

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

**EFEITOS DA COMPENSAÇÃO SÉRIE NA  
CAPACIDADE DE SINCRONIZAÇÃO EM SISTEMA  
MULTIMÁQUINAS**

JADIEL CAPARRÓS DA SILVA

ORIENTADOR : LAURENCE DUARTE COLVARA

Ilha Solteira – SP, Novembro de 2010

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**EFEITOS DA COMPENSAÇÃO SÉRIE NA  
CAPACIDADE DE SINCRONIZAÇÃO EM  
SISTEMA MULTIMÁQUINAS**

**JADIELCAPARRÓS DA SILVA**

**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  
**2010**

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

- S586e Silva, Jadiel Caparrós da.  
Efeitos da compensação série na capacidade de sincronização em sistemas multimáquinas / Jadiel Caparrós da Silva. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010  
80 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2010
- Orientador: Laurence Duarte Colvara  
Inclui bibliografia
1. Sistemas de energia elétrica – Estabilidade. 2. Sincronização.  
3. Capacidade de sincronização. 4. FACTS. 5. TCSC. 6. Fator de efeito.

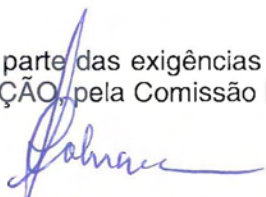
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** EFEITOS DA COMPENSAÇÃO SÉRIE NA CAPACIDADE DE SINCRONIZAÇÃO EM SISTEMA MULTIMÁQUINAS

**AUTOR:** JADIEL CAPARROS DA SILVA

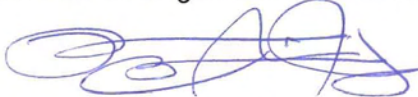
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,  
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



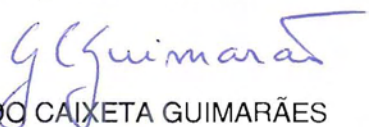
Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. GERALDO CAIXETA GUIMARÃES

Faculdade de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Uberlândia

Data da realização: 29 de novembro de 2010.

## DEDICATÓRIA

---

*Dedico este trabalho a todo o amor e incentivo dos meus pais,  
Benedito Neves da Silva e Cleonice Caparrós da Silva,  
pelo exemplo de vida, amor e apoio em todos os momentos.*

## **Agradecimentos**

---

Agradeço primeiramente a Deus, que nos momentos difíceis me deu forças para superar os obstáculos e continuar a caminhar.

Aos meus pais os quais eu amo de uma forma incomparável, pelos seus esforços e empenhos em me proporcionar mais essa conquista profissional.

Ao Professor Dr. Laurence Duarte Colvara quero expressar a minha profunda gratidão por me orientar com paciência e sabedoria, me conduzindo durante esse trabalho confiando e acreditar em mim desde o primeiro momento até a conclusão deste trabalho.

Professor Ms. Nilton Vieira Junior, quero agradecer de uma forma especial e expressar a minha imensa gratidão pela amizade, companheirismo, incentivo em inúmeras vezes e por ter acreditado em mim.

Aos meus grandes amigos Stefani, Flavilene, Andréia, Cibele, Meire, Talita, Alessandra, Ana Cláudia, Elisabete, Luzinete, Naryane, Aline, João Derroco, Ricardo, Marcelo, José Carlos, Ivan, Eduardo, pelo companheirismo e muitos 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 Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro ao desenvolvimento deste projeto.

Ciclos se encerram, amizades se perpetuam.

Muito obrigado a todos.

*Sigo firmado na rocha que é Cristo, em quem estão escondidos todos os tesouros da sabedoria e da ciência.*

*Colossenses 2:2 e 3*

## RESUMO

---

Os efeitos de compensação série em uma linha de transmissão sobre a potência sincronizante entre máquinas de um sistema de energia elétrica são considerados mediante análises da matriz admitância de barra, focando as admitâncias de transferência entre máquinas.

Com este propósito, faz-se a redução da matriz que descreve a rede às barras internas das máquinas, preservando, no entanto, os efeitos da ação do compensador na capacidade de sincronização entre máquinas do sistema, definindo o Coeficiente de Eficácia e o Fator de Efeito da compensação sobre a admitância de transferência.

Alguns estudos de casos foram efetuados com a finalidade de observar o comportamento do Fator de Efeito, visando, além de validar sua utilização para descrever o desempenho do sistema de potência com atuação de um TCSC, considerar sua habilidade em discriminar ligações entre máquinas que são mais severamente afetadas pela compensação série de outras que são pouco ou nada afetadas. Embora os testes tenham sido aplicados a sistemas exemplo de pequeno porte, os resultados obtidos são promissores.

*Palavras-Chave*—Sistemas de Energia Elétrica, Estabilidade, Capacidade de sincronização, FACTS, TCSC, Fator de Efeito.



## ABSTRACT

---

Keywords: Electrical Power System, stability, Synchronization capability, FACTS, TCSC, Effect Factor.

The main concern lies in the TCSC action installed in a multimachine power system. The device effects upon the synchronizing power are taken into account by means of bus admittance matrix, focusing the intermachine transfer admittances.

Since the purpose is to analyze the transfer admittances between machines, the bus admittance matrix is reduced to the machines internal busses preserving the compensator action effects by means of coefficients defined in order to evaluate the effectiveness and effect of the device action upon the intermachines synchronizing capacity.

Some cases were evaluated in order to observe the effectiveness coefficient and effect factor as a power system performance descriptor with a TCSC action. The ability of the effect factor in pointing out intermachines connections that are more or less affected by the compensator is investigated. Although tests were applied to small sample systems, the obtained results are considered very promising.

## Lista de Figuras

---

### Capítulo 2

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Diagrama Fasorial de Máquina Síncrona para modelo de dois eixos..... | 22 |
| Figura 2.2 – Sistema MBI.....                                                     | 25 |
| Figura 2.3 – Curva $P \times \delta$ .....                                        | 25 |
| Figura 2.4 – Sistema Multimáquinas.....                                           | 27 |
| Figura 2.5 – Sistema Multimáquinas com Barras Internas e Cargas.....              | 27 |

### Capítulo 3

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1 – Sistema de Energia Elétrica, destacando-se a linha $k - \ell$ com o TCSC.                                                                                 | 32 |
| Figura 3.2 – Sistema de Energia Elétrica, incluídas as barras internas dos geradores, destacando-se a linha $k - \ell$ e cargas representadas na forma admitância..... | 33 |
| Figura 3.3 – Sistema reduzido às barras internas dos geradores e terminais da linha compensada.....                                                                    | 34 |
| Figura 3.4 – Estrutura da matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores e terminais da Linha de Transmissão compensada.....                              | 34 |
| Figura 3.5 – Comparação dos valores obtidos para $fat_{CSC}$ .....                                                                                                     | 40 |
| Figura 3.6 – Variação da admitância de transferência entre as máquinas $i$ e $j$ devidas à variação da reatância do TCSC.....                                          | 42 |
| Figura 3.7 – Representação fasorial da admitância de transferência.....                                                                                                | 44 |

### Capítulo 4

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas de duas Áreas.....                                      | 47 |
| Figura 4.2 – Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas de duas Áreas (Dispositivo Instalado na Linha 8-9)..... | 50 |
| Figura 4.3 – Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas de duas Áreas (Dispositivo Instalado na Linha 5-6)..... | 52 |
| Figura 4.4 – Diagrama unifilar do sistema de 3 áreas e seis máquinas.....                                       | 54 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.5 – Diagrama unifilar do sistema de 3 áreas e seis máquinas<br>(Dispositivo Instalado na Linha 5-6).....   | 57 |
| Figura 4.6 – Diagrama unifilar do sistema de 3 áreas e seis máquinas<br>(Dispositivo Instalado na Linha 10-11)..... | 60 |
| Figura 4.7 – Diagrama unifilar do sistema de 3 áreas e seis máquinas<br>(Dispositivo Instalado na Linha 6-7).....   | 62 |
| Figura 4.8 – IEEE 14 barras e 5 máquinas.....                                                                       | 64 |
| Figura 4.9 – IEEE 14 barras e 5 máquinas (Dispositivo Instalado na Linha 4-5).....                                  | 67 |
| Figura 4.10 – IEEE 14 barras e 5 máquinas (Dispositivo Instalado na Linha 1-5).....                                 | 69 |

## **Anexo A**

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Sistema de duas máquinas (Diagrama unifilar)..... | 76 |
| Figura 2 – Sistema de duas máquinas.....                     | 77 |

## **Lista de Tabelas**

---

### **Capítulo 4**

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Tabela 1 – Dados de Linha do Sistema de Quatro Máquinas.....                  | <b>48</b> |
| Tabela 2 – Valores de Tensões e Potências da barras.....                      | <b>48</b> |
| Tabela 3 – Parâmetros das Máquinas.....                                       | <b>49</b> |
| Tabela 4 – Dados de Linhas do Sistema de Seis Máquinas.....                   | <b>54</b> |
| Tabela 5 – Resultados da Tensão e Potência da barra.....                      | <b>55</b> |
| Tabela 6 – Parâmetros das Máquinas.....                                       | <b>55</b> |
| Tabela 7 – Parâmetros das Áreas.....                                          | <b>55</b> |
| Tabela 8 – Dados de Linha do Sistema IEEE de Cindo Máquinas e Quatorze Barras | <b>64</b> |
| Tabela 9 – Resultados da Tensão e Potência da barra.....                      | <b>65</b> |
| Tabela 10 – Parâmetros das Máquinas.....                                      | <b>66</b> |

# Sumário

---

|                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 1.....</b>                                                                                        | <b>13</b> |
| 1.1 Sistemas de Energia Elétrica e a Questão do Sincronismo.....                                              | 13        |
| 1.2 Dispositivos FACTS e sua Influência no Desempenho dos<br>Sistemas de Energia Elétrica.....                | 15        |
| <b>Capítulo 2 .....</b>                                                                                       | <b>18</b> |
| 2.1 Introdução.....                                                                                           | 18        |
| 2.2 Rede Elétrica.....                                                                                        | 18        |
| 2.3 Cargas.....                                                                                               | 18        |
| 2.4 Máquina Síncrona.....                                                                                     | 20        |
| 2.4.1 Circuitos Equivalentes e Diagrama Fasorial.....                                                         | 20        |
| 2.4.2 A Equação de Oscilação.....                                                                             | 23        |
| 2.5 Sistema Máquina Versus Barra Infinita (MBI).....                                                          | 24        |
| 2.6 Sistema Multimáquinas.....                                                                                | 26        |
| <b>Capítulo 3.....</b>                                                                                        | <b>31</b> |
| 3.1 Introdução.....                                                                                           | 31        |
| 3.2 Compensação Série em uma Linha.....                                                                       | 31        |
| 3.3 A Redução da Matriz Admitância.....                                                                       | 35        |
| 3.4 Coeficientes de Eficácia do da Compensação Série.....                                                     | 41        |
| 3.5 Fator de Efeito.....                                                                                      | 43        |
| 3.6 Potência Ativa Transmitida e o Coeficiente de Potência<br>Sincronizante entre as Máquinas $i$ e $j$ ..... | 43        |
| 3.7 Efeito do TCSC Sobre as Interações Entre Máquinas.....                                                    | 45        |
| <b>Capítulo 4.....</b>                                                                                        | <b>47</b> |
| 4.1 Introdução.....                                                                                           | 47        |
| 4.2 Sistema de Quatro Máquinas .....                                                                          | 47        |

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.1 Caso Base.....                              | 48        |
| 4.2.2 O Dispositivo Instalado na Linha 8-9.....   | 49        |
| 4.2.3 O Dispositivo Instalado na Linha 5-6.....   | 51        |
| 4.3 - Sistema de Seis Máquinas.....               | 53        |
| 4.3.1 Caso Base.....                              | 53        |
| 4.3.2 O Dispositivo Instalado na Linha 2-3.....   | 56        |
| 4.3.3 O Dispositivo Instalado na Linha 10-11..... | 59        |
| 4.3.4 O Dispositivo Instalado na Linha 6-7.....   | 62        |
| 4.4 - Sistema de Cinco Máquinas.....              | 64        |
| 4.4.1 Caso Base.....                              | 65        |
| 4.4.2 O Dispositivo Instalado na Linha 4-5.....   | 67        |
| 4.4.3 O Dispositivo Instalado na Linha 1-5.....   | 69        |
| 4.5 - Considerações                               |           |
| .....                                             | 71        |
| <b>Capítulo 5.....</b>                            | <b>72</b> |
| 5.1 - Conclusão.....                              | 73        |
| 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....         | 74        |
| Referências Bibliográficas.....                   | 74        |
| Trabalhos Publicados.....                         | 76        |
| Anexo A.....                                      | 77        |

## INTRODUÇÃO

### 1.1 SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA E A QUESTÃO DO SINCRONISMO.

Grande importância tem os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) na sociedade, bem como a decorrente necessidade de sua operação adequada. A qualidade e confiabilidade são atributos essenciais no fornecimento da energia, sendo a manutenção dos valores especificados da tensão em magnitude e frequência as principais características da qualidade, e a confiabilidade é traduzida na minimização das interrupções do fornecimento. Os SEEs têm sido levados a dimensões enormes por causa da crescente demanda por energia em todos os segmentos (domiciliar, comercial e industrial), aumentando a complexidade de tratamento em todos os níveis de planejamento e operação além de elevar o nível da exigência de confiabilidade e qualidade.

*Para a regulação de tensão e a regulação de velocidade (frequência), técnicas e tecnologias eficazes aplicadas ao controle automático das máquinas síncronas (os geradores) tem sido estudadas. No entanto, alguns equipamentos modificam o desempenho dinâmico do SEE, beneficamente ou não, tendo como exemplo o Regulador Automático de Tensão (RAT), que algumas vezes introduz amortecimento negativo nas oscilações eletromecânicas, podendo levar a resultado desastroso.*

Com vistas ao sincronismo do sistema, consideram-se estudos de estabilidade de primeira oscilação e de múltiplas oscilações. A estabilidade da primeira oscilação é considerada quando é feito um estudo em um curto período de tempo com objetivo de identificar se, após uma perturbação, o ângulo de defasagem entre as máquinas (sendo uma delas uma barra infinita ou não) do sistema passa por um extremo com tendência posterior de estabilidade ou se apresenta tendência de afastamento irreversível do valor de equilíbrio. Neste caso, o intervalo de tempo considerado é o de uma fração de segundo, sendo as máquinas descritas pelo chamado modelo clássico em que apenas a dinâmica mecânica é

levada em conta. De outro modo, tem-se a chamada estabilidade de múltiplas oscilações cujo objetivo é estudar as oscilações de longo termo, considerando a dinâmica do sistema sob a atuação de diversos dispositivos de controle e compensação para períodos que podem ser superiores a 10 (dez) segundos.

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são basicamente constituídos por geradores, linhas de transmissão e cargas, e são construídos com o objetivo de atender a demanda de potência de determinada região atendendo as restrições de confiabilidade e qualidade. O principal objetivo de um projeto do Sistema Elétrico deve ser a viabilização da operação satisfatória do sistema em regime permanente e ser flexível à presença de perturbações ou faltas de modo a garantir a continuidade da prestação do serviço atendendo ainda perspectivas de expansão do consumo de energia

A expansão dos Sistemas Elétricos existentes ou construção de novas redes tem exigido altos investimentos devido à necessidade de maior confiabilidade em virtude do aumento da demanda de energia, assim resultando em interligações cada vez maiores entre os diversos sistemas de geração existentes.

No âmbito mundial, o Sistema Interligado Nacional (SIN) possui tamanho e características incomparáveis (ONS, 2006), sendo que no Brasil, há também pequenos sistemas isolados que atingem uma porcentagem mínima da capacidade de produção de eletricidade fora do SIN. O Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN (SINDAT) registra atualmente 560 usinas e subestações e 1079 linhas de transmissão que constituem a rede de atuação do Operador Nacional do Sistema, mostrando a tamanha complexidade.

Porém quanto maior a dimensão do sistema mais complexa se torna a sua operação no que diz respeito à ação que conecta unidades geradoras, cargas e linhas, assim gerando também alguns inconvenientes, os quais podem ser o aumento do risco de *blackout*, a incidência de correntes de curto-circuito mais elevadas, entre outros, necessitando de um estudo detalhado dos esquemas de proteção e análises rápidas das condições de estabilidade que descrevem o comportamento de todo um sistema a partir de perturbações externas indesejáveis.

A caracterização da estabilidade das máquinas síncronas pertencentes a um sistema é um dos principais aspectos nos estudos de SEP (STEVENSON, 1986). Quando ocorre um leve afastamento de uma máquina síncrona da velocidade síncrona, as forças de sincronismo, ou restaurativas, fazem com que ela tenda a retornar à velocidade síncrona. Porém, em alguns casos, as forças sincronizantes intrínsecas do sistema não são suficientes para manter o sincronismo de uma ou mais máquinas, e nessas condições de funcionamento, é importante



conhecer quais são os impactos da perturbação no sistema para estudar as formas de evitar ou pelo menos mitigar consequências danosas.

Um sistema de potência é estável do ponto de vista da estabilidade transitória para uma condição de operação particular e para uma dada grande perturbação se, após a ocorrência da perturbação, o sistema é capaz de alcançar uma condição de operação aceitável (ponto de equilíbrio estável) (IEEE Task Force on Terms & Definitions, 1982).

## **1.2 DISPOSITIVOS FACTS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.**

A constante elevação do consumo de energia elétrica sem um correspondente crescimento do sistema de transmissão levou a um crescimento do “stress” dos sistemas elétricos, o que tem sido minorado pelo aparecimento de tecnologias inovadoras para o controle eficiente dos SEE. Entre essas diversas tecnologias encontram-se os dispositivos genericamente designados por FACTS (HINGORANI ; GYUGYI, 1999; SONG ; JOHNS, 1999; WATANABE; BARBOSA; ALMEIDA ; TARANTO, 1998) que proporcionam grandes melhorias nos sistemas de transmissão, na utilização dos recursos, flexibilidade e desempenho dos sistemas.

*Os FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) são dispositivos instalados no sistema de transmissão, proporcionando modificação controlada nas características naturais de operação do sistema e, com leis de controle adequadas, melhorando o seu desempenho. Os controladores FACTS atuam principalmente no controle do fluxo de potência e no aumento da capacidade de transmissão de potência das linhas de transmissão, contribuindo na prevenção de “blackouts”. Os controladores FACTS atuam também na melhoria da produtividade através de uma distribuição adequada de carga entre os geradores, na redução do fluxo de potência reativa pelo sistema e de loopings de fluxo, no auxílio à manutenção da estabilidade através do amortecimento de oscilações transitórias e/ou subtransitórias.*

Os controladores FACTS operam com até algumas centenas de MVAs e são divididos em três grupos: chaveados, controlados e avançados.

Os estudos do desempenho dos Sistemas de Energia Elétrica sob atuação de dispositivos FACTS têm avançado consideravelmente nos últimos anos encontrando-se na literatura

especializada um número considerável de trabalhos (SONG ; JOHNS, 1999; HINGORANI ; GYUGYI, 1999) Destaca-se a análise feita por (SONG ; JOHNS, 1999) em que mostra com clareza e objetividade, por meio do método das áreas, o benefício trazido à margem de segurança para estabilidade transitória, de cada um dos compensadores TCSC, SVC e TCPS, para sistema máquina contra barra infinita ou para um sistema de duas máquinas. Outros resultados analíticos ainda podem ser encontrados, como o de (FESTRAITS, 2002), que mostra como os dispositivos FACTS contribuem para a estabilização do sistema via método de Lyapunov, sendo que este estudo se aplica ao sistema Máquina versus Barra infinita (MBI).

Não se encontra na literatura estudo semelhante dedicado ao caso da sincronização em sistema multimáquinas, e o foco deste trabalho é abordar o problema de estabilidade de SEP, do ponto de vista da capacidade de sincronização e de como os dispositivos FACTS afetam a essa capacidade quando inserido em um ambiente multimáquinas. A estabilidade do sistema é fortemente dependente da capacidade de sincronização entre máquinas, que depende diretamente da admitância de transferência entre máquinas, a qual está associada à capacidade de transmissão da rede. Notando-se então que a instalação de um dispositivo FACTS de compensação série afeta a capacidade de transmissão da linha onde está instalado, naturalmente a capacidade de sincronização entre máquinas do sistema é afetada por meio da admitância de transferência entre elas. De imediato, a questão que emerge desta observação é como, ou com que intensidade, a instalação de um compensador em determinado local da rede afeta a capacidade de sincronização de duas máquinas genéricas do sistema e este é o principal objetivo do presente trabalho.

Neste estudo se busca identificar a contribuição do Compensador Série na composição do torque de sincronização no ambiente multimáquinas, tendo em vista a análise de estabilidade transitória. Considera-se inicialmente o sistema representado com preservação da estrutura da rede, de modo a se poder implementar a atuação do Compensador Série. Então se faz uma redução da rede conservando as barras internas dos geradores e as barras terminais da linha de transmissão onde se localiza o Compensador Série. Deste resultado, obtém-se uma avaliação do efeito da atuação do Compensador Série em cada um dos geradores. Finalmente, a redução às barras internas proporciona uma quantificação dos efeitos da atuação do Compensador Série nos torques de sincronização entre máquinas do sistema, por meio dos efeitos causados na admitância de transferência entre elas. Neste trabalho, em vista do interesse em reduzir a matriz admitância da rede, as cargas são tratadas como de impedâncias/admitâncias constantes, de modo a serem incorporadas à matriz admitância da rede, a qual é então reduzida.

Então a importância relativa da contribuição das variações da susceptância dos FACTS para a admitância de transferência, é definida pelo Fator de Efeito, que indica entre os pares de máquinas quais serão mais ou menos afetados pela atuação de um Compensador Série. Esse Fator de Efeito significa a influência direta sobre a potência sincronizante entre as máquinas.

## REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

A representação adotada para o Sistema de Energia Elétrica é a representação consagrada na quase totalidade da literatura que trata de aspectos de estabilidade do sistema, e bem apresentada na referência (KUNDUR, 1994). Trata-se aqui de considerar os aspectos que serão úteis para os desenvolvimentos que serão feitos na sequência do presente trabalho.

### 2.2 REDE ELÉTRICA

Uma vez que o interesse do estudo reside nos transitórios relativos ao sincronismo e sincronização do sistema, portanto fenômenos de natureza eletromecânica de dinâmica relativamente lenta, as dinâmicas ultra-rápidas associadas à natureza eletromagnética das linhas de transmissão são desconsideradas. Assim, a rede de energia elétrica, composta de linhas de transmissão e transformadores é considerada em regime permanente senoidal, o que permite o tratamento fasorial e a representação utilizando o conceito de impedâncias (admitâncias) constantes (ANDERSON ; FOUAD, 2000). Assim, a rede é representada pela sua matriz admitância de barra, a qual é como segue.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j \mathbf{B} \quad (2.1)$$

sendo:

$\mathbf{Y}$  a matriz admitância de barra;

$\mathbf{G}$  a matriz condutância de barra;

**B** a matriz susceptância de barra; e

**j** a unidade imaginária (  $j = \sqrt{-1}$  )

Se nenhum elemento da rede apresenta acoplamento mútuo com qualquer outro a matriz admitância de barra é construída de modo bastante simples a partir dos elementos primitivos como:

$$\begin{aligned} Y_{kk} &= \sum_{\ell \in \Omega_k} y_{k\ell} \\ Y_{k\ell} &= -y_{k\ell}; \forall \ell \neq k \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde  $k$  e  $\ell$  designam barras genéricas da rede e as correspondentes linhas e/ou colunas da matriz **Y**,  $y_{k\ell}$  é a admitância do elemento primitivo (linha de transmissão ou transformador) conectado entre as barras  $k$  e  $\ell$  e  $\Omega_k$  é o conjunto dos elementos adjacentes (conectados a) a barra  $k$ .

## 2.3 CARGAS

Genericamente, as cargas são representadas por modelos adequados aos interesses dos estudos a serem desenvolvidos, podendo ser impedância constante, corrente constante, potência constante e dinâmica (motor). Neste trabalho, as cargas são tratadas como admitâncias constantes, que são obtidas a partir de valores nominais ou dos resultados do cálculo de fluxo de potência, considerado caso base, como se indica a seguir. Seja uma barra genérica  $k$  da rede, com tensão de barra  $V_k$  e a potência da carga seja  $\bar{S}_k = S_k \big|_{\underline{\varphi}_k} = P_k + jQ_k$ . Então, a admitância equivalente desta carga é dada por

$$Y_{Lk} = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^2} \quad (2.3)$$

Esta admitância pode então ser incorporada pela rede, não restando nesta barra injeção de corrente a ser considerada, uma vez que a corrente da carga passa a circular internamente à rede (na própria admitância da carga).

## 2.4 MÁQUINA SÍNCRONA

A máquina síncrona, que é o tipo de todos os geradores considerados neste trabalho, é um elemento de considerável complexidade, como apresentado em (KUNDUR, 1994). Entretanto, a grande maioria das publicações que tratam da questão do sincronismo e da estabilidade de SEEs utiliza modelos simplificados. Assim se faz também neste trabalho e, no que segue, apresenta-se sumariamente o modelo que será considerado, remetendo a busca de maior detalhamento, se for de interesse, à fonte consultada (KUNDUR, 1994).

### 2.4.1 Circuitos Equivalentes e Diagrama Fasorial

Seguem as equações de estado para uma máquina síncrona, considerando modelo de dois eixos ( $\delta$ ,  $\omega$ ,  $E'_d$  e  $E'_q$ ), como no diagrama fasorial da Figura 2.1 (KUNDUR, 1994):

$$\dot{\delta} = \omega \quad (2.4)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}(-D\omega + P_m - P_e) \quad (2.5)$$

$$\tau'_{do} \dot{E}'_q = -E'_q - (x_d - x'_d)i_d + E_{fd} \quad (2.6)$$

$$\tau'_{qo} \dot{E}'_d = -E'_d + (x_q - x'_q)i_q \quad (2.7)$$

sendo:

$\dot{\delta}$  = posição angular do rotor da máquina medida em relação a um eixo que gira à velocidade síncrona;

$\omega$  = desvio de velocidade angular da máquina síncrona com relação à velocidade síncrona;

$D$  = constante de amortecimento [s];

$E'_q$  = tensão proporcional ao enlace de fluxo do campo da máquina, localizada no eixo em quadratura;

$E'_d$  = tensão proporcional ao enlace de fluxo no enrolamento de eixo em quadratura, localizada no eixo direto;

$i_d$  = componente de eixo direto da corrente nos terminais da máquina;

$i_q$  = componente de eixo em quadratura da corrente terminal da máquina;

$M = \frac{2H}{2\pi f_0}$  = constante de inércia;

$P_e$  = potência elétrica entregue pela máquina síncrona;

$P_m$  = potência mecânica de entrada (fornecida a máquina síncrona);

$\tau'_{do}$  = constante de tempo de circuito aberto de eixo direto;

$\tau'_{qo}$  = constante de tempo de circuito aberto de eixo em quadratura;

$x'_d$  = reatância transitória de eixo direto;

$x_d$  = reatância de eixo direto;

$x'_q$  = reatância transitória de eixo em quadratura; e

$x_q$  = reatância de eixo em quadratura.

A potência elétrica ( $P_e$ ) fornecida pela máquina é dada por:

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.8)$$

Em que:

$$\begin{aligned} v_d &= E'_d + x'_q i_q \\ v_q &= E'_q - x'_d i_d \end{aligned} \quad (2.9)$$

sendo:

$v_d$  = componente de eixo direto da tensão no terminal da máquina e

$v_q$  = componente de eixo em quadratura da tensão no terminal da máquina.





É importante notar que o fato de considerar  $x'_q = x'_d$ , faz com que a tensão  $E'_i$  se localize “atrás” de  $X'_d$ , facilitando a integração da máquina à rede, uma vez que a barra interna pode ser simplesmente acrescida à rede, com a respectiva tensão aplicada.

## 2.4.2 A Equação de Oscilação

Uma unidade geradora  $i$  de um sistema de  $n$  unidades, recebe, por meio do eixo da turbina, a entrada de potência mecânica, ou potência da turbina ( $P_{Ti}$ ), e fornece a “saída” elétrica, ou potência do gerador ( $P_{Gi}$ ) à rede, por meio da sua barra terminal. O gerador funcionará com sua velocidade constante e em sincronismo com o restante do sistema quando essas duas potências forem iguais, uma vez que se desprezam as perdas relativamente insignificantes do gerador.

Porém, quando existir uma diferença entre essas duas potências, ela será usada para mudar a energia cinética da unidade e para dominar o conjugado de amortecimento que se desenvolve principalmente nos enrolamentos de amortecimento. Tem-se então (ELGERD, 1978):

$$P_{Ti} - P_{Gi} = \frac{d}{dt}(W_{kin,i}) + P_{damper} \quad (2.13)$$

onde  $W_{kin,i}$  é a energia cinética total do gerador mais turbina, dada em megawatts-segundo (MWs) ou megajoules (MJ).

Com tratamento algébrico adequado e com bases apropriadas, a equação toma a forma bem conhecida a seguir:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{Ti} - P_{Gi} - D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad [\text{pu}] \quad (2.14)$$

sendo  $M_i$  a constante de inércia dada em  $\text{s}^2$ ,  $t$  o tempo em s,  $\delta$  em radianos e as potências em pu.

## 2.5 SISTEMA MÁQUINA VERSUS BARRA INFINITA (MBI)

O barramento infinito, embora seja a rigor uma abstração, é uma aproximação bastante razoável para um ponto de conexão em um grande sistema onde se conecta uma máquina comparativamente muito menor, e é bastante útil para a compreensão de diversos fenômenos em SEEs. Considera-se por definição a barra infinita como uma máquina com tensão constante, impedância nula, capacidade de fornecer ou absorver potência ilimitada, com inércia infinita, e, portanto com velocidade angular constante. Já foram realizados estudos de estabilidade transitória deste simples sistema (SONG ; JOHNS, 1999), descrito pelas equações dinâmicas

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{M}(P_m - P_e)\end{aligned}\tag{2.15}$$

sendo a potência elétrica dada por

$$P_e = \frac{E'V}{X_d' + X_{transm}} \sin \delta\tag{2.16}$$

onde  $X_{transm}$  é o valor equivalente da reatância do sistema de transmissão existente entre o terminal da máquina e a barra infinita.

Considerando o chamado modelo clássico da máquina, ou seja,  $E'$  tem valor constante e  $\delta$  é o ângulo desta tensão, fazem-se as análises a seguir como ilustração do problema da estabilidade transitória do SEE afetado pela ocorrência de uma perturbação do tipo curto-circuito. Identificam-se três regimes de operação:

pré-falta, vigente antes da instalação do defeito, com todas as condições de igualdade e desigualdade atendidas, ou seja o sistema operando em condições normais;

em falta, que é a situação em que o sistema está submetido a uma condição anômala de funcionamento, caracterizada pelo curto-circuito em uma das linhas de transmissão, significando um desequilíbrio na equação (2.15);

pós-falta, vigente após a eliminação do defeito pela abertura da linha, ficando o sistema operando com uma única linha e sujeito aos desdobramentos dinâmicos da

perturbação na forma de oscilações ou, na pior das hipóteses, com movimento de perda de sincronismo não oscilatório.

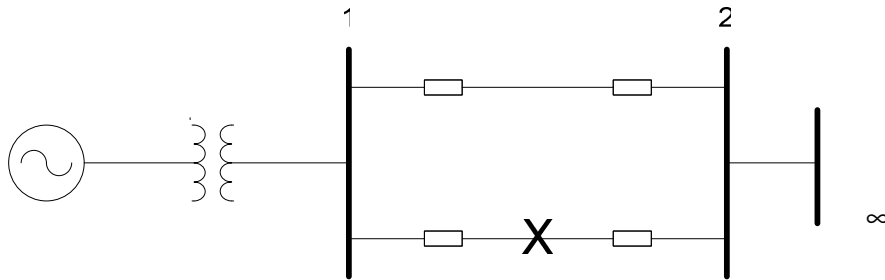


Figura 2.2 – Sistema MBI.

Através da Figura 2.3 (KUNDUR, 1994) pode ser analisada a alteração, em cada intervalo do gráfico  $P \times \delta$ , em função da configuração da rede (e da equação que rege a dinâmica do sistema), com as curvas correspondentes da transferência de potência do sistema em cada uma das condições, pré-falta, falta e pós-falta.

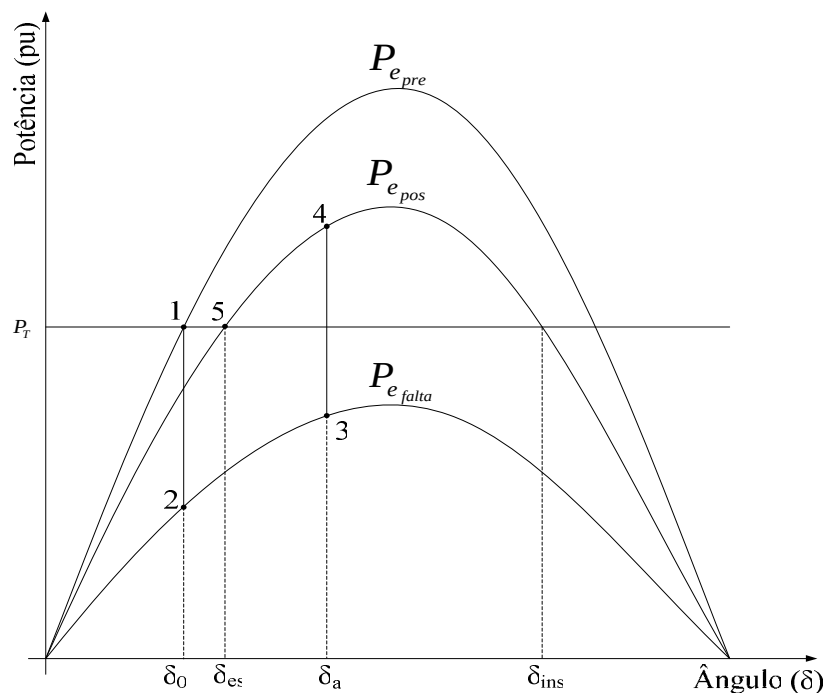


Figura 2.3– Curva  $P \times \delta$ .

O ponto 1 da Figura 2.3 corresponde ao ponto de operação pré-falta (antecede a ocorrência da falta), nele o equilíbrio é estabelecido, pois a potência mecânica da máquina é igual à potência elétrica fornecida ao sistema, e é dado pelo ângulo  $\delta_0$ .

O ponto 2 corresponde ao ponto de operação no instante da aplicação da falta, quando a potência transmitida diminui instantaneamente, resultando em potência acelerante positiva o que resulta em aceleração da máquina e o ângulo do gerador aumenta progressivamente. Se o defeito não for eliminado a máquina tende a acelerar indefinidamente, pois a potência elétrica é sempre inferior à potência mecânica. Por outro lado, se a linha for desligada no instante  $t_a$ , quando o ângulo é  $\delta_a$ , o sistema de transmissão assume a característica da curva  $P_{e\ pos}$ , e a potência transmitida passa instantaneamente do valor do ponto 3 ao valor assinalado no ponto 4 e então a potência acelerante passa a ser negativa, o que significa que a partir deste instante a velocidade passa a decrescer. O instante em que a velocidade  $\omega$  atinge zero é o instante em que o ângulo  $\delta$  alcança o valor máximo (lembrando que  $\omega = \dot{\delta}$ ). Se isto ocorrer antes de o ângulo alcançar  $\delta_{ins}$ , a partir deste instante o ângulo começa a decrescer o que se interpreta como estabilidade de primeira oscilação.

O ponto 5 corresponde ao valor final de operação pós-falta onde a potência elétrica igual a potência mecânica.

## 2.6 SISTEMA MULTIMÁQUINAS

Em um ambiente real existem várias máquinas conectadas em um mesmo sistema. A realização do estudo da estabilidade nesse caso é consideravelmente complexa, pois essas várias máquinas interligadas exercem influência umas sobre as outras. No entanto, considerações que são usadas para o sistema de uma máquina conectada a uma barra infinita podem ser empregadas para análise de um sistema multimáquinas, [ANDERSON e FOUAD, 2000], considerado o modelo clássico, as quais são: potência mecânica constante, a rede operando em regime permanente senoidal, a máquina síncrona representada pelo modelo clássico, ou seja, uma fonte de tensão em série com a reatância transitória de eixo direto, as cargas consideradas impedâncias constantes e o ângulo do rotor coincidente com o ângulo da tensão atrás da reatância transitória.

Considerando o objetivo deste trabalho, utiliza-se a representação do sistema conforme (ANDERSON ; FOUAD, 2000), sendo o sistema multimáquinas constituído por um conjunto de  $n$  máquinas que fornecem potência a uma rede de  $m$  barras, como na Figura 2.4. As injeções de correntes nas barras são dadas pela equação matricial.

$$\mathbf{I} = \mathbf{YV} \quad (2.17)$$

onde:

- $\mathbf{I}$  – vetor de injeção de corrente de barra;
- $\mathbf{V}$  – vetor de tensões de barra; e
- $\mathbf{Y}$  – matriz admitância de barra descrita por (2.1).

A figura 2.4 ilustra a configuração da rede, em que se supõe que as  $n$  primeiras barras são as de geração e as demais são barras de carga.

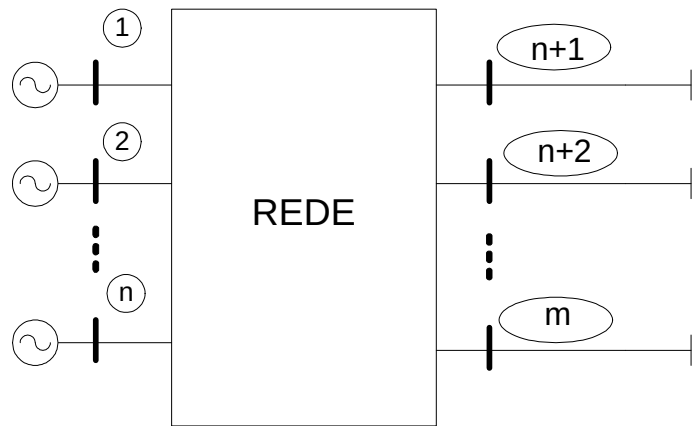


Figura 2.4 – Sistema Multimáquinas.

Genericamente, a  $i$ -ésima injeção de corrente de barra é dada por

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^m \bar{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (2.18)$$

Considerando as cargas como de admitância constante e adicionando-se à rede as barras internas das máquinas, a rede aumentada será conforme mostrado na Figura 2.5:

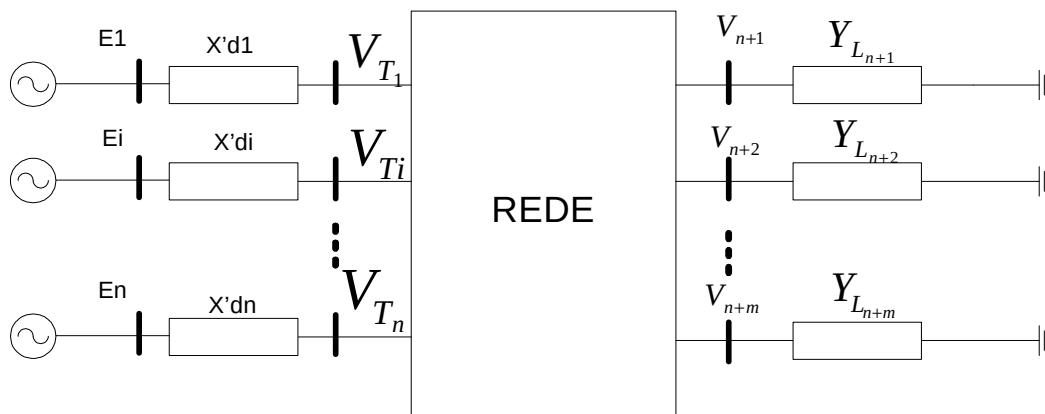


Figura 2.5 – Sistema Multimáquinas com Barras Internas e Cargas.

A equação nodal da rede aumentada é então escrita com a estrutura matricial compacta mostrada a seguir, onde as injeções de corrente nas barras de carga são nulas, ou seja  $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dots = \dot{I}_m = 0$  uma vez que as cargas foram incorporadas à rede como admitâncias constantes.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{gr} \\ \mathbf{Y}_{rg} & \mathbf{Y}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

O índice  $g$  denota variáveis/parâmetros associados às barras internas dos geradores e o índice  $r$  designa variáveis/parâmetros associados às barras da rede.

Então as equações correspondentes às injeções de corrente nas barras da rede são expressas na equação matricial:

$$\mathbf{0} = \mathbf{Y}_{rg}\mathbf{E} + \mathbf{Y}_{rr}\mathbf{V} \quad (2.20)$$

de onde se obtém as tensões nas barras da rede em função das tensões internas dos geradores como:

$$\mathbf{V} = -\mathbf{Y}_{rr}^{-1}\mathbf{Y}_{rg}\mathbf{E} \quad (2.21)$$

ou

$$\mathbf{V} = \mathbf{Y}_{V/E}\mathbf{E} \quad (2.22)$$

com:

$$\mathbf{Y}_{V/E} = -\mathbf{Y}_{rr}^{-1}\mathbf{Y}_{rg} \quad (2.23)$$

Note-se que esta é uma matriz complexa de dimensão  $(m,n)$

E, afinal, a rede reduzida às barras internas é descrita por

$$\mathbf{I}_g = [\mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{gr}\mathbf{Y}_{rr}^{-1}\mathbf{Y}_{rg}] \mathbf{E} \quad (2.24)$$

ou seja

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_{red} \mathbf{E} \quad (2.25)$$

sendo

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{gr} \mathbf{Y}_{rr}^{-1} \mathbf{Y}_{rg} \quad (2.26)$$

Feita a redução para o período de falta e para o pós-falta, tem-se as seguintes admitâncias

$$\mathbf{Y}_{V/E}^{falta} \quad \text{e} \quad \mathbf{Y}_{V/E}^{pós-falta}$$

Obtidas as expressões das injeções de correntes no sistema reduzido aos nós das forças eletromotrizes, pode-se definir a injeção de potência nestes nós. A potência elétrica fornecida por um gerador genérico  $i$  é dada por:

$$\bar{S}_i = \dot{E}_i \dot{I}_{gi}^* \quad (2.27)$$

Da equação da rede, sendo  $\bar{Y}_{ij}$  a admitância de transferência complexa entre as barras internas das máquinas  $i$  e  $j$ ,  $\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  e as tensões internas expressas por,  $\dot{E}_i = E_i \angle \delta_i$   $i=1, 2, \dots, n$ , a potência pode ser escrita como:

$$\bar{S}_i = E_i \left| \underline{\delta_i} \sum_{j=1}^n \{ (G_{ij} - jB_{ij}) E_j \right| \underline{-\delta_j} \} \quad (2.28)$$

a qual, após alguma manipulação algébrica, pode ser escrita como

$$P_{ei} = \text{Re}[\bar{S}_i] = G_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n [E_i G_{ij} E_j \cos \delta_{ij} + E_i B_{ij} E_j \sin \delta_{ij}] \quad (2.29)$$

e

$$Q_{ei} = I_m [\bar{S}_i] = -B_{ii} E_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n [E_i G_{ij} E_j \sin \delta_{ij} - E_i B_{ij} E_j \cos \delta_{ij}] \quad (2.30)$$

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

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_i, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.31)$$

Ou seja:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (2.32)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_i], \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.33)$$

Definida a injeção de potência ativa como sendo  $P_i = P_{mi} - G_{ii} E_i^2$ , obtêm-se as equações dinâmicas eletromecânicas do sistema multimáquinas:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (2.34)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - G_{ii} E_i^2 - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n (E_i B_{ij} E_j \sin \delta_{ij} + E_i G_{ij} E_j \cos \delta_{ij}) - D_i \omega_i], \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.35)$$



## **INCLUSÃO DE UM COMPENSADOR EM SÉRIE EM UM SISTEMA MULTIMÁQUINAS: ANÁLISE DOS EFEITOS SOBRE A CAPACIDADE DE SINCRONIZAÇÃO**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

Uma vez que o propósito deste trabalho é analisar a capacidade de sincronização entre máquinas de um sistema multimáquinas e esta capacidade, como mostrado adiante, está diretamente relacionada às admitâncias de transferência entre as máquinas, o foco é direcionado para estas admitâncias de transferência. Inicialmente, é importante observar que estas admitâncias estão definidas na matriz admitância de barra da rede reduzida às barras internas das máquinas tal como é usualmente empregada nos estudos de estabilidade transitória tradicionais. Para obtê-la, as cargas são representadas como admitâncias constantes, de modo a serem incorporadas à matriz admitância da rede, a qual é então reduzida.

Determinar-se-á um procedimento segundo o qual a matriz reduzida final, embora contenha unicamente a representação das barras internas dos geradores, mantém em seus elementos a influência da ação de um compensador série instalado em uma certa linha de transmissão da rede.

### **3.2 COMPENSAÇÃO SÉRIE EM UMA LINHA**

Considera-se uma compensação série em uma linha de transmissão genérica em uma rede de transmissão, na forma de inserção de uma reatância capacitiva, como ilustrado na Figura 3.1, onde se mostra um Sistema de Energia Elétrica, destacando a linha entre as barras  $k$  e  $\ell$ , com o compensador instalado. O objetivo deste trabalho é analisar como as variações da reatância capacitiva  $X_{CSC}$  afetam a sincronização entre as máquinas do sistema.

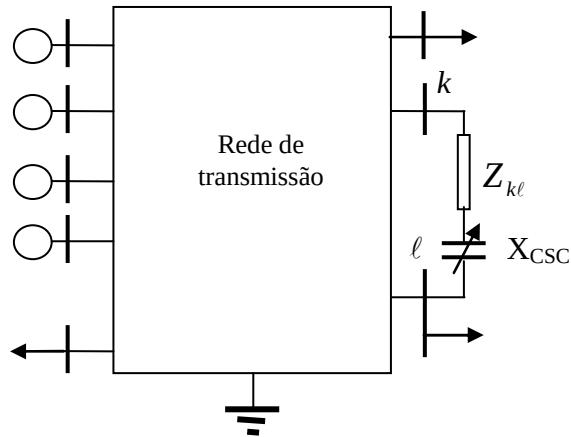


Figura 3.1. Sistema de Energia Elétrica, destacando-se a linha  $k - \ell$  com o TCSC

Assim, considera-se que o compensador acrescenta uma reatância série capacitiva na linha de transmissão  $k - \ell$  com uma parte estática (constante) ( $X_c^0$ ) e uma parte variável ( $\Delta X_c$ ) submetida a uma certa lei controle não analisada aqui. Então a impedância eficaz da linha é:

$$Z_{LT}^{ef} = Z_{ser\,k\ell}^0 - j\Delta X_c \quad (3.1)$$

onde  $Z_{ser\,k\ell}^0 = Z_{k\ell} - jX_c^0$ , e a admitância da linha, afetada pela ação do compensador, que pode ser um TCSC, é

$$y_{k\ell} = \frac{1}{Z_{ser\,k\ell}^0 - j\Delta X_c} \quad (3.2)$$

Nota-se que, definindo  $y_{k\ell}^0 = \frac{1}{Z_{ser\,k\ell}^0}$  (3.2) pode ser reescrita como

$$y_{k\ell} = y_{k\ell}^0 + y_{k\ell}^{add} \quad (3.3)$$

e, da comparação de (3.2) e (3.3), sem dificuldades se determina a admitância adicional equivalente à variação da reatância do capacitor como

$$y_{k\ell}^{add} = \frac{j\Delta X_c}{Z_{ser\,k\ell}^0 (Z_{ser\,k\ell}^0 - j\Delta X_c)} \quad (3.4)$$

Assim, a variação da impedância série da linha sob atuação do TCSC pode ser dada equivalentemente por uma admitância adicionada em paralelo, como ilustrado na Figura 3.2, onde se assume que os elementos da rede se encontram representados na forma admitância e a admitância da linha  $k - \ell$  é dada pelo seu valor estático (ou de equilíbrio) constante  $y_{k\ell}^0$  e as variações impostas pelo compensador série estão representadas em  $y_{k\ell}^{add}$ . Mostra-se também na Figura 3.2 a inclusão das barras internas dos geradores na rede assim como as cargas representadas por admitâncias.

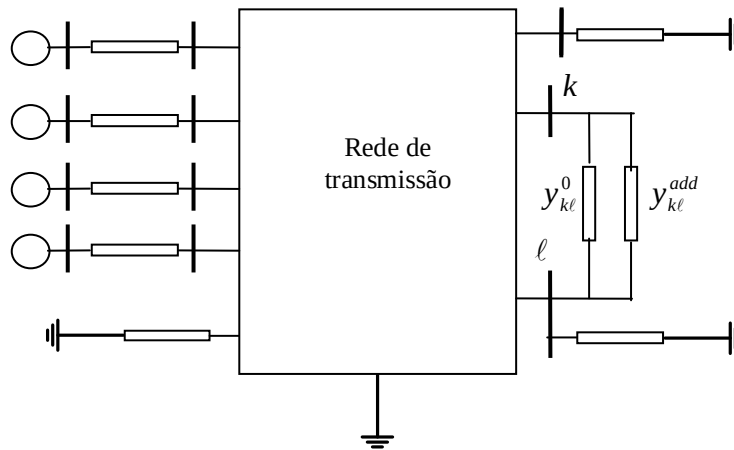


Figura 3.2 - Sistema de Energia Elétrica, incluídas as barras internas dos geradores, destacando-se a linha  $k - \ell$  e cargas representadas na forma admitância

A rede tem, agora,  $n+m$  barras, de modo que a matriz admitância que a representa é de dimensão  $n+m$ .

Esta rede expressa por sua matriz admitância de barra, será reduzida às barras internas dos geradores, ou seja, para a dimensão  $n$ , mantendo os efeitos do compensador série nas suas admitâncias. Para isto, a redução será efetuada em duas etapas, como segue. A primeira redução é efetuada para um conjunto de barras consideradas de interesse, que são as  $n$  barras internas dos geradores e as duas barras terminais da linha compensada, de modo que a nova representação da rede tem dimensão  $n+2$ , como se ilustra na figura 3.3. Nota-se que a parte fixa da admitância da linha,  $y_{k\ell}^0$ , já foi considerada incorporada à rede reduzida, tendo-se

assim destacada a parte variável da admitância para analisar sua influência no desempenho do sistema.

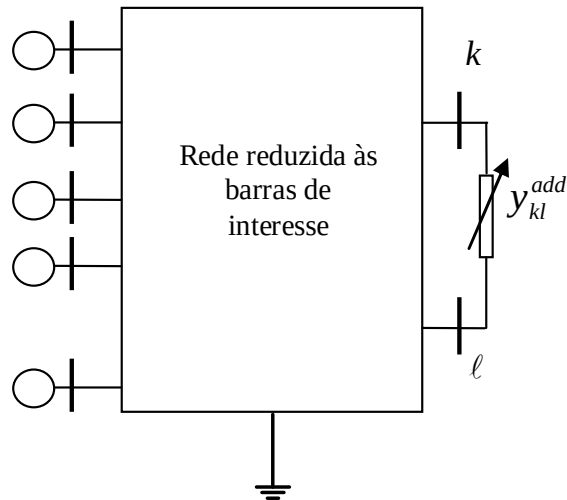


Figura 3.3. Sistema reduzido às barras internas dos geradores e terminais da linha compensada

Considerada esta rede reduzida, entende-se que a correspondente matriz admitância de barra, obviamente também reduzida, tem a estrutura mostrada na Figura 3.4.

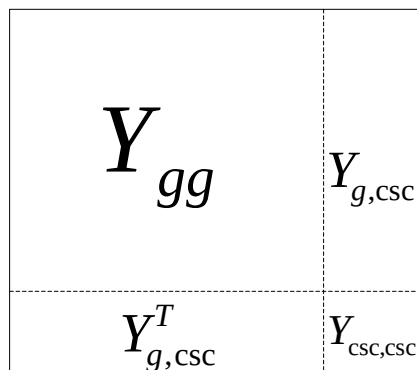


Figura 3.4 - Estrutura da matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores e terminais da Linha de Transmissão compensada

As sub-matrizes indicadas são como segue.  $\mathbf{Y}_{gg}$  é a partição da matriz correspondentes às barras internas dos geradores e, obviamente é quadrada de dimensão  $n$ .  $\mathbf{Y}_{g,csc}$  expressa o acoplamento entre as barras internas dos geradores e as barras terminais da linha compensada e seus elementos são fatores de influência das tensões nos terminais da linha compensada sobre a corrente nos geradores. Tem dimensões  $n \times 2$  e seus elementos são constantes. A sub-matriz  $\mathbf{Y}_{csc,csc}$  é a partição da matriz correspondente às barras terminais da linha compensada, obviamente quadrada de dimensão 2 e pode ser expressa com a estrutura dada a seguir.

$$\mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}} = \begin{bmatrix} Y_{kk}^0 + y_{k\ell}^{add} & Y_{k\ell}^0 - y_{k\ell}^{add} \\ Y_{k\ell}^0 - y_{k\ell}^{add} & Y_{\ell\ell}^0 + y_{k\ell}^{add} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Os valores de  $Y_{kk}^0$ ,  $Y_{\ell\ell}^0$  e  $Y_{k\ell}^0$  são constantes e referentes ao valor estático  $y_{k\ell}^0$  da admitância da linha compensada. Assim, as variações da reatância do compensador são representadas por  $y_{k\ell}^{add}$  que é dada por (3.4).

### 3.3 A REDUÇÃO DA MATRIZ ADMITÂNCIA

O vetor das injeções de correntes na rede reduzida às barras de interesse é dado por

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{I}_{k,\ell} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{g,\text{CSC}} \\ \mathbf{Y}_{g,\text{CSC}}^T & \mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{V}_{k,\ell} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Notando que as cargas, tomadas como admitâncias constantes, encontram-se incorporadas à rede, não há injeção de corrente a ser considerada nas barras terminais da linha  $k - \ell$ , ou seja,  $\mathbf{I}_{k,\ell} = [0 \ 0]^T$  de onde vem

$$\mathbf{V}_{k,\ell} = -\mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}^{-1} \mathbf{Y}_{g,\text{CSC}}^T \mathbf{E} \quad (3.7)$$

Substituindo (3.7) na equação matricial de  $\mathbf{I}_g$  têm-se

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}} \mathbf{E} \quad (3.8)$$

onde  $\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}}$  é matriz admitância da rede reduzida às barras internas dos geradores afetada pelas variações da reatância da compensação série na linha  $k - \ell$  da rede original, a qual é dada por

$$\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}} = \mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{g,\text{CSC}} \mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}^{-1} \mathbf{Y}_{g,\text{CSC}}^T \quad (3.9)$$

A inversão da matriz  $\mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}$  dada em (3.5) é efetuada como

$$\mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{\ell\ell}^0 + \bar{y}_{k\ell}^{add} & -(\bar{Y}_{k\ell}^0 - \bar{y}_{k\ell}^{add}) \\ -(\bar{Y}_{k\ell}^0 - \bar{y}_{k\ell}^{add}) & \bar{Y}_{kk}^0 + \bar{y}_{k\ell}^{add} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\text{sendo } \det = (Y_{kk}^0 + y_{k\ell}^{add})(Y_{\ell\ell}^0 + y_{k\ell}^{add}) - (Y_{k\ell}^0 - y_{k\ell}^{add})^2 = Y_{kk}^0 Y_{\ell\ell}^0 - Y_{k\ell}^{0^2} + (Y_{kk}^0 + Y_{\ell\ell}^0 + 2Y_{k\ell}^0)y_{k\ell}^{add}$$

$$\text{ou, definindo } \det^0 = Y_{kk}^0 Y_{\ell\ell}^0 - Y_{k\ell}^{0^2} \text{ e } \bar{K}_{k\ell} = (Y_{kk}^0 + Y_{\ell\ell}^0 + 2Y_{k\ell}^0)$$

$$\det = \det^0 + \bar{K}_{k\ell} y_{k\ell}^{add} \quad (3.11)$$

Com estas definições, reescreve-se (3.10) como

$$\mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}^{-1} = \frac{1}{\det^0 + \bar{K}_{k\ell} y_{k\ell}^{add}} \left\{ \begin{bmatrix} Y_{\ell\ell}^0 & -Y_{k\ell}^0 \\ -Y_{k\ell}^0 & Y_{kk}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} y_{k\ell}^{add} \right\} \quad (3.12)$$

ou, rearranjando termos:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}^{-1} &= \frac{1}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{add}} \left\{ \mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}^0{}^{-1} + \frac{1}{\det^0} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} y_{k\ell}^{add} \right\}; \\ \bar{k}_{k\ell} &= \frac{\bar{K}_{k\ell}}{\det^0} \end{aligned} \quad (3.13)$$

com o que (3.9) é reescrita como

$$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}} = \mathbf{Y}_{\text{gg}} - \frac{1}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{add}} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}} \left\{ \mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}^0{}^{-1} + \frac{1}{\det^0} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} y_{k\ell}^{add} \right\} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}}^{\text{T}} \quad (3.14)$$

Definindo

$$\Delta \mathbf{Y}^0 = -\mathbf{Y}_{\text{g,CSC}} \mathbf{Y}_{\text{CSC,CSC}}^0{}^{-1} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}}^{\text{T}} \quad (3.15)$$

Pode-se reescrever  $\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}}$  como

$$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}} = \mathbf{Y}_{\text{gg}} + \frac{1}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{add}} \left\{ \Delta \mathbf{Y}^0 - \frac{1}{\det^0} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}}^{\text{T}} y_{k\ell}^{add} \right\} \quad (3.16)$$

ou, somando e subtraindo  $\Delta \mathbf{Y}^0$

$$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}} = \mathbf{Y}_{\text{gg}} + \Delta \mathbf{Y}^0 + \left( \frac{1}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{\text{add}}} - 1 \right) \Delta \mathbf{Y}^0 - \frac{1}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{\text{add}}} \frac{1}{\det^0} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}}^{\text{T}} y_{k\ell}^{\text{add}} \quad (3.17)$$

De onde, finalmente, se têm

$$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}} = \mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0} + \left\{ -\bar{k}_{k\ell} \Delta \mathbf{Y}^0 - \frac{1}{\det^0} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}}^{\text{T}} \right\} \frac{y_{k\ell}^{\text{add}}}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{\text{add}}} \quad (3.18)$$

sendo  $\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0}$  a matriz da rede reduzida às barras internas dos geradores para a condição de regime permanente, ou seja, com  $\Delta X_C = 0$  (equivalentemente,  $y_{k\ell}^{\text{add}} = 0$ ), expressa por

$$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0} = \mathbf{Y}_{\text{gg}} - \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}} \left[ \frac{1}{Y_{kk}^0 Y_{\ell\ell}^0 - Y_{k\ell}^{0^2}} \begin{bmatrix} Y_{\ell\ell}^0 & -Y_{k\ell}^0 \\ -Y_{k\ell}^0 & Y_{kk}^0 \end{bmatrix} \right] \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}}^{\text{T}} \quad (3.19)$$

Os elementos de  $\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0}$  são admitâncias complexas escritas como,  $\bar{Y}_{ij}^0 = Y_{ij}^0 \angle \theta_{ij}^0$  isto é, com magnitude  $Y_{ij}^0$  e ângulo  $\theta_{ij}^0$ .

A segunda parcela no lado direito de (3.18) compõe as variações sofridas pela matriz admitância da rede reduzida como consequência da ação dinâmica/transitória do compensador traduzida em  $y_{k\ell}^{\text{add}}$  e é escrita como

$$\Delta \mathbf{Y}_{\text{CSC}} = \left\{ -\bar{k}_{k\ell} \Delta \mathbf{Y}^0 - \frac{1}{\det^0} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{g,CSC}}^{\text{T}} \right\} \frac{y_{k\ell}^{\text{add}}}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{\text{add}}} \quad (3.20)$$

de onde se tem

$$\Delta \mathbf{Y}_{\text{CSC}} = \{ -\bar{k}_{k\ell} \Delta \mathbf{Y}^0 - \mathbf{F}_y \} \frac{y_{k\ell}^{\text{add}}}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{\text{add}}} \quad (3.21)$$

O termo entre chaves é uma matriz quadrada de dimensão  $n$  constante

A matriz  $\mathbf{F}_y$ , é

$$\mathbf{F}_y = \frac{1}{\det^0} \mathbf{Y}_{g,CSC} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{g,CSC}^T \quad (3.22)$$

e seus elementos são da forma

$$\bar{F}_{y_{ij}} = \frac{1}{\det^0} (\bar{Y}_{i,k} + \bar{Y}_{i,\ell}) (\bar{Y}_{j,k} + \bar{Y}_{j,\ell}) \quad (3.23)$$

É importante observar que a expressão

$$\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}} = \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}^0} + \Delta \mathbf{Y}_{CSC} \quad (3.24)$$

com  $\Delta \mathbf{Y}_{CSC}$  dada por (3.21) leva a resultados precisos, uma vez que nenhuma consideração simplificadora foi levada em conta.

$$y_{k\ell}^{add}$$

Além disto, observa-se que a dependência dos termos da matriz admitância reduzida em relação às variações  $y_{k\ell}^{add}$  da admitância equivalente da linha com a compensação série se configura no fator escalar

$$fat_{CSC} = \frac{y_{k\ell}^{add}}{1 + \bar{k}_{k\ell} y_{k\ell}^{add}} \quad (3.25)$$

e então a admitância de transferência entre duas máquinas genéricas  $i$  e  $j$  afetada pela atuação do compensador série é escrita como

$$\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ij}^0 + \{-\bar{k}_{k\ell} \Delta Y_{ij}^0 - F_{y_{ij}}\} \frac{\bar{y}_{k\ell}^{add}}{1 + \bar{k}_{k\ell} \bar{y}_{k\ell}^{add}} \quad (3.26)$$

Lembrando que (equação (3.4))

$$y_{k\ell}^{add} = \frac{j\Delta X_c}{Z_{ser\,k\ell}^0 (Z_{ser\,k\ell}^0 - j\Delta X_c)} \quad (3.27)$$



vem, com alguma manipulação algébrica,

$$fat_{CSC} = \frac{j\Delta X_c}{Z_{ser\ k\ell}^0 + (\bar{k}_{k\ell} - Z_{ser\ k\ell}^0)j\Delta X_c} \quad (3.28)$$

com o que se tem

$$\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ij}^0 + \Delta\bar{Y}_{ij} \quad (3.29)$$

sendo

$$\Delta\bar{Y}_{ij} = \{-\bar{k}_{k\ell}\Delta Y_{ij}^0 - F_{yij}\} \frac{j\Delta X_c}{Z_{ser\ k\ell}^0 + (\bar{k}_{k\ell} - Z_{ser\ k\ell}^0)j\Delta X_c} \quad (3.30)$$

Assim, a admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  pode ainda ser escrita como

$$\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ij}^0 + \left\{ \frac{-\bar{k}_{k\ell}\Delta Y_{ij}^0 - F_{yij}}{Z_{ser\ k\ell}^0} \right\} \frac{j\Delta X_c}{1 + \frac{(\bar{k}_{k\ell} - Z_{ser\ k\ell}^0)j\Delta X_c}{Z_{ser\ k\ell}^0}} \quad (3.31)$$

Desejando-se fazer análise da influência do compensador sobre as admitâncias do sistema reduzido às barras internas dos geradores, para pequenas perturbações, a linearização em relação a  $\Delta X_C$  conduz a

$$fat_{CSC} = \frac{\bar{y}_{k\ell}^{add}}{1 + \bar{k}_{k\ell}\bar{y}_{k\ell}^{add}} \cong \frac{j(Z_{ser\ k\ell}^0)^2}{(Z_{ser\ k\ell}^0)^4} = \frac{j1}{(Z_{ser\ k\ell}^0)^2} \Delta X_c \quad (3.32)$$

e, definindo

$$\bar{K}_{CSC\ ij} = \{-\bar{k}_{k\ell}\Delta Y_{ij}^0 - F_{yij}\} \frac{j1}{(Z_{ser\ k\ell}^0)^2} \quad (3.33)$$

escreve-se

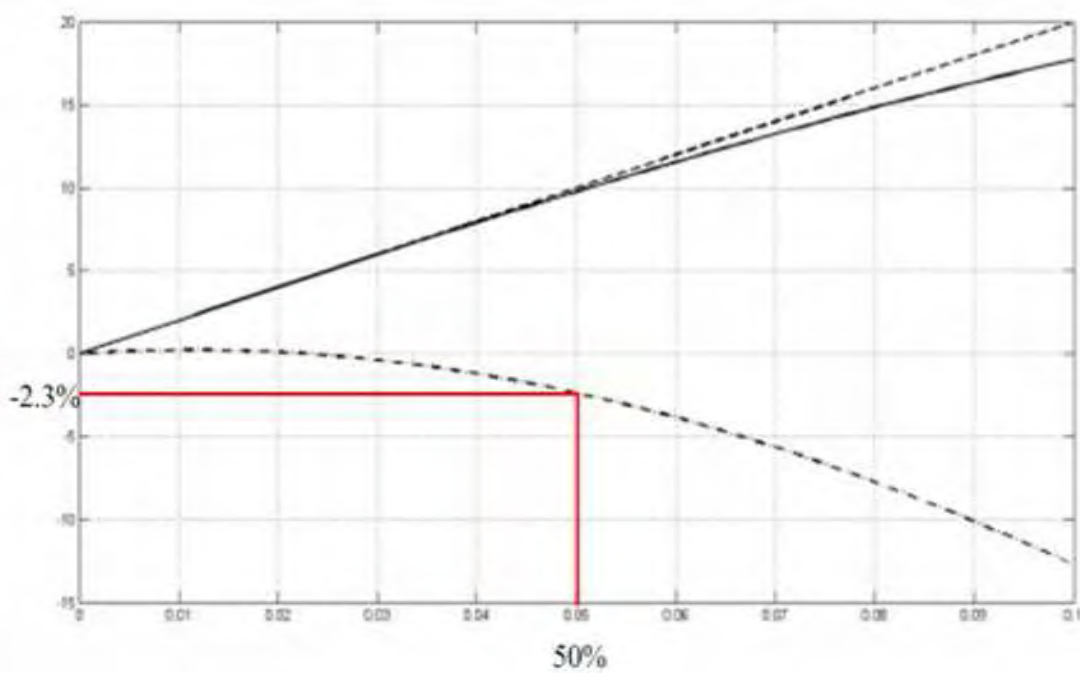
$$\Delta\bar{Y}_{ij} \cong \bar{K}_{CSC\ ij} \Delta X_c \quad (3.34)$$

É importante notar que os coeficientes  $\bar{K}_{CSCij}$  são constantes de valores complexos e podem ser escritos na forma polar como

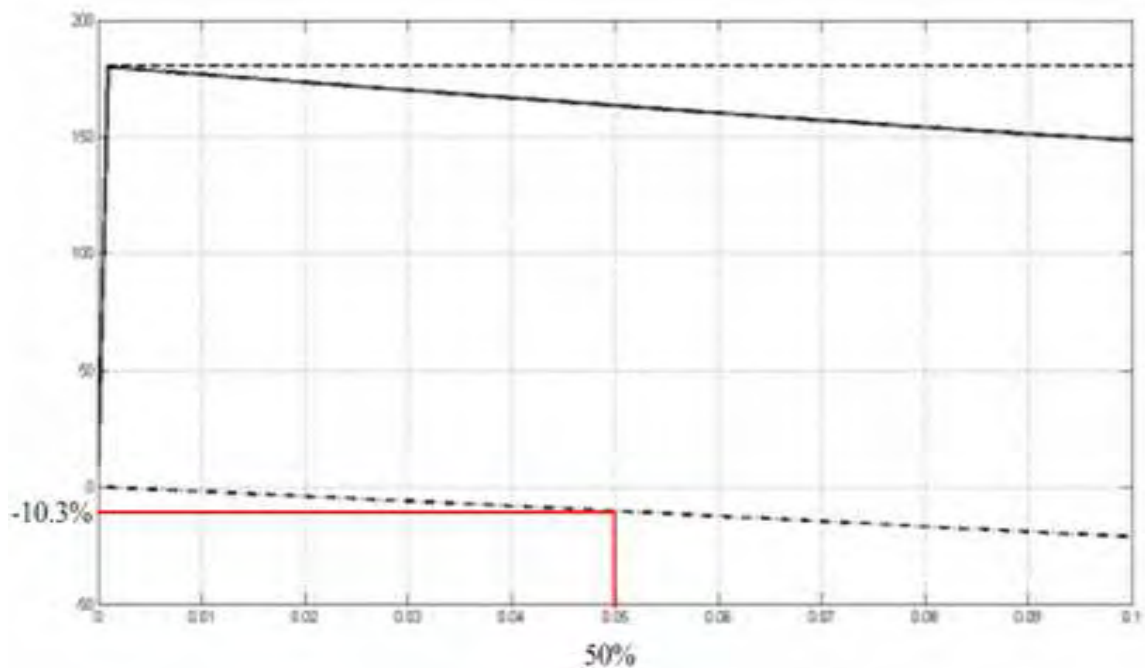
$$\bar{K}_{CSCij} = K_{CSCij} \left| \underline{\varphi_{CSCij}} \right| \quad (3.35)$$

onde  $K_{CSCij}$  é a magnitude e  $\varphi_{CSCij}$  é o ângulo da constante

A figura a seguir apresenta comparação dos valores obtidos para  $\Delta \bar{Y}$  dado por (3.26) ou (3.30) que são equivalentes e representados por curva contínua e por (3.34) com (3.33), representado por linha tracejada. A outra linha tracejada no gráfico representa os desvios percentuais do valor aproximado em relação ao valor real.



(a) Comparação dos valores obtidos para  $\Delta Y$



(b) - Comparação dos ângulos de  $\Delta \bar{Y}$

Figura 3.5 -Efeitos da compensação série em sistema de duas máquinas

Observando-se a Figura 3.5 nota-se que, embora a representação das variações da admitância de transferência dada por (3.34) com (3.33) tenha sido desenvolvida por meio de linearização, o que a rigor se aplica a pequenas perturbações, no presente caso, mesmo com compensação de 100% da linha, a expressão ainda apresenta resultados não muito discrepantes. Note-se que, para compensação de 50% da linha, o erro é de apenas 2.3% para magnitude e de 10,3% para ângulo.

### 3.4 COEFICIENTE DE EFICÁCIA DA COMPENSAÇÃO SÉRIE

Tendo em vista o interesse de análise do desempenho do sistema ou de sintetização de uma possível lei de controle para obter determinados desempenhos do sistema em função das variações (controladas) da reatância do TCSC, a matriz reduzida pode ser escrita como:

$$\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}} = \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}^0} + \mathbf{K}_{\text{CSC}} \Delta X_C \quad (3.35)$$

Nota-se que tanto a magnitude  $K_{CSC\,ij}$  como o ângulo  $\varphi_{CSC\,ij}$  são constantes. Então as variações da admitância de transferência  $\Delta Y_{ij}$  em função das variações da reatância do TCSC dependem diretamente de  $\Delta X_c$  e ocorrem sobre a linha de inclinação  $\varphi_{CSC\,ij}$ , como mostrado na Figura 3.6. Nesta ilustração se supõe um valor de regime permanente  $Y_{ij}^0$  e uma variação  $\Delta X_{c1}$  na reatância do compensador que leva a um valor  $\Delta Y_{ij}^1$  a ser adicionado sobre a linha de inclinação  $\varphi_{CSC\,ij}$ , resultando no valor  $Y_{ij}^1$  da admitância de transferência.

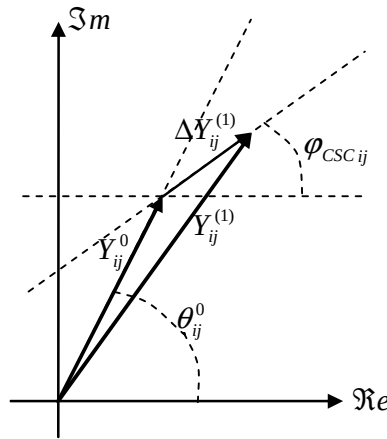


Figura 3.6 – Variação da admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  devidas à variação da reatância do TCSC

A variação efetiva da magnitude da admitância de transferência é  $\Delta Y_{ij} = Y_{ij} - Y_{ij}^0$  e pode ser expressa por:

$$\Delta Y_{CSC\,ij}^{ef} = K_{CSC\,ij}^{ef} \Delta X_c \quad (3.38)$$

onde  $K_{CSC\,ij}^{ef}$  é o coeficiente de eficácia do TCSC sobre as variações da admitância de transferência entre as máquinas  $i$  e  $j$  e é definido como

$$K_{CSC\,ij}^{ef} = K_{CSC\,ij} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{CSC\,ij}) \quad (3.39)$$

Este coeficiente expressa a participação efetiva das variações da susceptância do TCSC 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 TCSC quanto a interação entre as duas máquinas consideradas.

### 3.5 FATOR DE EFEITO

Há a necessidade de 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 a importância relativa da contribuição das variações da susceptância dos FACTS para a admitância de transferência, é uma informação mais significativa que a eficácia, e assim define-se o Fator de Efeito para a compensação série à semelhança do que foi feito para a compensação em derivação (MARQUES, 2009) como:

$$F_{CSC\,ij} = \frac{K_{CSC\,ij}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad (3.40)$$

com o que a admitância de transferência é dada por:

$$Y_{ij} = (1 + F_{CSC\,ij} \Delta X_c) Y_{ij}^0 \quad (3.41)$$

Este fator pode ser usado ainda para avaliar entre os pares de máquinas quais serão mais ou menos afetados pela atuação de um compensador série instalado em determinada localização no sistema. Este fator é denominado Fator de Efeito da atuação dos FACTS sobre a capacidade de sincronização das máquinas do sistema, uma vez que ele significa a influência direta sobre a potência sincronizante entre as máquinas.

### 3.6 POTÊNCIA ATIVA TRANSMITIDA E O COEFICIENTE DE POTÊNCIA SINCRONIZANTE ENTRE AS MÁQUINAS $i$ E $j$

A admitância de transferência complexa pode ser escrita na forma polar como:

$$\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} \quad (3.42)$$

e representada no diagrama da figura 3.7, onde se indica o ângulo complementar  $\alpha_{ij} = \frac{\pi}{2} - \theta_{ij}$

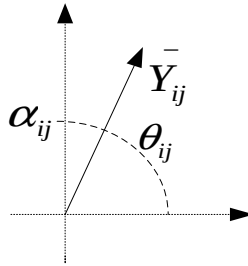


Figura 3.7 Representação fasorial da admitância de transferência

A potência ativa transmitida entre as máquinas  $i$  e  $j$  é dada por:

$$P_{eij} = E_i' Y_{ij} E_j' \cos(\delta_{ij}' - \theta_{ij}) \quad (3.43)$$

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

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \cos\left(\delta_{ij} + \alpha_{ij} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.44)$$

que pode ser escrita como

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \sin(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) \quad (3.45)$$

Empregando a variação eficaz da admitância de transferência, a potência transferida entre as máquinas  $i$  e  $j$  pode ser expressa por

$$P_{eij} = E_i (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef}) E_j \sin(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij}) \quad (3.46)$$

Assim o coeficiente de potência sincronizante entre as máquinas  $i$  e  $j$ , sob ação do compensador instalado na linha  $k-\ell$  é

$$K_{Peij} = \frac{\partial P_{eij}}{\partial \delta_{ij}} = E_i (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef}) E_j \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0) \quad (3.47)$$

### 3.7 EFEITO DO TCSC 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:

$$\begin{aligned} Y_{ij} &= Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}^{ef} = \\ &= Y_{ij}^0 + K_{CSCij}^{ef} \Delta X_C \end{aligned} \quad (3.48)$$

Sendo  $K_{CSCij}^{ef}$  dado por (3.39).

O coeficiente de eficácia expressa a participação efetiva das variações da susceptância do compensador na magnitude da admitância de transferência entre duas máquinas genéricas  $i$  e  $j$  de um sistema multimáquinas. Este coeficiente exerce um papel significativo, uma vez que se tem uma avaliação da eficácia da atuação do compensador série em introduzir alterações na admitância de transferência entre duas máquinas consideradas.

Porém pode-se considerar que uma determinada variação da admitância de transferência pode ter maior ou menor importância quando comparada com a magnitude original da mesma, ou seja, é mais significativa a informação da importância relativa da contribuição das variações da reatância do compensador série para a admitância de transferência. Com este objetivo, definiu-se o Fator de Efeito em (3.40), permitindo escrever o coeficiente de potência sincronizante como:

$$K_{Peij} = (1 + F_{CSCij} \Delta X_C) Y_{ij}^0 E_i E_j \cos(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij}^0) \quad (3.49)$$

O Fator de Efeito  $F_{CSC\ ij}$  expressa a importância relativa das variações da susceptância do TCSC sobre a admitância de transferência. Ele pode ser útil para técnicas de análise da atuação do sistema de potência sob ação da compensação série, assim como para realização de ajustes da atuação do sistema de potência com a compensação.

E ainda, sabendo-se como o compensador afeta o desempenho dinâmico/transitório entre máquinas ou áreas, pode-se utilizar o Fator de Efeito para definir e/ou analisar leis de controle.



## EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se exemplos ilustrativos visando validar e clarificar a utilização do fatores de Eficácia e de Efeito da Compensação Série em sistemas exemplos de 4, 5 e 6 máquinas, para um valor de 10% de variação da reatância acrescentada pelo Compensador Série ().

### 4.2 SISTEMA DE QUATRO MÁQUINAS

O sistema teste é apresentado em diagrama unifilar na Figura 4.1 e os correspondentes dados podem ser encontrados em (KUNDUR, 1994).

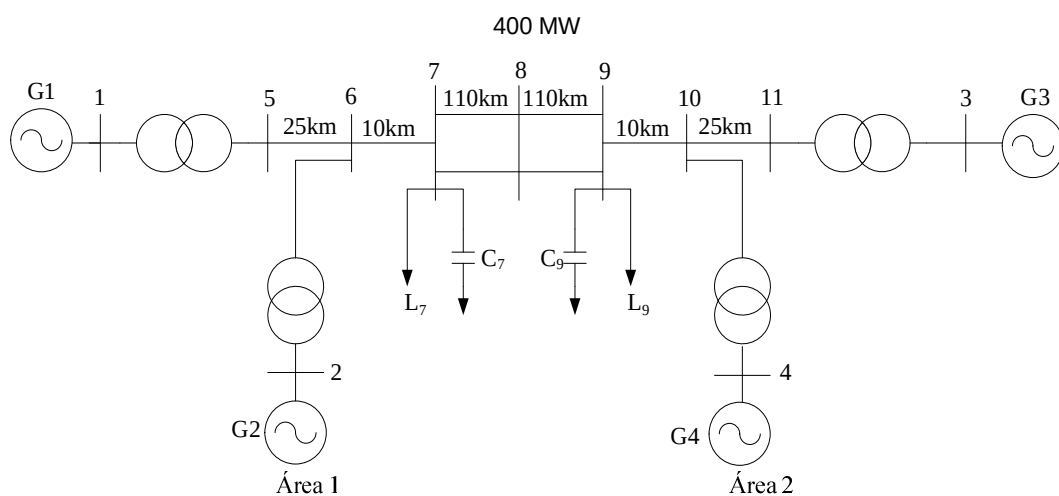


Figura 4.1 - Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas de duas Áreas.

### 4.2.1 Caso Base

Tabela 1 – 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                | 0,15  | 0                   | 0      |
| 2            | 2             | 6              | 0                | 0,15  | 0                   | 0      |
| 3            | 3             | 11             | 0                | 0,15  | 0                   | 0      |
| 4            | 4             | 10             | 0                | 0,15  | 0                   | 0      |
| 5            | 5             | 6              | 0,0025           | 0,025 | 0                   | 0,0049 |
| 6            | 6             | 7              | 0,009            | 0,09  | 0                   | 0,0019 |
| 7            | 7             | 8              | 0,099            | 0,99  | 0                   | 0,0214 |
| 8            | 7             | 8              | 0,099            | 0,99  | 0                   | 0,0214 |
| 9            | 8             | 9              | 0,099            | 0,99  | 0                   | 0,0214 |
| 10           | 8             | 9              | 0,099            | 0,99  | 0                   | 0,0214 |
| 11           | 9             | 10             | 0,009            | 0,09  | 0                   | 0,0019 |
| 12           | 10            | 11             | 0,0025           | 0,025 | 0                   | 0,0049 |

Tabela 2 – Valores de Tensões e Potências da barras

| BARRA | NOME     | TENSÃO DE BARRA (p.u.) |            |        |           | POT, BARRA (p.u.) |         |
|-------|----------|------------------------|------------|--------|-----------|-------------------|---------|
|       |          | Real                   | Imaginário | MODULO | ANG (GRA) | ATIVA             | REATIVA |
| 1     | BARRA 1  | 1,03                   | 0          | 1,03   | 0         | 0,5247            | 0,1583  |
| 2     | BARRA 2  | 1,0082                 | 0,0604     | 1,01   | 3,4294    | 1                 | 0,1032  |
| 3     | BARRA 3  | 0,9708                 | -0,3442    | 1,03   | -19,521   | 1                 | 0,1944  |
| 4     | BARRA 4  | 0,9204                 | -0,4159    | 1,01   | -24,3189  | 0,5767            | 0,0325  |
| 5     | BARRA 5  | 1,0069                 | -0,0764    | 1,0098 | -4,3397   | 0                 | 0       |
| 6     | BARRA 6  | 1,0018                 | -0,088     | 1,0057 | -5,063    | 0                 | 0       |
| 7     | BARRA 7  | 0,97                   | -0,2222    | 0,9952 | -12,9045  | -1,0744           | 0,1111  |
| 8     | BARRA 8  | 0,9037                 | -0,4262    | 0,9991 | -25,2481  | 0                 | 0,0469  |
| 9     | BARRA 9  | 0,799                  | -0,6071    | 1,0035 | -37,2296  | -1,9633           | 0,2778  |
| 10    | BARRA 10 | 0,8807                 | -0,492     | 1,0088 | -29,1895  | 0                 | 0       |
| 11    | BARRA 11 | 0,8955                 | -0,472     | 1,0122 | -27,7935  | 0                 | 0       |

Tabela 3 – Parâmetros das Máquinas

| Maquina | Barra | $X_d$ | $X'_d$ |
|---------|-------|-------|--------|
| 1       | 1     | 1,8   | 0,3    |
| 2       | 2     | 1,8   | 0,3    |
| 3       | 3     | 1,8   | 0,3    |
| 4       | 4     | 1,8   | 0,3    |

O objetivo é analisar a influência das variações da reatância do dispositivo de compensação série sobre o desempenho do sistema, sendo que a reatância de regime permanente do compensador é suposta nula. Com isto, a matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores é como mostrada a seguir por meio das matrizes de magnitudes  $|\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}^0}| = [Y_{ij}^0]; i, j = 1, 2, 3, 4$  [pu] e de ângulos [graus]:  $\boldsymbol{\theta}^0 = [\theta_{ij}^0]; i, j = 1, 2, 3, 4$  em que se indicam as partições correspondentes às áreas  $A_1$  e  $A_2$ .

$$|\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}^0}| = \begin{bmatrix} \begin{matrix} & A_1 & & \\ & 1.2801 & 0.9049 & \\ & 0.9049 & 1.3060 & \\ & 0.1329 & 0.1403 & \\ & 0.1403 & 0.1481 & \end{matrix} & \begin{matrix} & A_2 & & \\ & 0.1329 & 0.1403 & \\ & 0.1403 & 0.1481 & \\ & 1.3622 & 0.8647 & \\ & 0.8647 & 1.3996 & \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}^0 = \begin{bmatrix} \begin{matrix} & A_1 & & \\ & -81.5757 & 77.8203 & \\ & 77.8203 & -80.9050 & \\ & 50.1871 & 49.8855 & \\ & 49.8855 & 49.5840 & \end{matrix} & \begin{matrix} & A_2 & & \\ & 50.1871 & 49.8855 & \\ & 49.8855 & 49.5840 & \\ & -78.0124 & 70.3174 & \\ & 70.3174 & -77.1223 & \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix}$$

#### 4.2.2 O Dispositivo Instalado na Linha 8-9

Considera-se inicialmente um TCSC instalado na linha 8 – 9, notando que esta linha faz a interligação entre as áreas  $A_1$  e  $A_2$ , conforme mostrado na figura 4.2. Este teste tem por objetivo verificar se os fatores de eficácia e, principalmente, o fator de efeito, apontam com clareza a influência da compensação série sobre as interações inter-áreas.

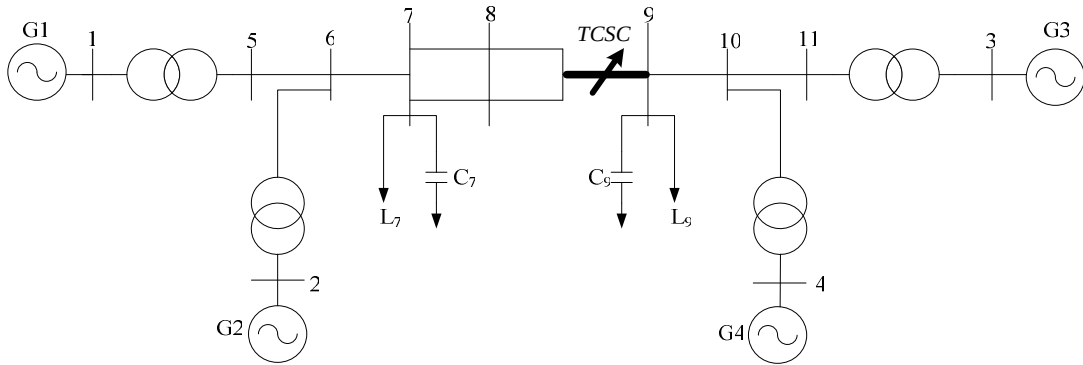


Figura 4.2 - Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas de duas Áreas (Dispositivo Instalado na Linha 8-9).

Obtém-se assim os coeficientes  $K_{CSC\ ij} \left| \varphi_{CSC\ ij} \right|$  apresentados a seguir por meio das matrizes para a magnitude e para o deslocamento angular  $\theta_{ij}^0 - \varphi_{CSC\ ij}$  (graus) separadamente.

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} & A_1 & & A_2 \\ |K_{CSC}| = & \begin{bmatrix} 0.0944 & 0.0996 & 0.0837 & 0.0884 \\ 0.0996 & 0.1052 & 0.0884 & 0.0933 \\ 0.0837 & 0.0884 & 0.0742 & 0.0783 \\ 0.0884 & 0.0933 & 0.0783 & 0.0827 \end{bmatrix} & \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} \end{matrix} \\
 & \begin{matrix} & A_1 & & A_2 \\ \theta_i^0 - \varphi_{CSC} = & \begin{bmatrix} -19.9334 & -179.6309 & 14.3301 & 14.3301 \\ -179.6309 & -21.2071 & 14.3301 & 14.3301 \\ 14.3301 & 14.3301 & -51.4442 & -200.0756 \\ 14.3301 & 14.3301 & -200.0756 & -52.9374 \end{bmatrix} & \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} \end{matrix}
 \end{aligned}$$

Observa-se que não há diferenciação destacada entre as magnitudes dos coeficientes  $K_{CSC\ ij}$ . No entanto, observando os deslocamentos angulares  $(\theta_{ij}^0 - \varphi_{CSC\ ij})$ , nota-se-se que o dispositivo tem um desempenho que favorece as interações entre áreas, notando que apenas  $14^\circ$  separam a ação do TCSC do ângulo da admitância de transferência. A matriz a seguir mostra os coeficientes de eficácia.

$$\mathbf{K}_{\text{CSC}}^{\text{ef}} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[ \begin{array}{cc|cc} 0.0887 & -0.0996 & 0.0811 & 0.0856 \\ -0.0996 & 0.0981 & 0.0856 & 0.0904 \\ \hline 0.0811 & 0.0856 & 0.0463 & -0.0736 \\ 0.0856 & 0.0904 & -0.0736 & 0.0498 \end{array} \right] \end{array}$$

Nota-se que os coeficientes relativos às interações intra-áreas são negativos de acordo com a observação de que os deslocamentos angulares são bem próximos de  $180^\circ$  estando assim em oposição. Observa-se que os fatores de eficácia inter e intra áreas (notadamente a área  $A_1$ ) tem magnitudes comparáveis, o que poderia levar a conclusão de que o compensador afeta indistintamente as interações inter e intra-áreas. Entretanto, o efeito causado pelo compensador é mais apropriadamente avaliado em comparação com a magnitude da susceptância considerada, e, de fato, os fatores de efeito vêm a satisfazer este requisito, como se evidencia nos valores dos elementos da matriz  $\mathbf{F}_{\text{CSC}}$  a seguir.

$$\mathbf{F}_{\text{CSC}} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[ \begin{array}{cc|cc} 0.0693 & -0.1101 & 0.6100 & 0.6100 \\ -0.1101 & 0.0751 & 0.6100 & 0.6100 \\ \hline 0.6100 & 0.6100 & 0.0340 & -0.0851 \\ 0.6100 & 0.6100 & -0.0851 & 0.0356 \end{array} \right] \end{array}$$

Na comparação dos efeitos inter- e intra-áreas fica evidente o maior efeito causado pela instalação do TCSC na linha 8-9 sobre as interações interáreas, uma vez que o fator de efeito entre quaisquer máquinas de áreas diferentes apresenta valor significativamente superior ao fator de efeito entre quaisquer máquinas de uma mesma área.

#### 4.2.3 O Dispositivo Instalado na Linha 5-6

Apenas para fins de exemplificação, considera-se a seguir a instalação de um TCSC na linha 5 – 6, que se localiza na conexão da máquina 1 com todas as demais.

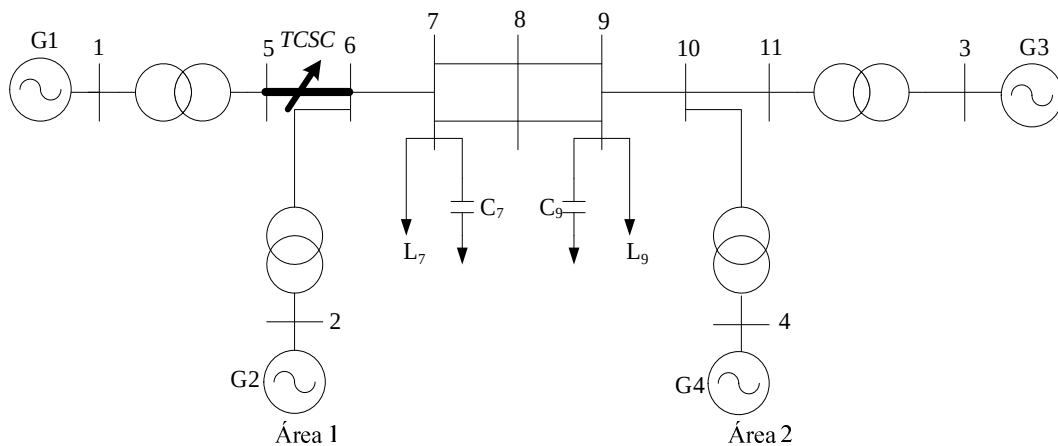


Figura 4.3 - Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas de duas Áreas (Dispositivo Instalado na Linha 5-6).

Este exemplo, embora possa não ser uma situação de interesse prático, no presente contexto é bastante significativo, porque possibilita verificar que os fatores de eficácia e de efeito mostram adequadamente a atuação do compensador sobre as interligações da máquina 1 com todas as demais. Neste caso, obtém-se as matrizes:

$$|K_{csc}| = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \end{array} & \begin{bmatrix} 1.6386 & 1.1584 & 0.1702 & 0.1796 \\ 1.1584 & 0.8189 & 0.1203 & 0.1270 \\ 0.1702 & 0.1203 & 0.0177 & 0.0187 \\ 0.1796 & 0.1270 & 0.0187 & 0.0197 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\theta_i^0 - \varphi_{csc} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \end{array} & \begin{bmatrix} 8.4243 & 8.4243 & 8.4243 & 8.4243 \\ 8.4243 & -33.4544 & -191.8782 & -191.8782 \\ 8.4243 & -191.8782 & -91.6135 & -240.2449 \\ 8.4243 & -191.8782 & -240.2449 & -93.1067 \end{bmatrix} \end{array}$$

Nesse caso o dispositivo TCSC estará atuando internamente à área  $A_1$  na interligação dos geradores 1 e 2, e se verifica então, obviamente, um melhor desempenho entre estes dois geradores, fato evidenciado pela magnitude  $K_{CSC12} = 1.1584$ , que é  $K_{CSC12} > 6K_{CSCij}$ ,  $\forall (i, j) \neq (1, 2)$ .

Na matriz a seguir são mostrados os coeficientes de eficácia do dispositivo, evidenciando a maior influência sobre as interações entre os geradores 1 e 2, o que é natural, devido ao fato

de a instalação ocorrer no caminho elétrico entre estes dois geradores, que são eletricamente os mais próximos entre todos (maior magnitude de admitância de transferência).

$$\mathbf{K}_{\text{CSC}}^{\text{ef}} = \begin{array}{cc|cc} & A_1 & & A_2 & \\ \hline & \boxed{1.6209} & \boxed{1.1459} & \boxed{0.1683} & \boxed{0.1777} \\ & \boxed{1.1459} & 0.6832 & -0.1177 & -0.1243 \\ \hline & \boxed{0.1683} & -0.1177 & -0.0005 & -0.0093 \\ & \boxed{0.1777} & -0.1243 & -0.0093 & -0.0011 \end{array} \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array}$$

Os Fatores de efeito têm os valores apresentados na matriz a seguir

$$\mathbf{F}_{\text{CSC}} = \begin{array}{cc|cc} & A_1 & & A_2 & \\ \hline & \boxed{1.2663} & \boxed{1.2663} & \boxed{1.2663} & \boxed{1.2663} \\ & \boxed{1.2663} & 0.5231 & -0.8389 & -0.8389 \\ \hline & \boxed{1.2663} & -0.8389 & -0.0004 & -0.0107 \\ & \boxed{1.2663} & -0.8389 & -0.0107 & -0.0008 \end{array} \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array}$$

Observa-se que o efeito causado sobre as admitâncias de transferência entre a máquina 1 e cada uma das outras é de mesma intensidade, sendo, porém, substancialmente superior ao causado nas conexões entre outras máquinas, de acordo com o fato de que o ponto de inserção do TCSC encontra-se no caminho elétrico entre a máquina 1 e todas as outras máquinas do sistema. É notório, ainda o inexpressivo efeito sobre as interações intra-áreas na área  $A_2$ .

### 4.3 - SISTEMA DE SEIS MÁQUINAS

Este sistema contém três áreas e seis máquinas, que estão dispostas conforme a Tabela 7 e pode ser visto no diagrama unifilar mostrado na Figura 4.4 a disposição das 6 máquinas e 12 barras [Taranto e Chow, 1994]. Os demais dados são mostrados nas Tabelas 4, 5 e 6.

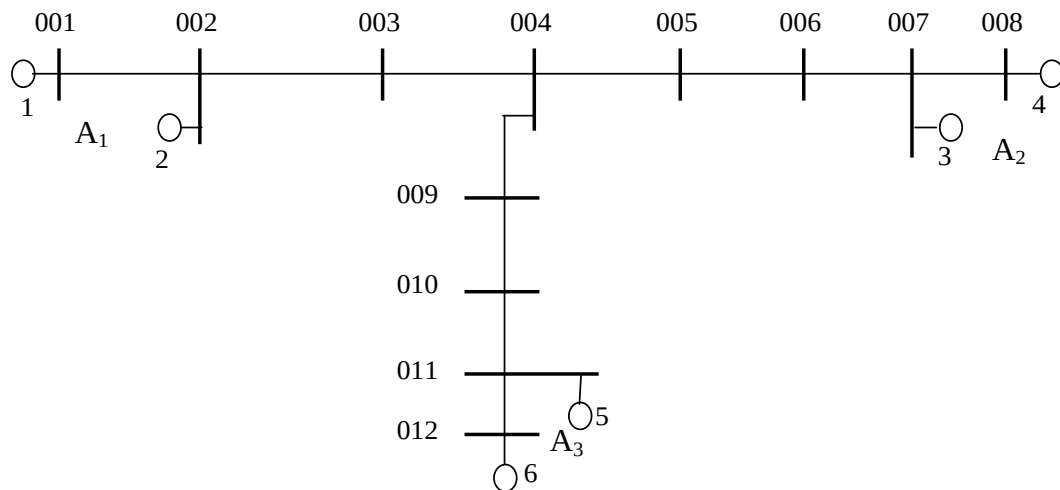


Figura 4.4 Diagrama unifilar do sistema de 3 áreas e seis máquinas

### 4.3.1 Caso Base

Tabela 4 – Dados de Linhas do Sistema de Seis Máquinas

| No. da linha | Barra inicial | Barra terminal | Impedância série |      | Admitância paralela |      |
|--------------|---------------|----------------|------------------|------|---------------------|------|
|              |               |                | R                | X    | G                   | B    |
| 1            | 1             | 2              | 0,01             | 0,1  | 0                   | 0    |
| 2            | 2             | 3              | 0,005            | 0,05 | 0                   | 0    |
| 3            | 3             | 4              | 0,01             | 0,1  | 0                   | 0    |
| 4            | 4             | 5              | 0,005            | 0,05 | 0                   | 0    |
| 5            | 5             | 6              | 0,04             | 0,4  | 0                   | 0,08 |
| 6            | 6             | 7              | 0,01             | 0,1  | 0                   | 0    |
| 7            | 7             | 8              | 0,01             | 0,1  | 0                   | 0    |
| 8            | 4             | 9              | 0,01             | 0,1  | 0                   | 0    |
| 9            | 9             | 10             | 0,04             | 0,4  | 0                   | 0,04 |
| 10           | 10            | 11             | 0,01             | 0,1  | 0                   | 0    |
| 11           | 11            | 12             | 0,01             | 0,1  | 0                   | 0    |



Tabela 5 – Resultados da Tensão e Potência da barra

| Barra | Nome     | Tensão |         | Magnitude | Ang (GRA) | Potências nas Barras |         |
|-------|----------|--------|---------|-----------|-----------|----------------------|---------|
|       |          |        |         |           |           | Ativa                | Reativa |
| 1     | Barra 1  | 0,7734 | -0,6802 | 1,03      | -41,333   | 0,8                  | 0,1556  |
| 2     | Barra 2  | 0,7059 | -0,7223 | 1,01      | -45,657   | 1,4                  | 1,2185  |
| 3     | Barra 3  | 0,5799 | -0,7395 | 0,9398    | -51,895   | -3                   | -1      |
| 4     | Barra 4  | 0,656  | -0,6922 | 0,9536    | -46,537   | -0,3                 | -0,1    |
| 5     | Barra 5  | 0,6942 | -0,7014 | 0,9869    | -45,293   | 0                    | 0,7     |
| 6     | Barra 6  | 0,8108 | -0,5411 | 0,9748    | -33,715   | -0,8                 | -0,2    |
| 7     | Barra 7  | 0,9053 | -0,4479 | 1,01      | -26,322   | 0,8                  | 0,3699  |
| 8     | Barra 8  | 0,9263 | -0,4026 | 1,01      | -23,492   | 0,5                  | -0,0376 |
| 9     | Barra 9  | 0,6868 | -0,6153 | 0,9221    | -41,856   | -0,5                 | 0       |
| 10    | Barra 10 | 0,9629 | -0,1536 | 0,9751    | -9,0645   | -0,4                 | -0,1    |
| 11    | Barra 11 | 1,05   | 0       | 1,05      | 0         | 1,0916               | 1,0332  |
| 12    | Barra 12 | 1,0283 | 0,0595  | 1,03      | 3,3119    | 0,6                  | -0,2479 |

Tabela 6 – Parâmetros das Máquinas

| Maquina | Barra | $X_d$ | $X'_d$ |
|---------|-------|-------|--------|
| 1       | 1     | 1,88  | 0,33   |
| 2       | 2     | 1,88  | 0,33   |
| 3       | 7     | 1,88  | 0,33   |
| 4       | 8     | 1,88  | 0,33   |
| 5       | 11    | 1,88  | 0,33   |
| 6       | 12    | 1,88  | 0,33   |

Tabela 7 – Parâmetros das Áreas

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

Neste exemplo se analisará novamente a influência das variações da susceptância do compensador série sobre o desempenho do sistema, sendo que a reatância de regime permanente do dispositivo é suposta nula.

A matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores é mostrada por meio das matrizes de magnitudes  $\left| \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}0} \right| = [Y_{ij}^0]; i, j = 1, 2, \dots, 6$  [pu] e de ângulos [graus]:  $\theta^0 = [\theta_{ij}^0]; i, j = 1, 2, \dots, 6$  em que se indicam as partições correspondentes às áreas  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ .

$$\left| \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}0} \right| = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} & \begin{array}{cc} 0.1776 & 0.1342 \\ 0.2315 & 0.1749 \end{array} \end{array} \begin{array}{c} A_3 \\ \begin{array}{cc} 0.1098 & 0.0829 \\ 0.0842 & 0.0636 \end{array} \end{array} \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{array} \\ \left[ \begin{array}{cc|cc|cc} 1.5790 & 0.9730 & 0.1824 & 0.1399 & 0.1776 & 0.1342 \\ 0.9730 & 1.7653 & 0.2378 & 0.1823 & 0.2315 & 0.1749 \\ \hline 0.1824 & 0.2378 & 1.6122 & 1.1069 & 0.1098 & 0.0829 \\ 0.1399 & 0.1823 & 1.1069 & 1.5149 & 0.0842 & 0.0636 \\ \hline 0.1776 & 0.2315 & 0.1098 & 0.0842 & 1.5055 & 1.1707 \\ 0.1342 & 0.1749 & 0.0829 & 0.0636 & 1.1707 & 1.4932 \end{array} \right] \end{array}$$

$$\theta^0 = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} & \begin{array}{cc} 94.5822 & 98.4457 \\ 93.2499 & 97.1135 \end{array} \end{array} \begin{array}{c} A_3 \\ \begin{array}{cc} 103.6355 & 107.4991 \\ 107.1383 & 111.0019 \end{array} \end{array} \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{array} \\ \left[ \begin{array}{cc|cc|cc} -87.8500 & 88.2700 & 99.2001 & 102.7029 & 94.5822 & 98.4457 \\ 88.2700 & -87.8007 & 97.8679 & 101.3707 & 93.2499 & 97.1135 \\ \hline 99.2001 & 97.8679 & -97.0186 & 101.3457 & 103.6355 & 107.4991 \\ 102.7029 & 101.3707 & 101.3457 & -97.2138 & 107.1383 & 111.0019 \\ \hline 94.5822 & 93.2499 & 103.6355 & 107.1383 & -97.4198 & 101.0707 \\ 98.4457 & 97.1135 & 107.4991 & 111.0019 & 101.0707 & -97.9078 \end{array} \right] \end{array}$$

### 4.3.2 O Dispositivo Instalado na Linha 2-3

Para fins de exemplificação considera-se um TCSC instalado na linha 2-3, conforme mostrado na figura abaixo:

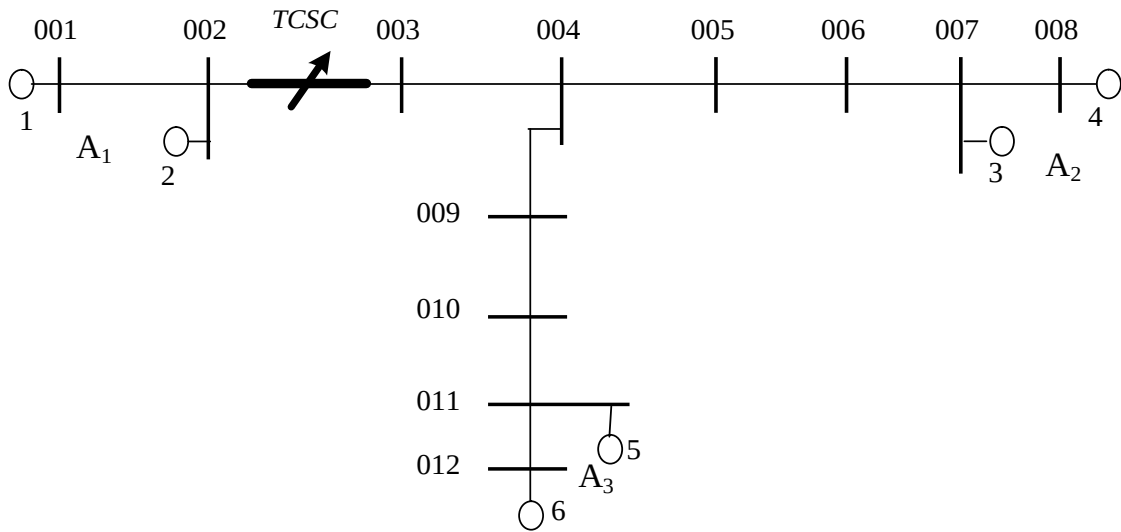


Figura 4.5 Diagrama unifilar do sistema de 3 áreas e seis máquinas (Dispositivo Instalado na Linha 5-6).

Se obtém os coeficientes  $K_{CSC\,ij}$  apresentados a seguir por meio das matrizes para a magnitude (pu) e para o deslocamento angular  $\theta_{ij}^0 - \varphi_{CSC\,ij}$  (graus) separadamente.

$$|K_{CSC}| = \begin{matrix} & \begin{matrix} A_1 & A_2 & A_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.3743 & 0.4879 & 0.2570 & 0.1971 & 0.2503 & 0.1891 \\ 0.4879 & 0.6359 & 0.3350 & 0.2569 & 0.3262 & 0.2464 \\ 0.2570 & 0.3350 & 0.1765 & 0.1353 & 0.1719 & 0.1298 \\ 0.1971 & 0.2569 & 0.1353 & 0.1038 & 0.1318 & 0.0995 \\ 0.2503 & 0.3262 & 0.1719 & 0.1318 & 0.1673 & 0.1264 \\ 0.1891 & 0.2464 & 0.1298 & 0.0995 & 0.1264 & 0.0955 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

A linha 2-3 faz a interligação entre as áreas  $A_1$ - $A_2$  e  $A_1$ - $A_3$ , e assim é possível observar a atuação do dispositivo TCSC nas interações entre essas áreas notando que quanto menor o deslocamento angular maior é a eficácia do dispositivo.

$$\theta^0 - \varphi_{CSC} = \begin{bmatrix} & A_1 & & A_2 & & A_3 \\ \begin{bmatrix} 14.5053 & -162.9468 \\ -162.9468 & 11.7916 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 7.5738 \\ 7.5738 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 7.5738 \\ 7.5738 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 7.5738 \\ 7.5738 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 7.5738 \\ 7.5738 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 7.5738 \\ 7.5738 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 23.9111 & -170.9504 \\ -170.9504 & 31.1119 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -181.3610 & -181.3610 \\ -181.3610 & -181.3610 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -181.3610 & -181.3610 \\ -181.3610 & -181.3610 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 7.5738 \\ 7.5738 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -181.3610 & -181.3610 \\ -181.3610 & -181.3610 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 15.0764 & -179.5505 \\ -179.5505 & 23.2915 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix}$$

Observando a matriz dos deslocamentos angulares ( $\theta_{ij}^0 - \varphi_{CSC\ ij}$ ), nota-se que o dispositivo tem um desempenho que favorece as interações entre as áreas  $A_1$  e  $A_2$  e  $A_1$  e  $A_3$ , pelo fato de o dispositivo estar instalado no caminho elétrico entre essas áreas, o que se reflete adequadamente no deslocamento angular de apenas  $7.6^\circ$  entre a admitância provida pela ação do TCSC e o ângulo da admitância de transferência da rede reduzida.

Fica evidente que as interações intra-áreas e entre as áreas  $A_2$  e  $A_3$  são desfavorecidas notando que os deslocamentos angulares são próximos de  $180^\circ$ , ou seja, em oposição, assim como as interações intra-áreas.

A matriz a seguir mostra os coeficientes de eficácia do dispositivo.

$$K_{CSC}^{ef} = \begin{bmatrix} & A_1 & & A_2 & & A_3 \\ \begin{bmatrix} 0.3624 & -0.4664 \\ -0.4664 & 0.6225 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.2548 \\ 0.3321 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.1954 \\ 0.2546 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.2481 \\ 0.3234 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.1874 \\ 0.2443 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.2548 \\ 0.1954 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.1614 & -0.1337 \\ -0.1337 & 0.0888 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0.1718 & -0.1317 \\ -0.1317 & -0.0995 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0.1298 & -0.0995 \\ -0.1264 & 0.0877 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0.2481 \\ 0.1874 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -0.1718 & -0.1317 \\ -0.1298 & -0.0995 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.1616 & -0.1264 \\ -0.1264 & 0.0877 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix}$$

Com a matriz dos coeficientes de eficácia do dispositivo, fica claro a atuação do compensador série, onde os coeficientes relativos às interações intra-áreas e entre as áreas  $A_2$  e  $A_3$  são negativos, de acordo com os deslocamentos angulares próximos de  $180^\circ$  estando assim em oposição.

Os Fatores de efeito são mostrados na matriz a seguir:

$$\mathbf{F}_{\text{CSC}} = \begin{array}{cc|cc|cc} & & A_1 & & A_2 & & A_3 & \\ \hline & & 0.2295 & -0.4794 & 1.3968 & 1.3968 & 1.3968 & 1.3968 \\ & & -0.4794 & 0.3526 & 1.3968 & 1.3968 & 1.3968 & 1.3968 \\ \hline & & 1.3968 & 1.3968 & 0.1001 & -0.1207 & -1.5654 & -1.5654 \\ & & 1.3968 & 1.3968 & -0.1207 & 0.0586 & -1.5654 & -1.5654 \\ \hline & & 1.3968 & 1.3968 & -1.5654 & -1.5654 & 0.1073 & -0.1080 \\ & & 1.3968 & 1.3968 & -1.5654 & -1.5654 & -0.1080 & 0.0587 \\ \hline & & & & & & & A_1 \\ & & & & & & & A_2 \\ & & & & & & & A_3 \end{array}$$

Na comparação dos efeitos inter- e intra-áreas fica evidente o maior efeito causado pela instalação do TCSC na linha 2-3 sobre as interações interáreas, uma vez que o fator de efeito entre quaisquer máquinas de áreas diferentes apresenta valor significativamente superior ao fator de efeito entre quaisquer máquinas de uma mesma área, o que já era esperado pelo fato do dispositivo estar instalado na área  $A_1$ , causando assim grande influência nas interações de qualquer outra área com a área  $A_1$ .

### 4.3.3 O Dispositivo Instalado na Linha 10-11

Considera-se agora um TCSC instalado na linha 10-11, e se obtém os coeficientes  $K_{\text{CSC}ij} \big|_{\varphi_{\text{CSC}ij}}$  apresentados a seguir por meio das matrizes para a magnitude (pu) e para o deslocamento angular  $\theta_{ij}^0 - \varphi_{\text{CSC}ij}$  (graus). Para esse exemplo têm-se o compensador série instalado no caminho elétrico entre área  $A_3$  e as demais áreas possibilitando verificar que os fatores de eficácia e de efeito mostram adequadamente a atuação do compensador, conforme mostrado na figura abaixo:

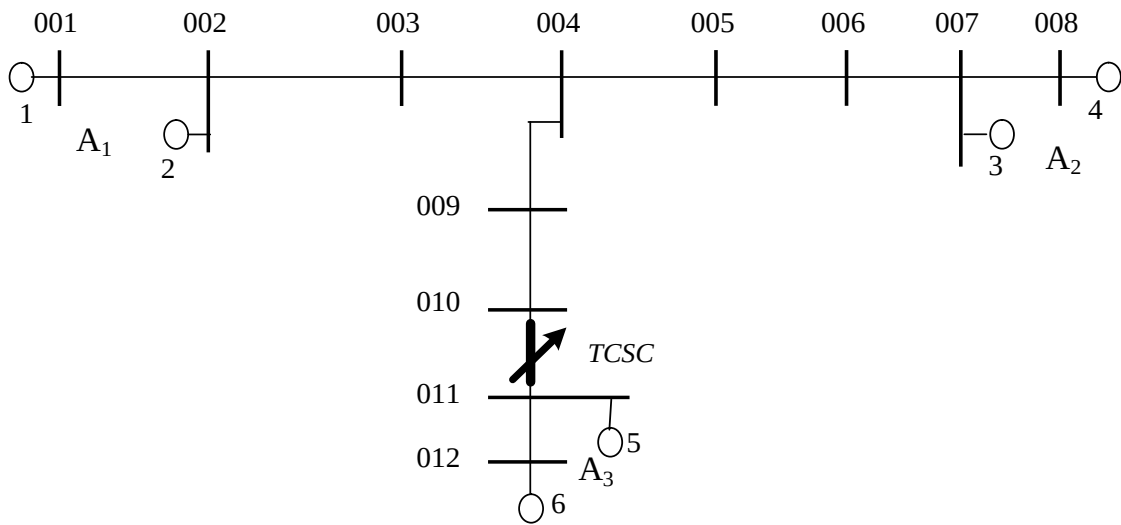


Figura 4.6 Diagrama unifilar do sistema de 3 áreas e seis máquinas (Dispositivo Instalado na Linha 10-11).

$$\begin{aligned}
 & \begin{array}{c} A_1 \qquad A_2 \qquad A_3 \\ |K_{csc}| = \begin{bmatrix} 0.0775 & 0.1010 & 0.0479 & 0.0367 & \boxed{0.1982} & \boxed{0.1497} \\ 0.1010 & 0.1316 & 0.0624 & 0.0479 & \boxed{0.2583} & \boxed{0.1952} \\ 0.0479 & 0.0624 & 0.0296 & 0.0227 & \boxed{0.1225} & \boxed{0.0925} \\ 0.0367 & 0.0479 & 0.0227 & 0.0174 & \boxed{0.0939} & \boxed{0.0709} \\ \boxed{0.1982} & \boxed{0.2583} & \boxed{0.1225} & \boxed{0.0939} & 0.5069 & 0.3830 \\ \boxed{0.1497} & \boxed{0.1952} & \boxed{0.0925} & \boxed{0.0709} & 0.3830 & 0.2893 \end{bmatrix} \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{array} \end{array} \\
 & \begin{array}{c} A_1 \qquad A_2 \qquad A_3 \\ \theta_i^0 - \varphi_{csc} = \begin{bmatrix} -23.5097 & -200.9619 & -201.5064 & -201.5064 & \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} \\ -200.9619 & -26.2235 & -201.5064 & -201.5064 & \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} \\ -201.5064 & -201.5064 & 3.7657 & -191.0958 & \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} \\ -201.5064 & -201.5064 & -191.0958 & 10.9665 & \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} \\ \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} & 64.5298 & -130.0971 \\ \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} & \boxed{13.2930} & -130.0971 & 72.7449 \end{bmatrix} \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{array} \end{array}
 \end{aligned}$$

Observando os deslocamentos angulares, nota-se que entre a área  $A_3$  e as demais o deslocamento é de apenas  $13,3^\circ$  enquanto que os demais estão consideravelmente distantes, concluindo-se que a ação do compensador favorece mais as interações entre a área  $A_3$  com as demais áreas.

Os coeficientes de eficácia para a localização do dispositivo na linha 10 – 11 são dados a seguir.

$$\mathbf{K}_{\text{CSC}}^{\text{ef}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} & \begin{array}{cc} A_3 & A_3 \end{array} \end{array} \begin{bmatrix} 0.0711 & -0.0943 & -0.0446 & -0.0342 & 0.1929 & 0.1457 \\ -0.0943 & 0.1181 & -0.0581 & -0.0445 & 0.2514 & 0.1899 \\ -0.0446 & -0.0581 & 0.0295 & -0.0223 & 0.1192 & 0.0901 \\ -0.0342 & -0.0445 & -0.0223 & 0.0171 & 0.0914 & 0.0690 \\ 0.1929 & 0.2514 & 0.1192 & 0.0914 & 0.2180 & -0.2467 \\ 0.1457 & 0.1899 & 0.0901 & 0.0690 & -0.2467 & 0.0858 \end{bmatrix} \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{array} \end{array}$$

Nota-se nitidamente uma maior eficácia do dispositivo nas interações entre máquinas da área  $A_3$  com máquinas das outras áreas, de acordo com o fato de que o compensador está conectado justamente na interligação desta área com o restante do sistema. Por outro lado, os coeficientes relativos às interações das admitâncias próprias das máquinas e entre as áreas fora do caminho elétrico da instalação do compensador são negativos de acordo com os deslocamentos angulares próximos de  $180^\circ$ , portanto atuando em oposição.

Os Fatores de efeito são:

$$\mathbf{F}_{\text{CSC}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} & \begin{array}{cc} A_3 & A_3 \end{array} \end{array} \begin{bmatrix} 0.0450 & -0.0969 & -0.2443 & -0.2443 & 1.0861 & 1.0861 \\ -0.0969 & 0.0669 & -0.2443 & -0.2443 & 1.0861 & 1.0861 \\ -0.2443 & -0.2443 & 0.0183 & -0.0201 & 1.0861 & 1.0861 \\ -0.2443 & -0.2443 & -0.0201 & 0.0113 & 1.0861 & 1.0861 \\ 1.0861 & 1.0861 & 1.0861 & 1.0861 & 0.1448 & -0.2107 \\ 1.0861 & 1.0861 & 1.0861 & 1.0861 & -0.2107 & 0.0575 \end{bmatrix} \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{array} \end{array}$$

Na comparação dos efeitos inter- e intra-áreas fica evidente o maior efeito causado pela instalação do TCSC na linha 10-11 sobre as interações interáreas entre a área  $A_3$  e as demais, uma vez que os fatores de efeito entre as áreas  $A_3$ - $A_1$  e  $A_3$ - $A_2$  apresentam valores significativamente superiores aos fatores de efeito nas admitâncias intra-áreas ou nas interações entre as áreas  $A_1$  e  $A_2$ .





Os deslocamentos angulares indicam que o dispositivo tem desempenho que favorece as interações entre a área  $A_2$  com as demais áreas, evidentemente pelo fato do compensador estar instalado no caminho elétrico da área  $A_2$  com as demais áreas.

A matriz a seguir mostra os coeficientes de eficácia do dispositivo.

$$\mathbf{K}_{\text{CSC}}^{\text{ef}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} & \begin{array}{cc} A_3 \end{array} \end{array} \\ \left[ \begin{array}{cc|cc|cc} 0.0951 & -0.1244 & 0.1872 & 0.1435 & -0.0574 & -0.0434 \\ -0.1244 & 0.1605 & 0.2440 & 0.1870 & -0.0748 & -0.0565 \\ \hline 0.1872 & 0.2440 & 0.2969 & -0.2625 & 0.1126 & 0.0851 \\ 0.1435 & 0.1870 & -0.2625 & 0.1572 & 0.0864 & 0.0652 \\ \hline -0.0574 & -0.0748 & 0.1126 & 0.0864 & 0.0339 & -0.0261 \\ -0.0434 & -0.0565 & 0.0864 & 0.0652 & -0.0261 & 0.0186 \end{array} \right] \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{array} \end{array}$$

Nota-se, novamente, que os coeficientes relativos às admitâncias próprias das máquinas e entre as áreas fora do caminho elétrico da instalação do compensador, são negativos mostrando que a ação do dispositivo está ligada às admitâncias de transferência entre as máquinas. Esse fato também pode ser observado através da matriz de deslocamento angular onde os valores são bem próximos de  $180^\circ$ .

Os Fatores de efeito são:

$$\mathbf{F}_{\text{CSC}} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} & \begin{array}{cc} A_3 \end{array} \end{array} \\ \left[ \begin{array}{cc|cc|cc} 0.0602 & -0.1279 & 1.0261 & 1.0261 & -0.3232 & -0.3232 \\ -0.1279 & 0.0909 & 1.0261 & 1.0261 & -0.3232 & -0.3232 \\ \hline 1.0261 & 1.0261 & 0.1841 & -0.2371 & 1.0261 & 1.0261 \\ 1.0261 & 1.0261 & -0.2371 & 0.1038 & 1.0261 & 1.0261 \\ \hline -0.3232 & -0.3232 & 1.0261 & 1.0261 & 0.0225 & -0.0223 \\ -0.3232 & -0.3232 & 1.0261 & 1.0261 & -0.0223 & 0.0124 \end{array} \right] \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{array} \end{array}$$

Na comparação dos efeitos inter- e intra-áreas fica evidente o maior efeito causado pela instalação do TCSC na linha 6-7 sobre as interações interáreas envolvendo a área  $A_2$ .



#### 4.4.1 Caso Base

Tabela 8 – Dados de Linhas do Sistema IEEE de Cindo Máquinas e Quatorze 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 9 – Resultados da Tensão e Potência da barra

| Barra | Nome    | Tensão |         | Magnitude | Ang (GRA) | Potências nas Barras |         |
|-------|---------|--------|---------|-----------|-----------|----------------------|---------|
|       |         |        |         |           |           | Ativa                | Reativa |
| 1     | Barra 1 | 0,9986 | 0,0521  | 1         | 2,9871    | 2,32                 | -0,0073 |
| 2     | Barra 2 | 0,9756 | -0,0424 | 0,9765    | -2,4887   | -0,217               | -0,127  |
| 3     | Barra 3 | 0,9363 | -0,1925 | 0,9558    | -11,616   | -0,942               | -0,19   |
| 4     | Barra 4 | 0,9376 | -0,1419 | 0,9483    | -8,6031   | -0,478               | 0       |
| 5     | Barra 5 | 0,9477 | -0,1154 | 0,9547    | -6,9412   | -0,0076              | -0,016  |
| 6     | Barra 6 | 0,9362 | -0,2326 | 0,9646    | -13,952   | -0,112               | -0,0756 |
| 7     | Barra 7 | 0,9261 | -0,2026 | 0,948     | -12,341   | 0                    | 0       |
| 8     | Barra 8 | 0,9585 | -0,2097 | 0,9812    | -12,341   | 0                    | 0       |

|    |          |        |         |        |         |        |        |
|----|----------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|
| 9  | Barra 9  | 0,8999 | -0,2302 | 0,9289 | -14,347 | -0,295 | -0,166 |
| 10 | Barra 10 | 0,8967 | -0,2341 | 0,9268 | -14,631 | -0,09  | -0,058 |
| 11 | Barra 11 | 0,9118 | -0,2348 | 0,9415 | -14,442 | -0,035 | -0,018 |
| 12 | Barra 12 | 0,915  | -0,2448 | 0,9472 | -14,98  | -0,061 | -0,016 |
| 13 | Barra 13 | 0,907  | -0,2441 | 0,9393 | -15,065 | -0,135 | -0,058 |
| 14 | Barra 14 | 0,8778 | -0,2508 | 0,913  | -15,945 | -0,149 | -0,05  |
| 15 | Barra 15 | 1      | 0       | 1      | 0       | 0,424  | 0,2439 |
| 16 | Barra 16 | 0,9795 | -0,2014 | 1      | -11,616 | 0      | 0,4416 |
| 17 | Barra 17 | 0,9705 | -0,2411 | 1      | -13,952 | 0      | 0,3536 |
| 18 | Barra 18 | 0,9769 | -0,2137 | 1      | -12,341 | 0      | 0,1881 |

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

Tabela 10 – Parâmetros das Máquinas

| Maq | Barra | $X_d$  | $X'_d$ |
|-----|-------|--------|--------|
| 1   | 1     | 0,8979 | 0,2995 |
| 2   | 15    | 0,9500 | 0,850  |
| 3   | 16    | 0,9500 | 0,850  |
| 4   | 17    | 1,150  | 0,1320 |
| 5   | 18    | 1,150  | 0,1320 |

Novamente, para este sistema, o objetivo é analisar a influência das variações da susceptância do dispositivo sobre o desempenho do sistema e a reatância de regime permanente do compensador é suposta nula. Então, a matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores é como mostrada a seguir por meio das matrizes de magnitudes

$$\left| \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}0} \right| = [Y_{ij}^0]; i, j = 1, 2, \dots, 5 \text{ [pu]} \text{ e de ângulos [graus]: } \boldsymbol{\theta}^0 = [\theta_{ij}^0]; i, j = 1, 2, \dots, 5.$$

$$\left| \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}0} \right| = \begin{bmatrix} 1.8385 & 0.4027 & 0.3494 & 0.7291 & 0.5071 \\ 0.4027 & 0.8923 & 0.1321 & 0.2593 & 0.1838 \\ 0.3494 & 0.1321 & 0.8163 & 0.2701 & 0.2010 \\ 0.7291 & 0.2593 & 0.2701 & 1.7470 & 0.6580 \\ 0.5071 & 0.1838 & 0.2010 & 0.6580 & 1.4132 \end{bmatrix}$$

$$\theta^0 = \begin{bmatrix} -88.3111 & 93.1226 & 92.3811 & 89.7050 & 89.3182 \\ 93.1226 & -90.7035 & 91.9433 & 90.7971 & 89.8981 \\ 92.3811 & 91.9433 & -87.9371 & 88.2112 & 86.4116 \\ 89.7050 & 90.7971 & 88.2112 & -80.7678 & 86.4114 \\ 89.3182 & 89.8981 & 86.4116 & 86.4114 & -86.0386 \end{bmatrix}$$

#### 4.4.2 O Dispositivo Instalado na Linha 4-5

Considera-se a seguir a instalação de um TCSC na linha 4-5, conforme mostrado na figura a seguir:

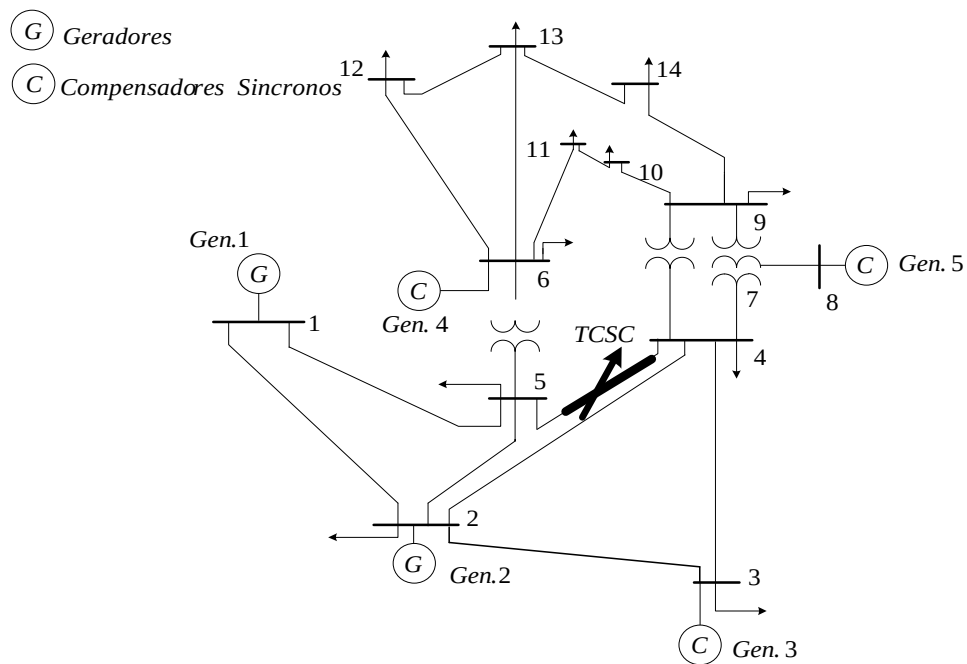


Figura 4.9– IEEE 14 barras e 5 máquinas (Dispositivo Instalado na Linha 4-5).

Onde se obtém as seguintes matrizes dos coeficientes  $K_{CSC\,ij}$  e do deslocamento angular  $\theta_{ij}^0 - \varphi_{CSC\,ij}$ :

$$|K_{CSC}| = \begin{bmatrix} 0.0737 & 0.0045 & 0.0569 & 0.1132 & 0.1393 \\ 0.0045 & 0.0003 & 0.0035 & 0.0070 & 0.0086 \\ 0.0569 & 0.0035 & 0.0439 & 0.0874 & 0.1075 \\ 0.1132 & 0.0070 & 0.0874 & 0.1738 & 0.2139 \\ 0.1393 & 0.0086 & 0.1075 & 0.2139 & 0.2632 \end{bmatrix}$$

$$\theta^0 - \varphi_{\text{CSC}} = \begin{bmatrix} 11.6396 & -132.1773 & 6.8093 & -181.1735 & -0.2324 \\ -132.1773 & 89.2657 & 44.8639 & -144.6487 & 36.8045 \\ 6.8093 & 44.8639 & 2.9893 & -3.8178 & -181.4640 \\ -181.1735 & -144.6487 & -3.8178 & -25.4977 & -12.1227 \\ -0.2324 & 36.8045 & -181.4640 & -12.1227 & -19.1183 \end{bmatrix}$$

Da análise da matriz do deslocamento angular ( $\theta_{ij}^0 - \varphi_{\text{CSC } ij}$ ), observa-se deslocamentos pequenos (12,1° ou menos) entre as máquinas 1 e 3, 1 e 5, 3 e 4, e 4 e 5. Aparece ainda o deslocamento angular entre as máquinas 2 e 5 com 36,8° e 2 e 3 com 44,86°, sendo todos os demais significativamente superiores. Entende-se que a proximidade angular advém do fato de que o compensador está instalado em um caminho elétrico mais direto entre as máquinas que possuem um menor deslocamento angular, que nos casos em que o deslocamento é maior.

A matriz a seguir mostra os Coeficientes de Eficácia do dispositivo.

$$\mathbf{K}_{\text{CSC}}^{\text{ef}} = \begin{bmatrix} 0.0722 & -0.0031 & 0.0565 & -0.1131 & 0.1393 \\ -0.0031 & 0.0000 & 0.0025 & -0.0057 & 0.0069 \\ 0.0565 & 0.0025 & 0.0438 & 0.0872 & -0.1075 \\ -0.1131 & -0.0057 & 0.0872 & 0.1569 & 0.2092 \\ 0.1393 & 0.0069 & -0.1075 & 0.2092 & 0.2487 \end{bmatrix}$$

Os Fatores de efeito têm os valores apresentados na matriz a seguir:

$$\mathbf{F}_{\text{CSC}} = \begin{bmatrix} 0.0392 & -0.0076 & 0.1616 & -0.1552 & 0.2746 \\ -0.0076 & 0.0000 & 0.0188 & -0.0220 & 0.0375 \\ 0.1616 & 0.0188 & 0.0537 & 0.3227 & -0.5346 \\ -0.1552 & -0.0220 & 0.3227 & 0.0898 & 0.3179 \\ 0.2746 & 0.0375 & -0.5346 & 0.3179 & 0.1760 \end{bmatrix}$$

Na matriz dos fatores de efeito, identificam-se como mais afetadas as interações entre as máquinas 1 e 3, 1 e 5, 3 e 4 e 4 e 5.

#### 4.4.3 O Dispositivo Instalado na Linha 1-5

Para fins de exemplificação do sistema de cinco máquinas, considera-se a seguir a instalação de um compensador na linha 1-5, conforme mostrado na figura a seguir:

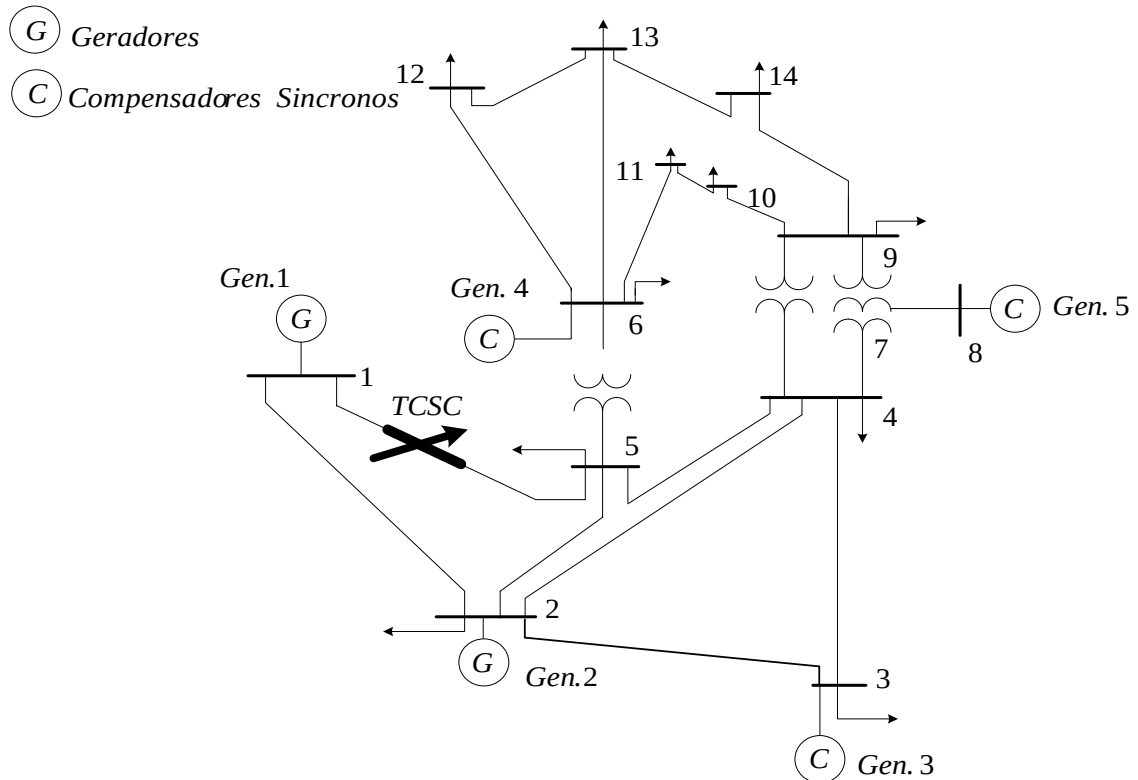


Figura 4.10– IEEE 14 barras e 5 máquinas (Dispositivo Instalado na Linha 1-5).

Onde se obtém as seguintes matrizes dos coeficientes  $K_{CSC\ ij}$  e do deslocamento

angular  $\theta_{ij}^0 - \varphi_{CSC\ ij}$ :

$$|K_{CSC}| = \begin{bmatrix} 0.3380 & 0.0204 & 0.0263 & 0.2100 & 0.1134 \\ 0.0204 & 0.0012 & 0.0016 & 0.0127 & 0.0069 \\ 0.0263 & 0.0016 & 0.0020 & 0.0163 & 0.0088 \\ 0.2100 & 0.0127 & 0.0163 & 0.1304 & 0.0705 \\ 0.1134 & 0.0069 & 0.0088 & 0.0705 & 0.0381 \end{bmatrix}$$

$$\theta^0 - \varphi_{CSC} = \begin{bmatrix} 1.4887 & -166.8044 & -2.7977 & -4.9434 & -4.2776 \\ -166.8044 & 30.1623 & 10.7807 & 7.1051 & 8.2831 \\ -2.7977 & 10.7807 & -6.0738 & -187.0438 & -184.9653 \\ -4.9434 & 7.1051 & -187.0438 & -22.8866 & -189.7868 \\ -4.2776 & 8.2831 & -184.9653 & -189.7868 & -17.0578 \end{bmatrix}$$

Para esse caso onde o dispositivo está instalado na linha 1-5, é possível fazer a análise do deslocamento angular, chegando a conclusões idênticas para os coeficientes de eficácia e para o fator de efeito.

A matriz a seguir mostra os coeficientes de eficácia do dispositivo, e,

$$\mathbf{K}_{\text{CSC}}^{\text{ef}} = \begin{bmatrix} 0.3379 & -0.0199 & 0.0263 & 0.2092 & 0.1131 \\ -0.0199 & 0.0011 & 0.0016 & 0.0126 & 0.0068 \\ 0.0263 & 0.0016 & 0.0020 & -0.0162 & -0.0088 \\ 0.2092 & 0.0126 & -0.0162 & 0.1202 & -0.0694 \\ 0.1131 & 0.0068 & -0.0088 & -0.0694 & 0.0364 \end{bmatrix}$$

Os Fatores de efeito têm os valores apresentados na matriz a seguir:

$$\mathbf{F}_{\text{CSC}} = \begin{bmatrix} 0.1838 & -0.0494 & 0.0751 & 0.2869 & 0.2230 \\ -0.0494 & 0.0012 & 0.0118 & 0.0486 & 0.0369 \\ 0.0751 & 0.0118 & 0.0025 & -0.0600 & -0.0437 \\ 0.2869 & 0.0486 & -0.0600 & 0.0688 & -0.1055 \\ 0.2230 & 0.0369 & -0.0437 & -0.1055 & 0.0257 \end{bmatrix}$$

Existe um deslocamento angular menor que os entre 1 - 4 e 1 - 5 o qual, porém, teve efeito mnos significativo no seu coeficiente de eficácia e no seu fator de efeito. Esse é o caso do deslocamento angular entre as máquinas 1 e 3 que foi de -2,7977. A razão disto é que a magnitude  $|\mathbf{K}_{\text{CSC}}|$  nesse caso ( $|\mathbf{K}_{\text{CSC } 1-3}| = 0,0263$ ) é muito menor do que aquela obtidas para as interações entre as máquinas 1-4 ( $|\mathbf{K}_{\text{CSC } 1-4}| = 0,2100$ ) e 1-5 ( $|\mathbf{K}_{\text{CSC } 1-5}| = 0,1134$ ).



## **4.5 - CONSIDERAÇÕES**

Finalizando a exemplificação, observa-se que os sistemas-testes 1 e 2 têm dimensões diminutas, são radiais e os resultados obtidos são previsíveis e esta é justamente a razão de sua utilização, o que difere do exemplo 3 que é um sistema malhado onde existem vários caminhos elétricos configurando assim uma topologia mais próxima dos sistemas reais. Possibilitou-se com isto a visualização clara da discriminação proporcionada pelo Fator de Efeito entre pares de máquinas muito afetadas e pouco afetadas pela ação do TCSC locado em determinada posição do sistema de transmissão.

## CAPÍTULO 5

---

### 5.1 - CONCLUSÃO

Apresentou-se uma abordagem do problema de estabilidade de SEP, do ponto de vista da capacidade de sincronização e de como os dispositivos FACTS afetam essa capacidade, tratando em especial o TCSC inserido em um ambiente multimáquinas.

Analisaram-se os efeitos deste dispositivo sobre a potência sincronizante, focando as admitâncias de transferência entre as barras internas das máquinas. Definiu-se o coeficiente de eficácia que compõem a variação efetiva da admitância de transferência entre duas máquinas do sistema, considerada uma certa localização do TCSC na rede e com ele se determina a variação da admitância de transferência entre duas máquinas quaisquer para uma variação da reatância do TCSC. Como uma dada variação absoluta da admitância pode resultar em diferentes efeitos sobre o desempenho do sistema, quando aplicada a diferentes conexões, definiu-se o coeficiente de efeito que compõem a variação da admitância de transferência em relação ao seu próprio valor de regime permanente, provendo uma avaliação da importância das variações do TCSC em determinada localização para as interações entre duas máquinas do sistema.

O coeficiente de eficácia e o fator de efeito poderão ser utilizados em procedimentos visando a melhor localização de dispositivos de compensação série em linha de transmissão com objetivo de eliminar e/ou mitigar efeitos de perturbações entre determinadas máquinas ou áreas do sistema, bem como auxiliar no ajuste de controle do dispositivo.

Os estudos de casos foram efetuados com a finalidade de observar o comportamento do Fator de Efeito, visando, além de validar sua utilização para descrever o desempenho do sistema de potência com atuação de um TCSC, considerar sua habilidade em discriminar ligações entre máquinas que são mais severamente afetadas pelo TCSC de outras que são pouco ou nada afetadas. Os resultados foram precisos neste sentido.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros são apresentadas algumas sugestões:

- a utilização do Fator de Efeito para sistemas de maior porte;
- o estudo da utilização do Fator de Efeito, bem como possivelmente outros coeficientes definidos neste trabalho, para análises de desempenho do SEE sob atuação do TCSC;
- emprego do Fator de Efeito para ajuste de parâmetros de um TCSC com vistas ao desempenho dinâmico/transitório do sistema;
- estudos análogos para a consideração de outros dispositivos FACTS;
- implementação de redes neurais, com vista a analisar a melhor localização do Compensador Série;
- análise da estabilidade transitória do SEE com aplicação de faltas.

---

**REFERÊNCIAS**

---

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power system control and stability**. 2.ed. Piscataway: IEEE Press, 2003.

COLVARA L. D.; SÁ L. F. X. Análogo mecânico para sistema de energia elétrica representado por modelo detalhado com regulador de tensão. **Congresso Temático de Dinâmica, Controle e Aplicações**, Bauru. v. 4, Anais, 2005.

ELGERD, O. I. **Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

FESTRAITS E. B. **Consideração da ação de dispositivos FACTS em um método automático de análise de estabilidade de sistemas de energia elétrica**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems**. New York: IEEE Press- John Wiley, 1999. 452p.

IEEE Task Force on Terms & Definitions. Proposed terms & definitions for power system stability. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v.PAS-101, n. 7, p.1894-1898, 1982 .

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

MARQUES, M. M. **Um estudo dos efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas de um sistema de potência multimáquinas**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Sistema interligado nacional**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 20 jun. 2010.

SONG Y. H.; JOHNS A. T. **Flexible AC transmission system (FACTS)**. England: The Institute of Electrical Engineers, 1999. 592p.

STEVENSON J. W.D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

WATANABE E. H.; BARBOSA P. G.; ALMEIDA K. C.; TARANTO G. N. Tecnologia FACTS- tutorial. **SBA Controle & Automação**, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.

**TRABALHO PUBLICADO**

---

SILVA, J. C. ; COLVARA, L. D.; O TCSC em um Sistema de Energia Elétrica  
Multimáquinas: os efeitos sobre a potência sincronizante. (2009), CLAGTEE, Vol 8.

## EXEMPLO: UM SISTEMA DE DUAS MÁQUINAS

Considerando um sistema de duas máquinas conectadas por uma linha com um dispositivo TCSC instalado como ilustrado na Figura 1

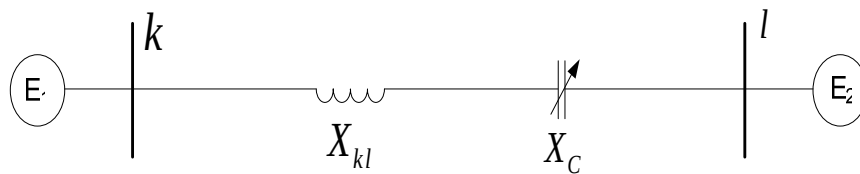


Figura 1 – Sistema de duas máquinas (Diagrama unifilar)

Descrevendo as máquinas pelo modelo clássico, então a reatância efetiva da linha é

$$X_{LT}^{ef} = X_{ser\,kl}^0 - \Delta X_c; X_{ser\,kl}^0 = X_{kl} - X_C^0 \quad (1)$$

e a admitância correspondentes é

$$y_{kl} = -j \frac{1}{X_{LT}^{ef}} = -j \frac{1}{X_{ser\,kl}^0 - \Delta X_c} \quad (2)$$

As admitâncias respectivas à reatância transitória da máquina são

$$y_{d1} = -j \frac{1}{X_{d1}'}; y_{d2} = -j \frac{1}{X_{d2}'} \quad (3)$$

Então, a barra da rede aumentada da matriz admitância é dada pela matriz

$$Y_{augm} = \left[ \begin{array}{cc|cc} y_{d1} & 0 & -y_{d1} & 0 \\ 0 & y_{d2} & 0 & -y_{d2} \\ \hline -y_{d1} & 0 & y_{k\ell} + y_{d1} & -y_{k\ell} \\ 0 & -y_{d2} & -y_{k\ell} & y_{k\ell} + y_{d2} \end{array} \right] \quad (4)$$

E a redução para os nós internos das máquinas é

$$Y_{red} = \left[ \begin{array}{cc} \frac{y_{d1} \left( \frac{y_{k\ell} y_{d2}}{y_{k\ell} + y_{d2}} \right)}{y_{d1} + \frac{y_{k\ell} y_{d2}}{y_{k\ell} + y_{d2}}} & - \frac{y_{d1} y_{d2}}{(y_{d1} + y_{d2}) + \frac{y_{d1} y_{d2}}{y_{k\ell}}} \\ - \frac{y_{d2} y_{d1}}{(y_{d1} + y_{d2}) + \frac{y_{d1} y_{d2}}{y_{k\ell}}} & \frac{y_{d2} \left( \frac{y_{d1} y_{k\ell}}{y_{k\ell} + y_{d1}} \right)}{y_{d2} + \frac{y_{d1} y_{k\ell}}{y_{k\ell} + y_{d1}}} \end{array} \right] \quad (5)$$

A admitância de transferência entre os nós interno das máquinas é então

$$\begin{aligned} Y_{12} &= - \frac{y_{d1} y_{d2}}{(y_{d1} + y_{d2}) + \frac{y_{d1} y_{d2}}{y_{k\ell}}} = - \frac{\left( -j \frac{1}{X'_{d1}} \right) \left( -j \frac{1}{X'_{d2}} \right)}{-j \left( \frac{1}{X'_{d1}} + \frac{1}{X'_{d2}} \right) + \frac{\left( -j \frac{1}{X'_{d1}} \right) \left( -j \frac{1}{X'_{d2}} \right)}{j(X_{ser\,k\ell}^0 - \Delta X_c)}} = \\ &= j \frac{1}{(X'_{d2} + X'_{d1}) + X_{ser\,k\ell}^0 - \Delta X_c} \end{aligned} \quad (6)$$

Este resultado não é surpreendente, uma vez que é o mesmo que o obtido através da utilização do circuito equivalente



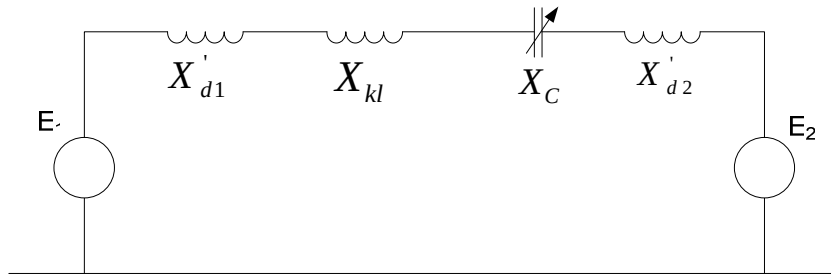


Figura 2 – Sistema de duas máquinas

Deste modo a variação da susceptância de transferência devida a uma variação da reatância do compensador série é dada por.

$$\Delta B_{12} = \frac{1}{(X'_{d2} + X'_{d1}) + X_{ser\ kl}^0 - \Delta X_c} - \frac{1}{(X'_{d2} + X'_{d1}) + X_{ser\ kl}^0} = \quad (7)$$

$$= \frac{\Delta X_c}{[(X'_{d2} + X'_{d1}) + X_{ser\ kl}^0][(X'_{d2} + X'_{d1}) + X_{ser\ kl}^0 - \Delta X_c]}$$

Observa-se que  $\Delta X_c$  nunca deve compensar completamente a reatância da linha, então ela tem de ser inferior  $X_{ser\ kl}^0$ . Neste caso espera-se que seja significativamente inferior a  $(X'_{d2} + X'_{d1}) + X_{ser\ kl}^0$  de modo que se pode escrever

$$B_{12} \cong B_{12}^0 + B_{12}^{0^2} \Delta X_c \quad (8)$$

ou

$$B_{12} \cong B_{12}^0 (1 + B_{12}^0 \Delta X_c) \quad (9)$$

Com o que o fator de efeito é  $B_{12}^0$ .

Conseqüentemente a transferência de potência entre as máquinas é

$$P_{e1-2} \cong E_1 (1 + B_{12}^0 \Delta X_c) B_{12}^0 E_2 \sin \delta_{12} \quad (10)$$

uma vez que

$$Y_{12} = -j \frac{1}{X'_{d2} + X^0_{ser\,kl} - \Delta X_c + X'_{d1}} \quad (11)$$

Com a parte real nula ( $G_{12} = 0$ ), a potência elétrica transferida entre as duas máquinas que compõe a potência sincronizante é

$$P_{e1} = P_{e12} = E_1 (B_{12}^o + B_{12}^{o^2} \Delta X_c) E_2 \sin \delta_{12} \quad (12)$$

ou

$$P_{e1} = P_{e12} = (1 + B_{12}^o \Delta X_c) E_1 B_{12}^o E_2 \sin \delta_{12} \quad (13)$$

As equações (13) e (14) evidenciam a influência direta das variações da susceptância do TCSC na capacidade de sincronização entre as duas máquinas. Observa-se ainda que o Fator de Efeito é

$$K_{CSC\,12}^{efeito} = B_{12}^o \quad (14)$$