

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Estudo do Efeito dos Transformadores de Relação
de Transformação Variável sobre a Capacidade de
Sincronização Intermáquinas”**

Naryanne Rodrigues Peraro

Orientador: Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara

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

Ilha Solteira – SP
Setembro/2010

FICHA CATALOGRÁFICA

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

P426e	Peraro, Naryanne Rodrigues. Estudo do efeito dos transformadores de relação de transformação variável sobre a capacidade de sincronização intermáquinas / Naryanne Rodrigues Peraro. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010 107 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. Transformadores elétricos. 4. Relação de transformação variável. 5. Fator de efeito. 6. ULTC. 7. PS.
-------	---



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Estudo do Efeito dos Transformadores de Relação de Transformação Variável sobre a Capacidade de Sincronização Intermáquinas

AUTORA: NARYANNE RODRIGUES PERARO

ORIENTADOR: Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. SILVIA GALVÃO DE SOUZA CERVANTES

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Estadual de Londrina

Data da realização: 02 de setembro de 2010.

Aos meus pais Naldo e Naida e meus irmãos Nélío e Neandro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me abençoar, dando-me sabedoria e força para vencer mais essa etapa em minha vida e a Nossa Senhora Aparecida pela sua grandiosa intercessão nos momentos de dificuldade.

Ao professor Dr. Laurence Duarte Colvara pela paciência, orientação e todo conhecimento concedido no desenvolvimento dessa dissertação. Agradeço pela oportunidade.

Aos professores Dionízio Paschoareli Júnior e Percival Bueno de Araujo pelas contribuições dadas a este trabalho.

A minha família por acreditar nos meus objetivos, pelo amor e compreensão.

A minha mãe e meu pai pelo incentivo ao estudo, apoio e amor.

Aos meus irmãos Nélcio e Neandro pelo apoio, amor, força, irmandade e confiança.

Ao meu namorado Guilherme pelo carinho, dedicação e paciência.

A todos os amigos que estiveram comigo nessa caminhada, em especial Aline Petean, Augusto, Aline Takiy, João Luiz, Jadiel, Ricardo, Camila, Andréia, Flavilene, Elisabete, Stefanie, Joel e Patrícia.

A UNESP pela ótima qualidade de ensino e aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica que colaboraram para que esse trabalho fosse realizado.

A CAPES pelo suporte financeiro.

RESUMO

O presente trabalho trata da influência de transformadores de relação de transformação variável, o ULTC (*Under Load Tap Changing*) e o PS (*Phase Shifter Transformer*), nas interações entre máquinas em um ambiente multimáquinas. A rede é reduzida às barras internas dos geradores com representação das consequências da ação do ULTC e do PS nas admitâncias de transferência entre máquinas. São determinados coeficientes denominados coeficiente de eficácia e Fator de Efeito, em que se identificam propriedades úteis para avaliar os efeitos da variação da relação de transformação do ULTC e do PS nas interações entre cada par de máquinas do sistema, assim como estabelecimento de lei de controle do próprio ULTC e do PS com vistas a determinado desempenho dinâmico/transitório.

Palavras-chaves: Sistema de energia elétrica. Estabilidade. Capacidade de sincronização. Transformadores. Relação de transformação variável. Fator de efeito. ULTC. PS.

ABSTRACT

This work deals with the influence of the variable ratio transformer, the ULTC (*Under Load Tap Changing*) and the PS (*Phase Shifter Transformer*) in the interactions between machines in a multimachines environment. The network is reduced to the internal busses of generators with representation of the consequences of the PS and the ULTC action in the transfer admittances between machines. Coefficients called effectiveness coefficient and Effect Factor are determined, which have useful properties for evaluating the effects of changes in the transformation ratio of the ULTC and the PS in the interactions between each generic pair of system machines, as well as establishing the control law of the ULTC and the PS overlooking a particular dynamic/transient performance.

Keywords: Electrical power system. Stability. Synchronization capability. Variable ratio transformer. Effect factor. ULTC. PS.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 2.1 – Sistema Multimáquinas.	29
Figura 2.2 - Representação do Sistema Multimáquinas com barras internas e cargas.	29
Figura 2.3 - Estrutura da matriz admitância de barra aumentada	30
Figura 2.4 - Diagrama Fasorial da tensão interna para a máquina i	32
Figura 2.5 – Representação da admitância de transferência	33

Capítulo 3

Figura 3.1– Característica de transferência de potência de um sistema de duas máquinas . . .	38
Figura 3.1(a) – diagrama unifilar	38
Figura 3.1(b) – modelo.	38
Figura 3.1(c) – diagrama fasorial.	38
Figura 3.1(d) – curva de potência versus ângulo.	38
Figura 3.2 – Classificação da estabilidade do sistema de potência	39
Figura 3.3 – Sistema de duas máquinas	41
Figura 3.4 – Ilustração critério de igualdade de área de estabilidade transitória	41
Figura 3.5 - Critério de igualdade de área para ilustrar a margem de estabilidade transitória de um simples sistema de duas máquinas	42
Figura 3.5(a) – sem compensação.	42
Figura 3.5(b) – com compensador ideal no meio da LT	42
Figura 3.5(c) – com um capacitor série	42
Figura 3.5(d) – com um transformador defasador	42

Capítulo 4

Figura 4.1 – Representação do transformador de relação de transformação variável	45
Figura 4.2 – Matriz admitância de barra aumentada com a inclusão do transformador de relação de transformação variável.	47
Figura 4.3 – Representação do ULTC	50
Figura 4.4 – Reordenação de linhas e colunas da matriz admitância aumentada com a inclusão do ULTC.	51
Figura 4.5 – Rede reduzida às barras internas dos geradores e as barras onde o ULTC está instalado.	52
Figura 4.6 – Estrutura da matriz reduzida às barras internas dos geradores e terminais LT com ULTC.	53
Figura 4.7 – Variações da admitância de transferência entre as máquinas i e j devidas às variações da relação de transformação do ULTC	58

Capítulo 5

Figura 5.1 - Representação do PS	64
Figura 5.2 - Reordenação de linhas e colunas da matriz admitância aumentada com a inclusão do PS.	65
Figura 5.3 - Rede reduzida às barras de interesse	66
Figura 5.4 - Estrutura da matriz reduzida às barras internas dos geradores e terminais LT com PS.	67
Figura 5.5 – Efeitos da variação do α_{PS} na admitância de transferência.	68
Figura 5.6 - Variações da admitância de transferência entre as máquinas i e j devidas às variações do ângulo do PS	72

Capítulo 6

Figura 6.1 - Diagrama Unifilar do Sistema Multimáquinas de duas áreas.	77
Figura 6.2 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o ULTC instalado entre as barras 4 e 10	81
Figura 6.3 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o ULTC instalado entre as barras 1 e 5.....	83
Figura 6.4 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o ULTC instalado entre as barras 8 e 9.....	85
Figura 6.5 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o OS instalado entre as barras 4 e 10	87
Figura 6.6 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o PS instalado entre as barras 8 e 9.....	90
Figura 6.7 - IEEE 14 barras e 5 máquinas	92
Figura 6.8 - IEEE 14 barras e 5 máquinas com o ULTC instalado entre as barras 7 e 8	95
Figura 6.9 - IEEE 14 barras e 5 máquinas com o ULTC instalado entre as barras 5 e 6	97
Figura 6.10 - IEEE 14 barras e 5 máquinas com o PS instalado entre as barras 7 e 8	99
Figura 6.11 - IEEE 14 barras e 5 máquinas com o PS instalado entre as barras 4 e 9	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 6.1 – Dados de Linhas do Sistema de Quatro Máquinas	78
Quadro 6.2 – Parâmetros das Máquinas.	78
Quadro 6.3 - Resultados do Cálculo do Fluxo de Potência para o Caso base.	79
Quadro 6.4 – Tensões Internas (atrás de Xld).	79
Quadro 6.5 – Ângulos dos Eixos q.. . . .	79
Quadro 6.6 – Dados de Linhas do Sistema IEEE 14 barras.	91
Quadro 6.7 – Resultados do Cálculo do Fluxo de Potência para o Caso do Sistema IEEE 14 barras	93
Quadro 6.8 – Parâmetros das Máquinas.	94
Quadro 6.9 – Tensões Internas (atrás de Xld).	94
Quadro 6.10 – Ângulos dos Eixos q.. . . .	94

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems

PS – Phase Shifter Transformer

SEE – Sistemas de Energia Elétrica

SVC – Static Var Compensator

TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor

ULTC – Tap Changing Under Load

$\bar{a}$: Relação de transformação variável de um transformador ideal

a : Magnitude da relação de transformação variável

a^0 : Magnitude da relação de transformação variável em condições de regime permanente

A_1 : Área referente à energia acelerante

A_{margem} : Área referente à margem de estabilidade do sistema

A_2 : Área referente a energia desacelerante

$b_{k\ell}$: Susceptância entre as barras genéricas k e ℓ

$\mathbf{B}$: Matriz susceptância de barra

D : Constante de amortecimento

$\mathbf{E}$: Vetor de tensões na barra

E' : Tensão interna

E_G : Tensão do gerador

E_M : Tensão do motor

E'_d : Tensão do eixo direto

E'_q : Tensão do eixo de quadratura

$\mathbf{F}_{\text{TC}}$: Fator de Efeito do ULTC

$\mathbf{F}_{\text{PS}}$: Fator de Efeito do PS

$\mathbf{G}$: Matriz de condutância de barra

i_ℓ : Corrente na barra ℓ

i_k : Corrente na barra k

$\mathbf{I}$: Vetor de injeções de correntes de barra.

I_k : Injeção de corrente na barra k

$\mathbf{I}_g$: vetor de correntes injetadas nas barras internas dos geradores

I_ℓ : Injeção de corrente na barra ℓ

$I_{\ell j}$: Corrente que flui no ramo, do nó ℓ ao nó k

I_{kj} : Corrente que flui no ramo, do nó k ao nó ℓ

$\mathbf{I}_{k,\ell}$: Corrente que flui da barra k para a ℓ

$\overline{\mathbf{K}}_{\text{PS}}$: Coeficiente de sensibilidade do PS

$\mathbf{K}_{\text{PS}}$: Magnitude do coeficiente de sensibilidade do PS

$\overline{\mathbf{K}}_{\text{TC}}$: Coeficiente de sensibilidade do ULTC

$\mathbf{K}_{\text{TC}}$: Magnitude do coeficiente de sensibilidade do ULTC

K_{Pe} : Coeficiente de potência sincronizante referente ao ULTC

$\mathbf{K}_{\text{TC}}^{\text{ef}}$: Coeficiente de eficácia do ULTC

$K_{Pej}^{'}$: Coeficiente de potência sincronizante referente ao PS

$\mathbf{K}_{\text{PS}}^{\text{ef}}$: Coeficiente de eficácia do PS

m: número de barras da rede

M : Constante de inércia

n: Número de geradores

P_1 : Potência quando ocorre o defeito na linha “1”

P_e : Potência elétrica

P_e^{max} : Potência máxima transmitida

P_G : Potência do gerador

P_{Ti} : Potência da turbina

$\mathbf{V}$: Tensão

$\dot{v}_p$: Tensão na barra p

$\dot{v}_k$: Tensão na barra q

$\dot{v}_\ell$: Tensão na barra ℓ

X_T : Reatância indutiva total

X_G : Reatância indutiva do gerador

X_L : Reatância indutiva

X_M : Reatância indutiva do motor

$x_{k\ell}$: Reatância entre as barras genéricas k e ℓ

$z_{k\ell}$: Impedância entre as barras genéricas k e ℓ

$\bar{y}_{k\ell}$: Admitância entre as barras genéricas k e ℓ

$\bar{y}_{\ell k}$: Admitância entre as barras genéricas ℓ e k

$\mathbf{Y}$: Matriz admitância de barra

$\mathbf{Y}_{\text{aum}}$: Matriz admitância de barra da rede aumentada

$\mathbf{Y}_{\text{gg}}$: Matriz admitância de barra dos geradores

$\mathbf{Y}_{\text{gr}}$: Matriz admitância de barra que representa a combinação entre as barras internas dos geradores

$\mathbf{Y}_{rr}$: Matriz admitância de barras que representa as barras da rede

$\mathbf{Y}_{\text{rede}}$: Matriz admitância de barra que representa a rede

$\mathbf{Y}_{\text{red}}$: Matriz admitância de barras da rede reduzida

$\bar{Y}_{ij}$: Admitância de transferência complexa entre as máquinas i e j

Y_{ij} : Magnitude da admitância de transferência entre as máquinas i e j

Y_{ij}^0 : Magnitude da admitância de transferência entre as máquinas i e j em condições de regime permanente

$\bar{Y}_{kk}$: Admitância própria da barra k

$\bar{Y}_{\ell\ell}$: Admitância própria da barra ℓ

$\bar{Y}_{k\ell}$: Admitância de transferência da barra k para a barra ℓ

$\bar{Y}_{\ell k}$: Admitância de transferência da barra ℓ para a barra k

$\bar{Y}_{kk}^{\text{rede}}$: Admitância própria da barra k excluindo a admitância oriunda do transformador de relação de transformação variável

$\bar{Y}_{k\ell}^{\text{rede}}$: Admitância transferência da barra k para a ℓ excluindo a admitância oriunda do transformador de relação de transformação variável

$\bar{Y}_{\ell\ell}^{\text{rede}}$: Admitância própria da barra ℓ excluindo a admitância oriunda do transformador de relação de transformação variável

$\bar{Y}_{kk}^0$: Admitância própria da barra k em condições de regime permanente

$\bar{Y}_{\ell\ell}^0$: Admitância própria da barra ℓ em condições de regime permanente

$\bar{Y}_{k\ell}^0$: Admitância de transferência da barra k para a barra ℓ em condições de regime permanente

$\mathbf{Y}_{\text{int}}$: Matriz admitância de barra reduzida as barras de interesse para o caso do ULTC

$\mathbf{Y}_{\text{g,TC}}$: Matriz admitância de barra que representa a combinação entre às barras internas dos geradores e às barras onde o ULTC foi instalado

$\mathbf{Y}_{(\text{g,TC})\text{rede}}$: Matriz admitância de barra que representa a transferência entre às barras internas dos geradores, às barras onde o ULTC está instalado e a rede

$\mathbf{Y}_{\text{TC,TC}}$: Matriz admitância de barra que representa o ULTC

$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}}$ - Matriz reduzida às barras internas dos geradores para o caso do ULTC

$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0}$ - Matriz reduzida às barras internas dos geradores em condição de regime permanente para o caso do ULTC

$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0'}$: Matriz reduzida às barras internas dos geradores em condição de regime permanente para o caso do PS

$\mathbf{Y}'_{\text{int}}$: Matriz admitância de barra reduzida as barras de interesse para o caso do PS

$\mathbf{Y}_{\text{g,PS}}$: Matriz admitância de barra que representa a transferência entre às barras internas dos geradores e às barras onde o PS foi instalado

$\mathbf{Y}_{(\text{g,PS})\text{rede}}$: Matriz admitância de barra que representa a transferência entre às barras internas dos geradores, às barras onde o PS está instalado e a rede

$\mathbf{Y}_{\text{PS,PS}}$: Matriz admitância de barra que representa o PS

$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}'}$: Matriz reduzida às barras internas dos geradores para o caso do PS

$\bar{y}_{k\ell\text{PS}}$: Admitância entre as barras k e ℓ afetada pela ação do PS

$\bar{y}_{\ell k\text{PS}}$: Admitância entre as barras ℓ e k afetada pela ação do PS

$\bar{y}_{k\ell}^0$: Admitância entre as barras k e ℓ em condições de regime permanente

$\bar{y}_{\ell k}^0$: Admitância entre as barras ℓ e k para condições de regime permanente

$\Delta\bar{y}_{\ell k\text{PS}}$: Variação da admitância entre as barras ℓ e k afetada pela ação do PS

$\Delta\bar{y}_{k\ell\text{PS}}$: Variação da admitância entre as barras k e ℓ afetada pela ação do PS

$\Delta \mathbf{Y}_{TC}$: Matriz que manifesta a atuação do controle do ULTC

$\Delta \mathbf{Y}_{PS}$: Matriz que manifesta a atuação do controle do PS

$\Delta \alpha$: Variação do módulo da relação de transformação variável

Δf_i : Frequência nominal

$\Delta \bar{Y}_{ij}$: Variação da admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j

$\Delta \mathbf{Y}^0$: Variação da admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j em condições de regime permanente para o caso ULTC

$\Delta \mathbf{Y}^0$: Variação da admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j em condições de regime permanente para o caso PS

ΔY_{TC}^{ef} : Variação efetiva da magnitude da admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j incluída pelo ULTC

$\Delta \theta_{PS}^{ef}$: Variação efetiva do ângulo da admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j incluída pelo PS

ΔG : Variação da matriz de condutância de barra

ΔB : Variação da matriz susceptância de barra

δ_i : Posição angular do rotor em relação a uma referência que gira de modo síncrono.

α_{PS} : Ângulo da relação de transformação variável.

α_{PS}^0 : Ângulo da relação de transformação variável em regime permanente.

$\Delta \alpha_{PS}$: Variação do ângulo da relação de transformação variável

θ : Ângulo da admitância de transferência

θ^0 : Ângulo da admitância de transferência em condições de regime permanente

δ : Deslocamento angular entre os rotores das duas máquinas.

δ_G : Ângulo pelo qual o rotor conduz o campo girante do estator.

δ_L : Ângulo entre o campo do estator do gerador e do motor.

δ_M : Ângulo pelo qual o rotor se atrasa do campo girante do estator.

δ_1 : Ângulo referente à curva pré-falta

δ_2 : Ângulo referente à desconexão da linha onde ocorreu a falta.

δ_3 : Ângulo do limite de estabilidade transitória

δ_{crit} : Ângulo do limite de estabilidade transitória

Ω_k : Conjunto de nós adjacentes ao nó k .

Ω_ℓ : Conjunto de nós adjacentes ao nó ℓ .

φ_{TC} : Ângulo do coeficiente de sensibilidade do ULTC

φ_{PS} : Ângulo do coeficiente de sensibilidade do PS

SUMÁRIO

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aspectos gerais de sistemas de energia elétrica	21
1.2 Sincronização e estabilidade transitória	23
1.3 Organização do Trabalho	24

Capítulo 2

Sistema Elétrico de Potência

2.1 Introdução	25
2.2 A Equação de Oscilação	25
2.3 Cargas	26
2.4 Sistema Multimáquinas	27
2.5 Conclusões	34

Capítulo 3

Estabilidade

3.1	Introdução.	35
3.2	O Problema da Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência.	36
3.3	A relação potência versus ângulo.	36
3.4	Estabilidade Transitória x Estabilidade Dinâmica	38
3.5	Melhoria da Estabilidade Transitória pela Atuação da Compensação no Sistema de Transmissão- Caso Ilustrativo de Duas Máquinas	40
3.6	Conclusões.	43

Capítulo 4

Análise do efeito de um ULTC inserido em um Sistema Multimáquinas

4.1	Introdução	44
4.2	O modelo do transformador de relação de transformação variável	45
4.3	Inserindo o transformador de relação de transformação variável em um sistema de potência multimáquinas	47
4.4	Inclusão de um ULTC em um Sistema Multimáquinas	49
4.4.1	<i>O ULTC na rede real</i>	49
4.4.2	<i>Redução da rede conservando os efeitos dinâmicos do ULTC.</i>	51
4.5	Efeitos do ULTC sobre o desempenho do sistema.	59
4.6	Conclusões	62

Capítulo 5

Análise do efeito de um PS inserido em um Sistema Multimáquinas

5.1	Introdução.	63
5.2	Inclusão de um PS em um Sistema Multimáquinas.	64
5.3	Efeitos do PS nas interações entre máquinas	73
5.4	Conclusões	75

Capítulo 6

Exemplos de Aplicação

6.1	Introdução.	77
6.2	Sistema Teste de 4 máquinas	77
6.2.1	<i>Inclusão do ULTC no sistema de 4 máquinas.</i>	<i>80</i>
6.2.2	<i>Inclusão do PS no sistema de 4 máquinas.</i>	<i>86</i>
6.3	Sistema Teste de 5 máquinas	92
6.3.1	<i>Inclusão do ULTC no sistema de 5 máquinas</i>	<i>94</i>
6.3.2	<i>Inclusão PS no sistema de 5 máquinas.</i>	<i>99</i>
6.4	Conclusões.	103

Capítulo 7

Conclusão.....	105
Trabalhos futuros	106
Referências	107
 Anexo - Artigo Publicado.....	 109

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aspectos gerais de Sistemas de Energia Elétrica

O desenvolvimento da sociedade tem levado a contínuo crescimento da demanda de energia e conseqüentemente, exigido maior robustez e confiabilidade dos Sistemas de Energia Elétrica (SEEs). Além disso, a crescente demanda acarreta incremento de fluxo nas linhas de transmissão que operam cada vez mais próximas do limite de capacidade de transmissão e com pequenas margens de segurança de modo que até mesmo pequenas perturbações podem causar grandes transtornos.

Os SEEs são constituídos basicamente de unidades geradoras, linhas de transmissão e cargas, e operam com a finalidade de suprir a demanda de energia elétrica exigida pelos seus consumidores sejam eles residenciais, comerciais ou industriais, de maneira eficiente e segura, respeitando os padrões de confiabilidade e qualidade, o que significa operar dentro de limites especificados de tensão e frequência.

Para atender as exigências da demanda crescente de energia, uma solução lógica seria a construção de novas unidades de geração e novas linhas de transmissão de energia elétrica, que viessem a ampliar a margem segura de operação e desta forma garantir um melhor fornecimento. Contudo, tal solução não possui uma implementação simples, visto que novos investimentos necessitam de altos valores econômicos, já que as novas fontes, tais como rios, jazidas de gás ou petróleo, a serem exploradas se localizam em grande parte muito distante dos grandes centros consumidores. As leis de proteção ambiental têm limitado ainda mais estes novos projetos. Desta forma, o investimento em geração e transmissão não tem acompanhado o crescimento do consumo de energia, acarretando interrupções no fornecimento de energia com qualidade.

Por esses motivos houve a necessidade de linhas de transmissões mais longas, já que muitas vezes as unidades geradoras estão distantes dos centros consumidores. Também as interligações de alguns sistemas já existentes foi efetivada visando a melhora de condições de

segurança. Juntamente com o aumento do sistema tanto em tamanho como em complexidade, tem-se o aumento de anomalias a que os sistemas estão sujeitos, tais como perturbações que o deslocam do seu ponto de equilíbrio (ponto de operação original), podendo o sistema encontrar ou não um novo ponto de equilíbrio após cessada a perturbação (PAI, 1981). Se o sistema não encontrar esse novo ponto de equilíbrio é dito instável; caso contrário é estável. Após a ocorrência de uma perturbação de grande impacto, as máquinas síncronas podem perder o sincronismo e esse problema é referido na literatura como problema de estabilidade transitória (ANDERSON; FOUAD, 1994; BRETAS; ALBERTO, 2000).

Por esses fatores é necessária uma otimização dos sistemas já existentes, levando em consideração o aumento da capacidade de transmissão de potência, assim como o atendimento aos aspectos de qualidade. Entra então em cena a compensação do sistema de transmissão como alternativa a investimentos mais vultosos na expansão do sistema.

Os transformadores de relação de transformação variável permitem alteração da relação de transformação (mudança de taps) que é utilizada para compensar quedas de tensão no sistema e também compensar deslocamento de fase para direcionar o fluxo de potência entre as linhas de transmissão (KUNDUR, 1994).

Neste trabalho considera-se a inclusão de um transformador de relação de transformação variável em um sistema multimáquinas, para análise do problema de estabilidade transitória, com ênfase na capacidade de sincronização (potência sincronizante) entre máquinas do sistema.

O objetivo deste trabalho é analisar o efeito que o transformador de relação de transformação variável exerce sobre a capacidade de sincronização entre duas máquinas genéricas do sistema, dependendo do local onde está instalado o dispositivo. A análise é feita mediante a matriz admitância de barra, observando como a admitância de transferência entre um par de máquinas genérico é afetada.

A análise será feita em particular sobre o efeito de dois transformadores de relação de transformação variável, o Transformador com comutador de taps, referido *como Under Load Tap Changing (ULTC)*, e também pode ser referidos por outros nomes *como On-Load Tap Changing (OLTC)* e *Load Tap Changing (LTC)* (KUNDUR, 1994) e o transformador defasador referido *como Phase Shifter (PS) Transformer* (KUNDUR, 1994), sendo esses inseridos individualmente no sistema multimáquinas.

Primeiramente o sistema é representado pela estrutura com preservação da rede original, e em seguida é inserido no sistema o transformador de relação de transformação

variável. Para fins didáticos a nova rede é reduzida em duas etapas, na primeira etapa a rede é reduzida às barras internas dos geradores e às barras onde o transformador de relação de transformação variável está instalado. Na segunda etapa a rede é reduzida somente às barras internas dos geradores, de maneira que se possa analisar qual a contribuição do transformador de relação de transformação variável para o torque de sincronização entre máquinas do sistema.

A estabilidade transitória está diretamente relacionada com a capacidade de sincronização a qual depende diretamente da admitância de transferência entre as máquinas. As admitâncias de transferência entre as máquinas são influenciadas pela variação da magnitude da relação de transformação variável no caso do ULTC e o no caso do PS a influência se dá pela variação do deslocamento angular.

Portanto este trabalho tem como foco estudar qual é o efeito do ULTC e do PS sobre a capacidade de sincronização das máquinas do sistema por meio da análise da admitância de transferência entre pares de máquinas genéricas. Analisar se o sistema é estável ou instável não faz parte do objetivo deste trabalho.

1.2 Sincronização e estabilidade transitória

Os sistemas de potência estão sujeitos a muitas perturbações como curto-circuitos rompimentos de linhas de transmissão, descargas atmosféricas, entrada e saída de cargas e/ou geradores de grande porte. Após uma perturbação o sistema pode afastar do seu ponto de operação de origem.

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

1.3 Organização do Trabalho

Esse trabalho está organizado da seguinte forma:

No capítulo 2 será feita uma descrição do Sistema Elétrico de Potência, é mostrada a equação de oscilação, bem como a representação da carga do sistema. Neste capítulo também será abordado a representação do Sistema Multimáquinas, já que é nesse ambiente que o transformador de relação de transformação variável será inserido.

No capítulo 3 será feita uma revisão sobre o problema da Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência e também será demonstrado através de um caso ilustrativo de duas máquinas, a melhoria da estabilidade transitória pela atuação da compensação no sistema de transmissão.

O capítulo 4 será dedicado à modelagem dos transformadores de relação de transformação variável inserido em um ambiente multimáquinas, e serão desenvolvidos coeficientes que analisam a influência do ULTC na admitância de transferência entre pares de máquinas do sistema.

No capítulo 5 o PS será inserido em um sistema multimáquinas e será analisada a influência do dispositivo na capacidade de sincronização entre duas máquinas quaisquer, por meio de coeficientes que expressam a influência do PS no desempenho dinâmico/ transitório do sistema.

No capítulo 6 serão apresentados exemplos de aplicações dos transformadores de relação de transformação variável tanto o ULTC quanto o PS. Os testes serão feitos em um sistema teste de 4 máquinas e um de 5 máquinas.

Para finalizar, no capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões desta dissertação e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Sistema Elétrico de Potência

2.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado um breve estudo sobre o sistema elétrico de potência abordando a modelagem do funcionamento do sistema (equação de oscilação), a representação das cargas do sistema e do sistema multimáquinas.

A apresentação do sistema multimáquinas é importante, pois no capítulo 5 os transformadores de relação de transformação variável serão inseridos nesse ambiente. Tanto a modelagem da matriz admitância de barra que representa a rede quanto a redução da mesma é ferramenta desse trabalho e, portanto, nesse capítulo será apresentada a formulação matemática dessas matrizes.

2.2 A Equação de Oscilação

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

Se existir uma diferença entre a potência da turbina e a potência do gerador, essa diferença será usada para a mudança da energia cinética, ou velocidade da unidade, como para dominar o conjugado de amortecimento que se desenvolve principalmente nos enrolamentos de amortecimento.

O comportamento dinâmico do sistema de n máquinas, é descrito por:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{m_i} - P_{e_i} - D_i \frac{d\delta_i}{dt} \quad (2.1)$$

Ou seja,

$$\dot{\delta}_i = \omega_i \quad (2.2)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{m_i} - P_{e_i} - D_i \omega_i] \quad (2.3)$$

Na qual δ_i representa a posição angular do rotor em relação a uma referência que gira à velocidade síncrona, em radianos, D_i é um parâmetro positivo da máquina, medido em megawatt por radiano elétrico por segundo, M_i é a constante de inércia e as potências são medidas em p.u e ω_i é a velocidade angular em radianos por segundo.

A potência elétrica fornecida pelo gerador pode ser escrita da seguinte forma:

$$P_e = VI \cos(\delta) \quad (2.4)$$

Ou seja,

$$P_e = E_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \cos(\delta_{ij} + \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

A matriz admitância Y é de grande importância, pois representa a rede elétrica e através dessa matriz é possível analisar a admitância de transferência entre as máquinas.

2.3 Cargas

Genericamente, as cargas podem ser representadas por impedância constante, corrente constante, potência constante e dinâmica (motor), ou ainda uma combinação de dois ou mais

destes modelos. A escolha do modelo a ser usado está relacionada com a necessidade do estudo que será desenvolvido (KUNDUR, 1994). Como neste trabalho há um interesse em reduzir a matriz admitância da rede, então as cargas são descritas como admitâncias constantes.

2.4 Sistema Multimáquinas

O Sistema Multimáquinas é um sistema composto por n máquinas síncronas (geradores), cargas e a rede de transmissão composta por m barras interconectadas por meio de linhas de transmissão e transformadores.

A potência elétrica P_{ei} fornecida pela i -ésima máquina é descrita por uma função complexa que agrupa as equações diferenciais da própria máquina síncrona e das demais máquinas conectadas por meio das equações algébricas da rede. Algumas suposições são feitas para facilitar o cálculo do equacionamento do sistema multimáquinas (ANDERSON; FOUAD, 1994), como:

- A potência mecânica de entrada é constante;
- O amortecimento e potência assíncrona são desprezíveis;
- O modelo de tensão constante atrás da reatância transitória é válido para a modelagem de máquinas síncronas;
- O ângulo do rotor da máquina síncrona coincide com o ângulo da tensão atrás da reatância transitória.
- As cargas são representadas por impedâncias constantes;

Considerando a rede elétrica em condições de regime permanente, a rede elétrica será representada em sua forma genérica por:

$$\bar{\mathbf{I}} = \bar{\mathbf{Y}}\bar{\mathbf{E}} \quad (2.6)$$

na qual $\bar{\mathbf{I}}$ é um vetor de injeções de correntes de barra de dimensões $n \times 1$, $\bar{\mathbf{E}}$ é um vetor de tensões na barra de dimensões $n \times 1$ e $\bar{\mathbf{Y}}$ a matriz admitância de barra, quadrada de dimensão n .

A matriz admitância de barra complexa pode ser escrita como:

$$\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{G} + j\mathbf{B} \quad (2.7)$$

onde $\mathbf{G}$ é a matriz de condutância de barra e $\mathbf{B}$ a matriz susceptância de barra.

A matriz $\bar{\mathbf{Y}}$ é composta por elementos da diagonal $\bar{Y}_{ii}$ chamados admitâncias próprias das barras e elementos fora da diagonal $\bar{Y}_{ij}$ chamados admitâncias de transferência entre as barras i e j . Por definição tem-se (ANDERSON; FOUAD, 1994; MONTICELLI; GARCIA, 2003), nos casos em que não há acoplamentos mútuos entre elementos da rede:

$\bar{Y}_{ii} = \mathbf{Y}_{ii} \big|_{\underline{\theta}_{ii}} = \mathbf{G}_{ii} + j\mathbf{B}_{ii}$ é a soma das admitâncias ligadas a i -ésima barra.

$\bar{Y}_{ij} = \mathbf{Y}_{ij} \big|_{\underline{\theta}_{ij}} = \mathbf{G}_{ij} + j\mathbf{B}_{ij}$ é a admitância de transferência entre as barras i -ésima e j -ésima barra com o sinal contrário.

A rede é representada pela matriz admitância de barra $\mathbf{Y}_m$, cuja dimensão é igual ao número de barras da rede (m), $\mathbf{Y}_m = [\bar{Y}_{ij}] \in \mathbb{C}^{m \times m}$, como se pode notar na equação (2.8):

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \cdots & \bar{Y}_{1m} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \cdots & \bar{Y}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{m1} & \bar{Y}_{m2} & \cdots & \bar{Y}_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \vdots \\ \dot{V}_m \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Por definição $\dot{I}_i$ com $i = 1, 2, \dots, m$ são correntes injetadas nas m barras da rede e $\dot{V}_i$ com $i = 1, 2, \dots, m$ são tensões das m barras tomadas em relação a uma referência comum, usualmente a terra ou o neutro, não representada na matriz.

As n barras internas das máquinas são adicionadas à rede, logo a rede agora possui $m_e = m + n$ barras. A nova matriz admitância de barra que representa a rede com m_e barras é denominada matriz admitância de barra aumentada $\mathbf{Y}_{\text{aum}}$.

A figura 2.1, ilustra um sistema multimáquinas composto por n máquinas síncronas conectadas a uma rede com m barras.

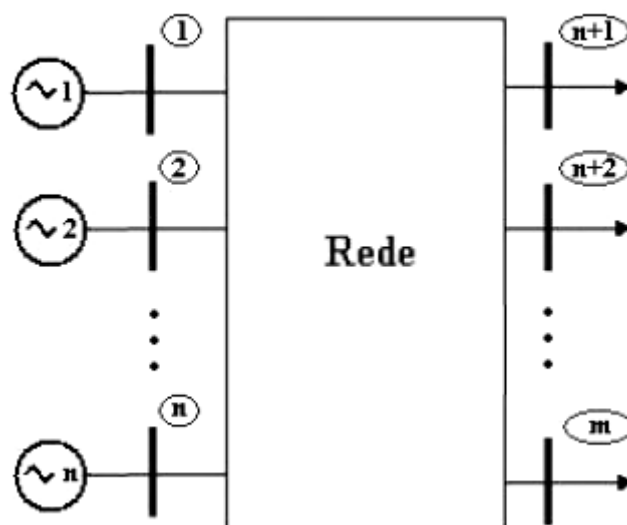


Figura 2.1 – Sistema Multimáquinas

Consideram-se as cargas representadas por admitâncias constantes e também adicionadas à rede, de modo que se tenha a rede de transmissão aumentada representada com preservação da sua estrutura (ANDERSON; FOUAD, 1994), como pode observar na Figura 2.2 (COLVARA, 2005).

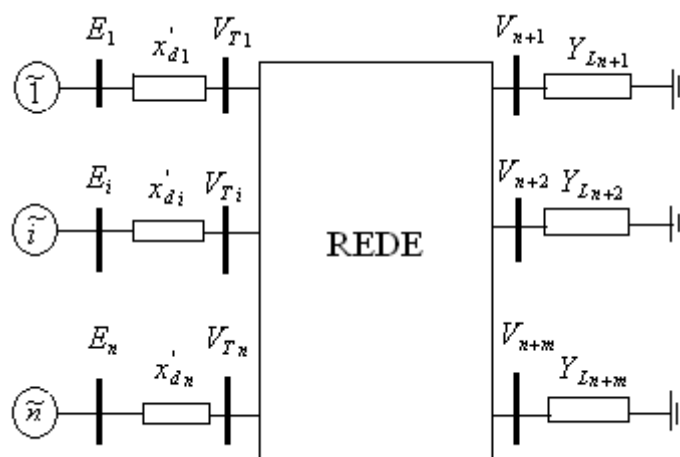


Figura 2.2 - Representação do Sistema Multimáquinas com barras internas e cargas.

A estrutura da matriz da rede aumentada é ilustrada na Figura 2.3.

	1	2		n	n+1	n+2		n+m
1	Y_{gg}				Y_{gr}			
2								
...								
...								
n								
n+1	Y_{rg}				Y_{rr}			
n+2								
...								
...								
n+m								

Figura 2.3 – Estrutura da matriz admitância de barra aumentada

Na figura 2.3 o índice g refere-se às barras internas dos geradores, r às barras da rede e gr a transferência entre as barras internas dos geradores e as barras da rede. Como se pode observar na figura 2.3, a matriz de admitância de barras que representa a rede aumentada é particionada em submatrizes da seguinte forma: a submatriz $\mathbf{Y}_{gg} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ corresponde às barras dos geradores, a $\mathbf{Y}_{gr} \in \mathbb{C}^{n \times m}$ representa a transferência entre as barras internas dos geradores e as barras da rede e $\mathbf{Y}_{rr} \in \mathbb{C}^{m \times m}$ representa as barras da rede. Onde $\mathbb{C}^{n \times n}$ é o conjunto de matrizes quadradas de dimensão n e seus elementos são números complexos e $\mathbb{C}^{m \times m}$ é o conjunto de matrizes quadradas de dimensão m e seus elementos são números complexos.

Da equação (2.6) tem-se que a injeção de corrente na i -ésima barra é escrita por:

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^m \bar{Y}_{ij} \dot{V}_j, \quad (2.9)$$

Como as cargas são incorporadas à rede, de modo que não há injeções de corrente nas barras de carga, somente nas barras de geração, ou seja, $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dots = \dot{I}_m = 0$. A equação da rede aumentada pode ser reescrita de forma compacta como (ANDERSON; FOUAD, 1994).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{gr} \\ \mathbf{Y}_{rg} & \mathbf{Y}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Na qual, $\mathbf{I}_g \in \mathbb{C}^n$ é o vetor de correntes injetadas nas barras internas dos geradores e $\mathbf{E} \in \mathbb{C}^n$ é o vetor das tensões internas dos geradores e $\mathbb{C}^n$ o conjunto de vetores de dimensão n cujos elementos são números complexos.

Expandindo a equação (2.10) tem-se:

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_{gg}\mathbf{E} + \mathbf{Y}_{gr}\mathbf{V} \quad (2.11)$$

e

$$\mathbf{Y}_{rg}\mathbf{E} + \mathbf{Y}_{rr}\mathbf{V} = 0 \quad (2.12)$$

Isolando $\mathbf{V}$ da equação (2.12) pode-se escrever:

$$\mathbf{V} = -\mathbf{Y}_{rr}^{-1}\mathbf{Y}_{rg}\mathbf{E} \quad (2.13)$$

E substituindo a equação (2.12) na equação (2.13) tem-se:

$$\mathbf{I}_g = [\mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{gr}\mathbf{Y}_{rr}^{-1}\mathbf{Y}_{rg}]\mathbf{E} \quad (2.14)$$

Define-se então a matriz reduzida como:

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{gr}\mathbf{Y}_{rr}^{-1}\mathbf{Y}_{rg} \quad (2.15)$$

Das equações (2.14) e (2.15) pode se obter:

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_{red}\mathbf{E} \quad (2.16)$$

A redução da rede ilustrada pelas equações (2.10)-(2.16) é uma técnica conveniente, mas só pode ser usada quando as cargas são representadas por admitâncias ou impedâncias constantes, já que nesse caso a injeção de corrente nas barras de carga é zero. Se as cargas forem representada de uma outra maneira a identidade da barra de carga deve ser mantida (ANDERSON ; FOUAD, 1994).

A admitância de transferência complexa entre as máquinas i e j pode ser escrita na forma polar como:

$$\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} \quad (2.17)$$

e as tensões internas fasoriais são expressas genericamente por:

$$\dot{E}_i = E_i \angle \delta_i \quad (2.18)$$

A figura 2.4 ilustra o diagrama fasorial da tensão interna para a máquina i .

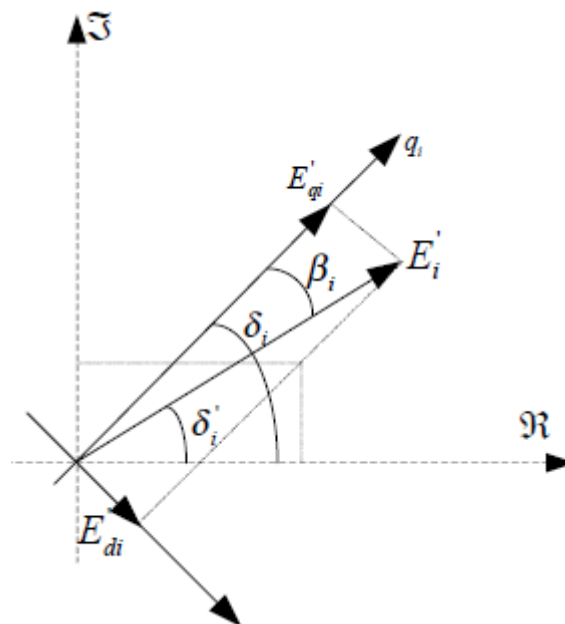


Figura 2.4 – Diagrama Fasorial da tensão interna para a máquina i .

E na figura 2.5 observa-se a admitância de transferência entre as máquinas i e j representada no plano complexo.

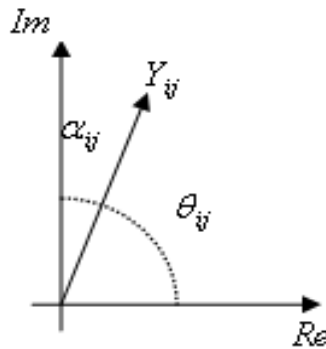


Figura 2.5 - Representação da admitância de transferência

Observando a figura 2.5 têm-se o ângulo complementar é dado por:

$$\alpha_{ij} = \frac{\pi}{2} - \theta_{ij} \quad (2.19)$$

Se a tensão interna da i -ésima máquina genérica tem magnitude E'_i e ângulo δ_i e a corrente na interligação com a máquina j é $\dot{I}_{ji} = \sum_{j=1}^n Y_{ij}(\dot{E}'_i - \dot{E}'_j)$ a potência ativa transferida entre as máquinas i e j é obtida como a parte real de $\bar{S}_{ij} = \dot{E}'_i \dot{I}_{ij}^*$ resultando em:

$$P_{eij} = E'_i Y_{ij} E'_j \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) \quad (2.20)$$

O indicativo (') é utilizado para as tensões e ângulos internos das máquinas.

Considerando o ângulo α_{ij} , a equação (2.20) também pode ser escrita como

$$P_{eij} = P_e^{\max} \sin(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) \quad (2.21)$$

com

$$P_e^{\max} = E'_i Y_{ij} E'_j \quad (2.22)$$

2.5 Conclusões

Este capítulo foi dedicado a representação do sistema elétrico de potência, apresentando a equação de oscilação que descrevem o funcionamento das máquinas e feitos alguns comentários sobre a representação das cargas. O desenvolvimento da redução da matriz admitância de barra foi apresentado porque nos capítulos posteriores será feita a análise da admitância de transferência entre duas máquinas genéricas através da matriz admitância de barra reduzida.

Como o transformador de relação de transformação variável será implementado em um ambiente multimáquinas, houve a necessidade da representação do sistema multimáquinas. Todas as considerações feitas neste capítulo foram necessárias, para análise futura da influência do transformador de relação de transformação variável sobre a potência sincronizante entre máquinas, principal foco desse trabalho.

Capítulo 3

Estabilidade

3.1 Introdução

A necessidade cada vez maior de energia elétrica, em especial nos últimos anos, faz com que os SEE's operem muito próximo dos seus limites, tornando o estudo de estabilidade imprescindível, especialmente ao considerar novas tecnologias que vêm justamente a propiciar a operação do sistema sem pesados investimentos em expansão da transmissão, mas por meio de compensadores introduzidos com vistas a dotar o sistema antigo de maiores capacidades. Neste sentido vem a introdução dos chamados dispositivos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems).

Este capítulo é destinado ao estudo de estabilidade e serão abordados os principais conceitos de estabilidade, como o problema de estabilidade dos SEEs, a relação potência – ângulo já que o sincronismo entre as máquinas síncronas depende da estabilidade do ângulo do rotor, estabilidade dinâmica e a estabilidade transitória.

Um caso ilustrativo de duas máquinas é mencionado, para verificar a melhoria da estabilidade transitória com a atuação da compensação em série, shunt e defasagem angular, já que será utilizada uma compensação de defasagem angular no desenvolver desse trabalho. Destaca-se que a compensação com o transformador de relação de transformação variável será utilizada para analisar o efeito desse dispositivo sobre a admitância de transferência entre duas máquinas genéricas.

3.2 O Problema da Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência

As mudanças no cenário energético, fez despontar um sistema interligado complexo, onde as unidades geradoras de energia são distantes dos grandes centros consumidores, acarretando problemas de estabilidade.

O Sistema de Energia Elétrica opera em um ponto de equilíbrio estável, e permanecerá indefinidamente neste ponto até que uma perturbação o remova desse estado. Após ser submetido a uma perturbação e essa cessada, o sistema poderá se aproximar de um novo ponto de equilíbrio aceitável, assim o sistema é dito estável, por outro lado se o sistema afastar-se indefinidamente de um possível ponto de operação o sistema tornar-se-á instável (PAI, 1981).

A capacidade que os sistemas elétricos de potência têm de manter-se em equilíbrio sob condições normais de operação e também a de atingirem um novo ponto de equilíbrio aceitável após serem submetidos a perturbações, é nomeada estabilidade (KUNDUR, 1994; SONG; JOHNS, 1999).

3.3 A Relação Potência versus Ângulo

A estabilidade do ângulo do rotor é a habilidade que as máquinas síncronas têm para permanecerem em sincronismo. Um fator fundamental neste problema é a maneira pela qual a potência de saída das máquinas síncronas variam de acordo com as oscilações de seus rotores.

Uma importante característica que influencia a estabilidade do sistema elétrico de potência é uma relação não-linear entre a troca de potência e a posição angular do rotor da máquina síncrona. A figura 3.1(a) ilustra um sistema elétrico de potência simplificado (KUNDUR, 1994), que consiste em duas máquinas síncronas conectadas por uma linha de transmissão com reatância indutiva X_L e resistência desprezível. A máquina 1 é um gerador que faz a alimentação de potência para o motor síncrono que é a máquina 2. Esse modelo é utilizado para o estudo da transferência de potência do gerador para o motor.

A transferência de potência do gerador (máquina 1) para o motor (máquina 2) é dada em função do deslocamento angular (δ) entre os rotores das duas máquinas, representado

pela equação (3.1). O deslocamento angular depende de três componentes: ângulo interno do gerador δ_G , diferença angular entre as tensões terminais do gerador e do motor δ_L e ângulo interno do motor δ_M .

$$\delta = \delta_G + \delta_L + \delta_M \quad (3.1)$$

A figura 3.1(b) mostra um diagrama unifilar usado para determinar a relação entre a potência e o ângulo (KUNDUR, 1994).

O diagrama fasorial que mostra a relação entre a tensão do gerador e o motor é ilustrado na figura 3.1 (c).

A potência transferida do gerador para o motor é dada por:

$$P_e = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (3.2)$$

onde:

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad (3.3)$$

Na figura 3.1(d), têm-se a curva que relaciona o ângulo e a potência, obtida da equação (3.2), sendo que a potência varia com o seno do deslocamento angular. A transferência de potência aumenta de acordo com o aumento do ângulo até um valor máximo, quando o valor do ângulo é igual a $\frac{\pi}{2}$ e após este valor, o crescimento do ângulo resulta na diminuição da transferência de potência, caracterizando uma relação não linear. Obviamente, quando o ângulo é zero não há transferência de potência.

A magnitude da máxima potência transferida é diretamente proporcional a tensão interna da máquina e inversamente proporcional a reatância entre as tensões como se pode observar na equação (3.2), incluindo a reatância da linha de transmissão que conecta as duas máquinas e as reatâncias entre as máquinas (KUNDUR, 1994).

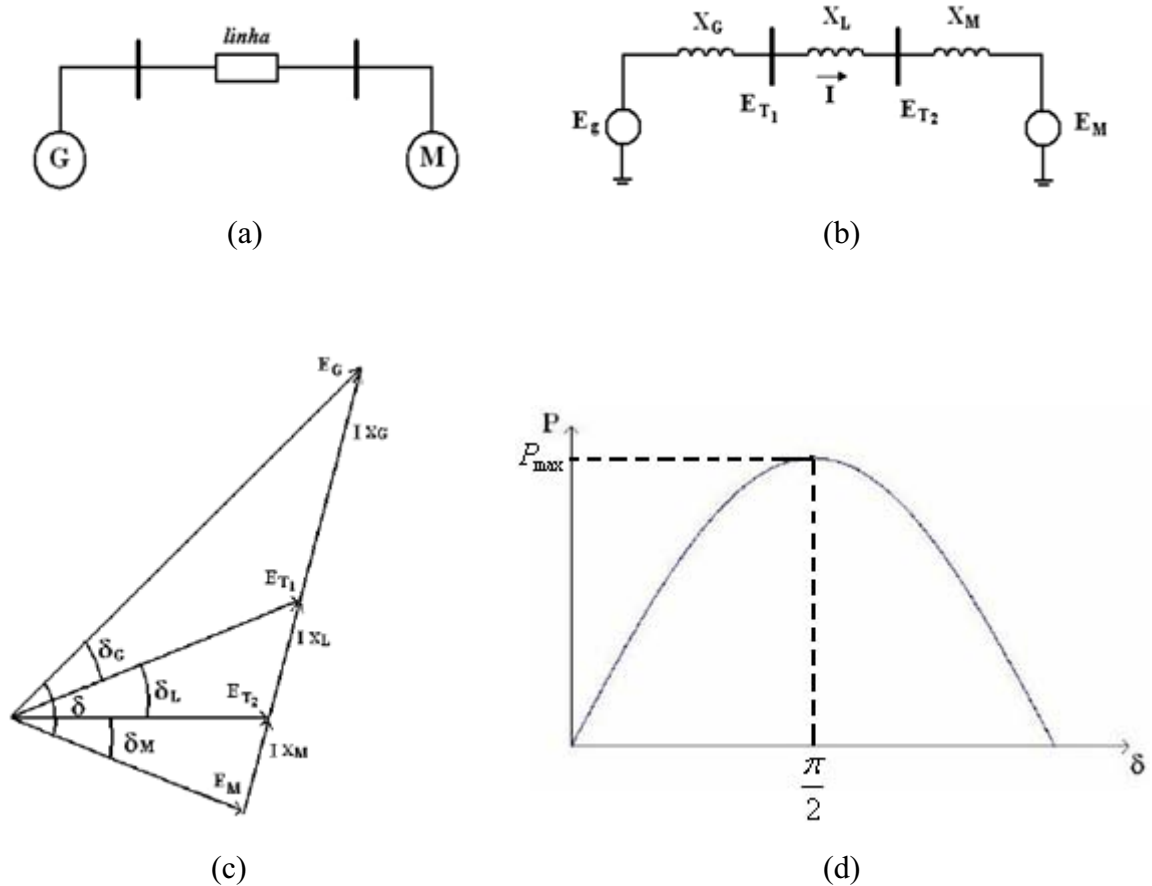


Figura 3.1 – Característica de transferência de potência de um sistema de duas máquinas (a) diagrama unifilar (b) modelo (c) diagrama fasorial (d) curva de potência versus ângulo.

3.4 Estabilidade Transitória x Estabilidade Dinâmica

Os problemas de estabilidade podem ser classificados em estabilidade de ângulo e tensão (SONG; JOHNS, 1999). A estabilidade de ângulo é interpretada pelas dinâmicas dos rotores dos geradores síncronos e seus sistemas de controle, já a estabilidade de tensão é interpretada pelo comportamento dinâmico das cargas do sistema. A figura 3.2 representa a classificação do sistema de potência em relação à estabilidade (KUNDUR, 1994).

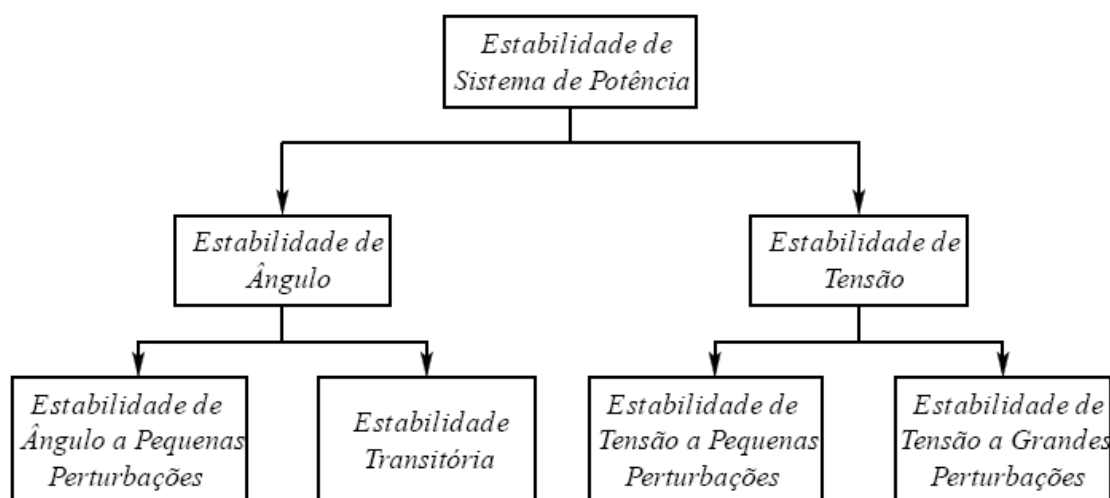


Figura 3.2 - Classificação da estabilidade do sistema de potência

Neste trabalho considera-se a estabilidade angular e como mostra a figura 3.2 os problemas de estabilidade angular podem ser estudados sob dois diferentes aspectos: estabilidade transitória e estabilidade dinâmica (PAI, 1981; SONG; JOHNS, 1999).

O termo Estabilidade Dinâmica (ANDERSON; FOUAD, 1994; BRETAS; ALBERTO, 2000; KUNDUR, 1994), é usado para descrever a resposta de um sistema após a ocorrência de uma pequena perturbação, esse problema pode ser analisado tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Neste caso as equações são linearizadas em torno de um ponto de equilíbrio, e o modelo matemático utilizado para análise é um conjunto de equações diferenciais lineares.

Os fenômenos que seguem a ocorrência de uma grande e súbita perturbação, como por exemplo um curto circuito no sistema, estão associados à estabilidade transitória (ANDERSON; FOUAD, 1994; BRETAS; ALBERTO, 2000 KUNDUR, 1994), e esses fenômenos são analisados no domínio do tempo. O tempo de análise varia de uma fração de segundos, quando a estabilidade de primeira oscilação é determinada, até períodos maiores que 10 segundos, quando é analisado a estabilidade de múltiplas oscilações.

A característica fundamental da estabilidade transitória é manter o sincronismo entre as máquinas durante um curto intervalo de tempo, após uma súbita perturbação. Neste caso as não-linearidades do sistema não podem ser desprezadas, de modo que as técnicas utilizadas para análise de estabilidade transitória levam em conta o conjunto de equações diferenciais não lineares (PAI, 1981).

Do ponto de vista da estabilidade transitória, esse trabalho vem contribuir com o estudo do desempenho do SEE sob a atuação do transformador de relação de transformação

variável (PS e ULTC), com ênfase, na maneira como esse transformador afeta as interações entre máquinas do sistema, com vistas como esse transformador interfere na capacidade de sincronização entre as máquinas.

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

O efeito da compensação shunt, em série e o controle angular podem trazer benefícios para o desempenho transitório do sistema e essa melhoria pode ser avaliada pelo critério de igualdade das áreas. O critério de igualdade de área pode ser explicado através de um sistema simples de duas máquinas e duas linhas como mostra a figura 3.3 e das correspondentes curvas P versus δ como mostra a figura 3.4. Assumindo que o sistema completo é caracterizado pela curva P versus δ . Na curva “a” (pré-falta) o sistema opera no ângulo de equilíbrio δ_1 transmitindo a potência P_1 quando ocorre o defeito na linha “1” como ilustra a figura 3.4. Durante a falta o sistema é caracterizado por P versus δ na curva “b” (em falta), durante esse período a potência elétrica diminui significativamente enquanto a potência mecânica fornecida para a máquina permanece constante resultando na aceleração do gerador e no aumento do ângulo de transmissão que era δ_1 no sistema original para δ_2 quando os disjuntores desconectam a linha onde ocorreu a falta. Durante a falta o gerador absorve a energia acelerante representada pela área A_1 . Após a eliminação da falta, o sistema é caracterizado pela curva “c” (pós-falta). No ângulo δ_2 , o gerador começa desacelerar e o ângulo δ continua aumentando devido à energia cinética armazenada no rotor da máquina. O ângulo máximo é alcançado em δ_3 quando a energia desacelerante, representada pela A_2 , torna-se igual à energia acelerante representada pela área A_1 . Em $\delta_3 = \delta_{crit}$ têm-se o limite de estabilidade transitória. A área A_{margem} entre δ_3 e δ_{crit} representa a margem de estabilidade do sistema.

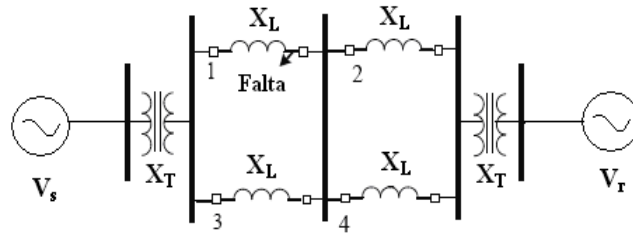


Figura 3.3 – Sistema de duas máquinas

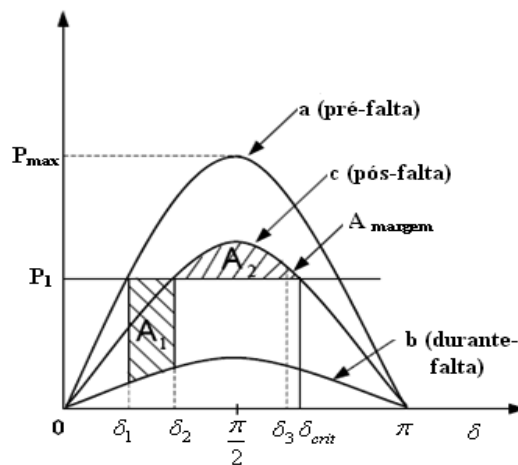


Figura 3.4 - Ilustração critério de igualdade de área de estabilidade transitória

No estudo de estabilidade transitória, o nível de transferência de potência e o tempo crítico de eliminação de uma falta podem ser determinados pelas características da curva $P \times \delta$ do sistema pós falta.

As figuras 3.5a a 3.5d representam respectivamente o sistema sem compensação, com compensação ideal shunt do ponto médio, com capacitor série e com um transformador defasador como ilustrado em (SONG; JOHNS, 1999).

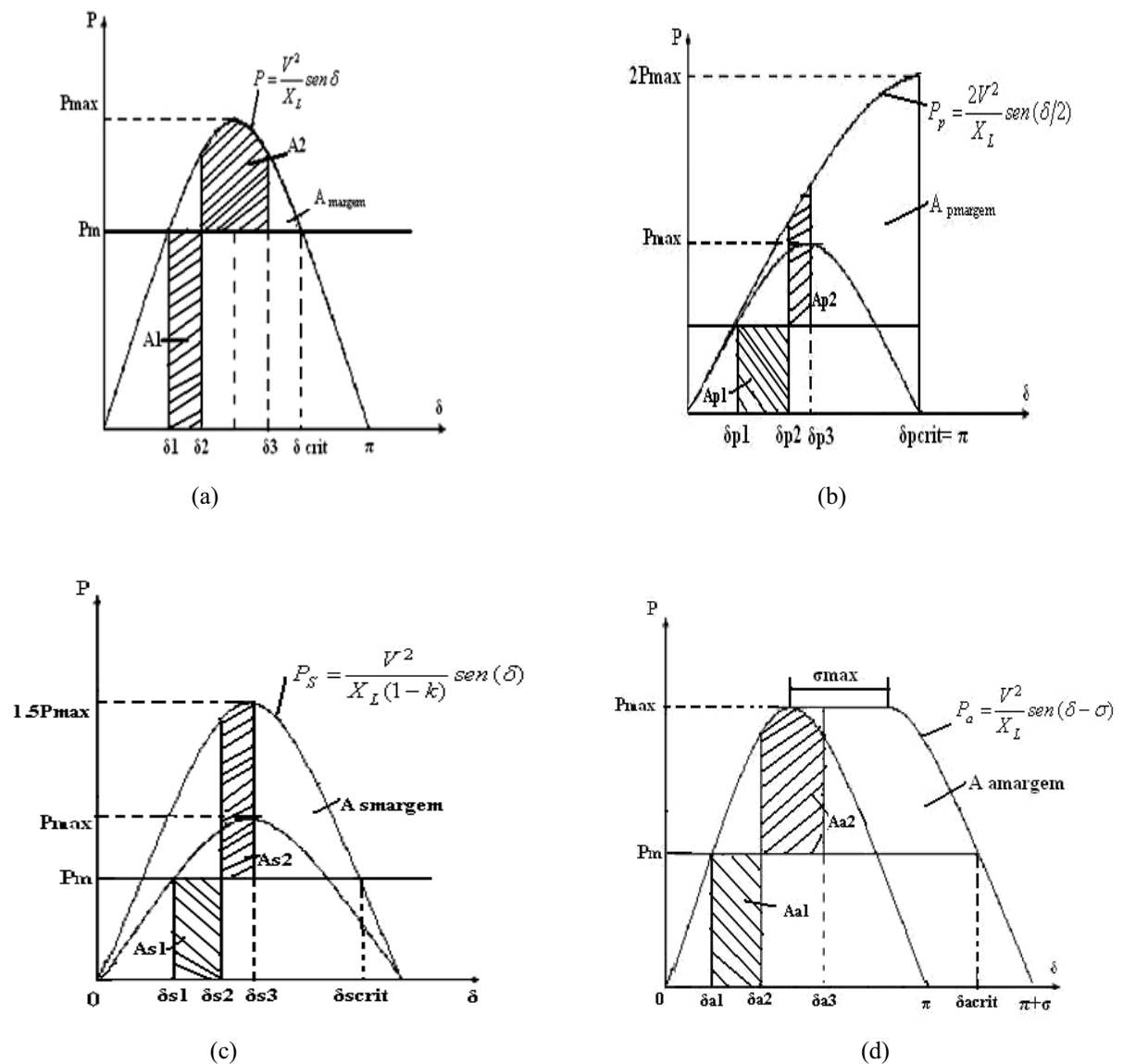


Figura 3.5 - Critério de igualdade de área para ilustrar a margem de estabilidade transitória de um simples sistema de duas máquinas (a) sem compensação (b) com compensador ideal shunt no meio da LT (c) com um capacitor série (d) com um transformador defasador.

As Figuras mostram o critério de igualdade de área aplicado ao estudo de um curto circuito eliminado sem abertura de linha, onde a área A_1 é a área de aceleração e a área A_2 a área de desaceleração, os quatro sistemas estão sujeitos a uma mesma falta com mesmo tempo de duração.

Observa-se a melhoria proporcionada pela compensação através do acréscimo da margem de estabilidade indicada pela área A_{margem} .

Como visto, as três compensações adicionam um aumento substancial da margem de estabilidade transitória em relação ao sistema não compensado.

Focando o objetivo deste trabalho, nota-se através dessas ilustrações a importância da instalação de um transformador de relação de transformação variável em um sistema simples

de duas máquinas. Entretanto, ao se considerar um sistema real, multimáquinas, há uma dificuldade em visualizar estes efeitos tanto no desempenho global do sistema como nas interações entre máquinas ou áreas do sistema, e não se encontra na literatura especializada abordagens deste problema que sem dúvida é de alto interesse, uma vez que é importante se analisar a influência do dispositivo sobre o desempenho do sistema.

Por isso, há um grande interesse em estudar como um dispositivo instalado em uma localização determinada da rede influencia no comportamento dinâmico e/ou transitório do sistema, principalmente em saber qual (is) máquina(s) são mais ou menos afetadas pelo dispositivo. Estas informações podem ser extremamente úteis para escolher uma boa localização do dispositivo e para realizar ajustes dos parâmetros de acordo com um critério de desempenho.

3.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados alguns aspectos referentes ao problema de estabilidade, bem como algumas formas de como os compensadores podem interferir na característica de estabilidade do sistema. Para isto, considerou-se um caso ilustrativo de duas máquinas, onde é visível a melhoria da estabilidade após os três tipos de compensações, shunt, série e defasagem angular. Nos capítulos seguintes será apresentada a compensação através dos transformadores de relação de transformação variável.

Capítulo 4

Análise do efeito de um ULTC inserido em um Sistema Multimáquinas

4.1 Introdução

Neste capítulo será abordada a inclusão dos transformadores com comutação de taps sob carga (ULTC – Under Load Tap Changing), nos sistemas elétricos pela adição de sua representação na matriz admitância de barra da rede e, o que é mais importante, será considerada a influência que eles exercem sobre o comportamento dinâmico/transitório do sistema multimáquinas. Para isto, será em primeiro lugar considerada a rede representada com sua estrutura original (configuração) preservada e nesta instalado o transformador de relação de transformação variável. Na sequência, a rede é reduzida às barras internas dos geradores mediante um procedimento que mantém os efeitos do transformador nas admitâncias de transferência entre máquinas, assim obtendo-se informações sobre o modo como o dispositivo interfere nas interações entre máquinas na medida em que afeta a capacidade de sincronização entre elas.

Os transformadores de relação de transformação variável, como o próprio nome sugere, são transformadores que permitem alterar a relação de transformação mediante mudanças de taps ou através de circuitos de eletrônica de potência, o que os inclui na categoria de dispositivos FACTS. Com a possibilidade de selecionar diferentes valores da relação de transformação em operação, estes transformadores são eficazes para ajustar a magnitude de tensão ou fluxo de potência de acordo com certa especificação ou lei de controle (KUNDUR, 1994).

Neste trabalho considera-se a relação de transformação variável de um transformador ideal na proporção de $1:\bar{a}$ sendo $\bar{a}$ um número complexo $\bar{a} = a \angle \alpha_{PS}$, onde a representa a magnitude da relação de transformação variável e α_{PS} representa o ângulo da relação de transformação variável. Pelo fato de considerar a relação de transformação variável um valor complexo, dois casos particulares podem ser considerados.

Suponha-se que $\alpha_{PS} = 0$. Com isto tem-se que $\bar{a} = a$; logo a relação de transformação variável é um valor real, resultando no caso do “*Under Load Tap Changing (ULTC) Transformer*”. No entanto se considerar $a = 1$, têm-se que $\bar{a} = 1 \angle \alpha_{PS}$, resultando no caso do “*Phase Shifter (PS) Transformer*”.

Na representação do ULTC, a variação na relação de transformação é feita adicionando um incremento Δa ao valor da relação de transformação do transformador em condição de regime permanente (STAGG ; EL ABIAD, 1968). O ULTC contribui com uma pequena alteração na magnitude da tensão, geralmente no intervalo de $\pm 10\%$ (KUNDUR, 1994) e deste modo afetam as interações entre as máquinas conectadas à rede por modificação das admitâncias de transferência entre elas com consequência direta na capacidade de sincronização e torques sincronizantes.

Neste capítulo serão definidos coeficientes que analisam a influência do ULTC sobre a capacidade de sincronização entre as máquinas.

4.2 O modelo do transformador de relação de transformação variável

O transformador de relação de transformação variável genérico é representado por uma admitância ou impedância em série com um transformador ideal, cuja relação de transformação variável é $1 : a \angle \alpha_{PS}$ como ilustra a figura 4.1.

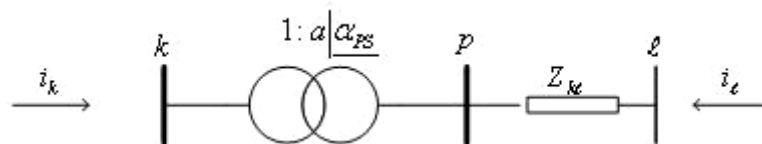


Figura 4.1 - Representação do transformador de relação de transformação variável

Considerando os terminais do transformador de relação de transformação variável genérico pode escrever que (KUNDUR, 1994):

$$\frac{\dot{v}_p}{\dot{v}_k} = a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \rightarrow \dot{v}_p = \dot{v}_k a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \quad (4.1)$$

sendo $\dot{v}_p$ a tensão na barra p, $\dot{v}_k$ a tensão na barra q e $\dot{v}_\ell$ a tensão na barra ℓ .

Considerando que não há perda de potência no transformador ideal, tem-se que:

$$\dot{v}_k \dot{i}_k^* = -\dot{v}_p \dot{i}_\ell^* \rightarrow \dot{v}_k \dot{i}_k^* = -\dot{v}_k a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \dot{i}_\ell^* \quad (4.2)$$

onde $\dot{i}_k$ é a corrente injetada na barra k e $\dot{i}_\ell$ é a corrente injetada na barra ℓ .

A injeção de corrente na barra k é escrita como:

$$\dot{i}_k = -a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \dot{i}_\ell = -a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \bar{y}_{k\ell} (\dot{v}_\ell - \dot{v}_p) \quad (4.3)$$

onde $\bar{y}_{k\ell}$ é a admitância de transferência entre as barras k e ℓ .

Substituindo $\dot{v}_p$ da equação (4.1) na equação (4.3) tem-se

$$\dot{i}_k = a^2 \bar{y}_{k\ell} \dot{v}_k - a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \bar{y}_{k\ell} \dot{v}_\ell \quad (4.4)$$

Considerando a equação (4.3) e isolando $\dot{i}_\ell$ têm-se:

$$\dot{i}_\ell = \frac{\dot{i}_k}{-a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right|} \quad (4.5)$$

Substituindo a equação (4.4) na equação (4.5) temos:

$$\dot{i}_\ell = -a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \bar{y}_{k\ell} \dot{v}_k + \bar{y}_{k\ell} \dot{v}_\ell \quad (4.6)$$

Colocando as equações (4.4) e (4.6), na forma matricial têm-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_k \\ \dot{i}_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 \bar{y}_{k\ell} & -a \left| -\alpha_{PS} \bar{y}_{k\ell} \right| \\ -a \left| \alpha_{PS} \bar{y}_{k\ell} \right| & \bar{y}_{k\ell} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_k \\ \dot{v}_\ell \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

que é a forma encontrada em KUNDUR (1994).

4.3 Inserindo o transformador de relação de transformação variável em um sistema de potência multimáquinas.

Considera-se um sistema de energia elétrica composto por n máquinas conectadas a uma rede de m barras. A rede é representada por uma matriz quadrada de dimensão $(m+n)$, nomeada matriz admitância de barra aumentada $\mathbf{Y}_{\text{aum}}$, como descrita no capítulo 2.

Um transformador de relação de transformação variável é inserido entre as barras k e ℓ pertencentes a essa rede. A estrutura da matriz que representa a rede aumentada com a inclusão do transformador de relação de transformação variável é ilustrada na figura 4.2, onde se nota que as $(n+k)$ -ésima e a $(n+\ell)$ -ésima linhas e colunas da matriz, indicadas por traços pontilhados, são referentes às barras terminais do transformador.

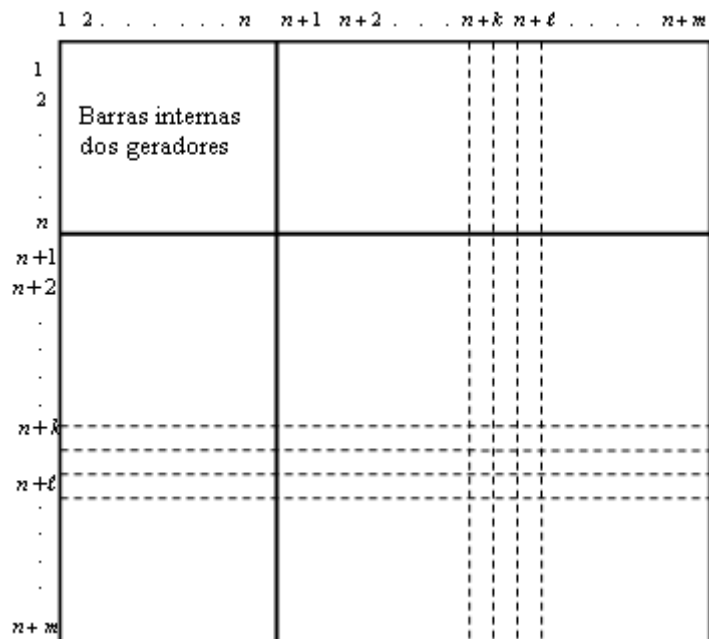


Figura 4.2 - Matriz admitância de barra aumentada com a inclusão do transformador de relação de transformação variável.

As injeções de correntes nas barras k e ℓ , tomadas como barras genéricas de uma rede, são dadas pelas somas das correntes nos ramos conectados à referida barra, como:

$$I_k = \sum_{j \in \Omega_k} I_{kj}; I_\ell = \sum_{j \in \Omega_\ell} I_{\ell j} \quad (4.8)$$

onde Ω_k é o conjunto dos nós adjacentes ao nó k , Ω_ℓ é o conjunto dos nós adjacentes ao nó ℓ , I_{kj} é a corrente que flui no ramo, do nó k ao nó j e $(I_{\ell j})$ é a corrente que flui no ramo, do nó ℓ ao nó j .

Deste modo a corrente injetada no nó k , incluindo o transformador de relação de transformação variável é expressa por:

$$I_k = \sum_{\substack{j \in \Omega_k \\ j \neq k; j \neq \ell}} \bar{y}_{kj} (\dot{V}_k - \dot{V}_j) + \dot{i}_k \quad (4.9)$$

similarmente a corrente injetada no nó ℓ , com a inclusão do transformador de relação de transformação variável é:

$$I_\ell = \sum_{\substack{j \in \Omega_\ell \\ j \neq \ell; j \neq k}} \bar{y}_{\ell j} (\dot{V}_\ell - \dot{V}_j) + \dot{i}_\ell \quad (4.10)$$

Os elementos da matriz admitância de barra, têm a forma usualmente utilizada na literatura especializada, enquanto que, com $\dot{i}_k$ e $\dot{i}_\ell$ obtidos de (4.7), o transformador de relação de transformação variável incluso entre os nós k e ℓ leva a alterações nas admitâncias próprias das referidas barras que ficam dadas por:

$$\bar{Y}_{kk} = \sum_{\substack{j \in \Omega_k \\ j \neq k; j \neq \ell}} \bar{y}_{kj} + a^2 \bar{y}_{k\ell} \quad (4.11)$$

$$\bar{Y}_{\ell\ell} = \sum_{\substack{j \in \Omega_\ell \\ j \neq \ell; j \neq k}} \bar{y}_{\ell j} + \bar{y}_{k\ell} \quad (4.12)$$

e nas admitâncias de transferência entre essas barras são:

$$\bar{Y}_{k\ell} = -a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \bar{y}_{k\ell} \quad (4.13)$$

$$\bar{Y}_{\ell k} = -a \left| \underline{\alpha_{PS}} \right| \bar{y}_{k\ell} \quad (4.14)$$

Observa-se que, no caso de relação de transformação complexa, a submatriz que contém a representação do transformador é não simétrica, como se encontra na literatura especializada (KUNDUR, 1994).

Um fato importante a ser considerado é que a situação no sistema multimáquinas é muito diferente do bem conhecido e explorado caso de sistema de duas máquinas (muitas vezes sendo uma delas uma barra infinita), em que existe uma única conexão a ser considerada. Ocorre que, no sistema de n máquinas existem $\frac{n(n-1)}{2}$ conexões entre máquinas a serem consideradas e expressas por meio da respectiva admitância de transferência. Deste modo, dada a posição do transformador de relação de transformação variável na rede, o efeito se dá mais acentualmente em alguma(s) admitância(s) de transferência que em outras. Avaliar estes efeitos tem grande utilidade para analisar o desempenho do sistema, bem como para estabelecer lei de controle das variações da relação de transformação com vistas à estabilidade dinâmica e/ou transitória do sistema.

4.4 Inclusão de um ULTC em um Sistema Multimáquinas

4.4.1 O ULTC na rede real

A figura 4.3 ilustra a inclusão do ULTC entre as barras genéricas k e ℓ da rede original do sistema, ou seja, com a preservação da estrutura.

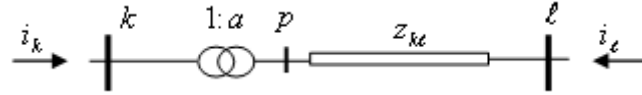


Figura 4.3 - Representação do ULTC

O modelo do transformador descrito na seção 4.1, é assim inserido na matriz admitância de barra. Como neste caso a relação de transformação é dada por um número real, considera-se $\alpha_{PS} = 0$ nas equações (4.11), (4.13) e (4.14), com o que os elementos da matriz admitância de barra afetados pela ação do ULTC são:

$$\bar{Y}_{kk} = \sum_{\substack{j \in \Omega_k \\ j \neq k; j \neq \ell}} \bar{y}_{kj} + a^2 \bar{y}_{k\ell} \quad (4.15)$$

$$\bar{Y}_{k\ell} = \bar{Y}_{\ell k} = -a \bar{y}_{k\ell} \quad (4.16)$$

Observa-se na equação (4.16) a presença da relação de transformação do transformador ideal do ULTC, o que evidencia a influencia do ULTC sobre as admitâncias de transferência entre as barras terminais do próprio transformador. Resta determinar como a atuação do ULTC se reflete nas interações entre máquinas do sistema e isto será desenvolvido adiante neste trabalho.

A atuação do ULTC se dá por mudança na relação de transformação variável seguindo uma lei de controle, tal como obter a magnitude da tensão desejada em uma barra específica. A atuação efetiva se dá por meio da adição de um incremento Δa na relação de transformação variável. Então a relação de transformação variável do ULTC pode ser expressa por $a = a^0 + \Delta a$, sendo a^0 o valor da relação de transformação variável especificado para a operação normal (regime permanente) e Δa a variação da relação de transformação, determinada por um dispositivo de controle mediante uma certa lei de atuação.

4.4.2 Redução da rede conservando os efeitos dinâmicos do ULTC.

O objetivo é obter a representação da rede reduzida às barras internas das máquinas, conservando os efeitos da atuação do ULTC sobre as admitâncias de transferência o que significa manter os efeitos sobre a capacidade de sincronização entre máquinas do sistema. Inicialmente, e em favor da clareza de exposição, faz-se uma reordenação de barras na rede, de modo que as barras genéricas onde o ULTC está instalado sejam a $(n+1)$ -ésima e $(n+2)$ -ésima linha e coluna da matriz. A estrutura da nova matriz admitância da rede aumentada é ilustrada pela figura 4.4. Note-se que a matriz $\mathbf{Y}_{g,TC}$ é quadrada de dimensão $(n+2)$, $\mathbf{Y}_{(g,TC)rede}$ tem dimensões $((n+2) \times (m-2))$ e $\mathbf{Y}_{rede}$ é quadrada de dimensão $(m-2)$.

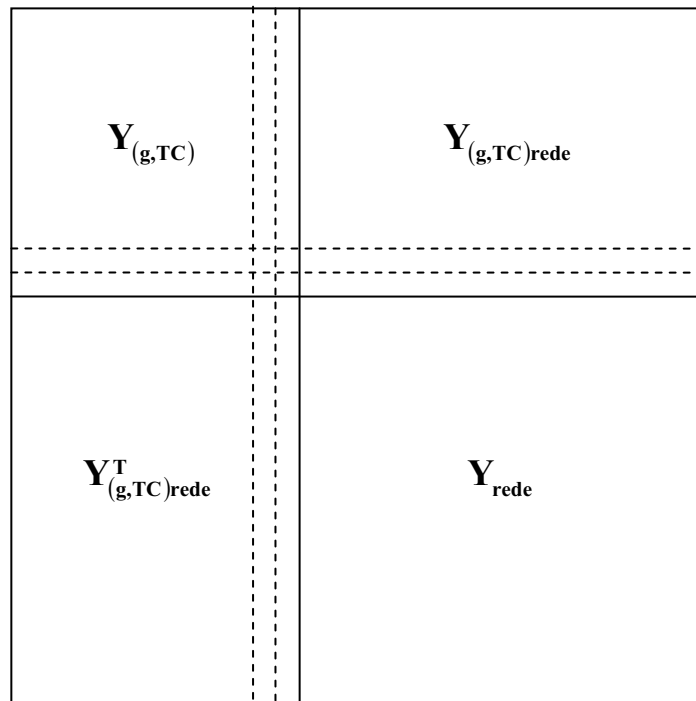


Figura 4.4 - Reordenação de linhas e colunas da matriz admitância aumentada com a inclusão do ULTC.

Como o propósito do estudo é analisar as interações entre máquinas por meio das respectivas admitâncias de transferência então é de grande importância que a matriz que descreve a rede possa ser reduzida às barras internas das máquinas. Com este propósito, as cargas são representadas por admitâncias constantes e estas admitâncias são incorporadas à

rede, de modo que a injeção de correntes nestas barras seja nula e a matriz de admitância da rede seja então reduzida (ANDERSON; FOUAD, 1994).

Inicialmente, define-se o conjunto de barras de interesse, constituído pelas barras internas dos geradores e as barras terminais da linha de transmissão onde está instalado o ULTC. Uma vez que o interesse de análise reside nestas barras, as demais são eliminadas, de modo que a rede fica reduzida às barras de interesse como ilustrado na Figura 4.5. Assim, têm-se representadas exclusivamente as máquinas do sistema e o dispositivo cujos efeitos sobre as interações entre máquinas se deseja avaliar. A representação matricial desta rede é expressa pela matriz admitância de barra de interesse obtida como:

$$\mathbf{Y}_{\text{int}} = \mathbf{Y}_{\text{g,TC}} - \mathbf{Y}_{(\text{g,TC})\text{rede}} \mathbf{Y}_{\text{rede}}^{-1} \mathbf{Y}_{(\text{g,TC})\text{rede}}^T \quad (4.17)$$

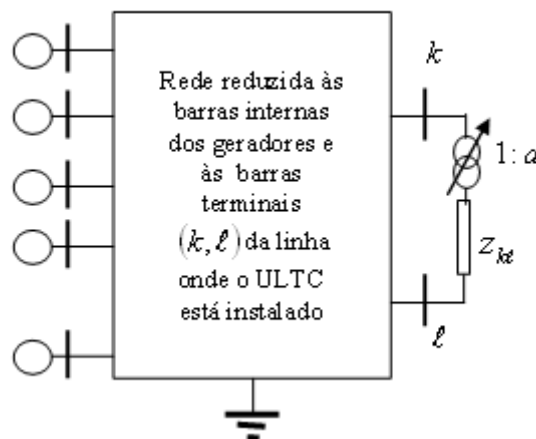


Figura 4.5 - Rede reduzida às barras internas dos geradores e as barras onde o ULTC está instalado.

A estrutura da matriz admitância de barra reduzida às barras de interesse é representada na figura 4.6, sendo as seguintes as dimensões das partições: $\mathbf{Y}_{\text{gg}}$ ($n \times n$); $\mathbf{Y}_{\text{g,TC}}$ ($n \times 2$); $\mathbf{Y}_{\text{TC,TC}}$ (2×2).

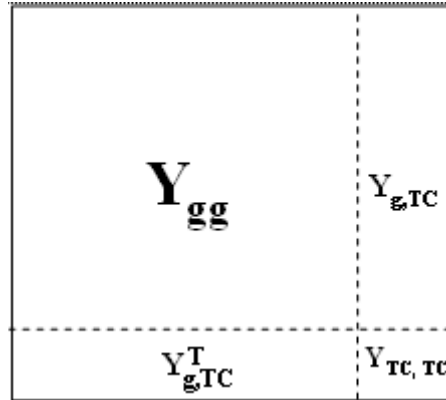


Figura 4.6 - Estrutura da matriz reduzida às barras internas dos geradores e terminais LT com ULTC.

É importante observar que os efeitos da atuação do ULTC estão presentes nos elementos da submatriz $\mathbf{Y}_{TC,TC}$ que contêm termos dos tipos dados nas equações (4.11) a (4.13), enquanto que todas as demais submatrizes são constantes, ou seja, não são afetadas pela ação do ULTC. A equação da rede reduzida às barras de interesse, então, pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{I}_{k,\ell} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{g,TC} \\ \mathbf{Y}_{g,TC}^T & \mathbf{Y}_{TC,TC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{V}_{k,\ell} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Uma vez que as cargas são tomadas como admitâncias constantes e incorporadas à rede, não há injeção de corrente nas barras terminais da linha $k - \ell$, então $\mathbf{I}_{k,\ell} = [0 \ 0]^T$ de onde vem que:

$$\mathbf{V}_{k,\ell} = -\mathbf{Y}_{TC,TC}^{-1} \mathbf{Y}_{g,TC}^T \mathbf{E} \quad (4.19)$$

Substituindo (4.19) na equação matricial (4.18) têm-se

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}} \mathbf{E} \quad (4.20)$$

onde $\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}}$ é matriz admitância da rede reduzida às barras internas dos geradores afetada pelas variações da relação de transformação do ULTC contidas na submatriz $\mathbf{Y}_{TC,TC}$, dada por:

$$\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}} = \mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{g,TC} \mathbf{Y}_{TC,TC}^{-1} \mathbf{Y}_{g,TC}^T \quad (4.21)$$

Enfatiza-se que as sub-matrizes $\mathbf{Y}_{gg}$ e $\mathbf{Y}_{g,TC}$, são resultantes da redução da matriz aumentada e portanto afetadas pelas barras já eliminadas, mas não são afetadas pelas variações do ULTC, de modo que seus elementos tem valores constantes. A influência das variações da relação de transformação do ULTC se manifesta na sub-matriz $\mathbf{Y}_{TC,TC}$, quadrada de dimensão 2 e simétrica, que é :

$$\mathbf{Y}_{TC,TC} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{kk}^{\text{rede}} + a^2 y_{k\ell} & \bar{Y}_{k\ell}^{\text{rede}} - a \bar{y}_{k\ell} \\ \bar{Y}_{k\ell}^{\text{rede}} - a \bar{y}_{k\ell} & \bar{Y}_{\ell\ell}^{\text{rede}} + \bar{y}_{k\ell} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

onde o superscrito ($^{\text{rede}}$) indica valores relacionados às conexões dos nós k e ℓ à rede, excluído em cada um a conexão com o outro terminal do ULTC a qual é expressa por meio do termo contendo $y_{k\ell}$.

Para a determinação da matriz reduzida por meio da expressão (4.21) é necessária a inversão da matriz $\mathbf{Y}_{TC,TC}$, que é obtida como:

$$\mathbf{Y}_{TC,TC}^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{\ell\ell}^{\text{rede}} & -(\bar{Y}_{k\ell}^{\text{rede}} - a \bar{y}_{k\ell}) \\ -(\bar{Y}_{k\ell}^{\text{rede}} - a \bar{y}_{k\ell}) & \bar{Y}_{kk}^{\text{rede}} + a^2 \bar{y}_{k\ell} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Sabendo que $a = a^0 + \Delta a$, onde a^0 é o valor de regime permanente da relação de transformação variável pode escrever:

$$\det = \det^0 + F(\Delta a) \quad (4.24)$$

sendo

$$\det^0 = \left[(\bar{Y}_{kk}^0 + a^{02} \bar{y}_{k\ell}) \bar{Y}_{\ell\ell}^0 - (\bar{Y}_{k\ell}^0 - a^0 \bar{y}_{k\ell})^2 \right] \quad (4.25)$$

com $\bar{Y}_{kk}^0 = \bar{Y}_{kk}^{rede} + a^{02} \bar{y}_{kl}$ e

$$F(\Delta a) = \left[2(a^0 \bar{Y}_{\ell\ell}^0 + \bar{Y}_{kl}^0) + (\bar{Y}_{\ell\ell}^0 - \bar{y}_{kl}) \Delta a \right] \bar{y}_{kl} \Delta a \quad (4.26)$$

onde $(^0)$ indica valores em condições de regime permanente.

Sendo ainda $\bar{Y}_{kl}^0 = \bar{Y}_{kl}^{rede} - a^0 \bar{y}_{kl}$ e $\bar{Y}_{\ell\ell}^0 = \bar{Y}_{\ell\ell}^{rede} + \bar{y}_{kl}$ a equação (4.23) pode ser reescrita como:

$$\mathbf{Y}_{TC,TC}^{-1} = \frac{\det^0}{\det^0 + F(\Delta a)} \left\{ \frac{1}{\det^0} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{\ell\ell}^0 & -(\bar{Y}_{kl}^0) \\ -(\bar{Y}_{kl}^0) & \bar{Y}_{kk}^0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\det^0} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & (2a^0 + \Delta a) \end{bmatrix} \bar{y}_{kl} \Delta a \right\} \quad (4.27)$$

A equação (4.21) pode ser escrita com $\mathbf{Y}_{TC,TC}^{-1}$ dada por (4.27) como:

$$\mathbf{Y}_{gg}^{red} = \mathbf{Y}_{gg} - k_{TC} \mathbf{Y}_{g,TC} \left[\frac{1}{\det^0} \begin{bmatrix} Y_{\ell\ell}^0 & -(Y_{kl}^0) \\ -(Y_{kl}^0) & Y_{kk}^0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\det^0} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & (2a^0 + \Delta a) \end{bmatrix} \bar{y}_{kl} \Delta a \right] \mathbf{Y}_{g,TC}^T \quad (4.28)$$

com

$$k_{TC} = \frac{\det^0}{\det^0 + F(\Delta a)} \quad (4.29)$$

Mais convenientemente, pode-se estabelecer a admitância de transferência entre as barras internas genéricas i e j como

$$\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ij}^0 + \Delta \bar{Y}_{ij} \quad (4.30)$$

sendo estas admitâncias de transferência elementos da matriz admitância reduzida final, obtida como:

$$\mathbf{Y}_{gg}^{red} = \mathbf{Y}_{gg}^{red0} + \Delta \mathbf{Y}_{TC} \quad (4.31)$$

onde $\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0}$ é a matriz reduzida às barras internas dos geradores para a condição de regime permanente, ou seja, com $\Delta a = 0$. Os elementos de $\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0}$ são constantes, ou seja, esta matriz representa a rede reduzida sem a atuação de controle do ULTC e pode ser escrita como:

$$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}^0} = \mathbf{Y}_{\text{gg}} + \Delta \mathbf{Y}^0 \quad (4.32)$$

com

$$\Delta \mathbf{Y}^0 = -\frac{1}{\det^0} \mathbf{Y}_{\text{g,TC}} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{\ell\ell}^0 & -(\bar{Y}_{k\ell}^0) \\ -(\bar{Y}_{k\ell}^0) & \bar{Y}_{kk}^0 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{g,PS}}^T \quad (4.33)$$

Já $\Delta \mathbf{Y}_{\text{TC}}$ em (4.31) é a matriz que manifesta a atuação do controle do ULTC, ou seja, é através dessa matriz que se expressa a influência do ULTC sobre as admitâncias da rede reduzida e pode ser escrita como:

$$\Delta \mathbf{Y}_{\text{TC}} = -\frac{\bar{y}_{k\ell} \Delta a}{\det^0} \mathbf{Y}_{\text{g,TC}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & (2a^0 + \Delta a) \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{g,TC}}^T \quad (4.34)$$

É de grande importância destacar que cada elemento ΔY_{TCij} da matriz $\Delta \mathbf{Y}_{\text{TC}}$, depende unicamente de Δa . Logo, as variações da admitância de transferência entre as máquinas i e j e da admitância própria de qualquer barra são afetadas pelas variações da relação de transformação do ULTC, e esta relação é representada por intermédio do coeficiente $\bar{K}_{TCij}$, obtido de (4.34) e dado por:

$$\bar{K}_{TCij} = \left. \frac{dY_{ij}}{d(\Delta a)} \right|_{\Delta a=0} = A_{TCij} - 2 \frac{(a^0 \bar{Y}_{\ell\ell}^0 + \bar{Y}_{k\ell}^0)}{(\det^0)} \bar{y}_{k\ell} \Delta Y_{ij}^0 \quad (4.35)$$

com

$$A_{TCij} = -\left[\frac{1}{\det^0} \left[(2a^0 + \Delta a) \bar{Y}_{i,\ell} \bar{Y}_{j,\ell} + \bar{Y}_{i,k} \bar{Y}_{j,\ell} + \bar{Y}_{i,\ell} \bar{Y}_{j,k} \right] \right] \bar{y}_{kl} \quad (4.36)$$

Tendo a^0 valor próximo de 1 e usualmente $\Delta a \ll 1$, Δa pode ser desconsiderado diante de $2a^0$, com o que $\bar{K}_{TCij}$ é um parâmetro que representa a sensibilidade da admitância de transferência do par de máquinas (i,j) na rede reduzida em relação às variações da relação de transformação do ULTC instalado entre as barras k e ℓ da rede original (com preservação da estrutura).

Os elementos genéricos ΔY_{TCij} expressam a variação da admitância de transferência entre as barras genéricas (i,j) em função da variação Δa da relação de transformação do ULTC, através do coeficiente $\bar{K}_{TC}$ como:

$$\Delta Y_{TCij} \cong \bar{K}_{TCij} \Delta a \quad (4.37)$$

Como $\bar{K}_{TCij}$ é número complexo, pode ser escrito como:

$$\Delta Y_{TCij} \cong |K_{TCij}| \Delta a \angle \varphi_{TCij} \quad (4.38)$$

sendo

$$\varphi_{TCij} = \text{ângulo}(\bar{K}_{TCij}) \quad (4.39)$$

Então a admitância de transferência entre os nós internos das máquinas i e j pode ser expressa por:

$$Y_{ij} \angle \theta_{ij} = Y_{ij}^0 \angle \theta_{ij}^0 + K_{TC} \angle \varphi_{TCij} \Delta a \quad (4.40)$$

. A figura 4.7 mostra a influência da ação do ULTC sobre as admitâncias de transferência entre máquinas i e j genéricas.

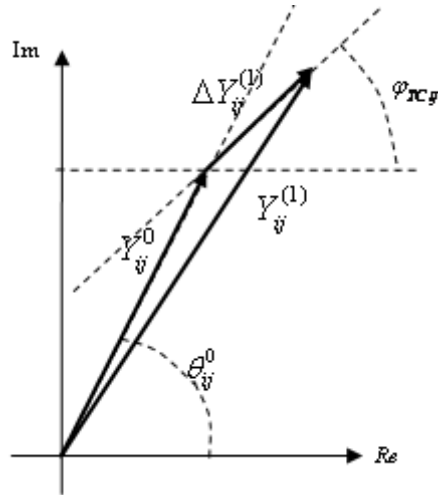


Figura 4.7 - Variações da admitância de transferência entre as máquinas i e j devidas às variações da relação de transformação do ULTC.

Nota-se que tanto a magnitude $K_{TC\,ij}$ como o ângulo $\varphi_{TC\,ij}$ são constantes, portanto as variações da admitância de transferência ΔY_{ij} em função das variações da relação de transformação do ULTC dependem diretamente de Δa e ocorrem sobre a linha de inclinação $\varphi_{TC\,ij}$ no plano complexo das admitâncias.

Nota-se na Figura 4.7 que as variações da relação de transformação inserida pelo ULTC afetam somente a magnitude da variação da admitância de transferência

A variação da admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j também pode ser escrita como:

$$\Delta Y_{ij} = \Delta G_{ij} + j\Delta B_{ij} \quad (4.41)$$

$$\Delta G_{ij} = \text{real}(K_{TC})\Delta a \quad (4.42)$$

$$\Delta B_{ij} = \text{imag}(K_{TC})\Delta a \quad (4.43)$$

Sabendo que a admitância de transferência entre as máquinas i e j pode sofrer variações em magnitude e ângulos, reescreve-se a equação (4.30) como:

$$\bar{Y}_{ij} = (Y_{ij}^0 + \Delta Y_{ij}) \angle \theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij} \quad (4.44)$$

Devido à variação de $\bar{Y}_{ij}$ em função da inclusão do ULTC temos que:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{ij} &= \bar{Y}_{ij}^0 + \bar{K}_{TCij} \Delta a \\ &= \left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{TCij} \right) \underbrace{\left(\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{TCij} \right)}\end{aligned}\quad (4.45)$$

4.5 Efeitos do ULTC sobre o desempenho do sistema

A variação efetiva da magnitude da admitância de transferência é:

$$\Delta Y_{TCij}^{ef} = Y_{ij} - Y_{ij}^0 \quad (4.46)$$

A quantidade ΔY_{TCij}^{ef} representa a variação efetiva da magnitude da admitância de transferência entre as máquinas i e j .

Então a potência elétrica transmitida entre as máquinas i e j pode ser escrita como:

$$P_{eij} = E_i \left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{TCij}^{ef} \right) E_j \sin \left(\delta_{ij} + \alpha_{ij}^0 + \Delta \alpha_{ij} \right) \quad (4.47)$$

A partir da potência elétrica calcula-se o coeficiente de potência sincronizante como:

$$K_{Peij} = \left. \frac{\partial P_{eij}}{\partial \delta_{ij}} \right|_{\Delta \delta=0} = E_i \left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{TCij}^{ef} \right) E_j \cos \left(\delta_{ij}^0 + \alpha_{ij} \right) \quad (4.48)$$

A grandeza K_{Peij} é conhecida como capacidade de sincronização ou coeficiente de potência sincronizante entre as máquinas i e j . Nota-se que o coeficiente de potência sincronizante entre as máquinas genéricas i e j depende da variação efetiva da magnitude da admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j a qual, por sua vez é influenciada pela relação de transformação variável inserida pelo ULTC. Evidencia-se neste ponto que as

equações (4.47) e (4.48) mostram claramente a influência do ULTC na sincronização intermáquinas por meio da variação efetiva da admitância de transferência.

A potência transmitida entre as máquinas i e j pode também ser representada na forma particionada a seguir, onde a primeira parcela está relacionada com a condição de regime permanente e a segunda parcela que depende da variação da relação de transformação do ULTC.

$$P_{eij} = E_i' Y_{ij}^0 E_j' \sin(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) + E_i' (K_{TCij} \Delta a) E_j' \sin(\delta_{ij} + \alpha_{ij}) \quad (4.49)$$

A variação efetiva da magnitude da admitância de transferência pode ser obtida como:

$$\Delta Y_{TCij}^{ef} \cong K_{TCij}^{ef} \Delta a \quad (4.50)$$

A equação (4.50) expressa a variação efetiva da magnitude da admitância de transferência entre as barras internas das máquinas i e j , decorrente da variação Δa da relação de transformação variável do ULTC por intermédio de um novo índice denominado Coeficiente de Eficácia K_{TCij}^{ef} , criado para analisar qual a eficácia da ação do ULTC para a sincronização entre as máquinas i e j .

O Coeficiente de Eficácia da relação de transformação variável do ULTC pode ser obtido como:

$$K_{TCij}^{ef} = K_{TCij} \cos(\theta_{ij}^0 - \varphi_{TCij}) \quad (4.51)$$

Definido à semelhança do Coeficiente de Eficácia da ação de um SVC (COLVARA; MARQUES, 2009; MARQUES, 2009) ou de um TCSC (SILVA; COLVARA, 2009).

A função do Coeficiente de Eficácia é determinar a participação efetiva das variações da relação de transformação do ULTC sobre a admitância de transferência entre cada par de máquinas genéricas i e j do sistema multimáquinas. É um coeficiente de extrema significância, pois através do mesmo tem-se a avaliação da eficácia da atuação do ULTC quanto à interação entre máquinas, mesmo para uma rede de grande complexidade.

Embora com alta eficácia, ou seja, as variações da relação de transformação do ULTC resultando em variações de magnitude absoluta significativa em determinada admitância de

transferência, o efeito pode ser de menor importância diante da magnitude original da mesma ou vice-versa. Por isso é mais interessante a informação da importância relativa da contribuição das variações da relação de transformação do ULTC em relação à magnitude da admitância de transferência original. Define-se então o Fator de Efeito $F_{TC\,ij}$ como:

$$F_{TC\,ij} = \frac{K_{TC\,ij}^{ef}}{Y_{ij}^0} \quad (4.52)$$

Esse coeficiente é importante para analisar a influência do TCUL nas interações entre máquinas. A magnitude da admitância de transferência entre as barras internas das máquinas i e j é então expressa como:

$$Y_{ij} = (1 + F_{TC\,ij} \Delta a) Y_{ij}^0 \quad (4.53)$$

O Fator de Efeito permite avaliar, quais pares de máquinas são mais ou menos afetados pela atuação do localizado entre duas barras genéricas do sistema. Após considerar diferentes localizações do ULTC no sistema, pode-se identificar qual é o local mais significativo visando às interações entre duas máquinas, ou ainda, visando às oscilações entre determinadas áreas do sistema, observando pares de máquinas pertencentes a diferentes áreas. O índice também pode ser útil para desenvolver técnicas para análise do sistema de potência sob a ação do ULTC, assim como para ajustes no sistema de potência com ULTC, uma vez que o coeficiente permite analisar a influência sobre a potência sincronizante entre as máquinas genéricas i e j .

Uma vez determinado o Fator de Efeito para o ULTC situado em determinado local da rede, pode-se empregá-lo para definir ou/e analisar leis de controle de modo a buscar certo requisito de desempenho.

4.6 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a modelagem matemática referente ao transformador de relação de transformação variável genérico (KUNDUR, 1994) cuja relação de transformação variável é representada por um valor complexo, inserido em um ambiente multimáquinas entre duas barras genéricas k e ℓ .

Em particular tratou-se de um caso de transformador de relação de transformação variável, o ULTC. Após as características do ULTC serem apresentadas, esse dispositivo foi inserido na representação de um sistema multimáquinas.

Considerando as cargas como admitâncias constantes, a matriz de admitância de barras que representa a rede com a inclusão do transformador de relação de transformação variável foi reduzida primeiramente às barras de interesse e novamente reduzida, finalmente às barras internas dos geradores.

Foram desenvolvidos modelos matemáticos para o cálculo da matriz $Y_{TC,TC}^{-1}$ inversa da matriz que representa as admitâncias do ULTC. Esse modelo é preciso e utilizado para o cálculo da matriz admitância reduzida final, e também é um resultado importante que pode ser utilizado para analisar os efeitos do ULTC nas interações entre máquinas e aplicá-los para análise de leis de controle do dispositivo e desempenho do sistema.

Com o intuito de analisar os efeitos do ULTC sobre a capacidade de sincronização entre pares de máquinas genéricas do sistema, desenvolveram-se o Coeficiente de Eficácia (K_{TC}^{ef}) e Fator de Efeito (F_{TC}) .

O Coeficiente de Eficácia expressa qual a participação efetiva da relação de transformação do ULTC em relação à magnitude das admitâncias de transferências entre duas máquinas genéricas do sistema.

O Fator de Efeito para o caso do ULTC tem como função comparar a variação da admitância de transferência devido à variação da relação de transformação do ULTC, com a magnitude da admitância de transferência em regime permanente.

Capítulo 5

Análise do efeito de um PS inserido em um Sistema Multimáquinas

5.1 Introdução

Neste capítulo será tratada a inclusão dos transformadores defasadores (PS – Phase Shifter) nos sistemas elétricos, de forma semelhante ao ULTC. Será incluído o modelo da representação do PS na matriz admitância de barra da rede original e a partir dessa inclusão será analisado o efeito que o PS exerce sobre o comportamento dinâmico/transitório do sistema multimáquinas. A princípio a rede é considerada com sua estrutura original e posteriormente é inserido nesta rede um PS.

A rede é então reduzida às barras internas dos geradores através de um método que mantém os efeitos do PS nas admitâncias de transferência entre máquinas, podendo assim analisar a influência do dispositivo nas interações entre máquinas ocasionando uma análise do efeito do mesmo na capacidade de sincronização entre máquinas.

Em sistemas de potência ocasionalmente ocorre que o ângulo necessário para o uso ótimo de uma linha de transmissão é incompatível com o ângulo de operação do sistema de transmissão. Esse fato ocorre quando a potência entre duas barras é transmitida através de linhas paralelas de comprimento elétrico diferente ou quando o ângulo entre as duas barras não é suficiente para estabelecer o fluxo de potência desejado. Nestes casos, o PS é frequentemente utilizado (SONG; JOHNS, 1999).

O PS consiste em uma admitância em série com um transformador ideal onde a relação de transformação variável (tap) é um número complexo, $\bar{a} = a \angle \alpha_{PS}$ com $a = 1$. O deslocamento angular varia de acordo com as diferentes posições do tap, sendo a posição do tap ajustada de acordo com a necessidade do sistema. Deste modo são afetadas as interações entre as máquinas conectadas à rede por modificação das admitâncias de transferência entre elas, influenciando na capacidade de sincronização e torques sincronizantes.

O deslocamento angular ideal para direcionar o fluxo de potência desejado na linha de transmissão, é obtido mediante o acréscimo de um incremento angular $\Delta\alpha_{PS}$ ao ângulo de regime permanente da relação de transformação do PS.

Através de coeficientes definidos nesse capítulo é possível o estudo da influência do PS sobre a capacidade de sincronização entre as máquinas.

5.2 Inclusão de um PS em um Sistema Multimáquinas

A inclusão do PS na rede é feita de maneira similar a do ULTC e a figura 5.1 ilustra o PS incluso na rede entre as barras genéricas k e ℓ .

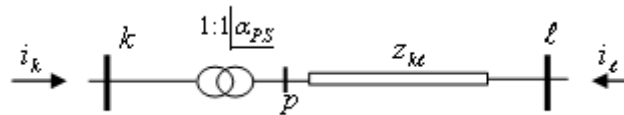


Figura 5.1 - Representação do PS

Considere então as características da relação de transformação variável do PS inclusa na forma matricial da equação (4.7). Considerando $a=1$ nas equações (4.13) e (4.14), os elementos da matriz admitância de barra afetados pela ação do PS de relação de transformação variável $1:1|\underline{\alpha}_{PS}$ instalado entre as barras k e ℓ são:

$$\bar{Y}_{k\ell} = -1|\underline{\alpha}_{PS} \bar{y}_{k\ell} \quad (5.1)$$

$$\bar{Y}_{\ell k} = -1|\underline{\alpha}_{PS} \bar{y}_{\ell k} \quad (5.2)$$

Observa-se nas equações (5.1) e (5.2) que a ação do PS afeta diretamente as admitâncias de transferências, ou seja, influencia as interações entre máquinas. Destaca-se também que a admitância de transferência da barra k para a ℓ é diferente da admitância de transferência da barra ℓ para a barra k . Essa diferença é dada pela oposição do ângulo da relação de transformação variável do PS.

A atuação do PS se dá por mudança na relação de transformação seguindo uma determinada lei de controle, tal como obter o deslocamento angular desejado em uma linha de transmissão específica o que é feito adicionando um incremento $\Delta\alpha_{PS}$ na relação de transformação. Então a relação de transformação pode ser expressa por $\alpha_{PS} = \alpha_{PS}^0 + \Delta\alpha_{PS}$, sendo α_{PS}^0 o valor da relação especificado para a operação em regime permanente.

Similarmente ao desenvolvimento realizado na análise do caso do ULTC, faz-se uma reordenação de barras na rede, de modo que as barras genéricas onde o PS está instalado sejam representadas na $(n+1)$ -ésima e $(n+2)$ -ésima linha e coluna da matriz admitância de barra aumentada. A nova matriz admitância da rede aumentada é:

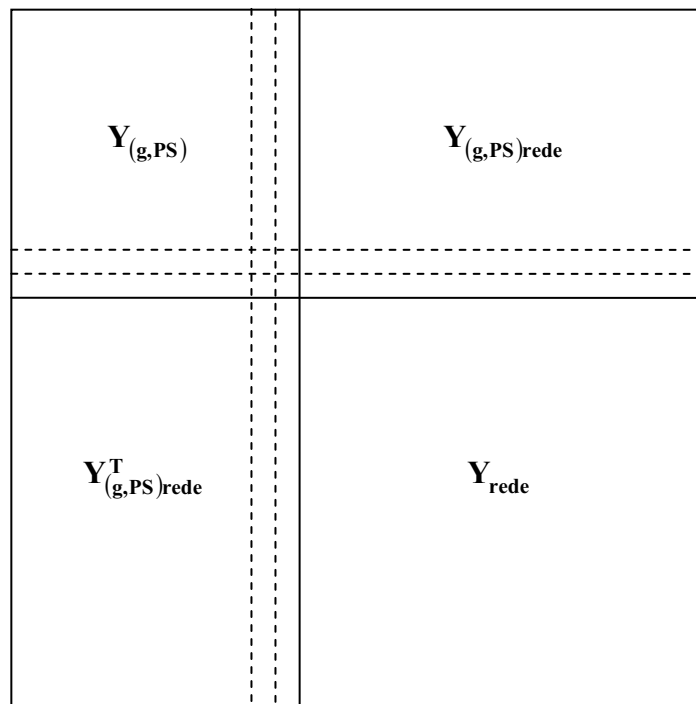


Figura 5.2 - Reordenação de linhas e colunas da matriz admitância aumentada com a inclusão do PS.

Nota-se na figura 5.2 que a matriz $Y_{(g,PS)}$ é quadrada de dimensão $(n+2)$, $Y_{(g,PS)rede}$ tem dimensões $((n+2) \times (m-2))$ e Y_{rede} é quadrada de dimensão $(m-2)$.

No sistema as cargas são representadas como impedâncias constantes e a rede é primeiramente reduzida às barras de interesse (barras internas dos geradores e as barras terminais do PS), conforme ilustrado na Figura 5.3.

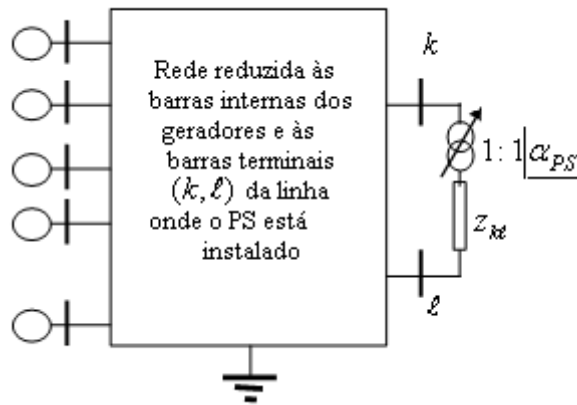


Figura 5.3 - Rede reduzida às barras de interesse

A matriz admitância da rede reduzida às barras de interesse é obtida da seguinte forma:

$$\mathbf{Y}'_{\text{int}} = \mathbf{Y}_{\text{g,PS}} - \mathbf{Y}_{(\text{g,PS})\text{rede}} \mathbf{Y}_{\text{rede}}^{-1} \mathbf{Y}_{(\text{g,PS})\text{rede}}^T \quad (5.3)$$

A estrutura da matriz admitância de barra reduzida às barras de interesse é como mostrado na figura 5.4.

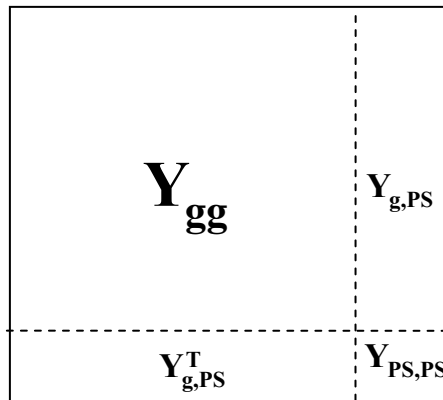


Figura 5.4 - Estrutura da matriz reduzida às barras internas dos geradores e terminais LT com PS.

É importante notar que a assimetria introduzida na matriz pela representação do PS está contida na submatriz $\mathbf{Y}_{\text{PS,PS}}$, sendo todas as demais constantes, ou seja, os efeitos do PS estão inteiramente contidos em $\mathbf{Y}_{\text{PS,PS}}$.

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

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{I}_{k,\ell} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{gg} & \mathbf{Y}_{g,PS} \\ \mathbf{Y}_{g,PS}^T & \mathbf{Y}_{PS,PS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{V}_{k,\ell} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Tomando as cargas como admitâncias constantes incorporadas à rede, não há injeção de corrente nas barras terminais da linha $k - \ell$, então $\mathbf{I}_{k,\ell} = [0 \ 0]^T$ de onde vem que:

$$\mathbf{V}_{k,\ell} = -\mathbf{Y}_{PS,PS}^{-1} \mathbf{Y}_{g,PS}^T \mathbf{E} \quad (5.5)$$

Substituindo (5.5) na equação matricial (5.4) têm-se

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}'} \mathbf{E} \quad (5.6)$$

onde $\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}'}$ é a matriz admitância da rede reduzida às barras internas dos geradores afetada pelas variações da relação de transformação do PS, dada por:

$$\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}'} = \mathbf{Y}_{gg} - \mathbf{Y}_{g,PS} \mathbf{Y}_{PS,PS}^{-1} \mathbf{Y}_{g,PS}^T \quad (5.7)$$

As sub-matrizes $\mathbf{Y}_{gg}$, quadrada de dimensão n , e a $\mathbf{Y}_{g,PS}$, de dimensões $n \times 2$, são resultantes da redução e portanto afetadas pelas barras eliminadas, mas não são afetadas pelas variações do PS, de modo que seus elementos tem valores constantes. A influência das variações da relação de transformação do PS se manifesta na sub-matriz $\mathbf{Y}_{PS,PS}$, quadrada de dimensão 2, que é :

$$\mathbf{Y}_{PS,PS} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{kk}^{\text{rede}} & \bar{Y}_{kl}^{\text{rede}} + \bar{y}_{klPS} \\ \bar{Y}_{kl}^{\text{rede}} + \bar{y}_{\ell kPS} & \bar{Y}_{\ell\ell}^{\text{rede}} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Nota-se que a matriz admitância $\mathbf{Y}_{PS,PS}$ é não simétrica, isso significa que admitância de transferência da barra k para a ℓ é diferente da admitância de transferência da barra ℓ para a k (KUNDUR, 1994).

As admitâncias relacionadas com o PS têm valor de equilíbrio incluído o ângulo α_{PS}^0 que, diante de perturbações do sistema apresenta desvio angular de $\Delta\alpha_{PS}$, portanto agora o deslocamento angular introduzido pelo PS é $\alpha_{PS} = \alpha_{PS}^0 + \Delta\alpha_{PS}$.

As admitâncias afetadas pela ação do PS são:

$$\bar{y}_{k\ell PS} = -1 \left| \underline{\alpha_{PS}} \bar{y}_{k\ell} \right. \quad (5.9)$$

$$\bar{y}_{\ell k PS} = -1 \left| \underline{\alpha_{PS}} \bar{y}_{\ell k} \right. \quad (5.10)$$

Dado que $\bar{y}_{k\ell} = \frac{1}{jx_{k\ell}} = -jb_{k\ell}$ têm-se:

$$\bar{y}_{k\ell PS} = b_{k\ell} \left| \underline{\frac{\pi}{2} - \alpha_{PS}} \right. \quad (5.11)$$

$$\bar{y}_{\ell k PS} = b_{k\ell} \left| \underline{\frac{\pi}{2} + \alpha_{PS}} \right. \quad (5.12)$$

E as variações do ângulo α_{PS} levam a variações na admitância de transferência como mostra a figura 5.5.

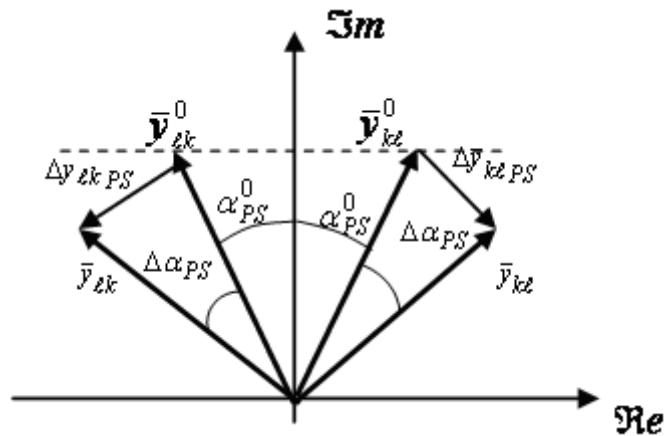


Figura 5.5 – Efeitos da variação do α_{PS} na admitância de transferência.

As admitâncias afetadas pelo PS podem ser escritas como:

$$\bar{y}_{k\ell} = \bar{y}_{k\ell}^0 + \Delta\bar{y}_{k\ell PS} \quad (5.13)$$

$$\bar{y}_{\ell k} = \bar{y}_{\ell k}^0 + \Delta\bar{y}_{\ell k PS} \quad (5.14)$$

Da geometria da figura 5.5 temos que o valor final de $\bar{y}_{k\ell PS}$ é obtido avaliando-se o incremento:

$$\Delta\bar{y}_{k\ell PS} = 2y_{k\ell PS} \operatorname{sen}\left(\frac{\Delta\alpha_{PS}}{2}\right) \left| \alpha_{PS}^0 - \frac{\Delta\alpha_{PS}}{2} \right| \quad (5.15)$$

e o valor final de $\bar{y}_{\ell k PS}$ é obtido através de:

$$\Delta\bar{y}_{\ell k PS} = 2y_{\ell k PS} \operatorname{sen}\left(\frac{\Delta\alpha_{PS}}{2}\right) \left| \pi + \alpha_{PS}^0 + \frac{\Delta\alpha_{PS}}{2} \right| \quad (5.16)$$

Adicionando a variação do deslocamento angular na equação (5.8) temos:

$$\mathbf{Y}_{PS,PS} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{kk}^0 & \bar{Y}_{k\ell}^0 + \Delta\bar{y}_{k\ell PS} \\ \bar{Y}_{\ell k}^0 + \Delta\bar{y}_{\ell k PS} & \bar{Y}_{\ell\ell}^0 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

A matriz admitância de barra reduzida final, relacionando exclusivamente as barras internas das máquinas é obtida como:

$$\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}'} = \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}^0} + \Delta\mathbf{Y}_{PS} \quad (5.18)$$

onde:

$$\Delta\mathbf{Y}_{PS} = -\mathbf{Y}_{g,PS} \mathbf{Y}_{PS,PS}^{-1} \mathbf{Y}_{g,PS}^T \quad (5.19)$$

$\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}^0}$ é a matriz reduzida às barras internas dos geradores para a condição de regime permanente, ou seja é a matriz da rede reduzida sem a atuação do controle do PS, já $\Delta\mathbf{Y}_{PS}$ é a matriz das variações das admitâncias da rede com a atuação do PS.

Considerando que se pode escrever:

$$\mathbf{Y}_{\text{PS,PS}}^{-1} \cong \frac{1}{\det'} \left\{ \begin{bmatrix} \bar{Y}_{\ell\ell}^0 & -\bar{Y}_{k\ell}^0 \\ -\bar{Y}_{\ell k}^0 & \bar{Y}_{kk}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\bar{y}_{k\ell PS} \\ -\Delta\bar{y}_{\ell k PS} & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (5.20)$$

sendo $\det' = Y_{kk}^0 Y_{\ell\ell}^0 - (Y_{k\ell}^0 + \Delta\bar{y}_{k\ell PS})(Y_{\ell k}^0 + \Delta\bar{y}_{\ell k PS}) \cong Y_{kk}^0 Y_{\ell\ell}^0 - Y_{k\ell}^0 Y_{\ell k}^0$.

Pode reescrever a equação (5.18), onde a primeira parcela do lado direito da mesma é uma matriz constante, dada por:

$$\mathbf{Y}_{\text{gg}}^{\text{red}0'} = \mathbf{Y}_{\text{gg}} - \Delta\mathbf{Y}^{0'} \quad (5.21)$$

com

$$\Delta\mathbf{Y}^{0'} = \frac{1}{\det'} \mathbf{Y}_{\text{g,PS}} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{\ell\ell}^0 & -\bar{Y}_{k\ell}^0 \\ -\bar{Y}_{\ell k}^0 & \bar{Y}_{kk}^0 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{g,PS}}^{\text{T}} \quad (5.22)$$

E a segunda parcela da equação (5.18) é uma matriz de variações de admitância do PS, o que representa a influência do PS sobre as admitâncias da rede reduzida expressa por:

$$\Delta\mathbf{Y}_{\text{PS}} = -\frac{1}{\det'} \left\{ \mathbf{Y}_{\text{g,PS}} \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\bar{y}_{k\ell PS} \\ -\Delta\bar{y}_{\ell k PS} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{g,PS}}^{\text{T}} \right\} \quad (5.23)$$

ou

$$\Delta\mathbf{Y}_{\text{PS}} = -\frac{1}{(\bar{Y}_{kk}^0 \bar{Y}_{\ell\ell}^0 - \bar{Y}_{k\ell}^0 \bar{Y}_{\ell k}^0)} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{1,k} & \bar{Y}_{1,\ell} \\ \bar{Y}_{2,k} & \bar{Y}_{2,\ell} \\ \vdots & \vdots \\ \bar{Y}_{i,k} & \bar{Y}_{i,\ell} \\ \bar{Y}_{j,k} & \bar{Y}_{j,\ell} \\ \vdots & \vdots \\ \bar{Y}_{n,k} & \bar{Y}_{n,\ell} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\bar{y}_{k\ell PS} \\ -\Delta\bar{y}_{\ell k PS} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_{1,k} & \bar{Y}_{2,k} & \dots & \bar{Y}_{i,k} & \bar{Y}_{j,k} & \dots & \bar{Y}_{n,k} \\ \bar{Y}_{1,\ell} & \bar{Y}_{2,\ell} & \dots & \bar{Y}_{i,\ell} & \bar{Y}_{j,\ell} & \dots & \bar{Y}_{n,\ell} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Os elementos genéricos ΔY_{PSij} da matriz $\Delta \mathbf{Y}_{PS}$ expressam a variação da admitância de transferência entre as barras genéricas (i, j) e podem ser escritos como:

$$\Delta Y_{PSij} = \frac{1}{\det'} \left[\bar{Y}_{i,k} \bar{Y}_{j,\ell} \Delta \bar{y}_{kl PS} + \bar{Y}_{i,\ell} \bar{Y}_{j,k} \Delta \bar{y}_{\ell k PS} \right] \quad (5.25)$$

Substituindo $\Delta \bar{y}_{kl PS}$ e $\Delta \bar{y}_{\ell k PS}$ na equação (5.25) têm-se

$$\begin{aligned} \Delta Y_{PSij} &= \frac{1}{\det'} \left[\bar{Y}_{i,k} \bar{Y}_{j,\ell} 2y_{kl PS} \operatorname{sen} \left(\frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} \right) \left| -\alpha_{PS}^0 - \frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \bar{Y}_{i,\ell} \bar{Y}_{j,k} 2y_{\ell k PS} \operatorname{sen} \left(\frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} \right) \left| \pi + \alpha_{PS}^0 + \frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} \right. \right] \quad (5.26) \\ &= \frac{2 \operatorname{sen} \left(\frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} \right)}{\det'} \left[\begin{array}{c} Y_{i,k} Y_{j,\ell} y_{kl PS} \left| \theta_{ik} + \theta_{j\ell} - \alpha_{PS}^0 - \frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} + \right. \\ Y_{i,\ell} Y_{j,k} y_{\ell k PS} \left| \pi + \theta_{i\ell} + \theta_{jk} + \alpha_{PS}^0 + \frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} \right. \end{array} \right] \end{aligned}$$

onde θ_{ik} e $\theta_{j\ell}$ são os ângulos referente das admitâncias $Y_{i,k}$ e $Y_{j,\ell}$ respectivamente e $\theta_{i\ell}$ e θ_{jk} são os ângulos referentes das admitâncias $Y_{i,\ell}$ e $Y_{j,k}$.

Notando que $y_{kl PS} = y_{\ell k PS}$ (somente magnitudes) temos:

$$\Delta Y_{PSij} = \frac{2y_{kl PS} \operatorname{sen} \left(\frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} \right)}{\det'} \left[\begin{array}{c} Y_{i,k} Y_{j,\ell} \left| \theta_{ik} + \theta_{j\ell} - \alpha_{PS}^0 - \frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} + \right. \\ - Y_{i,\ell} Y_{j,k} \left| \theta_{i\ell} + \theta_{jk} + \alpha_{PS}^0 + \frac{\Delta \alpha_{PS}}{2} \right. \end{array} \right] \quad (5.27)$$

A sensibilidade da admitância de transferência com as respectivas defasagem do ângulo do PS é dada por:

$$\bar{K}_{PSij} = \frac{d(\Delta Y_{PSij})}{d(\Delta \alpha_{PS})} \Big|_{\Delta \alpha=0} = \frac{y_{kl PS}}{\det'} \left[\begin{array}{c} Y_{i,k} Y_{j,\ell} \left| \theta_{ik} + \theta_{j\ell} - \alpha_{PS}^0 + \right. \\ - Y_{i,\ell} Y_{j,k} \left| \theta_{i\ell} + \theta_{jk} + \alpha_{PS}^0 \right. \end{array} \right] \quad (5.28)$$

O parâmetro $\bar{K}_{PSij}$ representa a sensibilidade da admitância de transferência do par de máquinas (i, j) na rede reduzida em relação às variações da relação de transformação do PS instalado entre as barras k e ℓ da rede original (com preservação da estrutura).

Observa-se que as admitâncias de transferência são em princípio afetadas em magnitude e ângulo pela ação do PS. O que pode ser confirmado pelo valor complexo de $\bar{K}_{PSij}$ escrito como:

$$\bar{K}_{PSij} = K_{PSij} \left| \varphi_{PSij} \right| \quad (5.29)$$

Notando que tanto a magnitude K_{PSij} como o ângulo φ_{PSij} são constantes, então as variações da admitância de transferência ΔY_{ij} em função das variações da relação de transformação do PS, dependem diretamente de $\Delta \alpha_{PS}$ e ocorrem sobre a linha de inclinação φ_{PSij} no plano complexo das admitâncias, como ilustrado na Figura (5.6).

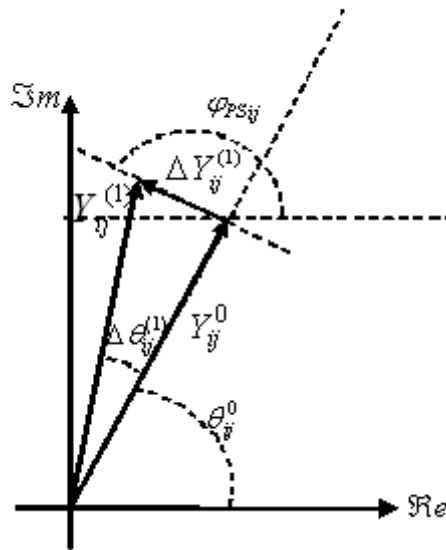


Figura 5.6 - Variações da admitância de transferência entre as máquinas i e j devidas às variações do ângulo do PS.

Como o objetivo do trabalho é avaliar a influência do PS nas interações entre máquinas expressam-se as variações das admitâncias de transferência entre barras internas das máquinas em função das variações do ângulo do PS como:

$$\Delta \bar{Y}_{ij} \cong \bar{K}_{PSij} \Delta \alpha_{PS} = K_{PSij} \Delta \alpha_{PS} \Big|_{\underline{\varphi_{PSij}}} \quad (5.30)$$

A equação (5.18) pode ser escrita como:

$$\mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}'} = \mathbf{Y}_{gg}^{\text{red}0'} + \bar{K}_{PSij} \Delta \alpha_{PS} \quad (5.31)$$

Diante dos resultados já citados, tem-se que a admitância genérica da rede reduzida é expressa por:

$$\begin{aligned} Y_{ij} \Big|_{\underline{\theta_{ij}}} &= Y_{ij}^0 \Big|_{\underline{\theta_{ij}^0}} + K_{PSij} \Delta \alpha_{PS} \Big|_{\underline{\varphi_{PSij}}} \\ &= \left(Y_{ij}^0 + \Delta Y_{PSij} \right) \Big|_{\underline{\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{PSij}}} \end{aligned} \quad (5.32)$$

5.3 Efeitos do PS nas interações entre máquinas

A variação efetiva do ângulo da admitância de transferência é

$$\Delta \theta_{PSij}^{ef} = \theta_{ij} - \theta_{ij}^0 \quad (5.33)$$

O parâmetro $\Delta \theta_{PSij}^{ef}$ representa a variação efetiva do ângulo da admitância de transferência entre as máquinas i e j . Então a potência elétrica transmitida entre as máquinas i e j pode ser escrita como:

$$P_{eij} = E_i Y_{ij} E_j \cos \left(\delta_{ij} - \left(\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij}^{ef} \right) \right) \quad (5.34)$$

A partir da potência elétrica calcula-se o coeficiente de potência sincronizante como:

$$K'_{Peij} = \left. \frac{\partial P_{eij}}{\partial \delta_{ij}} \right|_{\Delta \delta=0} = -E_i Y_{ij} E_j \text{sen} \left(\delta_{ij}^0 - \left(\theta_{ij}^0 + \Delta \theta_{ij}^{ef} \right) \right) \quad (5.35)$$

A grandeza K_{Peij} é conhecida como capacidade de sincronização ou coeficiente de potência sincronizante entre as máquinas i e j . Observando a equação (5.35) é notório que coeficiente de potência sincronizante entre as máquinas genéricas i e j depende da variação efetiva do ângulo da admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j , uma vez que essa é influenciada pela ação do PS.

Da geometria da figura 5.6 tem-se que:

$$\begin{aligned} \text{tg}(\Delta \theta_{ij}) &\cong \frac{\Delta Y_{PSij} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{PSij} + \theta_{ij}^0 \right)}{|Y_{ij}^0|} \\ &\cong K_{\alpha(i,j)} \Delta \alpha_{PS} \end{aligned} \quad (5.36)$$

sendo:

$$K_{\alpha(i,j)} = \frac{|K_{PSij}| \text{sen}(\varphi_{PSij} - \theta_{ij}^0)}{|Y_{ij}^0|} \quad (5.37)$$

A variação do ângulo da admitância de transferência é:

$$\begin{aligned} \Delta \theta_{ij} &\cong \arctg(K_{\alpha(i,j)} \Delta \alpha_{PS}) \\ &\cong K_{PSij}^{ef} \Delta \alpha_{PS} \end{aligned} \quad (5.38)$$

com

$$K_{PSij}^{ef} = \left. \frac{d[\arctg(K_{\alpha(i,j)} \Delta \alpha_{PS})]}{d\Delta \alpha_{PS}} \right|_{\Delta \alpha=0} = K_{\alpha(i,j)} \quad (5.39)$$

O Coeficiente de Eficácia demonstra a participação efetiva do deslocamento angular da relação de transformação do PS sobre o ângulo da admitância de transferência entre cada par de máquinas genéricas i e j do sistema multimáquinas.

À semelhança do descrito na seção 4.5, a respeito do ULTC observa-se que, também no caso do PS, o Coeficiente de Eficácia é significativo, mas o Fator de Efeito é mais significativo, comparando a variação do ângulo da admitância de transferência devida a variação do ângulo do PS, com o ângulo da admitância de transferência original.

Define-se então o Fator de Efeito F_{PSij} como:

$$F_{PS(i,j)} = \frac{K_{PS(i,j)}^{ef}}{\theta_{ij}^0} \quad (5.40)$$

com o objetivo de expressar a importância relativa das variações da relação do ângulo do PS sobre a admitância de transferência entre as máquinas genéricas i e j , influenciando diretamente a capacidade de sincronização entre essas máquinas.

O ângulo da admitância de transferência entre as barras internas das máquinas i e j é então expressa como:

$$\theta_{ij} = \theta_{ij}^0 (1 + F_{PSij} \Delta \alpha_{PS}) \quad (5.41)$$

5.4 Conclusões

Em particular, neste capítulo foi considerado o PS inserido em um ambiente multimáquinas. Considerando as cargas como admitâncias constantes, a matriz de admitância de barras que representa a rede com as características do PS foi reduzida às barras internas dos geradores.

Foi desenvolvido, assim como para o ULTC, um modelo matemático para calcular a inversa da matriz que representa as características do PS, $\mathbf{Y}_{PS,PS}^{-1}$. Matriz necessária para calcular a matriz admitância de barra reduzida final.

Esse modelo matemático contribuiu para o desenvolvimento de coeficientes que tem como finalidade analisar a influência do PS na capacidade de sincronização entre máquinas, dentre os coeficientes destacam-se o Coeficiente de Eficácia K_{ps}^{ef} e o Fator de Efeito F_{ps} .

O Coeficiente de Eficácia do PS representa a participação efetiva da relação de transformação variável do PS em função das admitâncias transferências entre um par de máquinas genéricos do sistema.

O Fator de Efeito do PS compara a variação do ângulo da admitância de transferência com o ângulo da admitância de transferência original, podendo assim analisar quais pares de máquinas são mais ou menos afetados pelo efeito do PS.

Capítulo 6

Exemplos de Aplicação

6.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se exemplos de aplicação visando validar e clarificar o estudo feito nos capítulos 4 e 5. Os testes serão feitos em sistemas de 4 e 5 máquinas e após incluir o dispositivo em diferentes localizações no sistema, será analisado qual a influência do transformador de relação de transformação variável, tanto do ULTC quanto do PS, sobre a capacidade de sincronização intermáquinas e/ou interáreas.

Os resultados obtidos de simulações realizadas no sistema teste, na qual a implementação computacional foi realizada utilizando o software MATLAB serão apresentados e discutidos.

6.2 Sistema Teste de 4 máquinas

O sistema-teste é ilustrado pelo diagrama unifilar da figura 6.1, sendo o sistema composto de 4 máquinas e 11 barras, contendo 2 áreas bem definidas. Mais detalhes podem ser encontrados em Kundur (1994).

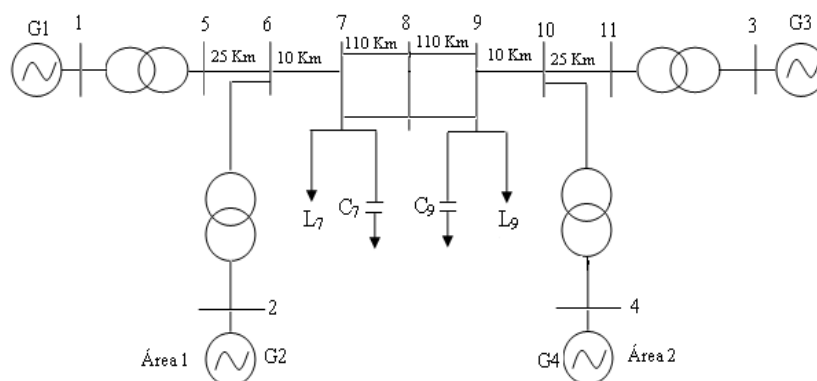


Figura 6.1 - Diagrama Unifilar do Sistema de 4 máquinas e 11 barras

O caso base é apresentado pelos dados de linha, parâmetros das máquinas e pelos resultados do cálculo do Fluxo de Potência.

Quadro 6.1 – Dados de Linhas do Sistema de Quatro Máquinas

Nº da linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância série		Admitância Paralela	
			R	X	G	B
1	1	5	0.0000	0.1500	0.0000	0.0000
2	2	6	0.0000	0.1500	0.0000	0.0000
3	3	11	0.0000	0.1500	0.0000	0.0000
4	4	10	0.0000	0.1500	0.0000	0.0000
5	5	6	0.0025	0.0250	0.0000	0.0049
6	6	7	0.0090	0.0900	0.0000	0.0019
7	7	8	0.0990	0.4950	0.0000	0.0214
8	8	9	0	0.4950	0.0000	0.0000
9	9	10	0.0090	0.0090	0.0000	0.0019
10	7	9	0.0990	0.0990	0.0000	0.0428
11	10	11	0.0025	0.0250	0.0000	0.0049

Quadro 6.2 – Parâmetros das Máquinas

Máquina	Barra	XD	Xld	M	D	Tld0	Tlq0	KR	TR
1	1	1.800	0.3000	0.3450	0.0000	8.0000	0.4000	25.0000	0.1000
2	2	1.800	0.3000	0.3450	0.0000	8.0000	0.4000	25.0000	0.1000
3	3	1.800	0.3000	0.3280	0.0000	8.0000	0.4000	25.0000	0.1000
4	4	1.800	0.3000	0.3280	0.0000	8.0000	0.4000	25.0000	0.1000

Máquina	Barra	Efdmax	Efdmin	Tg	Tm	Ag	Bg	Alf	Bet
1	1	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	2	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	3	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	4	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Quadro 6.3 - Resultados do Cálculo do Fluxo de Potência para o Caso base

Barra	Nome	Tensão de Barra		Potência de Barra (p.u.)	
		Módulo	Ângulo	Ativa	Reativa
		(p.u.)	(graus)		
1	Barra 1	1.0300	0.0000	0.5249	0.1621
2	Barra 2	1.0100	3.4298	1.0000	0.1076
3	Barra 3	1.0300	-19.6715	1.0000	0.2023
4	Barra 4	1.0100	-24.4745	0.5767	0.0415
5	Barra 5	1.0093	-4.3438	0.0000	0.0000
6	Barra 6	1.0050	-5.0679	0.0000	0.0000
7	Barra 7	0.9938	-12.9217	-1.0744	0.1111
8	Barra 8	0.9942	-25.3264	0.0000	0.0469
9	Barra 9	1.0007	-37.4152	-1.9633	0.2778
10	Barra 10	1.0075	-29.3513	0.0000	0.0000
11	Barra 11	1.0111	-27.9531	0.0000	0.0000

Quadro 6.4 – Tensões Internas (atrás de Xld)

Máquina	Magnitude	Ângulo
1	1.0869	0.1411
2	1.0822	0.3379
3	1.1250	-0.0788
4	1.0339	-0.2580

Quadro 6.5 – Ângulos dos Eixos q

Máquina	Ângulo
1	35.0600
2	59.6087
3	32.3910
4	19.5838

Os elementos da matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores genericamente para condição de equilíbrio (regime permanente), têm magnitudes $|\mathbf{Y}_{\text{red}}^0| = [\mathbf{Y}_{ij}^0]$; $i,j=1,2,\dots,n$ [pu] e ângulos [graus]: $\boldsymbol{\theta}^0 = [\boldsymbol{\theta}_{ij}^0]$; $i,j=1,2,\dots,n$ e as matrizes são divididas em submatrizes correspondentes às áreas A_1 e A_2 .

Neste caso têm-se:

$$|Y_{red}^0| = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} 1.4029 & 0.7698 & 0.2483 & 0.2621 \\ 0.7698 & 1.4419 & 0.2621 & 0.2767 \\ \hline 0.2483 & 0.2621 & 1.4343 & 0.7571 \\ 0.2621 & 0.2767 & 0.7571 & 1.4780 \end{array} \right] \end{array}$$

$$\theta^0 = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} -83.1508 & 77.3295 & 57.8402 & 57.5387 \\ 77.3295 & -82.7325 & 57.5387 & 57.2371 \\ \hline 57.8402 & 57.5387 & -81.3302 & 73.0789 \\ 57.5387 & 57.2371 & 73.0789 & -80.7878 \end{array} \right] \end{array}$$

6.2.1 Inclusão do ULTC no sistema de 4 máquinas

A partir do caso base, consideram-se diferentes localizações de instalação do ULTC com o principal objetivo de analisar as matrizes admitância para verificar se realmente os coeficientes expressam os efeitos do dispositivo sobre as interações intermáquinas e interáreas. O ULTC será instalado entre as barras 4-10, 1-5 e 8-9.

Considera-se a relação de transformação de regime permanente do ULTC como 1:1.05 e a variação da relação de transformação inserida pelo ULTC no sistema é $\Delta a = 0.05$.

É importante observar que, em todos os casos, a expressão $Y_{TC,TC}^{-1} = \frac{\det^0}{\det^0 + F(\Delta a)} \left\{ \frac{1}{\det^0} \begin{bmatrix} Y_{\ell\ell}^0 & -(Y_{k\ell}^0) \\ -(Y_{k\ell}^0) & Y_{kk}^0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\det^0} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & (2a^0 + \Delta a) \end{bmatrix} \bar{y}_{k\ell} \Delta a \right\}$ conduziu a avaliação precisa da matriz reduzida final. Este é um resultado importante porque, embora não seja uma expressão linear, é uma função analítica que pode ser utilizada para avaliação dos efeitos do ULTC nas interações entre máquinas e empregada para análise e/ou síntese de leis de controle do dispositivo para um determinado critério de desempenho.

1º caso) ULTC instalado entre as barras 4 e 10

Primeiramente o ULTC é instalado entre as barras 4 e 10 como mostra a figura 6.2, e se obtém a matriz do coeficiente de sensibilidade $\mathbf{K}_{TC}$ em p.u. e a matriz do deslocamento angular entre a admitância de transferência em regime permanente e o coeficiente de sensibilidade $(\theta^0 - \varphi_{TC})$ em graus.

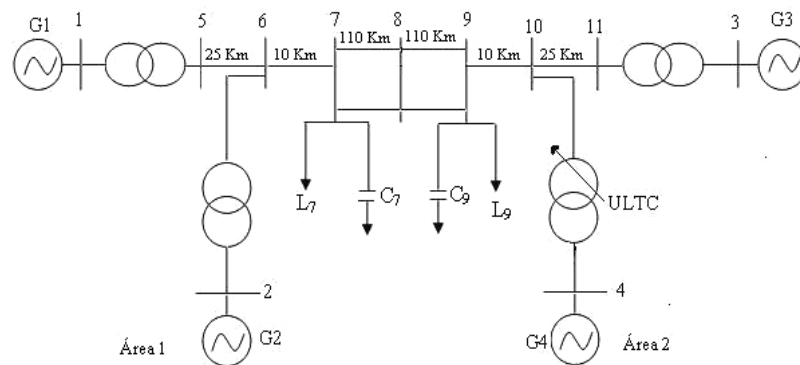


Figura 6.2 – Sistema teste 4máquinas e 11 barras com o ULTC instalado entre as barras 4 e 10

$$\mathbf{K}_{TC} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ \hline 0.0440 & 0.0464 & 0.1270 & 0.0495 \\ 0.0464 & 0.0490 & 0.1341 & 0.0523 \\ \hline 0.1270 & 0.1341 & 0.3668 & 0.1430 \\ 0.0495 & 0.0523 & 0.1430 & 1.6754 \end{bmatrix} \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix}$$

$$\theta^0 - \varphi_{TC} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ \hline -109.3340 & 51.4479 & 16.1168 & 48.7164 \\ 51.4479 & -108.3126 & 16.1168 & 48.7164 \\ \hline 16.1168 & 16.1168 & -138.5938 & 48.7164 \\ 48.7164 & 48.7164 & 48.7164 & 7.1945 \end{bmatrix} \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix}$$

Observa-se na matriz deslocamento angular $(\theta^0 - \varphi_{TC})$ que os elementos $(\theta^0 - \varphi_{TC})_{13}$ e $(\theta^0 - \varphi_{TC})_{23}$ referentes aos pares de máquinas (1,3) e (2,3), tem menor deslocamento

angular, o que significa que as interações entre as máquinas (1,3) e (2,3) são mais diretamente afetadas pelo desempenho do ULTC.

Os Coeficientes de Eficácia para a localização do ULTC entre as barras 4 e 10 são mostrados na matriz a seguir:

$$\mathbf{K}_{TC}^{ef} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} -0.0146 & 0.0289 & 0.1220 & 0.0327 \\ 0.0289 & -0.0154 & 0.1288 & 0.0345 \\ \hline 0.1220 & 0.1288 & -0.2751 & 0.0944 \\ 0.0327 & 0.0345 & 0.0944 & 1.6622 \end{array} \right] \end{array}$$

Os coeficientes de eficácia mostram uma certa prevalência dos efeitos do ULTC sobre as interligações da máquina 3 em comparação com as demais interligações, mas esta prevalência é mais destacada por meio dos fatores de efeito, como se nota em:

$$\mathbf{F}_{TC} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} -0.0104 & 0.0376 & 0.4913 & 0.1246 \\ 0.0376 & -0.0107 & 0.4913 & 0.1246 \\ \hline 0.4913 & 0.4913 & -0.1918 & 0.1246 \\ 0.1246 & 0.1246 & 0.1246 & 1.1246 \end{array} \right] \end{array}$$

Observando as matrizes $\mathbf{F}_{TC}$ e $\mathbf{K}_{TC}^{ef}$ nota-se que os elementos $(K_{TC}^{ef})_{13(31)}$, $(K_{TC}^{ef})_{23(32)}$, $(K_{TC}^{ef})_{43(34)}$, $(F_{TC})_{13(31)}$ e $(F_{TC})_{23(32)}$, possuem valores de mesma grandeza e maiores se comparados aos demais coeficientes, significando que o ULTC favorece mais as interações entre as máquinas (1,3) e (2,3). O esperado era um maior favorecimento nas interações entre a máquina 4 e as demais máquinas, uma vez que o ULTC se localiza justamente na conexão desta máquina com o sistema. Diante dos resultados, conclui-se que o ULTC na localização considerada promova suporte de tensão para as interações entre os pares de máquinas 1 e 3 e também entre 2 e 3, de modo que, estas interações, sim, tenha um maior benefício.

2º caso) ULTC instalado entre as barras 1 e 5

Considerando o ULTC instalado entre as barras 1 e 5 como mostra a figura 6.3

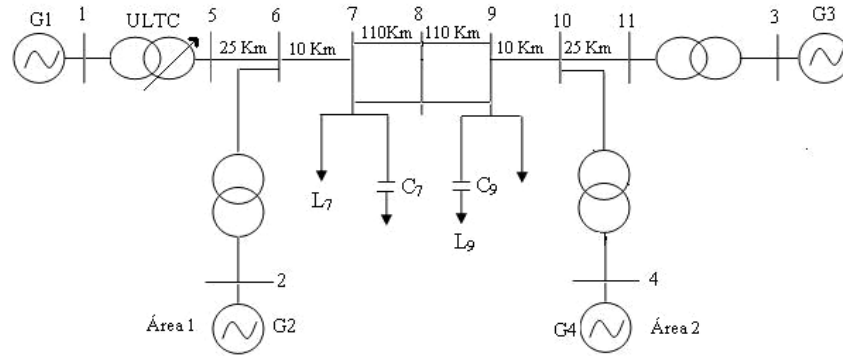


Figura 6.3 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o ULTC instalado entre as barras 1 e 5

obtem-se os resultados a seguir:

$$\mathbf{K}_{TC} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cc|cc} 1.6394 & 0.1482 & 0.0478 & 0.0505 \\ 0.1482 & 0.3785 & 0.1221 & 0.1289 \\ \hline 0.0478 & 0.1221 & 0.0394 & 0.0416 \\ 0.0505 & 0.1289 & 0.0416 & 0.0439 \end{array} \right] \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array} \end{array}$$

$$\boldsymbol{\theta}^0 - \boldsymbol{\varphi}_{TC} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cc|cc} 4.9275 & 31.4234 & 31.4234 & 31.4234 \\ 31.4234 & -148.0905 & 11.6700 & 11.6700 \\ \hline 31.4234 & 11.6700 & -107.7095 & 47.0011 \\ 31.4234 & 11.6700 & 47.0011 & -106.5640 \end{array} \right] \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array} \end{array}$$

Observando a matriz de deslocamento angular $(\boldsymbol{\theta}^0 - \boldsymbol{\varphi}_{TC})$ nota-se que o menor deslocamento angular está em $(\boldsymbol{\theta}^0 - \boldsymbol{\varphi}_{TC})_{23(32)}$ e $(\boldsymbol{\theta}^0 - \boldsymbol{\varphi}_{TC})_{24(42)}$, o que significa que a interação entre os pares de máquinas (2,3) e (2,4) são mais afetadas pelo efeito do ULTC.

A matriz a seguir mostra os Coeficientes de Eficácia do ULTC:

$$\mathbf{K}_{TC}^{ef} = \begin{array}{cc|cc} & A_1 & & A_2 & \\ \hline & 1.6333 & 0.1265 & 0.0408 & 0.0431 \\ & 0.1265 & -0.3213 & 0.1196 & 0.1262 \\ \hline & 0.0408 & 0.1196 & -0.0120 & 0.0283 \\ & 0.0431 & 0.1262 & 0.0283 & -0.0125 \\ \hline & & & & A_1 \\ & & & & A_2 \end{array}$$

Observa-se que o ULTC neste caso apresenta mais influência nas interações da máquina 2 com as demais máquinas do sistema, como mais destacado na matriz dos Fatores de Efeito a seguir.

$$\mathbf{F}_{TC} = \begin{array}{cc|cc} & A_1 & & A_2 & \\ \hline & 1.1643 & 0.1643 & 0.1643 & 0.1643 \\ & 0.1643 & -0.2228 & 0.4561 & 0.4561 \\ \hline & 0.1643 & 0.4561 & -0.0084 & 0.0374 \\ & 0.1643 & 0.4561 & 0.0374 & -0.0085 \\ \hline & & & & A_1 \\ & & & & A_2 \end{array}$$

Observa-se que os efeitos sobre a admitância de transferência entre os pares de máquina (2,3) e (2,4) foram mais influenciados pela ação do ULTC. Como no caso anterior, conclui-se que a localização do ULTC na conexão da máquina 1 com o sistema promove suporte de tensão para as interações da máquina 2 com as demais. Conclui-se que por isso há um maior benefício entre as conexões das máquinas (2,3) e (2,4).

3º caso) ULTC instalado entre as barras 8 e 9

Considerando o ULTC instalado entre as barras 8 e 9 como na figura 6.4

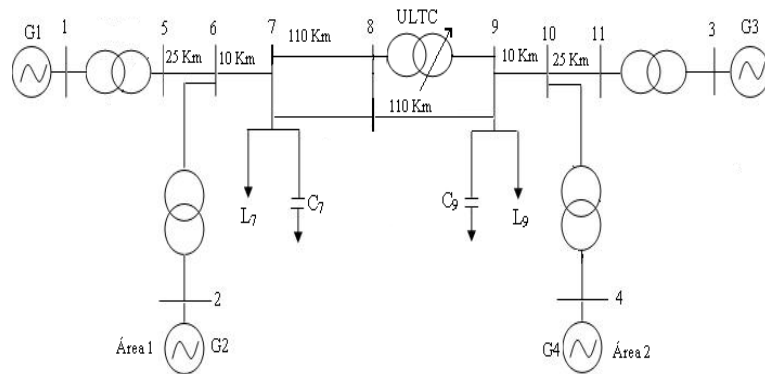


Figura 6.4 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o ULTC instalado entre as barras 8 e 9

obtem-se os resultados a seguir:

$$\mathbf{K}_{TC} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cc|cc} 0.0652 & 0.0689 & 0.0031 & 0.0033 \\ 0.0689 & 0.0727 & 0.0033 & 0.0035 \\ \hline 0.0031 & 0.0033 & 0.0710 & 0.0749 \\ 0.0033 & 0.0035 & 0.0749 & 0.0791 \end{array} \right] \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array} \end{array}$$

$$\boldsymbol{\theta}^0 - \varphi_{TC} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cc|cc} 28.5895 & 189.3714 & 104.4328 & 104.4328 \\ 189.3714 & 29.6109 & 104.4328 & 104.4328 \\ \hline 104.4328 & 104.4328 & -131.0431 & 23.6676 \\ 104.4328 & 104.4328 & 23.6676 & -129.8976 \end{array} \right] \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array} \end{array}$$

Nota-se que, além de ter magnitudes muito baixas, os coeficientes interáreas apresentam deslocamentos angulares relativamente próximos da quadratura, levando a pouca efetividade da atuação do ULTC nestas interligações, como se observa nos Coeficientes de Eficácia a seguir:

$$\mathbf{K}_{TC}^{ef} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cc|cc} 0.0573 & -0.0679 & 0.0008 & 0.0008 \\ -0.0679 & 0.0632 & 0.0008 & -0.0009 \\ \hline 0.0008 & 0.0008 & -0.0466 & 0.0686 \\ 0.0008 & -0.0009 & 0.0686 & -0.0507 \end{array} \right] \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array} \end{array}$$

Embora surpreendentemente um pouco superiores, uma vez que se esperava o contrário, os coeficientes de eficácia intra-áreas também não chegam a ser significativos. Os Fatores de Efeito ficam como mostrado a seguir:

$$\mathbf{F}_{TC} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} 0.0408 & -0.0883 & -0.0031 & -0.0031 \\ -0.0883 & 0.0438 & -0.0031 & -0.0031 \\ \hline -0.0031 & -0.0031 & -0.0325 & 0.0907 \\ -0.0031 & -0.0031 & 0.0907 & -0.0343 \end{array} \right] \end{array}$$

Observa-se um maior efeito na interação entre as máquinas 3 e 4, pertencentes à área 2, contrariando a expectativa de que a localização do ULTC na interligação entre as áreas favoreceria mais as interligações interáreas.

Admitindo-se que a definição da relação de transformação como $1:a$ supõe que a tensão no lado da barra 8 seja mantida e que a do lado da barra 9 seja afetada pelas variações de a parece natural a maior influência nas interações interárea na Área 2, uma vez que estas recebem então um suporte (ou contrário) de tensão. Esta é uma possível justificativa para o fato de que o Fator de Efeito é mais expressivo para as admitâncias de transferência entre as máquinas 3 e 4.

Finalmente, atribui-se a pequena significância dos coeficientes à relativamente grande distância elétrica do ULTC em relação a todas as máquinas do sistema.

6.2.2 Inclusão do PS no sistema de 4 máquinas

Considera-se o PS instalado em diferentes localizações no sistema-teste ilustrado pelo diagrama unifilar da figura 6.1, neste caso foi calculado o paralelo equivalente das linhas 7-8 e 8-9. O PS é inserido no sistema com o principal objetivo de analisar as matrizes admitância para verificar se realmente os coeficientes expressam os efeitos do dispositivo sobre as interações intermáquinas e interáreas.

Considera-se a relação de transformação do PS como $1:1|35^\circ$, onde o ângulo em condições iniciais é $\alpha^0 = 30^\circ$ e a variação da relação de transformação inserida pelo PS no sistema para esse caso é $\Delta\alpha_{PS} = 5^\circ$.

É importante notar que a expressão

$$\mathbf{Y}_{PS,PS}^{-1} \cong \frac{1}{\det} \left\{ \begin{bmatrix} \bar{Y}_{\ell\ell}^0 & -\bar{Y}_{k\ell}^0 \\ -\bar{Y}_{\ell k}^0 & \bar{Y}_{kk}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\bar{y}_{k\ell PS} \\ -\Delta\bar{y}_{\ell k PS} & 0 \end{bmatrix} \right\}, \text{ proposta para o cálculo da matriz}$$

reduzida às barras internas dos geradores, foi precisa, por isso foi utilizada para calcular os coeficientes necessários para análise dos efeitos do PS na capacidade de sincronização entre máquinas.

4º caso) PS instalado entre as barras 4 e 10

Considera-se inicialmente o PS instalado entre as barras 4 e 10 como mostra a figura 6.5.

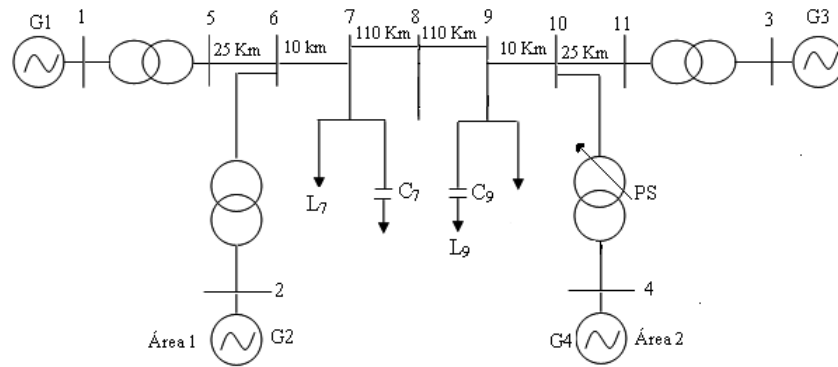


Figura 6.5 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o PS instalado entre as barras 4 e 10

E as condições iniciais para o 4º caso, onde os elementos da matriz admitância reduzida às barras internas dos geradores genericamente para condição de equilíbrio (regime permanente), têm magnitudes $|\mathbf{Y}_{red}^0| = [\mathbf{Y}_{ij}^0]$; $i,j=1,2,\dots,n$ [pu] e ângulos [graus]: $\boldsymbol{\theta}^0 = [\boldsymbol{\theta}_{ij}^0]$; $i,j=1,2,\dots,n$ e as matrizes são divididas em submatrizes correspondentes às áreas A_1 e A_2 são:

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

$$\boldsymbol{\theta}^0 = \begin{array}{cc|cc} & A_1 & & A_2 & \\ \hline & -81.5757 & 77.8203 & 50.1871 & 79.8855 \\ & 77.8203 & -80.9050 & 49.8855 & 79.5840 \\ \hline & 50.1871 & 49.8855 & -78.0124 & 100.3174 \\ & 19.8855 & 19.5840 & 40.3174 & -77.1223 \end{array} \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array}$$

Obtém-se o coeficiente $\bar{\mathbf{K}}_{\text{PS}} = \mathbf{K}_{\text{PS}} \big|_{\varphi_{\text{PS}}}$ sendo as magnitudes $\mathbf{K}_{\text{PS}}$ apresentadas em (p.u.) e os deslocamentos angulares $(\varphi_{\text{PS}} - \boldsymbol{\theta}^0)$ apresentados em graus.

$$\mathbf{K}_{\text{PS}} = \begin{array}{cc|cc} & A_1 & & A_2 & \\ \hline & 0 & 0 & 0 & 0.1403 \\ & 0 & 0 & 0 & 0.1481 \\ \hline & 0 & 0 & 0 & 0.8647 \\ & 0.1403 & 0.1481 & 0.8647 & 0 \end{array} \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array}$$

Observa-se que neste caso o PS apresenta influência apenas sobre as admitâncias de transferência envolvendo a máquina 4, o que é consistente com o fato de que o dispositivo está instalado justamente na interligação desta máquina com o sistema.

$$\varphi_{\text{PS}} - \boldsymbol{\theta}^0 = \begin{array}{cc|cc} & A_1 & & A_2 & \\ \hline & 81.5757 & -77.8203 & -50.1871 & 90.0000 \\ & -77.8203 & 80.9050 & 49.8855 & 90.0000 \\ \hline & -50.1871 & -49.8855 & 78.0124 & -270.0000 \\ & -90.0000 & -90.0000 & -90.0000 & 77.1223 \end{array} \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \end{array}$$

A matriz de deslocamentos angulares $(\varphi_{\text{PS}} - \boldsymbol{\theta}^0)$ do PS é utilizada para estudar e validar as características do PS.

Observando a matriz de deslocamentos angulares $(\varphi_{\text{PS}} - \boldsymbol{\theta}^0)$, nota-se que os deslocamentos angulares $(\varphi_{\text{PS}} - \theta^0)_{14}$, $(\varphi_{\text{PS}} - \theta^0)_{24}$ e $(\varphi_{\text{PS}} - \theta^0)_{34}$ são de 90° por outro lado os deslocamentos $(\varphi_{\text{PS}} - \theta^0)_{41}$, $(\varphi_{\text{PS}} - \theta^0)_{42}$ e $(\varphi_{\text{PS}} - \theta^0)_{43}$ são de -90° . Destaca-se que isto é coerente com o fato de que a defasagem introduzida pelo PS é positiva em um sentido e negativa no outro. Isso acontece porque a matriz $Y_{\text{PS,PS}}$ é uma matriz não simétrica e a

assimetria está justamente nos ângulos de $\bar{y}_{k\ell PS}$ e $\bar{y}_{\ell k PS}$ que são opostos como ilustrado na figura 5.6.

$$\mathbf{K}_{PS}^{ef} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ -1.0000 & -1.0000 & -1.0000 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

Observando a matriz dos coeficientes de eficácia $\mathbf{K}_{PS}^{ef}$, nota-se que somente os elementos $(K_{PS}^{ef})_{14(41)}$, $(K_{PS}^{ef})_{24(42)}$ e $(K_{PS}^{ef})_{34(43)}$ possuem valores diferentes de zero, o que indica que o PS só é eficaz nas interações entre a máquina 4 e as demais máquinas do sistema.

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

$$\mathbf{F}_{PS} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{cc} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} 0 & 0 & 0 & 0.7172 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7199 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0.5711 \\ -2.8813 & -2.9256 & -1.4211 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

A matriz de Fatores de Efeito apresenta a mesma característica da matriz do coeficiente de eficácia. Conclui-se que com o PS instalado entre as barras 4-10, como está localizado na conexão da máquina 4 com o sistema, influencia somente as interações da máquinas 4 com as demais máquinas do sistema.

5º caso) PS instalado entre as barras 8 e 9

Considera-se o PS instalado entre as barras 8 e 9 como na figura 6.6.

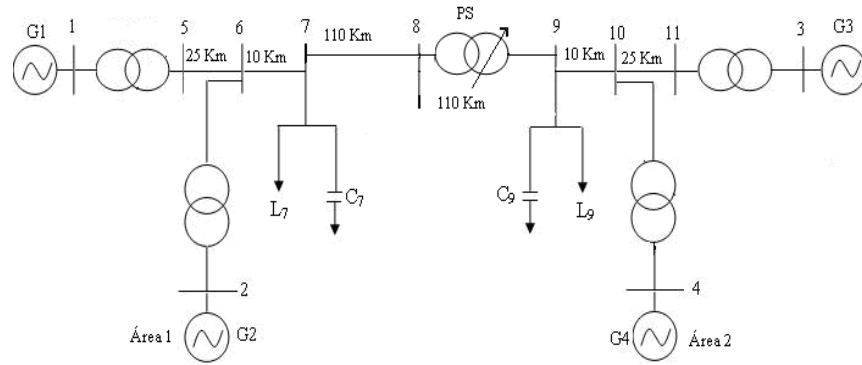


Figura 6.6 – Sistema teste 4 máquinas e 11 barras com o PS instalado entre as barras 8 e 9

As condições iniciais para o 5º caso são:

$$|Y_{\text{red}}^0| = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} 1.2801 & 0.9049 & 0.1329 & 0.1403 \\ 0.9049 & 1.3060 & 0.1403 & 0.1481 \\ \hline 0.1329 & 0.1403 & 1.3622 & 0.8647 \\ 0.1403 & 0.1481 & 0.8647 & 1.3996 \end{array} \right] \end{array}$$

$$\theta^0 = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} -81.4691 & 77.4914 & 11.6102 & 11.3086 \\ 77.4914 & -80.7970 & 11.3086 & 11.0071 \\ \hline 71.6102 & 71.3086 & -77.6387 & 68.6167 \\ 71.3086 & 71.0071 & 68.6167 & -76.7535 \end{array} \right] \end{array}$$

e obtém-se os seguintes resultados:

$$K_{\text{PS}} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} A_1 & A_2 \end{array} \\ \begin{array}{c} A_1 \\ A_2 \end{array} & \left[\begin{array}{cc|cc} 0 & 0 & 0.1294 & 0.1366 \\ 0 & 0 & 0.1366 & 0.1442 \\ \hline 0.1294 & 0.1366 & 0 & 0 \\ 0.1366 & 0.1442 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

Neste caso o dispositivo está localizado na interconexão entre as áreas e os coeficientes K_{PS} refletem perfeitamente esta situação, uma vez que são nulos para as interligações entre máquinas de uma mesma área.

$$\varphi_{\text{PS}} - \theta^0 = \begin{bmatrix} & A_1 & & A_2 \\ \begin{bmatrix} 81.4691 & -77.4914 \\ -77.4914 & 80.7970 \\ 90.0000 & 90.0000 \\ 90.0000 & 90.0000 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -90.0000 & -90.0000 \\ -90.0000 & -90.0000 \\ 77.6387 & -68.6167 \\ -68.6167 & 76.7535 \end{bmatrix} \\ & A_1 \\ & A_2 \end{bmatrix}$$

O efeito causado pela ação do PS é sobre as interações interáreas, e as variações da admitâncias de transferência entre máquinas de áreas diferentes são sempre em quadratura com a admitância original, destacando a ação proeminente sobre os ângulos das admitâncias positivamente em uma direção e negativamente na outra, de acordo com a rotação angular introduzida pelo PS. Entre A_1 e A_2 o deslocamento está atrasado em 90° e entre A_2 e A_1 está adiantado de 90° . As matrizes dos coeficientes de eficácia e fatores de efeito são

$$\mathbf{K}_{\text{PS}}^{\text{ef}} = \begin{bmatrix} & A_1 & & A_2 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1.0000 & 1.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1.0000 & -1.0000 \\ -1.0000 & -1.0000 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ & A_1 \\ & A_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{\text{PS}} = \begin{bmatrix} & A_1 & & A_2 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.8001 & 0.8035 \\ 0.8035 & 0.8069 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -4.9350 & -5.0666 \\ -5.0666 & -5.2054 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ & A_1 \\ & A_2 \end{bmatrix}$$

Nota-se na matriz do Coeficiente de Eficácia e do Fator de Efeito que os elementos nulos pertencem as conexões internas das áreas A_1 e A_2 , o que evidencia a ação do PS nas interações interáreas.

Quadro 6.6 – Dados de Linhas do Sistema IEEE 14 barras

Nº da linha	Barra inicial	Barra terminal	Impedância série		Admitância Paralela	
			R	X	G	B
1	1	2	0.0194	0.0592	0.0000	0.0528
2	1	5	0.0540	0.2230	0.0000	0.0492
3	2	3	0.0470	0.1980	0.0000	0.0438
4	2	4	0.0581	0.1763	0.0000	0.0374
5	2	5	0.0569	0.1739	0.0000	0.0340
6	3	4	0.0670	0.1710	0.0000	0.0346
7	4	5	0.0133	0.0421	0.0000	0.0128
8	4	7	0.0000	0.2091	0.0000	0.0000
9	4	9	0.0000	0.5562	0.0000	0.0000
10	5	6	0.0000	0.2520	0.0000	0.0000
11	6	11	0.0950	0.1989	0.0000	0.0000
12	6	12	0.1229	0.2558	0.0000	0.0000
13	6	13	0.0662	0.1303	0.0000	0.0000
14	7	8	0.0000	0.1761	0.0000	0.0000
15	7	9	0.0000	0.1100	0.0000	0.0000
16	9	10	0.0318	0.0845	0.0000	0.0000
17	9	14	0.1271	0.2704	0.0000	0.0000
18	10	11	0.0821	0.1921	0.0000	0.0000
19	12	13	0.2209	0.1999	0.0000	0.0000
20	13	14	0.1709	0.3480	0.0000	0.0000
21	2	15	0.0000	0.1000	0.0000	0.0000
22	3	16	0.0000	0.1000	0.0000	0.0000
23	6	17	0.0000	0.1000	0.0000	0.0000
24	8	18	0.0000	0.1000	0.0000	0.0000

Quadro 6.7 – Resultados do Cálculo do Fluxo de Potência para o Caso do Sistema IEEE 14 barras

Barra	Nome	Tensão de Barra		Potência de Barra (p.u)	
		Módulo (p.u.)	Ângulo(graus)	Ativa	Reativa
1	Barra 1	1.0000	2.9954	2.3200	-0.0828
2	Barra 2	0.9791	-2.5026	-0.2170	-0.1270
3	Barra 3	0.9591	-11.5590	-0.9420	-0.1900
4	Barra 4	0.9571	-8.6950	-0.4780	0.0000
5	Barra 5	0.9625	-7.0045	-0.0760	-0.0160
6	Barra 6	0.9805	-13.6939	-0.1120	-0.0750
7	Barra 7	0.9679	-12.4296	0.0000	0.0000
8	Barra 8	0.9884	-12.4296	0.0000	0.0000
9	Barra 9	0.9625	-14.3821	-0.2950	-0.1660
10	Barra 10	0.9575	-14.6033	-0.0900	-0.0580
11	Barra 11	0.9651	-14.3051	-0.0350	-0.0180
12	Barra 12	0.9709	-14.7764	-0.0610	-0.0160
13	Barra 13	0.9720	-15.2429	-0.1350	-0.0580
14	Barra 14	0.9999	-17.3958	-0.1490	0.2954
15	Barra 15	1.0000	0.0000	-0.4275	0.2184
16	Barra 16	1.0000	-11.5590	0.0000	0.4093
17	Barra 17	1.0000	-13.6939	0.0000	0.1946
18	Barra 18	1.0000	-12.4296	0.0000	0.1161

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

Quadro 6.8 – Parâmetros das Máquinas

Máquina	Barra	XD	Xld	M	D	Tld0	Tlq0	KR	TR
1	1	0.8979	0.2995	0.2730	0.0000	7.4000	0.2000	50.0000	0.5000
2	15	0.9500	0.8500	0.3470	0.0000	6.1000	0.3000	20.0000	0.5000
3	16	0.9500	0.8500	0.3470	0.0000	6.1000	0.3000	20.0000	0.5000
4	17	1.1500	0.1320	0.0268	0.0000	4.7500	1.5000	20.0000	0.5000
5	18	1.1500	0.1320	0.0268	0.0000	4.7500	1.5000	20.0000	0.5000

Máquina	Barra	Efdmax	Efdmin	Tg	Tm	Ag	Bg	Alf	Bet
1	1	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	15	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	16	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	17	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	18	5.0000	-5.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Quadro 6.9 – Tensões Internas (atrás de Xld)

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

Quadro 6.10 – Ângulos dos Eixos q

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

6.3.1 Inclusão do ULTC no sistema de 5 máquinas

Para esse caso a matriz admitância de barra reduzida as barras internas dos geradores para condição de equilíbrio é:

$$|Y_{red}^0| = \begin{bmatrix} 2.3719 & 1.0814 & 0.2590 & 0.4914 & 0.0228 \\ 1.0814 & 3.0216 & 0.6096 & 0.9059 & 0.1203 \\ 0.2590 & 0.6096 & 2.8187 & 0.1073 & 0.4647 \\ 0.4914 & 0.9059 & 0.1073 & 3.1544 & 0.4320 \\ 0.0228 & 0.1203 & 0.4647 & 0.4320 & 2.1532 \end{bmatrix}$$

$$\theta^0 = \begin{bmatrix} -86.6213 & 85.7428 & 88.0147 & 84.6133 & 77.9930 \\ 85.7428 & -84.0350 & 84.3097 & 84.2185 & 81.4032 \\ 88.0147 & 84.3097 & -79.3626 & -79.8693 & 82.2851 \\ 84.6133 & 84.2185 & -79.8693 & -86.7983 & 90.2934 \\ 77.9930 & 81.4032 & 82.2851 & 90.2934 & -85.3063 \end{bmatrix}$$

A partir deste caso base, consideram-se diferentes localizações de instalação do ULTC com o objetivo de verificar se os coeficientes expressam adequadamente os efeitos do dispositivo sobre as interações intermáquinas.

Considera-se a relação de transformação do ULTC como 1:a e a variação da relação de transformação inserida pelo ULTC no sistema é $\Delta a = 0.1$.

6º caso) ULTC instalado entre as barras 7 e 8

Considere o ULTC é instalado entre as barras 7- 8 como ilustra a figura 6.8,

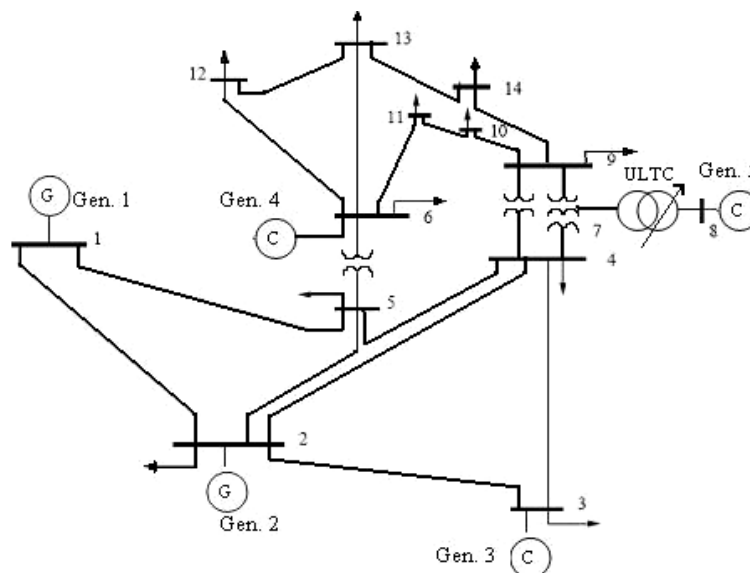


Figura 6.8 - IEEE 14 barras e 5 máquinas com o ULTC instalado entre as barras 7 e 8

e se obtém a matriz K_{TC} em (p.u.) e a matriz do deslocamento angular $\theta^0 - \varphi_{TC}$ em graus é:

$$\mathbf{K}_{TC} = \begin{bmatrix} 0.0521 & 0.0884 & 0.0793 & 0.0981 & 0.0901 \\ 0.0884 & 0.1500 & 0.1346 & 0.1665 & 0.1529 \\ 0.0793 & 0.1346 & 0.1207 & 0.1494 & 0.1372 \\ 0.0981 & 0.1665 & 0.1494 & 0.1848 & 0.1697 \\ 0.0901 & 0.1529 & 0.1372 & 0.1697 & 1.2324 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\theta}^0 - \boldsymbol{\varphi}_{TC} = \begin{bmatrix} 20.2838 & 193.3008 & 195.7359 & 187.6680 & -14.1446 \\ 193.3008 & 22.8882 & 194.2363 & 188.3293 & -14.1446 \\ 195.7359 & 194.2363 & 30.0963 & 189.3084 & -14.1446 \\ 187.6680 & 188.3293 & 189.3084 & 22.0013 & -14.1446 \\ -14.1446 & -14.1446 & -14.1446 & -14.1446 & -171.9830 \end{bmatrix}$$

Observando a matriz de deslocamentos angulares $(\boldsymbol{\theta}^0 - \boldsymbol{\varphi}_{TC})$, nota-se que os deslocamentos angulares entre a máquina 5 e as demais máquinas são pequenos em relação aos das demais interações, podendo-se concluir que a variação da relação de transformação do ULTC afeta mais as interações entre a máquina 5 e as demais máquinas do sistema. Os coeficientes de eficácia e fatores de efeito são dados a seguir:

$$\mathbf{K}_{TC}^{ef} = \begin{bmatrix} 0.0488 & -0.0860 & -0.0763 & -0.0972 & 0.0874 \\ -0.0860 & 0.1382 & -0.1305 & -0.1647 & 0.1483 \\ -0.0763 & -0.1305 & 0.1045 & -0.1474 & 0.1330 \\ -0.0972 & -0.1647 & -0.1474 & 0.1713 & 0.1646 \\ 0.0874 & 0.1483 & 0.1330 & 0.1646 & -1.2204 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{TC} = \begin{bmatrix} 0.0208 & -0.0832 & -0.1279 & -0.2584 & 0.3459 \\ -0.0832 & 0.0410 & -0.1176 & -0.2673 & 0.3459 \\ -0.1279 & -0.1176 & 0.0359 & -0.2922 & 0.3459 \\ -0.2584 & -0.2673 & -0.2922 & 0.0801 & 0.3459 \\ 0.3459 & 0.3459 & 0.3459 & 0.3459 & -0.7385 \end{bmatrix}$$

Analisando a matriz de Fator de Efeito F_{TC} , nota-se que o ULTC instalado entre as barras 7 - 8 causa maior efeito entre a máquina 5 e as demais máquinas do sistema, como esperado, pois o transformador está localizado justamente na conexão da máquina 5 com o restante do sistema.

7º caso) ULTC instalado entre as barras 5 e 6

A figura 6.9 ilustra o ULTC instalado entre as barras 5 e 6 como

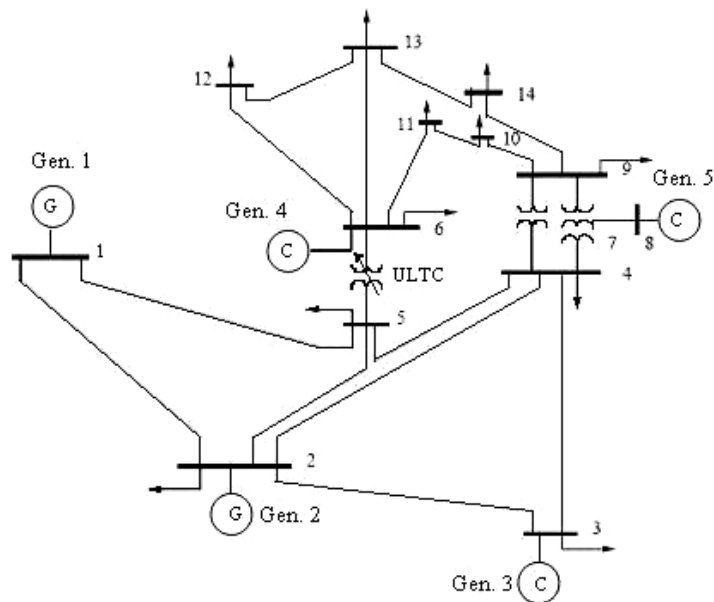


Figura 6.9 - IEEE 14 barras e 5 máquinas com o ULTC instalado entre as barras 5 e 6

Para este caso, as matrizes dos coeficientes de eficácia e deslocamentos angulares são:

$$\mathbf{K}_{TC} = \begin{bmatrix} 0.1095 & 0.1749 & 0.1334 & 0.1544 & 0.0449 \\ 0.1749 & 0.2793 & 0.2129 & 0.2508 & 0.0712 \\ 0.1334 & 0.2129 & 0.1622 & 0.2008 & 0.0532 \\ 0.1544 & 0.2508 & 0.2008 & 0.5562 & 0.1549 \\ 0.0449 & 0.0712 & 0.0532 & 0.1549 & 0.0144 \end{bmatrix}$$

$$(\theta^0 - \varphi_{TC}) = \begin{bmatrix} 11.5604 & 183.7616 & 185.2457 & -1.5227 & 199.0780 \\ 183.7616 & 12.5315 & 182.9255 & -1.4326 & 198.3810 \\ 185.2457 & 182.9255 & 17.8265 & -1.0390 & 197.9220 \\ -1.5227 & -1.4326 & -1.0390 & -154.6785 & 5.9509 \\ 199.0780 & 198.3810 & 197.9220 & 5.9509 & 89.2686 \end{bmatrix}$$

Observe-se na matriz de deslocamentos angulares que os menores deslocamentos são $(\theta^0 - \varphi_{TC})_{41}, (\theta^0 - \varphi_{TC})_{42}, (\theta^0 - \varphi_{TC})_{43}$ e $(\theta^0 - \varphi_{TC})_{45}$, portanto as interações entre a máquina 4 e as demais máquinas são mais afetadas pela ação do ULTC. A matriz dos coeficientes de eficácia é:

$$\mathbf{K}_{TC}^{ef} = \begin{bmatrix} 0.1073 & -0.1745 & -0.1328 & 0.1543 & -0.0424 \\ -0.1745 & 0.2727 & -0.2127 & 0.2507 & -0.0676 \\ -0.1328 & -0.2127 & 0.1544 & 0.2008 & -0.0506 \\ 0.1543 & 0.2507 & 0.2008 & -0.5027 & 0.1541 \\ -0.0424 & -0.0676 & -0.0506 & 0.1541 & 0.0002 \end{bmatrix}$$

Nota-se que o elemento $(K_{TC}^{ef})_{24}$ é o maior, dentre os elementos fora da diagonal, significando que a ação do ULTC é mais eficaz entre as máquinas 2 e 4, ou seja, a ação do ULTC é mais eficaz sobre a admitância de transferência entre as máquinas 2 e 4. Mas observando a matriz dos Fatores de Efeito

$$\mathbf{F}_{TC} = \begin{bmatrix} 0.0457 & -0.1688 & -0.2226 & 0.4102 & -0.1680 \\ -0.1688 & 0.0809 & -0.1918 & 0.4068 & -0.1576 \\ -0.2226 & -0.1918 & 0.0530 & 0.3981 & -0.1317 \\ 0.4102 & 0.4068 & 0.3981 & -0.2350 & 0.3238 \\ -0.1680 & -0.1576 & -0.1317 & 0.3238 & 0.0001 \end{bmatrix}$$

nota-se o maior efeito é entre as máquinas 1 e 4, mas também são afetadas de modo significativo as conexões da máquina 4 com as demais máquinas do sistema.

Como comentado anteriormente o Fator de Efeito indica a influência da relação de transformação do ULTC sobre a capacidade de sincronização entre duas máquinas do sistema,

portanto pode-se concluir que a capacidade de sincronização entre a máquina 4 e as demais máquinas foram mais influenciadas pela adição do ULTC.

6.3.2 Inclusão PS no sistema de 5 máquinas

8º caso) PS instalado entre as barras 7 e 8

Considerando o caso base, o PS será instalado em diferentes localizações no sistema teste. No 8º caso o PS é instalado entre as barras 7- 8 como ilustra a figura 6.10,

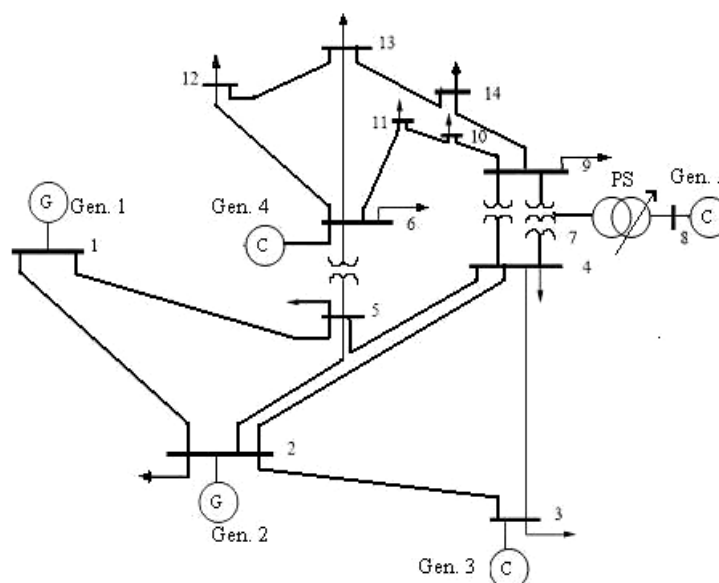


Figura 6.10 - IEEE 14 barras e 5 máquinas com o PS instalado entre as barras 7 e 8

e as condições iniciais para esse caso são:

$$|Y_{red}^0| = \begin{bmatrix} 2.3491 & 1.0337 & 0.5966 & 0.3762 & 0.2526 \\ 1.0337 & 3.3696 & 1.1091 & 0.6163 & 0.4287 \\ 0.5966 & 1.1091 & 2.9127 & 0.5044 & 0.3846 \\ 0.3762 & 0.6163 & 0.5044 & 2.1392 & 0.4758 \\ 0.2526 & 0.4287 & 0.3846 & 0.4758 & 1.6524 \end{bmatrix}$$

$$\theta^0 = \begin{bmatrix} -86.5857 & 85.6456 & 87.3384 & 82.1410 & 51.5653 \\ 85.6456 & -85.5527 & 85.0531 & 82.0166 & 50.7795 \\ 87.3384 & 85.0531 & -79.8292 & 82.2535 & 50.0373 \\ 82.1410 & 82.0166 & 82.2535 & -82.1832 & 52.9078 \\ 111.5653 & 110.7795 & 110.0373 & 112.9078 & -86.2946 \end{bmatrix}$$

Obtém-se a matriz K_{PS} em p.u. e a matriz do deslocamento angular $\varphi_{PS} - \theta^0$ em graus é:

$$K_{PS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2526 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4287 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3846 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4758 \\ 0.2526 & 0.4287 & 0.3846 & 0.4758 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{PS} - \theta^0 = \begin{bmatrix} 86.5857 & -85.6456 & -87.3384 & -82.1410 & -90.0000 \\ -85.6456 & 85.5527 & -85.0531 & -82.0166 & -90.0000 \\ -87.3384 & -85.0531 & 79.8292 & -82.2535 & -90.0000 \\ -82.1410 & -82.0166 & -82.2535 & 82.1832 & -90.0000 \\ -270.0000 & -270.0000 & -270.0000 & -270.0000 & 86.2946 \end{bmatrix}$$

A matriz K_{PS} mostra que só tem sensibilidade nas interações da máquina 5 com as demais máquinas do sistema e nota-se na matriz $\varphi_{PS} - \theta^0$ que os deslocamentos angulares $(\varphi_{PS} - \theta^0)_{15}$, $(\varphi_{PS} - \theta^0)_{25}$, $(\varphi_{PS} - \theta^0)_{35}$ e $(\varphi_{PS} - \theta^0)_{45}$ são de -90° por outro lado os deslocamentos $(\varphi_{PS} - \theta^0)_{51}$, $(\varphi_{PS} - \theta^0)_{52}$, $(\varphi_{PS} - \theta^0)_{53}$ e $(\varphi_{PS} - \theta^0)_{54}$ são de 90° , portanto apresenta as características do PS nas interações da máquina 5 com as demais máquinas do sistema.

$$\mathbf{K}_{\text{PS}}^{\text{ef}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix}$$

Os Coeficientes de Eficácia evidenciam que as variações da relação de transformação do PS afetam diretamente as admitâncias de transferência entre a máquina 5 e as demais máquinas. Nota-se que as interações entre as demais máquinas do sistema são nulas. E os Fatores de Efeito também evidenciam isto como se observa na matriz a seguir:

$$\mathbf{F}_{\text{PS}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1.1111 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.1283 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.1451 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.0829 \\ 0.5136 & 0.5172 & 0.5207 & 0.5075 & 0 \end{bmatrix}$$

Dado que o PS está instalado na interligação da máquina 5 com o sistema, o efeito de sua ação ocorre nas interações desta máquina com as demais e o efeito nas interações entre as outras máquinas do sistema é nulo.

9º caso) PS instalado entre as barras 4 e 9

Considere o PS instalado entre as barras 4- 9 como na figura 6.11,

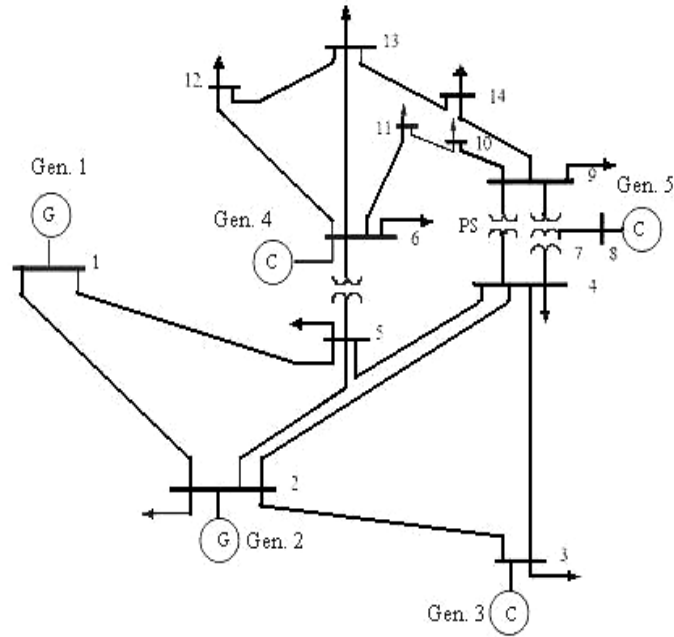


Figura 6.11 - IEEE 14 barras e 5 máquinas com o PS instalado entre as barras 4 e 9

e as condições iniciais para o 9º caso são:

$$|Y_{red}^0| = \begin{bmatrix} 2.3540 & 1.0251 & 0.5888 & 0.3630 & 0.2454 \\ 1.0251 & 3.3835 & 1.0960 & 0.5943 & 0.4166 \\ 0.5888 & 1.0960 & 2.9232 & 0.4852 & 0.3738 \\ 0.3630 & 0.5943 & 0.4852 & 2.1543 & 0.4670 \\ 0.2454 & 0.4166 & 0.3738 & 0.4670 & 1.6633 \end{bmatrix}$$

$$\theta^0 = \begin{bmatrix} -86.6241 & 85.7542 & 87.6020 & 79.1970 & 76.8356 \\ 85.7205 & -85.6403 & 85.2519 & 78.9202 & 75.9755 \\ 87.4244 & 85.1371 & -79.9368 & 78.7273 & 75.0532 \\ 85.3296 & 85.4038 & 86.1582 & -82.3619 & 82.6407 \\ 87.0662 & 86.3551 & 85.7901 & 84.1008 & -86.5167 \end{bmatrix}$$

se obtém a matriz K_{PS} em (p.u.) e a matriz do deslocamento angular $\varphi_{PS} - \theta^0$ em graus é:

$$K_{PS} = \begin{bmatrix} 0.0016 & 0.0024 & 0.0022 & 0.0397 & 0.0439 \\ 0.0025 & 0.0036 & 0.0029 & 0.0685 & 0.0755 \\ 0.0023 & 0.0029 & 0.0010 & 0.0638 & 0.0698 \\ 0.0405 & 0.0695 & 0.0641 & 0.0279 & 0.0319 \\ 0.0440 & 0.0755 & 0.0698 & 0.0207 & 0.0182 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{PS} - \theta^0 = \begin{bmatrix} -13.7891 & -199.1007 & -235.3195 & -109.8873 & -121.0163 \\ -174.0360 & -14.7372 & -227.1874 & -110.3027 & -120.8816 \\ -143.8777 & -145.2880 & -22.8262 & -110.3439 & -120.3210 \\ -233.5773 & -234.8762 & -237.1456 & -20.8883 & -170.5803 \\ -249.7829 & -250.1291 & -250.6823 & -229.5433 & -24.4974 \end{bmatrix}$$

Diante da matriz de coeficiente de sensibilidade, observa-se que a sensibilidade da máquina 4 e da máquina 5 com as demais máquinas do sistema é maior.

$$\mathbf{K}_{PS}^{ef} = \begin{bmatrix} -0.0002 & 0.0008 & 0.0031 & -0.1012 & -0.1558 \\ -0.0003 & -0.0003 & 0.0020 & -0.1065 & -0.1582 \\ -0.0023 & -0.0015 & -0.0001 & -0.1215 & -0.1640 \\ 0.0897 & 0.0956 & 0.1110 & -0.0046 & -0.0114 \\ 0.1681 & 0.1705 & 0.1762 & 0.0337 & -0.0045 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{PS} = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0005 & 0.0020 & -0.0732 & -0.1162 \\ -0.0002 & 0.0002 & 0.0013 & -0.0773 & -0.1193 \\ -0.0015 & -0.0010 & 0.0001 & -0.0884 & -0.1252 \\ 0.0603 & 0.0642 & 0.0738 & 0.0032 & -0.0079 \\ 0.1106 & 0.1131 & 0.1177 & 0.0230 & 0.0030 \end{bmatrix}$$

De acordo com a matriz $\mathbf{F}_{PS}$ têm-se que os valores referentes às interações da máquina 5 com as outras máquinas do sistema são maiores comparados as outras interações, o que evidencia uma maior influência do PS nas interações da máquina 5 com as demais máquinas do sistema. Isso acontece porque a máquina 5 está mais próxima do local onde foi instalado o PS.

6.4 Conclusões

Este capítulo apresentou os resultados de simulações realizadas em dois sistemas testes. O primeiro sistema teste é composto por 4 máquinas, 11 barras e duas áreas simétricas encontrados em Kundur (1994) e o segundo sistema teste é uma variação (por exclusão de compensadores presentes no original) do conhecido sistema IEEE-14 barras e 5 máquinas.

Foi inserido um ULTC entre as barras 4-10, 1-5 e 8-9 no primeiro sistema teste e entre as barras 7-8 e 5-6 no segundo sistema teste, para estudar qual o efeito que o ULTC causa na capacidade de sincronização entre pares de máquinas, dependendo de onde o dispositivo está instalado.

O transformador PS foi considerado entre as barras 4-10 e 8-9 no primeiro sistema teste e no segundo sistema teste foi instalado entre as barras 7-8 e 4-9. O PS foi instalado em diferentes localizações com o intuito de analisar qual o efeito que o deslocamento angular inserido no sistema pelo PS, exerce sob a capacidade de sincronização entre máquinas. E através dos coeficientes desenvolvidos nos capítulos 4 e 5, os coeficientes de eficácia e os fatores de efeito, foi possível analisar o efeito dos transformadores de relação de transformação variável sobre a capacidade de sincronização entre máquinas.

Capítulo 7

Conclusão

Neste trabalho abordou-se o problema de estabilidade transitória do Sistema Elétrico de Potência (SEP), do ponto de vista da capacidade de sincronização intermáquinas e como um transformador de relação de transformação variável, tanto o PS quanto o ULTC, inserido entre duas barras genéricas, em um ambiente multimáquinas pode influenciar na capacidade de sincronização intermáquinas e interárea.

As cargas foram representadas por admitâncias constantes e a matriz admitância foi reduzida às barras internas das máquinas, visando viabilizar a análise das interações entre máquinas por meio das admitâncias de transferência. Analisou-se a influência da ação do ULTC e do PS sobre as admitâncias de transferência entre pares de máquinas genéricos estudando assim a influência deste dispositivo na capacidade de sincronização entre as máquinas.

Durante o trabalho foram desenvolvidos alguns coeficientes com o objetivo de avaliar a influência da atuação do ULTC e PS nas interações entre máquinas. Os coeficientes de maior importância são o Coeficiente de Eficácia e o Fator de Efeito.

O Coeficiente de Eficácia indica a participação efetiva das variações da relação de transformação do ULTC ou do PS sobre a admitância de transferência entre cada par de máquinas genéricas i e j do sistema multimáquinas. Mais significativo é o Fator de Efeito que indica a variação da admitância de transferência comparada a admitância original. No caso do ULTC essa variação da admitância de transferência é comparada com a magnitude da admitância original (condições de equilíbrio), já para o caso do PS, que atua sobre a defasagem angular, a variação do ângulo da admitância de transferência é comparada com o ângulo da admitância em condições de regime permanente.

Através do Coeficiente de Eficácia e do Fator de Efeito foi possível estudar qual é a influência do ULTC e do PS sob a capacidade de sincronização entre máquinas, através da análise da admitância de transferência.

Nos casos analisados, observou-se que o Fator de Efeito apresenta um bom desempenho para verificar qual(is) interação(s) entre máquinas são mais ou menos afetadas pela ação do transformador de relação de transformação variável.

Embora as experimentações tenham sido efetuadas utilizando apenas pequenos sistemas testes, os resultados são promissores para consideração do Fator de Efeito em sistemas maiores onde pode ser útil em diversas abordagens ou procedimentos, tais como se descrevem a seguir.

- Desenvolver técnicas de análise da atuação do sistema de potência sobre a ação do ULTC e do PS.
- Conhecendo como o ULTC e o PS afeta o desempenho dinâmico e/ou transitório entre máquinas ou áreas, pode utilizar o fator de efeito para definir leis de controle.
- O fator de efeito pode indicar quais pares de máquinas são mais ou menos afetados pela atuação do ULTC e PS, portanto é possível desenvolver métodos para analisar a melhor localização para esse dispositivo de acordo com o par de máquinas a ser escolhido para análise.

Trabalhos futuros

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

- Estudo da utilização dos coeficientes definidos neste trabalho, para análises de desempenho dinâmico e/ou transitório do Sistema de Energia Elétrica sob a ação do ULTC e do PS.
- Desenvolver Métodos para analisar a melhor localização do transformador de relação de transformação variável no sistema de potência de acordo com a interação entre o par de máquinas escolhido, para isto poderiam ser utilizados métodos de otimização e/ou redes neurais.
- Desenvolver leis de controle para a utilização do transformador de relação de transformação variável no sistema com vistas a atender determinados critérios de desempenho.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A.A. **Power system control and stability**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1994. 464 p.

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

COLVARA, L. D. Influencia do TCSC na energia transitoria dos sistemas e potência. **IEEE Latin America Transactions**, Los Alamitos, California, v. 3, n. 3, p. 284-289, 2005. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/reg/9/etrans/eng/>>. Acesso em: 06 jan. 2010.

COLVARA, L. D.; MARQUES, M. M. Efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas em sistema de potência multimáquinas. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION-CLAGTEE, 8., 2009, Ubatuba. **Proceedings...** Guaratinguetá: FDCT, 2009. p. 1-06. 1 CD-ROM.

ELGERD, O. I. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica**. São Paulo: Mackon Books, 1976. 604 p.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 p. (Electric Power Research Institute).

Marques, M. M. **Um estudo dos efeitos da atuação de um SVC sobre as interações entre máquinas de um sistema de potência multimáquinas**. 2009. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2009.

MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. Campinas: Unicamp, 2003. 251p.

PAI, M. A. **Power system stability: analysis by direct of lyapunov**. Amsterdam: North Holland, 1981. 251 p.

SILVA, J. C.; COLVARA, L. D. O TCSC em um sistema de energia elétrica multimáquinas: os efeitos sobre a potência sincronizante. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION-CLAGTEE, 8., 2009, Ubatuba. **Proceedings...** Guaratinguetá: FDCT, 2009. p. 1-7. 1 CD-ROM.

STAGG, G. W.; EL ABIAD, A. H. **Computer methods in power system analysis**. New York: McGraw-Hill, c1968. 427 p.

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

ANEXO

Artigo publicado

PERARO, N. R; COLVARA, L. D. Análise dos efeitos da atuação de um Phase Shifter (PS) Transformer na sincronização intermáquinas. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMIC, CONTROL AND THEIR APPLICATIONS (DINCON'10), 9., 2010, Serra Negra, SP. **Proceedings...** Serra Negra: [s.n.], 2010. p. 1-8.