradores sofrem grandes variações e a estabilidade do SEE

dependerá das condições iniciais de operação e da contingência. Se após a contingência o sistema for estável e as condições de operação forem diferentes, o sistema operará em um novo ponto de equilíbrio. Porém, se as condições de operação forem idênticas o sistema, se estável, voltará para o ponto de operação inicial (KUNDUR, 1994).

Considere o Sistema Multimáquinas (SM) representado pelo análogo da Figura 4, em que as massas representam os geradores e as linhas de transmissão são representadas pelos elásticos.

Figura 4 - Análogo de um SM

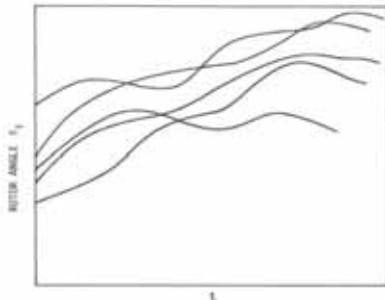


Fonte: Elgerd (1976)

Inicialmente o sistema se encontra em regime permanente, porém, num dado instante, um dos cordões é subitamente cortado, representando o rompimento de uma linha de transmissão. Nessas condições, as massas se movimentarão e poderão encontrar um novo ponto de equilíbrio, ou ocasionar novos rompimentos e evoluir para instabilidade. Assim, se um sistema for capaz de manter a integridade após tal perturbação diz-se que ele é estável para a falta em questão (ELGERD, 1976).

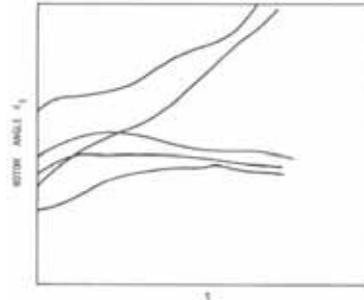
A estabilidade de um sistema implica em manter o sincronismo após uma grande perturbação, porém, estas perturbações fazem com que os geradores e as cargas entrem em desequilíbrio e conseqüentemente perde-se o equilíbrio entre as potências (potência mecânica e potência elétrica) de cada unidade geradora, ou seja, há uma diferença entre potência mecânica e potência elétrica do gerador, implicando em uma aceleração ou desaceleração das máquinas e afetando diretamente o ângulo interno do rotor. Se os ângulos dos rotores forem plotados em função do tempo, existem duas possibilidades, como ilustram as Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Ângulos internos dos rotores de um sistema estável



Fonte: Pai (1981)

Figura 6 - Ângulos internos dos rotores de um sistema instável



Fonte: Pai (1981)

Na Figura 5, os ângulos dos rotores aumentam, porém o sincronismo é mantido, assim, diz-se que o sistema está em sincronismo, em contrapartida, na Figura 6, algumas máquinas resultam com velocidade diferente das demais, ou seja, os ângulos internos dos rotores de um grupo de geradores crescem mais rapidamente e aumentam indefinidamente quando comparado com outro grupo de geradores, caracterizando a instabilidade ou perda de sincronismo do sistema (PAI, 1981).

De acordo com Alberto e Bretas (2000), o objetivo primordial do estudo da estabilidade transitória consiste na determinação do tempo crítico de abertura do sistema. Assim, define-se tempo crítico de abertura do sistema como sendo o máximo tempo de duração da falta de modo a garantir o sincronismo entre máquinas do sistema, e, caso contrário, se o defeito for eliminado após esse tempo o sistema evoluirá para instabilidade (PAI, 1981). Colvara (2005), utilizou o tempo crítico de abertura do sistema como ferramenta para avaliar a melhoria da estabilidade transitória, comparando o tempo crítico de abertura do sistema para o caso base e o tempo crítico de abertura do sistema após a inserção de um dispositivo FACTS na rede.

A análise da estabilidade transitória é feita basicamente por meio de dois métodos, os métodos diretos e os métodos indiretos. Os métodos indiretos, mais tradicionais, requerem a solução das equações diferenciais que, tratando-se de sistemas não-lineares, como é o caso dos SEE's, não podem ser resolvidas analiticamente.

Os métodos diretos são muito vantajosos quando comparados com os métodos indiretos no estudo da estabilidade transitória, pois é possível analisar a estabilidade de um sistema sem resolver as equações diferenciais, baseando-se na

função energia do sistema, obtida originalmente por meio do método de Lyapunov (PAI, 1981).

3.3 Método de Lyapunov

Lyapunov em 1892 propôs que o estudo da estabilidade de um ponto de equilíbrio de um sistema não linear de dimensão n

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0 \quad (10)$$

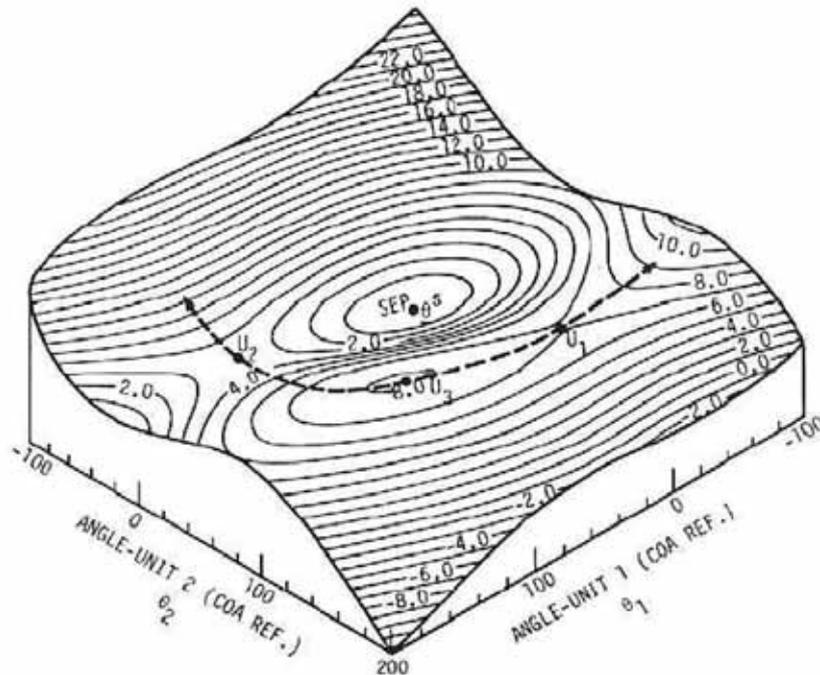
pode ser obtida sem resolução das equações diferenciais. De acordo com Lyapunov, se existir uma função $V(x)$ para 10 que é positiva definida para uma região em torno do ponto de equilíbrio e sua derivada temporal $\dot{V}(x)$ for negativa definida na mesma região, o ponto de equilíbrio é dito assintoticamente estável (SAUER; PAI, 1998).

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i + \sum_{k=1}^m \int_{\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}}^{\delta_{ij}^1 + \alpha_{ij}} f_k(\varphi_k) d\varphi \quad (11)$$

A função $V(x)$ tem natureza de energia e é composta por duas parcelas perfeitamente caracterizadas como energia cinética (E_c) e energia potencial (E_p). Pode-se calcular E_p no espaço das posições angulares dos rotores, construindo um mapa da região de estabilidade em torno de um ponto de equilíbrio. Este mapa pode ser apresentado por curvas de nível, também conhecidas como curvas equipotenciais. Essas curvas são fechadas ao redor do ponto de equilíbrio estável θ^s como ilustra a Figura 7, que exemplifica curvas equipotenciais de um sistema de 3 máquinas, em que U_1 e U_2 são pontos de equilíbrio instável do tipo sela U_3 , que é um ponto de equilíbrio instável (PAI, 1981).

Através desse mapa obtém-se uma boa noção da área de atração que circunda o ponto de equilíbrio estável do sistema e utilizando esse mapa será possível analisar a influência do equipamento TCSC na energia potencial do SEE.

Figura 7 - Curvas equipotenciais de um sistema de três máquinas (Linhas sólidas) e limite da área de atração (linha pontilhada)



Fonte: Pai (1981)

3.4 Influência dos Dispositivos FACTS na Estabilidade Transitória do Sistema de Energia Elétrica

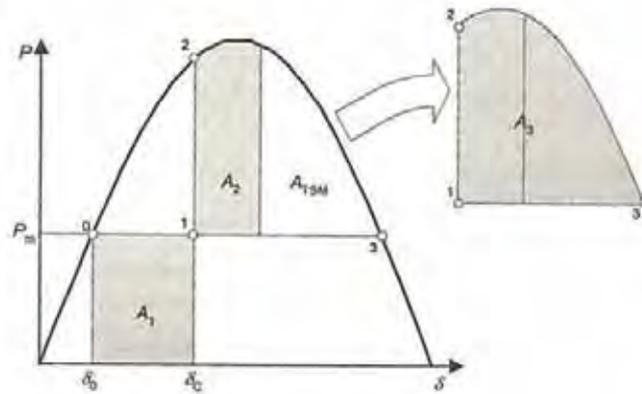
Sabe-se que os FACTS, adequadamente controlados, melhoram a margem de estabilidade transitória do SEE, pois esses equipamentos são capazes de controlar as características do sistema de transmissão. Em um sistema máquina barra infinita (SMBI) faz-se a análise da margem de estabilidade transitória de um sistema afetado pelo equipamento, utilizando o critério das áreas iguais.

Na Figura 8 tem-se uma ilustração da aplicação do critério das áreas sob a curva $P \times \delta$, que ilustra com clareza tal margem para análise de estabilidade do sistema SMBI, considerando uma perturbação do tipo curto-circuito.

Na Figura 8 A_1 é a área de aceleração, pois corresponde ao intervalo de duração do curto circuito, quando a potência elétrica é nula enquanto a potência mecânica é aplicada no eixo da máquina. Já a área A_2 corresponde à área de desaceleração e A_3 é a máxima área possível de desaceleração, ou seja, correspondente à condição de potência elétrica maior que a potência mecânica. Assim no exato instante em que $A_2 = A_1$, o ângulo passa por máximo, ou seja, a

partir deste instante começa a decrescer, o que significa que o sistema é estável. A diferença entre a área A_3 e a área A_2 é chamada de margem de estabilidade transitória A_{TSM} e se essa margem for negativa o sistema é dito instável.

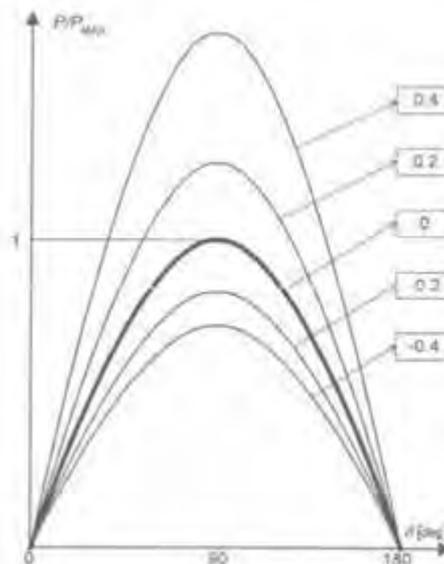
Figura 8 - Curva $P \times \delta$



Fonte: Johns e Song (1999)

É possível melhorar a estabilidade do SEE aumentando a margem de estabilidade transitória, porém cada tipo de compensação a afeta de modo diferente. O equipamento TCSC melhora significativamente a estabilidade de um sistema, pois quando instalado em uma linha de transmissão aumenta a capacidade de transmissão da linha, aumentando de forma direta a margem de estabilidade transitória, como ilustra a Figura 9.

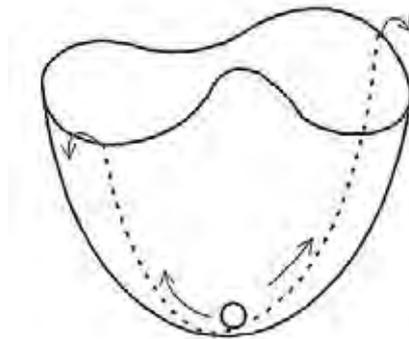
Figura 9 - Influência do TCSC na A_{TSM}



Fonte: Johns e Song (1999)

O critério das áreas não é diretamente aplicável para SM, e, para analisar a estabilidade transitória, uma alternativa que se apresenta é o emprego do método direto por meio da função energia, mais especificamente a energia potencial, que permite uma estimativa da área de atração de um sistema, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Representação análoga da área de atração



Fonte: Johns e Song (1999)

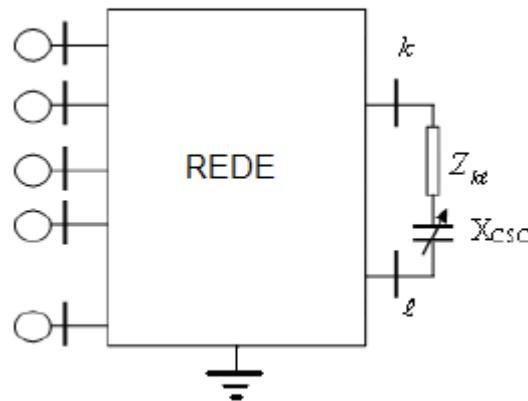
A figura acima traz uma analogia da superfície da energia potencial de um SM. Inicialmente considera-se que o sistema encontra-se em regime permanente (no ponto de equilíbrio estável), com sua superfície semelhante a uma bacia com uma bola no fundo. Assim, quando o sistema sofre uma perturbação a bola que se situa no fundo da bacia ganhará energia cinética e se a energia cinética for maior que a energia potencial na direção do movimento da bola, esta poderá saltar para fora caracterizando a instabilidade do sistema (JOHNS; SONG, 1999).

CAPÍTULO 4 - REPRESENTAÇÃO DE UM TCSC NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS E SEU EFEITO NO DESEMPENHO DINÂMICO/TRANSITÓRIO

4.1 Inclusão de um TCSC no Sistema Multimáquinas (SILVA, 2010)

De estudos anteriores (SILVA, 2010) sabe-se que o dispositivo afeta as admitâncias de transferência entre as máquinas, as quais influenciam diretamente a energia potencial. Considera-se que o dispositivo está instalado em uma linha genérica $k - \ell$ como ilustrado na Figura 11 e posteriormente far-se-á a redução da rede às barras internas do gerador.

Figura 11 - SM com um TCSC instalado entre as barras k e ℓ



Fonte: Elaboração própria do autor

O TCSC acrescenta uma reatância série capacitiva na linha de transmissão, cancelando parte da reatância própria da linha na qual ele está instalado. A reatância proveniente do TCSC é composta de duas partes, uma parte fixa X_{csc}^0 , e outra parte variável ΔX_{csc} . A impedância efetiva da linha de transmissão sob a atuação do dispositivo é dada por:

$$Z_{ef} = R_{k\ell} + jX_{k\ell} - jX_{csc}^0 - j\Delta X_{csc} \quad (12)$$

onde $R_{k\ell}$ é a resistência e $X_{k\ell}$ é a reatância da linha de transmissão.

Define-se a impedância da linha de transmissão de regime permanente como:

$$Z_{k\ell}^0 = R_{k\ell} + jX_{k\ell} - jX_{csc}^0 \quad (13)$$

onde o sobrescrito ⁰ indica os valores de regime permanente.

Deste modo, a Equação 13 pode se reescrita como:

$$Z_{ef} = Z_{k\ell}^0 - j\Delta X_{csc} \quad (14)$$

A admitância da linha afetada pelo TCSC é dada pela Equação 15.

$$y_{kl} = \frac{1}{Z_{k\ell}^0 - j\Delta X_{csc}} \quad (15)$$

Separando a parte fixa da parte variável na Equação 15, tem-se:

$$y_{k\ell} = \frac{1}{Z_{k\ell}^0} + \frac{j\Delta X_{csc}}{Z_{k\ell}^0(Z_{k\ell}^0 - j\Delta X_{csc})} \quad (16)$$

Tem-se assim,

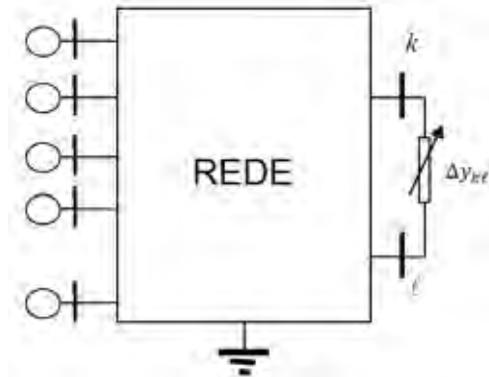
$$y_{k\ell} = y_{k\ell}^0 + \Delta y_{k\ell} \quad (17)$$

sendo $y_{k\ell}^0$ parte fixa e $\Delta y_{k\ell}$ parte variável da admitância da linha que são dados pelas Equações 18 e 19 respectivamente.

$$y_{k\ell}^0 = \frac{1}{Z_{k\ell}^0} \quad (18)$$

$$\Delta y_{k\ell} = \frac{j\Delta X_{csc}}{Z_{k\ell}^0(Z_{k\ell}^0 - j\Delta X_{csc})} \quad (19)$$

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



Fonte: Elaboração própria do autor

4.1.1 Redução às Barras de Interesse

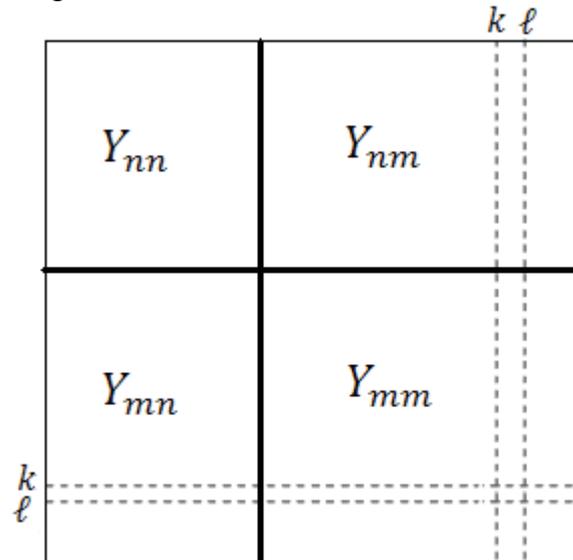
Uma vez que o interesse inicialmente reside na análise dos efeitos causados pela ação do TCSC nas interações entre os geradores do sistema, inicia-se o processo de redução às barras internas dos geradores, fazendo a redução para as chamadas barras de interesse, quais sejam as n barras internas dos geradores, acrescidas das barras entre as quais o TCSC encontra-se instalado.

Partindo da matriz admitância de barra da rede aumentada que é dada pela Equação 20,

$$Y_{aum} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nm} \\ Y_{mn} & Y_{mm} \end{bmatrix}_{(n+m) \times (n+m)} \quad (20)$$

a atuação do dispositivo em uma linha de transmissão entre as barras genéricas $k - \ell$ é representada na matriz Y_{aum} em elementos das respectivas linhas e colunas da matriz, como ilustrado na Figura 13.

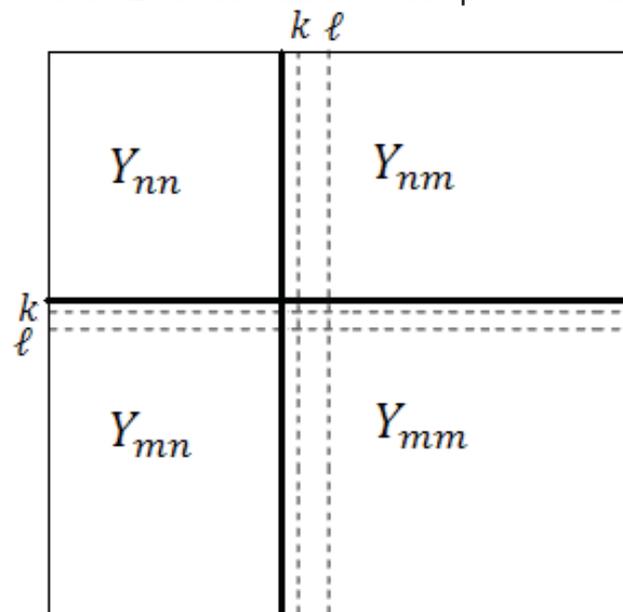
Figura 13 - Matriz de rede aumentada.



Fonte: Elaboração própria do autor

A título de simplicidade, faz-se uma reordenação de barras, de modo que as linhas e colunas correspondentes às barras k e ℓ sejam colocadas imediatamente a seguir das linhas e colunas da submatriz Y_{nn} , como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Matriz de rede aumentada após a reordenação de barras.

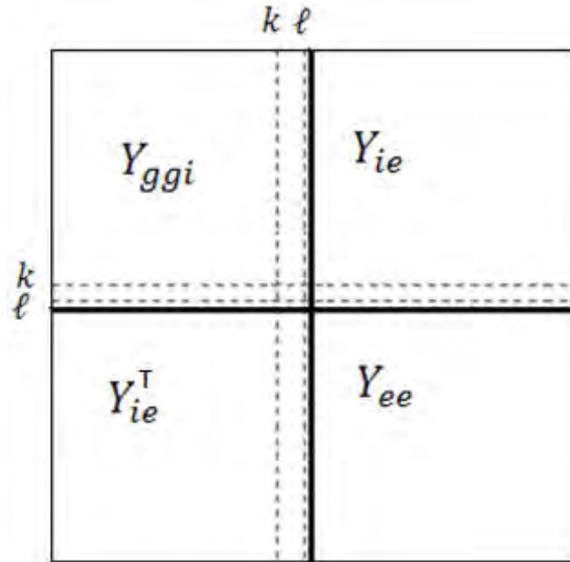


Fonte: Elaboração própria do autor

Após a reordenação de barras obtêm-se novas submatrizes, os índices "i" e "e" significam interesse e externo respectivamente, e são utilizados para denotar as

submatrizes que se encontram depois das linhas e colunas $n + 2$ da matriz admitância de rede aumentada que é dada pela Figura 15.

Figura 15 - Submatrizes após a reordenação de barras



Fonte: Elaboração própria do autor

Assim, faz-se a redução para as barras de interesse utilizando a Equação 21.

$$Y_{red}^{int} = Y_{ggi} - Y_{ie}(Y_{ee}^{-1})Y_{ei} \quad (21)$$

Da Equação 21, tem-se o seguinte resultado:

$$Y_{red}^{int} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & \bar{Y}_{g,csc} \\ \bar{Y}_{csc,g} & Y_{csc,csc} \end{bmatrix}_{(n+2) \times (n+2)} \quad (22)$$

A submatriz Y_{gg} é uma submatriz quadrada de ordem n , $\bar{Y}_{g,csc}$ é uma submatriz cuja ordem é $n \times 2$, $Y_{csc,g}$ é a transposta da matriz $Y_{g,csc}$.

A submatriz $Y_{csc,csc}$ é uma submatriz quadrada de ordem 2 dada pela Equação 23.

$$Y_{csc,csc} = \begin{bmatrix} Y_{kk}^0 + \Delta y_{kl} & Y_{kl}^0 - \Delta y_{kl} \\ Y_{kl}^0 - \Delta y_{kl} & Y_{ll}^0 + \Delta y_{kl} \end{bmatrix} \quad (23)$$

4.1.2 Redução para as Barras Internas dos Geradores preservando a Atuação do TCSC

Após fazer a redução para as barras de interesse, far-se-á a redução para as barras internas dos geradores que é dada pela Equação 24.

$$Y_{red} = Y_{gg} - Y_{g,csc}(Y_{csc,csc}^{-1})Y_{csc,g} \quad (24)$$

A inversão da submatriz $Y_{csc,csc}$ é dada pela Equação 25, sua estrutura é fornecida pela Equação 23.

$$(Y_{csc,csc})^{-1} = \frac{1}{Det} \begin{bmatrix} Y_{\ell\ell}^0 + \Delta y_{k\ell} & -(Y_{k\ell}^0 - \Delta y_{k\ell}) \\ -(Y_{k\ell}^0 - \Delta y_{k\ell}) & Y_{kk}^0 + \Delta y_{k\ell} \end{bmatrix} \quad (25)$$

O determinante da Equação 25 é dado pela Equação 26 onde já se separou a parte fixa da admitância da parte variável:

$$Det = Y_{kk}^0 Y_{\ell\ell}^0 - Y_{k\ell}^0{}^2 + (Y_{kk}^0 + Y_{\ell\ell}^0 + 2Y_{k\ell}^0)\Delta y_{k\ell} \quad (26)$$

Esta última pode ser reescrita definindo-se

$$det^0 = Y_{kk}^0 Y_{\ell\ell}^0 - Y_{k\ell}^0{}^2 \quad (27)$$

$$\bar{K}_{k\ell} = (Y_{kk}^0 + Y_{\ell\ell}^0 + 2Y_{k\ell}^0) \quad (28)$$

resultando em

$$Det = det^0 + \bar{K}_{k\ell}\Delta y_{k\ell} \quad (29)$$

Substituindo a Equação 29 na Equação 25, tem-se:

$$(Y_{csc,csc})^{-1} = \frac{1}{det^0 + \bar{K}_{k\ell}\Delta y_{k\ell}} \left\{ \begin{bmatrix} Y_{\ell\ell}^0 & -Y_{k\ell}^0 \\ -Y_{k\ell}^0 & Y_{kk}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \Delta y_{k\ell} \right\} \quad (30)$$

Dividindo a Equação 4.19 por det^0 , substituindo na Equação 24 e reorganizando os termos, obtém-se:

$$Y_{red} = Y_{gg} - \frac{1}{1 + \left(\frac{\bar{K}_{k\ell}\Delta y_{k\ell}}{det^0}\right)} Y_{g,csc} \left\{ Y_{csc,csc}^0 + \frac{1}{det^0} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \Delta y_{k\ell} \right\} Y_{csc,g} \quad (31)$$

Reescrevendo a Equação 31 tem-se:

$$Y_{red} = Y_{gg} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\bar{K}_{k\ell}\Delta y_{k\ell}}{det^0}\right)} \left\{ \Delta Y^0 - \frac{1}{det^0} Y_{g,csc} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} Y_{csc,g} \Delta y_{k\ell} \right\} \quad (32)$$

onde

$$\Delta Y^0 = -Y_{g,csc} Y_{csc,csc}^0 Y_{csc,g} \quad (33)$$

Definindo a Equação 34.

$$\bar{k}_{k\ell} = \frac{\bar{K}_{k\ell}}{det^0} \quad (34)$$

Substituindo a Equação 34, somando e subtraindo o termo ΔY^0 na Equação 32, tem-se:

$$Y_{red} = Y_{gg} + \Delta Y^0 + \left(\frac{1}{1 + \bar{k}_{k\ell}\Delta y_{k\ell}} - 1 \right) \Delta Y^0 - \frac{1}{(1 + \bar{k}_{k\ell}\Delta y_{k\ell})det^0} Y_{g,csc} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} Y_{csc,g} \Delta y_{k\ell} \quad (35)$$

Reorganizando a Equação 35 e definindo as Equações 36 e 37.

$$Y_{gg}^{red0} = Y_{gg} + \Delta Y^0 \quad (36)$$

$$Y_{csc} = \left\{ -\bar{k}_{k\ell}\Delta Y^0 - \frac{1}{det^0} Y_{g,csc} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} Y_{csc,g} \right\} \frac{\Delta y_{k\ell}}{1 + \bar{k}_{k\ell}\Delta y_{k\ell}} \quad (37)$$

A matriz Y_{gg}^{red0} que é dada pela Equação 36 é a matriz de rede reduzida na condição de regime permanente, ou seja, nesta matriz não leva em consideração a influência da parte variável do dispositivo, assim, seus elementos são admitâncias complexas constantes de magnitude Y_{ij}^0 e ângulo θ_{ij}^0 que podem ser representadas da seguinte forma:

$$\bar{Y}_{ij}^0 = Y_{ij}^0 \left| \theta_{ij}^0 \right. \quad (38)$$

O termo entre chaves na Equação 37 é uma matriz quadrada de ordem n com elementos constantes. Assim, define-se:

$$F_y = -\frac{1}{det^0} Y_{g,csc} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} Y_{csc,g} \quad (39)$$

e substituindo na Equação 37 tem-se a Equação 40.

$$\Delta Y_{csc} = \left\{ -\bar{k}_{k\ell} \Delta Y^0 + F_y \right\} \frac{\Delta y_{k\ell}}{1 + \bar{k}_{k\ell} \Delta y_{k\ell}} \quad (40)$$

Assim a matriz reduzida às barras internas dos geradores é dada por:

$$Y_{red} = Y_{gg}^{red0} + \Delta Y_{csc} \quad (41)$$

A matriz de rede reduzida depende das variações Δy_{kl} da admitância equivalente do TCSC e com vistas a expressar esta dependência adequadamente, define-se o fator escalar:

$$Fat_{csc} = \frac{\Delta y_{k\ell}}{1 + \bar{k}_{k\ell} \Delta y_{k\ell}} \quad (42)$$

com o que a admitância de transferência entre máquinas genéricas i e j afetada pelo TCSC instalado entre as barras k e ℓ , é dada pela Equação 43.

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 + \left\{ -\bar{k}_{k\ell} \Delta Y_{ij}^0 - F_{y_{ij}} \right\} Fat_{csc} \quad (43)$$

Substituindo a Equação 19 na Equação 42, tem-se:

$$Fat_{csc} = \frac{j\Delta X_{csc}}{Z_{k\ell}^0{}^2 + (\bar{k}_{k\ell} - Z_{k\ell}^0)j\Delta X_{csc}} \quad (44)$$

Assim substituindo (44) na Equação 43 tem-se:

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 + \left\{ -\bar{k}_{k\ell}\Delta Y_{ij}^0 - F_{y_{ij}} \right\} \frac{j\Delta X_{csc}}{Z_{k\ell}^0{}^2 + (\bar{k}_{k\ell} - Z_{k\ell}^0)j\Delta X_{csc}} \quad (45)$$

Supondo-se que ΔX_{csc} seja relativamente pequeno, pode-se admitir a formulação linear do fator escalar no ponto de equilíbrio em relação à condição de equilíbrio, quando $\Delta X_{csc} = 0$:

$$\left. \frac{dFat_{csc}}{d\Delta X_{csc}} \right|_{\Delta X_{csc}=0} = j \frac{1}{Z_{k\ell}^0{}^2} \quad (46)$$

Desse modo define-se o coeficiente de sensibilidade na Equação 47.

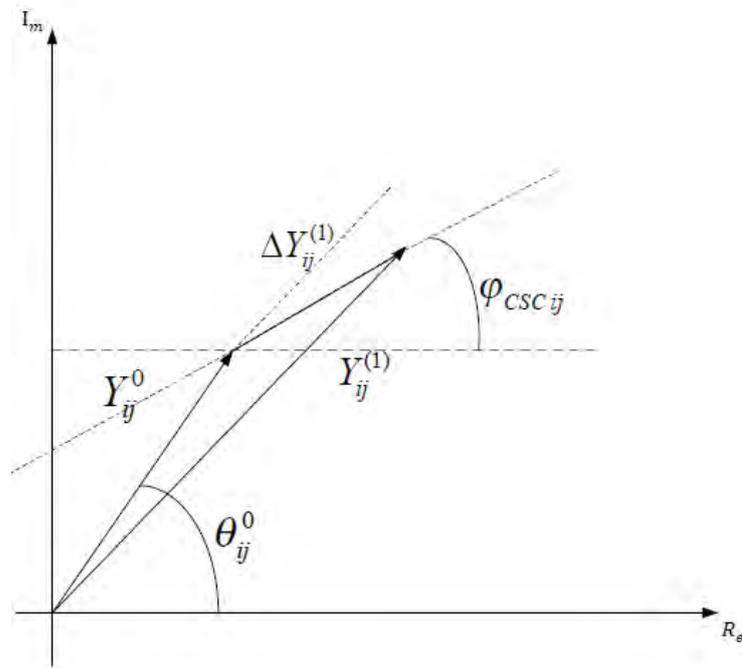
$$\bar{K}_{cscij} = \left\{ -\bar{k}_{k\ell}\Delta Y_{ij}^0 - F_{y_{ij}} \right\} j \frac{1}{Z_{k\ell}^0{}^2} \quad (47)$$

nota-se que \bar{K}_{cscij} é uma grandeza complexa composta de magnitude K_{cscij} e ângulo φ_{cscij} , como segue na Equação 48.

$$\bar{K}_{cscij} = K_{cscij} \left| \underline{\varphi_{cscij}} \right. \quad (48)$$

Nota-se que tanto a magnitude como o ângulo do coeficiente de sensibilidade são constantes, portanto as variações da admitância de transferência ΔY_{ij} em função das variações da reatância do TCSC, dependem diretamente de ΔX_{csc} e ocorrem sobre a linha de inclinação φ_{cscij} no plano complexo das admitâncias, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Variação da admitância de transferência entre as máquinas i e j devida às variações da reatância do TCSC



Fonte: Silva (2010)

A variação efetiva da magnitude da admitância de transferência é dada da seguinte forma:

$$\Delta Y_{cscij}^{ef} = K_{cscij}^{ef} \Delta X_{csc} \quad (49)$$

O termo K_{cscij}^{ef} é definido como o coeficiente de eficácia do TCSC e expressa a eficácia da ação do TCSC sobre a magnitude da admitância de transferência entre as máquinas i e j e é dado pela Equação 4.39 (SILVA, 2010).

$$K_{cscij}^{ef} = K_{cscij} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{cscij}^0) \quad (50)$$

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

Existe um dado que expressa com mais clareza a influência do TCSC nas admitâncias de transferência, ou seja, comparando as variações das admitâncias de

transferência entre máquinas com a magnitude original da mesma, desse modo, tem-se uma informação mais significativa da contribuição da susceptância do TCSC para as admitâncias de transferências entre máquinas, com isto define-se Fator de Efeito que é dado pela Equação 51 (MARQUES, 2009; PERARO, 2010; SILVA, 2010).

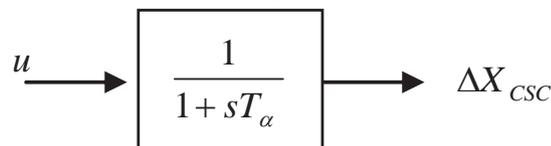
$$F_{cscij} = \frac{K_{cscij}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad (51)$$

Este fator expressa as variações da susceptância do TCSC sobre a admitância de transferência entre duas máquinas. Este índice pode ser usado para indicar quais pares de máquinas são mais ou menos afetados pela atuação do TCSC quando localizado entre duas barras quaisquer, dessa forma é possível identificar qual é a melhor localização para o dispositivo, visando às interações entre determinado par de máquinas, ou visando às oscilações entre máquinas de duas áreas diferentes (SILVA, 2010).

4.2 Representação Dinâmica do TCSC Equipado com um Estabilizador Suplementar

O TCSC é representado por um bloco de primeira ordem definido por uma constante de tempo T_α representativa da dinâmica dos tiristores, como ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Representação dinâmica do TCSC



Fonte: Johns e Song (1999)

O controle do TCSC é efetuado a partir de uma entrada u via compensação de fase, ou seja:

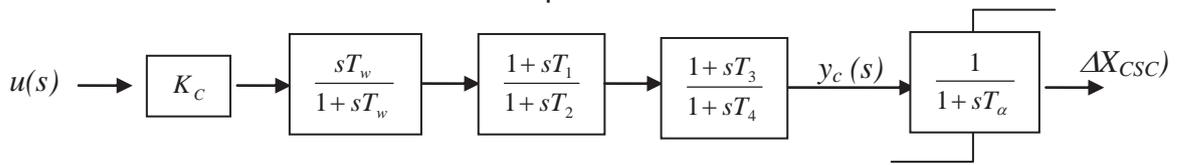
$$y_c(s) = G_c(s)u(s) \quad (52)$$

com

$$G_c(s) = K_{csc} \frac{sT_w}{1 + sT_w} \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \quad (53)$$

A Equação 53 pode ser colocada na forma de diagrama de blocos como ilustra a Figura 18

Figura 18: Diagrama de blocos do TCSC equipado com um estabilizador complementar



Fonte: Costa (2006) e Rosso, Cañizares e Doña (2003)

Em geral a estrutura do controlador TCSC para estabilidade é como ilustrado na Figura 18. E este controlador está equipado com um estabilizador suplementar que é composto por um bloco washout e dois blocos lead-leg, o bloco washout é necessário para evitar uma resposta do controlador ao sinal da entrada em condição de regime permanente, e os blocos lead-leg que proporcionam a compensação de fase para inserir um sinal acordo com a necessidade do SEE.

Observe na Figura 18 que o bloco que representa a dinâmica do equipamento TCSC tem um limite máximo e mínimo, tais limites são definidos como sendo a própria reatância da linha em que o equipamento se encontra instalado, ou seja, considerando a reatância da linha de transmissão igual a x_{km} então o limite máximo do dispositivo é $X_{cscMAX} = x_{km}$ e o limite mínimo é $X_{cscMIN} = -x_{km}$ (JOHNS; SONG, 1999).

A função racional do equipamento TCSC equipado com um estabilizador suplementar obtida pelo diagrama de blocos da Figura 18 e considerando apenas um estágio (desconsiderando o bloco washout, e considerando apenas um bloco lead-leg) pode ser reescrita como:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} = \left[\frac{T_1}{T_2} + \frac{1 - \frac{T_1}{T_2}}{1 + sT_2} = K_d + \frac{K_t}{1 + sT_2} \right] \quad (54)$$

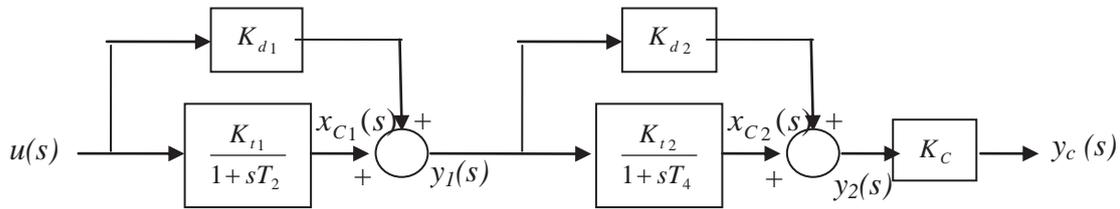
onde as constantes K_d (ganho direto) e K_t (ganho transitório) são definidas nas Equações 55 e 56 respectivamente

$$K_d = \frac{T_1}{T_2} \quad (55)$$

$$K_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (56)$$

Então a função de transferência do compensador pode ser colocada como na Figura 19.

Figura 19 - Diagrama de blocos da função de transferência do compensador



Fonte: Elaboração própria do autor

Dessa forma analisando a Figura 19 uma realização possível é descrita pelas Equações 57 a 62.

$$\dot{x}_{c1}(t) = \frac{1}{T_2} (-x_{c1}(t) + K_{t1}u(t)) \quad (57)$$

$$y_1(t) = K_{d1}u(t) + x_{c1}(t) \quad (58)$$

$$\dot{x}_{c2}(t) = \frac{1}{T_4} (-x_{c2}(t) + K_{t2}y_1(t)) = \frac{1}{T_4} [-x_{c2}(t) + K_{t2}(K_{d1}u(t) + x_{c1}(t))] \quad (59)$$

$$y_2(t) = K_{d2}y_1(t) + x_{c2}(t) = K_{d2}[K_{d1}u(t) + x_{c1}(t)] + x_{c2}(t) \quad (60)$$

$$y_c(t) = K_c y_2(t) = K_c \{K_{d2}[K_{d1}u(t) + x_{c1}(t)] + x_{c2}(t)\} \quad (61)$$

$$\dot{x}_{csc} = \frac{1}{T_\alpha} [-x_{csc} + y_c] \quad (62)$$

As Equações 57 a 62 representam a dinâmica de um equipamento TCSC equipado com um estabilizador suplementar.

CAPÍTULO 5 - INFLUÊNCIA DO TCSC NA FUNÇÃO ENERGIA DE UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS

5.1 Efeitos de um Dispositivo FACTS TCSC na Energia Transitória de Sistema Multimáquinas

A presença de um dispositivo FACTS TCSC na rede altera a matriz admitância de barras do sistema reduzida às barras internas dos geradores como mostra a Equação 63.

$$Y = Y_{red}^0 + \Delta Y_{CSC} \quad (63)$$

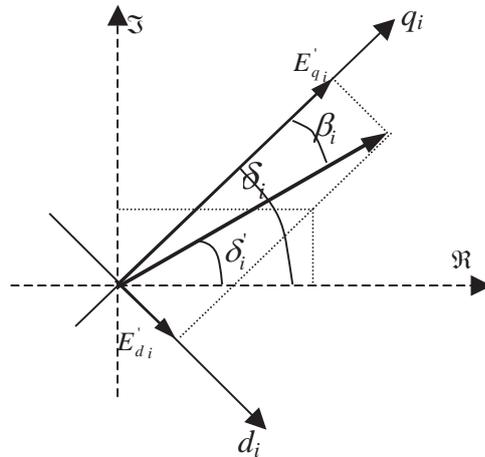
Também no Capítulo 4 foi definido o coeficiente de sensibilidade, que é composto por magnitude e ângulo, como reafirma a equação abaixo:

$$\bar{K}_{cscij} = K_{cscij} \angle \varphi_{cscij} \quad (64)$$

sabe-se que as variações da magnitude da admitância de transferência entre máquinas ocorrem sobre a linha de declividade do ângulo do coeficiente de sensibilidade, como foi mostrado na Figura 16 do Capítulo 4.

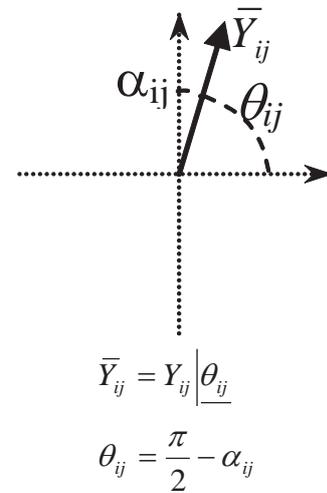
Seja o valor final da admitância de transferência complexa entre as barras internas das máquinas i e j dado por $\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij}$ e as tensões internas fasoriais expressas genericamente por $\bar{E}_i = E_i \angle \delta_i$, como ilustrado nas Figuras abaixo.

Figura 20 - Diagrama fasorial para a máquina i



Fonte: Elaboração própria do autor

Figura 21 - Ângulos das admitâncias de transferência



Fonte: Elaboração própria do autor

Na Figura 21 observa-se que:

$$\theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij} \quad (65)$$

A potência transferida entre duas máquinas genéricas i e j , já bem conhecida (SILVA, 2010), é expressa por:

$$P_{eij} = E'_i Y_{ij} E'_j \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) \quad (66)$$

Substituindo o valor de θ da Equação 65 na Equação 66

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \cos\left(\delta_{ij} + \alpha_{ij} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (67)$$

que pode ser escrita como

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \sin(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) \quad (68)$$

A admitância de transferência, afetada pela ação de um compensador dinâmico na rede, pode ser expressa por:

$$\bar{Y}_{ij} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}) \left| \underline{\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij}} \right. \quad (69)$$

E sendo a variação de Y_{ij} devida ao TCSC,

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{ij} &= \bar{Y}_{ij}^0 + \bar{K}_{cscij} \Delta X_{csc} \\ &= (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}) \left| \underline{\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij}} \right. \end{aligned} \quad (70)$$

A variação efetiva da magnitude da admitância de transferência pode ser escrita como

$$\Delta Y_{ij}^{ef} = K_{cscij}^{ef} \Delta X_{csc} \quad (71)$$

o termo K_{cscij}^{ef} é o coeficiente de eficácia definido no Capítulo 4 na Equação 59.

A variação do ângulo da admitância de transferência é dada na Equação 72.

$$\Delta \theta_{ij} = \theta_{ij} - \theta_{ij}^0 = \arctan \left[\frac{K_{cscij} \Delta X_{csc} \text{sen}(\varphi_{cscij} - \theta_{ij}^0)}{Y_{ij}^0 + K_{cscij} \Delta X_{csc} \text{cos}(\varphi_{cscij} - \theta_{ij}^0)} \right] \quad (72)$$

Ou, sendo

$$\theta_{ij} + \alpha_{ij} = \theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij} = \frac{\pi}{2} \quad (73)$$

$$\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - (\alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \quad (74)$$

Na Figura 5.2 temos que $\theta_{ij}^0 = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij}^0$, assim, segue da Equação 74 que $\Delta \alpha_{ij} = -\Delta \theta_{ij}$.

Substituindo o valor da Equação 74 na Equação 70

$$\bar{Y}_{ij} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef}) \left| \underline{\frac{\pi}{2} - (\alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij})} \right. \quad (75)$$

Então a potência transferida entre as máquinas i e j pode ser expressa por

$$P_{e_{ij}} = E_i(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef})E_j \text{sen}(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}) \quad (76)$$

Porém, no Capítulo 4 na Equação 51 definiu-se o fator de efeito, que é mostrado na equação abaixo

$$F_{csc_{ij}} = \frac{K_{csc_{ij}}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad (77)$$

E com um pouco de álgebra e reorganizações chega-se na Equação 77

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 \left(1 + F_{csc_{ij}} \Delta X_{csc}\right) \quad (78)$$

E finalmente a potência transferida entre máquinas do sistema afetada pela ação do dispositivo TCSC é:

$$P_{e_{ij}} = \left(1 + F_{csc_{ij}} \Delta X_{csc}\right) E_i Y_{ij}^0 E_j \text{sen}(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}) \quad (77)$$

5.2 Função Energia do Sistema Multimáquinas

Tendo como referencial o centro inercial das máquinas e lembrando que a potência elétrica transferida entre elas é:

$$P_{e_{ij}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i' Y_{ij}^0 E_j' \text{sen}(\delta_{ij}' + \alpha_{ij}) \quad (80)$$

Definindo $\varphi_k = \delta_{ij}' + \alpha_{ij}$, a variação da potência elétrica é:

$$\Delta P_{e_{ij}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Delta P_{e_{ij}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[E_i' Y_{ij}^0 E_j' \left(\text{sen}(\varphi_k) - \text{sen}(\varphi_k^0) \right) \right] = \sum_{k=1}^m f_k(\varphi_k) \quad (81)$$

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

Considerando a função energia do sistema $V(x)$ (PAI, 1981) é dada por:

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i + \sum_{k=1}^m \int_{(\delta'_{ij} + \alpha_{ij})}^{(\delta'_{ij} + \alpha_{ij})} f_k(\varphi_k) d\varphi \quad (82)$$

Após o cálculo da integral e voltando para as variáveis originais, obtém-se:

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i + \sum_{k=1}^m \{E'_i Y_{ij}^0 E'_j [-\cos(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}) - (\delta'_{ij} - \delta'_{ij}^0) \text{sen}(\delta'_{ij} + \alpha_{ij})]\} \quad (83)$$

A Equação 83 é a função energia do sistema, destacando-se que esta função é perfeitamente caracterizada pela soma da energia cinética com a energia potencial como mencionado anteriormente. Ressalva-se que, a rigor, as condições para a validade de $V(x)$ como função de Lyapunov são encontradas com $\alpha_{ij} = 0, \forall i, j$, uma vez que

$$f_k(-\varphi_k) = -f_k(\varphi_k) \quad (84)$$

é verdadeira se, e somente se, $\alpha_{ij} = 0$, ou seja, desconsiderando as condutâncias de transferências.

5.3 Efeito do Controlador FACTS na Função Energia de um Sistema Multimáquinas

Lembrando que a transferência de potência entre as máquinas i e j afetada pela ação dinâmica do controlador TCSC é como expressa em

$$P_{e_{ij}} = (1 + F_{csc_{ij}} \Delta X_{csc}) E'_i Y_{ij}^0 E'_j \text{sen}(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \quad (85)$$

e considerando neste momento apenas o efeito do controlador sobre a magnitude da admitância de transferência, podem-se determinar os desvios da potencia transferida como

$$\Delta P_{e_{ij}} = \left(1 + F_{csc_{ij}} \Delta X_{csc}\right) f_k(\varphi_k) \quad (86)$$

ou, definindo para efeito de simplicidade o Fator de Participação do TCSC na admitância de transferência entre máquinas.

$$G_{csc_k} = (1 + F_{csc_{ij}} \Delta X_{csc}) \quad (87)$$

$$\Delta P_{e_{ij}} = G_{csc_k} f_k(\varphi_k) \quad (88)$$

Para efeitos de análise neste trabalho, considera-se que os efeitos das variações da reatância do TCSC ΔX_{csc} ocorrem sobre a rede instantaneamente, e conseqüentemente assim também se processam sobre a função energia do sistema, e exclusivamente sobre a energia potencial, de modo que não se modela a dinâmica desta atuação.

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i + \sum_{k=1}^m \{G_{csc_k} E_i' Y_{ij}^0 E_j' [-\cos(\delta'_{ij} + \alpha_{ij}) + \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}) - (\delta'_{ij} - \delta_{ij}^0) \text{sen}(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij})]\} \quad (89)$$

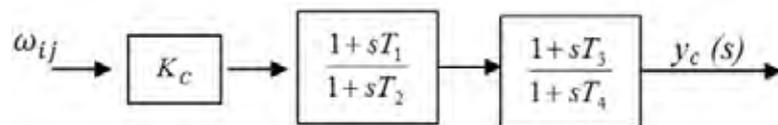
Observa-se na Equação 89 que as parcelas da energia potencial são afetadas pela ação TCSC como determinado pelo respectivo Fator de Participação do TCSC. Assim, é possível determinar os efeitos do TCSC na energia potencial do sistema, e analisar o desempenho do mesmo sob ação do dispositivo mediante a alteração que ele promove na energia potencial, o que implica em observar como é afetado o torque de sincronização do sistema. E, uma vez que se tem a informação da intensidade com que o dispositivo afeta 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 do TCSC na energia potencial do sistema deseja-se elaborar uma lei de controle embasando-se na energia potencial de tal maneira que a trajetória do sistema assuma uma direção de subida, ou seja, que a trajetória percorra um caminho mais íngreme, e/ou idealmente que a trajetória assuma a mesma orientação do gradiente da energia potencial na direção de um ponto de equilíbrio instável; isto significa em um torque restaurativo mais efetivo do sistema.

5.4 Lei de Controle para o Estabilizador Suplementar

Deseja-se elaborar uma lei de controle para o estabilizador suplementar com o propósito de influenciar na trajetória do sistema para que ela tenha a mesma orientação do gradiente da energia potencial. Assim, para alcançar este objetivo, o sinal da saída do controlador suplementar $y_c(s)$ (Figura 22) tenha uma relação com o gradiente da energia potencial.

Figura 22 - Diagrama de blocos do estabilizador suplementar



Fonte: Elaboração própria do autor

Considera-se a entrada $u(s)$ do estabilizador suplementar como sendo a diferença entre as velocidades angulares da máquina de maior aceleração (máquina i) e a máquina de menor aceleração (máquina j) do sistema, ou seja, espera-se que a entrada $u(s)$ seja $\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j$, como ilustrado na Figura 22.

A velocidade angular relativa das máquinas não é um sinal local, de modo que é necessário buscar uma forma de obtê-lo. Uma alternativa efetiva apresentada é a utilização da tecnologia PMU (*Phasor Measurement Unit*), por meio da qual se faz a medição do sinal remoto e a envia ao estabilizador suplementar.

Procura-se fazer com que o sinal $y_c(s)$ guarde uma relação direta com gradiente da energia potencial. Toma-se então a equação dinâmica de um par de máquinas genérico desacoplado do sistema utilizando a Equação 90:

$$\dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{M_{ij}} [-f_k(\varphi_k)] \quad 90$$

Notando que $f_k(\varphi_k)$ é uma componente do gradiente da energia potencial correspondente ao par de máquinas $k = (i, j)$, considera-se que esta é a forma desejada para a saída $y_c(s)$. No entanto, não se dispõe de $\dot{\omega}_{ij}$, mas sim de ω_{ij} ($\omega_i - \omega_j$). E, notando que a derivação é uma operação linear que introduz avanço de 90° um sinal em fase com a aceleração $\dot{\omega}_{ij}$ em oposição a $f_k(\varphi_k)$ é obtido com compensação de fase em avanço. Mas, como o que se deseja é um sinal em fase

com $f_k(\varphi_k)$, faz-se a compensação do sinal de entrada velocidade ω_{ij} em atraso. A estrutura do estabilizador suplementar (Figura 22) é composta por dois blocos de avanço/atraso (*lead-leg*), e, para obter o sinal desejado, faz-se um atraso de 90 graus. Assim, as constantes de tempo para promover o atraso desejado são dadas no Quadro 1, ressaltando que $T_1 = T_3$ e $T_2 = T_4$.

Quadro 1 - Constantes de tempo do controlador suplementar

T_1	T_2	T_3	T_4
0,1	0,6685	0,1	0,6685

Fonte: Elaboração própria do autor

Neste estudo não foi abordado um método para obter o ganho K_c (ganho do estabilizador), sendo ele escolhido de forma empírica.

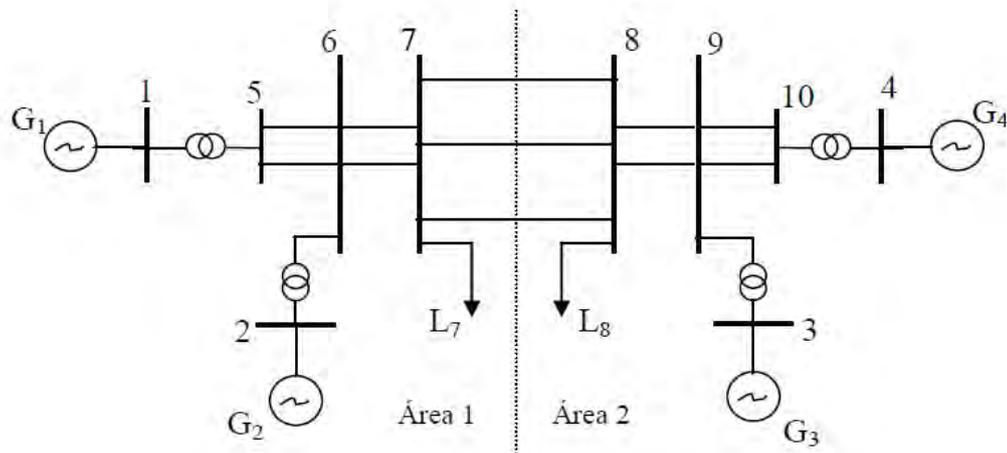
CAPÍTULO 6 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

6.1 Simulações e Resultados

6.1.1 Sistema de Quatro Máquinas

O sistema teste utilizado neste trabalho é ilustrado na Figura 23. Trata-se de um sistema simétrico de duas áreas e dez barras (KLEIN; ROGER; KUNDUR, 1991).

Figura 23 - Sistema de quatro máquinas e duas áreas



Fonte: Klein, Roger e Kundur (1994)

Os dados do sistema são apresentados nos Quadros 2, 3 e 4.

Quadro 2 - Dados das linhas de transmissão

Nº da linha	da Barra inicial	Barra final	Impedância série		Admitância paralela	
			R	X	G	B
1	1	5	0,1000	0,0120	0	0
2	2	6	0,1000	0,0120	0	0
3	3	9	0,1000	0,0120	0	0
4	4	10	0,1000	0,0120	0	0
5	5	6	0,0025	0,0250	0	0,1500
6	6	7	0,0010	0,0100	0	0,0600
7	7	8	0,0073	0,0730	0	0,9900
8	8	9	0,0010	0,0100	0	0,0600
9	9	10	0,0025	0,025	0	0,1500

Fonte: Klein, Roger e Kundur (1994)

Quadro 3 - Dados de barra

Barra	Tensão		Potência nas barras	
	Magnitude	Ângulo	Ativa	Reativa
1	1,0300	8,6157	7,0000	2,2915
2	1,0100	-1,4295	7,0000	4,4369
3	1,0300	-11,0019	7,0000	5,3444
4	1,0100	0	7,3811	2,6622
5	0,9997	4,0642	0	0
6	0,9536	-6,1679	0	0
7	0,9061	-15,0450	-11,5900	-2,1200
8	0,8855	-25,1089	-15,7500	-2,8800
9	0,9428	-15,7401	0	0
10	0,9953	-4,8071	0	0

Fonte: Klein, Roger e Kundur (1994)

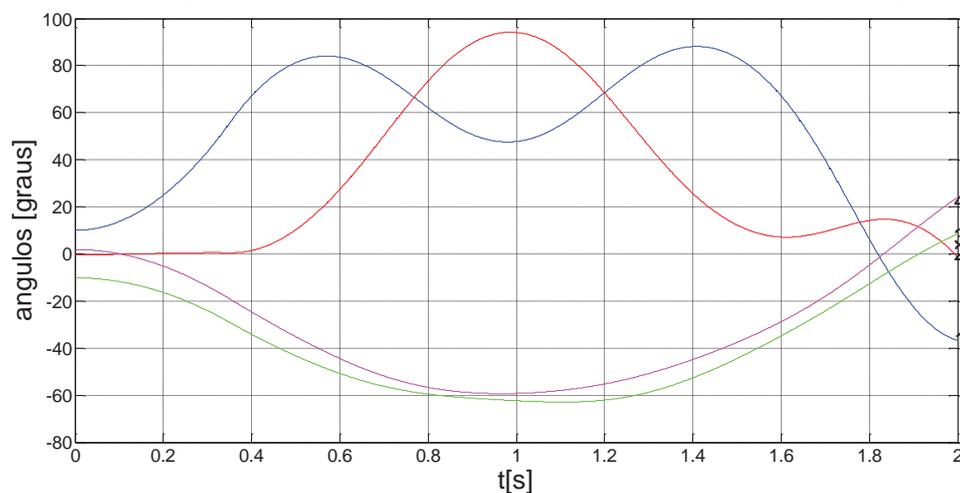
Quadro 4 - Dados das máquinas

Máquinas	Reatância transitória de eixo direto
1	0,033
2	0,033
3	0,033
4	0,033

Fonte: Klein, Roger e Kundur (1994)

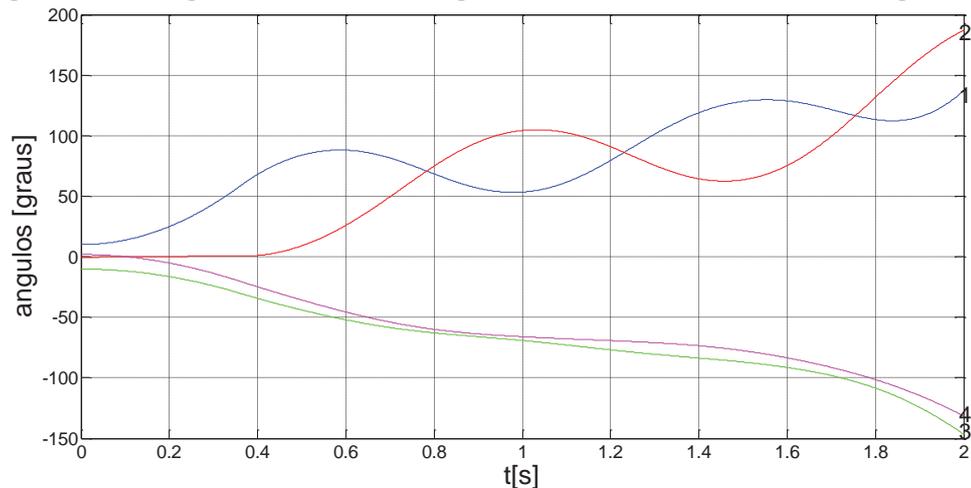
Inicialmente o sistema está operando em regime permanente e em um dado instante ocorre um curto circuito na barra 5, que é eliminado sem chaveamento de linha de transmissão. As Figuras 24 e 25 mostram as variações dos ângulos internos dos geradores com duração de falta de 0.35 e 0.36 segundos, respectivamente.

Figura 24 - Ângulos internos dos geradores com falta de 0.35 segundos



Fonte: Elaboração própria do autor

Figura 25 - Ângulos internos dos geradores com falta de 0.36 segundos



Fonte: Elaboração própria do autor

A Figura 24 nos leva a concluir que o sistema é estável na primeira oscilação, mas na Figura 25, o sistema evoluiu para instabilidade. Sendo assim, o tempo crítico de abertura do sistema é 0.35 – 0.36 segundos. Ainda na Figura 25, observe que os geradores da área 1 perderam o sincronismo com relação aos geradores da área 2. Considera-se então a instalação de um TCSC na linha 7 – 8, na expectativa de que seja eficaz na manutenção do sincronismo entre geradores de áreas diferentes.

De fato, com o TCSC na linha de transmissão 7 – 8, obtém-se o resultado esperado, pois de acordo com o fator de efeito (F_{cscij}) mostrado na Quadro 5 temos que o equipamento será eficiente entre os pares de máquinas de áreas diferentes.

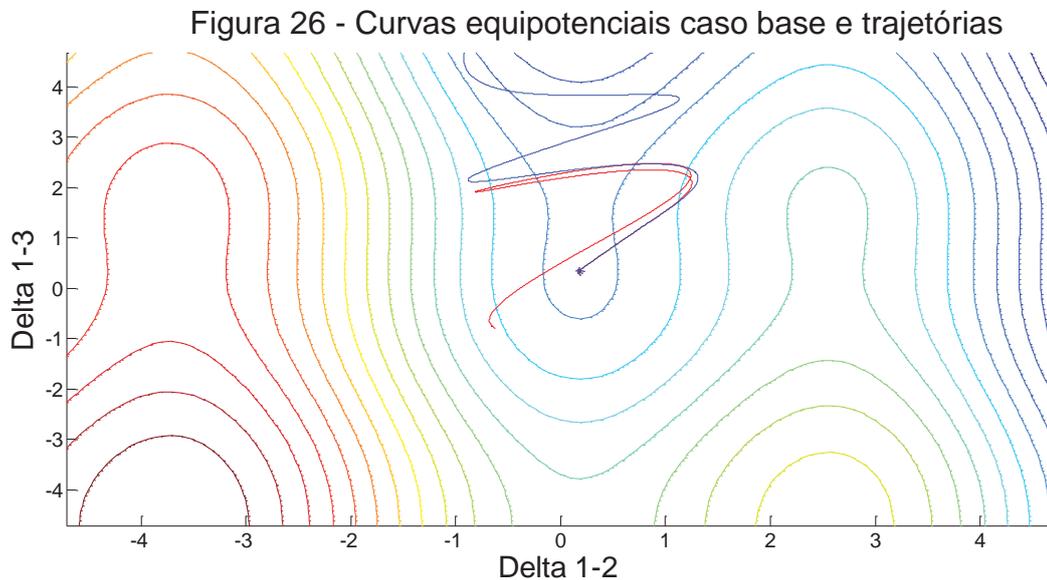
Quadro 5 - Fator de efeito para as máquinas i e j .

Máquina i	Máquinas j	F_{cscij}
1	2	0,4430
1	3	9,1002
1	4	9,1002
2	3	9,1002
2	4	9,1002
3	4	1,3766

Fonte: Elaboração própria do autor

Instalando o TCSC nesta linha de transmissão, espera-se influenciar de maneira positiva na energia potencial e na trajetória do sistema, melhorando significativamente a estabilidade transitória do sistema.

Antes de analisar a influência da compensação série dinâmica, primeiramente ilustram-se as curvas equipotenciais referentes ao caso base do sistema (Figura 26), juntamente com a trajetória estável e instável do SEE.

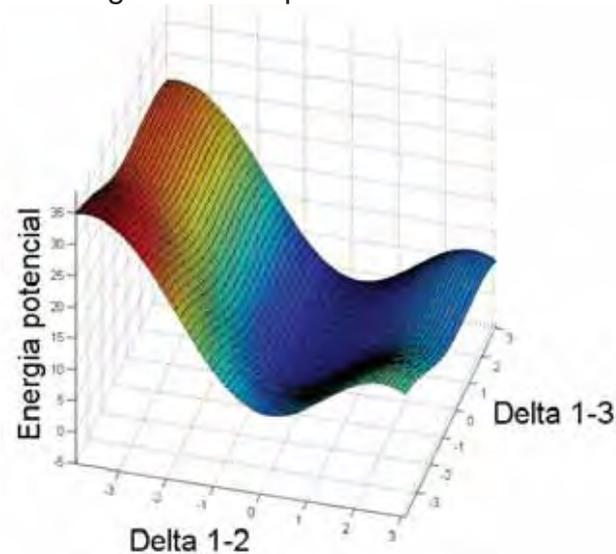


Fonte: Elaboração própria do autor

As trajetórias sobrepostas às curvas equipotenciais ilustradas na Figura 26 representam as defasagens angulares das máquinas $\delta_{1,2}$ por $\delta_{1,3}$. A trajetória cuja duração da falta é 0,35 segundos está em vermelho e é estável, pois observando o gráfico acima pode-se ver que ela tangencia o ponto de equilíbrio instável e retorna para uma vizinhança do ponto de equilíbrio estável. Porém, isso não acontece na trajetória azul em que a falta durou 0,36 segundos, notando que embora também tangencie o ponto de sela, posteriormente a trajetória afasta-se indefinidamente do ponto de equilíbrio estável, caracterizando a instabilidade do tipo perda de sincronismo.

A Figura 27 ilustra a superfície determinada pela energia potencial correspondente às curvas equipotenciais acima.

Figura 27 - Superfície caso base



Fonte: Elaboração própria do autor

Sabe-se que o ponto de equilíbrio estável 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 27. Os pontos de equilíbrio instável e os pontos de equilíbrio instável do tipo sela são caracterizados por picos e passos na borda da depressão energética.

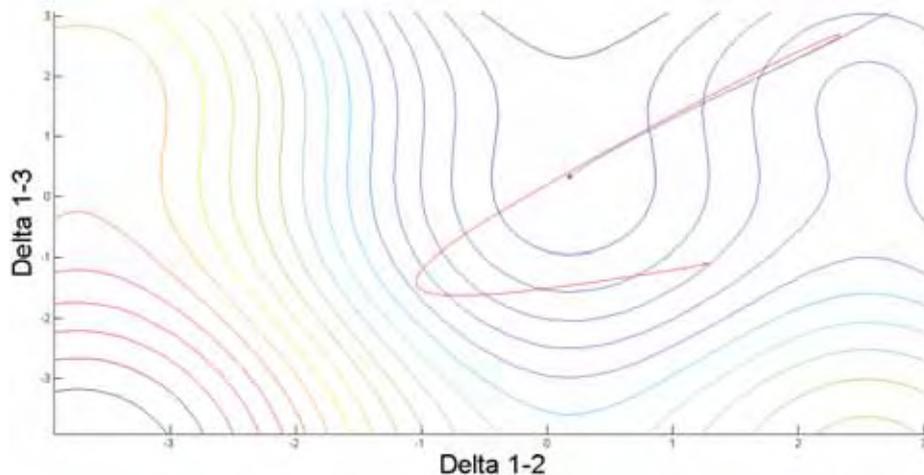
Na Figura 26, ficou claro que o sistema perdeu a estabilidade, saindo por um ponto de sela (passo energético). É de se notar que este é o caminho que exige menos esforço para deixar a região de atração entre os dois pontos de máxima energia potencial (picos energéticos). Desejando-se que o sistema não 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 gradiente da energia potencial. Com este propósito, e com o auxílio do equipamento TCSC equipado com um estabilizador suplementar, pode-se exercer uma influência na energia potencial e/ou na trajetória do sistema, buscando estes objetivos.

Considerando o estabilizador suplementar para inserir torque sincronizante no sistema, as constantes para o estabilizador suplementar foram obtidas no Capítulo 5. O TCSC está cancelando 10% do valor nominal da reatância da linha de transmissão em regime permanente. As curvas equipotenciais foram plotadas,

levando em conta somente a compensação fixa do dispositivo e utilizando-se a máxima variação do TCSC ($\Delta X_{csc} = 0,07$).

A Figura 28 ilustra as curvas equipotenciais e as trajetórias (influenciadas pela ação dinâmica) sobrepostas a elas para esta situação, porém, vale ressaltar que o tempo de duração de falta da trajetória em vermelho, estável é de 0,42 segundos. Já a trajetória em azul é instável e corresponde a tempo de duração da falta de 0,43 segundos. Observa-se que o sistema perdeu a estabilidade, deixando a região de atração pela proximidade de um dos picos energéticos das curvas equipotenciais e não por um ponto de sela como tinha acontecido no caso base.

Figura 28 - Curvas equipotenciais e trajetórias afetadas pelo TCSC



Fonte: Elaboração própria do autor

Utilizando o tempo crítico de abertura do sistema como critério de avaliação, observe o quadro abaixo:

Quadro 6 - Comparação do tempo crítico de abertura do sistema

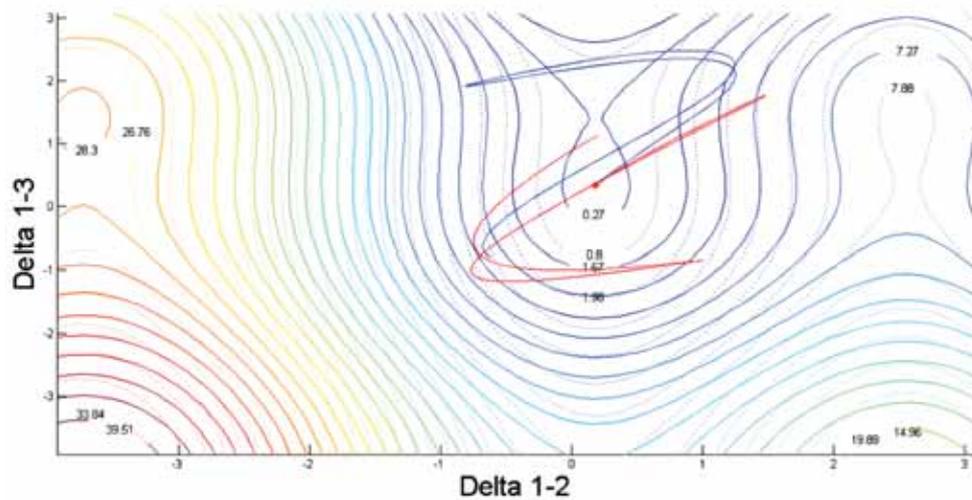
Tempo Crítico	
Caso Base	0,35 – 0,36
TCSC	0,42 – 0,43

Fonte: Elaboração própria do autor

Na Figura 28, nota-se que o TCSC foi eficaz, direcionando a trajetória para um pico energético e tornando mais íngreme o caminho a ser percorrido pela trajetória, dificultando assim a perda da estabilidade, o que se reflete no aumento do tempo crítico de abertura do sistema como mostra o Quadro 6. Porém, para

esclarecer a influência do compensador série na energia potencial e nas trajetórias do sistema, faz-se a comparação das curvas equipotenciais e das trajetórias sobrepostas a elas, como ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Comparação entra as curvas equipotenciais e a trajetória caso base e dinâmica

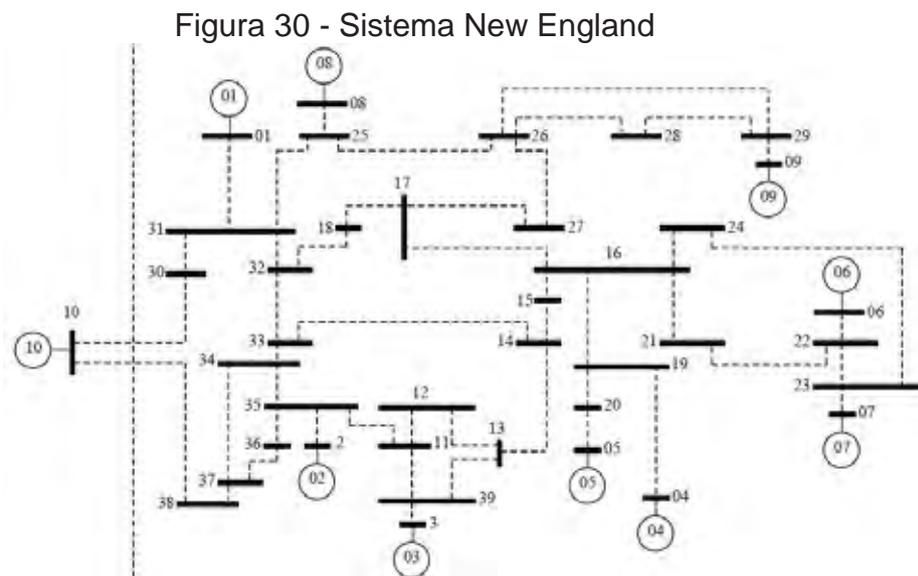


Fonte: Elaboração própria do autor

As curvas equipotenciais pontilhadas e a trajetória azul referem-se ao caso base (sem compensação). As curvas equipotenciais sólidas referem-se à compensação fixa de 10% da reatância nominal da linha de transmissão e a trajetória vermelha refere-se à compensação dinâmica adicional, inserindo sincronização. A configuração do sistema e a duração da falta são as mesmas para ambas as trajetórias (curto circuito na barra 5 com duração de 0,35 segundos). Fazendo a comparação das curvas equipotenciais ilustradas na Figura 29, observa-se a influência da compensação fixa do TCSC. Observa-se que a atuação do dispositivo levou a energia potencial a apresentar picos mais altos, aumentando a barreira energética a ser superada para abandonar a região de atração do ponto de equilíbrio. Isto é um resultado muito positivo, tendo em vista que a influência da compensação dinâmica do dispositivo direcionou a trajetória do sistema para um caminho mais íngreme, dificultando a perda da estabilidade.

6.1.2 Sistema New England

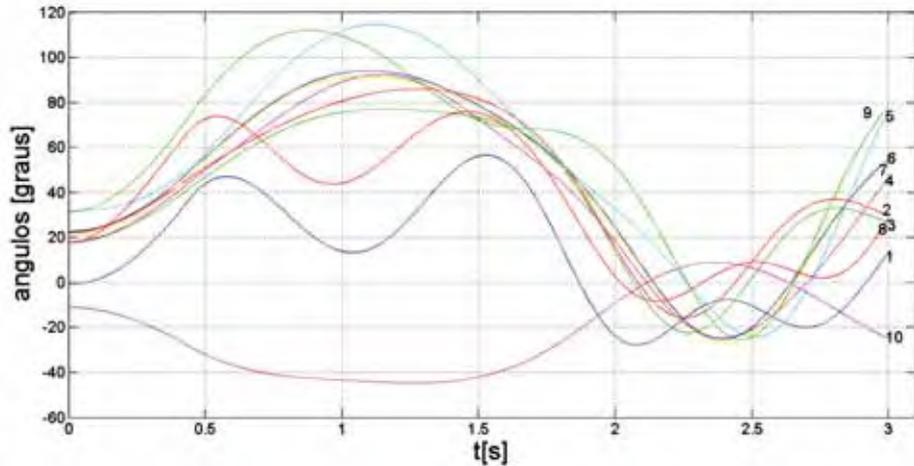
Nesta seção estuda-se o efeito de um dispositivo TCSC em um sistema de maior porte e com uma configuração menos particularizada que o considerado na seção anterior. O sistema é o New England, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 30. Este sistema é composto por 10 geradores, 39 barras e 46 linhas. Os dados deste sistema podem ser encontrados em Araujo, Zanetta, 2000.



Fonte: Araujo e Zanetta (2000)

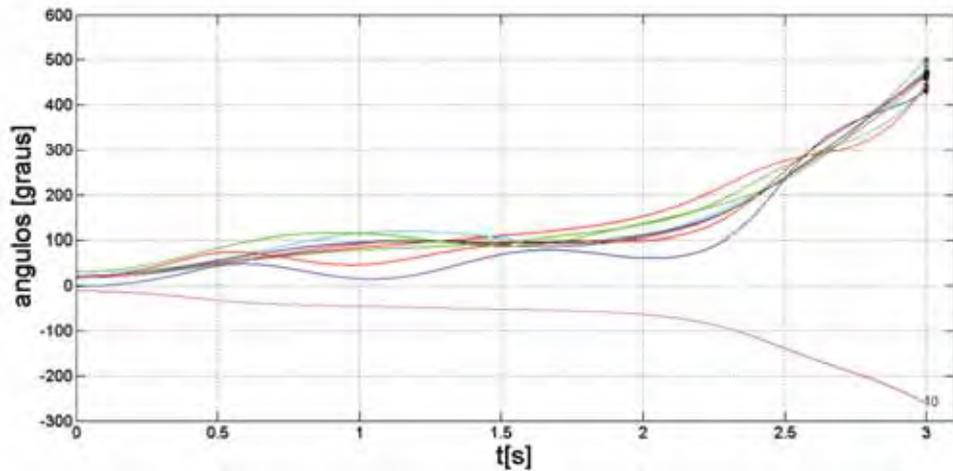
Inicialmente o sistema encontra-se operando em regime permanente e num dado instante ocorre um curto circuito na barra 1, que é eliminado sem abertura de linha de transmissão. As Figuras 31 e 32 mostram a variações dos ângulos internos dos geradores com duração de falta de 0.43 e 0.44 segundos, respectivamente.

Figura 31 - Ângulos internos dos geradores com duração da falta de 0,43 segundos



Fonte: Elaboração própria do autor

Figura 32 - Ângulos internos dos geradores com duração da falta de 0,44 segundos



Fonte: Elaboração própria do autor

Observando a Figura 31 conclui-se que o sistema é estável na primeira oscilação, mas, pela análise do comportamento dos ângulos internos dos geradores da Figura 32, nota-se que os geradores de 1 a 9 perderam o sincronismo com relação ao gerador 10, assim, o tempo crítico de abertura do sistema para esta falta se encontra no intervalo 0,43 – 0,44 segundos.

Deseja-se encontrar um local onde o TCSC tenha uma maior influência nas interações entre os pares de geradores (1 – 10, 2 – 10, 3 – 10, 4 – 10, 5 – 10, 6 – 10, 7 – 10, 8 – 10, 9 – 10). Considera-se a instalação do TCSC na linha de transmissão 30 – 31, na expectativa de que o dispositivo seja eficaz na manutenção do sincronismo entre os geradores do sistema, uma vez que os Fatores de Efeito (F_{cscij}) mostrados no Quadro 7 indicam que o equipamento nesta localização será

eficiente e influenciará de forma positiva na energia potencial e trajetória na maioria dos pares de geradores.

Quadro 7 - Fator de efeito para as máquinas i e j

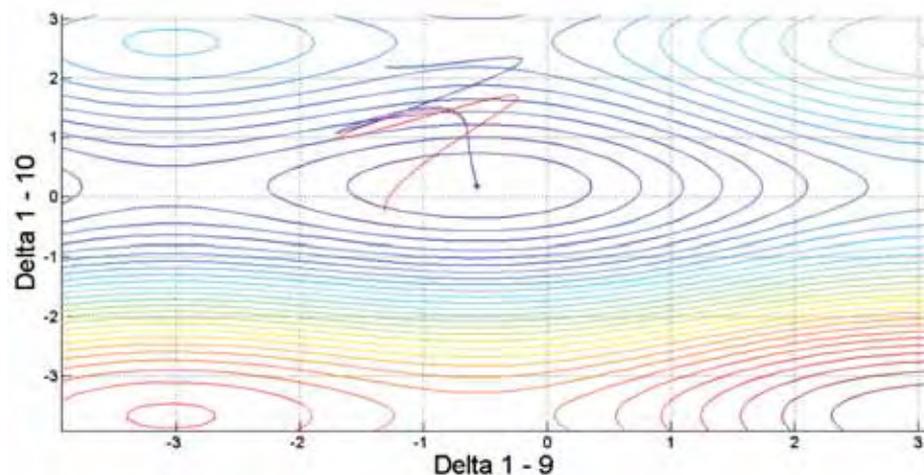
Máquina i	Máquinas j	F_{cscij}
1	10	60,8316
2	10	-5,5719
3	10	-1,7037
4	10	33,8075
5	10	33,8075
6	10	33,8075
7	10	30,8075
8	10	66,4517
9	10	65,0348

Fonte: Elaboração própria do autor

Observe no Quadro 7 que os valores para o Fator de Efeito entre os pares de geradores 2 – 10 e 3 – 10 são negativos, porém estes valores quando comparados com os demais são muito pequenos, podendo-se dizer que o efeito da atuação do dispositivo nesses pares de máquinas é relativamente pouco importante.

Na Figura 33, têm-se as curvas equipotenciais e sobrepostas a elas as trajetórias estável e instável do sistema caso base.

Figura 33 - Curvas equipotenciais e trajetórias caso base



Fonte: Elaboração própria do autor

As trajetórias na Figura 33 representam as defasagens angulares das máquinas $\delta_{1,9}$ por $\delta_{1,10}$. A trajetória cuja duração da falta é 0,43 segundos está em vermelho e é estável, pois observando o gráfico acima pode-se ver que ela retorna

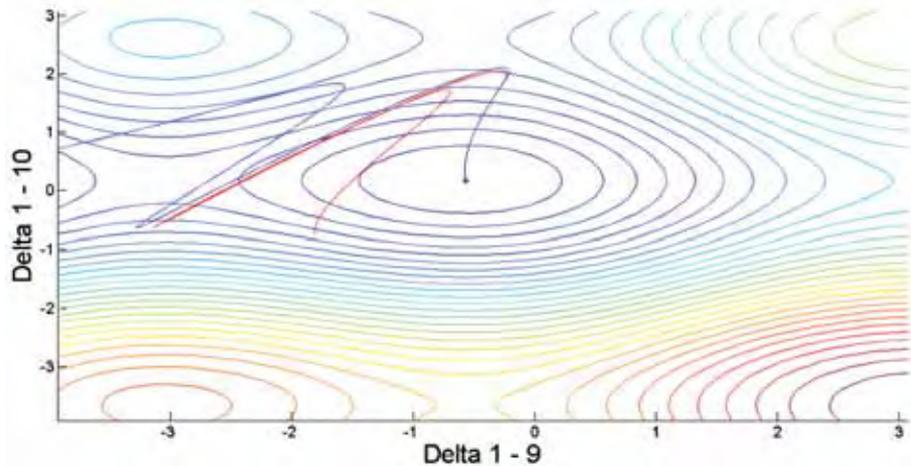
para uma vizinha do ponto de equilíbrio estável após tangenciar o passo energético (ponto de sela), mas isso não acontece na trajetória azul em que a falta durou 0,44 segundos, note que ela afasta-se indefinidamente do ponto de equilíbrio estável, caracterizando a instabilidade do sistema.

Na Figura 33 nota-se que a trajetória do sistema aproxima-se de um passo energético e em seguida toma a direção de outro passo energético perdendo estabilidade por este ponto abandonando a área de atração afastando-se indefinidamente do ponto de equilíbrio estável. Assim, espera-se que a atuação do TCSC seja no sentido de compelir o sistema não abandonar esta região, e dessa forma, seria conveniente que a trajetória assumisse uma direção de “subida” mais íngreme, ou idealmente, que a trajetória tivesse direção coincidente com o gradiente da energia potencial (na direção do pico energético).

O TCSC é ajustado para cancelar 10% do valor nominal da reatância da linha de transmissão em regime permanente. As curvas equipotenciais foram plotadas, levando em conta somente a compensação fixa do dispositivo e utilizando a máxima variação do TCSC ($\Delta X_{csc} = 0,0411\text{pu}$).

A Figura 34 ilustra as curvas equipotenciais e as trajetórias influenciadas pela ação dinâmica do estabilizador suplementar utilizando a lei de controle baseada na aceleração relativa das máquinas apresentada no Capítulo 5 seção 5.4, e utilizando o tempo crítico de abertura do sistema (Quadro 7) como critério de avaliação, observa-se que a ação de controle utilizada levou a sistema a ter um desempenho muito superior quando comprado ao caso base. O tempo de duração de falta da trajetória em vermelho é de 0,61 segundos e da trajetória em azul o tempo de duração da falta é de 0,62 segundos.

Figura 34 - Curvas equipotenciais e trajetórias afetadas pelo TCSC



Fonte: Elaboração própria do autor

Utilizando o tempo crítico de abertura do sistema como critério de avaliação da melhoria da estabilidade transitória do sistema, observe o Quadro 8:

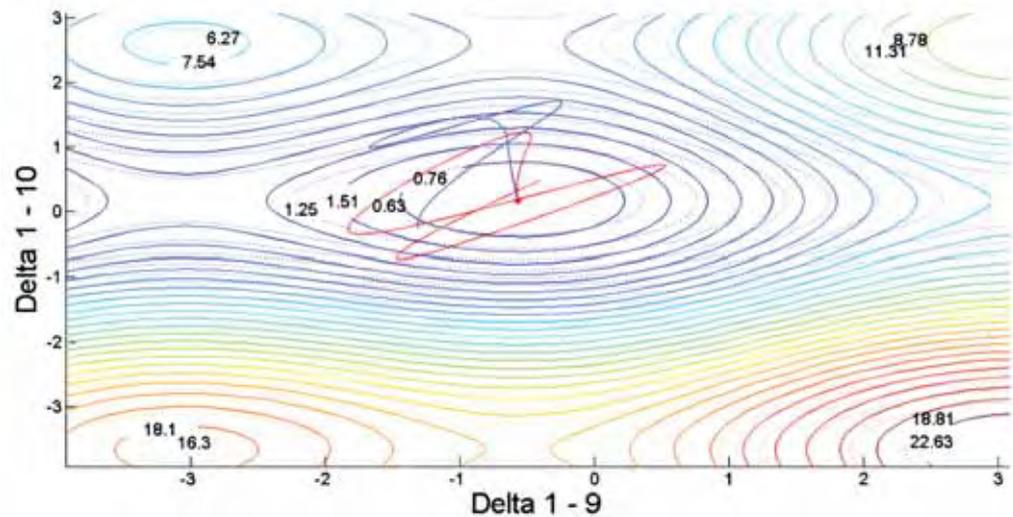
Quadro 8 - Tempo Crítico de abertura do sistema

Tempo Crítico	
Caso Base	0,43 – 0,44
TCSC	0,61 – 0,62

Fonte: Elaboração própria do autor

Note que houve um aumento significativo do tempo crítico de abertura após a instalação de um TCSC, porém para esclarecer a influência do dispositivo na energia potencial e nas trajetórias do sistema, faz-se a comparação das curvas equipotenciais e das trajetórias caso base e influenciadas pela ação do TCSC (Figura 35).

Figura 35 - Comparação entre curvas equipotenciais e trajetória



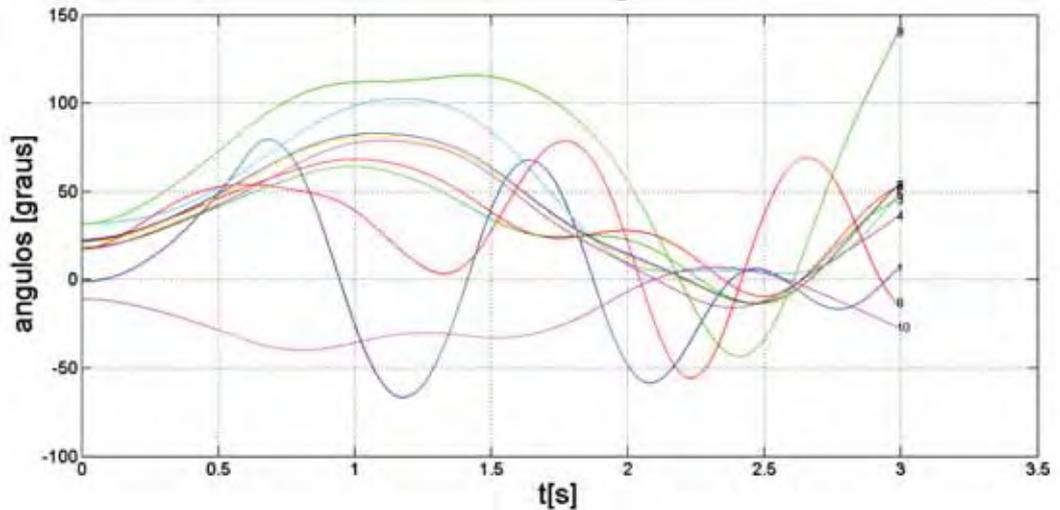
Fonte: Elaboração própria do autor

As curvas equipotenciais pontilhadas e a trajetória em azul referem-se ao caso base, as curvas equipotenciais sólidas referem-se à compensação fixa de 10% da reatância nominal da linha de transmissão onde o dispositivo se encontra instalado e a trajetória em vermelho refere-se à compensação dinâmica adicional, inserindo sincronização. A configuração do sistema e a duração da falta são as mesmas para ambas as trajetórias (curto circuito na barra 1 com duração de 0,43 segundos).

Comparando as curvas equipotenciais ilustradas na Figura 35 fica evidente a influência do TCSC. Note que a atuação do dispositivo levou a energia potencial a apresentar picos mais altos, aumentando a barreira energética a ser superada para abandonar a região de atração do ponto de equilíbrio estável e a influência da compensação dinâmica do dispositivo deslocou a trajetória do sistema no plano. Isso fica mais evidente quando se comparam os valores dos picos energéticos situados próximos às coordenadas $(-3,3)$, $(-3,-3)$, $(3,3)$ e $(3,-3)$.

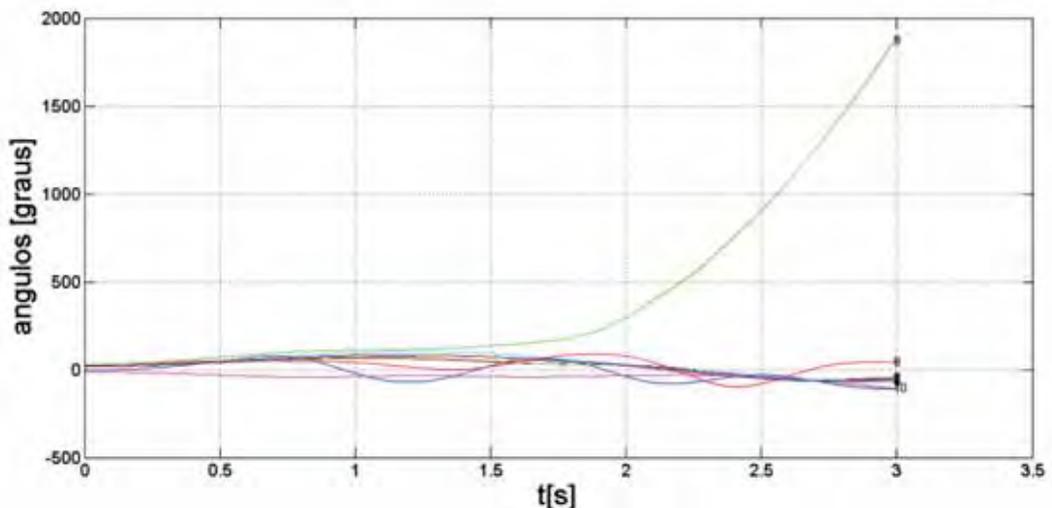
No Quadro 8, mostrou-se o tempo crítico de abertura do sistema, considerando a atuação de um dispositivo FACTS TCSC instalado na linha de transmissão 30 – 31. As Figuras 36 e 37 mostram as variações dos ângulos internos dos geradores com duração de falta de 0.61 e 0.62 segundos, respectivamente.

Figura 36 - Ângulos internos dos geradores influenciados pela ação dinâmica do TCSC com falta de 0,61 segundos



Fonte: Elaboração própria do autor

Figura 37: Ângulos internos dos geradores influenciados pela ação dinâmica do TCSC com duração da falta de 0,62 segundos.



Fonte: Elaboração própria do autor

Através da Figura 37 conclui-se que o gerador 9 perdeu o sincronismo com os demais geradores do sistema. Dessa forma, deseja-se que um segundo TCSC seja eficiente nas interações entre o gerador 9 e os demais do sistema.

Assim, considera-se a instalação de um segundo TCSC na linha de transmissão 29 – 9. Os fatores de efeito são mostrados no Quadro 9, ressaltando-se que a influência do primeiro TCSC instalado na linha de transmissão 30 – 31 é discriminado somente pela compensação fixa de 10% do valor nominal da reatância da linha de transmissão.

Quadro 9 - Fator de efeito para as máquinas i e j

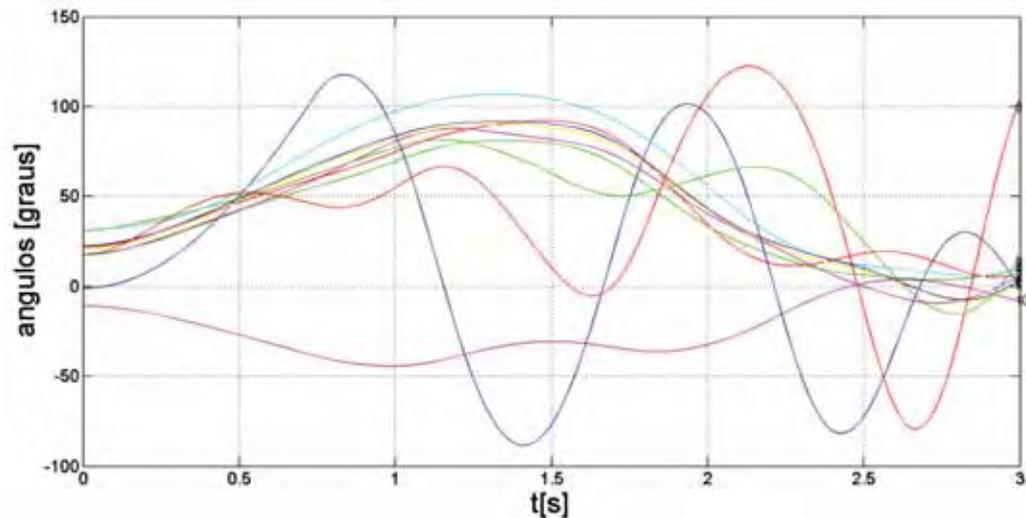
Máquina i	Máquinas j	F_{cscij}
1	9	40,2027
2	9	40,2027
3	9	40,2027
4	9	40,2027
5	9	40,2027
6	9	40,2027
7	9	40,2027
8	9	40,2027
10	9	40,2027

Fonte: Elaboração própria do autor

Assim, instalando o TCSC nessa linha de transmissão espera-se que o TCSC influencie positivamente na energia potencial, aumentando a barreira energética (elevando os picos energéticos) e direcionando a trajetória do sistema para um caminho mais íngreme (mesma direção e sentido do gradiente na direção de um pico energético), fazendo com o que o sistema não abandone a região da área de atração do ponto de equilíbrio estável.

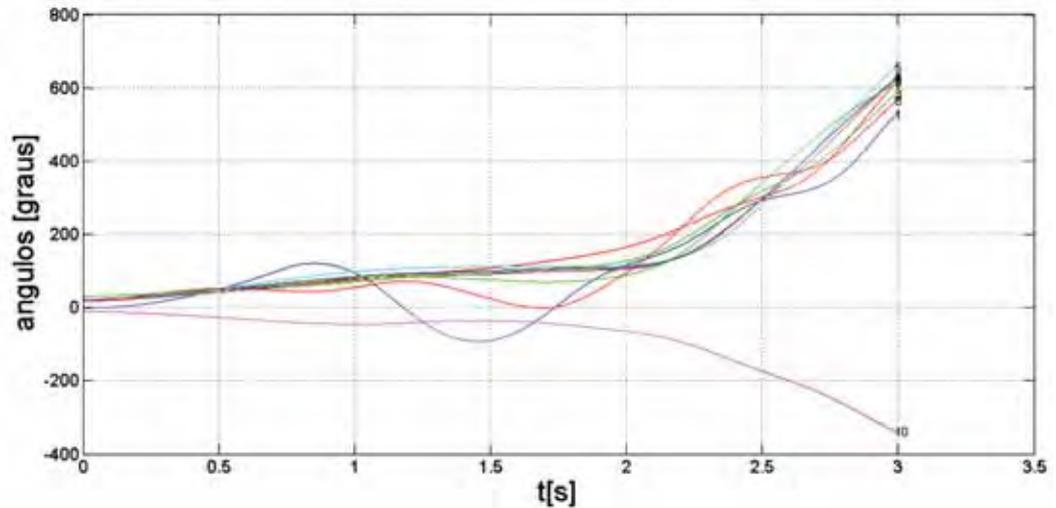
As Figuras 38 e 39 mostram as variações angulares dos rotores com duração da falta de 0,74 e 0,75, respectivamente.

Figura 38 - Ângulos internos dos geradores com duração de falta de 0,74 segundos



Fonte: Elaboração própria do autor

Figura 39 - Ângulos internos dos gerados com duração da falta de 0,75 segundos

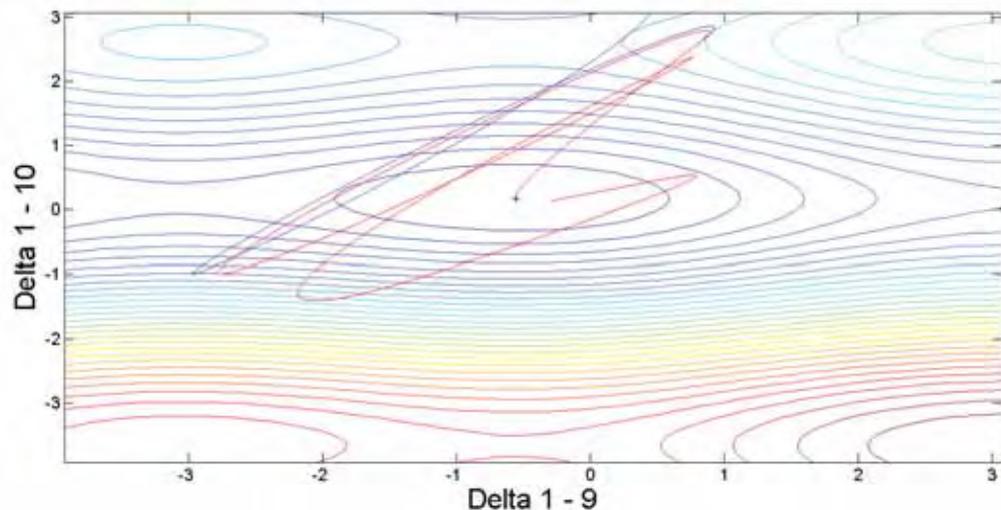


Fonte: Elaboração própria do autor

Na Figura 38, o sistema é estável para a primeira oscilação, porém na Figura 39, o sistema é instável. Assim, o tempo crítico de abertura do sistema considerando a atuação de dois dispositivos TCSC's é de 0,74 – 0,75 segundos.

Como o objetivo deste trabalho é analisar a influência do TCSC na energia potencial e na trajetória do sistema, observe a Figura 40, ressalva-se que para este caso, a máxima variação do TCSC (ΔX_{csc}) é igual a 0,0156.

Figura 40 - Curva equipotencial e trajetórias influenciadas pela ação de dois dispositivos TCSC's

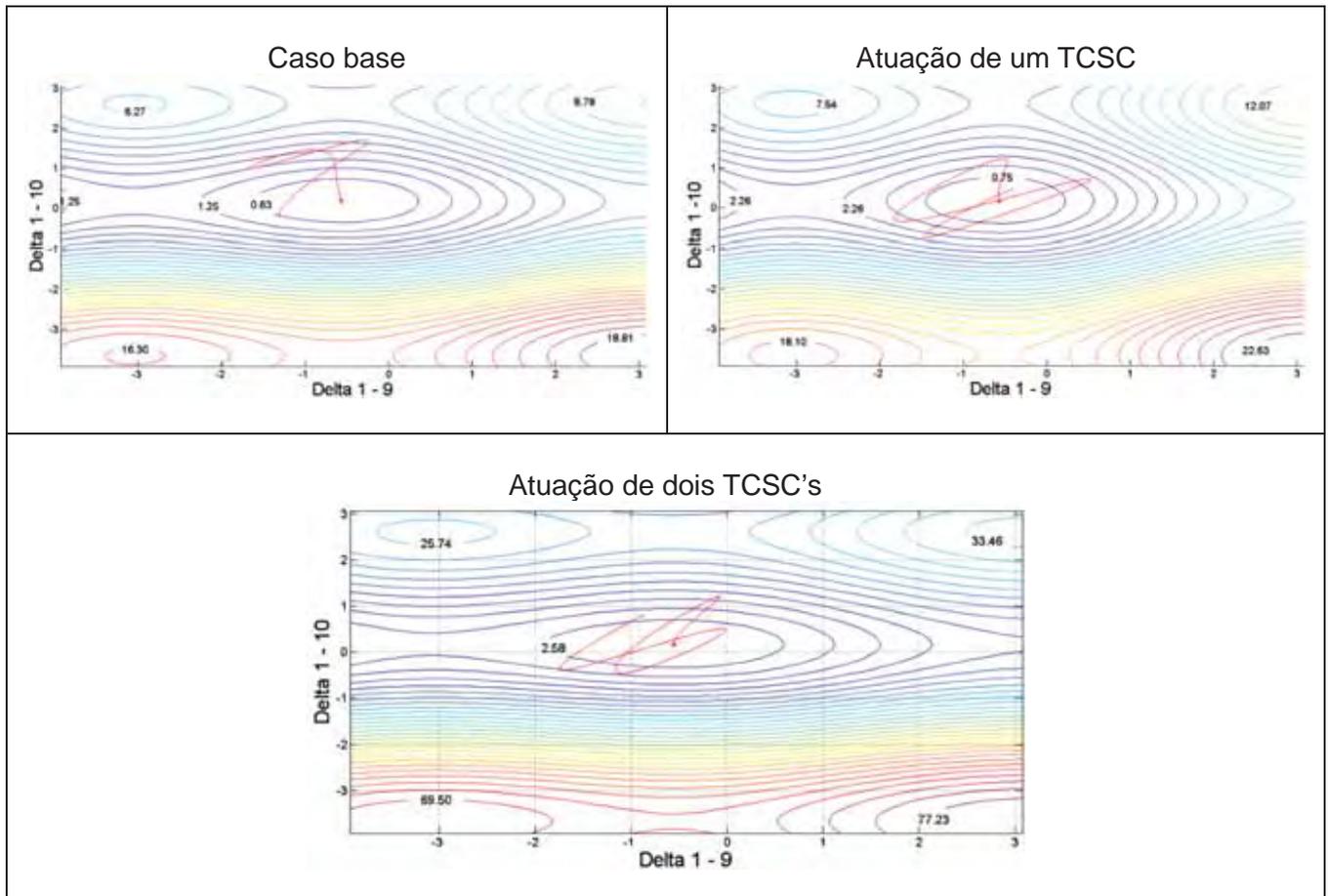


Fonte: Elaboração própria do autor

Na Figura 40, a trajetória plotada em vermelho é estável e corresponde a uma falta de 0,74 segundos, já a trajetória plotada em azul é instável e o tempo de duração da falta correspondente a esta trajetória é de 0,75 segundos. Com o intuito

de esclarecer a influência do TCSC na energia potencial e na trajetória do sistema, far-se-á uma comparação entre os resultados obtidos anteriormente (Figura 41). Ressalta-se que são consideradas as mesmas condições para as trajetórias apresentadas (curto circuito na barra 1 com duração da falta de 0,43 segundos).

Figura 41 - Comparação das curvas equipotenciais e trajetórias do sistema



Fonte: Elaboração própria do autor

Na Figura 41, fica mais evidente a influência do FACTS TCSC na energia potencial e na trajetória do sistema. Note que o dispositivo levou a energia potencial a apresentar picos mais altos, aumentando a área de atração do ponto de equilíbrio estável, pois tomando como referência o pico energético situado próximo da coordenada (3,3), para o caso base o valor da energia potencial é de 8,78. Porém, considerando a influência de um TCSC instalado na linha de transmissão 30 – 31, o valor da energia potencial para esta mesma coordenada é de 12,07. Já instalando um segundo TCSC na linha de transmissão 29 – 9, a energia potencial passou a

apresentar o valor de 33,46, ou seja, a presença de dois TCSC's na rede elevou os picos energéticos de forma considerável, isto significa um torque restaurativo mais efetivo do sistema. Analisando a trajetória do sistema, observe que a influência da dinâmica direcionou a trajetória para um pico energético, ou seja, o sistema terá mais dificuldade de abandonar a área de atração e isso reflete diretamente no tempo crítico, aumentando-o de forma considerável (Quadro 10).

Quadro 10 - Comparação do tempo crítico de abertura do sistema

Tempo Crítico	
Caso Base	0,43 – 0,44
TCSC	0,61 – 0,62
2 TCSC's	0,74 – 0,75

Fonte: Elaboração própria do autor

Os resultados apresentados na Quando 10 são esperados, pois como apresentado na Figura 41, a trajetória foi direcionada para um caminho mais íngreme e a influência do TCSC levou a energia potencial a apresentar picos mais altos, dificultando a perda da estabilidade.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

7.1 Conclusão

Esta dissertação de mestrado analisou como o dispositivo TCSC equipado com um estabilizador suplementar influencia na trajetória e na energia potencial do sistema quando instalado em uma linha de transmissão pré-determinada, utilizando resultados fornecidos pelo fator de efeito.

A função energia foi descrita com a influência da compensação série manifestada nas admitâncias de transferência entre máquinas.

Sabe-se pela análise clássica (KUNDUR, 1994), que a adição de torque de sincronização é obtida com um sinal suplementar de saída em fase com as variações angulares das máquinas em um sistema de duas máquinas. Como esta não é uma situação que se encontre de modo imediato no sistema multimáquinas, procurou-se outra grandeza que propiciasse informação de sincronização. Assim, propôs-se que o sinal de saída do estabilizador fosse ajustado para guardar uma relação direta com o valor do gradiente da energia potencial, tomando como entrada do estabilizador a velocidade angular relativa do par de máquina suposto mais afetado, com apropriado atraso de fase, e os resultados mostraram que de fato obteve-se reforço de sincronização.

Foi proposta a análise da influência do TCSC em dois sistemas, um sistema de pequeno porte - Sistema de Quatro Máquinas e um sistema de grande porte - New England, cujos diagramas unifilares foram ilustrados nas Figuras 23 e 30, respectivamente.

Para analisar a eficiência do equipamento na trajetória e na energia potencial do sistema de quatro máquinas, utilizaram-se as defasagens angulares entre máquinas ($\delta_{1,2} \times \delta_{1,3}$) por se tratarem de máquinas de áreas diferentes. A trajetória foi plotada sobreposta às curvas equipotenciais e com isso, verificamos a influência do equipamento.

Através dos gráficos observa-se que foi possível deslocar a direção da trajetória, fazendo com que ela percorresse um caminho mais íngreme de energia potencial. E na Figura 28, demonstra-se o que foi dito de forma clara. Também se

afirma (de acordo com a Figura 29), que o dispositivo elevou o potencial do pico pelo qual a trajetória passa, dificultando a perda de estabilidade e como consequência, aumentando o tempo crítico.

No sistema New England, analisou-se a influência de um TCSC na trajetória e na energia potencial do sistema e posteriormente foi instalado um segundo TCSC para aumentar um grau de liberdade para estabilização, possibilitando exercer controle não só sobre a amplitude, mas também sobre a direção do gradiente, o que se mostrou efetivo nas experimentações realizadas.

Através do gráfico apresentado na Figura 35, em que se faz uma comparação, ficou claro que o TCSC foi eficaz, elevando os picos energéticos e direcionando a trajetória para um caminho mais íngreme, o que reflete no tempo crítico, aumentando-o como mostra o Quadro 8. Desejando instalar um segundo TCSC, analisou-se a Figura 37 e com o auxílio dos resultados fornecidos pelo fator de efeito determinou-se em qual localização o TCSC seria eficiente. Assim, através da Figura 41, conclui-se que a influência de dois TCSC's foi eficaz, elevando ainda mais os picos energéticos e direcionando a trajetória para um caminho mais íngreme, que é resultado muito positivo, tendo em vista que o sistema demorará mais para perder a estabilidade, elevando consideravelmente o tempo crítico de abertura do sistema, como mostrado no Quadro 10, em que se comparou o tempo crítico de abertura do sistema para o caso base com um TCSC e com dois TCSC's.

Trabalhos Futuros

Usar técnicas mais sofisticadas para determinar as máquinas críticas do sistema.

Estender o estudo para outros FACTS.

Otimizar o fator de efeito de forma que ele possa discriminar qual é a localização ótima para o dispositivo visando toda a rede

REFERÊNCIAS

- ALBERTO, L. F. C; BRETAS, N. G. **Estabilidade transitória em sistemas eletroenergéticos**. São Carlos: EESC/USP, 2000.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power system control and stability**. Iowa: Iowa State University Press, 1977.
- ANH, N. T; HERTEM, D. V; DRIESEN, J. Effectiveness of TCSC controller using remote input signals for transient stability enhancement. In: IEEE TROMDHEIM POWER TECH, 2011, Tromdheim. **Proceedings...** New York: IEEE, 2011. 8 p.
- ARAUJO, P. B; ZANETTA, L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Oxford, v. 23, n. 3, p. 173-178, 2001.
- CAPELLETTE, R. F; MARTINS R. V. F; COLVARA, L. D. Influência de um dispositivo FACTS TCSC na energia transitória de um sistema de energia elétrica multimáquinas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 4., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBSE, 2012.
- COLVARA, L. D. Influência do TCSC na energia transitória dos sistemas de potência. **IEEE Latin America Transactions**, New York, v. 3, n. 3, p. 284-289, 2005.
- COSTA, M. L. **Análise do desempenho do TCSC no sistema multimáquinas e comparação entre leis de controle**. 2006. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2006.
- CVETKOVIC, M; ILIC, M. PMU based transient stabilization using FACTS. In: IEEE/PES POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION – PSCE, 2011, Phoenix. **Proceedings...** New York: IEEE, 2011. 6 p.
- ELGERD, O. I. **Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.
- HINGORANI, N. G; GYUGYI, L. **Understanding facts: concepts and technology of flexible ac transmission systems**. New York: IEEE, 2000.
- JOHNS, A; SONG, Y. H. **Flexible ac transmission systems (FACTS)**. London: IEE, 1999.
- KLEIN, M; ROGERS, G. J; KUNDUR, P. A fundamental study of inter-area oscillation in power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 6, n. 3, p. 914-921, 1991.
- KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability: IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 19, n. 2, p. 1387-1401, 2004.

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, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2009.

MOSLEMI, R; SHAYANFAR, H. A. Optimal location for series FACTS devices to transient stability constrained congestion management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING – IEEEIC, 2011, Rome. **Proceedings...** New York: IEEE, 2011. 4 p.

OLIVEIRA, C. C. B. et al. **Introdução a sistemas elétricos de potência: componentes simétricas**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.

PAI, M. A. **Power system stability**. Amsterdam: North-Holland, 1981.

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, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2010.

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

SAUER, P. W; PAI, M. A. **Power system dynamics and stability**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.

SILVA, J. C. **Efeitos da compensação série na capacidade de sincronização em sistema multimáquinas**. 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2010.

SHIZAWA, R. et al. Allocation of TCSC from transient stability viewpoint. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY – PowerCon, 2004, Singapore. **Proceedings...** New York: IEEE, 2004. v. 1, p. 216-221.

STEVENSON JR., W. D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: McGraw-Hill, 1974.