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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UM ESTUDO DOS EFEITOS DA ATUAÇÃO DE UM SVC SOBRE AS INTERAÇÕES ENTRE MÁQUINAS DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS

MEIRE DE MELO MARQUES

ORIENTADOR : LAURENCE DUARTE COLVARA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

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

Marques, Meire de Melo.
M357e Um estudo dos efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas de um sistema de potência multimáquinas / Meire de Melo Marques. Ilha Solteira : [s.n.], 2009.
69 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Automação, 2009

Orientador: Laurence Duarte Colvara
Bibliografia: p. 66-67

l. Sistemas de energia elétrica. 2. Dispositivos protetores. 3. Fator de potência.

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Um estudo dos efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas de um Sistema de Potência multimáquinas

AUTORA: MEIRE DE MELO MARQUES
ORIENTADOR: Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Aprovada 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. GIDEON VILLAR LEANDRO
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Paraná - Curitiba/PR

Data da realização: 05 de junho de 2009.

Dedico aos meus pais Maria José e Landoaldo aos meus irmãos Mayra, Leandro Diogo e Leonardo Diony e ao meu noivo Luiz Gustavo pelo amor e incentivo no momento desta conquista.

Agradecimentos

A Deus por iluminar meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente e tornar tudo possível.

A minha família pela compreensão e amor.

Ao Professor Dr. Laurence Duarte Colvara pela oportunidade oferecida e conhecimentos compartilhados.

Ao Professor Dr. Carlos Roberto Minussi pela amizade e atenção.

Aos meus queridos amigos Alessandra, Ana Cláudia, Elisabete, Jadiel, João, Luzinete, Mara, Marcelo, Rodrigo, Vanessa e Waléria pelo companheirismo e momentos de lazer.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e da seção de pós-graduação da FEIS/UNESP que direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao apoio financeiro da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

"Reunir-se é começo, permanecer juntos é um progresso e trabalhar juntos é sucesso". (Henry Ford)

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é analisar a influência da atuação do SVC no desempenho dinâmico e transitório de um sistema de energia elétrica multimáquinas, focando as interações máquina-versus-máquina, por meio das admitâncias de transferência entre as barras internas dos geradores

Cada admitância de transferência entre máquinas do sistema depende diretamente das variações da susceptância do SVC, e, para expressar esta dependência foi definido um coeficiente denominado Fator de Efeito. Mostra-se que este fator avalia com propriedade o efeito exercido pela ação do SVC sobre cada admitância de transferência entre máquinas do sistema, e dele se pode inferir quais pares de máquinas são mais e quais são menos afetados.

Mostra-se ainda que, embora o Fator de Efeito possa apresentar variação de valores em diferentes condições de carregamentos, o mesmo não perde sua capacidade de discriminação de importância da compensação para interações entre máquinas. Notadamente, a discriminação da importância para interações intra e inter-áreas foi preservada em todas as situações de carregamentos consideradas.

Considera-se que o Fator de Efeito poderá ser de grande utilidade em procedimentos de análise do desempenho de um SEE sob atuação de um SVC, bem como em procedimentos de projeto e ajuste de controles do dispositivo.

Palavras Chaves: Sistema de Energia Elétrica, SVC, Fator de Efeito.

Abstract

The aim of this study is to analyze the influence of the action of a SVC in the dynamic and transient performance of a multimachine power system, with the focus putted on the machine versus machine interactions, by means of the their transfer admittance.

The internal generators nodes transfer admittances are affected by the performance of the SVC and a coefficient named Effect Factor is defined in order to take it into account. It is shown that this factor provides an appropriate evaluation of relative importance of the SVC effects among all of the pairs of machines transfer admittances.

It is also shown that the Effect Factor does not lose its discrimination ability when considering different system loading conditions. Especially the intra- and inter-area discrimination has been preserved in all of the various considered cases.

It is expected that the effect factor can be very useful in power system performance analysis under SVC action, as well as in design and tuning methods for the device control.

Keywords: Electrical Power System,SVC, Factor Effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 SVC shunt. (23)

Figura 2.2a Sistema de duas máquinas. (24)

Figura 2.2b: Ilustração de Igualdade de área ao critério de estabilidade. (24)

Figura 2.3: Critério de igualdade de área para ilustrar a margem de estabilidade transitória de um simples sistema de duas máquinas. (25)

Figura 3.1: SVC instalado em um ponto da linha k – l.. (27)

Figura 3.2: Matriz admitância adicionada o dispositivo SVC. (28)

Figura 3.3: Reordenação de linhas e colunas da matriz admitância. (28)

Figura 3.4: Rede reduzida às barras internas dos geradores e do SVC. (29)

Figura 3.5: Matriz admitância reduzida. (29)

Figura 3.6: Admitância de transferência da rede reduzida no equilíbrio e a linha das variações dinâmicas. (33)

Figura 3.7: Diagrama Fasorial para a máquina. (34)

Figura 3.8: Ângulos das admitâncias de transferência. (34)

Figura 3.9: Admitância de transferência entre as barras internas de dois geradores (1 e 2) afetada por variações da admitância equivalente do SVC $\left(\Delta B_{SVC}^{1} \ e \ \Delta B_{SVC}^{2}\right)$ (35)

Figura 4.1: Diagrama unifilar do sistema de dois geradores. (39)

Figura 4.2: Efeitos do SVC colocado na barra 5 sobre a admitância de transferência entre as máquina 1 e 2 (carregamento na linha -2 a 2,5). (44)

Figura 4.3: Efeitos do SVC colocado na barra 5 sobre a admitância de transferência entre as máquinas 1 e 2. (45)

Figura 4.4: Variações de admitâncias. (46)

Figura 4.5: Sistema de quatro máquinas. (47)

Figura 4.6: Efeitos do SVC sobre a potência sincronizante – Sistema Kundur. (53)

Figura 4.7: Diagrama Unifilar do sistema de 3 áreas. (54)

Figura 4.8: IEEE 14 barras e 5 máquinas. (59)

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Dados de linha para o sistema de duas máquinas. (39)
Tabela 2: Resultados obtidos para o fluxo de potência ativa 1,5 pu da barra 3 a barra 4 (40)
Tabela 3: Parâmetros das máquinas (sistema de duas máquinas). (40)
Tabela 4: Resultados obtidos para o fluxo de potência ativa -0,5 pu da barra 3 a barra 4. (41)
Tabela **5**: Resultados obtidos para o fluxo de potência ativa 2,5 pu da barra 3 a barra 4. (42)
Tabela 6: Resultados obtidos para o fluxo de potência nulo da barra 3 a barra 4. (42)
Tabela 7: Resultados obtidos para o fluxo de potência ativa –1,872 pu da barra 3 a barra 4. (43)
Tabela 8: Análise do Fator de Efeito do SVC em diferentes valores de fluxo de potência ativa na linha de transmissão 3 - 4 (sistema de duas máquinas). (43)
Tabela 9: Análise do Fator de Efeito do SVC em diferentes valores de fatores de potência das cargas (sistema de duas máquinas). (44)
Tabela 10: Dados de linha do sistema de quatro máquinas. (47)
Tabela 11: Resultados obtidos para o fluxo de potência ativa 2,0004 da barra 7 a barra 9. (48)
Tabela 12: Parâmetros das máquinas (sistema de quatro máquinas). (48)
Tabela 13: Tensões internas (atrás de Xld) para o sistema de quatro máquinas. (49)
Tabela 14: Ângulos dos eixos q para o sistema de quatro máquinas. (49)
Tabela 15: Resultados obtidos para o fluxo de potência ativa 2,6000 da barra 7 a barra 9. (50)
Tabela 16: Resultados obtidos para o fluxo de potência ativa 1,3992 da barra 7 a barra 9 (51)
Tabela 17: Avaliação dos efeitos do SVC sobre admitâncias de transferências intra-área e inter-áreas. (52)
Tabela 18: Dados de linhas sistema de seis máquinas. (54)
Tabela 19: Resultados obtidos para o sistema de seis máquinas. (54)
Tabela 20: Parâmetros das máquinas (sistema de seis máquinas). (55)
Tabela 21:.Efeitos do SVC instalado na barra 4 nas admitâncias de transferência entre máquinas. (56)
Tabela 22: Efeitos do SVC instalado na barra 5 nas admitâncias de transferência entre máquinas . (57)
Tabela 23: Efeitos do SVC instalado na barra 3 nas admitâncias de transferência entre máquinas.

(58)
Tabela 24: Dados de linhas do sistema IEEE 14 barras. (59)
Tabela 25: Resultados obtidos para o caso base. (60)
Tabela 26: Parâmetros das máquinas. (60)
Tabela 27: Tensões internas (atrás de Xld). (61)
Tabela 28: Ângulos dos eixos q. (61)
Tabela 29: Efeitos do SVC nas admitâncias de transferência (62)

LISTA DE SÍMBOLOS

$P_{T\,i}$: Potência da turbina.

$P_{G\,i}$: Potência do gerador.

$W_{kin,i}$: Energia cinética total do gerador mais turbina.

δ_i : Posição angular do rotor.

$W^0_{kin,i}$: Energia cinética da unidade i.

M : Constante de inércia.

D : Constante de amortecimento.

E : Vetor tensões na barra.

E'_i : Tensão interna.

E'_{di} : Tensão do eixo direto.

E'_{qi} : Tensão do eixo de quadratura.

Y : Matriz admitância de barra.

G : Matriz condutância de barra.

B : Matriz susceptância de barra.

ΔZ_{svc} : Variação (em série) da impedância para alteração da admitância do SVC.

Y_{int} : Matriz admitância às barras de interesse.

Y_{redf} : Matriz reduzida final.

ΔY^*_{svcij} : Variação da admitância de transferência entre as máquinas i e j.

ΔB_{svc} : Variação da susceptância do SVC.

K_{Peij} : Coeficiente de potência sincronizante entre as máquinas i e j.

Y^0_{red} : Matriz admitância de barra da rede reduzida às barras internas dos geradores, incorporando o SVC na situação de equilíbrio.

P_{eij} : Potência de transferência entre as barras internas das máquinas.

K'_{svcij} : Coeficiente de efeito da capacidade de sincronização do par de máquinas (i,j).

K_{svcij} : Coeficiente das variações da susceptância do SVC sobre a variação da admitância de transferência entre às barras internas da máquina i e j.

φ_{svcij} : ângulo(K_{svcij}).

$\delta_i^{'}$: Ângulo interno da máquina.

δ_i : Ângulo entre tensão do eixo em quadratura com o eixo real.

β_i : Ângulo entre a tensão do eixo em quadratura com o eixo da máquina.

ΔY_{ij} : Magnitude da variação da admitância.

ΔY_{ij}^{ef} : Variação efetiva da magnitude da admitância de transferência.

ΔB_{svc} : Variação da susceptância do SVC.

K_{svcij}^{ef} : Coeficiente efetivo da admitância do SVC.

K_{svcij}^{efeito} : Fator de efeito.

K_{svc} : Matriz dos coeficientes efetivos da admitância do SVC.

FACTS: Flexible Alternating Current Transmission Systems (Sistema de Transmissão Flexível em Corrente Alternada).

SVC: Static Var Compensator.

SEE: Sistema de Energia Elétrica

SUMÁRIO

Capítulo 1

Introdução 15

1.1 Os Sistemas de Energia Elétrica e sua Evolução 15

1.2 Problema da Estabilidade. 16

1.3 Introdução dos dispositivos FACTS : seus efeitos no sistema. 17

Capítulo 2

Representação do Sistema de Energia Elétrica 19

2.1.A equação de Oscilação. 19

2.2 Rede Elétrica. 20

2.3 Cargas. 21

2.4 FACTS. 21

2.4.1 Melhoria da Estabilidade Transitória pela Atuação da Compensação no Sistema de Transmissão- Caso Ilustrativo de Duas Máquinas. 23

Capítulo 3

3.1 Inclusão de um SVC em um Sistema Multimáquinas Análise da estabilidade transitória**.** 27

3.2 Efeito do SVC sobre as interações entre máquinas. 37

Capítulo 4

4.1 Sistema Teste de Duas Máquinas. 39

4.2 Sistema de Quatro Máquinas. 47

4.3 Sistema de Seis Máquinas – 3 áreas. 53
4.4 Sistema de Cinco máquinas. 59

Capítulo 5

5.1 Conclusão. 64
Referências. 66

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Os Sistemas de Energia Elétrica e sua Evolução

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) são projetados com o principal objetivo de atender à demanda de potência e energia requerida pelos seus consumidores com padrões de confiabilidade e qualidade, significando operar dentro de limites especificados de tensão e frequência. Além de os sistemas serem capazes de operar satisfatoriamente em regime permanente, eles devem ser flexíveis à presença de defeitos ou perturbações de forma a garantir a continuidade da prestação de serviço mesmo quando sujeitos a anomalias.

Muitas são as causas de defeitos ou perturbações em sistemas de potência: curto-circuitos, rompimento de linhas de transmissão, descargas atmosféricas, entrada ou saída de cargas e/ou geradores de grande porte etc. são alguns exemplos de anomalias às quais os sistemas estão sujeitos. Essas perturbações afastam o sistema do seu ponto de operação original. Basicamente os estudos de estabilidade analisam o comportamento transitório do sistema durante e após tais perturbações. Deve-se determinar se o sistema será capaz de encontrar um novo ponto de operação e quais os procedimentos necessários para que isso aconteça.

Desde antes dos anos 1950 os sistemas tem apresentado crescimento sempre maior tanto em tamanho como em complexidade, forçando a evolução das metodologias de análise, bem como da modelagem do próprio sistema (ANDERSON; FOUAD; 2000, KUNDUR, 1994). Os métodos de análise evoluíram desde a simulação por meio de integração numérica das equações diferenciais que representam as dinâmicas do sistema com plotagem dos oscilogramas para análise visual (método tradicional) até os chamados métodos diretos/automáticos que permitem conclusão pelo computador comparando índices relacionados à energia do sistema sem a necessidade de intervenção de um “analista”. Dada a evolução dos computadores o método tradicional não apresenta limitações quanto a sofisticação da modelagem empregada (vide KUNDUR, 1994), sendo ainda atualmente utilizado para análise definitiva de casos, enquanto

que os métodos diretos são expeditos porém limitados quanto a fidedignidade da modelagem empregada, o que leva a incertezas quanto a confiabilidade dos resultados. Há um esforço no sentido de superar as dificuldades dos métodos diretos, seja na busca da perfeita determinação do ponto da fronteira da região de estabilidade por onde o sistema a abandona, como (SILVA ; BRETÃS 2003) ainda com o modelo clássico, seja na busca da sofisticação dos modelos empregados, como em (COLVARA, 2009).

O problema da estabilidade, em si, longe de ser superado, apresenta sempre novos desafios. Pode-se citar, entre tantos, as dificuldades impostas pelas limitações dos equipamentos, notadamente as linhas de transmissão, caracterizadas por “rigidez” dos parâmetros que interferem na capacidade de transmissão e de sincronização do sistema, estabelecidos pelos aspectos construtivos da linha. Assim, alteração de uma linha visando aumentar sua capacidade de transmissão e/ou característica dinâmica do sistema, tradicionalmente é realizada mediante construção de uma nova linha de transmissão como reforço da existente. Ocorre que, além da necessidade de vultoso investimento econômico, há restrição ambiental quanto à criação ou alargamento do corredor onde se instalará a nova linha.

Por outro lado, os avanços tecnológicos alcançados nos últimos anos pela eletrônica de potência possibilitaram o desenvolvimento de dispositivos que permitem não apenas compensar a linha de transmissão dotando-a de maior capacidade, mas também por meio de controle rápido efetuar variações da compensação de modo a favorecer a estabilidade do sistema. Estes dispositivos proporcionam uma nova característica ao sistema que muito apropriadamente é qualificada como flexibilidade e assim foram designados como FACTS (“Flexible Alternating Current Transmission Systems”) (SONG; JOHNS, 1999). São atualmente realidade em diversos sistemas em operação, e apresentam uma forte tendência de desenvolvimento, significando interesse de pesquisa não apenas no estudo dos próprios dispositivos, mas também de suas consequências e implicações no desempenho do sistema de potência.

A inserção desses dispositivos no sistema abriu nova frente de trabalho na área de análise e projeto, enfatizando-se o desenvolvimento de técnicas de análise de desempenho transitório do sistema incorporando a ação dos novos dispositivos, como em (GABRIJEL; MIHALIC 2002, (COLVARA; ARAUJO; FESTRAITS, 2005).

Considera-se neste trabalho a inclusão do SVC (Static Var Compensator) em um sistema multimáquinas tendo em vista a análise de estabilidade transitória, enfocando os efeitos do dispositivo sobre a capacidade de sincronização do sistema.

Busca-se identificar a contribuição do SVC na composição do torque de sincronização no ambiente do sistema multimáquinas. Para isto, considera-se inicialmente o sistema representado com preservação da completa estrutura da rede, de modo a se poder implementar a atuação do SVC. E para fins de análise (e não para a simulação digital propriamente), se faz uma redução da rede conservando as barras internas dos geradores e a barra onde se localiza o SVC. Deste resultado, obtém-se uma avaliação do efeito da atuação do SVC em cada um dos geradores. Finalmente, a redução às barras internas proporciona uma quantificação dos efeitos da atuação do SVC nos torques de sincronização entre máquinas do sistema.

A capacidade de sincronização entre duas máquinas genéricas do sistema é diretamente afetada pelas variações das admitâncias de transferência entre elas, e cada admitância de transferência é, por sua vez, afetada pelas variações da susceptância do SVC. Então, o foco do estudo foi localizado nas admitâncias de transferência.

1.2 Problema da Estabilidade

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

Estabilidade dinâmica é a designação dada para o estudo de pequenas perturbações. Neste caso, o foco do estudo reside no amortecimento das oscilações do sistema, que pode ser aumentado através de diversos procedimentos, desde o clássico Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) até a inclusão de controles nas compensações do sistema de transmissão, com chaveamento de pequenas capacitâncias em série ou em paraledo com as linhas de transmissão, resultando no que se conhece pela designação de FACTS.

Os fenômenos durante e após a ocorrência de uma grande e súbita perturbação em um sistema de potência são normalmente estudados e/ou analisados sob a denominação “estabilidade transitória”. As soluções para o regime durante a perturbação são obtidas no domínio do tempo mediante simulação digital, o que significa integração numérica das equações de estado do sistema a partir das condições iniciais dadas pelo regime permanente antes da perturbação. Da mesma forma, o movimento do sistema no período pós-falta é obtido pela integração numérica das equações do sistema a partir da condição inicial definida pelo estado do sistema no final do período da perturbação. O intervalo de tempo sob estudo pode variar de uma fração de segundo, quando a estabilidade da primeira oscilação é determinada, até o período em torno de 10 segundos ou superior, nos casos em que a estabilidade para múltiplas oscilações deve ser examinada.

1.3 Introdução dos dispositivos FACTS: seus efeitos no sistema

A influência dos dispositivos FACTS no desempenho dinâmico e transitório dos Sistemas de Energia Elétrica tem sido matéria de estudos já há anos, encontrando-se na literatura especializada muitos resultados mostrando de forma inequívoca que a estabilidade dinâmica e/ou transitória pode ser favorecida com adequadas leis de controle do dispositivo. Encontra-se ainda uma gama de trabalhos propondo metodologias de análise e de ajuste de parâmetros. Não obstante, o assunto encontra-se ainda em aberto, e este trabalho vem com o propósito de dar uma contribuição para o estudo do desempenho do Sistema de Energia Elétrica multimáquinas sob a atuação de um dispositivo FACTS, enfocando o modo como o dispositivo afeta as interações entre máquinas do sistema.

CAPÍTULO 2

Representação do Sistema de Energia Elétrica

2.1. A Equação de Oscilação

Considere a unidade geradora *i* de um sistema de *n* unidades. O gerador recebe, por meio do eixo da turbina, a "entrada" mecânica, ou potência da turbina, $P_{T\,i}$. Ele fornece a "saída" elétrica, ou potência do gerador, $P_{G\,i}$, à rede, por meio da sua barra terminal. Se essas duas potências forem iguais (desprezando as perdas relativamente insignificantes do gerador) o gerador funcionará com sua velocidade constante e em sincronismo com o restante do sistema.

Se, ao contrário, existir uma diferença entre essas duas potências, ela será usada para:

1. Mudar a energia cinética, ou velocidade, da unidade.
2. Dominar o conjugado de amortecimento que se desenvolve principalmente nos enrolamentos de amortecimento.

Matematicamente, escrevemos: (ELGERD, 1976).

$$P_{T\,i} - P_{G\,i} = \frac{d}{dt}\left(W_{kin,i}\right) + P_{damper} \tag{2.1}$$

O termo de energia cinética $W_{kin,i}$ representa a energia cinética total do gerador mais turbina, dada em megawatts-segundo (MWs) ou megajoules (MJ). Em vista da equação $\frac{d}{dt}W_{kin,i} = \frac{2W_{kin,i}^{0}}{f^{0}} \frac{d}{dt}\Delta f_i$ MW e $\Delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt}\Delta\delta_i$ Hz, podemos escrever o primeiro termo do segundo membro da equação (2.1):

$$\frac{d}{dt}W_{kin,i} = \frac{W_{kin,i}^{0}}{\pi f^{0}} \frac{d^2\delta_1}{dt^2} \text{ MW} \tag{2.2}$$

Nessa equação $W_{kin,i}^{0}$ representa a energia cinética da unidade *i* medida na frequência nominal; δ_i representa a posição angular do rotor, medida em radianos elétricos, em relação a uma referência que gira de modo síncrono.

O termo de amortecimento:

Com os desvios da velocidade do rotor em relação à velocidade síncrona, serão induzidas correntes nos enrolamentos de amortecimento do rotor, produzindo torques em oposição à velocidade. Além disto, há as perdas por atrito e ventilação, que também contribuem com o amortecimento. Todas estas componentes de torque de amortecimento são representadas em

$$P_{damper} \approx D_i \frac{d\delta_i}{dt} \text{ MW} \tag{2.3}$$

Em que D_i é um parâmetro positivo da máquina, medido em megawatt por radiano elétrico por segundo.

Tendo em vista os resultados, equações (2.2) e (2.3) podemos escrever assim a equação (2.1).

$$P_{Ti} - P_{Gi} = \frac{W_{kin,i}^{0}}{\pi f^{0}} \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad \text{[MW]} \tag{2.4}$$

Definindo bases apropriadas para a representação por unidade, a equação de oscilação é escrita na sua forma consagrada para uso em estudos de estabilidade transitória

$$M_i \frac{d^2\delta_i}{dt^2} = P_{Ti} - P_{Gi} - D_i \frac{d\delta_i}{dt}$$

em que o ângulo é expresso em radianos, o tempo em segundos, e as potências em pu.

2.2 Rede Elétrica

Considerando a rede de energia elétrica em regime permanente, ou seja, as dinâmicas ultra-rápidas de natureza eletromagnéticas das linhas de transmissão são desconsideradas diante das dinâmicas eletromecânicas (ANDERSON; FOUAD, 2000), sua representação genérica na referência de barras é:

$$I = YE \tag{2.5}$$

sendo:

$I =$ vetor injeções de correntes de barra;

$E =$ vetor tensões na barra;

$Y =$ matriz admitância de barra;

A matriz admitância de barra é complexa, podendo ser escrita como

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + \mathbf{jB} \tag{2.6}$$

onde **G** é a matriz condutância de barra e **B** é a matriz susceptância de barra.

2.3 Cargas

As cargas, genericamente, são representadas por modelos adequados aos estudos a desenvolver, podendo ser impedância constante, corrente constante, potência constante e dinâmica (motor), ou ainda uma combinação de dois ou mais destes modelos. No presente estudo, em vista do interesse em reduzir a matriz admitância da rede, as cargas são tratadas como de impedância constante.

2.4 FACTS

Uma das alternativas encontradas pelo setor elétrico para o problema do aumento da demanda e da falta de investimentos na construção de novas linhas de transmissão e unidades geradoras é a utilização de dispositivos FACTS (HINGORANI, 1993).

O termo **FACTS** provém do inglês **Flexible Alternating Current Transmission Systems** e é definido pelo IEEE como: sistemas de transmissão em corrente alternada que utilizam dispositivos de eletrônica de potência e também outros controladores estáticos com o objetivo de aumentar a controlabilidade e a capacidade de transferência de potência de um sistema elétrico (MACHADO, 2003).

Os dispositivos FACTS utilizam eletrônica de potência como forma de acionamento, o que garante uma operação com maior rapidez de resposta, mais continuidade, robustez, flexibilidade e confiabilidade. O êxito da tecnologia FACTS está diretamente ligado ao avanço empreendido pela eletrônica de potência e pela tecnologia de chaveamentos. À medida que estas áreas avançam com a produção de tiristores e transistores com maiores capacidades de potência e frequência de chaveamento; a tecnologia dos dispositivos FACTS vem tornando possível também o desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados e adequados às aplicações a que se destinam.

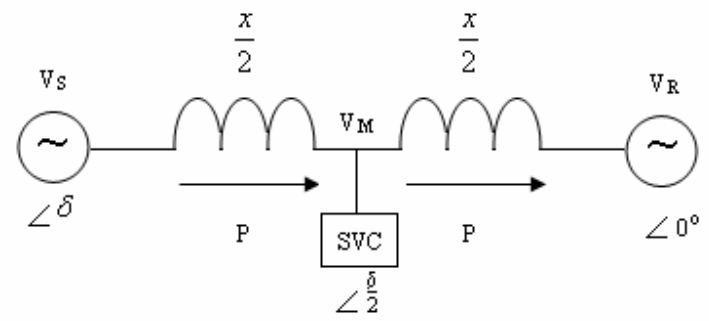
Entre esses dispositivos está o **SVC (Static Var Compensator)**, idealizado para o controle de tensão, que foi pela primeira vez demonstrado em Nebraska e comercializado, pela GE em 1974. O SVC tem sido usado desde o início dos anos 60, mas somente passaram a ser utilizados no controle de tensão de sistemas de transmissão no final dos anos 70, constituindo-se no mais importante dos dispositivos FACTS. A precisão, a disponibilidade e a rápida resposta permitem um alto desempenho no controle de tensão em regimes permanente, dinâmico e transitório em relação à compensação shunt convencional. Também são usados no amortecimento de oscilações de potência, na melhoria da estabilidade transitória e na redução de perdas sistêmicas através da otimização do controle da potência reativa. (MACHADO, 2003).

A melhoria da estabilidade é de grande importância em sistema de potência. O controle de excitação e o compensador estático de reativos (SVC) têm papel importante em melhorar a estabilidade de sistemas de potência. SVCs são crescentemente aplicados por várias razões em sistemas de potência modernos com linhas de transmissão longas e fontes remotas de geração, uma vez que podem alcançar rapidamente a regulação precisa de tensão terminal. Instalações de SVC servem para melhorar a estabilidade transitória de sistema de potência após uma perturbação importante no sistema (LERCH; POVH; XU, 1991). Para perturbações pequenas, um controle contínuo linear é normalmente adequado para melhorar o amortecimento. Porém, para perturbações grandes uma ação mais drástica, como controle de tipo de bang-bang (WANG;TAN;GUO, 2000).

O SVC é normalmente operado para regular a tensão da linha de transmissão no ponto onde o mesmo é conectado.

Se o equipamento é instalado no meio da linha de transmissão e atua de tal forma que a tensão seja mantida constante em todos os níveis de fluxo de potência, então a linha é

efetivamente dividida em duas partes iguais (reatância $X/2$). Nesta situação a presença do SVC dobra o valor limite de potência estável do sistema. O ângulo total da linha de transmissão é maior para este valor de potência, e como a magnitude da tensão é mantida constante, a estabilidade dinâmica é mantida mesmo para ângulos superiores a $\pi/2$. Deste modo os limites de tensão, limites de colapso de tensão e limites de estabilidade da linha são melhorados (SONG ; JOHNS, 1999).



$$P = \frac{V_S V_M}{\left(\frac{X}{2}\right)} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{V_M V_R}{\left(\frac{X}{2}\right)} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

Figura 2.1 - SVC shunt

2.4.1 Melhoria da Estabilidade Transitória pela Atuação da Compensação no Sistema de Transmissão – Caso Ilustrativo de Duas Máquinas

O potencial da compensação shunt, em série, e de controle de ângulo sobre a estabilidade transitória pode trazer melhoria do desempenho transitório do sistema e isto pode ser avaliado pelo critério de igualdade de área. O significado do critério de igualdade de área é explicado com sistema simples de duas máquinas e duas linhas mostrado na Figura 2.2a e das correspondentes curvas P versus δ mostradas na Figura 2.2b.

Suponhamos que o sistema completo é caracterizado por P versus δ na curva "a" e está operando com ângulo δ_1 para transmitir potência P_1 quando ocorre uma falta na linha segmento

"1." Durante a falta o sistema é caracterizada por P versus δ na curva "b" e, assim, ao longo deste período, a transmissão de potência elétrica decresce significativamente. Como consequência, o gerador acelera e o ângulo de equilíbrio, que era δ_1 na situação original passa para δ_2 quando os disjuntores desconectam a linha onde ocorreu a falta no segmento “1”.Sob a vigência da falta o gerador absorve energia acelerante representada pela área "A1". Depois de eliminada a falta, sem o segmento "1" da linha, o sistema tem a característica da curva "c". No ângulo de equilíbrio δ_2 na curva "c" a potência transmitida iguala a potência mecânica e a partir daí o gerador sofre desaceleração; no entanto, o ângulo δ continua a crescer devido à energia cinética armazenada no rotor da máquina. O ângulo máximo é alcançado em δ_3, onde a energia de desaceleração, representado pela área "A2", se torna igual à energia de aceleração representada pela área "A1". Se $\delta_3 = \delta_{crit}$, têm-se o limite de estabilidade transitória.

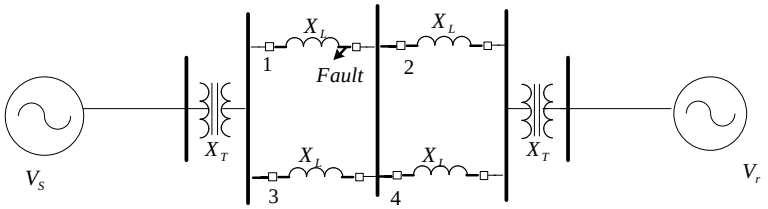


Figura 2.2 a Sistema de duas máquinas

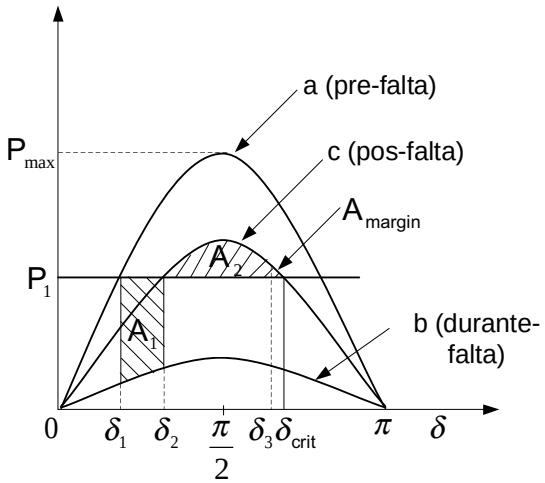


Figura 2.2 b- Ilustração critério de igualdade de área de estabilidade transitória

Através das Figuras 2.3a a 2.3d pode ser verificado o comportamento transitório do sistema sem qualquer compensação, com compensação ideal shunt do ponto médio, com capacitor série e com um transformador defasador, respectivamente como bem ilustrado em (SONG; JOHNS, 1999).

As Figuras mostram o critério de igualdade de área aplicado ao estudo de um curto-circuito eliminado sem abertura de linha, sendo a área A_1 a área de aceleração e a área A_2 a área de desaceleração. Fica evidente o benefício da compensação pelo expressivo acréscimo da margem de estabilidade indicada pela área A_{margem}.

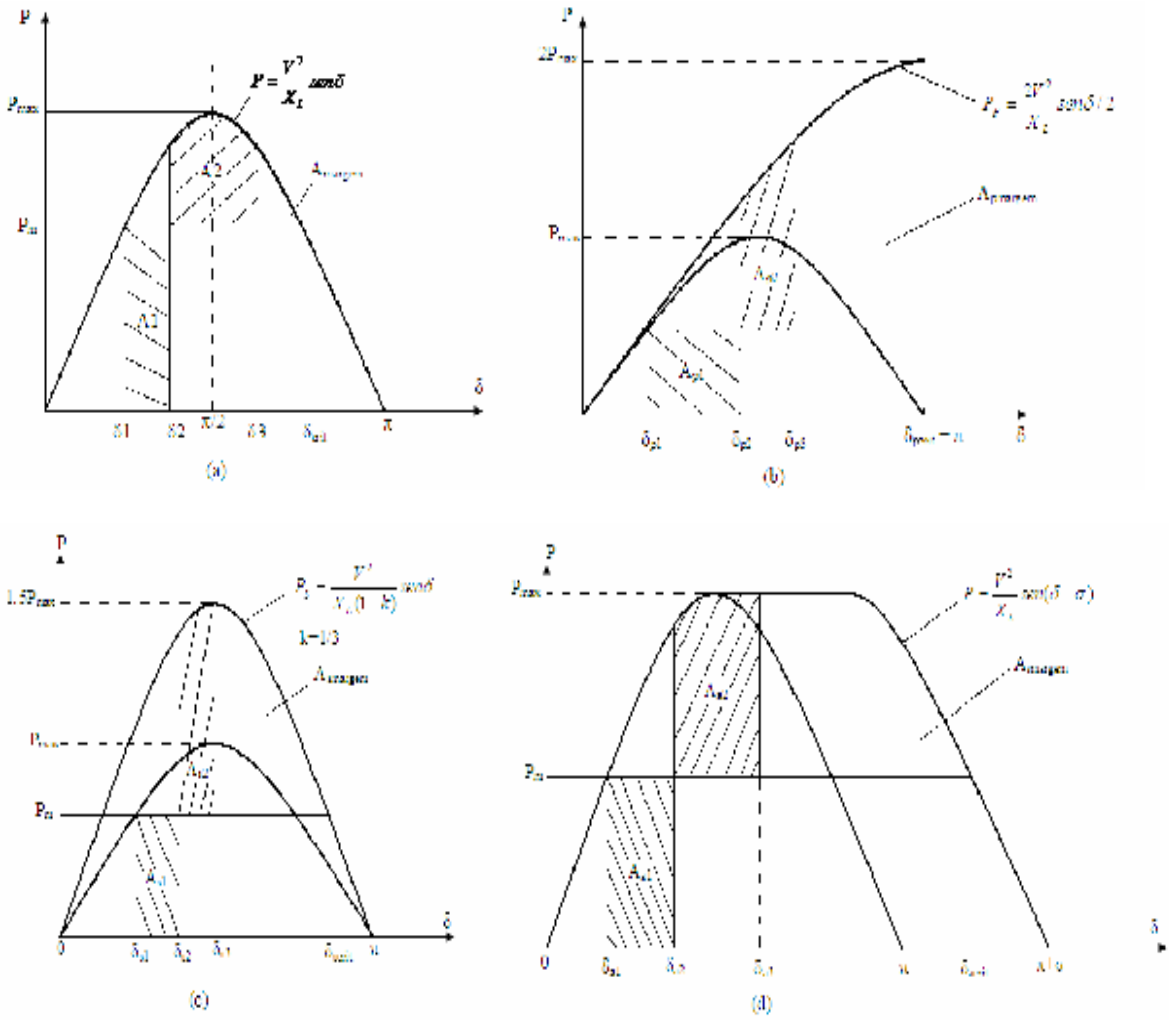


Figura 2.3 Critério de igualdade de área para ilustrar a margem de estabilidade transitória de um simples sistema de duas máquinas (a) sem compensação (b) com SVC ideal no meio da LT (c) com uma série de condensadores (d) com um defasador

Como visto, qualquer uma das três compensações pode aumentar significativamente a margem de estabilidade transitória em relação ao sistema não compensado. Estas são boas ilustrações para o efeito da instalação do dispositivo FACTS em um sistema simples de duas máquinas.

Em um sistema real, multimáquinas, estes efeitos não são tão facilmente visualizados, e mesmo a influência do dispositivo no desempenho global do sistema, assim como sobre as interações entre máquinas ou áreas do sistema não é evidente. É óbvio que há grande interesse em saber como um dispositivo instalado em determinada barra da rede influencia o comportamento dinâmico/transitório do sistema, principalmente sobre qual(is) máquina(s) são mais ou menos afetadas. Estas informações podem ser extremamente úteis para se escolher a localização do dispositivo, e até mesmo para ajustar parâmetros com vistas a certo critério de desempenho. Este aspecto é tratado no próximo capítulo, onde se apresenta um estudo das interações entre máquinas de um sistema afetadas pela presença de um SVC em determinada barra de rede.

CAPÍTULO 3

3.1 Inclusão de um SVC em um Sistema Multimáquinas Análise dos Efeitos sobre a Capacidade de Sincronização

Seja um Sistema de Energia Elétrica (SEE) em cuja rede de m nós tenha-se instalado um SVC em uma linha conectando as barras genéricas k e ℓ. Para representar esta instalação, cria-se o nó denominado $n_{k\ell}$ como ilustrado na Figura 3.1.

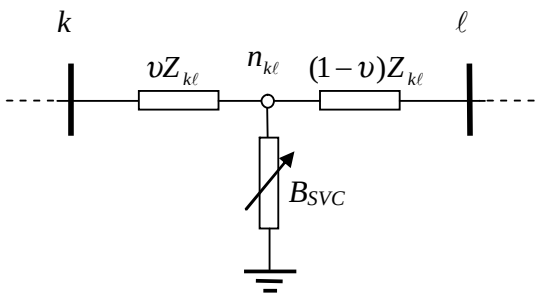


Figura 3.1 - SVC instalado em um ponto da linha $k-\ell$.

A literatura indica a instalação no ponto central da linha. Aqui, assume-se que o dispositivo possa ser instalado em qualquer ponto da linha, fazendo-se $0 < \upsilon < 1$.

O nó $n_{k\ell}$ é adicionado à rede, de modo que então a rede passa a ter m+1 nós.

A esta rede adicionam-se as barras internas dos geradores e a matriz admitância tem então a dimensão n+m+1 em que n é o número de geradores e m o número de barras da rede e a (*n+m+1*)-ésima barra é justamente a barra do SVC (Figura 3.2)

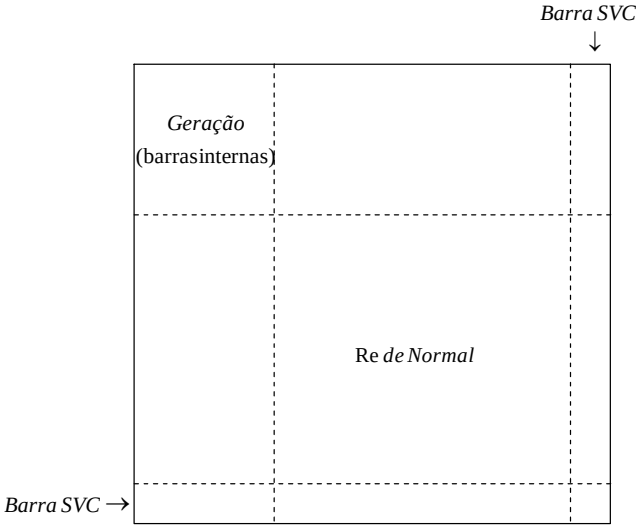


Figura 3.2 – Matriz admitância adicionada o dispositivo SVC.

Faz-se, então, uma reordenação de barras, de modo que a (*n+1*)-ésima linha e coluna sejam as correspondentes ao nó $n_{k\ell}$. Então, a matriz da rede fica como ilustrado na Figura 3.3:

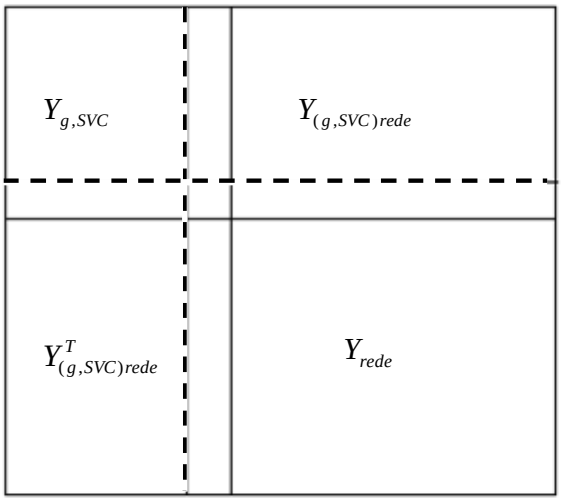


Figura 3.3 – Reordenação de linhas e colunas da matriz admitância.

Definem-se, no âmbito deste estudo, as barras internas dos geradores e a barra do SVC, como barras de interesse, sendo o enfoque das análises de ora em diante dedicado a estas barras.

O desempenho elétrico das demais barras deixa de interessar e a rede é então reduzida as barras de interesse, como mostrado na Figura 3.4.

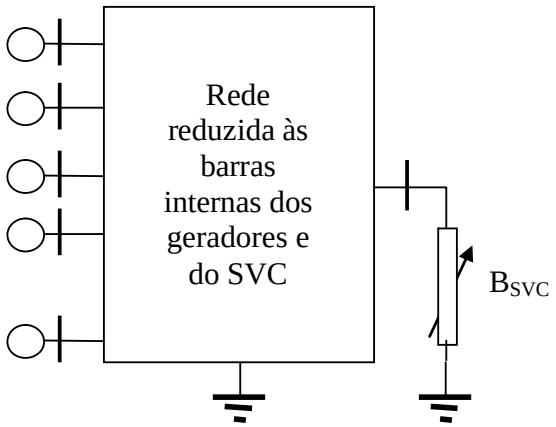


Figura 3.4 - Rede reduzida às barras internas dos geradores e do SVC.

Efetuando a redução da matriz admitância às barras de interesse obtém-se: (vide apêndice A).

$$Y_{\text{int}} = Y_{g,SVC} - Y_{(g,SVC)rede} Y_{rede}^{-1} Y_{(g,SVC)rede}^{T} \tag{3.1}$$

e a matriz reduzida às barras de interesse mostrada na Figura 3.5.

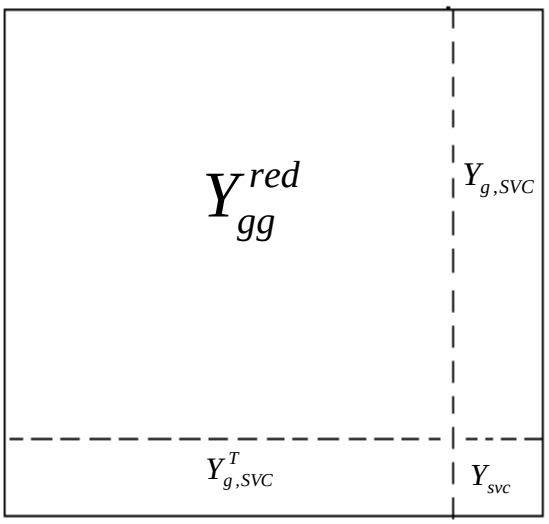


Figura 3.5 – Matriz admitância reduzida.

Em que Y_{svc} é a admitância própria da barra do SVC na rede reduzida às barras de interesse.

A equação da rede reduzida às barras de interesse, então, pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I_g} \\ \hline I_{SVC} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{Y_{gg}^{red}} & \mathbf{Y_{g,SVC}} \\ \hline \mathbf{Y_{g,SVC}^T} & Y_{SVC} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \hline V_{SVC} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Nota-se que $\mathbf{Y_{g,SVC}}$ é um vetor de dimensão *n* (número de máquinas) e seu *i*-ésimo elemento genérico Y_{g,SVC_i} pode ser entendido como a sensibilidade da corrente terminal do *i*-ésimo gerador às variações da tensão sobre o SVC, isto é $Y_{g,svci} = \dfrac{\Delta I_{gi}}{\Delta V_{svc}}$.

Como $I_{SVC} = 0$ a matriz reduzida final, relacionando exclusivamente as barras internas dos geradores é obtida como $Y_{redf} = Y_{gg}^{red} - Y_{g,svc} Y_{svc}^{-1} Y_{g,svc}^T$ e, considerando as variações de susceptância do SVC têm-se (vide apêndice A):

$$Y_{svc}^{-1} = \left(Y_{svc}^0 + \Delta Y_{svc}\right)^{-1} \text{ ou ainda}$$

$$Y_{svc}^{-1} = Z_{svc} = (Z_{svc}^0 + \Delta Z_{svc}) \tag{3.3}$$

sendo $Z_{svc}^0 = Y_{svc}^{0\ -1}$ a impedância equivalente do SVC na condição de operação normal (equilíbrio) e então

$$\Delta Z_{svc} = \frac{1}{Y_{svc}^0 + \Delta Y_{svc}} - \frac{1}{Y_{svc}^0} = \frac{-\Delta Y_{SVC}}{Y_{SVC}^0\left(Y_{SVC}^0 + \Delta Y_{SVC}\right)} \tag{3.4}$$

Note-se que ΔZ_{SVC} é a correspondente variação (em série) da impedância do SVC correspondente à alteração da admitância do SVC (considerada em derivação). E finalmente pode-se estabelecer a admitância de transferência entre as barras internas i e j como

$$Y_{ij} = Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij} \tag{3.5}$$

e a matriz reduzida final, relacionando exclusivamente as barras internas dos geradores será dada por:

$$\mathbf{Y_{redf}} = \mathbf{Y^0_{red}} + \mathbf{\Delta Y^*_{svc}} \tag{3.6}$$

sendo

$$\mathbf{Y^0_{red}} = [\mathbf{Y^{red}_{gg}} + \mathbf{\Delta Y^0_{svc}}] \tag{3.7}$$

com

$$\mathbf{\Delta Y^0_{svc}} = -Z^0_{svc}[\mathbf{Y_{g,svc}}\,\mathbf{Y^T_{g,svc}}] \tag{3.8}$$

Destaca-se que $\mathbf{Y^0_{red}}$ é a matriz admitância de barra da rede reduzida as barras internas dos geradores, incorporando a admitância equivalente do SVC na situação de regime permanente. Pode-se dizer que é a matriz reduzida considerando a compensação estática (fixa ou constante).

Mas, se além da compensação paralela constante, tem-se uma parcela da admitância (ou impedância) variante então se tem adicionalmente uma variação da matriz admitância reduzida expressa por:

$$\mathbf{\Delta Y^*_{svc}} = -\Delta Z_{svc}[\mathbf{Y_{g,svc}}\,\mathbf{Y^T_{g,svc}}] \tag{3.9}$$

Note-se que cada elemento $\Delta Y^*_{svc\,ij}$ de $\mathbf{\Delta Y^*_{svc}}$ é a variação da admitância de transferência entre as máquinas *i* e *j* e é dada por:

$$\Delta Y^*_{svc\,ij} = -[Y_{g,svc_i} Y_{g,svc_j}]\Delta Z_{svc} \tag{3.10}$$

Sendo $Y_{g,svc_i} Y_{g,svc_j} = cte, \forall i, j$ têm-se que cada admitância de transferência entre máquinas i e j do sistema depende diretamente das variações da impedância do SVC, por intermédio do coeficiente $K'_{svc\,ij}$ definido como.

$$K'_{svc\,ij} = -Y_{g,svc_i} Y_{g,svc_j} \tag{3.11}$$

O coeficiente $K'_{svc\,ij}$ pode ser identificado como a sensibilidade da admitância de transferência do par de máquinas (*i*,*j*) em relação às variações da impedância do SVC, como se descreve a seguir.

Considerando que na barra onde o SVC está instalado incidem outras admitâncias, é razoável admitir que $Y_{svc}^{0}\left(Y_{svc}^{0}+\Delta Y_{svc}\right)\approx\left(Y_{svc}^{0}\right)^{2}$, e assim pode-se escrever:

$$\Delta Z_{svc}=\frac{-\Delta Y_{svc}}{Y_{svc}^{0}\left(Y_{svc}^{0}+\Delta Y_{svc}\right)}\cong-\frac{\Delta Y_{svc}}{\left(Y_{svc}^{0}\right)^{2}} \tag{3.12}$$

e como

$$\Delta Y_{svc}=j\Delta B_{svc} \tag{3.13}$$

$$\Delta Z_{svc}=-\frac{j\Delta B_{svc}}{\left(Y_{svc}^{0}\right)^{2}} \tag{3.14}$$

e, afinal, reunindo os resultados, têm-se

$$K_{SVCij}=\frac{\Delta Y_{SVCij}^{*}}{\Delta B_{SVC}}\cong-Y_{(g,SVC)i}Y_{(g,SVC)j}\frac{\Delta Z_{SVC}}{\Delta B_{SVC}} \tag{3.15}$$ ou

$$K_{SVCij}\cong j\frac{Y_{(g,SVC)i}Y_{(g,SVC)j}}{\left(Y_{SVC}^{0}\right)^{2}} \tag{3.16}$$

Logo o coeficiente das variações da susceptância ΔB_{svc} do SVC sobre a variação da admitância de transferência entre as barras internas das máquinas i e j ΔY_{svcij} é dado por

$$K_{svcij}=\frac{\Delta Y^{*}{}_{svcij}}{\Delta B_{svc}}\cong-j\frac{K_{SVC}^{'}}{\left(Y_{svc}^{0}\right)^{2}} \tag{3.17}$$

Então a variação da admitância de transferência entre as barras internas das máquinas i e j originada da ação do SVC é dada por

$$\Delta Y_{svcij}=K_{svcij}\Delta B_{svc} \tag{3.18}$$

ou

$$\Delta Y_{svcij}=\left|K_{svcij}\right|\left|\Delta B_{svc}\right|\underline{\varphi_{svcij}} \tag{3.19}$$

em que se define

$$\varphi_{svcij} = \hat{a}ngulo\left(K_{svcij}\right) \tag{3.20}$$

Observa-se que as variações da susceptância do SVC $\left(\Delta B_{svc}\right)$ afetam a magnitude da variação da admitância de transferência, mas não o seu ângulo, como ilustrado na Figura 3.6.

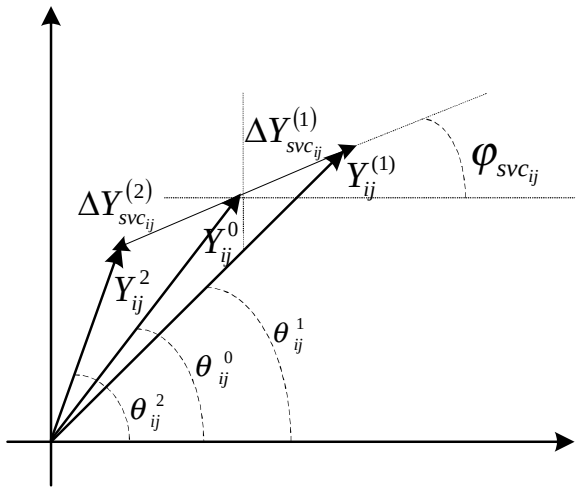


Figura 3.6 – Admitância de transferência da rede reduzida no equilíbrio e a linha das variações dinâmicas

O efeito resultante pode ainda ser expresso por

$$\Delta Y_{ij} = \Delta G_{ij} + j\Delta B_{ij} \tag{3.21}$$

com

$$\Delta G_{ij} = real\left(K_{svc}\right)\Delta B_{svc} \tag{3.22}$$

$$\Delta B_{ij} = imag\ \left(K_{svc}\right)\Delta B_{svc} \tag{3.23}$$

Seja o valor final da admitância de transferência complexa entre as barras internas das máquinas i e j dado por $\bar{Y} = Y_{ij}\angle\theta_{ij}$ e as tensões internas fasoriais expressas genericamente por $\dot{E}_i = E_i\angle\delta_i$, como ilustrado nas Figuras 3.7 e 3.8.

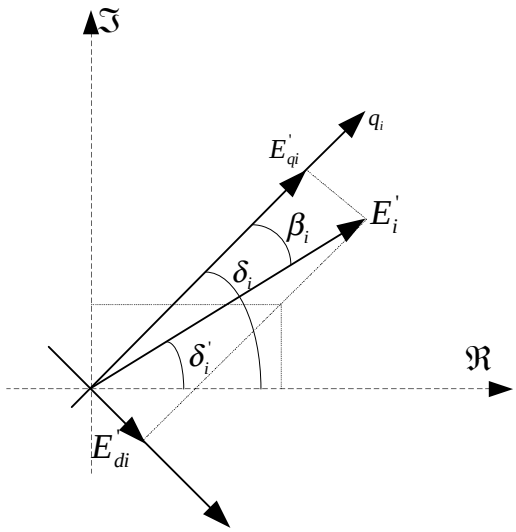


Figura 3.7 – Diagrama Fasorial para a máquina i

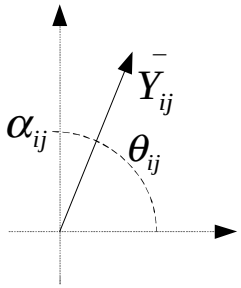


Figura 3.8 – Ângulos das admitâncias de transferência

A potência transferida entre as máquinas *i* e *j* é expressa por

$$P_{eij} = E'_i Y_{ij} E'_j \cos\left(\delta'_{ij} - \theta_{ij}\right) \tag{3.24}$$

ou, com $\theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij}$ e, por simplicidade de notação, deixando de utilizar o indicativo $(')$ para as tensões e ângulos internos das máquinas, vem

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \cos\left(\delta_{ij} + \alpha_{ij} - \frac{\pi}{2}\right) \tag{3.25}$$

que pode ser escrita como

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j sen(\delta_{ij} + \alpha_{ij}). \tag{3.26}$$

Admitindo que a admitância de transferência entre as máquinas i e j pode sofrer variações em magnitude e ângulo, escreve-se-a como

$$\bar{Y}_{ij} = \left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}\right) \angle \theta_{ij}^0 + \Delta\theta_{ij} \tag{3.27}$$

E, sendo a variação de Y_{ij} devida ao SVC como descrito anteriormente, vem

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{ij} &= \bar{Y}_{ij}^0 + \bar{K}_{svc_{ij}} \Delta B_{svc} \\ &\left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{SVC\,ij}\right) \Big| \underline{\theta_{ij}^0 + \Delta\theta_{SVC\,ij}} \end{aligned} \tag{3.28}$$

A Figura 3.9 é uma ilustração para os efeitos de um SVC instalado em alguma barra genérica do sistema de transmissão sobre a admitância de transferência entre as máquinas 1 e 2 deste sistema, considerando dois valores hipotéticos de variação da susceptância do SVC, ΔB_{SVC}^1 e ΔB_{SVC}^2.

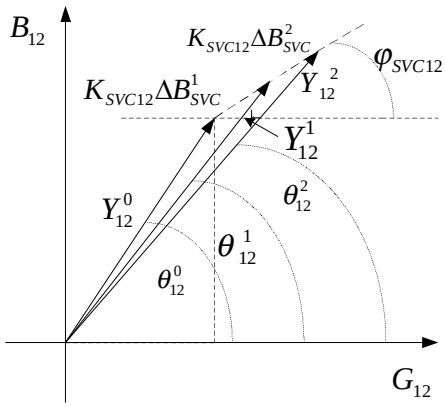


Figura 3.9 – Admitância de transferência entre às barras internas de dois geradores (1 e 2) afetada por variações da admitância equivalente do SVC (ΔB_{SVC}^1 *e* ΔB_{SVC}^2)

Os correspondentes resultados são $\bar{Y}_{12}^1 = Y_{12}^1 \Big| \underline{\theta_{12}^1}$ e $\bar{Y}_{12}^2 = Y_{12}^2 \Big| \underline{\theta_{12}^2}$

A magnitude da variação da admitância é

$$\Delta Y_{ij} = \left| K_{SVC\,ij} \right| \Delta B_{SVC} \tag{3.29}$$

e a variação efetiva da magnitude da admitância de transferência é

$$\Delta Y_{ij}^{ef} = Y_{ij} - Y_{ij}^{0} = \sqrt{\left(Y_{ij}^{0} + \Delta Y_{ij} \cos\left(\varphi_{SVC\,ij} - \theta_{ij}^{0}\right)\right)^2 + \left(\Delta Y_{ij} sen\left(\varphi_{SVC\,ij} - \theta_{ij}^{0}\right)\right)^2} - Y_{ij}^{0} \tag{3.30}$$

ou

$$\Delta Y_{ij}^{ef} = \sqrt{Y_{ij}^{0\,2} + \Delta Y_{ij}\left[\Delta Y_{ij} + 2Y_{ij}^{0} \cos\left(\varphi_{SVC\,ij} - \theta_{ij}^{0}\right)\right]} - Y_{ij}^{0} \tag{3.31}$$

e

$$\Delta\theta_{ij} = \theta_{ij} - \theta_{ij}^{0} = \arctan\left[\frac{K_{SVC\,ij}\Delta B_{SVC}\, sen\left(\varphi_{SVC\,ij} - \theta_{ij}^{0}\right)}{Y_{ij}^{0} + K_{SVC\,ij}\Delta B_{SVC} \cos\left(\varphi_{SVC\,ij} - \theta_{ij}^{0}\right)}\right] \tag{3.32}$$

Observa-se que $K_{SVC\,ij}$ e $\varphi_{SVC\,ij}$ têm valores constantes, e, principalmente, que as variações da admitância de transferência entre as máquinas i e j, tanto em magnitude como em ângulo, dependem exclusivamente das variações da susceptância do SVC $\left(\Delta B_{SVC}\right)$.

Seja

$$\theta_{ij} + \alpha_{ij} = \theta_{ij}^{0} + \Delta\theta_{ij} + \alpha_{ij}^{0} + \Delta\alpha_{ij} = \frac{\pi}{2} \tag{3.33}$$

$$\theta_{ij}^{0} + \Delta\theta_{ij} = \frac{\pi}{2} - \left(\alpha_{ij}^{0} + \Delta\alpha_{ij}\right) \tag{3.34}$$

como $\theta_{ij}^{0} = \frac{\pi}{2} - \alpha_{ij}^{0}$, têm-se $\Delta\alpha_{ij} = -\Delta\theta_{ij}$, podendo-se expressar a admitância de transferência como

$$\bar{Y}_{ij} = (Y_{ij}^{0} + \Delta Y_{ij}^{ef}) \angle \frac{\pi}{2} - (\alpha_{ij}^{0} + \Delta\alpha_{ij}) \tag{3.35}$$

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

$$P_{eij} = E_i\left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef}\right)E_j sen\left(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}\right) \tag{3.36}$$

E o coeficiente de potência sincronizante entre as máquinas i e j, sob ação do SVC instalado na barra n_{kl} é;

$$K_{Peij} = \frac{\partial P_{eij}}{\partial \delta_{ij}} = E_i\left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef}\right)E_j \cos\left(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0\right) \tag{3.37}$$

Estabelecendo uma dependência direta do coeficiente de potência sincronizante com as variações da susceptância do SVC;

$$K_{P_{eij}} = E_i\left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef}\right)E_j \cos\left(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0\right) \tag{3.38}$$

A potência líquida mútua entre as máquinas i e j pode ser escrita destacando a parcela introduzida pelas variações da magnitude da admitância de transferência devidas ao SVC como;

$$P_{eij} = E_i\left(Y_{ij}^0\right)E_j sen\left(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}\right) + E_i \Delta Y_{ij}^{ef} E_j sen\left(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta\alpha_{ij}\right) \tag{3.39}$$

3.2 Efeito do SVC Sobre as Interações entre Máquinas

A capacidade de sincronização entre as máquinas i e j está diretamente associada à magnitude da admitância de transferência entre elas, que pode ser escrita como

$$\begin{aligned} Y_{ij} &= Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef} = \\ &= Y_{ij}^0 + K_{SVC\,ij}^{ef} \Delta B_{SVC} \end{aligned} \tag{3.40}$$

(3.41)

Observando a Figura 3.9, nota-se que o coeficiente efetivo da susceptância do SVC pode ser avaliado como

$$K_{SVC\,ij}^{ef} \cong K_{SVC\,ij} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{SVC\,ij}) \tag{3.42}$$

Este coeficiente expressa a participação efetiva das variações da susceptância do SVC na magnitude da admitância de transferência entre duas máquinas genéricas i e j de um sistema multimáquinas. Este é, em si, um dado extremamente significativo, uma vez que, mesmo para

uma rede de transmissão de grande complexidade, se tem uma avaliação da eficácia da atuação do SVC quanto a interação entre as duas máquinas consideradas..

Por outro lado, há que se considerar que uma determinada variação da admitância de transferência pode ter maior ou menor importância quando comparada com a magnitude original da mesma. Então, é mais significativa a informação da importância relativa da contribuição das variações da susceptância do SVC para a admitância de transferência. Com este objetivo, define-se o Fator de Efeito

$$k_{SVC\ ij}^{efeito} \overset{\Delta}{=} \frac{K_{SVC\,ij}^{ef}}{Y_{ij}^{0}} \tag{3.43}$$

e se reescreve a admitância de transferência como

$$Y_{ij} = Y_{ij}^{0}\left(1 + k_{SVC\ ij}^{efeito}\Delta B_{SVC}\right) \tag{3.44}$$

O Fator de Efeito $k_{SVC\ ij}^{efeito}$ expressa a importância relativa das variações da susceptância do SVC sobre a admitância de transferência. Este fator de efeito pode ser útil para técnicas de análise da atuação do sistema de potência sob ação do SVC, assim como para realização de ajustes da atuação do sistema de potência com o SVC, uma vez que expressa a importância relativa da atuação do SVC sobre a admitância de transferência entre duas máquinas do sistema. Enfatiza-se que isto significa influência direta sobre a potência sincronizante entre estas máquinas e assim este fator pode ser denominado índice de efeito da atuação do SVC sobre a capacidade de sincronização das máquinas do sistema.

Naturalmente, o índice pode ser usado ainda para avaliar quais pares de máquinas são mais e quais são menos afetados pela atuação do SVC localizado em determinada barra do sistema. Consequentemente, considerando diversas localizações do SVC, pode-se identificar qual é a mais efetiva visando às interações entre determinado par de máquinas, ou ainda, visando às oscilações entre determinadas áreas do sistema, bastando para isto observar duas máquinas pertencentes a áreas diferentes.

Além disto, sabendo-se como o SVC afeta o desempenho dinâmico/transitório entre máquinas ou áreas, pode-se utilizar o fator de efeito para definir e/ou analisar leis de controle.

Os exemplos apresentados no Capítulo 4 ilustram os conceitos aqui enunciados.

CAPÍTULO 4

Exemplos de Aplicação

Neste capítulo apresentam-se exemplos ilustrativos visando validar e clarificar a utilização do fator de efeito do SVC em sistemas exemplos de 2, 4, 6 e 5 máquinas.

4.1 Sistema Teste de Duas Máquinas

1º. Caso - Caso base: Fluxo de Potência Ativa 1,5 pu da barra 3 para a barra 4

O sistema considerado é apresentado a seguir por meio de seu diagrama unifilar, dados de linha e resultados do fluxo de potência para o que se considera aqui o caso base.

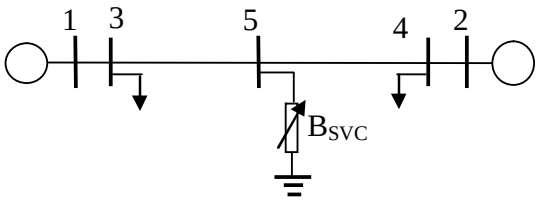


Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema de 2 máquinas.

Tabela 1 – Dados de Linhas do Sistema de Duas Máquinas

No. da linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância série		Admitância paralela	
			R	X	G	B
1	1	3	0	0,05	0	0
2	3	5	0	0,15	0	0
3	5	4	0	0,15	0	0
4	4	2	0	0,05	0	0

Tabela 2 - Resultado Obtido para o Fluxo de Potência Ativa 1,5 pu da barra 3 para a barra 4

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	1,0000	0,000	1,0000	0,0000	2,5002	0,6395
2	Barra 2	0,8428	-0,5745	1,0200	-34,2787	2,0000	0,4423
3	Barra 3	0,9041	-0,3750	0,9788	-22,5294	-1,0000	0,0000
4	Barra 4	0,7697	-0,6433	1,0031	-39,8877	-3,5000	-0,0500
5	Barra 5	0,8916	-0,4528	1,0001	-26,9247	0,0000	0,6328

Tabela 3 – Parâmetros das Máquinas

Maq	Barra	XD	Xld	M	D	Tld0	Tlq0	KR	TR
1	1	0,7844	0,1906	0,0192	0,0020	5,36	0,50	25,00	0,10
2	2	0,7844	0,1906	0,0192	0,0020	7,2	0,40	25,00	0,10

Maq	Barra	Efdmax	Efdmin	Tg	Tm	Ag	Bg	Alf	Bet
1	1	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
2	2	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000

Neste caso, têm-se a matriz admitância reduzida as barras internas das máquinas para a situação de equilíbrio (regime permanente) a seguir.

$$Y_{red}^{0} = \begin{bmatrix} 0.5789 - 1.4634i & 0.7867 + 0.8663i \\ 0.7867 + 0.8663i & 1.3965 - 2.1162i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5737 & 1.1702 \\ 1.1702 & 2.5355 \end{bmatrix} \Bigg\| \begin{bmatrix} -68.4153 & 47.7564 \\ 47.7564 & -56.5785 \end{bmatrix}$$

e a matriz dos coeficientes efetivos da admitância do SVC é

$$K_{SVC} = \begin{bmatrix} 0.1754 + 0.1525i & 0.1985 + 0.0962i \\ 0.1985 + 0.0962i & 0.2057 + 0.0390i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2324 & 0.2206 \\ 0.2206 & 0.2094 \end{bmatrix} \Bigg\| \begin{bmatrix} 40.9941 & 25.8591 \\ 25.8591 & 10.7242 \end{bmatrix}$$

e o deslocamento angular entre a admitância de transferência e o coeficiente efetivo é

$$\theta_{12} - \varphi_{SVC12} = 47{,}76 - 25{,}86 = 21{,}90^o \tag{4.1}$$

2º. Caso - Sistema de Transmissão Menos Carregado: Fluxo de potência ativa - 0,5 pu da barra 3 para a barra 4.

O resultado do fluxo de potência para este caso é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado Obtido para o Fluxo de Potência Ativa - 0,5 pu da barra 3 para a barra 4.

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	1,0000	0,000	1,0000	0,0000	2,5000	0,4649
2	Barra 2	1,0016	-0,1931	1,0200	-10,9130	2,0000	0,1775
3	Barra 3	0,9303	-0,3750	1,0030	-21,9552	-3,0000	0,0000
4	Barra 4	0,9744	-0,2877	1,0160	-16,4502	-1,5000	-0,0500
5	Barra 5	0,9629	-0,3613	1,0285	-20,5663	0,0000	0,6328

A matriz admitância de barra reduzida as barras internas dos geradores para a situação de equilíbrio é

$$Y_{red}^{0} = \begin{bmatrix} 0.8471 - 1.7463i & 0.7981 + 0.8132i \\ 0.7981 + 0.8132i & 1.0057 - 1.7888i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.9409 & 1.1394 \\ 1.1394 & 2.0521 \end{bmatrix} \Bigg\| \underline{\begin{bmatrix} -64.1212 & 45.5391 \\ 45.5391 & -60.6540 \end{bmatrix}}$$

e a matriz dos coeficientes efetivos da admitância do SVC é

$$K_{SVC} = \begin{bmatrix} 0.1952 + 0.0571i & 0.1945 + 0.0561i \\ 0.1945 + 0.0561i & 0.1937 + 0.0552i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2034 & 0.2024 \\ 0.2024 & 0.2014 \end{bmatrix} \Bigg\| \underline{\begin{bmatrix} 16.3049 & 16.0995 \\ 16.0995 & 15.8940 \end{bmatrix}}$$

e o deslocamento angular entre a admitância de transferência e o coeficiente efetivo é

$$\theta_{12} - \varphi_{SVC12} = 45{,}54 - 16{,}10 = 29{,}44^o \tag{4.2}$$

3º Caso - Sistema de Transmissão Mais Carregado: Fluxo de potência ativa 2,5 pu da barra 3 para a barra 4.

Os resultados para este caso são apresentados a seguir.

Tabela 5 – Resultados Obtidos para o Fluxo de Potência Ativa 2,5 pu da barra 3 para a barra 4

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	1,0000	0,000	1,0000	0,0000	2,5001	1,1353
2	Barra 2	0,6283	-0,8035	1,0200	-51,9782	2,0000	1,1643
3	Barra 3	0,8297	-0,3750	0,9105	-24,3225	0,0000	0,0000
4	Barra 4	0,5159	-0,8190	0,9679	-57,7919	-4,5000	-0,0500
5	Barra 5	0,7729	-0,5000	0,9206	-32,9002	0,0000	0,6328

$$Y_{red}^{0} = \begin{bmatrix} 0.3549 - 1.3709i & 0.7328 + 0.8598i \\ 0.7328 + 0.8598i & 1.5134 - 2.3808i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4161 & 1.1297 \\ 1.1297 & 2.8211 \end{bmatrix} \angle \begin{bmatrix} -75.4869 & 49.5564 \\ 49.5564 & -57.5580 \end{bmatrix}$$

$$K_{SVC} = \begin{bmatrix} 0.1288 + 0.1966i & 0.1795 + 0.1163i \\ 0.1795 + 0.1163i & 0.1923 + 0.0308i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2350 & 0.2139 \\ 0.2139 & 0.1947 \end{bmatrix} \angle \begin{bmatrix} 56.7694 & 32.9411 \\ 32.9411 & 9.1129 \end{bmatrix}$$

e o deslocamento angular entre a admitância de transferência e o coeficiente efetivo é

$$\theta_{12} - \varphi_{SVC12} = 49{,}56 - 32{,}94 = 16{,}62^{o} \tag{4.3}$$

4º Caso - Sistema de Transmissão com Carga Nula: Fluxo de potência ativa nulo da barra 3 para a barra 4

Tabela 6 – Resultados Obtidos para o Fluxo de Potência Ativa Nulo da barra 3 para a barra 4

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	1,0000	0,000	1,0000	0,0000	2,4991	0,449
2	Barra 2	0,9787	-0,2872	1,0200	-16,3554	2,0000	0,1472
3	Barra 3	0,9333	-0,3749	1,0057	-21,8841	-2,5000	0,0000
4	Barra 4	0,9442	-0,3793	1,0175	-21,8841	-2,0000	-0,0500
5	Barra 5	0,9573	-0,3845	1,0317	-21,8841	0,0000	0,6328

$$Y_{red}^{0} = \begin{bmatrix} 0.7978 - 1.6631i & 0.8061 + 0.8354i \\ 0.8061 + 0.8354i & 1.1230 - 1.8486i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.8446 & 1.1609 \\ 1.1609 & 2.1630 \end{bmatrix} \angle \begin{bmatrix} -64.3737 & 46.0214 \\ 46.0214 & -58.7230 \end{bmatrix}$$

$$K_{SVC} = \begin{bmatrix} 0.1981 + 0.0808i & 0.2003 + 0.0661i \\ 0.2003 + 0.0661i & 0.2015 + 0.0515i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2140 & 0.2110 \\ 0.2110 & 0.2080 \end{bmatrix} \Bigg\| \begin{bmatrix} 22.1951 & 18.2698 \\ 18.2698 & 14.3445 \end{bmatrix}$$

e o deslocamento angular entre a admitância de transferência e o coeficiente efetivo é

$$\theta_{12} - \varphi_{SVC12} = 46{,}02 - 18{,}27 = 27{,}75^o \tag{4.4}$$

5º Caso - Sistema de Transmissão Menos Carregado: Fluxo de Potência Ativa –1,872 pu da barra 3 para a barra 4.

Tabela 7 – Resultados Obtidos para o Fluxo de Potência Ativa –1,872 da barra 3 para a barra 4

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	1,0000	0,000	1,0000	0,0000	2,5002	0,7674
2	Barra 2	1,0158	0,0919	1,0200	5,1713	2,0000	0,6329
3	Barra 3	0,8849	-0,3750	0,9611	-22,9681	-4,3720	0,0000
4	Barra 4	0,9938	-0,085	0,9938	--0,4902	-0,1280	-0,0500
5	Barra 5	0,9573	-0,2906	0,9794	-17,2602	0,0000	0,6328

$$Y_{red}^{0} = \begin{bmatrix} 0.9192 - 2.0333i & 0.7379 + 0.7045i \\ 0.7379 + 0.7045i & 0.6188 - 1.7222i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.2314 & 1.0202 \\ 1.0202 & 1.8300 \end{bmatrix} \Bigg\| \begin{bmatrix} -65.6727 & 43.6716 \\ 43.6716 & -70.2367 \end{bmatrix}$$

$$K_{SVC} = \begin{bmatrix} 0.1603 - 0.0036i & 0.1606 + 0.0274i \\ 0.1606 + 0.0274i & 0.1549 + 0.0584i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1603 & 0.1629 \\ 0.1629 & 0.1656 \end{bmatrix} \Bigg\| \begin{bmatrix} -1.2910 & 9.6860 \\ 9.6860 & 20.6630 \end{bmatrix}$$

$$\theta_{12} - \varphi_{SVC12} = 43{,}67 - 9{,}68 = 33.99^o \tag{4.5}$$

Para fins de comparação, os resultados são apresentados na Tabela 8.

Em que a defasagem entre rotores é dado em graus.

Tabela 8 - Análise do Fator de Efeito do SVC em Diferentes Valores de Fluxo de Potência Ativa na linha de transmissão 3 – 4. (Sistema de duas máquinas)

Fluxo de potência ativa na LT 3 - 4	Defasagem entre rotores (δ_{12})	Y_{12} (rede reduzida)	K_{SVC12}	$\theta_{12}^{0} - \varphi_{SVC12}$	$K_{SVC12}^{ef} = K_{SVC12}\cos(\theta_{12}^{0} - \varphi_{SVC12})$	$k_{SVC\ ij}^{efeito} \triangleq \frac{K_{SVC\,ij}^{ef}}{Y_{ij}^{0}}$
-1,872	0,0	$1{,}0202\angle 43{,}67$	0,1629	34,00	0,1351	0,1324
-0,5	13,02	$1{,}1394\angle 45{,}53$	0,2024	29,45	0,1762	0,1547
0,0	18,21	$1{,}1609\angle 46{,}02$	0,2110	27,75	0,1867	0,1609
1,5	38,33	$1{,}1702\angle 47{,}75$	0,2206	21,90	0,2047	0,1749
2,5	59,26	$1{,}1297\angle 49{,}56$	0,2139	16,62	0,2050	0,1814

Os valores são ainda colocados no gráfico apresentado na Figura 4.2.

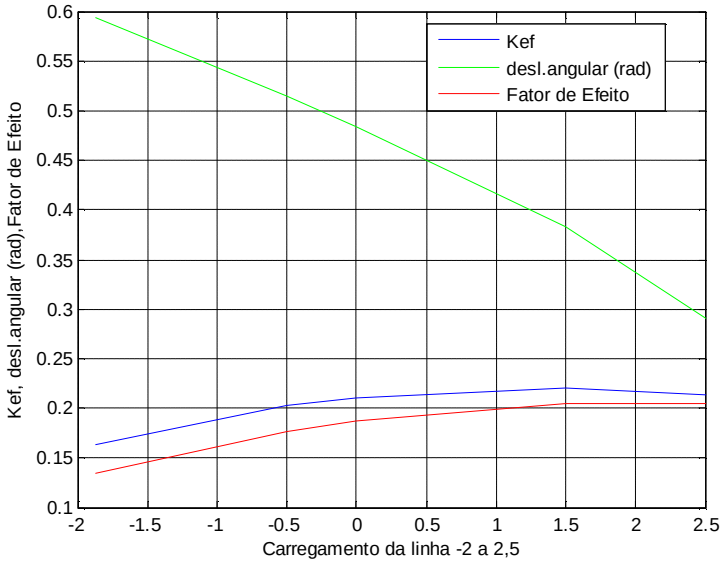


Figura 4.2 Efeito do SVC colocado na barra 5 sobre a admitância de transferência entre as máquinas 1 e 2 (Carregamento da linha -2 a 2,5)

Diferentes condições de carregamento são também consideradas quanto a fator de potência e os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Análise do Fator de efeito do SVC em Diferentes Valores dos Fatores de Potência das Cargas (Sistemas de duas máquinas).

Fator de potência		Defasagem entre rotores (δ_{12})	Y_{12} (rede reduzida)	K_{SVC12}	$\theta_{12}^{0} - \varphi_{SVC12}$	$K_{SVC12}^{ef} = K_{SVC12}\cos(\theta_{12}^{0} - \varphi_{SVC12})$	$k_{SVC\ ij}^{efeito} \triangleq \frac{K_{SVC\,ij}^{ef}}{Y_{ij}^{0}}$
Barra 3	Barra 4						
1	~1	38,33	1,1702|47,75	0,2206	21,90	0,2047	0,1749
0,8 (ind)	0,8 (ind)	63,68	0,6419|49,93	0,0945	17,31	0,0902	0,1405
0,8 (cap)	0,8 (cap)	-14,28	1,88244|40,17	0,44631	30,1896	0,3858	0,2050
0,9 (ind)	0,9 (ind)	55,72	0,8334|50,01	0,1362	18,61	0,1291	0,1549
0,9 (cap)	0,9 (cap)	4,49	1,5925|43,43	0,3463	26,71	0,3093	0,1942

O gráfico mostrado na Figura 4.3 permite uma visualização da evolução dos coeficientes com as variações do fator de potência.

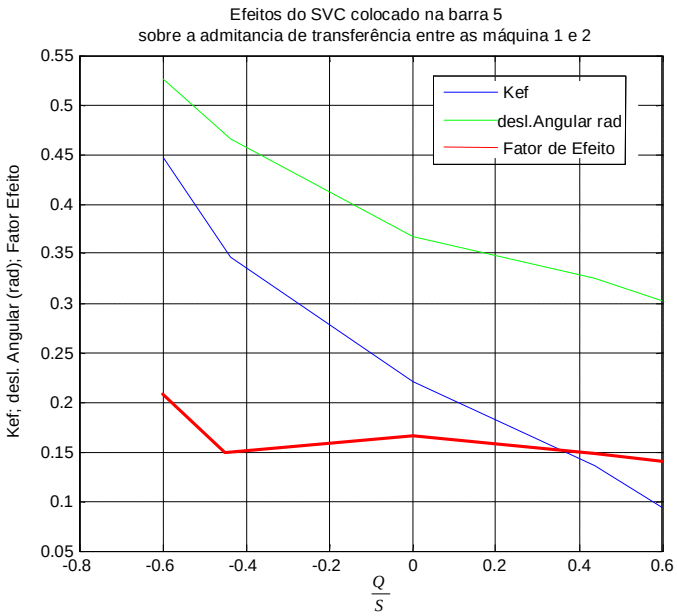


Figura 4.3 – Efeitos do SVC colocado na barra 5 sobre a admitância de transferência entre as máquinas 1 e 2, para diferentes valores de $\frac{Q}{S}$ (Q: potência reativa; S: potência aparente)

A representação do efeito do SVC sobre a admitância de transferência – comparação de resultados.

Os resultados das variações da admitância de transferência entre as máquinas obtidos via cálculo exato e com a formulação obtida são comparados em simulação com os seguintes dados.

SVC instalado na barra	5
Ganho do controle de tensão	10,0000
Constante de tempo	0,0010
Valor máximo	1,0000
Valor mínimo	-1,0000

A perturbação é um curto-circuito de duração de 0,1s na barra 3.

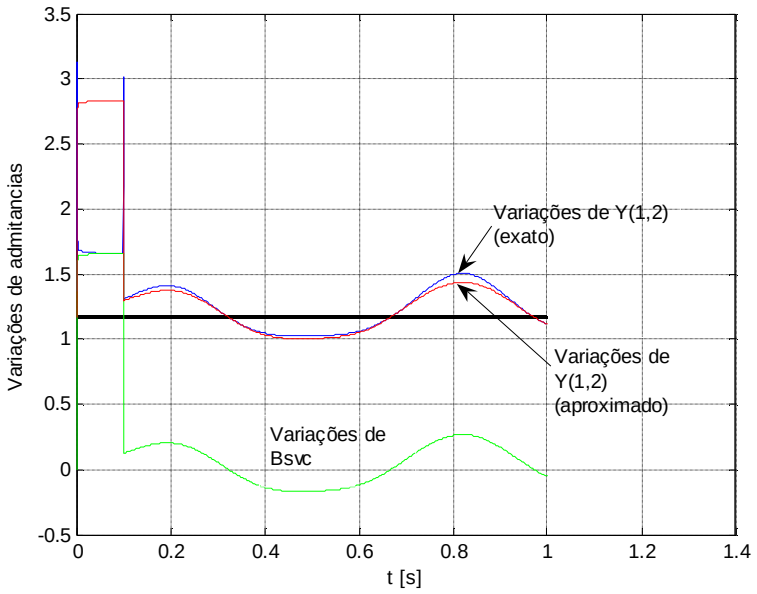


Figura 4.4 – Variação de admitâncias.

A Figura mostra uma aproximação bastante razoável entre um e outro, indicando que o modelo proposto pode se prestar a técnicas de análise e ajustes da atuação do sistema de potência com o SVC.

Os valores de K_{svc}^{ef} e K_{svc}^{efeito} apresentam variações em diferentes condições de carregamento, sendo mais acentuadas para K_{svc}^{ef} e para variações do fator de potência. Entretanto, observa-se que K_{svc}^{efeito} é menos afetado pelas variações do carregamento, inclusive no que se refere a fator de potência quando K_{svc}^{ef} apresenta variações de 327% (0,3858 /0,0902) e K_{svc}^{efeito} varia apenas 45% (0,2050/0,1405).

Conclui-se então que K_{svc}^{efeito} é um parâmetro melhor para analisar a influência do SVC na capacidade de sincronização das máquinas.

4.2 Sistema de Quatro Máquinas

O sistema exemplo considerado é encontrado em (KUNDUR, 1994) e é aqui apresentado por meio de seu diagrama unifilar e resultados de fluxo de potência do caso base.

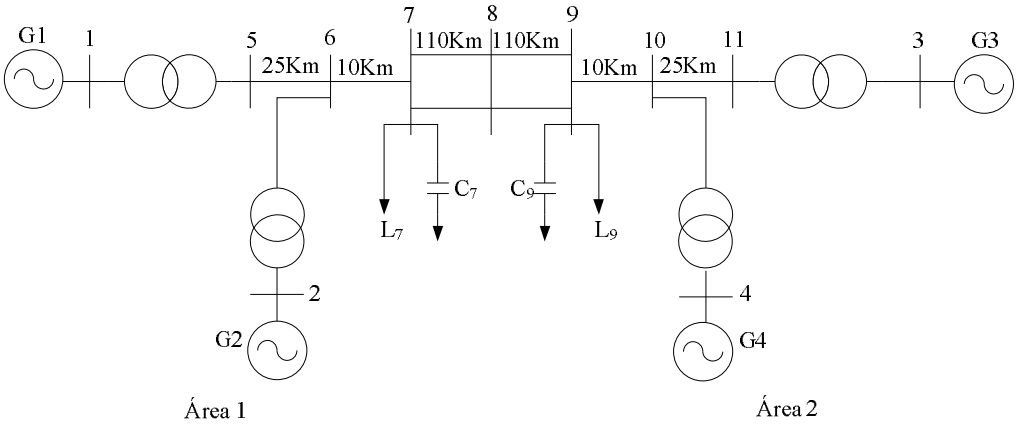


Figura 4.5 - Sistema de quatro máquinas.

1º) Caso Base – Fluxo de Potência Ativa de 2,000 da barra 7 para a barra 9

Tabela 10 – Dados de Linha do Sistema de Quatro Máquinas

No. da linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância série		Admitância paralela	
			R	X	G	B

1	1	5	0	0,1500	0	0
2	2	6	0	0,1500	0	0
3	3	11	0	0,1500	0	0
4	4	10	0	0,1500	0	0
5	5	6	0,0025	0,0250	0	0,0049
6	6	7	0,0090	0,0900	0	0,0019
7	7	8	0,0990	0,9900	0	0,0214
8	7	8	0,0990	0,9900	0	0,0214
9	8	9	0,0990	0,9900	0	0,0214
10	8	9	0,0990	0,9900	0	0,0214
11	9	10	0,0090	0,0900	0	0,0019
12	10	11	0,0025	0,0250	0	0,0049

Tabela 11 - Resultado Obtido para o Fluxo de Potência Ativa de 2,000 da barra 7 para a barra 9

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	1,0300	0,000	1,0300	0,0000	0,5247	0,1583
2	Barra 2	1,0082	0,0604	1,0100	3,4294	1,0000	0,1032
3	Barra 3	0,9708	-0,3442	1,0300	-19,5206	1,0000	0,1944
4	Barra 4	0,9204	-0,4159	1,0100	-24,3184	0,5767	0,0325
5	Barra 5	1,0069	-0,0764	1,0098	-4,3396	0,0000	0,0000
6	Barra 6	1,0018	-0,088	1,0057	-5,0630	0,0000	0,0000
7	Barra 7	0,9700	-0,2222	0,9952	-12,9044	-1,0744	0,1111
8	Barra 8	0,9037	-0,4262	0,9991	-25,2479	0,0000	0,0469
9	Barra 9	0,7990	-0,6071	1,0035	-37,2292	-1,9633	0,2778
10	Barra 10	0,8807	-0,4920	1,0088	-29,1891	0,0000	0,0000
11	Barra 11	0,8955	-0,4720	1,0122	-27,7931	0,0000	0,0000

Tabela 12 – Parâmetros das Máquinas

Maquina	Barra	XD	Xld	M	D	Tld0	Tlq0	KR	TR
1	1	1,800	0,300	0,345	0,000	8,0	0,40	25,00	0,10
2	2	1,800	0,300	0,345	0,000	8,0	0,40	25,00	0,10
3	3	1,800	0,300	0,328	0,000	8,0	0,40	25,00	0,10
4	4	1,800	0,300	0,328	0,000	8,0	0,40	25,00	0,10

Maquina	Barra	Efdmax	Efdmin	Tg	Tm	Ag	Bg	Alf	Bet
1	1	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
2	2	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
3	3	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
4	4	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 13 - Tensões Internas (atrás de Xld)

Máquina	Magnitude	Ângulo
1	1,0869	0,1411
2	1,0822	0,3379
3	1,1250	-0,0788
4	1,0339	-0,2580

Tabela 14 -Ângulos dos Eixos q

Máquina	Ângulos
1	35,0600
2	59,6087
3	32,3910
4	19,5838

As matrizes calculadas para um SVC instalado na barra 008, considerando o caso base, são.

$$Y_{red}^{0} = \begin{bmatrix} 1.2797 & 0.9051 & 0.1331 & 0.1405 \\ 0.9051 & 1.3056 & 0.1405 & 0.1483 \\ 0.1331 & 0.1405 & 1.3609 & 0.8655 \\ 0.1405 & 0.1483 & 0.8655 & 1.3982 \end{bmatrix}$$

$$\theta^{0} = \left| \underline{Y_{red}^{0}} \right. \begin{bmatrix} -81.5925 & 77.8518 & 50.3712 & 50.0696 \\ 77.8518 & -80.9230 & 50.0696 & 49.7681 \\ 50.3712 & 50.0696 & -78.0411 & 70.4055 \\ 50.0696 & 49.7681 & 70.4055 & -77.1519 \end{bmatrix}$$

$$K_{SVC} = \begin{bmatrix} 0.0543 & 0.0573 & 0.0528 & 0.0558 \\ 0.0573 & 0.0605 & 0.0558 & 0.0589 \\ 0.0528 & 0.0558 & 0.0514 & 0.0543 \\ 0.0543 & 0.0589 & 0.0543 & 0.0573 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{SVC} = \begin{bmatrix} 45.3464 & 45.0448 & 35.8744 & 35.5729 \\ 45.0448 & 44.7433 & 35.5729 & 35.2713 \\ 35.8744 & 35.5729 & 26.4024 & 26.1009 \\ 35.5729 & 35.2713 & 26.1009 & 25.7993 \end{bmatrix}$$

Consideram-se dois pares de máquinas e os respectivos coeficientes de eficácia das variações da susceptância do SVC sobre as admitâncias de transferência, um intra-área e outro inter-áreas. Os deslocamentos angulares entre a admitância de transferência e o coeficiente efetivo são

$$\theta_{12}^{0} - \varphi_{svc12} = 77{,}85 - 45{,}04 = 32{,}80^{0} \tag{4.6}$$

$$\theta_{13}^{0} - \varphi_{svc13} = 50{,}37 - 35{,}87 = 14{,}50^{0} \tag{4.7}$$

2º. Caso: Acréscimo de 30% no carregamento do sistema (em relação ao caso base).- Fluxo de Potência Ativa 2,6000da barra 7 para a barra 9

Tabela 15 - Resultado Obtido para o Fluxo de Potência Ativa 2,6000 da barra 7 para a barra 9

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	1,0300	0,000	1,0300	0,0000	0,7247	0,3625
2	Barra 2	1,0073	0,0744	1,0100	4,2225	1,3000	0,3705
3	Barra 3	0,8676	-0,5551	1,0300	-32,6081	1,3000	0,4471

4	Barra 4	0,7841	-0,6366	1,0100	-39,0719	0,7497	0,2726
5	Barra 5	0,9772	-0,1055	0,9829	-6,1641	0,0000	0,0000
6	Barra 6	0,9666	-0,1222	0,9743	-7,2075	0,0000	0,0000
7	Barra 7	0,8919	-0,2978	0,9403	-18,4649	-1,3967	0,1111
8	Barra 8	0,7203	-0,5609	0,9129	-37,9081	0,0000	0,4609
9	Barra 9	0,5159	-0,7928	0,9459	-56,9450	-2,5523	0,2778
10	Barra 10	0,6825	-0,6975	0,9759	-45,6236	0,0000	0,0000
11	Barra 11	0,7108	-0,6795	0,9833	-43,7097	0,0000	0,0000

As matrizes calculadas para um SVC instalado na barra 008 considerado o caso de carga alta - acréscimo de 30% em relação ao caso base são dadas a seguir.

$$Y_{red}^{0} = \begin{bmatrix} 1.3369 & 0.8671 & 0.1140 & 0.1203 \\ 0.8671 & 1.3704 & 0.1203 & 0.1270 \\ 0.1140 & 0.1203 & 1.4669 & 0.7849 \\ 0.1203 & 0.1270 & 0.7849 & 1.5169 \end{bmatrix}$$

$$\theta^{0} = \underline{|Y_{red}^{0}} \begin{bmatrix} -79.7573 & 73.6833 & 34.2279 & 33.9264 \\ 73.6833 & -78.9871 & 33.9264 & 33.6248 \\ 34.2279 & 33.9264 & -77.2392 & 64.8099 \\ 33.9264 & 33.6248 & 64.8099 & -76.4042 \end{bmatrix}$$

$$K_{SVC} = \begin{bmatrix} 0.0462 & 0.0488 & 0.0429 & 0.0452 \\ 0.0488 & 0.0515 & 0.0452 & 0.0478 \\ 0.0429 & 0.0452 & 0.0398 & 0.0420 \\ 0.0452 & 0.0478 & 0.0420 & 0.0443 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{SVC} = \begin{bmatrix} 29.7635 & 29.4619 & 17.1176 & 16.8161 \\ 29.4619 & 29.1603 & 16.8161 & 16.5145 \\ 17.1176 & 16.8161 & 4.4718 & 4.1702 \\ 16.8161 & 16.5145 & 4.1702 & 3.8687 \end{bmatrix}$$

Os deslocamentos angulares entre a admitância de transferência e o coeficiente efetivo dos pares intra- e inter-áreas são.

$$\theta_{12}^{0} - \varphi_{svc12} = 73{,}68 - 29{,}46 = 44{,}22^{0} \tag{4.8}$$

$$\theta_{13}^{0} - \varphi_{svc13} = 34{,}22 - 17{,}11 = 17{,}11^{0} \tag{4.9}$$

3º. Caso: Redução de 30% no Carregamento do Sistema (em relação ao caso base) – Fluxo de Potência Ativa de 1,3992 da barra 7 para a barra 9.

Tabela 16 - Resultado Obtido para o Fluxo de Potência Ativa de 1,3992 da barra 7 para a barra 9

Barra	Nome	Tensão	Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras

						Ativa	Reativa
1	Barra 1	1,0300	0,000	1,0300	0,0000	0,3522	0,0491
2	Barra 2	1,0090	0,0438	1,0100	2,4877	0,7000	-0,0484
3	Barra 3	1,0080	-0,2115	1,0300	-11,8516	0,7000	0,0442
4	Barra 4	0,9749	-0,2639	1,0100	-15,1458	0,4037	-0,1069
5	Barra 5	1,0229	-0,513	1,0241	-2,8705	0,0000	0,0000
6	Barra 6	1,0207	-0,0597	1,0225	-3,3476	0,0000	0,0000
7	Barra 7	1,0137	-0,1528	1,0251	-8,5717	-0,7521	0,1111
8	Barra 8	1,0014	-0,2949	1,0439	-16,4112	0,0000	0,0469
9	Barra 9	0,9479	-0,4203	1,0369	-23,9110	-1,3743	0,2778
10	Barra 10	0,9746	-0,3259	1,0276	-18,4900	0,0000	0,0000
11	Barra 11	0,9808	-0,3100	1,0286	-17,5385	0,0000	0,0000

Matrizes calculadas para um SVC instalado na barra 008 – Redução de 30%

$$Y_{red}^{0} = \begin{bmatrix} 1.2417 & 0.9290 & 0.1465 & 0.1546 \\ 0.9290 & 1.2622 & 0.1546 & 0.1632 \\ 0.1465 & 0.1546 & 1.2764 & 0.9208 \\ 0.1546 & 0.1632 & 0.9208 & 1.3027 \end{bmatrix} \qquad \theta^{0} = \left|\underline{Y_{red}^{0}}\right. \begin{bmatrix} -83.6644 & 81.4712 & 64.1959 & 63.8944 \\ 81.4712 & -83.1501 & 63.8944 & 63.5928 \\ 64.1959 & 63.8944 & -80.1801 & 75.9983 \\ 63.8944 & 63.5928 & 75.9983 & -79.3774 \end{bmatrix}$$

$$K_{SVC} = \begin{bmatrix} 0.0602 & 0.0636 & 0.0603 & 0.0636 \\ 0.0636 & 0.0671 & 0.0636 & 0.0672 \\ 0.0603 & 0.0636 & 0.0604 & 0.0637 \\ 0.0636 & 0.0672 & 0.0637 & 0.0673 \end{bmatrix} \qquad \varphi_{SVC} = \begin{bmatrix} 59.1149 & 58.8133 & 52.5689 & 52.2673 \\ 58.8133 & 58.5118 & 52.2673 & 51.9658 \\ 52.5689 & 52.2673 & 46.0228 & 45.7213 \\ 52.2673 & 51.9658 & 45.7213 & 45.4197 \end{bmatrix}$$

e o deslocamento angular entre a admitância de transferência e o coeficiente efetivo dos pares intra e inter-áreas são

$$\theta_{12}^{0} - \varphi_{svc12} = 81{,}47 - 58{,}81 = 22{,}65^{0} \tag{4.10}$$

$$\theta_{13}^{0} - \varphi_{svc13} = 64{,}19 - 52{,}56 = 11{,}62^{0} \tag{4.11}$$

Tabela 17 – Avaliações dos Efeitos do SVC sobre Admitâncias de Transferência intra-área e inter-áreas

	Carga leve	Caso base	Carga alta
Fluxo ativo na LT 7 - 9	1,3992	2,0004	2,6000

Y_{12}^{0}	0,9290	0,9051	0,8671
θ_{12}^{0}	81,47	77,85	73,68
K_{SVC12}	0,0636	0,0573	0,0488
$\theta_{12}^{0} - \varphi_{SVC12}$	22,66	32,80	44,22
K_{SVC12}^{ef}	0,0587	0,0482	0,0350
$k_{SVC_12}^{efeito}$	0,0632	0,0533	0,0404
Y_{13}^{0}	0,1465	0,1331	0,1140
θ_{13}^{0}	64,20	50,3712	34,23
K_{SVC13}	0,0603	0,0528	0,0429
$\theta_{13}^{0} - \varphi_{SVC13}$	11,63	14,50	17,11
K_{SVC13}^{ef}	0,0590	0,0511	0,0410
$k_{SVC_13}^{efeito}$	0,4027	0,3839	0,3596

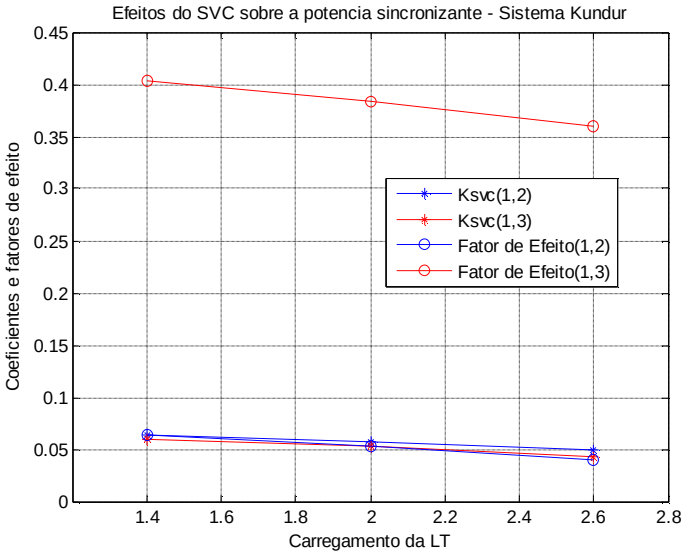


Figura 4.6 - Efeitos do SVC sobre a potência sincronizante – Sistema Kundur

4.3 Sistema de Seis Máquinas – 3 áreas

Este sistema apresenta claramente 3 áreas formadas como se descreve a seguir.

Área	Máquinas integrantes
A_1	1 e 2
A_2	3 e 4
A_3	5 e 6

O diagrama unifilar e demais dados do sistema são mostrados a seguir.

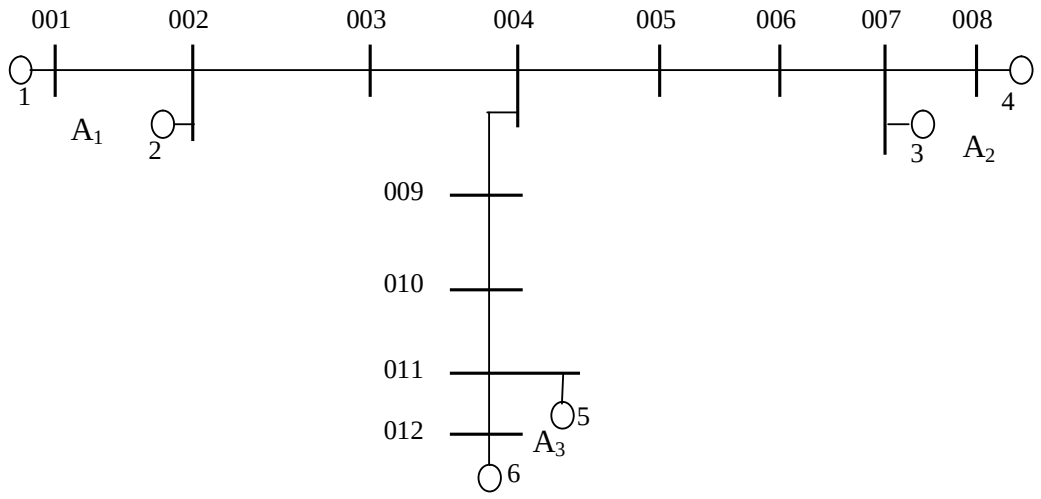


Figura 4.7 – Diagrama unifilar do sistema de 3 áreas.

Tabela 18 – Dados de Linhas (sistema de 3 áreas)

No. da linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância série		Admitância paralela	
			R	X	G	B
1	1	2	0,0100	0,1000	0,0000	0,0000
2	2	3	0,0050	0,0500	0,0000	0,0000
3	3	4	0,0100	0,1000	0,0000	0,0000
4	4	5	0,0050	0,0500	0,0000	0,0000
5	5	6	0,0400	0,4000	0,0000	0,0800
6	6	7	0,0100	0,1000	0,0000	0,0000
7	7	8	0,0100	0,1000	0,0000	0,0000
8	4	9	0,0100	0,1000	0,0000	0,0000
9	9	10	0,0400	0,4000	0,0000	0,0400
10	10	11	0,0100	0,1000	0,0000	0,0000
11	11	12	0,0100	0,1000	0,0000	0,0000

Tabela 19 – Resultados Obtidos para o Sistema de 3 áreas

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	0,7734	-0,6802	1,0300	-41,3328	0,8000	0,1556
2	Barra 2	0,7059	-0,7223	1,0100	-45,6573	1,4000	1,2185
3	Barra 3	0,5799	-0,7395	0,9398	-51,8948	-3,0000	-1,0000
4	Barra 4	0,6560	-0,6922	0,9536	-46,5366	-0,3000	-0,1000

5	Barra 5	0,6942	-0,7014	0,9869	-45,2925	0,0000	0,7000
6	Barra 6	0,8108	-0,5411	0,9748	-33,7146	-0,8000	-0,2000
7	Barra 7	0,9053	-0,4479	1,0100	-26,3222	0,8000	0,3699
8	Barra 8	0,9263	-0,4026	1,0100	-23,4916	0,5000	-0,0376
9	Barra 9	0,6868	-0,6153	0,9221	-41,8559	-0,5000	0,0000
10	Barra 10	0,9629	-0,1536	0,9751	-9,0645	-0,4000	-0,1000
11	Barra 11	1,0500	0,0000	1,0500	0,0000	1,0916	1,0332
12	Barra 12	1,0283	0,0595	1,0300	3,3119	0,6000	-0,2479

Tabela 20– Parâmetros das Máquinas (Sistema de 3 áreas)

Maquina	Barra	XD	Xld	M	D	Tld0	Tlq0	KR	TR
1	1	1,88	0,33	0,019	0,000	8,0	0,4	50,0	0,05
2	2	1,88	0,33	0,019	0,000	8,0	0,4	50,0	0,05
3	7	1,88	0,33	0,019	0,000	8,0	0,4	50,0	0,05
4	8	1,88	0,33	0,019	0,000	8,0	0,4	50,0	0,05
5	11	1,88	0,33	0,019	0,000	8,0	0,4	50,0	0,05
6	12	1,88	0,33	0,019	0,000	8,0	0,4	50,0	0,05

Maquina	Barra	Efdmax	Efdmin	Tg	Tm	Ag	Bg	Alf	Bet
1	1	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
2	2	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
3	7	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
4	8	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
5	11	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
6	12	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000

A matriz admitância reduzida as barras internas dos geradores, para a condição de equilíbrio é dada a seguir, pelas magnitudes e ângulos das admitâncias de barra:

$$\mathbf{Y}_{\mathbf{red}}^{\mathbf{0}} = \begin{bmatrix} 1.7665 & 0.7860 & 0.1334 & 0.1024 & 0.1234 & 0.0947 \\ 0.7860 & 2.1016 & 0.1739 & 0.1334 & 0.1609 & 0.1234 \\ 0.1334 & 0.1739 & 1.7263 & 1.0169 & 0.0807 & 0.0619 \\ 0.1024 & 0.1334 & 1.0169 & 1.5521 & 0.0619 & 0.0475 \\ 0.1234 & 0.1609 & 0.0807 & 0.0619 & 1.6832 & 1.0426 \\ 0.0947 & 0.1234 & 0.0619 & 0.0475 & 1.0426 & 1.5284 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} -82.2308 & 70.8285 & 52.6932 & 54.0254 & 53.7498 & 55.0821 \\ 70.8285 & -80.1687 & 51.3610 & 52.6932 & 52.4176 & 53.7498 \\ 52.6932 & 51.3610 & -84.0517 & 83.5747 & 57.8183 & 59.1505 \\ 54.0254 & 52.6932 & 83.5747 & -85.4431 & 59.1505 & 60.4827 \\ 53.7498 & 52.4176 & 57.8183 & 59.1505 & -85.4599 & 85.7059 \\ 55.0821 & 53.7498 & 59.1505 & 60.4827 & 85.7059 & -86.4218 \end{bmatrix}$$

Considera-se a seguir um SVC instalado em diferentes barras do sistema, buscando observar a influência de cada locação nas diferentes admitâncias de transferência entre máquinas.

<u>SVC instalado na barra 4</u>

Considerada a instalação de um SVC na barra 004, obtém-se os valores do coeficiente de eficácia e do fator de efeito apresentados na Tabela 21

Tabela 21 – Efeitos do SVC instalado na barra 4 nas admitâncias de transferência entre máquinas

i	j	$K^{ef}_{SVC\,ij}$	$k^{efeito}_{SVC\;ij}$
1	2	0,0275	0,0349
1	3	0,0188	0,1409
1	4	0,0144	0,1409
1	5	0,0174	0,1409
1	6	0,0133	0,1409
2	3	0,0245	0,1409
2	4	0,0188	0,1409
2	5	0,0227	0,1409
2	6	0,0174	0,1409
3	4	0,0066	0,0065
3	5	0,0114	0,1409
3	6	0,0087	0,1409
4	5	0,0087	0,1409
4	6	0,0067	0,1409
5	6	0,0057	0,0055

Ressaltam-se os valores idênticos dos fatores de efeito inter áreas, atribuídos à simetria do sistema em relação à barra 004. Destacam-se também os valores substancialmente inferiores dos fatores de efeito intra-áreas comparados com os inter-áreas, o que está de acordo com o fato de que o SVC está alocado em barra externa a qualquer das áreas e que, portanto, pouca influência deve ter sobre as dinâmicas internas das áreas.

SVC instalado na barra 5

Para este caso, os valores calculados para os coeficientes estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Efeitos do SVC instalado na barra 5 nas admitâncias de transferência entre máquinas

i	j	$K^{ef}_{SVC\,ij}$	$k^{efeito}_{SVC\;\;ij}$
1	2	0,0249	0,0317
1	3	0,0237	0,1774
1	4	0,0182	0,1774
1	5	0,0160	0,1293
1	6	0,0122	0,1293
2	3	0,0308	0,1774
2	4	0,0237	0,1774
2	5	0,0208	0,1293
2	6	0,0160	0,1293
3	4	0,0126	0,0124
3	5	0,0143	0,1774
3	6	0,0110	0,1774
4	5	0,0110	0,1774
4	6	0,0084	0,1774
5	6	0,0052	0,0049

Nota-se que, neste caso, além de os fatores de efeito intra-áreas serem substancialmente inferiores aos inter-áreas, denotando pouca influência do SVC nas dinâmicas internas das áreas, percebe-se que as dinâmicas entre as áreas A_1 e A_3 são menos afetadas pela ação do SVC do que as dinâmicas entre as áreas A_1 e A_2 e entre as áreas A_2 e A_3, o que está de acordo com o fato de que a barra de instalação do SVC não pertence ao caminho elétrico entre as áreas A_1 e A_3.

SVC instalado na barra 3

A Tabela 23 apresenta os valores calculados dos coeficientes para esta localização do SVC.

Tabela 23 – Efeitos do SVC instalado na barra 3 nas admitâncias de transferência entre máquinas

i	j	$K^{ef}_{SVC\,ij}$	$k^{efeito}_{SVC\;ij}$
1	2	0,0482	0,0614
1	3	0,0136	0,1023
1	4	0,0105	0,1023
1	5	0,0126	0,1023
1	6	0,0097	0,1023
2	3	0,0178	0,1023
2	4	0,0136	0,1023
2	5	0,0165	0,1023
2	6	0,0126	0,1023
3	4	0,0013	0,0013
3	5	0,0034	0,0420
3	6	0,0026	0,0420
4	5	0,0026	0,0420
4	6	0,0020	0,0420
5	6	0,0011	0,0010

Novamente observa-se que as dinâmicas intra-áreas são relativamente muito pouco afetadas pela ação do SVC, especialmente as das áreas A_2 e A_3, mais distantes da localização do SVC. Quanto ao efeito do SVC nas interações inter-áreas, observa-se que as dinâmicas entre as áreas A_2 e A_3 são as menos afetadas. Como antes observa-se que, neste caso, a ilustração do SVC ocorre em barra não pertencente ao caminho elétrico entre A_2 e A_3

4.4 Sistema de Cinco Máquinas

O sistema-teste é o IEEE – 14 barras, 5 máquinas, sendo que 3 delas são compensadores síncronos.

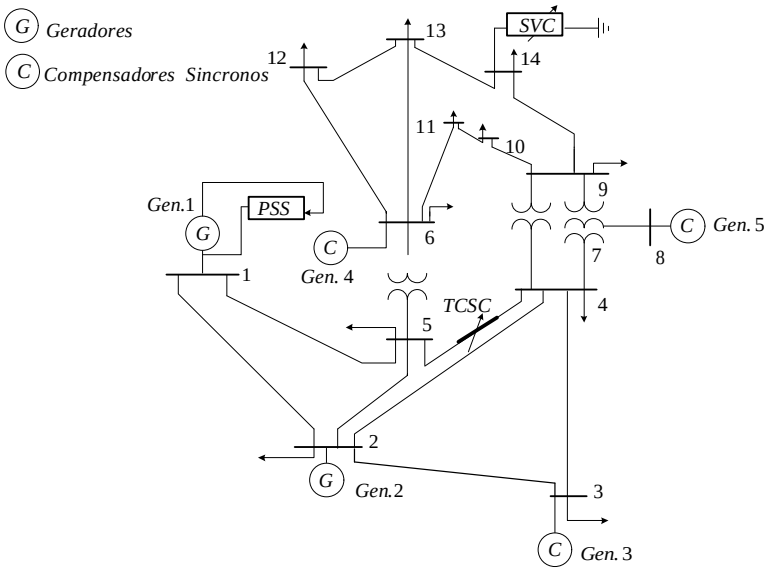


Figura 4.8 – IEEE 14 barras e 5 máquinas .

Tabela 24 – Dados de Linhas do Sistema IEEE 14 barras

No. da linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância série		Admitância paralela	
			R	X	G	B
1	1	2	0,0194	0,0592	0	0,0528
2	1	5	0,0540	0,2230	0	0,0492
3	2	3	0,0470	0,1980	0	0,0438
4	2	4	0,0581	0,1763	0	0,0374
5	2	5	0,0569	0,1739	0	0,0340
6	3	4	0,0670	0,1710	0	0,0346
7	4	5	0,0133	0,0421	0	0,0128
8	4	7	0,0000	0,2091	0	0
9	4	9	0,0000	0,5562	0	0
10	5	6	0,0000	0,2520	0	0
11	6	11	0,0950	0,1989	0	0
12	6	12	0,1229	0,2558	0	0
13	6	13	0,0662	0,1303	0	0
14	7	8	0,0000	0,1761	0	0
15	7	9	0,0000	0,1100	0	0
16	9	10	0,0318	0,0845	0	0
17	9	14	0,1271	0,2704	0	0
18	10	11	0,0821	0,1921	0	0
19	12	13	0,2209	0,1999	0	0
20	13	14	0,1709	0,3480	0	0

21	2	15	0,0000	0,1000	0	0
22	3	16	0,0000	0,1000	0	0
23	6	17	0,0000	0,1000	0	0
24	8	18	0,0000	0,1000	0	0

Tabela 25 – Resultados Obtidos para o Caso base

Barra	Nome	Tensão		Magnitude	Ang (GRA)	Potências nas Barras	
						Ativa	Reativa
1	Barra 1	0,9986	0,0521	1,0000	2,9871	2,3200	-0,0073
2	Barra 2	0,9756	-0,0424	0,9765	-2,4887	-0,2170	-0,1270
3	Barra 3	0,9363	-0,1925	0,9558	-11,6164	-0,9420	-0,1900
4	Barra 4	0,9376	-0,1419	0,9483	-8,6031	-0,4780	0,0000
5	Barra 5	0,9477	-0,1154	0,9547	-6,9412	-0,0076	-0,0160
6	Barra 6	0,9362	-0,2326	0,9646	-13,9522	-0,1120	-0,0756
7	Barra 7	0,9261	-0,2026	0,9480	-12,3408	0,0000	0,0000
8	Barra 8	0,9585	-0,2097	0,9812	-12,3408	0,0000	0,0000
9	Barra 9	0,8999	-0,2302	0,9289	-14,3469	-0,2950	-0,1660
10	Barra 10	0,8967	-0,2341	0,9268	-14,6312	-0,0900	-0,0580
11	Barra 11	0,9118	-0,2348	0,9415	-14,4421	-0,0350	-0,0180
12	Barra 12	0,9150	-0,2448	0,9472	-14,9800	-0,0610	-0,0160
13	Barra 13	0,9070	-0,2441	0,9393	-15,0650	-0,1350	-0,0580
14	Barra 14	0,8778	-0,2508	0,9130	-15,9454	-0,1490	-0,0500
15	Barra 15	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,4240	0,2439
16	Barra 16	0,9795	-0,2014	1,0000	-11,6164	0,0000	0,4416
17	Barra 17	0,9705	-0,2411	1,0000	-13,9522	0,0000	0,3536
18	Barra 18	0,9769	-0,2137	1,0000	-12,3408	0,0000	0,1881

Observação: as barras de 15 a 18 foram inseridas como as barras terminais das máquinas.

Tabela 26 – Parâmetros das Máquinas

Maq	Barra	XD	Xld	M	D	Tld0	Tlq0	KR	TR
1	1	0,8979	0,2995	0,273	0,000	7,40	0,20	50,00	0,50
2	15	0,9500	0,850	0,347	0,000	6,10	0,30	20,00	0,50
3	16	0,9500	0,850	0,347	0,000	6,10	0,30	20,00	0,50
4	17	1,150	0,1320	0,0268	0,000	4,75	1,5	20,00	0,50
5	18	1,150	0,1320	0,0268	0,000	4,75	1,5	20,00	0,50

Maq	Barra	Efdmax	Efdmin	Tg	Tm	Ag	Bg	Alf	Bet
1	1	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
2	15	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
3	16	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
4	17	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000
5	18	5,00	-5,00	1,00	1,00	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 27 – Tensões Internas (atrás de Xld):

Máquina	Magnitude	Ângulo
1	1.2159	0.6604
2	1.0214	0.0353
3	1.0375	-0.2027
4	1.0467	-0.2435
5	1.0248	-0.2154

Tabela 28 – Ângulos dos Eixos q

Máquina	Ângulos
1	67.4905
2	18.1104
3	-11.6164
4	-13.9522
5	-12.3408

A matriz de admitância reduzida as barras internas das máquinas para este caso é

$$\mathbf{Y}_{\mathbf{red}}^{\mathbf{0}} = \begin{bmatrix} 2.3491\angle -86.59^{o} & 1.0337\angle 85.64^{o} & 0.5966\angle 87.33^{o} & 0.3762\angle 82.14^{o} & 0.2526\angle 81.56^{o} \\ 1.0337\angle 85.64^{o} & 3.3696\angle -85.55^{o} & 1.1091\angle 85.05^{o} & 0.6163\angle 82.01^{o} & 0.4287\angle 80.78^{o} \\ 0.5966\angle 87.33^{o} & 1.1091\angle 85.05^{o} & 2.9127\angle -79.83^{o} & 0.5044\angle 82.25^{o} & 0.3846\angle 80.04^{o} \\ 0.3762\angle 82.14^{o} & 0.6163\angle 82.01^{o} & 0.5044\angle 82.25^{o} & 2.1392\angle -82.18^{o} & 0.4758\angle 82.91^{o} \\ 0.2526\angle 81.56^{o} & 0.4287\angle 80.78^{o} & 0.3846\angle 80.04^{o} & 0.4758\angle 82.91^{o} & 1.6524\angle -86.29^{o} \end{bmatrix}$$

O efeito do SVC instalado na barra 14 sobre as admitâncias de transferência entre as máquinas em

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_{\mathbf{red}}^{\mathbf{0}} + \mathbf{K}_{\mathbf{SVC}} \Delta B_{SVC} \tag{4.12}$$

é determinado pela matriz

$$\mathbf{K}_{\mathbf{SVC}} = \begin{bmatrix} 0.1099\underline{|22.06^{o}} & 0.1837\underline{|21.45^{o}} & 0.1587\underline{|20.83^{o}} & 0.3938\underline{|25.75^{o}} & 0.2248\underline{|19.81^{o}} \\ 0.1837\underline{|21.45^{o}} & 0.3071\underline{|20.84^{o}} & 0.2652\underline{|20.22^{o}} & 0.6582\underline{|25.14^{o}} & 0.3757\underline{|19.20^{o}} \\ 0.1587\underline{|20.83^{o}} & 0.2652\underline{|20.22^{o}} & 0.2291\underline{|19.60^{o}} & 0.5685\underline{|24.52^{o}} & 0.3245\underline{|18.57^{o}} \\ 0.3938\underline{|25.75^{o}} & 0.6582\underline{|25.14^{o}} & 0.5685\underline{|24.52^{o}} & 1.4108\underline{|29.44^{o}} & 0.8053\underline{|23.50^{o}} \\ 0.2248\underline{|19.81^{o}} & 0.3757\underline{|19.20^{o}} & 0.3245\underline{|18.57^{o}} & 0.8053\underline{|23.50^{o}} & 0.4597\underline{|17.55^{o}} \end{bmatrix}$$

Os valores dos correspondentes coeficientes de eficácia e do fator de efeito estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Efeitos do SVC nas Admitâncias de Transferência

i	j	$K_{SVC\,ij}^{ef}$	$k_{SVC\;\;ij}^{efeito}$
1	2	0.08	0.0774
1	3	0.0633	0.1061
1	4	0.2180	0.5795
1	5	0.1064	0.4212
2	3	0.1128	0.1017
2	4	0.3597	0.5836
2	5	0.1788	0.4171
3	4	0.3035	0.6017
3	5	0.1550	0.4030
4	5	0.4098	0.8613

Este sistema não apresenta, como nos casos anteriores, uma clara definição de áreas, mas a pequena dimensão do mesmo permite observar (empiricamente) que o fator de efeito faz uma discriminação adequada entre os pares de máquinas mais e menos afetados pela ação do SVC, por meio dos relativamente maior e menor valores respectivamente. O fator de efeito indica que o par 1 - 2 é o menos afetado enquanto que o par 4 e 5 é o que é mais fortemente afetado pelas variações da susceptância do SVC. Em uma observação atenta do sistema pode-se notar que as

máquinas 1 e 2 têm uma conexão direta eletricamente forte (comparada com as outras) sendo o SVC alocado em um caminho em paralelo consideravelmente distante. Situação diferente têm as máquinas 4 e 5, com o SVC instalado no caminho elétrico entre elas em localização relativamente próxima.

CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se um estudo das interações entre máquinas de um Sistema de Energia Elétrica quando afetadas pela atuação de um SVC instalado em uma barra do sistema de transmissão.

Definiram-se vários coeficientes que avaliam a influência da atuação do SVC sobre o desempenho do sistema, seja pela ação sobre a corrente terminal de cada gerador, seja pela variação imposta às admitâncias de transferência entre máquinas. Dentre esses, foi identificado o Fator de Efeito como um indicativo da importância das variações da susceptância do SVC sobre as admitâncias de transferência entre máquinas e se mostrou que este Fator apresenta um bom desempenho quanto à discriminação entre pares de máquinas relativamente muito e pouco afetados pela ação do dispositivo, bem como tem pouca sensibilidade a diversidades de condições operativas do sistema.

Uma vez que significa influência direta sobre a potência sincronizante entre estas máquinas, este Fator que pode ser denominado índice de efeito da atuação do SVC sobre a capacidade de sincronização das máquinas do sistema.

Dada a sua caracterização e sua relativa robustez em face de diferentes condições de operação do sistema, o Fator de Efeito pode ser útil para:

- técnicas de análise da atuação do sistema de potência sob ação do SVC.
- realização de ajustes da atuação do sistema de potência com o SVC, uma vez que expressa a importância relativa da atuação do SVC sobre a admitância de transferência entre duas máquinas do sistema.
- avaliar quais pares de máquinas são mais e quais são menos afetadas pela atuação do SVC localizado em determinada barra do sistema e, como decorrência, considerando diversas alternativas, pode-se escolher a melhor localização para o

SVC em uma rede visando a eliminação/mitigação de problemas de estabilidade entre máquinas e/ou áreas.

Analisaram-se apenas sistemas exemplos de pequeno porte, mas consideram-se os resultados promissores, ensejando a expectativa de bom desempenho do Fator de Efeito em sistemas de grande porte.

Como sugestões para futuros trabalhos, apontam-se as possibilidades imediatas:

1. o estudo da utilização do Fator de Efeito, bem como possivelmente outros coeficientes definidos neste trabalho, para análises de desempenho do Sistema de Energia Elétrica sob atuação do SVC.
2. emprego do Fator de Efeito para ajuste de parâmetros de um SVC com vistas ao desempenho dinâmico/transitório do sistema.
3. estudos análogos para a consideração de outros dispositivos FACTS.

Referências

ANDERSON, P.M.; FOUAD, A. A. **Power system control and stability.** Iowa: The Iowa State University Press, 1977 p. 27.

COLVARA, L. D.; ARAÚJO, S. C. B.; FESTRAITS, E. B. Stability analysis of Power system including FACTS (TCSC) effects by direct method approach. **International Journal Of Electrical Power And Energy System,** Oxford, v.27, n.4, p. 264-274, maio 2005.

COLVARA, L. D. Stability analysis of power systems described with detailed models by automatic method. **International Journal Of Electrical Power And Energy System,** Oxford,v. 31, n.4, p. 139-145, jan. 2009.

ELGERD, O. I. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica.** São Paulo: Mackon Books, 1976. p. 521 – 522.

GABRIJEL, U.; MIHALIC, R. Direct methods for transient stability assessment in power system comprising controllable series devices. **IEEE Transactions On Power Systems**, E. U. A., v.7, n.4, p.1116-1122, 04 nov. 2002.

HINGORANI, N. G. Flexible AC Transmission. **IEEE Transactions On Power Systems** E.U.A, v.30, n.4, p.40-45, 04 abr. 1993.

KUNDUR, P. **Power system stability and control.** Ontario: Mcgraw-hill, 1994. p. 202.

LERCH, E.; POVH, D.; XU, L. Advanced SVC control for Damping Power System Oscillations. **IEEE Transactions On Power Systems**, E.U.A, v.6, n.2, p.524-531, maio 1991.

MACHADO, R. L. **Aplicação de dispositivos FACTS no sistema de trasmissão da Eletrosul.** 2003. f. 152 Dissertação (Mestre) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

PAI, M. A. **Power system stability analysis by direct of lyapunov.** Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1981. p. 78.

SILVA, F. H. J. R.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G.. Smooth Perturbation on the Classical Energy Function for Lossy Power System Stability Analysis Power Engineering Society General Meeting. **IEEE Transactions On Power Systems**, E.U.A, v.3, n.3, p.1732-1736, jul. 2003.

SONG, Y. H; JOHNS, A. T. **Flexible AC transmission system (FACTS).** London: IEE Uk, 1999. p. 20 – 22.

WANG, Y.; TAN, Y. L.; GUO, G. Robust Nonlinear Coordinated Generator Excitation and SVC Control for Power Systems, **International Journal of Electrical Power And Energy System,** Oxford, v.22, n.3, p. 187-195 março 2000.

APÊNDICE A

Redução do Sistema

$$\begin{bmatrix} I_g \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gr} \\ Y_{rg} & Y_{rr} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_g \\ V_r \end{bmatrix}$$

Sendo as cargas representadas por admitâncias constantes, estas admitâncias são incorporadas à rede, de modo que a injeção de corrente nestas barras é nula. Então as equações podem ser reescritas como (ANDERSON; FOUAD. 1977).

Redução às barras internas

$$I_g = Y_{gg} V_g + Y_{gr} V_r$$

$$0 = Y_{rg} V_g + Y_{rr} V_r \Rightarrow -Y_{rr} V_r = Y_{rg} V_g$$

$$Y_{rr} V_r = -Y_{rg} V_g$$

$$V_r = -Y_{rr}^{-1} . Y_{rg} . V_g$$

Substituindo V_r na equação de I_g tem-se:

$$I_g = Y_{gg} V_g + Y_{gr} (-Y_{rr}^{-1} . Y_{rg} V_g)$$

$$I_g = Y_{gg} V_g - (Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg} V_g)$$

$$I_g = (Y_{gg} - Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg}) V_g \Rightarrow I_g = Y_{red} V_g$$

$$Y_{red} = Y_{gg} - Y_{gr} Y_{rr}^{-1} Y_{rg}$$

APÊNDICE B

Trabalho Produzido Durante o Curso.

MARQUES, M. M.; COLVARA, D. L. **Estabilidade do Sistema de Energia Elétrica com FACTS**. XII Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional 2008.