

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS COM TECNOLOGIA FACTS
(FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS) EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA - COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA.**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.**

Carlos Aparecido Gama

Florianópolis, abril de 1995.

**UTILIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS COM TECNOLOGIA FACTS
(FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS) EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA - COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA.**

Carlos Aparecido Gama

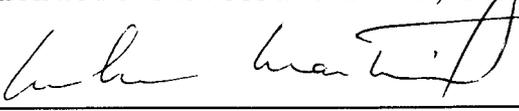
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia**, especialidade **Engenharia Elétrica**, e aprovada em sua forma final pelo programa de pós-graduação.

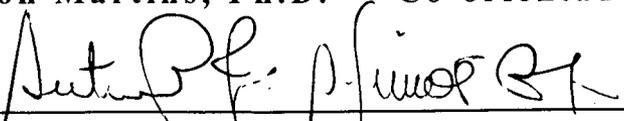

Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D. - Orientador

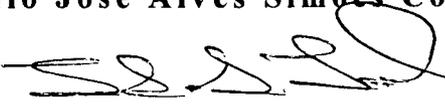

Enio Valmor Kassick, Dr. - Coordenador de Pós-graduação

Banca Examinadora:


Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D. - Orientador


Nelson Martins, Ph.D. - Co-orientador


Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.


Jorge Luís de Araújo Jardim, Ph.D.

aos meus pais Alírio e Nair,

aos meus irmãos Eliane, Sônia, Luis, Alírio e Rogério.

Agradecimentos.

Gostaria de externar meus agradecimentos às Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. - ELETRONORTE, em especial à Superintendência de Planejamento, ao Departamento de Planejamento Elétrico e à Divisão de Análise e Programação do Sistema Elétrico, pela oportunidade de desenvolvimento e publicação deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, na pessoa do orientador e amigo Aguinaldo Silveira e Silva, e a todos que me ajudaram direta ou indiretamente.

Aos amigos Nelson Martins, do CEPEL, na condição de co-orientador e Flávio Antônio Farina Pazo Blanco, da ELETRONORTE, pelas valiosas sugestões e contribuições agregadas ao trabalho.

Aos colegas da ABB Power Systems, Ludvika - Suécia, da ABB Transmission Technology Institute, Raleigh - USA, e da SIEMENS, Alemanha, pelo apoio, sugestões e disponibilização de ferramentas e relatórios técnicos.

Aos amigos José Luiz e Raul, da ELETRONORTE, pelo valioso apoio em microinformática.

A Deus, presente em todas as etapas da realização deste trabalho.

CONTEÚDO

1. - Introdução.	1
2. - Dispositivos FACTS.	7
2.1. - Introdução.	7
2.2. - Semicondutores de Potência.	7
2.2.1. - Tiristores.	8
2.2.2. - Semicondutores de Última Geração.	10
2.3. - Tipos de Dispositivos FACTS.	13
2.3.1. - Reator Controlado a Tiristor (RCT)	14
2.3.2. - Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT).	16
2.3.3. - Compensador Série Controlado (CSC).	19
2.3.4. - Gerador Estático de Reativos.	19
2.3.5. - Compensador Estático de Potência Ativa.	21
2.3.6. - Compensador Generalizado (Universal).	22
2.3.7. - Limitador de Curto-Circuito.	24
2.3.8. - Filtros Ativos de Potência.	25
2.3.9. - Disjuntor Rápido.	26
2.3.10.- "Load Tap Changers" (LTC).	27
2.3.11.- Linhas Autocomutáveis.	27
2.4. - Conclusões.	28
3. - FACTS para Controle de Fluxo de Potência.	30
3.1. - Introdução.	30
3.2. - Controle de Impedância Equivalente de Linhas de Transmissão.	30
3.2.1. - Compensação "Shunt".	33

3.2.2. - Compensação Série.	37
3.3. - Controle de Tensão Usando Defasadores.	41
3.4. - Estabilidade de Sistemas de Potência com Equipamentos Controladores de Fluxo de Potência.	45
3.5. - Conclusões.	49
4. - Compensação Série Controlada (CSC).	51
4.1. - Introdução.	51
4.2. - "Thyristor Controlled Series Compensation" (TCSC).	51
4.2.1. - Características Básicas.	51
4.2.2. - Característica de Impedância.	57
4.2.3. - Capacidade Real de Reatância do TCSC.	60
4.3. - "Thyristor Switched Series Compensation" (TSSC).	65
4.4. - Aplicações do CSC nos Sistemas Elétricos.	66
4.4.1. - Controle de Fluxo de Potência.	67
4.4.2. - Aumento da Capacidade de Transporte de Energia.	68
4.4.3. - Mitigação de Ressonância Subsíncrona.	70
4.5. - Estado da Arte.	74
4.5.1. - Projeto SIEMENS/WAPA.	74
4.5.2. - Projeto ABB/AEP.	76
4.5.3. - Projeto EPRI/GE/BPA.	78
4.6. - Conclusões.	79
5. - Modelagem do Compensador Série Controlado em Programas Digitais de Análise de Sistemas de Potência.	81
5.1. - Introdução.	81
5.2. - Programa de Fluxo de Potência.	83
5.3. - Programa de Estabilidade Eletromecânica.	85

5.3.1. - Sistema de Medição.	87
5.3.2. - Controlador.	88
5.3.3. - Sistema de Disparo.	92
5.3.4. - Unidade de Distribuição de Reatância.	93
5.4. - Programa de Estabilidade Linear.	99
5.5. - Programa de Transitórios Eletromagnéticos.	103
5.6. - Conclusões.	105
6. - Casos Testes.....	107
6.1. - Introdução.	107
6.2. - Caso Teste 1.	107
6.3. - Caso Teste 2.	116
6.4. - Caso Teste 3.	119
6.5. - Conclusões.	121
7. - Aplicação a um Sistema Elétrico de Grande Porte.	123
7.1. - Introdução.	123
7.2. - Modelos Utilizados.	127
7.3. - Resultados Obtidos.	129
7.3.1. - CSC para Incremento de Transmissão de Energia.	129
7.3.2. - CSC para Controle de Fluxo de Potência e Incremento de Transmissão de Energia.	133
7.4. - Conclusões.	134
8. - Conclusões Finais e Sugestões para Futuros Trabalhos.	137
8.1. - Conclusões Finais.	137
8.2. - Sugestões para Futuros Trabalhos.	141

9. - Referências	144
Apêndice A.	150
Apêndice B.	161
Apêndice C.	171

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Ganho em p.u. no fluxo de potência transmitida em função de δ (ângulo de defasagem) e n (número de pontos compensados).	37
QUADRO 2 - Aplicações do CSC em sistemas elétricos: \uparrow - aplica-se, \downarrow - não se aplica.....	80
QUADRO 3 - Parâmetros de linhas e transformadores.	108
QUADRO 4 - Valores máximos de intercâmbio.	125
QUADRO 5 - Principais reforços planejados.	126
QUADRO 6 - Níveis de compensação série adotados.	129
QUADRO 7 - Ajuste base do controlador do CSC.	173

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	- Potência instalada de transmissão CCAT.	2
FIGURA 2	- (a) Símbolo do SCR ou LTT; (b) Válvula série com circuito "snubber".	9
FIGURA 3	- Simbologia do GTO.	10
FIGURA 4	- Dispositivos híbridos - Potência prevista.	12
FIGURA 5	- (a) Esquema básico do RCT; (b) Formas de onda da tensão e corrente.	14
FIGURA 6	- RCT de 12 pulsos.	16
FIGURA 7	- (a) Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT); (b) Formas de onda de tensão e corrente.	18
FIGURA 8	- Banco típico de CCT ("shunt").	18
FIGURA 9	- Capacitores Chaveados a Tiristor para conexão série.	18
FIGURA 10	- Esquema genérico do Compensador Série Controlado.	19
FIGURA 11	- Gerador Estático de Reativos (GER).	20
FIGURA 12	- Compensador Estático de Potência Ativa.	22
FIGURA 13	- Compensador Generalizado.	23
FIGURA 14	- Limitador de Curto-Circuito (LCC).	25
FIGURA 15	- (a) Sistema elétrico simples composto por duas máquinas; (b) diagrama fasorial correspondente e (c) característica de transmissão de potência.	31
FIGURA 16	- (a) Sistema elétrico com compensador "shunt"; (b) diagrama fasorial correspondente; (c) característica de transmissão de potência.	35

FIGURA 17 - (a) Sistema elétrico com compensação série; (b) diagrama fasorial; (c) característica de impedância.	39
FIGURA 18 - (a) Sistema elétrico com defasador; (b) diagrama fasorial; (c) característica de transmissão.	43
FIGURA 19 - Análise de estabilidade transitória através do critério das áreas iguais:(a) sem compensação; (b) com compensação "shunt".	47
FIGURA 19 - Análise de estabilidade transitória através do critério de áreas iguais: (c) com compensação série; (d) compensação com defasador.	48
FIGURA 20 - Módulo TCSC genérico.	52
FIGURA 21 - Esquema Simplificado do TCSC.	52
FIGURA 22 - Formas de onda de tensão e corrente no TCSC.	54
FIGURA 23 - Impedância teórica do TCSC à 60 Hz, em função do ângulo de disparo (α).	58
FIGURA 24 - Curva de Capacidade de Reatância Teórica do TCSC.	59
FIGURA 25 - Curva de Capacidade do TCSC.	61
A - Limite de Ângulo de Disparo (Capacitivo)	
B - Tiristores Bloqueados	
C - Limite de Máxima Tensão no Capacitor	
D - Tiristores em Condução Completa Reatância de Bypass)	
E - Limite de Ângulo de Disparo (Indutivo)	
F - Limite de Aquecimento Harmônico	
G - Limite de Corrente Máxima nos Tiristores	
FIGURA 26 - Curva de Capacidade de Reatância do TSSC.	66
FIGURA 27 - Configuração Genérica do CSC.	67

FIGURA 28 - TCSC com sistema de controle genérico.	71
FIGURA 29 - TCSC com Amortecedor de RSS no Sistema de Disparo.	73
FIGURA 30 - Reatância do TCSC em função da frequência.	73
FIGURA 31 - Projeto SIEMENS/WAPA - Diag. unifilar simplificado.	76
FIGURA 32 - Projeto ABB/AEP - Diagrama unifilar simplificado.	77
FIGURA 33 - Projeto EPRI-GE-BPA - Diagrama unifilar simplificado.	78
FIGURA 34 - Modelo genérico de simulação do CSC.	82
FIGURA 35 - Ilustração do modelo de CSC para fluxo de potência.	85
FIGURA 36 - Representação do sistema de medição.	88
FIGURA 37 - Proposição de Controlador Genérico para o CSC.	90
FIGURA 38 - Formas de representação do Sistema de Disparo.	93
FIGURA 39 - Módulo TCSC: (a) Unidade de distribuição de reatância; (b) Curva de capacidade de reatância.	95
FIGURA 40 - Modelo 1 - TCSC ideal.	95
FIGURA 41 - Curva de capacidade de reatância de um TCSC ideal (número infinito de módulos).	96
FIGURA 42 - Modelo 2 - TCSC com número limitado de módulos.	97
FIGURA 43 - Unidade de distribuição de reatância para TSSC.	98
FIGURA 44 - Modelo 4 - Limitador estático.	98
FIGURA 45 - Modelo de CSC para programa de estabilidade linear.	103
FIGURA 46 - Sistema teste 1 - diagrama unifilar.	108
FIGURA 47 - Modelo de gerador síncrono (máquina 1).	109

FIGURA 48 -	Sistema de excitação da máquina 1.	110
FIGURA 49 -	Modelo clássico de máquina (máquina 2).	110
FIGURA 50 -	Modelo do CSC para o caso teste 1.	110
FIGURA 51 -	Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com compensação fixa (50%).	112
FIGURA 52 -	Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 70%).	112
FIGURA 53 -	Reatância total da linha em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 70%).	113
FIGURA 54 -	Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com compensação fixa (70%).	114
FIGURA 55 -	Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 50%).	114
FIGURA 56 -	Reatância total da linha em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 50%).	115
FIGURA 57 -	Sistema teste 2 - diagrama unifilar.	116
FIGURA 58 -	Modelo do CSC para o caso teste 2.	117
FIGURA 59 -	Fluxo de pot. ativa na linha compensada em função do tempo. Sistema com compensação fixa (50%).	118
FIGURA 60 -	Fluxo de pot. ativa na linha compensada em função do tempo. Sistema com CSC.	118
FIGURA 61 -	Reatância total da linha compensada em função do tempo. Sistema com CSC.	119

FIGURA 62 -	Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com compensação fixa (50%).	120
FIGURA 63 -	Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 70%).	120
FIGURA 64 -	Diagrama eletrogeográfico do sistema Norte-Nordeste.	124
FIGURA 65 -	Diagrama unifilar do sistema de 500 kV atual.	124
FIGURA 66 -	Sistema de 500 kV planejado.	125
FIGURA 67 -	Modelo de CSC utilizado.	128
FIGURA 68 -	Curto-circuito monofásico com religamento tripolar.	130
FIGURA 69 -	Curto-circuito monofásico com religamento tripolar.	131
FIGURA 70 -	Curto-circuito monofásico com religamento tripolar. Intercâmbio de 2300 MW.	131
FIGURA 71 -	Curto-circuito monofásico com religamento tripolar.	132
FIGURA 72 -	Curto-circuito monofásico seguido de rejeição de carga: 1- Compensação fixa; 2- CSC para estabilidade; 3- CSC para estabilidade e controle de fluxo de potência.	134
FIGURA 73 -	Sistema simplificado representado no ATP.	150
FIGURA 74 -	Degrau na ordem de impedância do TCSC. Ângulo de disparo dos tiristores.	151
FIGURA 75 -	Degrau na ordem de impedância do TCSC. Impedância do TCSC.	152

FIGURA 76 - Degrau na ordem de impedância do TCSC. Corrente na linha de transmissão.	152
FIGURA 77 - Degrau na ordem de impedância do TCSC. Tensão no capacitor do TCSC.	153
FIGURA 78 - Degrau na ordem de impedância do TCSC. Corrente na válvula de tiristores.	153
FIGURA 79 - Corrente no TCSC em condições de regime permanente: 1- corrente nos tiristores; 2- corrente no capacitor.	154
FIGURA 80 - Degrau na ordem de corrente. Ângulo de disparo dos tiristores.	155
FIGURA 81 - Degrau na ordem de corrente. Corrente na linha.	155
FIGURA 82 - Degrau na ordem de corrente. Impedância do TCSC.	156
FIGURA 83 - Degrau na ordem de corrente. Tensão no capacitor do TCSC.	156
FIGURA 84 - Degrau na ordem de corrente. Corrente na válvula de tiristores.	157
FIGURA 85 - Curto trifásico próximo ao TCSC. Corrente na linha de transmissão.	158
FIGURA 86 - Curto próximo ao TCSC. Tensão no capacitor do TCSC.	159
FIGURA 87 - Curto trifásico próximo ao TCSC. Energia absorvida pelos varistores (MOV): 1- Capacitor fixo (40 Ω); 2- Capacitor do TCSC.	159
FIGURA 88 - Curto trifásico próximo ao TCSC. Corrente na válvula de tiristores.	160
FIGURA 89 - Sistema mecânico de unidades geradoras.	162
FIGURA 90 - Circuito ressonante.	163

FIGURA 91 - Força magnetomotriz no rotor.	165
FIGURA 92 - Força magnetomotriz deslocada.	165
FIGURA 93 - Circuito equivalente do gerador de indução.	168
FIGURA 94 - Circuito equivalente para frequência subsíncrona.	169

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS UTILIZADOS

✧ Símbolos Genéricos:

CC - Corrente Contínua.

CA - Corrente Alternada.

t, t - Tempo (s).

S - Operador de Laplace.

$\Delta \vec{z}$ - Pequena variação da variável genérica \vec{z} .

$\frac{d^n}{dt^n}$ - Derivada de ordem "n" em relação ao tempo (n=1,2,3...).

$\frac{\partial \vec{f}}{\partial \vec{z}}$ - Derivada parcial da função genérica \vec{f} em relação à variável genérica \vec{z} .

✧ Capítulo 3:

\dot{V}_s - Tensão do terminal gerador da linha de transmissão (p.u.).

\dot{V}_r - Tensão do terminal receptor da linha de transmissão (p.u.).

\dot{V}_m - Tensão no ponto central da linha de transmissão (p.u.).

V - Módulo da tensão (p.u.).

\dot{I} - Corrente na linha de transmissão (p.u.).

P - Potência ativa transmitida (p.u.).

Q_s - Potência reativa fornecida no terminal gerador (p.u.).

Q_r - Potência reativa fornecida no terminal receptor (p.u.).

Q - Potência reativa total consumida pela linha de transmissão (p.u.).

δ - Ângulo de carga da linha de transmissão (grau).

X - Reatância da linha de transmissão (p.u.).

P_p - Potência ativa na linha com compensação "shunt" (p.u.).

- Q_p - Potência reativa da fonte controlada (p.u.).
 \dot{I}_{sm} - Corrente no primeiro segmento de linha (p.u.).
 \dot{I}_{mr} - Corrente no segundo segmento de linha (p.u.).
 \dot{I}_m - Corrente da fonte controlada (p.u.).
 n - Número de pontos compensados da linha de transmissão.
 X_e - Impedância equivalente da linha compensada (p.u.).
 X_l - Reatância indutiva série da linha (p.u.)
 X_c - Reatância do capacitor série (p.u.).
 s - Taxa de compensação série.
 \dot{I}_s - Corrente na linha com compensação série (p.u.).
 P_s - Potência ativa transmitida na linha com compensação série (p.u.).
 Q_{sc} - Potência reativa fornecida pelo compensador série (p.u.).
 \dot{V}_g - Tensão do gerador (p.u.).
 \dot{V}_{pq} - Tensão da fonte controlada de tensão (p.u.).
 P_α - Potência ativa da linha com defasador (p.u.).
 α - Ângulo do defasador (grau).
 \dot{I}_α - Corrente na linha com defasador (p.u.).
 \dot{S}_{pq} - Potência aparente do defasador (p.u.).
 P_{pq} - Potência ativa do defasador (p.u.).
 Q_{pq} - Potência reativa do defasador (p.u.).
 δ_{crit} - Ângulo crítico para perda de sincronismo (grau).

✱ Capítulo 4:

- I_c - Corrente no capacitor do TCSC (p.u.).
 I_L - Corrente no indutor (válvula) (p.u.).
 I - Corrente na linha (p.u.).
 V_c - Tensão no capacitor (p.u.).

- ω - Frequência angular do sistema (rad/s).
- φ - Defasamento entre tensão e corrente (grau).
- α - Ângulo de disparo dos tiristores (grau).
- γ - Ângulo de condução dos tiristores (grau).
- ω_0 - Frequência natural de ressonância do circuito LC (rad/s).
- Z_1 - Impedância teórica do TCSC à frequência fundamental (p.u.).

✱ **Capítulo 5:**

- \vec{x} - Vetor de variáveis de estado.
- $\dot{\vec{x}}$ - Derivada de \vec{x} com relação ao tempo.
- \vec{z} - Vetor de variáveis algébricas.
- \vec{f}, \vec{g} - Funções que representam o equacionamento do sistema.
- \vec{i} - Injeções de correntes nas barras.
- \vec{v} - Tensões nas barras.
- \vec{Y} - Matriz de admitâncias.
- J - Matriz jacobiana do sistema.
- A - Matriz de estados do sistema.

✱ **Apêndice B:**

- X_L - Reatância da linha (p.u.).
- X_G - Reatância subtransitória média dos eixos do gerador (p.u.).
- X_C - Reatância capacitiva (compensação série) (p.u.).
- ω_{RE} - Frequência de ressonância do sistema (rad/s).
- f_{RE} - Frequência de ressonância do sistema (Hz).
- ω_0 - Frequência nominal do sistema (rad/s).
- f_0 - Frequência nominal do sistema (Hz).
- f_n - Frequência de oscilação do rotor (Hz).

- B_f - Força magnetomotriz.
- θ - Ângulo do rotor (grau).
- s_1 - Escorregamento do rotor (modelo gerador de indução).
- R_{rede} - Resistência equivalente da rede (p.u.).
- $\frac{R_r}{s_1}$ - Resistência de escorregamento do rotor (p.u.).

RESUMO

Com o desenvolvimento do tiristor de alta potência na década de 60, dando origem às excitatrizes estáticas e impulsionando a transmissão CC, deu-se início a um processo de transformação do sistema elétrico, originalmente eletromecânico, num sistema eletroeletrônico. Este processo vem se caracterizando por uma crescente taxa de utilização de equipamentos baseados em eletrônica de potência.

Da concepção e utilização de equipamentos com eletrônica de potência para tornar os sistemas de transmissão CA mais flexíveis, surgiu o conceito FACTS (Flexible AC Transmission Systems) ou “Sistemas de Transmissão CA Flexíveis”.

Na realidade, alguns equipamentos que empregam tecnologia FACTS vêm sendo utilizados desde a década de 80, como os compensadores estáticos de potência reativa. Já outros dispositivos FACTS mais recentes, como os Compensadores Série Controlados (CSC), começaram a ser introduzidos no sistema elétrico no início dos anos 90.

Ressalta-se que o desenvolvimento generalizado do conceito e da tecnologia FACTS vem prometendo mudanças significativas e mesmo radicais em termos de concepção e operação dos sistemas elétricos. Sua utilização já atingiu todo o setor: geração, transmissão, distribuição e consumidores.

Este contexto conduz à necessidade de um amplo conhecimento da tecnologia FACTS e ao estabelecimento de diretrizes, ferramentas e

modelos adequados para estudos de planejamento e operação. Este trabalho se dedica a parte desta tarefa e apresenta inicialmente uma descrição desta tecnologia, destacando os conceitos básicos, os princípios operativos e o estágio atual da aplicação dos principais dispositivos FACTS.

Em seqüência, a Compensação Série Controlada (CSC) é destacada em função de sua potencial aplicação para aumentar de forma efetiva a capacidade de transporte de energia de linhas de transmissão. As características elétricas de dois CSC, o TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) e o TSSC (Thyristor Switched Series Compensator) são analisadas, tendo-se em vista as suas principais aplicações e os correspondentes requisitos de modelagem.

O trabalho desenvolve e propõe modelos de CSC para programas digitais de análise de sistemas de potência. Um pequeno e hipotético sistema é então utilizado para testar a consistência dos modelos e avaliar os esperados benefícios do CSC em termos de controle de fluxo de potência de interligações e de aumento da capacidade de transmissão de energia.

Adicionalmente, os modelos propostos são aplicados em um estudo de um sistema elétrico real e de grande porte, o sistema Norte-Nordeste brasileiro. Este estudo avalia a atratividade técnica da utilização de CSC em linhas de 500 kV, destacando seus benefícios em comparação com a alternativa de compensação série convencional (fixa).

ABSTRACTS

The development of power thyristor during the sixties, giving origin to the static exciters and impelling the HVDC transmission, started up a transformation process of the power system, originally electromechanical, into an electro-electronic one. This process has been characterized by a growing utilization rate of power electronics based equipment.

The FACTS (Flexible AC Transmission Systems) concept has arisen from the conception and utilization of power electronics devices to increase the AC transmission systems flexibility.

As a matter of fact, some equipment, which employ FACTS technology, have been used since the eighties, as the Static Var Compensators. On the other hand, newer FACTS devices, like the Controlled Series Compensators (CSC), came into scene in the beginning of the nineties.

It should be emphasized that the generalized development of the FACTS concept and technology promises significant and even radical changes in terms of systems planning and operation. Its employment has affected the whole sector: generation, transmission, distribution and consumers.

This context leads to the need of a broad understanding of this technology and the establishment of suitable methodologies, tools and models for planning and operation studies. This work deals with part of this task, presenting initially a description of the FACTS technology

including the basic concepts, the operative principles and the state of the art of the main FACTS devices.

In the sequel the Controlled Series Compensation (CSC) is highlighted due to its potential application to effectively increase the systems power transfer capability. The electric characteristics of two kinds of CSC, the TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) and the TSSC (Thyristor Switched Series Compensator) are analyzed having in mind their main applications and the corresponding modeling requirements.

The work develops and proposes CSC models to be used in digital programs for power systems analysis. A small and hypothetical power system is therefore used to check the models consistence and evaluate the CSC expected benefits concerning power flow control and increment of transmission lines's loadability.

Additionally, the proposed models are applied to a real and large power system, the Brazilian North-Northeast intertie. This study evaluates the technical attractiveness of using Controlled Series Compensation in a 500 kV transmission corridor, highlighting its benefits in comparison to the conventional (fixed) series compensation.

1. - INTRODUÇÃO.

O marco inicial da aplicação da eletrônica de potência em sistemas de transmissão de energia elétrica foi a entrada em operação do primeiro elo de transmissão em corrente contínua (CCAT), baseado em conversores com válvulas de mercúrio, ligando a ilha de Gotland ao continente sueco em 1954 [1]. No entanto, devido às limitações e ao custo da válvula de mercúrio, inicialmente o desenvolvimento e aplicação da tecnologia CCAT foram lentas.

Somente a partir da utilização da primeira excitatriz estática, no final da década de 60, verificou-se um forte impulso na revolução tecnológica desencadeada pela introdução da eletrônica de potência nos sistemas de transmissão de energia elétrica.

O desenvolvimento do tiristor de alta potência possibilitou, nas duas últimas décadas, um grande avanço tecnológico na área de transmissão de energia em corrente contínua (CCAT). A década de 70 pode ser considerada a década da transmissão CCAT. De fato, até então os sistemas CCAT existentes não somavam 5000 MW de potência instalada. Hoje este número é no mínimo dez vezes maior (figura 1) [1].

Uma das principais razões do sucesso desta tecnologia de transmissão está associada ao seu alto grau de flexibilidade. Isto é, o fluxo de potência de um sistema CCAT pode ser rapidamente controlado de forma bidirecional, com considerável independência em relação à frequência, tensão e impedância do sistema de corrente alternada (CA).

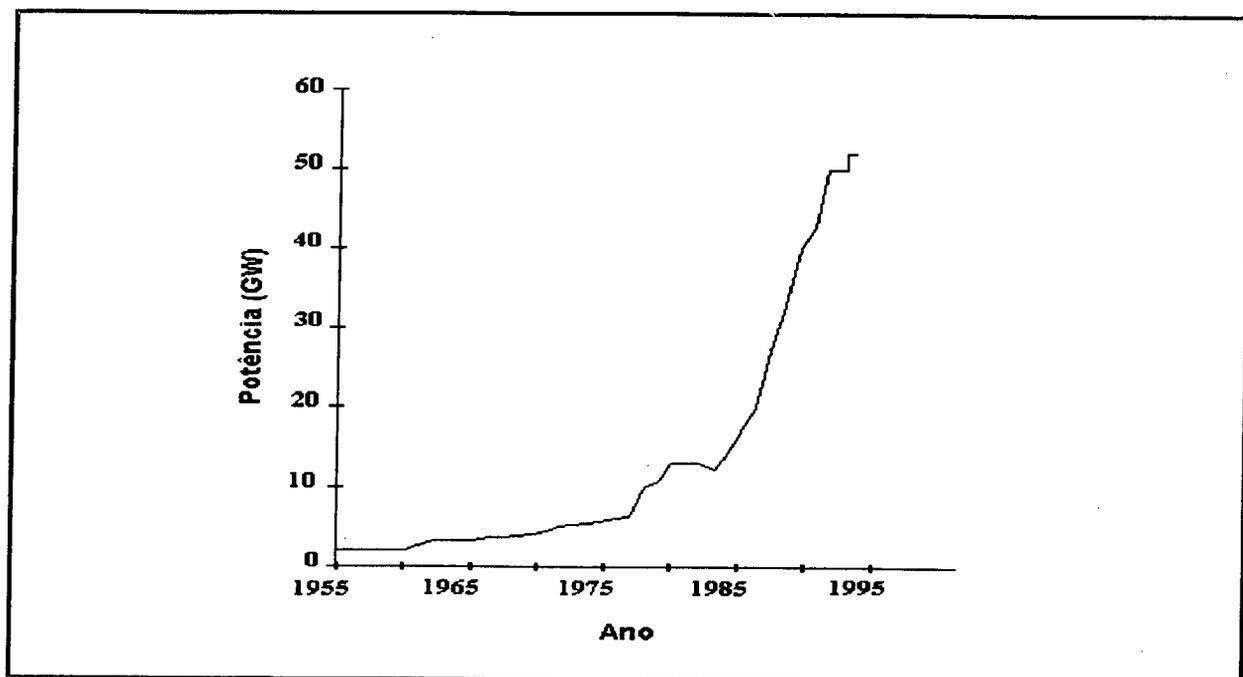


FIGURA 1 - Potência instalada de transmissão CCAT.

A década de 80 pode ser considerada a década dos compensadores estáticos. Estes equipamentos surgiram no final da década de 70 para solucionar o problema de oscilação de tensão causado por fornos a arco. Até então a compensação reativa controlável era feita com os compensadores síncronos, que não eram suficientemente rápidos para resolver o problema de oscilação de tensão. No entanto, o sucesso do compensador estático foi tal que, apenas naquela década, foram instalados 30.000 MVar de compensação estática em todo o mundo.

Esta crescente taxa de utilização de equipamentos baseados em eletrônica de potência deu início a um processo de transformação do sistema elétrico, originalmente eletromecânico, num sistema eletro-eletrônico. Todavia, atualmente observa-se que os controladores dos sistemas CA ainda são, em sua maioria, baseados em sistemas mecânicos ou eletromecânicos e, portanto, lentos. Isto vem impedindo que os

sistemas CA apresentem um maior grau de flexibilidade, a exemplo dos sistemas CCAT.

Do processo de substituição dos controladores e dispositivos eletromecânicos dos sistemas CA por equipamentos eletro-eletrônicos similares, mais rápidos e mais flexíveis, e da concepção de novos equipamentos para dotar os sistemas CA de níveis de flexibilidade comparáveis aos dos sistemas CCAT, surgiu o conceito FACTS (Sistemas de Transmissão CA Flexíveis) [1],[4].

Desta forma, a concepção básica da tecnologia FACTS está em se desenvolver e utilizar equipamentos que permitam o rápido controle do fluxo de potência de sistemas CA. Este controle pode ser obtido pela variação rápida do ângulo de carga, da impedância ou da tensão do sistema CA, de acordo com uma referência pré-estabelecida e uma determinada lógica de controle, estabelecidos em função dos objetivos a serem atingidos.

Em função da lógica de controle empregada, estes equipamentos podem ser usados de forma a atender um ou mais requisitos do sistema de potência. Como exemplos podem ser citadas as aplicações para controle do fluxo de potência ativa de uma determinada interligação e também o controle para permitir o aumento da capacidade de transmissão, ao fornecer amortecimento para oscilações eletromecânicas.

Na realidade, alguns dispositivos que empregam tecnologia FACTS têm sido estudados e utilizados há algum tempo, como o compensador estático de potência reativa. Entretanto, a promoção desta sigla deu-se de forma marcante devido à atuação do EPRI (Electric Power Research

Institute) dos Estados Unidos da América, que antevê um futuro onde estes equipamentos serão largamente utilizados [2],[3].

Existem fortes indícios de que a década de 90 venha ser considerada a década dos dispositivos FACTS nos sistemas elétricos, caracterizando-se pela realização e proliferação de equipamentos e filosofias teoricamente realizáveis, mas praticamente inexistentes.

De uma forma geral, percebe-se que a eletrônica de potência vem revolucionando os sistemas de potência nos últimos 30 anos e promete mudanças ainda mais radicais para as próximas décadas com o desenvolvimento generalizado do conceito FACTS. Sua utilização já atingiu todo o setor elétrico: geração, transmissão, distribuição e consumidores.

Este contexto nos conduz necessariamente a uma reflexão cuidadosa sobre a melhor maneira de nos adaptarmos a essa nova realidade. O treinamento e a formação de nossos profissionais devem ser revistos. Nossos esforços em pesquisa e desenvolvimento devem ser redirecionados e incrementados e, certamente, os conceitos de planejamento, operação e manutenção devem ser adaptados a esse novo cenário.

Este trabalho pretende dar início a contribuições neste sentido, apresentando inicialmente uma descrição do "estado da arte" referente ao estágio atual de desenvolvimento e utilização dos principais equipamentos que empregam tecnologia FACTS. Esta análise tem início no Capítulo 2 do trabalho e continua no Capítulo 3, no qual os

dispositivos FACTS para controle de fluxo de potência recebem atenção especial.

A compensação série de linhas de transmissão é destacada nesta etapa, tendo-se em vista as reais possibilidades de aplicação de Compensadores Série Controlados (CSC) como forma de melhorar o desempenho operativo dos sistemas de potência. Ainda no Capítulo 2, é apresentada a descrição de dois dispositivos chave para a implementação dos Compensadores Série Controlados, ou seja, o Reator Controlado a Tiristor (RCT) e o Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT).

Os Capítulos 4 e 5 dedicam-se à análise detalhada dos Compensadores Série Controlados (CSC), objetivo principal deste trabalho. Os tópicos abordados incluem as formas de realização e as características básicas de dois dispositivos FACTS, o Compensador Controlado por Tiristor (TCSC) e o Compensador Chaveado por Tiristor (TSSC).

Estes dois equipamentos, TCSC e TSSC, passaram a ser denominados genericamente pela literatura técnica como sendo Compensadores Série Controlados (CSC). No Capítulo 4, além das características básicas destes equipamentos, apresenta-se uma rápida descrição das três instalações de compensação série baseadas em CSC, atualmente em operação no setor elétrico a nível mundial.

O Capítulo 5 se dedica à análise e proposição de modelos do CSC e seus controladores para programas digitais de análise de sistemas de potência. Atenção especial é dada à modelagem do CSC para estudos de fluxo de potência e estabilidade eletromecânica, e a proposição de modelos de controladores para o CSC, apropriados para controlar fluxo

de potência em sistemas malhados e para introduzir amortecimento para oscilações eletromecânicas entre geradores do sistema de potência.

No Capítulo 6, os modelos propostos e desenvolvidos no Capítulo 5 são implementados em um programa de análise de estabilidade eletromecânica, via simulação no tempo, e testados em um pequeno e hipotético sistema de potência, com o objetivo de verificar a consistência dos modelos e avaliar benefícios da utilização do CSC.

O Capítulo 7 mostra a aplicação do CSC a um sistema elétrico real e de grande porte. Trata-se do sistema elétrico Norte/Nordeste brasileiro, uma interligação em 500 kV com previsão de aplicação de compensação série para aumentar a capacidade de transporte de energia. Trata-se de um estudo pioneiro, promovendo uma comparação técnica entre a utilização de compensação série convencional (fixa) e a compensação série controlada.

O Capítulo 8 apresenta as principais conclusões do trabalho e indica tópicos de interesse para futuros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento. O Apêndice A apresenta simulações realizadas com o programa ATP (Simulação de Transitórios Eletromagnéticos), utilizando o modelo de TCSC desenvolvido pela SIEMENS e adaptado para abrigar um modelo de controlador de corrente para o TCSC apresentado no Capítulo 5 deste trabalho. O Apêndice B apresenta uma descrição do fenômeno de ressonância subsíncrona e o Apêndice C descreve o procedimento para a obtenção do ajuste do sistema de controle do CSC utilizado nas simulações.

2. - DISPOSITIVOS FACTS.

2.1. - Introdução.

A grande maioria dos equipamentos FACTS são baseados nos dispositivos semicondutores de potência. Sendo assim, antes de apresentar os principais dispositivos FACTS existentes e/ou em desenvolvimento, torna-se importante apresentar uma descrição dos principais semicondutores de potência que são de uso corrente nos sistemas elétricos e também daqueles com elevado potencial de utilização num futuro próximo.

Foge aos objetivos deste trabalho fazer uma descrição detalhada dos semicondutores de potência. Pretende-se tão somente delinear as características e princípios básicos de funcionamento dos mesmos. Um enfoque bem mais detalhado pode ser encontrado nas referências [1,4].

2.2. - Semicondutores de Potência.

Por um longo período de tempo existiram tecnologias distintas para a fabricação de dispositivos de baixa potência, como por exemplo o microcomputador, cujas dimensões físicas dos componentes básicos são micrométricas, daí o nome microeletrônica. Por outro lado, na fabricação de tiristores de potência, as dimensões de um componente básico pode ser da ordem de milímetros a centímetros. Estas tecnologias coexistiram separadamente até aproximadamente o final da década de 70, quando começaram a ser lançados os dispositivos de última geração

como o MOSFET de potência, o transistor de potência, etc.. Estes dispositivos utilizam basicamente tecnologias de microeletrônica em altas potências. A seguir será feita uma apresentação resumida dos principais semicondutores de potência.

2.2.1. - Tiristores.

Do ponto de vista do setor elétrico, os semicondutores de potência mais importantes ainda são os tiristores. Os principais tiristores utilizados nos sistemas de potência são:

- retificador controlado de silício (SCR);
- tiristor disparado por luz (LTT);
- tiristor comutado pelo gatilho (GTO).

O SCR comporta-se como uma chave controlada. Após a aplicação de um pulso de disparo no gatilho, ele passa do estado de bloqueio direto para o estado de condução. Uma vez conduzindo, ele permanece neste estado até que a corrente se inverta em função do circuito de potência. Isso significa que o circuito de controle não tem capacidade de desligá-lo e esta é a sua principal limitação.

Esta característica do SCR faz com que o mesmo seja basicamente empregado em conversores onde o disparo de um tiristor automaticamente faz com que a corrente daquele que está conduzindo se anule. Isso ocorre por exemplo em pontes retificadoras e inversoras de comutação natural. Essa mesma característica é também responsável principal pelo fato dos conversores acima mencionados serem

consumidores de reativos. Por outro lado, o fato do SCR somente cortar com corrente nula (ou próxima de zero) facilita a sua conexão em série.

Os SCRs atualmente disponíveis são capazes de conduzir correntes da ordem de 5 kA e bloquear tensões de pico da ordem de 10 kV. Portanto, do ponto de vista de corrente, eles atendem perfeitamente às necessidades da área de sistemas de potência. No entanto, do ponto de vista de tensão, eles ainda estão longe de atendê-las [1].

O LTT é um tiristor semelhante ao SCR, sendo a única diferença o sistema de disparo: o LTT necessita de um pulso de luz. Apesar dessa pequena diferença, o LTT tem provocado um importante impacto no setor elétrico porque o disparo por luz simplifica o projeto das válvulas de tiristores. A figura 2 mostra o símbolo de um SCR ou LTT e uma válvula com vários tiristores em série.

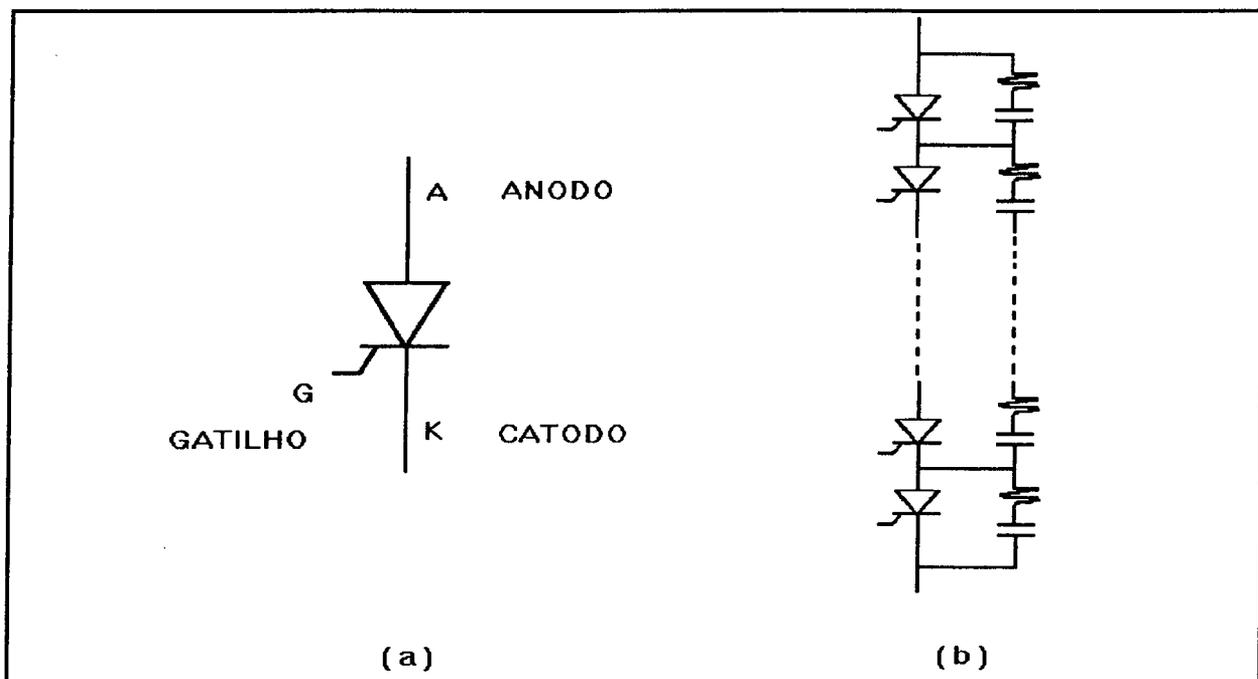


FIGURA 2 - (a) Símbolo do SCR ou LTT;
(b) Válvula série com circuito "snubber"

O GTO é um dispositivo semelhante ao SCR mas que permite a comutação da corrente através de um pulso de corrente no gatilho. Esta característica é extremamente importante porque viabiliza uma série de equipamentos até então inviáveis. No entanto, como o pico da corrente de controle necessária para a comutação é da ordem de grandeza da corrente a ser comutada, o custo e a complexidade da válvula de GTO é superior ao da válvula de SCR ou LTT. Atualmente o maior GTO existente opera com tensão de 4,5 kV e corrente de 3 kA. A figura 3 apresenta a simbologia de um GTO.

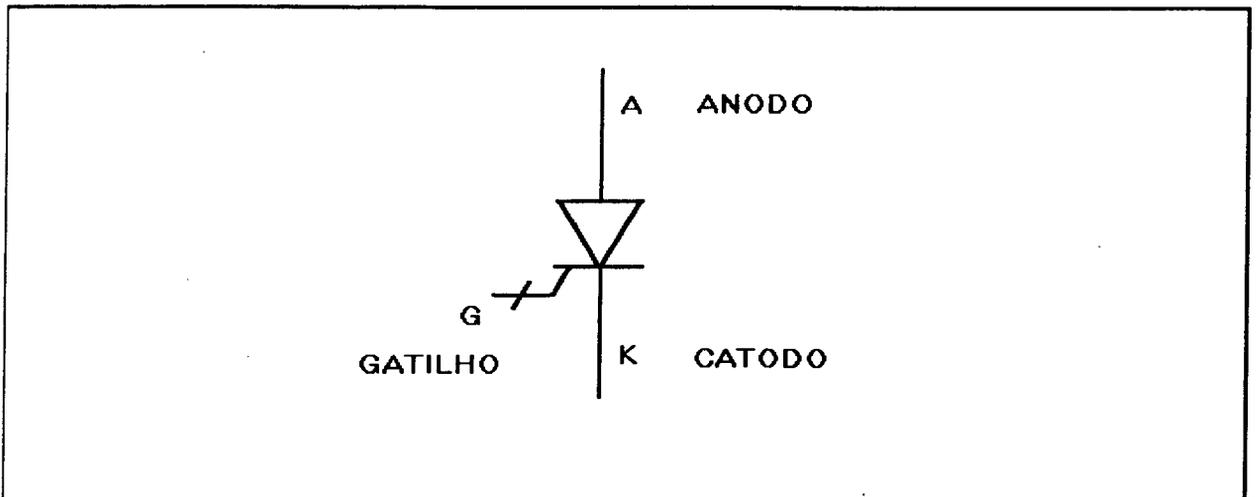


FIGURA 3 - Simbologia do GTO

2.2.2 - Semicondutores de Última Geração.

Os semicondutores de potência de última geração começaram a surgir a partir da década de 80. Da evolução da tecnologia MOS (Semicondutores de Óxido Metálico), longamente utilizada em circuitos integrados digitais, surgiu o MOSFET de Potência. As suas principais características são a alta velocidade e a baixíssima energia do circuito de gatilho. Um dos problemas destes dispositivos está na alta perda

durante a condução e na impossibilidade técnica de se fabricarem dispositivos de alta potência. Quando se consegue um MOSFET de alta tensão, ele é de baixa corrente e vice-versa.

Da combinação da tecnologia MOSFET com a tecnologia bipolar dos tiristores, surgiram os dispositivos híbridos. Estes dispositivos associam a velocidade e capacidade de comutação de corrente da tecnologia MOSFET com as baixas perdas da tecnologia bipolar. Por isso esses dispositivos possuem a capacidade de comutar corrente pelo controle e podem trabalhar com frequências de chaveamento maiores que os tiristores. Os principais dispositivos híbridos são:

- transistor bipolar de gatilho isolado (IGBT),
- tiristor controlado por MOS (MCT), e
- tiristor de indução estática (SITH).

A figura 4 apresenta a potência controlável (tensão de bloqueio multiplicada pela corrente de condução) prevista para esses componentes.

O IGBT começou a ser comercializado em 1983 mas a sua utilização no setor elétrico ainda é limitada devido à baixa potência dos disponíveis comercialmente (1400 V - 400 A). No entanto, é um dos que apresenta o maior potencial de impacto dentre os novos dispositivos, porque opera com frequências de chaveamento de até 20 kHz e as potências necessárias para o disparo e para a comutação são praticamente desprezíveis.

O SITH é basicamente um dispositivo japonês enquanto o MCT é um dispositivo americano concorrente. Ambos tem o bloqueio e a condução

controlados e são aproximadamente 5 a 10 vezes mais rápidos que os GTOs, além do que a corrente de bloqueio é também bem menor nestes dois dispositivos híbridos. O MCT é similar ao GTO em termos de funcionamento, enquanto o SITH é um dispositivo que normalmente está em condução e, portanto, para cortá-lo é necessário uma polarização reversa no gatilho.

O MCT, apesar de ter sido anunciado há alguns anos, ainda não está disponível comercialmente. Por outro lado, o SITH já é comercializado e o maior deles opera em até 1200 V - 600 A. É muito provável que estes dispositivos venham a ser, em futuro próximo, os substitutos do GTO.

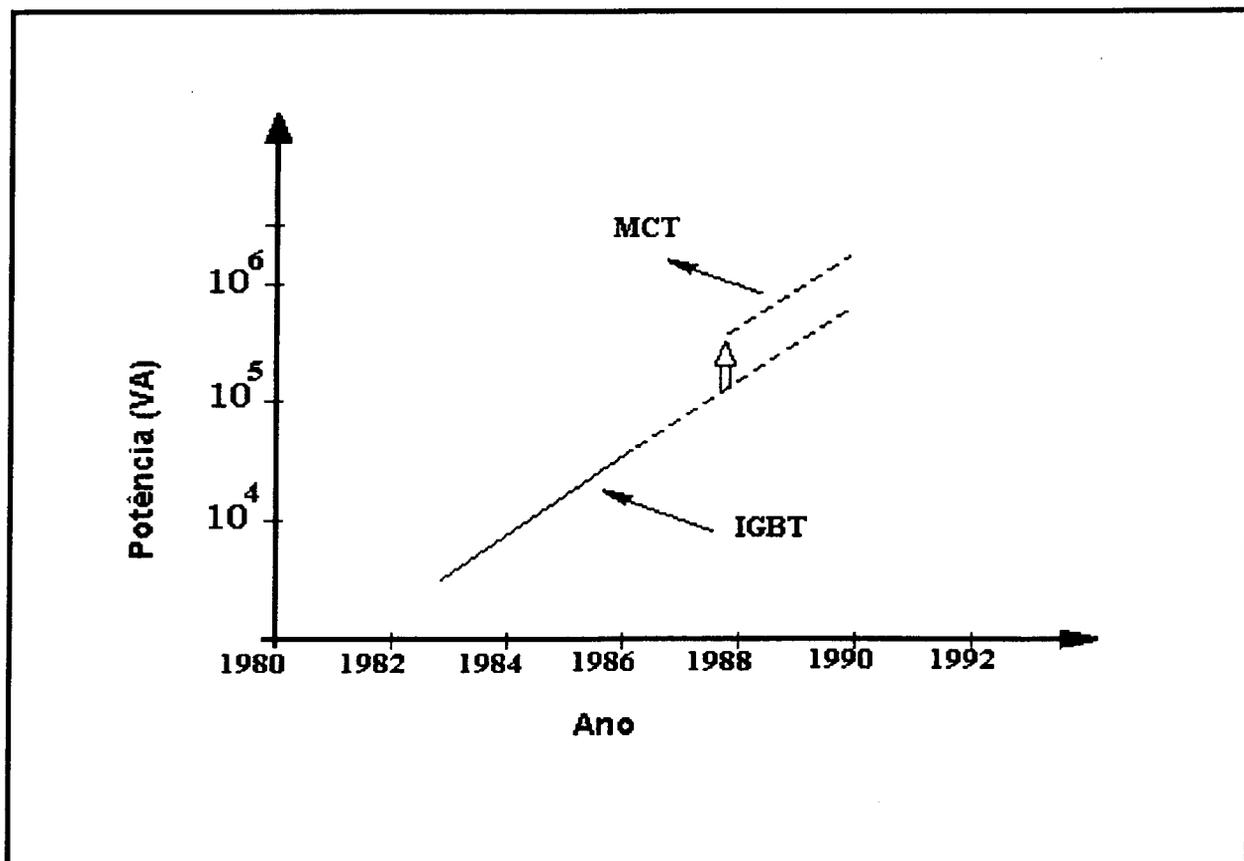


FIGURA 4 - Dispositivos híbridos - Potência prevista.

2.3. - Tipos de Dispositivos FACTS.

Os principais dispositivos FACTS existentes e/ou em desenvolvimento são apresentados a seguir:

- Reator Controlado a Tiristor (RCT);
- Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT);
- Compensador Série Controlado (CSC);
- Gerador Estático de Reativos (GER);
- Compensador Estático de Potência Ativa;
- Compensador Generalizado;
- Limitador de Curto-Circuito (LCC);
- Filtros Ativos de Potência;
- Disjuntor Rápido;
- Comutadores de Tap sob Carga (LTC);
- Linhas Autocompensáveis.

Conforme dito anteriormente, estes dispositivos são baseados em tiristores convencionais (SCR e LTT) ou nos semicondutores com capacidade de corte (GTO, IBGT, MCT e SITH).

Dentre estes diversos dispositivos, apenas dois serão aqui descritos em maiores detalhes, devido às suas reais e comprovadas possibilidades de aplicação. São eles, o Reator Controlado a Tiristor (RCT) e o Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT). Conforme será visto mais adiante (Capítulo 4), estes elementos são fundamentais para a implementação do esquema de Compensação Série Controlada (CSC).

2.3.1. - Reator Controlado a Tiristor (RCT).

O conjunto formado pelo Reator Controlado a Tiristor (RCT) e bancos de capacitores é bastante conhecido pelo nome de Compensador Estático. O adjetivo estático foi inicialmente utilizado para diferenciar estes compensadores, onde nada se move, do compensador síncrono, que possui partes móveis. Porém, do ponto de vista elétrico, estes compensadores são bem mais rápidos que os síncronos. Uma vez que o elemento básico que garante a rapidez de resposta destes equipamentos é o RCT, neste subitem será feita uma apresentação resumida deste dispositivo, que já é bastante conhecido e utilizado em conexão "shunt". Esta utilização é, inclusive, anterior ao aparecimento do conceito FACTS.

O RCT é um dispositivo já largamente utilizado em controle de tensão e/ou reativos. A figura 5 apresenta o esquema básico deste dispositivo. O ângulo de disparo α é medido a partir do cruzamento por zero da tensão V_{AB} , e seu valor está limitado entre 90° e 180° .

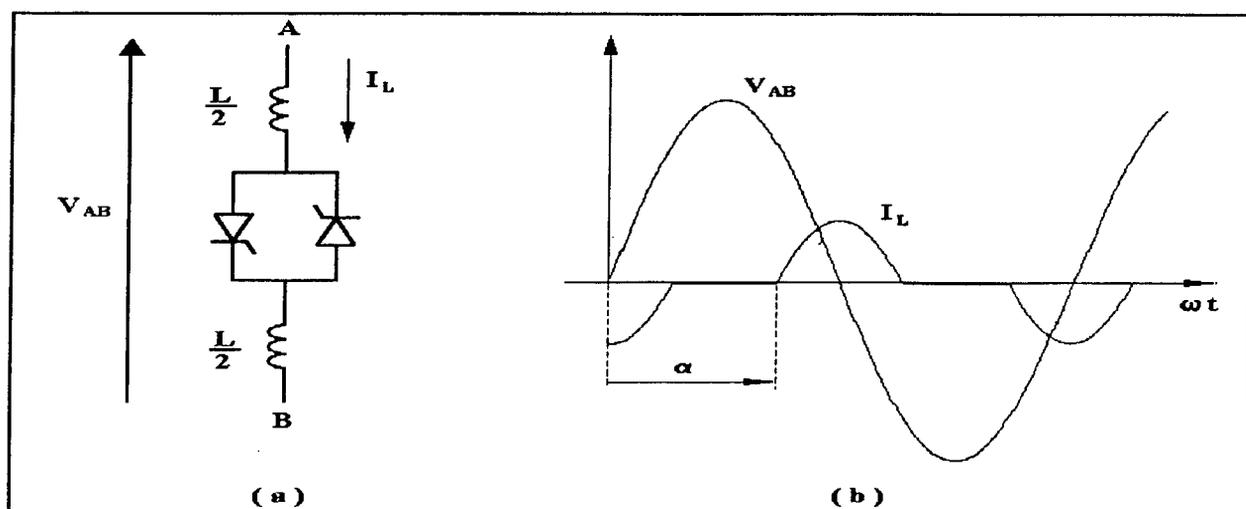


FIGURA 5 - (a) Esquema básico do RCT; (b) Formas de onda da tensão e corrente.

O valor eficaz da componente fundamental da corrente é dado por:

$$I_1 = -\frac{\sqrt{2} \cdot V}{X_1} \cdot \frac{(2 \cdot \pi - 2 \cdot \alpha + \text{sen } 2\alpha)}{\pi} \quad (5.1)$$

onde:

V - é o valor eficaz da tensão aplicada nos terminais do RCT;

X_1 - é a reatância dada por $w \cdot L$ (w é a freqüência da tensão aplicada ao RCT; e

α - é o ângulo de disparo.

O valor mínimo de I_1 é obtido em $\alpha=180^\circ$ e o máximo em $\alpha=90^\circ$. Nesta última condição a corrente é puramente senoidal.

O circuito equivalente do RCT na freqüência fundamental é um reator variável. Assim, para se obterem reatâncias capacitivas variáveis, torna-se necessária a conexão de um banco de capacitores em paralelo com o RCT.

Em circuitos trifásicos, a conexão do conjunto RCT e capacitor é feita em delta, visto que a conexão em estrela do RCT não permite que o controle possa ser feito na faixa $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ [4].

Dado que o conteúdo harmônico da corrente I_1 é relativamente alto, nas aplicações onde se requer baixo nível de poluição harmônica, além do uso de compensadores de 12 pulsos, são utilizados filtros passivos para

a eliminação de harmônicos. A figura 6 apresenta o esquema de um RCT de 12 pulsos.

São vários os exemplos de aplicação de Compensadores Estáticos em conexão "shunt" no Brasil [5] e pode-se dizer que esta tecnologia já está razoavelmente dominada e testada.

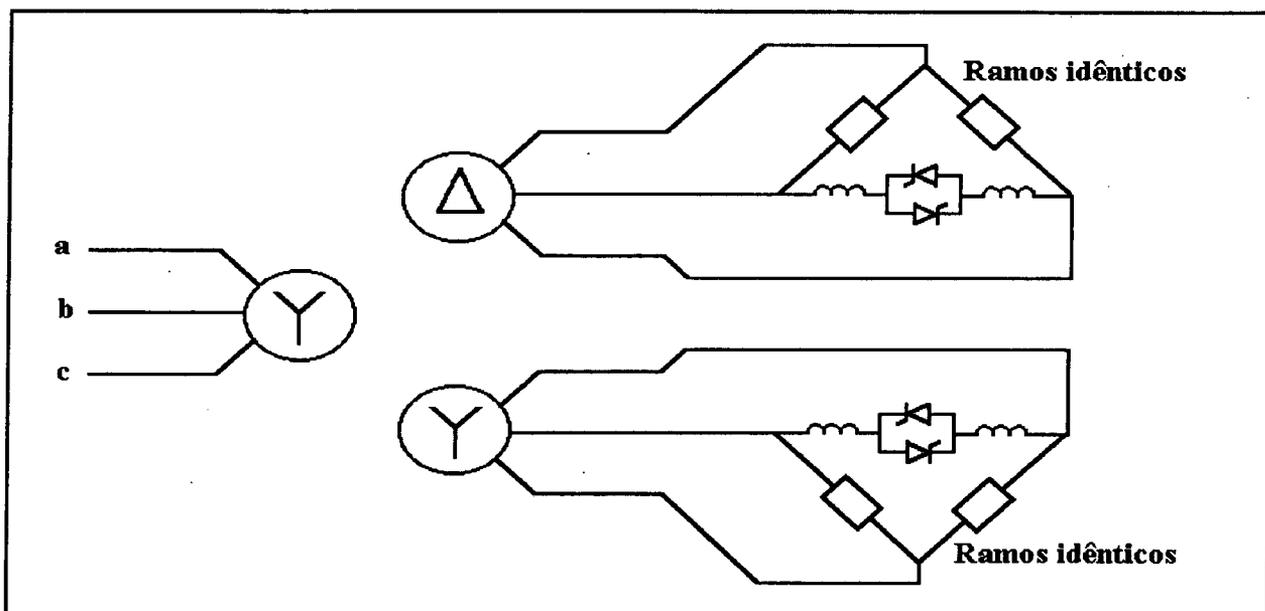


FIGURA 6 - RCT de 12 pulsos.

O conjunto RCT/capacitor pode também ser conectado em série para se obter um esquema denominado de Compensação Série Controlada. Esta modalidade inovadora de compensação será abordada com mais detalhes nos Capítulos 4 e 5 deste trabalho.

2.3.2 - Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT).

O chaveamento de capacitores deve ser feito sempre de acordo com o conceito conhecido como ZVS (Zero Voltage Switching), ou

chaveamento com tensão nula nos terminais da chave, para evitar sobrecorrentes de chaveamento nos tiristores.

É importante ressaltar que o tiristor convencional não é, naturalmente, o elemento ideal para este tipo de controle. Isto porque o tiristor dispara quando a tensão em seus terminais é positiva e cessa a condução quando a corrente é nula. Para o chaveamento de capacitores, o ideal seria um dispositivo que disparasse naturalmente à tensão nula e interrompesse a condução em qualquer valor de corrente positiva. Este é o conceito de "tiristor dual", dispositivo que não existe fisicamente, mas pode ser sintetizado com chaves semicondutoras associadas a uma lógica de controle.

No caso do CCT, o chaveamento dos tiristores é sempre feito à tensão nula (tensão nos terminais dos tiristores).

A figura 7 apresenta o esquema de um CCT para conexão "shunt". Da mesma forma que no RCT, os tiristores são conectados em anti-paralelo e a forma de onda de corrente é senoidal (supondo que a tensão também o seja). Esta corrente pode existir se os tiristores forem disparados, ou não existir, se os tiristores não forem disparados. Não é possível "controlar o capacitor". Isto justifica o nome Capacitor Chaveado.

Quando se necessita de capacitores variáveis, uma possibilidade está no uso de vários Capacitores Chaveados em paralelo. A figura 8 mostra um exemplo de um banco de CCT para conexão "shunt". Este exemplo consiste de quatro ramos CCT que, pelos valores escolhidos, permite a obtenção de capacitores com valores de capacitância variando desde zero (todas as chaves abertas), até 15 C, com degrau de 1C.

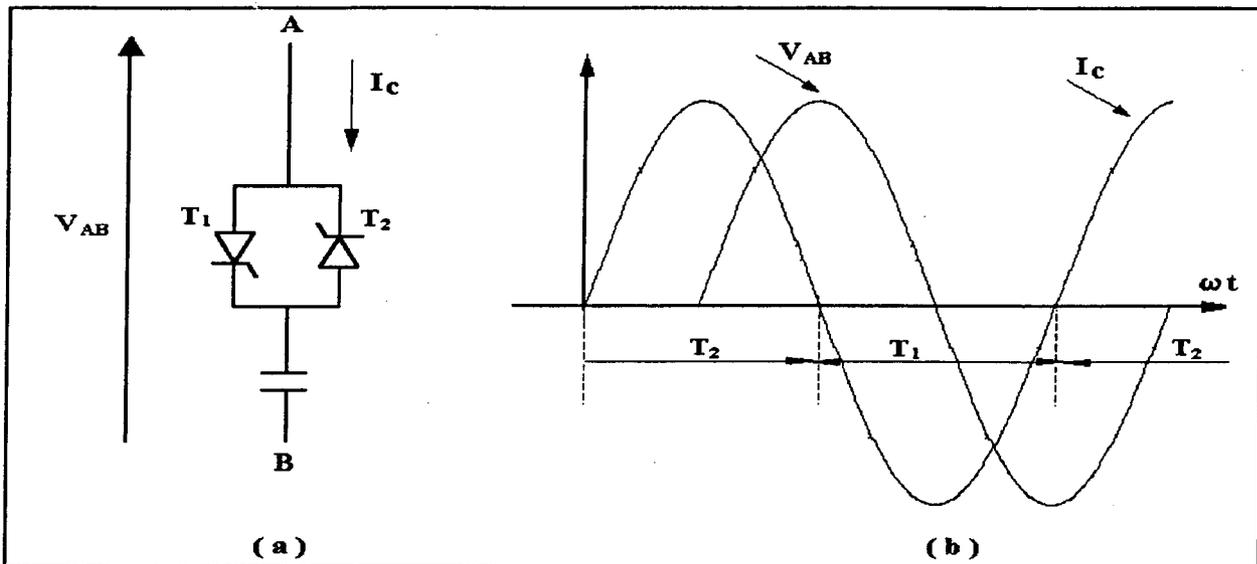


FIGURA 7 - (a) Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT); (b) Formas de onda de tensão e corrente.

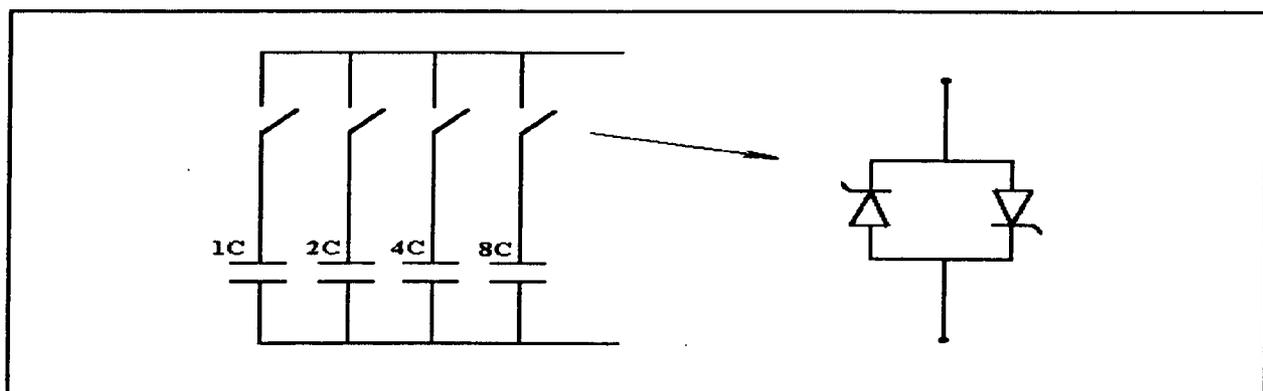


FIGURA 8 - Banco típico de CCT ("shunt").

O banco de capacitores chaveados por tiristores também pode ser usado para se fazer compensação série. Neste caso, a conexão capacitor/tiristor deve ser feita conforme mostrado na figura 9.

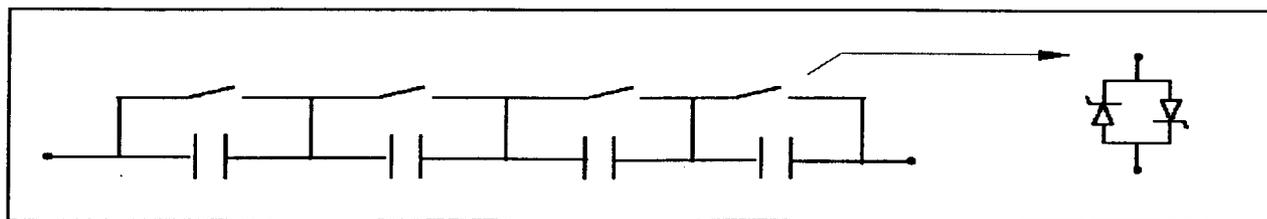


FIGURA 9 - Capacitores Chaveados a Tiristor para conexão série.

2.3.3. - Compensador Série Controlado (CSC).

O Compensador Série Controlado consiste basicamente de um capacitor fixo conectado em paralelo com um reator controlado a tiristores, conforme mostra a figura 10. Dependendo do valor do reator e da filosofia de disparo dos tiristores, este equipamento pode se comportar como um Capacitor Série Chaveado a Tiristores (TSSC) ou como um Capacitor Série Controlado a Tiristores (TCSC). Em ambos os casos a impedância equivalente da compensação série se torna controlável, aumentando a flexibilidade operativa do sistema de transmissão. Conforme dito anteriormente, este equipamento será analisado detalhadamente nos Capítulos 4 e 5.

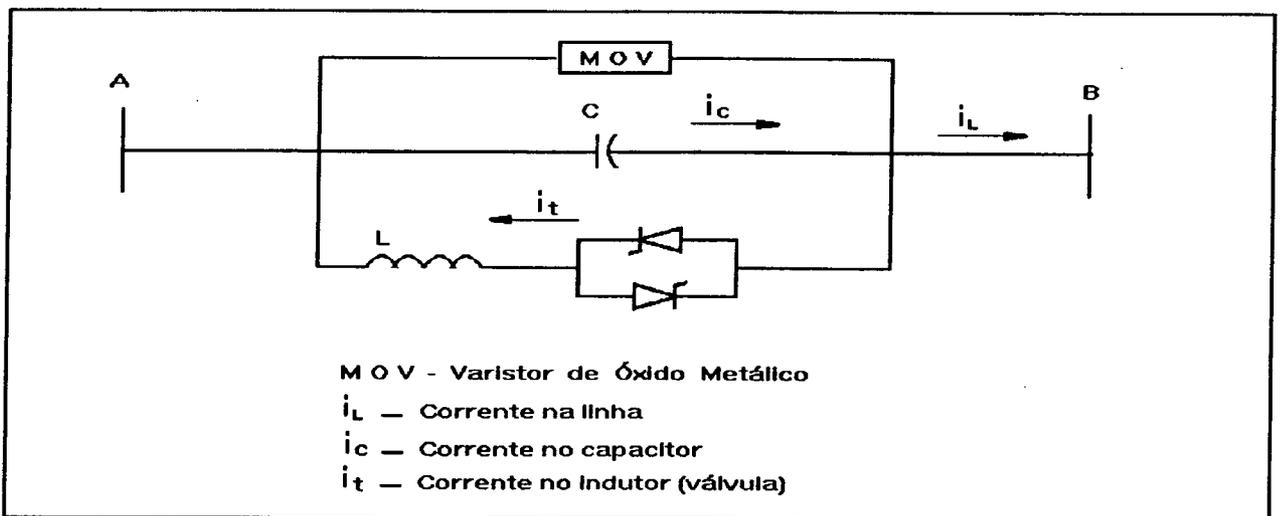


FIGURA 10 - Esquema genérico do Compensador Série Controlado.

2.3.4. - Gerador Estático de Reativos (GER).

Os compensadores estáticos de reativos, até então utilizados nos sistemas elétricos, são constituídos de reatores e/ou capacitores e válvulas de tiristores. A potência reativa é totalmente

fornecida/absorvida pelos capacitores/reatores e as válvulas funcionam apenas como elementos de controle.

Qualquer outro sistema que permita o controle de potência reativa apenas eletronicamente, sem o uso de componentes passivos armazenadores de energia, tem um grande potencial de redução de custos e espaço. Os GERs funcionam baseados no mesmo princípio do compensador síncrono: uma fonte de tensão controlada atrás de uma reatância (figura 11). No caso do GER, a reatância é a própria reatância do transformador de acoplamento e a fonte de tensão controlada é um conversor eletrônico de potência.

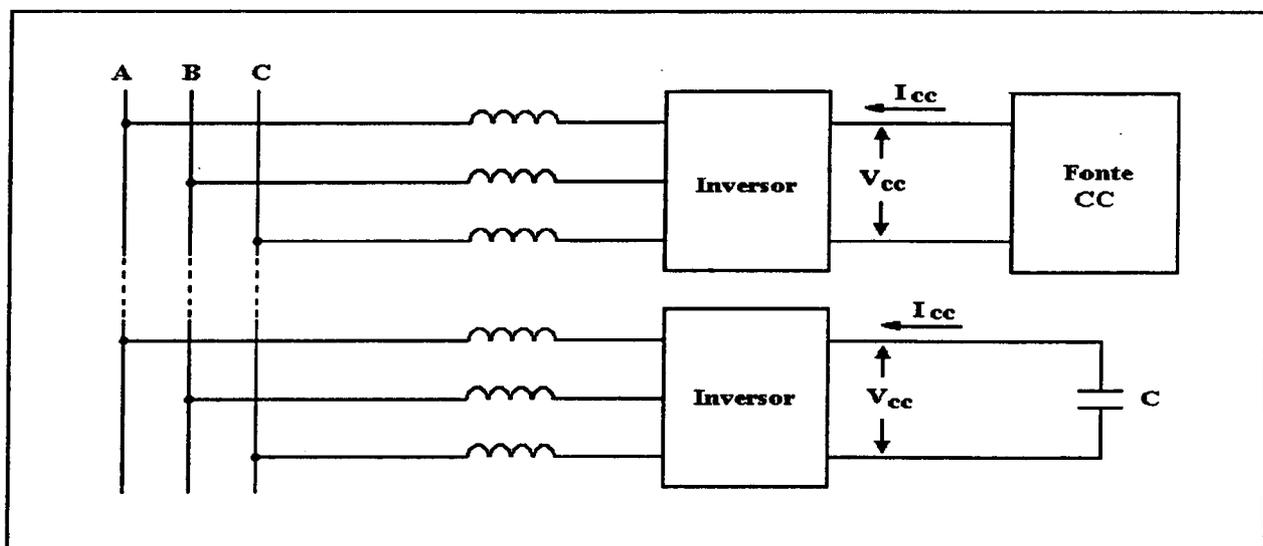


FIGURA 11 - Gerador Estático de Reativos (GER).

O conversor deve ser capaz de fornecer uma tensão senoidal trifásica de amplitude ajustável e sincronizada com a rede de tal forma a fornecer/absorver apenas potência reativa. É importante ressaltar que o capacitor do lado CC do conversor é dimensionado apenas em função da corrente harmônica que circula por ele. Isto significa que os grandes

bancos de capacitores e reatores não são mais necessários porque toda a potência reativa é fornecida/absorvida apenas pelo conversor.

A primeira grande vantagem do GER é a sua maior capacidade de geração de potência reativa com a diminuição da tensão. Além disso, como os GERs utilizam dispositivos semicondutores autocomutáveis, a injeção de harmônicos no sistema é praticamente desprezível. Conseqüentemente, o uso de filtros não é necessário. Finalmente, as perdas no GER aumentam com a potência reativa gerada/absorvida e, ao contrário dos outros compensadores estáticos, é mínima com geração nula. Como na maioria das vezes os compensadores só necessitam gerar/absorver reativos transitoriamente, as perdas totais de operação tendem a ser menores com os GERs.

Protótipos de 154 kV e 80 MVA, utilizando GTOs de 4,5 kV e 3 kA, foram desenvolvidos e instalados no sistema japonês, ocupando um terço da área de um RCT/CCT equivalente, com menos perdas e pelo mesmo custo deste [6].

2.3.5. - Compensador Estático de Potência Ativa.

A operação dos sistemas elétricos exige a variação da potência gerada pelas grandes máquinas para atender às flutuações de carga. O Compensador Estático de Potência Ativa tem sido estudado e desenvolvido como uma solução alternativa para atender esta necessidade.

Este equipamento consiste basicamente de um reator mantido a temperaturas criogênicas e de um conversor para conectá-lo ao sistema. Como a estrutura deste equipamento (figura 12) é semelhante à do RCT, ele pode, além de compensar as flutuações de potência ativa, trabalhar também como compensador estático de potência reativa. Um protótipo de 1 MJ [7] foi desenvolvido em 1989 no Japão e equipamentos para a indústria já estão disponíveis comercialmente nos EUA.

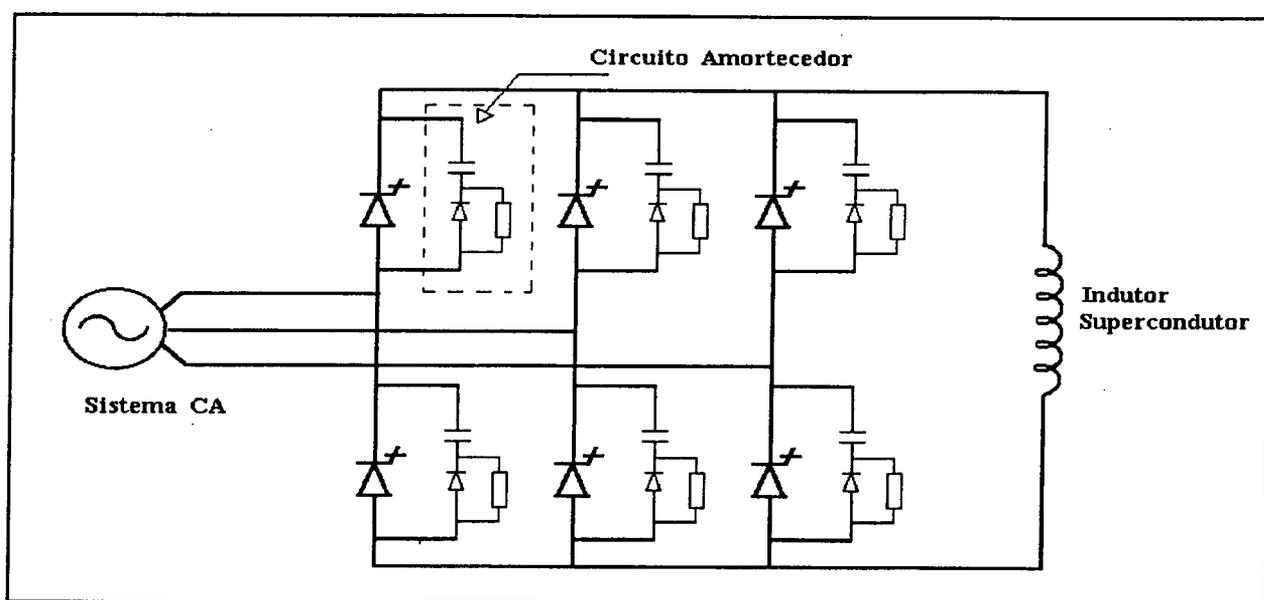


FIGURA 12 - Compensador Estático de Potência Ativa.

2.3.6. - Compensador Generalizado (Universal).

O conceito de Compensador Generalizado ou Universal surgiu do acoplamento dos compensadores série e "shunt". Constitui-se, portanto, de um conversor ligado em série e outro em derivação com a linha (figura 13). O conversor série é responsável pela injeção de uma tensão e o conversor em derivação, pela injeção de uma corrente [1]

Na figura 13 observa-se que os compensadores série e "shunt" estão próximos e seus lados CC estão conectados em um único capacitor. Desta forma, cada um deles pode funcionar independentemente gerando/absorvendo reativos e, neste caso, não haverá fluxo de potência no elo capacitivo.

É interessante notar que esta configuração permite uma grande flexibilidade a um sistema de transmissão. Por exemplo, tanto o lado série quanto o "shunt" podem ser controlados de modo a sintetizar elementos capacitivos, aumentando-se o fluxo de potência em uma linha. Porém, com um simples comando eletrônico é possível que, em um espaço de tempo menor que meio ciclo (sendo muito conservativo), estes capacitores equivalentes sejam transformados em reatores equivalentes, diminuindo-se o fluxo de potência na linha apenas pelo chaveamento correto dos dispositivos semicondutores e praticamente sem elemento armazenador de energia.

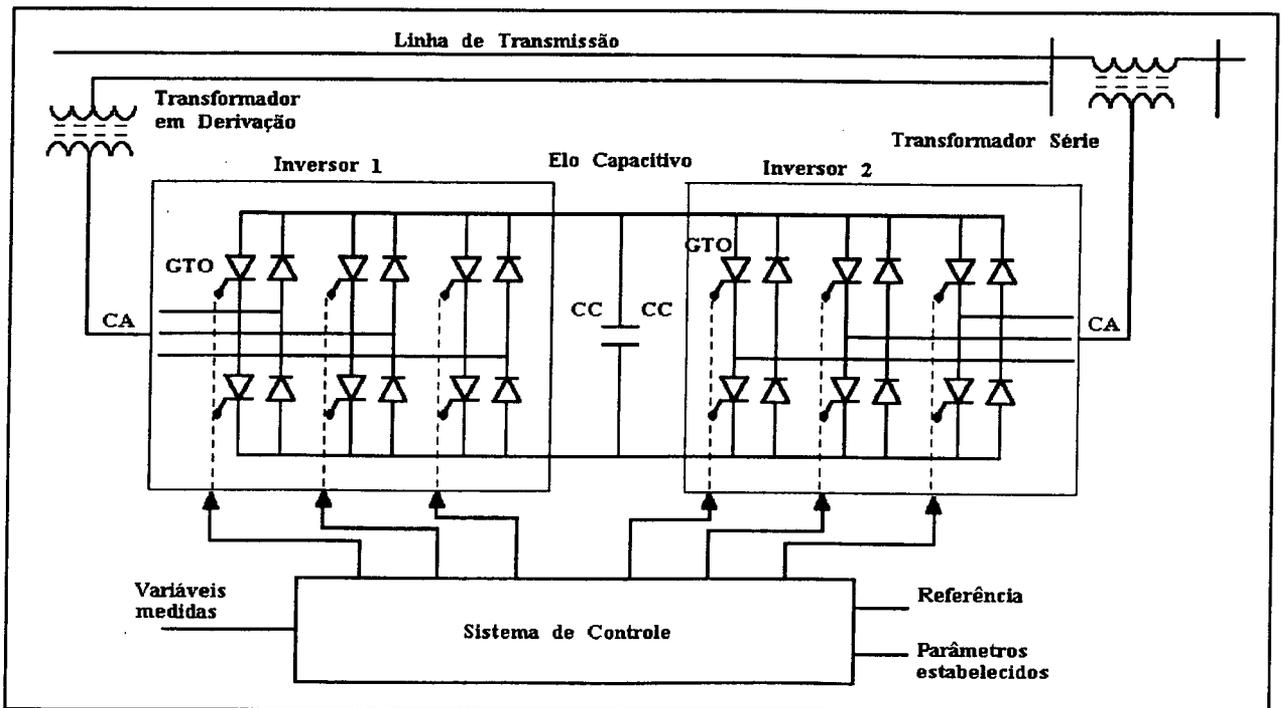


FIGURA 13 - Compensador Generalizado.

Uma outra possibilidade de controle é a de que este equipamento opere com fluxo de potência ativa no elo CC. Ou seja, é possível retirar potência ativa série para injetá-la pelo compensador "shunt" ou vice-versa. Nesta situação este conjunto de compensadores estará operando como um defasador eletrônico.

Em suma, este equipamento apresenta características inéditas, do ponto de vista de sistemas de potência, que ainda estão sendo investigadas.

2.3.7. - Limitador de Curto-Circuito (LCC).

Com a expansão dos sistemas elétricos, o valor das correntes de curto-circuito tem crescido acentuadamente. Esse crescimento acarreta a substituição de muitos equipamentos ou a necessidade de novos equipamentos mais robustos, o que, em ambos os casos, requer maiores investimentos.

Uma possível alternativa para esse problema é a instalação de limitadores de corrente de curto (LCC). Esses equipamentos não devem interferir normalmente no sistema mas, no caso de faltas, devem aumentar rapidamente a impedância do sistema. É importante ressaltar que o objetivo do LCC é de apenas reduzir a taxa de crescimento e/ou as correntes de curto-circuito e não interrompê-las. Esta última função continuaria sendo feita pelos disjuntores. A figura 14 apresenta uma possível configuração para esse equipamento.

O princípio básico deste dispositivo é o uso de um retificador alimentando um reator em série com a linha. Em condições normais, a

corrente no indutor é contínua e, conseqüentemente, a queda de tensão no LCC será mínima. Durante os transitórios de corrente, o indutor tende a manter a corrente constante, limitando assim o níveis de curto.

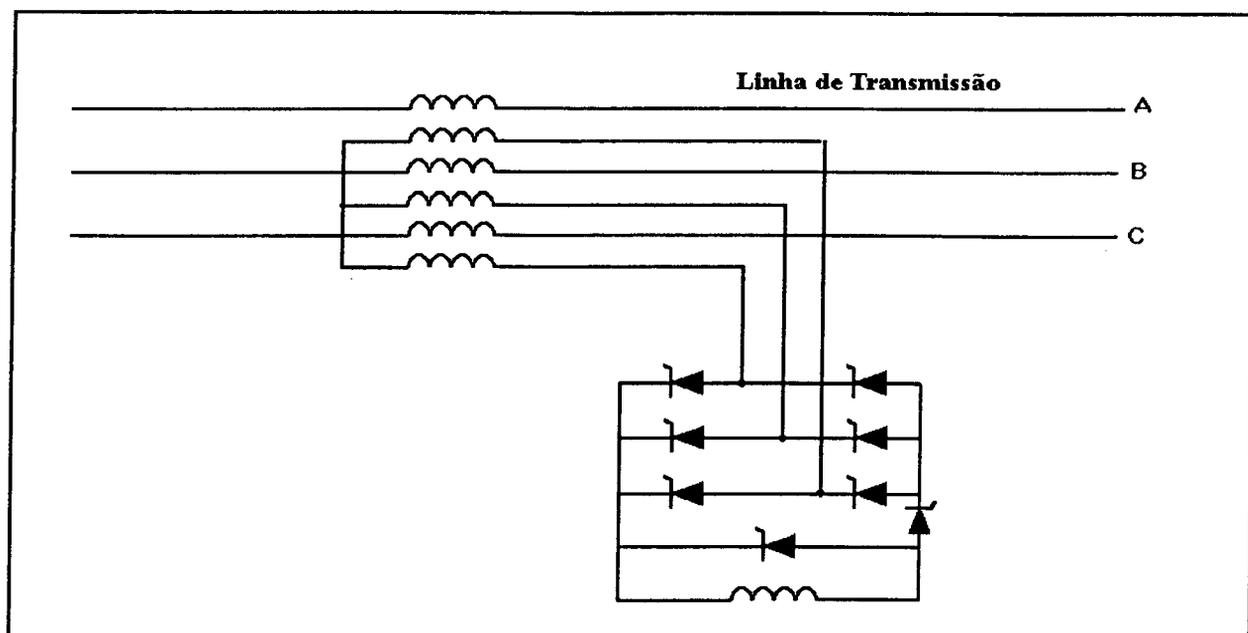


FIGURA 14 - Limitador de Curto-Circuito (LCC).

2.3.8. - Filtros Ativos de Potência.

Com o aumento do uso da eletrônica de potência, um novo problema tem surgido nos sistemas elétricos: os harmônicos. De uma maneira geral, todos os equipamentos eletrônicos geram correntes harmônicas que, ao se propagarem pelo sistema, provocam a distorção harmônica da tensão. Esta distorção afeta o funcionamento dos outros equipamentos conectados à rede e sobrecarrega os bancos de capacitores.

A solução tradicional para este problema tem sido a instalação de filtros passivos em derivação próximos às fontes geradoras das correntes harmônicas. No entanto, a sua eficiência nem sempre é adequada devido

à variação de frequência dos harmônicos e devido à interação com a própria impedância harmônica da rede.

Com o advento dos semicondutores de potência de última geração, os filtros ativos de potência se tornaram viáveis. O filtro ativo de potência consiste basicamente num conversor injetando correntes distorcidas no sistema de modo a anular as correntes harmônicas injetadas por outros equipamentos.

A principal vantagem do filtro ativo de potência, em comparação com o passivo, é a sua capacidade de adaptação. Enquanto os filtros passivos são projetados para eliminar apenas alguns harmônicos de frequências fixas e definidas, os filtros ativos se adaptam automaticamente à frequência dos harmônicos gerados. Além disso, como eles não utilizam capacitores e indutores, o tamanho do equipamento é bem menor. Reduções de um terço no volume já foram obtidas em protótipos de 100 kVA e já existem equipamentos operando em sistemas CCAT.

2.3.9. - Disjuntor Rápido.

Os disjuntores eletromecânicos estão sendo considerados lentos para algumas aplicações, principalmente depois do aparecimento do conceito FACTS. A idéia básica é aumentar a velocidade de resposta do mesmo, possivelmente pelo uso de tiristores. O problema do uso de tiristores está nas perdas em regime permanente, que são mais altas que nos disjuntores convencionais.

2.3.10. - "Load Tap Changers" (LTC).

"Load Tap Changers" convencionais são dispositivos também eletromecânicos para chaveamento de "taps" de transformadores, visando o controle de tensão. Por serem eletromecânicos, são lentos, e a idéia é o desenvolvimento de um dispositivo similar que utilize o tiristor como elemento chaveador. Neste caso, também as perdas em regime permanente constituem-se em problema.

2.3.11. - Linhas Autocompensáveis.

As linhas de transmissão CA têm sido consideradas elementos estáticos nos sistemas elétricos. Os seus parâmetros dependem de sua geometria e, uma vez determinados, estão fora do controle do sistema. Diversos estudos [8] mostraram a possibilidade de se aumentar a capacidade de transmissão das linhas de corrente alternada através da aproximação de circuitos duplos com determinado defasamento entre eles. A aproximação dos circuitos aumenta o acoplamento mútuo entre os mesmos e, desta forma, afeta a impedância de surto equivalente da linha.

Esses mesmos estudos demonstraram que, através do controle do defasamento da tensão nos dois circuitos, é possível reduzir a impedância de surto para a metade do seu valor normal. Esta é uma grande contribuição para os sistemas elétricos porque permite dobrar a capacidade de transmissão das linhas.

Com o uso de transformadores defasadores eletrônicos nos extremos da linha autocompensável é possível operá-la no SIL para diversas

condições de carga, minimizando-se a potência dos equipamentos de compensação reativa.

2.4. - Conclusões.

A preocupação inicial deste capítulo foi centrada na descrição das características básicas dos principais semicondutores de potência que são utilizados na concepção dos dispositivos FACTS, ou seja, os tiristores do tipo SCR, LTT e GTO e também dos semicondutores de última geração como o IGBT, o MCT e o SITH.

Em seguida fez-se uma explanação dos princípios básicos de funcionamento de uma variedade de diferentes dispositivos FACTS. Foram abordados os dispositivos já em utilização há bastante tempo no setor elétrico como os compensadores estáticos de reativos (RCT e CCT), outros recentemente comissionados e em fase de experiência operativa inicial como os compensadores série controlados (CSC) e também aqueles equipamentos em fase de desenvolvimento para futuras e inovadoras aplicações como o compensador estático de potência ativa e o compensador generalizado, dentre outros.

Constata-se que estes equipamentos atuam no sistema de potência no sentido de atender os mais diversos requisitos operativos. Em geral, esta atuação se dá via o controle do ângulo de potência, da impedância ou da tensão de linhas de transmissão. Dessa forma, os equipamentos aqui apresentados podem ser divididos em grupos de acordo com a finalidade de aplicação dos mesmos.

Alguns deles têm aplicações bem específicas como os filtros ativos de potência. Outros agem como elementos de proteção como os disjuntores rápidos e os limitadores de corrente de falta. Já os equipamentos usados para compensação de potência reativa (compensadores série e "shunt") e os defasadores podem ser considerados como controladores de fluxo de potência.

Estudos até então desenvolvidos e relatados na literatura técnica [4] indicam que, do ponto de vista da relação custo/benefício, aparentemente os controladores de fluxo de potência com tecnologia FACTS são os mais promissores. O Capítulo seguinte se dedica a uma descrição mais detalhada destes equipamentos através de modelos simples, dando início à análise da compensação série de linhas de transmissão, visando a apresentação do compensador série controlado (CSC) a partir do Capítulo 4.

3. - FACTS PARA CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA.

3.1. - Introdução.

Esta parte do estudo tem como referência principal o trabalho indicado na referência 4. Inicialmente serão revisados os problemas relativos à transmissão de energia em uma linha curta, com base em um resumo da teoria encontrada na literatura e discutida especificamente para a apresentação da conceituação FACTS por Gyugyi [9]. A partir de um modelo simples, é mostrado como se pode teoricamente fazer a compensação paralela ou série de uma linha de transmissão, visando o controle da impedância da mesma. Também será discutido o controle do ângulo de carga.

3.2. - Controle da Impedância Equivalente de Linhas de Transmissão.

O controle de impedância equivalente de uma linha de transmissão pode ser realizado com a conexão série ou paralela de fontes controladas de potência reativa. Em termos de circuito equivalente, estas fontes representam reatâncias capacitivas e/ou indutivas variáveis, inseridas na linha de transmissão.

Um melhor entendimento deste tipo de compensação pode ser obtido a partir de um sistema simplificado composto apenas de duas máquinas interligadas por uma impedância, conforme apresentado por Gyugyi [9] e aqui ilustrado na figura 15. Este modelo pode representar a interligação

entre duas máquinas por uma linha curta. Admite-se que as tensões terminais são fixas, com módulos iguais.

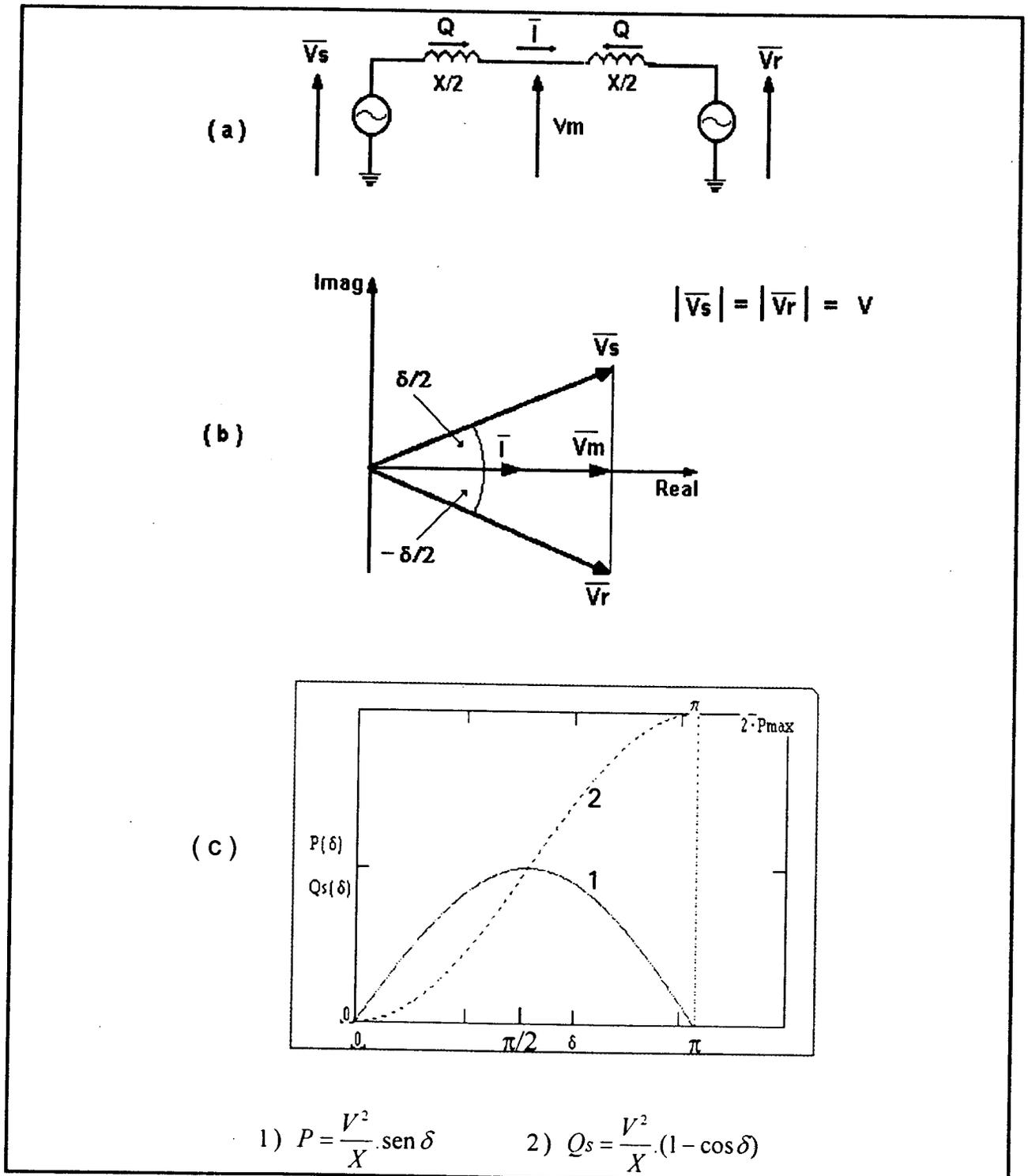


FIGURA 15 - (a) Sistema elétrico simples composto por duas máquinas; (b) diagrama fasorial correspondente e (c) característica de transmissão de potência.

Nestas condições, as tensões nos dois terminais da linha são dadas por:

$$\begin{aligned}\dot{V}_s &= V \angle \delta/2 \\ \dot{V}_r &= V \angle -\delta/2\end{aligned}\quad (3.1)$$

A tensão no ponto central da linha de transmissão curta é dada por:

$$\dot{V}_m = V \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \angle 0^\circ \quad (3.2)$$

e a corrente da linha é dada por :

$$\dot{I} = \frac{2V}{X} \cdot \text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \angle 0^\circ \quad (3.3)$$

O diagrama fasorial das tensões e corrente é mostrado na figura 15 (b). Deve-se notar que as perdas da linha foram desprezadas ($R = 0$). Neste caso, a potências ativas dos dois terminais e também do ponto central são iguais e valem:

$$P = \frac{V^2}{X} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (3.4)$$

A potência reativa que está sendo fornecida pelos terminais da linha é dada por :

$$Q_s = -Q_r = \frac{V^2}{X} \cdot (1 - \cos \delta) \quad (3.5)$$

Assim, a potência reativa total consumida pela linha vale:

$$Q = 2 \cdot Q_s = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot (1 - \cos \delta) \quad (3.6)$$

A figura 15 (c) mostra os gráficos das potências P e Qs em função do ângulo δ .

A seguir será mostrado que o uso de uma fonte de tensão controlada no meio da linha pode aumentar a potência máxima transmissível da linha e ainda melhorar a estabilidade dinâmica do sistema, além de aumentar o limite de estabilidade estática.

3.2.1. - Compensação "Shunt"

Para analisar a compensação "shunt" do sistema da figura 15 (a), admite-se que uma fonte ideal de potência reativa seja conectada no ponto central da linha, conforme mostra a figura 16 (a) [9].

Admite-se também que a fonte ideal de reativos controla a tensão no ponto central da linha e eleva seu módulo para o mesmo valor das tensões terminais, ou seja :

$$|\dot{V}_s| = |\dot{V}_r| = |\dot{V}_m| = V \quad (3.7)$$

Se a fonte ideal de reativos possui potência ativa nula, suas correntes trifásicas devem estar defasadas de 90° das tensões no ponto central da linha. O diagrama fasorial da figura 16 (b) ilustra esta situação.

Nestas condições, a compensação "shunt" pode ser entendida como um "seccionamento" da linha, pois as tensões \dot{V}_s e \dot{V}_m possuem módulos iguais e uma defasagem angular igual a $\delta/2$. A impedância equivalente

deste segmento de linha vale $X/2$ e assim, por analogia, tem-se que a potência ativa transmitida vale :

$$P_p = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.8)$$

Deve-se notar que a potência transmitida tem o mesmo valor nos dois segmentos da linha, pois a potência da fonte controlada de reativos é nula.

A corrente que circula no primeiro segmento de linha (\dot{I}_{sm}) pode ser calculada pela seguinte equação :

$$\dot{V}_s - \dot{V}_m = J\left(\frac{X}{2}\right) \cdot \dot{I}_{sm} = V \angle \frac{\delta}{2} - V \angle 0^\circ \quad (3.9)$$

A solução da equação acima fornece :

$$\dot{I}_{sm} = \frac{4 \cdot V}{X} \cdot \text{sen}\left(\frac{\delta}{4}\right) \angle \frac{\delta}{4} \quad (3.10)$$

De forma similar, pode-se determinar o valor da corrente no segundo segmento de linha (\dot{I}_{mr}), que vale :

$$\dot{I}_{mr} = \frac{4 \cdot V}{X} \cdot \text{sen}\frac{\delta}{4} \angle -\frac{\delta}{4} \quad (3.11)$$

Das equações (3.10) e (3.11) pode-se, então, determinar o valor da corrente da fonte controlada de reativos (\dot{I}_m) :

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{sm} - \dot{I}_{mr} = \frac{8 \cdot V}{X} \cdot \text{sen}^2\left(\frac{\delta}{4}\right) \angle 90^\circ \quad (3.12)$$

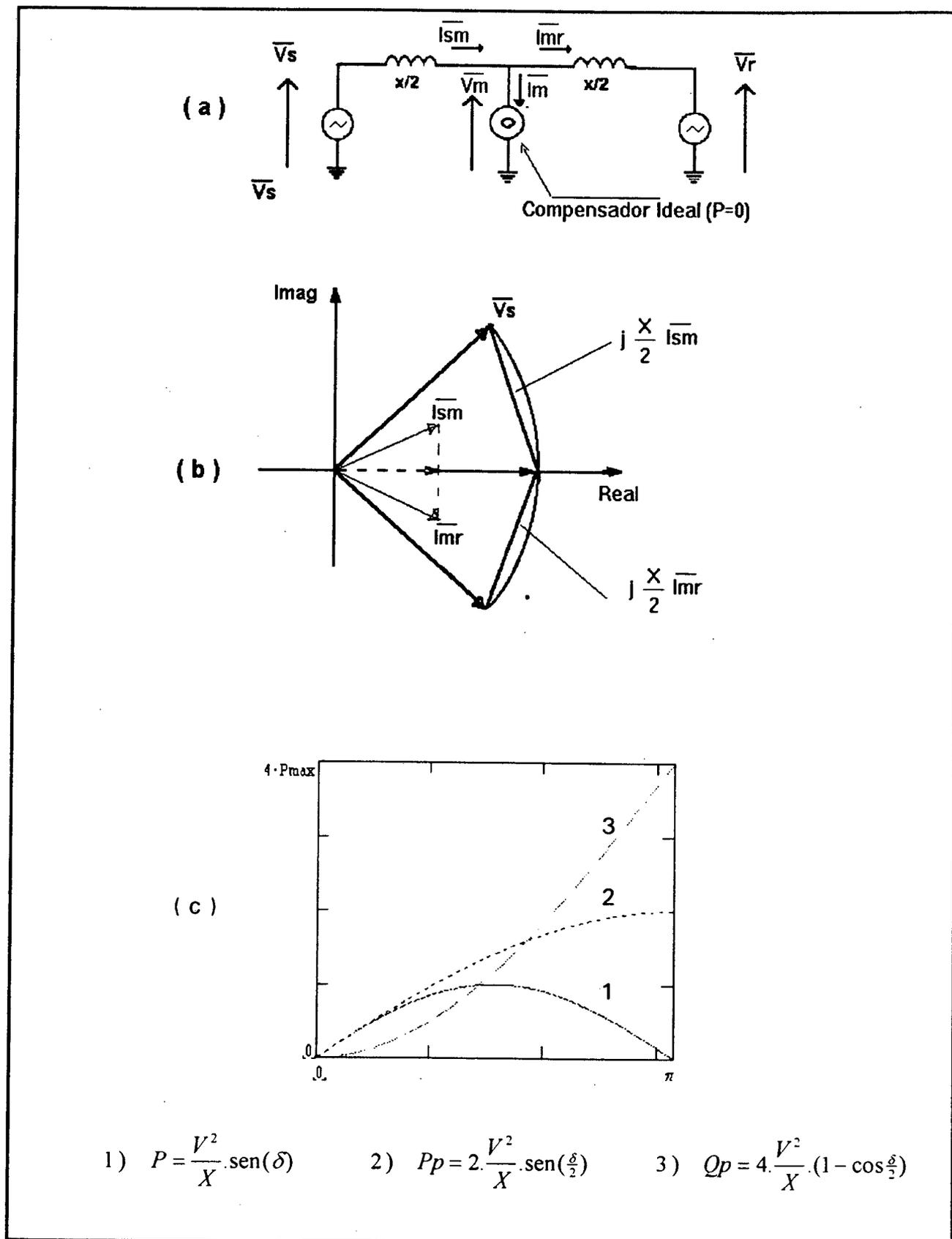


FIGURA 16 - (a) Sistema elétrico com compensador "shunt"; (b) diagrama fasorial correspondente; (c) característica de transmissão de potência.

Dado que o ângulo da tensão \dot{V}_m é nulo, de (3.12) conclui-se que a fonte controlada pode ser representada por um capacitor ideal, pois a corrente \dot{I}_m está avançada de 90° com relação a \dot{V}_m .

A potência reativa da fonte controlada é dada por :

$$Q_p = \text{Im}\{\dot{V}_m \cdot \dot{I}_m^*\} = -\frac{4 \cdot V^2}{X} \cdot (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (3.13)$$

A figura 16 (c) mostra as curvas de P_c e Q_c em função do ângulo δ . Ela mostra ainda a curva da potência ativa transmitida sem a compensação "shunt", donde se conclui que o problema da estabilidade estática em $\delta = 90^\circ$ foi tecnicamente eliminado na linha compensada. Contudo, deve ser notado que para valores elevados de δ , a potência reativa fornecida pela fonte controlada assume proporções que podem inviabilizar este tipo de compensação.

Esta filosofia de compensação pode ser empregada "n" vezes e, neste caso, a potência transmitida P_p , passa a ser expressa por :

$$P_p = 2 \cdot n \cdot \frac{V^2}{X} \cdot \text{sen}(\frac{\delta}{2n}); \quad (3.14)$$

sendo "n" o número de pontos (igualmente espaçados) da linha onde são inseridos os compensadores. Pode-se então definir $g(n, \delta) = P_p/P - 1$, como sendo o ganho de fluxo de potência (em p.u.) com a adoção de compensação "shunt" (P_p), em relação ao sistema não compensado (P).

O quadro 1 indica como fica o ganho de fluxo de potência em p.u., em função do ângulo de defasagem δ e do número de pontos de

compensação (de uma linha curta). Deste quadro fica claro que existe um ganho substancial na transmissão de potência para $n = 1$ e $\delta = 90^\circ$, porém este ganho cresce relativamente pouco com o aumento do número de pontos de compensação. De fato, mesmo que n tendesse a um valor infinito, o limite de (3.14) seria dado por: $P_p = V^2 \cdot \delta / X$, o que daria um ganho máximo de $(\pi/2 - 1) = 0.57$ p.u. para $\delta = 90^\circ$.

$n \backslash \delta$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	0.0086	0.0350	0.0820	0.1550	0.2600	0.4100
2	0.0100	0.0440	0.1000	0.1950	0.3300	0.5300
3	0.0110	0.0450	0.1070	0.2000	0.3400	0.5500
4	0.0110	0.0460	0.1090	0.2060	0.3490	0.5600
5	0.0110	0.0467	0.1100	0.2070	0.3500	0.5640
6	0.0110	0.0468	0.1100	0.2100	0.3500	0.5670

QUADRO 1 - Ganho em p.u. no fluxo de potência transmitida em função de δ (ângulo de defasagem) e n (número de pontos compensados).

3.2.2 - Compensação Série.

A compensação série apresentada a seguir consiste no emprego de uma fonte controlada de reativos conectada em série com a linha de transmissão.

Para efeito de comparação, será também considerado o mesmo sistema da figura 15, onde se considera apenas a indutância série da linha, modelo este, válido para linhas curtas. Desta forma, assim como na compensação "shunt", a fonte controlada de reativos atuará também como um capacitor ideal.

A figura 17 (a) propõe uma compensação série constituída por um capacitor que compensa parte da potência reativa indutiva da linha, ou seja :

$$X_e = X_l - X_c , \quad (3.15)$$

onde :

X_e - Impedância equivalente da linha compensada

X_l - Reatância indutiva série da linha

X_c - Reatância do capacitor série

No caso da compensação "shunt", partiu-se de uma fonte de tensão e mostrou-se que ela atuava basicamente como um capacitor. No caso da compensação série, vale o inverso, isto é, os capacitores série, podem ser substituídos por fontes controladas.

Define-se s como sendo a taxa de compensação, ou seja :

$$s = X_c / X_l , \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (3.16)$$

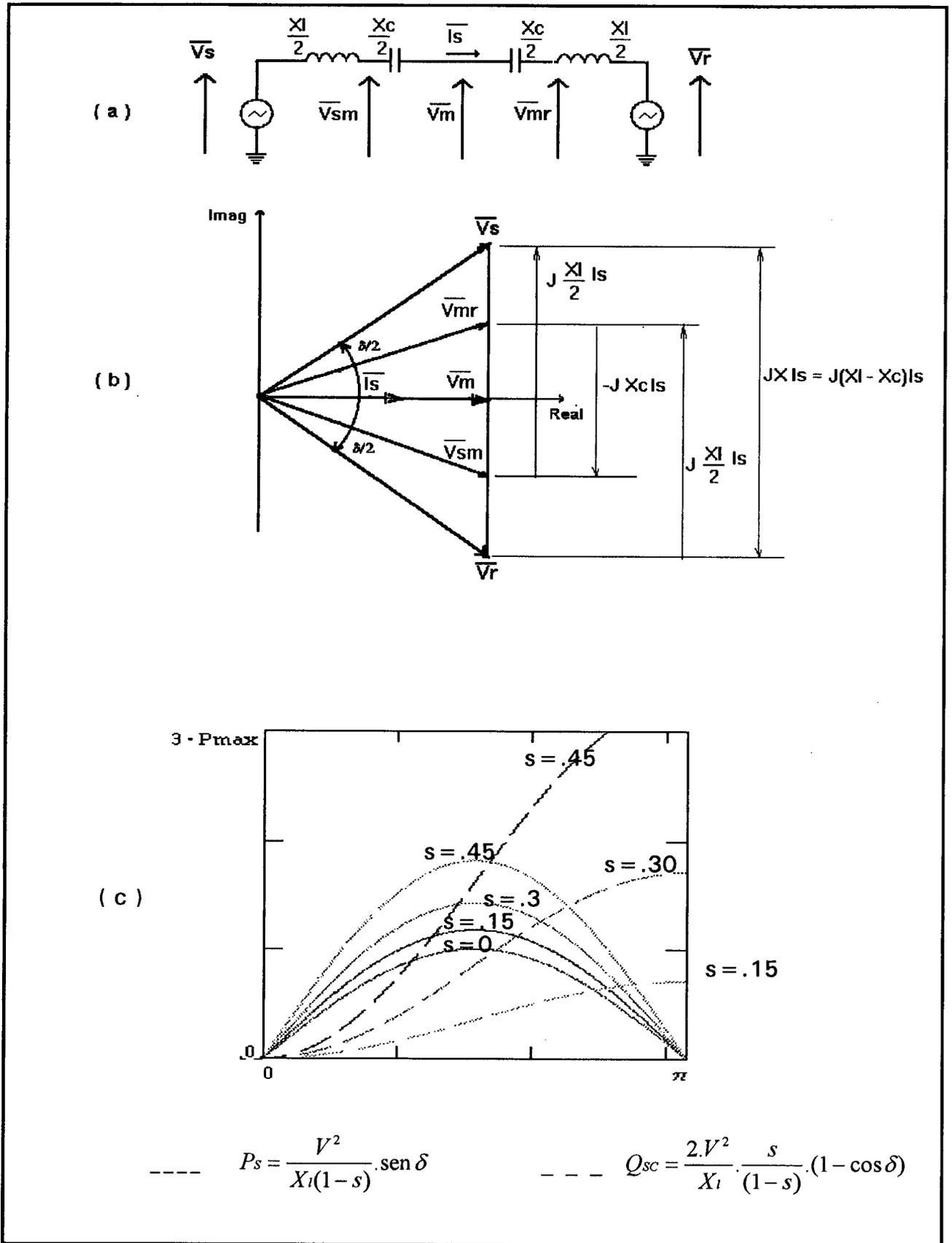


FIGURA 17 - (a) Sistema elétrico com compensação série; (b) diagrama fasorial; (c) característica de impedância.

Assim, de (3.15) e (3.16) vem :

$$X_e = X_l(1-s) \quad (3.17)$$

O fasor que representa a corrente na linha (\dot{I}_s) está sobre o eixo real, conforme ilustra a figura 17 (b).

A partir da equação (3.3) e do valor da impedância equivalente da linha com compensação série, obtém-se o novo valor da corrente da linha.

$$\dot{I}_s = \frac{2.V}{X_l(1-s)} \cdot \text{sen} \frac{\delta}{2} \angle 0^\circ \quad (3.18)$$

Da equação (3.4) e da expressão da impedância X_e , obtém-se a nova equação para a potência transmitida:

$$P_s = \frac{V^2}{X_l(1-s)} \cdot \text{sen} \delta \quad (3.19)$$

Deve-se lembrar que a tensão da fonte controlada está em quadratura com a corrente \dot{I}_s . Dessa forma, o valor da potência ativa fornecida pela fonte é nulo. Por outro lado, a potência reativa fornecida pelo compensador depende da taxa "s" de reativos que se deseja compensar, ou seja:

$$Q_{sc} = X_c \left| \dot{I}_s \right|^2 = \frac{2.V^2}{X_l} \cdot \frac{s}{(1-s)} \cdot (1 - \cos \delta) \quad (3.20)$$

A figura 17 (c) apresenta as curvas de potência ativa transmitida e da potência reativa fornecida pelo compensador série em função do ângulo

de potência (δ) e para algumas taxas (s) de compensação reativa. Dessa figura pode-se concluir, por exemplo, que para uma compensação de 30% ($s=0.30$) da potência reativa da linha, a potência ativa máxima é incrementada de 43%, ($P_s=1.43.V^2 / X_l$), enquanto que a potência reativa do compensador para este ponto de máximo ($\delta=90^\circ$) vale $1.22.V^2 / X_l$.

3.3. - Controle de Tensão Usando Defasadores

Conforme visto anteriormente, outra forma de aplicação do conceito FACTS para controle do fluxo de potência consiste no emprego de equipamentos que atuem sobre as tensões terminais da linha, alterando seus módulos e/ou suas defasagens angulares.

Para efeito de análise, será considerado novamente o sistema simplificado da figura 15 (a). Propõe-se, então, o emprego de uma fonte de tensão controlada, conectada em série com a linha de transmissão curta, em uma de suas extremidades, conforme ilustra a figura 18 (a).

Nesta figura observa-se que a tensão \dot{V}_s é função da tensão \dot{V}_g do gerador e da tensão \dot{V}_{pq} da fonte controlada de tensão, ou seja :

$$\dot{V}_s = \dot{V}_g - \dot{V}_{pq} \quad (3.21)$$

Desta equação (3.21) conclui-se que a fonte controlada de tensão pode modificar o módulo e o ângulo da tensão terminal da (\dot{V}_s), de forma a controlar o fluxo de potência.

Apresenta-se a seguir, um esquema de controle do ângulo de potência, no qual o módulo das tensões permanecem inalterados, conforme proposto por Gyugyi [9].

Admite-se que os módulos da tensão do gerador e das tensões terminais da linha sejam iguais. Assim, tem-se que :

$$|\dot{V}_g| = |\dot{V}_s| = |\dot{V}_r| = V \quad (3.22)$$

Portanto, neste caso, a tensão da fonte controlada de tensão (\dot{V}_{pq}) é tal que provoca uma defasagem angular α entre as tensões \dot{V}_g e \dot{V}_s . Por este motivo, a fonte controlada de tensão será denominada de Defasador ("phase shifter") de agora em diante.

A figura 18 (b) mostra o diagrama fasorial do sistema controlado pelo Defasador. Deve-se notar que o ângulo α representa a defasagem angular entre \dot{V}_g e \dot{V}_s , que é diferente do ângulo de fase da tensão \dot{V}_{pq} .

Do diagrama fasorial da figura 18 (b) nota-se que o novo ângulo de carga da linha vale $(\delta - \alpha)$ e assim, a potência ativa da linha compensada pelo Defasador vale :

$$P_\alpha = \frac{V^2}{X} \cdot \text{sen}(\delta - \alpha) \quad (3.23)$$

O Defasador controla o ângulo α , que indiretamente controla o fluxo de potência da linha.

O diagrama fasorial da figura 18 (b) mostra que a tensão \dot{V}_m e a corrente da linha \dot{I}_a estão sobre o eixo real. Assim, por analogia a equação (3.3) passa a ser equivalente a :

$$\dot{I}_a = \frac{2.V}{X} \cdot \text{sen}\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right) \angle 0^\circ \quad (3.24)$$

Uma característica importante da compensação por Defasador reside no fato de que a tensão e a corrente no Defasador não estão em quadratura, o que torna sua potência ativa diferente de zero.

A potência aparente do Defasador é dada por :

$$\dot{S}_{pq} = P_{pq} + jQ_{pq} = \dot{V}_{pq} \cdot \dot{I}_a^* = [V \angle (\frac{\delta+\alpha}{2}) - V \angle (\frac{\delta-\alpha}{2})] \cdot I_a^* \quad (3.25)$$

Substituindo o valor de \dot{I}_a em (3.25) obtém-se as expressões para as potências ativa e reativa do Defasador :

$$P_{pq} = -\frac{4.V^2}{X} \cdot \text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right) \quad (3.26)$$

$$P_{pq} = \frac{4.V^2}{X} \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\delta-\alpha}{2}\right) \quad (3.27)$$

Observando a expressão da potência ativa P_{pq} , nota-se que, quando $\alpha > 0$, ou seja, quando a tensão \dot{V}_s está avançada de um ângulo α com relação à tensão \dot{V}_s , a potência ativa do Defasador é negativa ($P_{pq} < 0$). Como foi adotada a convenção de carga (corrente no sentido contrário ao da tensão), o Defasador, nestas condições, está fornecendo energia para o sistema. Para $\alpha < 0$, ele estaria consumindo energia.

Análise similar mostra que o Defasador consome reativos quando $\alpha > 0$ e gera reativos quando $\alpha < 0$.

Este Defasador não incrementa a máxima potência transmissível pela linha, conforme mostra a equação (3.23), mas permite manter a potência ativa da linha no seu valor máximo quando se utiliza uma estratégia de controle que faz com que :

$$\delta \pm \alpha = 90^\circ \quad (3.28)$$

O ângulo α não pode crescer demasiadamente, pois tornaria a potência do Defasador muito elevada. Admite-se que α possa variar dentro de limites predeterminados (α_{\min} e α_{\max}). A potência ativa P_α da linha pode, então, ser mantida no seu valor máximo para :

$$90^\circ - \alpha_{\min} \leq \delta \leq 90^\circ + \alpha_{\max} \quad (3.29)$$

A figura 18 (c) apresenta a curva de potência ativa P_α transmitida pela linha. A curva em linha cheia mostra P_α quando o Defasador atua na faixa $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$.

3.4. - Estabilidade de Sistemas de Potência com Equipamentos Controladores de Fluxo de Potência.

Neste item será feita uma análise simplificada, enfocando o aspecto da estabilidade dos três sistemas compensados propostos nos itens anteriores. Esta análise será feita através do Critério das Áreas Iguais.

Sistemas com compensação série ou "shunt" para controle da impedância equivalente de linhas de transmissão podem ter incrementado o valor máximo de potência transmissível. Isto porque, com um controle dos compensadores adequado e devidamente ajustado, é possível atuar rapidamente sobre o fluxo de potência do sistema e, conseqüentemente, aumentar o limite de estabilidade transitória (primeiro "swing"), além de prover amortecimento para oscilações de potência.

Da mesma forma, um equipamento defasador com controle rápido e adequado pode ser utilizado para melhorar as condições de estabilidade transitória e dinâmica do sistema de potência.

O limite de estabilidade transitória define o valor máximo de potência ativa que pode ser transmitida em regime permanente, para o qual o sistema consegue retornar a uma condição operativa estável após a ocorrência de um distúrbio. O limite teórico máximo da potência ativa transmitida é dado por $P_{max} = V^2/X$, quando o ângulo δ vale 90° num sistema sem compensação. Contudo, não é recomendável a operação do sistema nestas condições (próximo ao limite de estabilidade transitória), uma vez que ele necessita de uma certa margem de segurança para se recuperar satisfatoriamente dos distúrbios.

Considerando o sistema sem compensação da figura 15 e os três sistemas compensados referentes às figuras 16 a 18 e aplicando o critério das áreas iguais, obtém-se os gráficos das figuras 19 (a) a 19 (d). Admite-se que para os 4 sistemas a potência ativa transmitida antes da aplicação do distúrbio é a mesma e vale P_m . Admite-se, ainda, que os 4 sistemas foram submetidos a uma falta de igual período de duração.

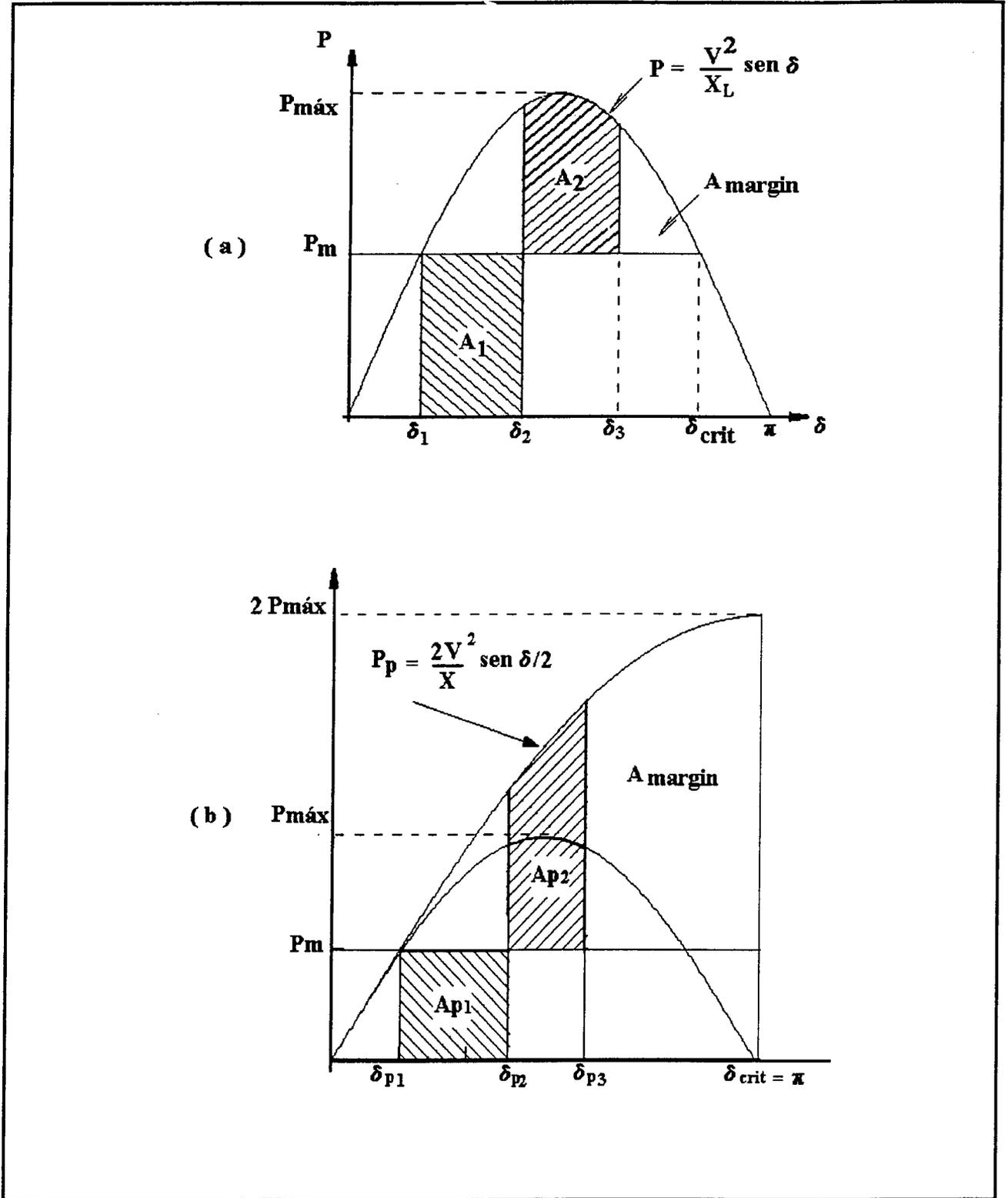


FIGURA 19 - Análise de estabilidade transitória através do critério das áreas iguais:

(a) sem compensação;

(b) com compensação "shunt".

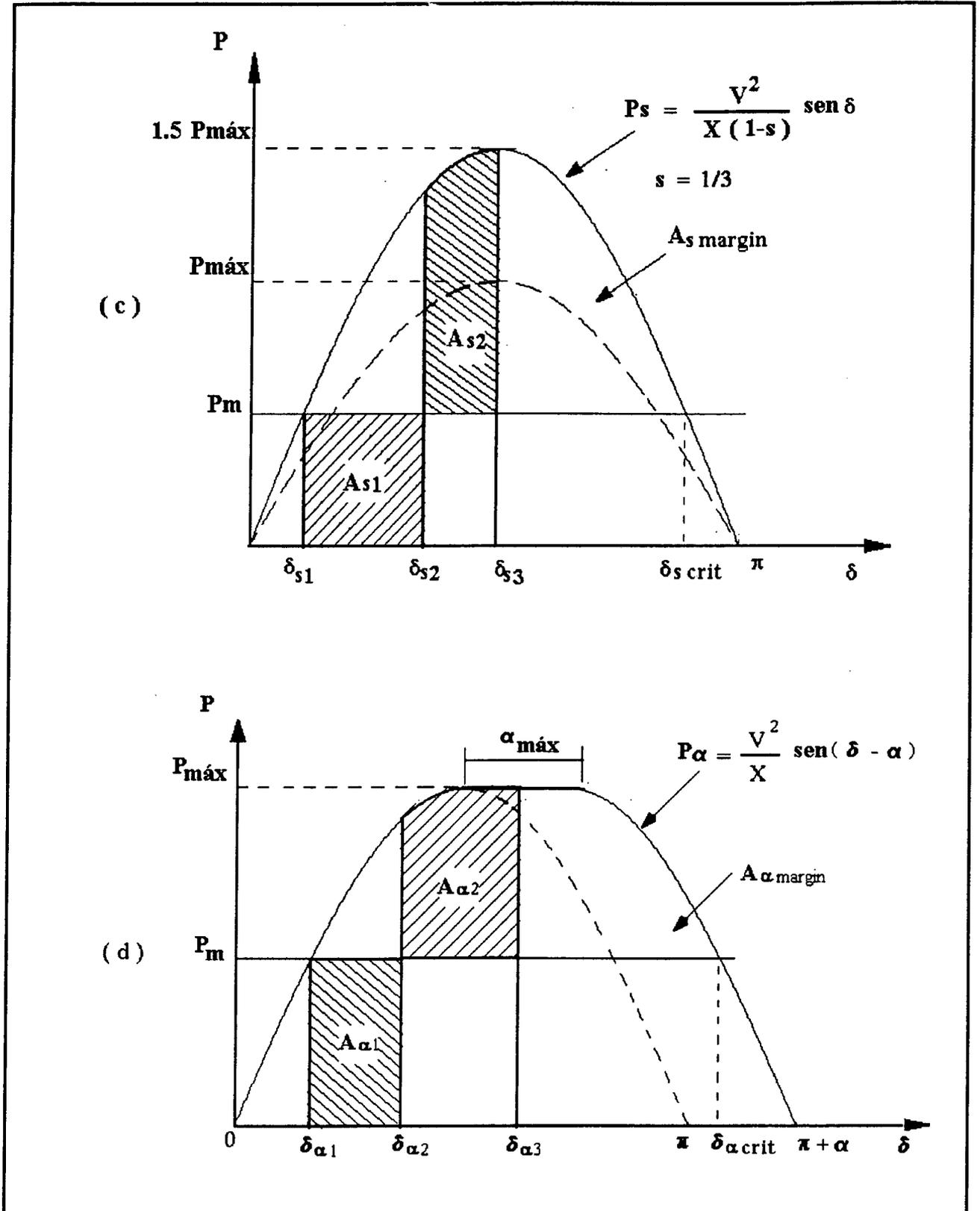


FIGURA 19 - Análise de estabilidade transitória através do critério de áreas iguais:

(c) com compensação série;

(d) compensação com defasador.

Durante o período em que ocorre a falta, a potência ativa transmitida reduz-se a zero fazendo com que a máquina comece a acelerar, elevando seu ângulo de carga de δ_1 para δ_2 . Quando o ângulo δ atinge o valor δ_2 , o sistema se recompõe e a potência transmitida torna-se maior que a potência mecânica no eixo do gerador, desacelerando a máquina. Entretanto o ângulo de carga da máquina continua a crescer até que a área A_2 relativa a energia desacelerante se iguale à área A_1 correspondente à energia acelerante fornecida ao rotor da máquina.

O ângulo máximo δ_3 deve ser menor que o ângulo crítico δ_{crit} para que o sistema não perca o sincronismo. As figuras 19 (a) a 19 (d) mostram que os ângulos críticos são diferentes para os 4 sistemas. As áreas compreendidas entre os ângulos δ_3 e δ_{crit} estão associadas com a margem de estabilidade do sistema. Estas áreas são maiores nos sistemas com compensação, o que prova que o uso de equipamentos dentro do conceito FACTS ampliam os limites de estabilidade do sistema.

Deve-se notar que o sistema não compensado da figura 19 (a) já possui uma margem satisfatória de estabilidade, correspondente a uma energia desacelerante disponível mas que não foi utilizada. Dessa forma, nos sistemas compensados a potência P_m transmitida em regime permanente poderia ser aumentada sem perda da margem de estabilidade.

3.5. - Conclusões.

Este capítulo apresentou três formas distintas da aplicação do conceito FACTS para controle do fluxo de potência, quais sejam: a compensação

"shunt" de linhas de transmissão, a compensação série de linhas de transmissão e a utilização de defasadores.

Foi mostrado que os compensadores "shunt" e série atuam sobre a impedância equivalente das linhas possibilitando o aumento da capacidade de transporte de energia das mesmas. Já para o defasador, viu-se que este objetivo é alcançado através do controle do módulo e ângulo das tensões terminais da linha.

Utilizando o critério das áreas iguais, mostrou-se como estes dispositivos têm em comum o potencial para aumentar o limite de estabilidade transitória de sistemas de potência. Na realidade, também o limite de estabilidade dinâmica pode ser sensivelmente incrementado, como será visto mais adiante, com a utilização de compensação série controlada. O Capítulo seguinte dá início à discussão da compensação série controlada, objetivo principal deste trabalho.

4. - COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA (CSC).

4.1. - Introdução.

Já foi mencionado, no Capítulo 2, que os equipamentos tipo Reator Controlado a Tiristor (RCT), e o Capacitor Chaveado a Tiristor (CCT) podem ser associados a bancos de capacitores e conectados em série com a linha de transmissão, dando origem a um esquema de compensação denominado Compensação (ou Compensador) Série Controlada (CSC).

Existem duas conhecidas formas de se implementar o CSC. Uma delas dá origem ao equipamento chamado TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) que possibilita a variação contínua do nível de compensação de uma linha de transmissão. O outro dispositivo, conhecido por TSSC (Thyristor Swichted Series Capacitor), permite apenas a variação em degraus (steps) do nível de compensação série da linha de transmissão.

4.2. - "Thyristor Controlled Series Compensation" (TCSC).

4.2.1. - Características Básicas.

Um módulo TCSC consiste basicamente de um capacitor de valor fixo em paralelo com um Reator Controlado a Tiristor (RCT). O banco de capacitores é geralmente equipado com Varistores de Óxido Metálico (MOV) para limitar a tensão sobre o mesmo durante condições de falta. A instalação é também protegida por disjuntores de "bypass", utilizados para isolar o TCSC do sistema de potência nas situações em que isto se

faz necessário (casos de faltas próximas à instalação, manutenção, etc).
A figura 20 mostra um diagrama genérico de um módulo TCSC.

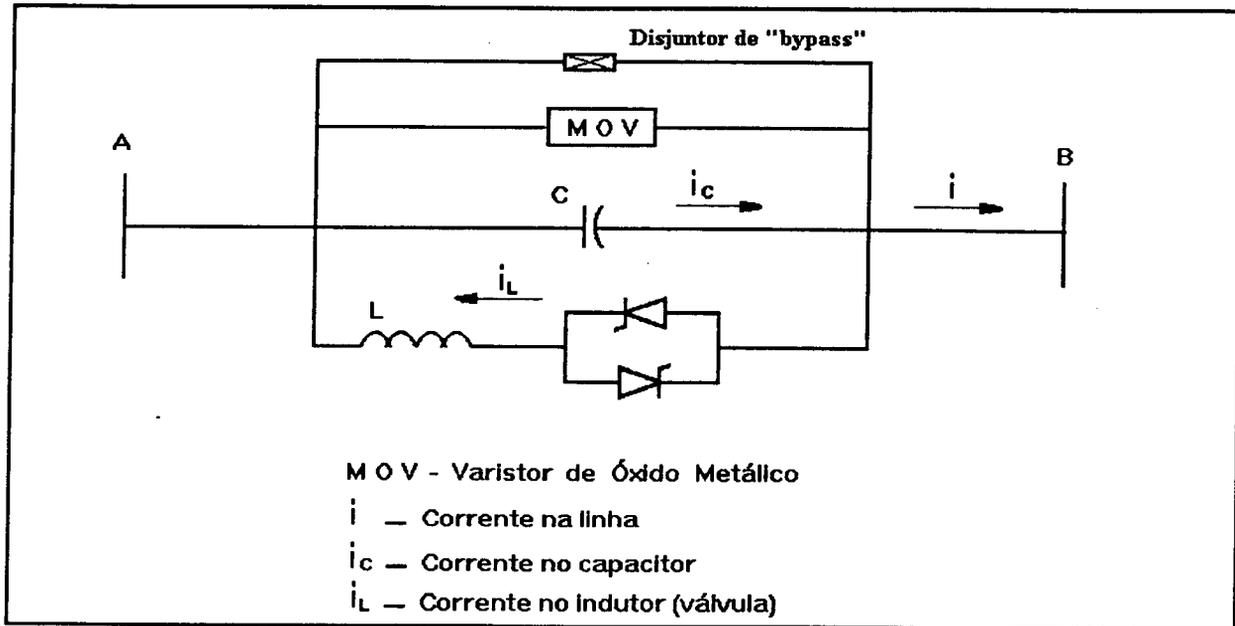


FIGURA 20 - Módulo TCSC genérico.

As características básicas deste equipamento podem ser obtidas de uma maneira simplificada considerando o sistema como uma barra infinita alimentando uma fonte de corrente conforme a figura 21 [10].

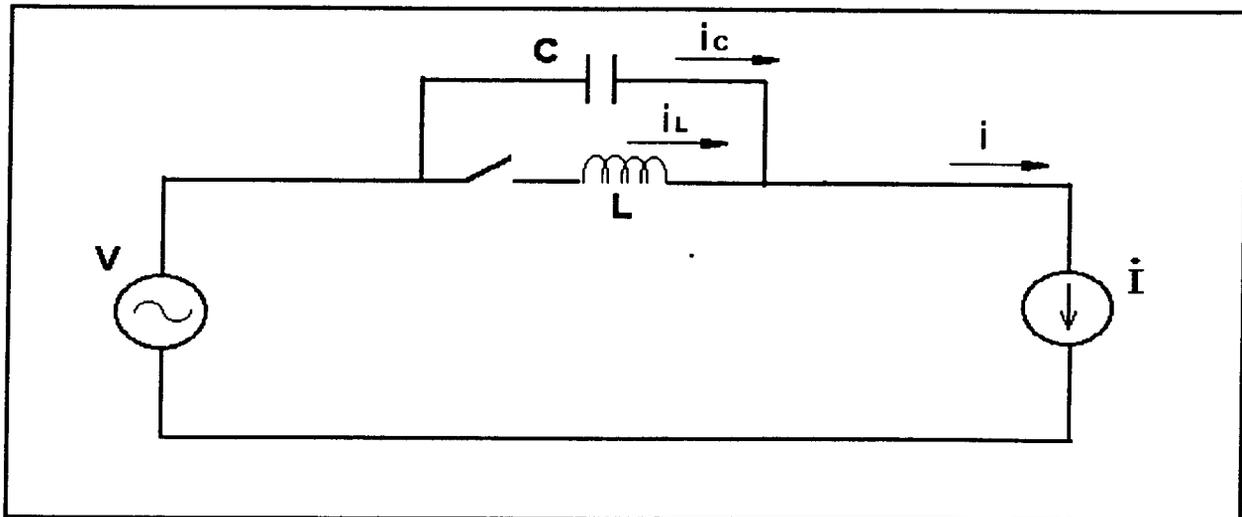


FIGURA 21 - Esquema Simplificado do TCSC.

Considerando o reator desligado por um longo período de tempo, tem-se que:

$$I_c(t) = I(t) = C \cdot \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (4.1)$$

onde:

$$I(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(wt - \varphi) \quad (4.2)$$

sendo:

I o valor eficaz da corrente;

φ o seu defasamento em relação à tensão.

Substituindo (4.2) em (4.1), a tensão no capacitor será dada por:

$$V_c(t) = -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{w \cdot C} \cdot \cos(wt - \varphi) \quad (4.3)$$

A figura 22 apresenta as formas de onda da tensão da barra infinita, tensão no capacitor e da corrente na linha. Considerando o reator ligado entre $\alpha < wt < \beta$ tem-se que:

$$wt' = wt - \alpha \quad (4.4)$$

$$I_c(t') = C \cdot \frac{dV_c(t')}{dt'} \quad (4.5)$$

$$V_c(t') = L \cdot \frac{dI_L(t')}{dt'} \quad (4.6)$$

$$I_c(t') + I_L(t') = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(wt' + \alpha - \varphi) \quad (4.7)$$

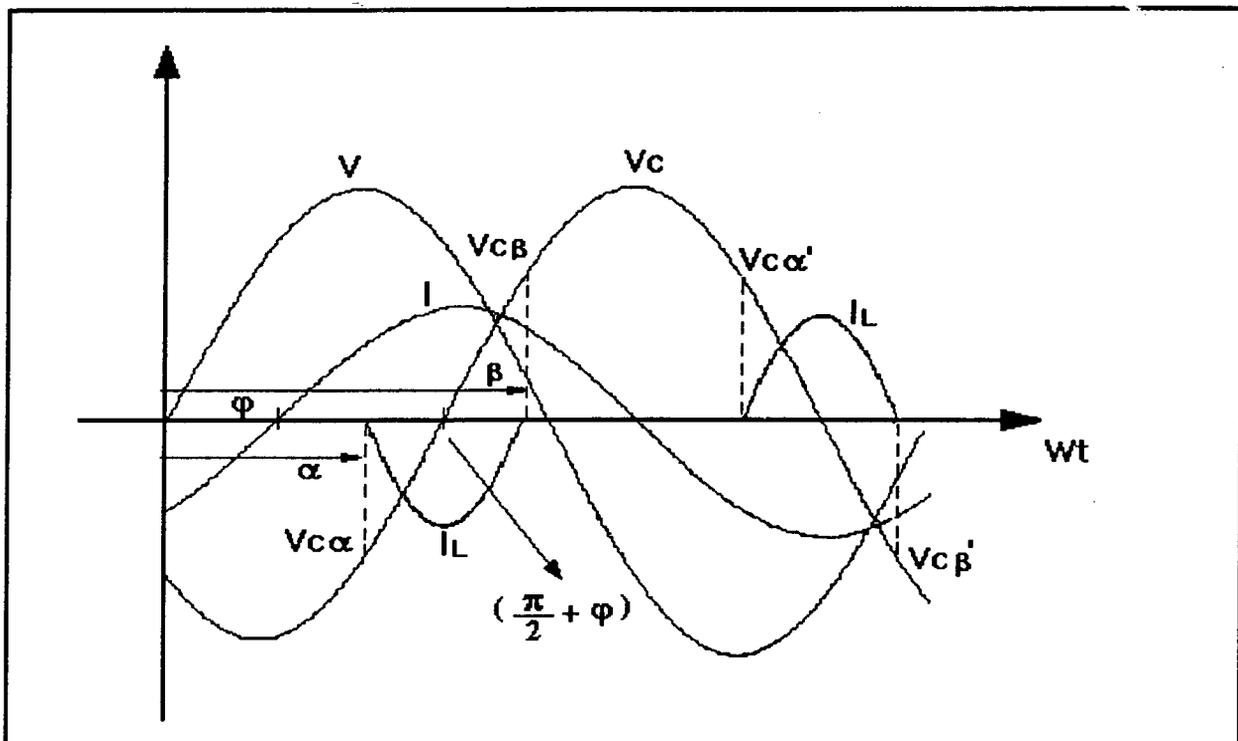


FIGURA 22 - Formas de onda de tensão e corrente no TCSC.

Derivando (4.5), (4.6) e substituindo na derivada de (4.7), tem-se que:

$$C \cdot \frac{d^2 V_c(t')}{dt'^2} + \frac{V_c(t')}{L} = \sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot \cos(wt' + \alpha - \varphi) \quad (4.8)$$

Aplicando a Transformada de Laplace a esta equação, tem-se que:

$$V_c(S) = \frac{S \cdot V_{c\alpha}}{S^2 + w\omega^2} + \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\alpha - \varphi)}{C \cdot (S^2 + w\omega^2)} + \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w \cdot \cos(\alpha - \varphi) \cdot S}{C \cdot (S^2 + w^2) \cdot (S^2 + w\omega^2)} - \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot w^2 \cdot \text{sen}(\alpha - \varphi)}{C \cdot (S^2 + w^2) \cdot (S^2 + w\omega^2)} \quad (4.9)$$

onde:

$V_{c\alpha}$ é o valor da tensão no capacitor no instante do disparo;

$w\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ é a frequência natural de ressonância do circuito LC.

Voltando ao domínio do tempo, a tensão no capacitor normalizada será dada por:

$$\overline{V}_c(t') = [\overline{V}_{ca} + A \cdot \cos(\alpha - \varphi)] \cdot \cos(\omega_0 \cdot t') - k \cdot A \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t') - A \cdot \cos(\omega t' + \alpha - \varphi) \quad (4.10)$$

onde:

$$k = \omega_0 / \omega$$

$$A = \frac{1}{1 - k^2}$$

Nesta equação a tensão base é a tensão de pico no capacitor, quando o reator não está presente. Torna-se importante observar que os dois primeiros termos da expressão (4.10) são devidos à existência do circuito LC do equipamento e são de alta frequência. Isto significa que cuidados especiais devem ser tomados caso a tensão e/ou corrente no capacitor e indutor durante a operação da válvula, sejam utilizados como referência para o sistema de controle.

A corrente no indutor será dada por:

$$I_L(t') = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t' + \alpha - \varphi) - C \cdot \frac{dV_c(t')}{dt'} \quad (4.11)$$

Substituindo a derivada de (4.10) em (4.11), a corrente normalizada no reator será dada por:

$$\overline{I}_L(t') = -k^2 \cdot A \cdot \sin(\omega t' + \alpha - \varphi) + k \cdot [\overline{V}_{ca} + A \cdot \cos(\alpha - \varphi)] \cdot \sin(\omega_0 \cdot t') + k^2 \cdot A \cdot \sin(\alpha - \varphi) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t') \quad (4.12)$$

Nesta equação a corrente base é a corrente de pico da fonte. A corrente passa por zero em $wt = \beta$ e, conseqüentemente, a válvula de tiristores bloqueia. Desta maneira, teremos que:

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (4.13)$$

$$0 = -k \cdot \text{sen}(\gamma + \alpha - \varphi) + \left[\frac{\overline{V_{c\alpha}}}{A} + \cos(\alpha - \varphi) \right] \cdot \text{sen}(k \cdot \gamma) + k \cdot \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot \cos(k \cdot \gamma) \quad (4.14)$$

onde: γ é o ângulo de condução.

Para qualquer valor de α e $\overline{V_{c\alpha}}$, o valor de γ pode se encontrado a partir de (4.14).

Substituindo γ na equação (4.10), a tensão $\overline{V_{c\beta}}$ será dada por:

$$\overline{V_{c\beta}} = [\overline{V_{c\alpha}} + A \cdot \cos(\alpha - \varphi)] \cdot \cos(k \cdot \gamma) - k \cdot A \cdot \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot \text{sen}(k \cdot \gamma) - A \cdot \cos(\gamma + \alpha - \varphi) \quad (4.15)$$

Finalmente, o valor da tensão $V_{c\alpha'}$ será dada por:

$$V_{c\alpha'} = \frac{1}{C} \cdot \int_{\beta/w}^{(\pi+\alpha)/w} \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(wt - \varphi) dt + V_{c\beta} \quad (4.16)$$

$$\overline{V_{c\alpha'}} = \cos(\gamma + \alpha - \varphi) + \cos(\alpha - \varphi) + \overline{V_{c\beta}} \quad (4.17)$$

Como, em regime permanente, a tensão $V_{c\alpha'}$ será igual a $-V_{c\alpha}$, tem-se :

$$\overline{V_{c\alpha'}} = (1 - A) \cdot \frac{\cos(\alpha + \gamma - \varphi)}{1 + \cos(k\gamma)} + \cos(\alpha - \varphi) \cdot \frac{1 + A \cdot \cos(k\gamma)}{1 + \cos(k\gamma)} - k \cdot A \cdot \text{sen}(\alpha - \varphi) \cdot \frac{\text{sen}(k\gamma)}{1 + \cos(k\gamma)} \quad (4.18)$$

$$\gamma = 2 \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \alpha + \varphi \right] \quad \text{para } \varphi \leq \alpha \leq \varphi + \frac{\pi}{2} \quad (4.19)$$

Durante as variações no ângulo de disparo α , o ângulo de condução não obedece a expressão (4.19). Isto ocorre devido à necessidade de se carregar ou descarregar o capacitor. Além disso, como este fenômeno de carga e descarga é função da corrente na linha, existe um atraso que independe do sistema de controle. Este fenômeno não existe nos compensadores estáticos e, conseqüentemente, deve ser levado em consideração no projeto do sistema de controle deste novo equipamento.

4.2.2 - Característica de Impedância.

A impedância teórica do TCSC à frequência fundamental "w", pode ser obtida via análise do circuito da figura 21. Esta análise, encontrada nas referências [11,12], mostra que a impedância (Z_1) é dada por:

$$Z_1 = \frac{1}{w \cdot c} + \frac{w \omega^2 \cdot A}{w^3 \cdot c \cdot \pi} \cdot (\gamma - \text{sen } \gamma) - 4 \cdot \frac{w \omega^2 \cdot A}{w^3 \cdot c \cdot \pi} \cdot \cos \gamma \cdot \left(k \cdot \tan g \frac{k \cdot \gamma}{2} - \tan g \frac{\gamma}{2} \right) \quad (4.20)$$

com k e A definidos no subitem anterior.

Esta equação tem pólos em:

$$\frac{k \cdot \gamma}{2} = (2 \cdot n - 1) \frac{\pi}{2} \quad \text{com } n = 1, 2, 3, \dots$$

A figura 23 apresenta a curva de Impedância do TCSC em função do ângulo de disparo α . A faixa de variação teórica da impedância equivalente do TCSC é dada por:

- impedância capacitiva: valor mínimo = X_C
valor máximo = infinito
- impedância indutiva: valor mínimo = $\frac{X_C \cdot X_L}{X_C + X_L}$
valor máximo = infinito

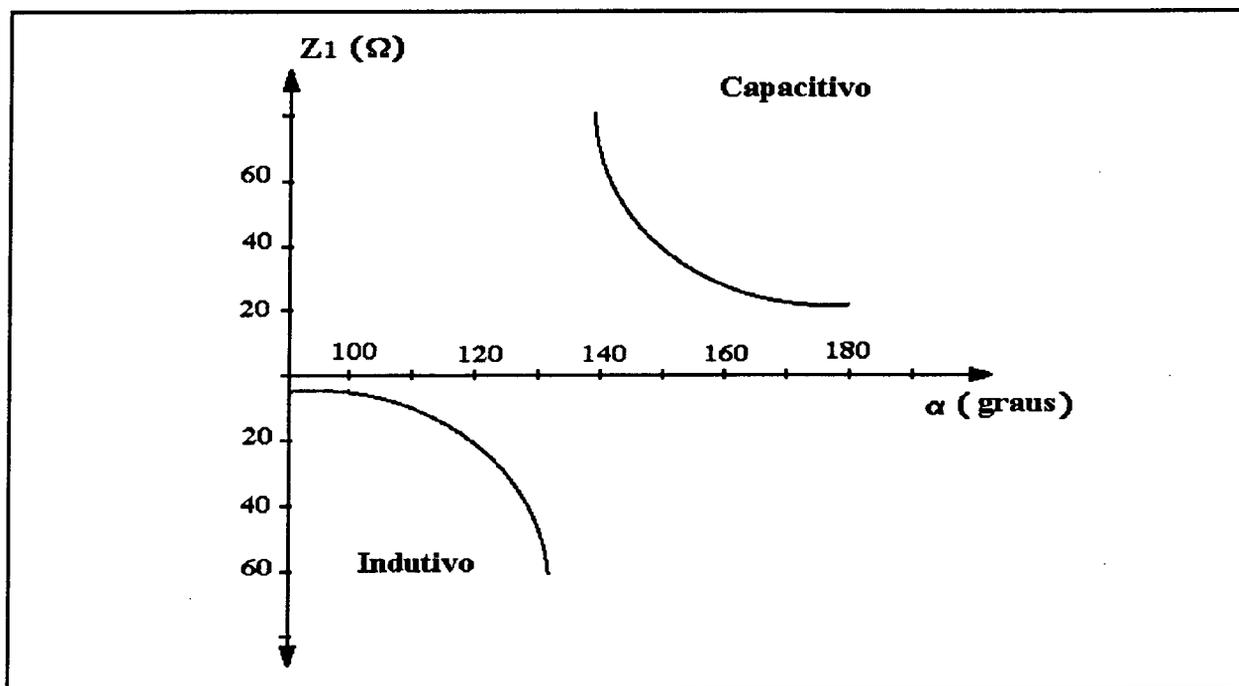


FIGURA 23 - Impedância teórica do TCSC à 60 Hz, em função do ângulo de disparo (α).

Com os tiristores bloqueados (ou com $\alpha = 180^\circ$), o TCSC se comporta como uma compensação série convencional (capacitor fixo). Com os tiristores conduzindo continuamente ($\alpha = 90^\circ$), o TCSC se comporta como uma indutância de pequeno valor, e esta condição operativa é denominada de modo "bypassado". Controlando-se o ângulo de condução dos tiristores, é possível variar a reatância do TCSC tanto na direção capacitiva quanto na direção indutiva.

A operação na região indutiva estende a faixa de controle do TCSC e possibilita reduzir os "gaps" (descontinuidades) na faixa de controle de

um esquema multi modular (vários módulos TCSC em série). Entretanto, o impacto de correntes harmônicas no dimensionamento do equipamento precisa ser avaliado. Se o indutor for pequeno frente ao capacitor, pode ser desejável restringir a operação na região indutiva, exceto para a condição de modo "bypassado" (tiristores em condução completa). A necessidade de operação na região indutiva deve ser decidida com base nos requisitos de desempenho do sistema e nos custos do equipamento.

A impedância do TCSC não pode assumir valores muito elevados (tendendo a infinito). A operação na região próxima a esta condição de ressonância deve ser evitada, impondo-se limites para os ângulos de disparo dos tiristores. A figura 24 apresenta a característica de impedância de um módulo TCSC em função da corrente na linha, considerando-se a limitação de ângulo de disparo na região de ressonância.

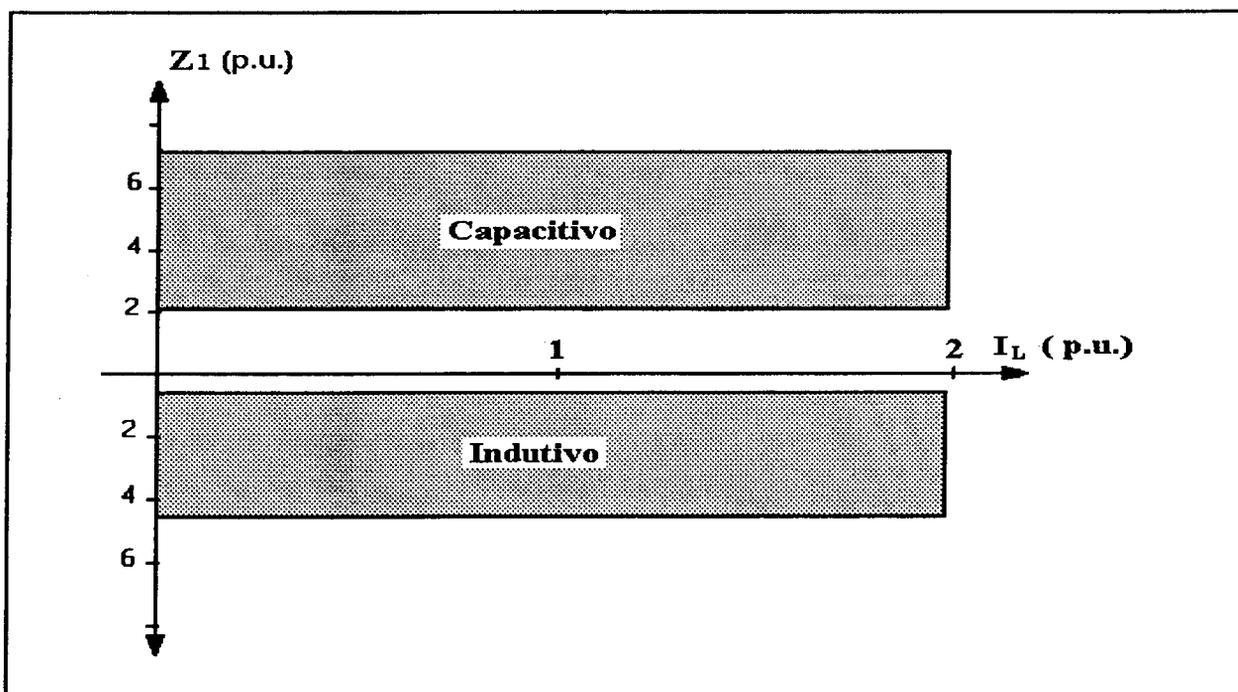


FIGURA 24 - Curva de Capacidade de Reatância Teórica do TCSC.

No item seguinte será mostrado como esta característica é modificada quando outros limites de controle e características construtivas do TCSC são incorporados.

4.2.3. - Capacidade Real de Reatância do TCSC.

Os valores nominais e as características do equipamento determinam os limites de operação (Região Operativa do Compensador). Os limites devidos a valores máximos de tensão e corrente assim como a estabilidade do sistema de controle impõem restrições aos valores de reatância de saída do TCSC. A figura 25 apresenta uma curva típica de valores de reatância de um módulo TCSC em função da corrente na linha de transmissão. As restrições ou limites operativos serão discutidos a seguir. É importante notar a redução na faixa dinâmica de operação com o aumento de corrente na linha de transmissão.

I - Operação na Região Capacitiva.

I.1. - Limites de Tensão.

Os capacitores do TCSC apresentam dois valores nominais de tensão, um de curta duração (transitório), e outro para operação contínua. Os valores nominais de tensão no capacitor impõem um limite dependente do tempo, no valor máximo de operação da tensão sobre o capacitor série. Em adição, os valores nominais do MOV (Varistor de Óxido Metálico), também impõem limites aos valores de tensão que podem ser, inclusive, mais restritivos que os limites de sobretensões de curta

duração no capacitor. Estes valores máximos de tensão podem ser traduzidos em limites máximos de reatância, simplesmente dividindo-se os mesmos pelo valor atual da corrente na linha de transmissão. Uma vez que o limite máximo de tensão é uma função da duração da sobretensão, e que a corrente também varia com o tempo, o valor limite de reatância calculado tem natureza dinâmica.

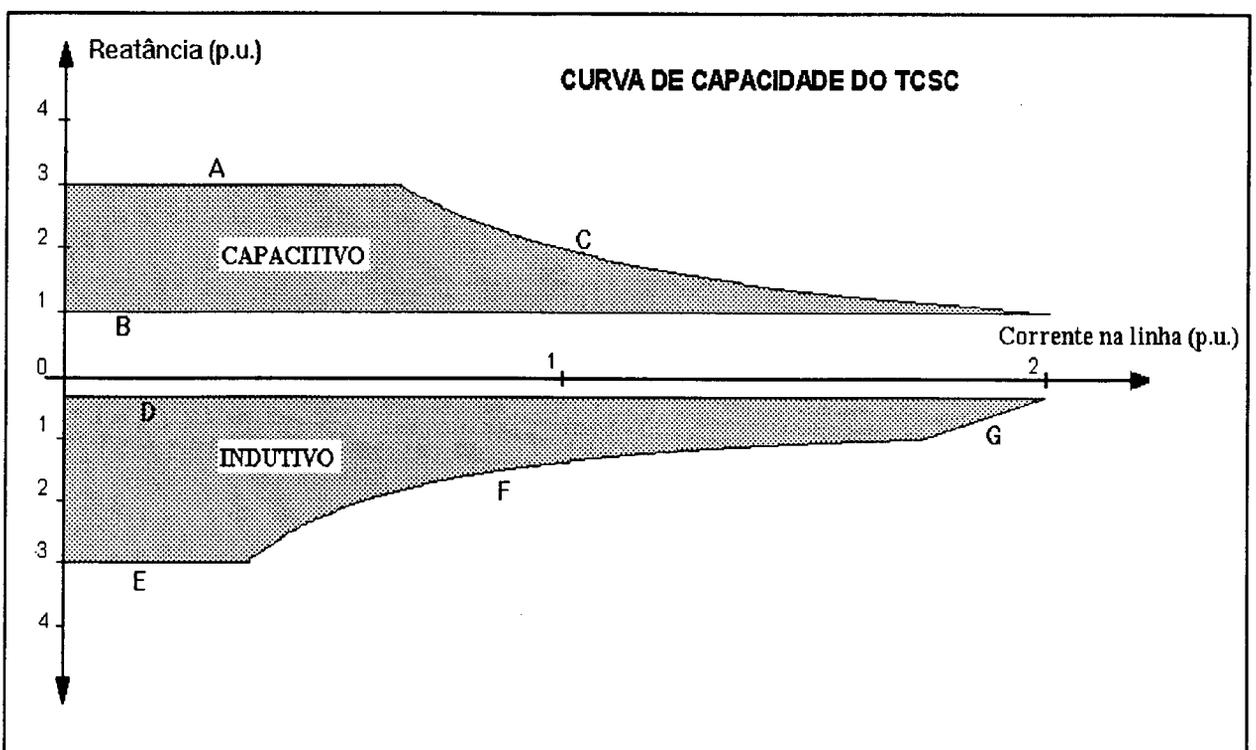


FIGURA 25 - Curva de Capacidade do TCSC.

- A - Limite de Ângulo de Disparo (Capacitivo)
- B - Tiristores Bloqueados
- C - Limite de Máxima Tensão no Capacitor
- D - Tiristores em Condução Completa (Reatância de "Bypass")
- E - Limite de Ângulo de Disparo (Indutivo)
- F - Limite de Aquecimento Harmônico
- G - Limite de Corrente Máxima nos Tiristores

Para análises de estabilidade eletromecânica, o limite máximo de tensão pode ser fixo ao invés de ser função do tempo, de forma a simplificar a implementação. Para estudos de planejamento, tem sido sugerido na literatura [13] um valor igual a 2 (duas) vezes a tensão nominal do capacitor, para ser usado como limite máximo de tensão em simulações que vão até 10 (dez) segundos.

I.2. - Limites de Corrente.

Para altos valores de corrente na linha de transmissão torna-se necessário "bypassar" o TCSC para proteger os capacitores. Para prover histerese ao controle, o TCSC, uma vez "bypassado", somente será reinserido após um intervalo de tempo a contar do instante em que a corrente na linha volta a ser inferior ao valor limite. Aqui também é sugerido um valor de 2 (duas) vezes a corrente nominal para o limite máximo de corrente na linha.

I.3. - Limites de Ângulos de Disparo.

Para evitar a operação muito próxima ao ponto de ressonância, o que pode causar instabilidade de controle, o sistema de controle deve impor alguns limites para o ângulo de disparo, para as regiões de operação capacitiva e indutiva. Para a região capacitiva, a limitação no ângulo de disparo pode ser expressa como um valor limite constante de reatância capacitiva.

I.4. - Limites de Reatância Capacitiva.

O limite máximo de reatância capacitiva é igual ao mínimo dos limites descritos anteriormente e ilustrados na figura 25. Geralmente, para baixos valores de corrente, a máxima reatância capacitiva é limitada a um valor máximo fixo devido à limitação do ângulo de disparo. Para altos valores de corrente, a tensão máxima permitida no capacitor é determinante e assim, o limite de reatância máxima é inversamente proporcional à corrente na linha.

O limite capacitivo mínimo é obtido com os tiristores bloqueados. Se a operação na região indutiva não é desejada, o valor mínimo de reatância do TCSC é igual ao limite mínimo capacitivo para operação normal (em regime). Em caso de aplicações para amortecimento de oscilações de potência, particularmente se alguma forma de estratégia de controle "bang-bang" é usada, o limite mínimo de reatância pode ser considerado igual à reatância de "bypass" (tiristores em condução total), para aumentar a faixa dinâmica de atuação do TCSC.

II. - Operação na Região Indutiva.

II.1. - Limite de Ângulo de Disparo.

A limitação no ângulo de disparo para evitar instabilidade de controle próximo à região de ressonância é expressa como um limite máximo constante de reatância indutiva.

II.2. - Limite Harmônico.

O efeito de aquecimento provocado pela circulação de correntes harmônicas deve ser considerado. O nível de harmônicos depende da corrente e do tamanho do indutor em relação ao capacitor. Esta limitação pode ser aproximada por uma tensão constante sobre o TCSC. Dividindo-se este valor de tensão pela corrente na linha, tem-se o limite de reatância devido à circulação de correntes harmônicas.

II.3. - Limite de Corrente nos Tiristores.

O valor de corrente máxima nos tiristores não pode ser excedido. Esta restrição pode ser expressa como um limite de reatância que é função da corrente na linha, do limite máximo de corrente nos tiristores e do valor nominal da reatância capacitiva (sem restrição de tensão). A corrente máxima nos tiristores é um valor específico de projeto. Para estudos de planejamento sugere-se que o limite máximo de corrente nos tiristores seja igual ao valor máximo transitório de corrente na linha, assumido como sendo 2 (duas) vezes o valor nominal da corrente na linha de transmissão.

II.4. - Limites de Reatância Indutiva.

O limite máximo de reatância indutiva é o mínimo dos limites descritos anteriormente. Para baixos valores de corrente na linha, a reatância indutiva máxima é limitada a um valor fixo devido à limitação do ângulo de disparo. Para altos valores de corrente, o efeito de aquecimento

devido a correntes harmônicas é dominante, e o limite máximo de reatância é inversamente proporcional à corrente na linha. Para valores muito altos de corrente na linha, a corrente nos tiristores pode ser o fator limitante.

A reatância indutiva mínima é a reatância de "bypass" (tiristores em condução total). Para um TCSC que não tem o modo de operação indutivo, os valores máximo e mínimo de reatância indutiva são idênticos e iguais à reatância de "bypass".

4.3. - "Thyristor Switched Series Compensation" (TSSC).

O módulo TSSC é similar ao TCSC. Entretanto, o indutor do TSSC é bem menor e os tiristores operam em apenas dois diferentes estados: bloqueados ou em condução total. Com os tiristores bloqueados, o TSSC funciona como um capacitor série convencional. Com os tiristores em condução total, o TSSC se comporta como um curto-circuito. Isto significa que a saída do TSSC é ou zero (levemente indutiva na realidade), ou o valor da reatância do capacitor. Portanto o TSSC apresenta uma saída do tipo discretizada (em degraus) e não produz correntes harmônicas. Pode-se dizer que a compensação com TSSC só opera na região capacitiva, sendo que o nível de compensação é aumentado ou reduzido em degraus.

Um esquema de compensação série controlada usando TSSC, pode ser obtido com vários módulos TSSC em série com capacitores convencionais (fixos). O tamanho do degrau na saída do TSSC é igual ao tamanho do menor módulo TSSC.

A figura 26 apresenta uma curva de capacidade de reatância típica para um módulo TSSC. Observa-se que o TSSC apresenta um valor constante de reatância capacitiva mesmo para altos valores de corrente na linha, já que o capacitor é geralmente dimensionado para esta condição operativa (tiristores bloqueados). Para o outro modo de controle, ou seja, com os tiristores em condução completa, o capacitor é "bypassado" pelo indutor de baixo valor de forma que a reatância equivalente do TSSC é praticamente nula (levemente indutiva).

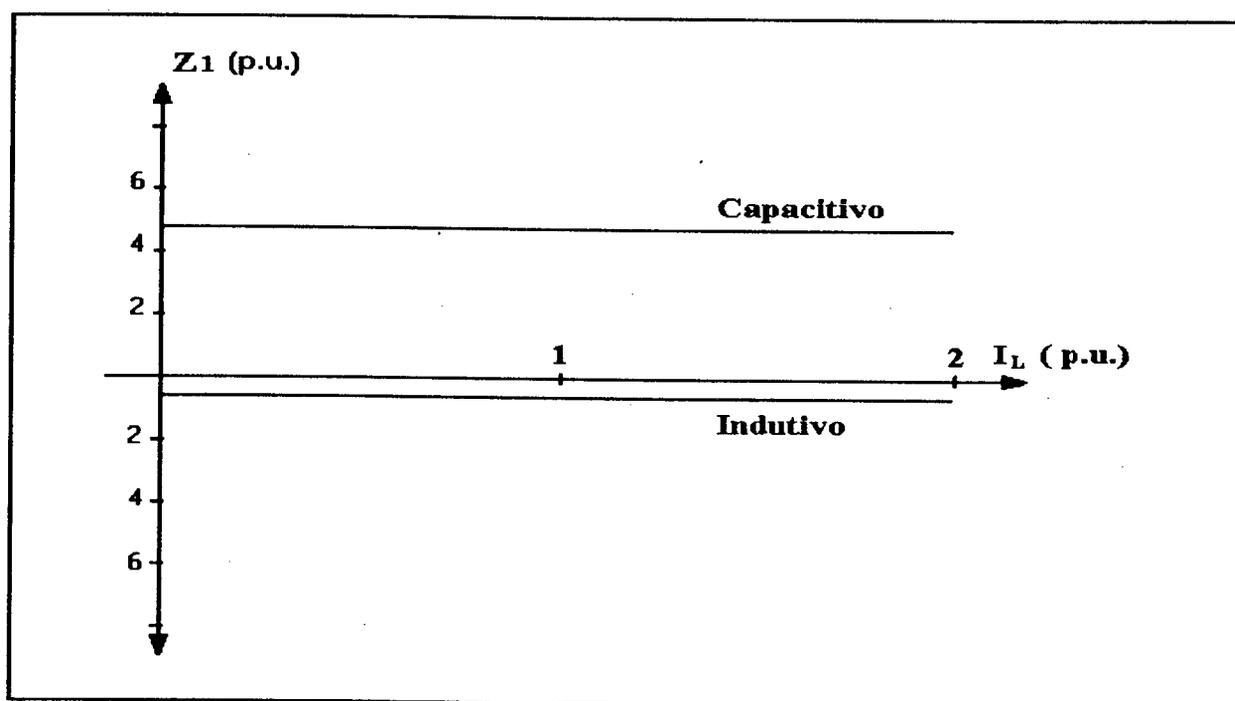


FIGURA 26 - Curva de Capacidade de Reatância do TSSC.

4.4. - Aplicações do CSC nos Sistemas Elétricos.

Conforme já dito nos itens anteriores, o CSC possibilita controlar o valor da impedância equivalente da linha de transmissão na qual o mesmo está instalado. A figura 27 apresenta a forma genérica do sistema de controle do CSC, seja este um TCSC ou um TSSC.

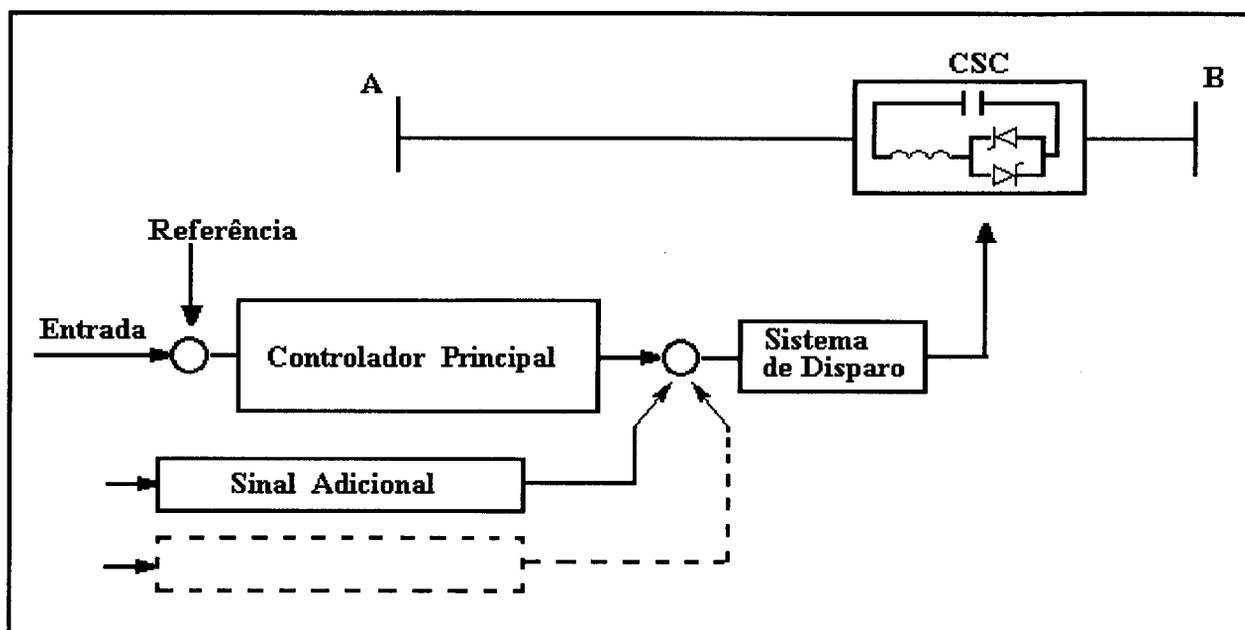


FIGURA 27 - Configuração Genérica do CSC.

Em função da lógica de controle empregada, o CSC pode ser usado de forma a atender vários requisitos operativos do sistema de potência. Estas aplicações, que serão discutidas a seguir, definem os possíveis modos de controle para o TCSC e o TSSC. As características dos controladores (controlador principal e sinais adicionais) e a modelagem dos mesmos serão discutidos no Capítulo seguinte.

4.4.1. - Controle de Fluxo de Potência.

Neste modo de controle, o fluxo de potência em regime permanente, em caminhos paralelos de transmissão, pode ser controlado. Uma das possibilidades é forçar a linha compensada a absorver toda a variação de despacho de potência dos geradores. Esta filosofia de operação é conhecida por estratégia de "ângulo constante", já que o fluxo de potência nas linhas paralelas e de impedâncias fixas é mantido constante[14].

Outra estratégia é o uso do TCSC para controlar o fluxo de potência ou a corrente na linha compensada pelo mesmo. Pode-se também pensar em uma estratégia que, na medida do possível, faça com que a potência flua por caminhos preferenciais de forma a reduzir as perdas globais do sistema de transmissão.

Uma vez que para atender ao requisito de controle de potência não é necessária uma variação contínua da reatância da linha de transmissão, tanto o TCSC quanto o TSSC podem ser usados para este fim.

4.4.2. - Aumento da Capacidade de Transporte de Energia.

O CSC pode também ser utilizado para aumentar os limites de estabilidade eletromecânica de um sistema de potência e, em consequência, aumentar a capacidade de transmissão de energia do mesmo.

A estabilidade eletromecânica de sistemas de potência em resposta a grandes perturbações é geralmente tratada como dois problemas distintos. A estabilidade transitória ou de primeiro "swing" trata da recuperação do sistema durante o primeiro "swing". O amortecimento das oscilações subsequentes é o segundo aspecto e é comumente conhecido por estabilidade oscilatória.

Para melhorar a estabilidade transitória é necessário aumentar a potência de sincronização do sistema. Uma maneira consiste em adotar, em regime permanente, o nível máximo possível de compensação série, para minimizar o ângulo de potência ao longo dos sistema de transmissão.

Entretanto, isto nem sempre é viável devido aos requisitos de controle de tensão em regime permanente. Assim, pode ser essencial ter uma parte da compensação desligada durante condições normais, para ser introduzida durante contingências no sistema.

Para aumentar o amortecimento, a reatância da linha deve ser modulada em função das oscilações eletromecânicas do sistema, caracterizadas geralmente por frequências de oscilação situadas dentro de uma faixa que vai de 0,2 a 2,0 Hz. Isto pode ser feito via um controlador, atuando como sinal adicional no sistema de controle do CSC, propriamente projetado para este fim. A entrada deste sinal adicional deve ser uma grandeza elétrica que reflita as oscilações eletromecânicas do sistema, como por exemplo o fluxo de potência ou a corrente na linha, a frequência, etc. O CSC deve ser ajustado para fornecer a correta relação de ganho e fase entre a saída e a entrada, de forma a propiciar amortecimento para o sistema de potência para a faixa de frequência de interesse.

Como a atuação do CSC se processa via a variação da reatância aparente da linha e não através da variação das tensões de barra, pode-se dizer que ele é virtualmente insensível às características da carga. Mais ainda, o CSC é mais efetivo justamente na condição de alto carregamento da linha compensada. Por outro lado, a capacidade do CSC para amortecer oscilações de potência decresce quando a linha compensada é paralelizada por linhas de transmissão mais fortes (com maior capacidade de transporte de energia elétrica). O montante de compensação que deve ser modulada é, naturalmente, dependente de cada sistema, porém os estudos até então realizados sinalizam para valores próximos a +/- 10% da compensação série total [15].

4.4.3. - Mitigação de Ressonância Subsíncrona.

A compensação série fixa tem possibilitado às empresas aumentar de forma econômica a capacidade de transmissão de energia de seus sistemas de potência. Todavia, apesar deste incentivo econômico, o nível de compensação série instalada tem sido tradicionalmente limitado a valores inferiores a 70%, devido principalmente ao seu potencial para introduzir, sob certas condições especiais, oscilações entre a rede elétrica e os sistemas torsionais das unidades geradoras.

Este fenômeno é conhecido por Ressonância Subsíncrona (RSS) e é caracterizado por um lento crescimento da troca de energia que se estabelece entre os capacitores série e os sistemas torsionais (eixos) dos geradores mais próximos. Para determinadas condições de sistema, a frequência natural de oscilação da energia armazenada no capacitor série pode coincidir com um dos modos de oscilação do sistema torsional dos geradores, e dessa forma, fazer com que a troca de energia entre os sistemas mecânico e elétrico seja amplificada (não amortecida). As frequências de oscilação típicas de RSS situam-se entre 5 e 45 Hz. Uma descrição mais detalhada deste fenômeno é apresentada no Apêndice B deste trabalho.

O TCSC, por ser um elemento ativo e com alta velocidade de resposta, tem a capacidade de controlar esta referida troca de energia entre o capacitor série e os eixos dos geradores, e assim, possibilitar a utilização de níveis de compensação série bem acima daqueles usados atualmente. Na realidade, o limite máximo de compensação passa a inexistir, podendo-se admitir que a linha seja compensada em até 100% de sua reatância indutiva.

Duas formas de mitigação de RSS usando TCSC são possíveis. A primeira delas consiste em projetar um controlador ativo que estime as oscilações subsíncronas presentes no sistema e então passe a controlar a tensão sobre o capacitor série de forma a introduzir nos geradores um torque elétrico que se oponha à amplificação das oscilações. Trata-se portanto de mais um sinal adicional aplicado ao controlador principal do CSC, neste caso um TCSC.

A figura 28 ilustra uma configuração genérica de um TCSC e seu respectivo sistema de controle, contemplando um controlador principal para controle de fluxo de potência e dois sinais adicionais para amortecimento de oscilações eletromecânicas e RSS.

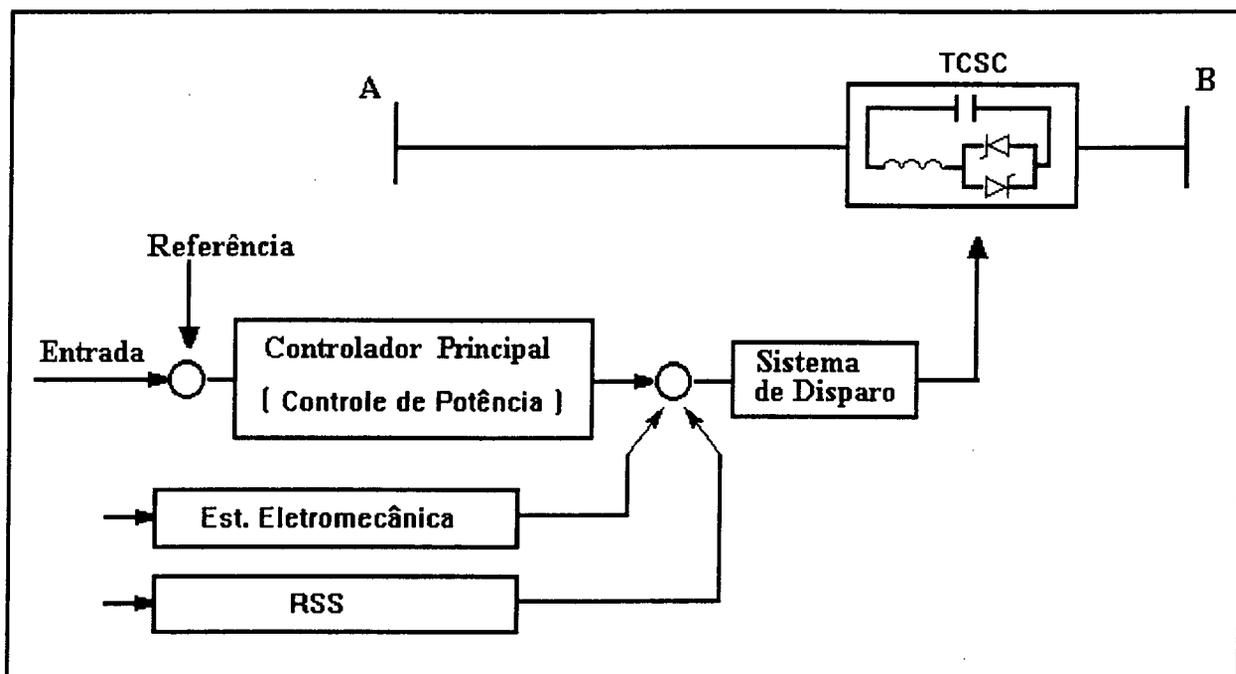


FIGURA 28 - TCSC com sistema de controle genérico.

A outra estratégia de mitigação de RSS consiste em projetar o sistema de disparo das válvulas do TCSC de forma que a sua impedância equivalente se torne resistiva-indutiva para a faixa de frequências

típicas de RSS, prevenindo assim, qualquer tipo de interação entre o capacitor série e o sistema torsional das unidades geradoras.

A figura 29 apresenta esquematicamente esta estratégia de mitigação de RSS e a figura 30 apresenta a característica de reatância do TCSC em função da frequência. Esta figura indica também a característica de reatância para um capacitor fixo. É importante notar que o TCSC apresenta reatância indutiva em toda a faixa de frequências subsíncronas (5 a 45 Hz), enquanto que o capacitor fixo tem, obviamente, uma reatância capacitiva para qualquer valor de frequência.

Nas proximidades da frequência nominal, o TCSC se comporta como um capacitor puro variável (reatância capacitiva variável) e pode então ser usado para os objetivos de controle de potência e de melhoria da estabilidade eletromecânica do sistema.

Esta segunda estratégia de mitigação de RSS oferece maior robustez diante de variações das condições de sistema, em comparação com a primeira proposição (controlador ativo). Esta, por sua vez, apresenta o potencial para amortecer RSS causada não apenas pelo próprio TCSC, mas também por outra compensação série convencional que porventura exista em suas proximidades.

É importante mencionar que o TSSC não pode ser usado para amortecer RSS, dada às suas características operativas descritas anteriormente, ou seja, variação discreta da reatância da linha e com velocidade de resposta incompatível com a que é exigida pelas frequências subsíncronas (5 a 45 Hz).

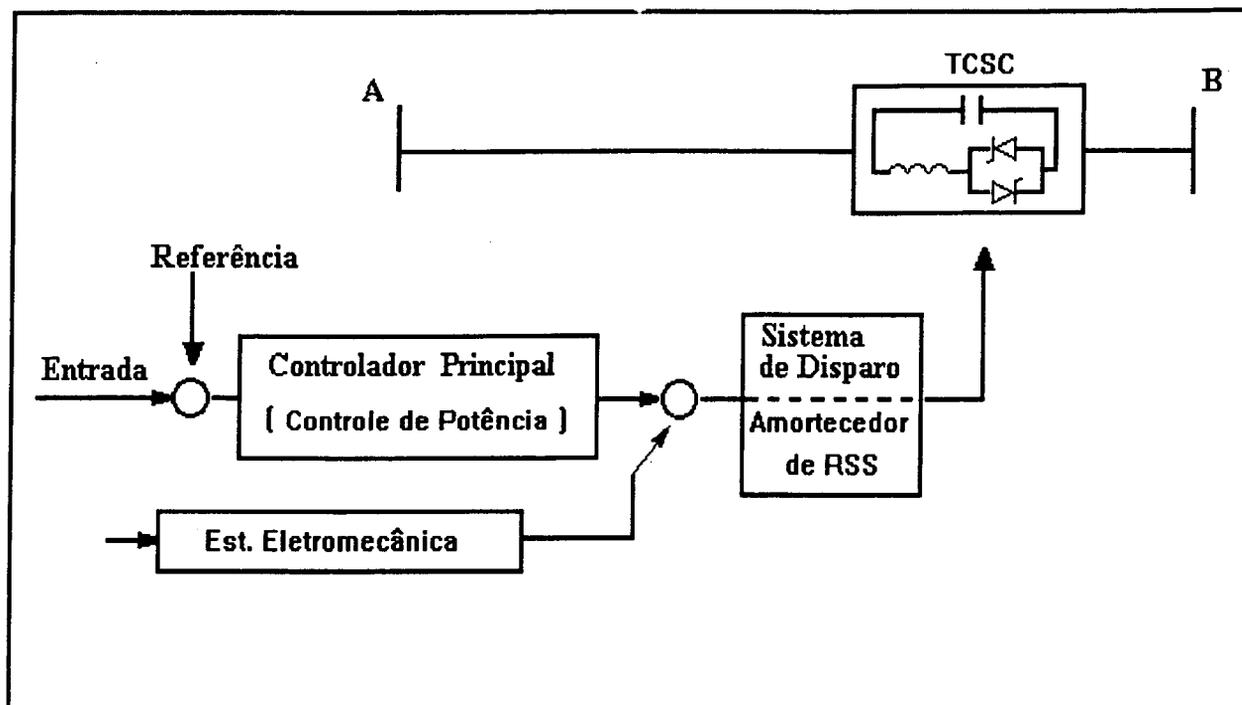


FIGURA 29 - TCSC com Amortecedor de RSS no Sistema de Disparo.

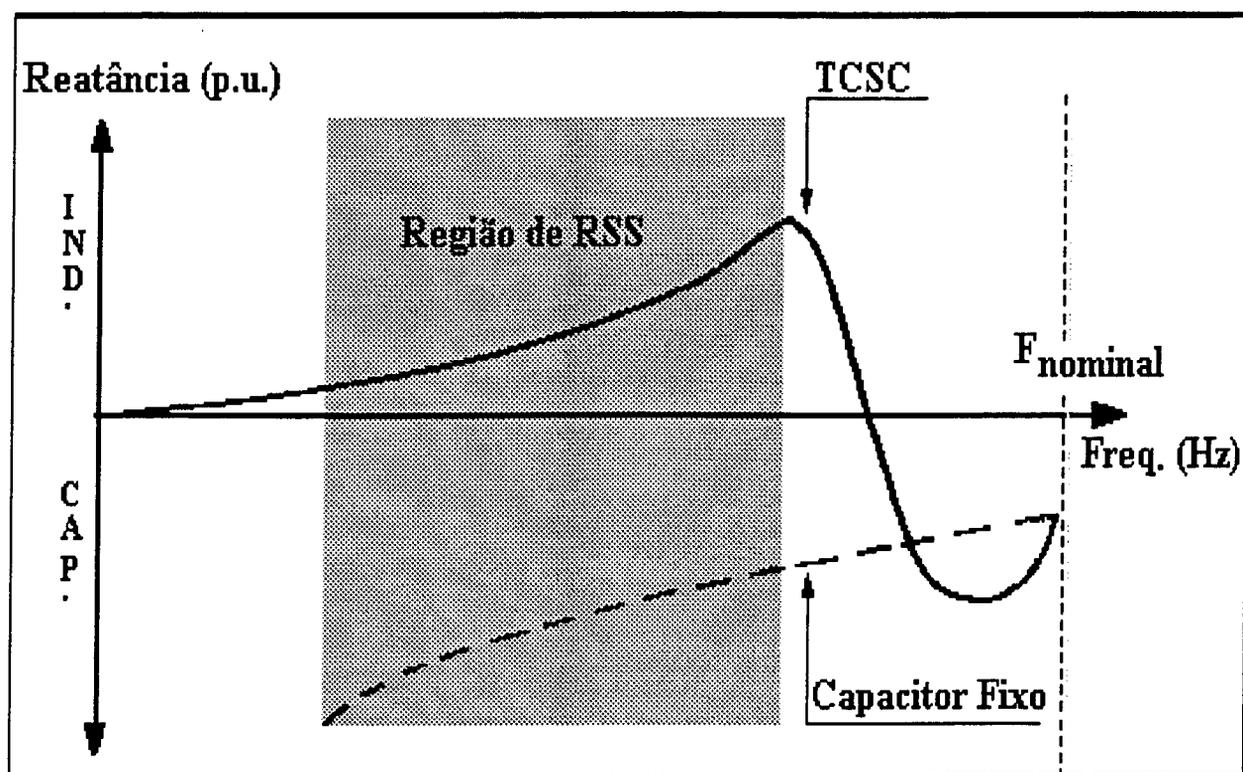


FIGURA 30 - Reatância do TCSC em função da frequência.

4.5. - Estado da Arte.

O Compensador Série Controlado (CSC) vem se constituindo no primeiro equipamento da nova geração de dispositivos com tecnologia FACTS a estar disponível comercialmente. Atualmente três equipamentos já se encontram em operação. São eles :

- ✓ Projeto EPRI-BPA-GE
- ✓ Projeto SIEMENS-WAPA
- ✓ Projeto ABB-AEP

O CSC está sendo desenvolvido independentemente por grandes fabricantes de equipamentos elétricos (ABB, GE e SIEMENS) e pelo EPRI. Consequentemente, cada um dos três desenvolvimentos apresenta características próprias que precisam ser levadas em consideração nos diversos tipos de modelo.

4.5.1. - Projeto SIEMENS/WAPA.

O projeto conjunto SIEMENS/WAPA (Western Area Power Administration)[16], localiza-se na subestação de Kayenta (WAPA - EUA). Esta subestação faz parte da conexão de 230 kV entre Glen Canyon e Shiprock, e foi construída em 1964 para transmitir aproximadamente 300 MW de potência.

A construção de outras linhas de transmissão, que criaram caminhos paralelos com a conexão Glen Canyon - Shiprock, bem como o aumento de carga no Sudoeste dos EUA, foram fatores que levaram à tentativa de

aplicação de tecnologia FACTS para obter um melhor desempenho da referida conexão. Os estudos realizados concluíram pela instalação de dois bancos de capacitores, de 165 MVar cada, em série com a linha de transmissão. A figura 31 apresenta um diagrama unifilar simplificado do sistema. Cada banco de 165 MVar possui uma reatância de 55Ω por fase e admite uma corrente nominal de 1000 A.

Estes bancos de capacitores estão equipados com Varistores de Óxido-Metálico (MOV) para limitar a tensão sobre os capacitores série durante condições de falha. Para proteção da instalação e para evitar sobrecargas nos MOV's, são colocados disjuntores de "bypass" para cada banco.

O banco situado no trecho Kayenta-Shiprock está dividido em duas partes, uma de 40Ω e outra de 15Ω , para permitir a adição de um Reator Controlado por Tiristor (RCT) em paralelo com a reatância capacitiva de 15Ω . Este RCT caracteriza esta instalação como sendo uma solução do tipo FACTS.

Este equipamento pode operar tanto de maneira discreta como contínua, sendo portanto um compensador tipo TCSC. Dois modos de controle contínuo são previstos para o compensador; controle de impedância e controle de corrente ou potência. No modo de controle de impedância constante, o ângulo de disparo é determinado para fornecer o valor de impedância série desejada. No modo de corrente ou potência constante, a impedância do compensador é ajustada para manter a corrente ou potência na interligação no valor desejado. Entretanto, nestes dois modos de operação, o compensador opera apenas com impedâncias capacitivas, sendo o ângulo de disparo limitado a valores entre 180

graus e o ângulo em que ocorre a primeira ressonância (142 graus neste projeto).

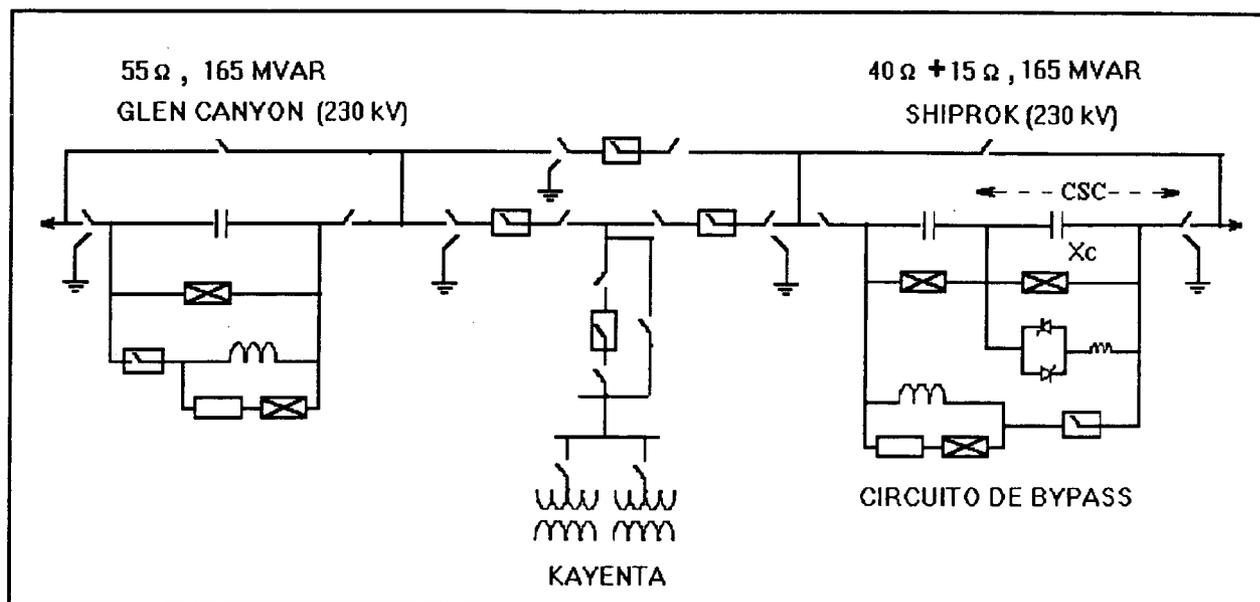


FIGURA 31 - Projeto SIEMENS/WAPA - Diag. unifilar simplificado.

No caso de faltas, pode ser desejável a operação do compensador como indutor. Para isto, está previsto o modo de controle "bang-bang", no qual a válvula permanece totalmente em condução. No Apêndice A deste trabalho são apresentadas simulações de transitórios eletromagnéticos no programa ATP com o modelo do CSC desenvolvido pela SIEMENS.

4.5.2 - Projeto ABB/AEP.

O trabalho de pesquisa conjunto entre a ASEA Brown Boveri e a AEP (American Electric Power Service Corporation), na área de FACTS, teve início em 1986 e conduziu à montagem de um esquema de compensação série na linha de 345 kV entre Kanawha River e Funk, na Virgínia, EUA [17].

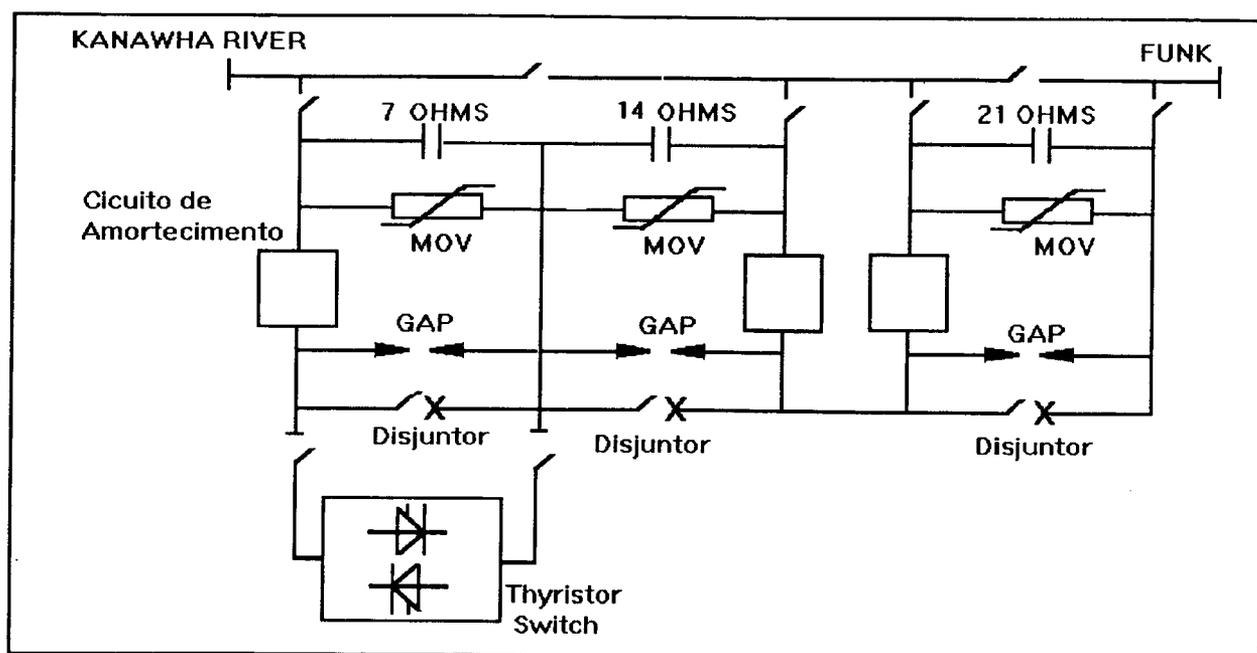


FIGURA 32 - Projeto ABB/AEP - Diagrama unifilar simplificado.

O objetivo da compensação é de aumentar a capacidade de transmissão da linha, que estava limitada em aproximadamente 950 MW. A compensação série proposta está mostrada na figura 32. Ela corresponde a uma compensação de aproximadamente 60 % da reatância indutiva da linha e tem ao todo 788 MVar, com capacidade de 2500 A. A compensação está dividida em três segmentos de capacitores; um de 131 MVar (10 %), um de 263 MVar (20 %) e um de 394 MVar (30 %).

Este equipamento se caracteriza pelo chaveamento eletrônico de parte do banco de capacitores série por válvulas tiristorizadas. No entanto, o restante do banco continua sendo chaveado por disjuntores. Por isso, o reator ligado em série com a válvula é o menor possível e sua função é de limitar a corrente na válvula durante o chaveamento do banco. Conseqüentemente, este compensador só opera de forma discreta através de um controle liga-desliga, sendo portanto um compensador tipo TSSC. Tal esquema oferece a vantagem de resposta rápida, livre de geração de harmônicos e de desgastes mecânicos.

Para limitar sobretensões nos capacitores, o compensador é também equipado com Varistores de Óxido-Metálico (MOV). Além disso, em paralelo com a chave de tiristores, dispõe-se de um contato metálico "on-off" de ultra-alta-velocidade (UHSC), desenvolvido recentemente nos EUA. Este dispositivo permite reduzir as perdas de condução dos tiristores durante longos períodos no estado "on".

4.5.3. - Projeto EPRI-GE-BPA (Bonneville Power Administration).

Este equipamento, apresentado na figura 33, pode ser considerado uma versão intermediária dos dois sistemas anteriores. Possui seis módulos iguais ligados em série e pode trabalhar tanto de maneira discreta como de maneira contínua, tendo seu reator um valor intermediário em relação aos reatores dos dois projetos anteriores. Apesar de ser um compensador do tipo TCSC, porque permite a variação contínua do nível de compensação, o seu modo preferencial de controle é o discreto [4].

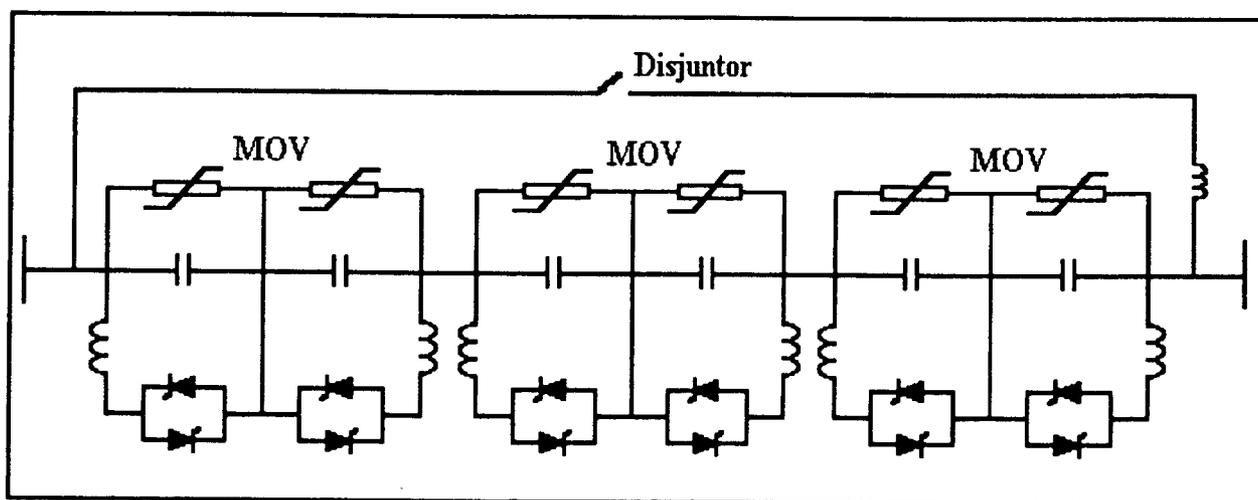


FIGURA 33 - Projeto EPRI-GE-BPA - Diagrama unifilar simplificado.

4.6. - Conclusões.

Da discussão sobre o CSC apresentada neste Capítulo extraem-se os seguintes tópicos relevantes:

- a) O TCSC é constituído de um capacitor fixo em paralelo com um RCT. Com os tiristores bloqueados (ou $\alpha = 180^\circ$), o TCSC se comporta como um capacitor fixo. Com os tiristores conduzindo continuamente (ou $\alpha = 90^\circ$), o TCSC se comporta como um indutor de pequeno valor (modo "bypassado"). Controlando-se o ângulo α entre 90° e 180° , pode-se variar continuamente a impedância do TCSC tanto na direção indutiva quanto na direção capacitiva, sendo que neste modo operativo há geração de componentes harmônicas.
- b) A região operativa do TCSC, ou seja, a sua capacidade real de reatância, é determinada a partir dos limites máximos de tensão no capacitor, da corrente máxima nos tiristores, dos limites de ângulos de disparo e do limite de aquecimento harmônico, conforme ilustra a figura 25. Ressalta-se a existência de um "gap" na transição entre as faixas indutiva e capacitiva. Este "gap" pode ser reduzido com um esquema multimodular de compensação (vários módulos TCSC em série).
- c) O TSSC tem estrutura semelhante à do TCSC. Entretanto o indutor do RCT é bem menor (muito próximo de zero). Neste dispositivo, os tiristores só operam em dois estados: bloqueados ou em condução contínua ($\alpha = 90^\circ$), que é o modo "bypassado". Dessa forma a variação da reatância só ocorre de forma discretizada (em degraus) e só assume valores capacitivos. Como não há descontinuidade na

condução de corrente pela válvula, o TSSC não gera componentes harmônicas. A curva de capacidade de reatância do TSSC é apresentada na figura 26.

d) As possibilidades de aplicação do CSC nos sistemas elétricos são sumarizadas no quadro 2 abaixo:

	TCSC	TSSC
CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA	↑	↑
ESTABILIDADE - AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO	↑	↑
RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA	↑	↓
LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO	↑	↓

QUADRO 2 - Aplicações do CSC em sistemas elétricos: ↑ - aplica-se, ↓ - não se aplica.

Uma vez determinadas as características operativas e as possibilidades de aplicação do CSC, torna-se natural pensar na proposição de modelos para o TCSC e o TSSC que possam ser implementados e usados em programas digitais para análise de sistemas de potência. O Capítulo seguinte se dedica a esta tarefa.

5. - MODELAGEM DO COMPENSADOR SÉRIE CONTROLADO EM PROGRAMAS DIGITAIS DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA.

5.1. - Introdução.

Estudos de sistemas elétricos que contemplam a aplicação de Compensadores Série Controlados ou de qualquer outro dispositivo FACTS exigem, obviamente, uma adequada representação destes equipamentos nas diferentes ferramentas de estudo. Este Capítulo se dedica à proposição de modelos genéricos do CSC que possam ser utilizados em estudos de fluxo de potência e de estabilidade eletromecânica via simulação não linear no tempo e também via análise linear no domínio da frequência. Adicionalmente serão feitas algumas considerações sobre a modelagem para estudos de transitórios eletromagnéticos.

O Compensador Série Controlável pode ser dividido em duas partes básicas: a porção conectada diretamente ao sistema de potência, ou seja, o banco de capacitores propriamente dito juntamente com o braço paralelo do reator em série com a válvula, e a parte referente ao sistema de controle, e portanto, de baixa potência.

Apesar dos três protótipos apresentados anteriormente possuírem características distintas, o esquema do Capacitor Série Controlado mostrado na figura 27 atende à função básica dos equipamentos descritos, que é a variação de sua impedância mediante ação do controle sobre a válvula, para cumprir objetivos predeterminados.

A figura 34 apresenta uma estrutura genérica do modelo do CSC que pode ser implementado em programas de fluxo de potência, estabilidade eletromecânica ou mesmo em um programa de transitórios eletromagnéticos.

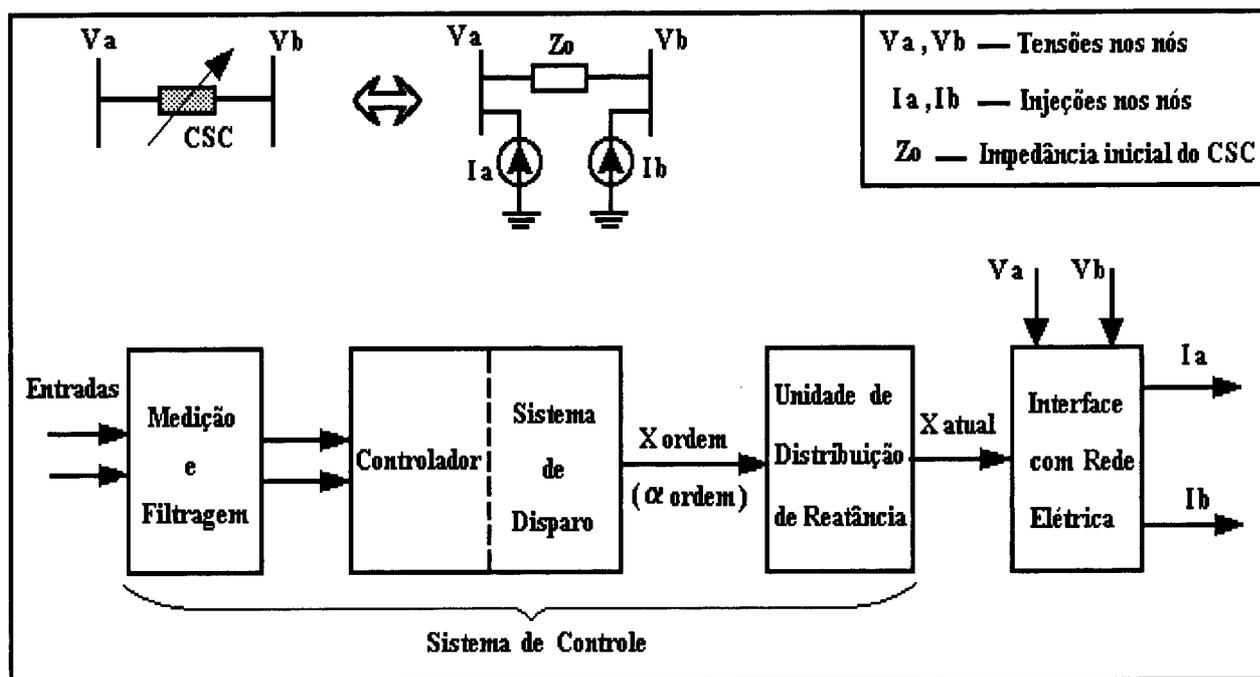


FIGURA 34 - Modelo genérico de simulação do CSC.

Este modelo consiste de quatro blocos principais. O sistema de medição e filtragem fornece as entradas necessárias para o controlador. O controlador do CSC, incluindo o sistema de disparo, contém as funções de transferência do modelo. A saída deste bloco é o valor desejado para a reatância do CSC (X_{ordem}). Esta ordem de reatância é transmitida para a unidade de limitação de reatância que determina o valor possível para a saída do CSC (X_{atual}) em função dos diversos limites operativos discutidos no Capítulo anterior. Finalmente, a saída da unidade de limitação (X_{atual}) é levada ao modelo da rede elétrica onde, utilizando-se as tensões dos nós, são determinados os correspondentes valores das correntes que são, então, injetadas nos nós da rede.

A incorporação destas idéias em cada uma das ferramentas de análise exige considerações específicas, relacionadas ao detalhamento na representação dos diversos componentes do equipamento em questão. Outro aspecto a ser destacado é a falta de documentação disponível a respeito do esquema de controle adotado nos protótipos anteriormente apresentados. Conseqüentemente, tornou-se necessário um trabalho de desenvolvimento deste sistema de controle. De qualquer forma, os modelos a serem apresentados devem ser suficientemente flexíveis para representar diferentes filosofias de controle.

O bloco "interface com rede elétrica" da figura 34 não será objeto de análise deste trabalho. Isto porque não constitui objetivo deste trabalho fazer alterações nos programas atualmente em uso no setor elétrico, visto que isto demandaria um esforço extra considerável, além do que esta tarefa já está sendo desenvolvida por outras empresas, como o CEPTEL. Além disso, os programas atuais de análise de sistemas de potência dispõem de rotinas que permitem ao usuário modelar os mais diversos equipamentos e seus sistemas de controle, usando linguagem de alto nível. Os modelos aqui propostos seguem esta filosofia, ou seja, podem ser facilmente incorporados aos programas de análise, dispensando alterações na estrutura dos mesmos.

5.2. - Programa de Fluxo de Potência.

Para o programa de fluxo de potência, a seção de potência pode ser tratada simplesmente como uma impedância variável a 60 Hz. O sistema de controle não precisa ser detalhado, mas tão somente simular o seu estado final, qual seja, o de manter inalterado o valor da grandeza

elétrica controlada, dependendo do modo de controle desejado. Na eventualidade de ser atingido algum limite da faixa de operação do Capacitor Série Controlado, este limite deverá ser fixado e, em consequência, o objetivo do controle não será atingido.

A idéia da modelagem no programa de fluxo de potência consiste em possibilitar a representação de ligações CA controladas, algo bastante similar à modelagem de ligações CC.

A princípio, três modos de controle seriam suficientes:

- 1 - controle de impedância;**
- 2 - controle de potência;**
- 3 - controle de corrente.**

A representação do modelo com controle de impedância é trivial e requer apenas a informação do valor desejado de impedância da linha compensada. É exatamente a mesma representação de compensação série fixa. Já os outros dois modelos exigem uma modelagem específica. O programa deve ser capaz de obter, através de um processo iterativo, o valor da impedância do CSC, necessário para manter constante e igual ao valor especificado, o fluxo de potência ou corrente na linha.

A figura 35 ilustra a implementação deste modelo, indicando as informações necessárias para a sua representação. É importante observar que, no caso de um sistema malhado, pode-se adotar a filosofia de controlar o fluxo de potência ou a corrente nas linhas paralelas à linha compensada. Isto justifica a necessidade de informar não só o circuito compensado mas também o circuito controlado.

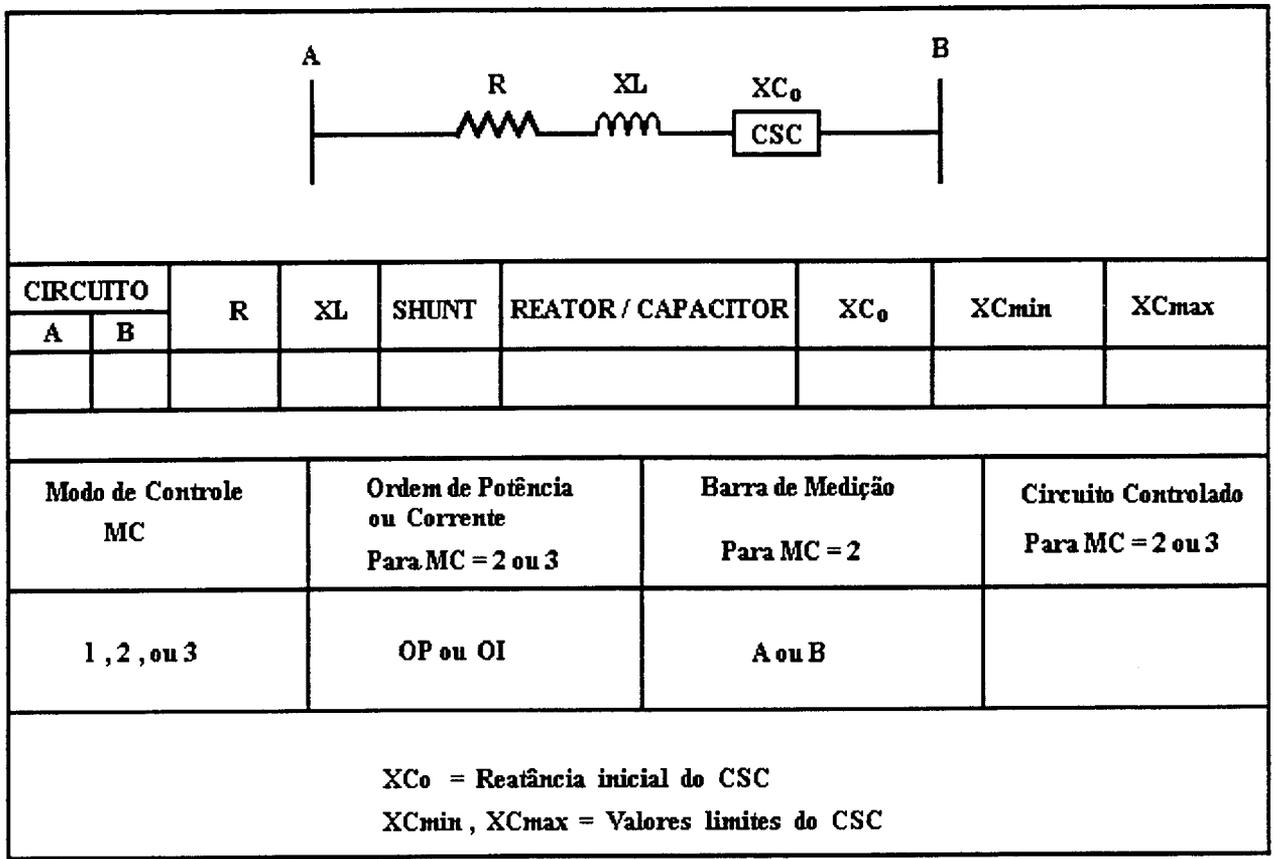


FIGURA 35 - Ilustração do modelo de CSC para fluxo de potência.

5.3. - Programa de Estabilidade Eletromecânica.

A análise de estabilidade eletromecânica de sistemas elétricos de potência visa essencialmente verificar a manutenção ou não do sincronismo entre as máquinas síncronas do sistema, para uma dada condição de operação inicial e um distúrbio ou mesmo uma seqüência de distúrbios especificados.

Os métodos de análise de estabilidade eletromecânica descritos na literatura especializada podem ser classificados em 3 (três) grupos: Métodos Diretos, Métodos Híbridos e Métodos Numéricos [18].

Os Métodos Diretos têm como objetivo principal a realização do diagnóstico da estabilidade do sistema de potência sem precisar resolver as equações diferenciais não-lineares que representam o seu comportamento dinâmico. Como exemplo, pode ser citado o Método Direto de Lyapunov.

Os Métodos Híbridos são aqueles que utilizam um certo método direto, como a função de Lyapunov e, além disso, determinam, ainda que via uma metodologia simplificada, a trajetória dos estados do sistema (trajetória assumida pelos ângulos e desvios de velocidade dos rotores).

Os Métodos Numéricos realizam a integração numérica das equações diferenciais não-lineares do sistema e o diagnóstico da estabilidade é realizado a partir da análise visual do comportamento das curvas dos ângulos dos rotores das máquinas síncronas em função do tempo.

Foge aos objetivos deste trabalho a utilização dos Métodos Diretos ou Híbridos. Dessa forma, a modelagem do Compensador Série Controlado será discutida e direcionada visando sua implementação em programas de simulação numérica.

No programa de estabilidade eletromecânica, a seção de potência do CSC é modelada como uma impedância variável (a 60 Hz) no domínio do tempo. Já o sistema de controle, responsável pela variação da impedância, tem que ser representado de forma detalhada, considerando-se todas as malhas de controle cujas constantes de tempo sejam relevantes no escopo da análise da estabilidade eletromecânica (por exemplo: acima de 10 ms).

Para efeito de análise e modelagem, o sistema de controle do CSC mostrado na figura 34 pode ser dividido em quatro partes distintas:

- . **Sistema de Medição;**
- . **Controlador;**
- . **Sistema de Disparo;**
- . **Unidade de Distribuição de Reatância.**

Os três primeiros componentes formam a parte do sistema de controle do CSC que vale tanto para o TCSC como para o TSSC. O elemento responsável pela distinção no comportamento entre estes dois compensadores é a unidade de distribuição de reatância. A seguir, estes quatro componentes serão discutidos individualmente a fim de se detectar a melhor forma de modelá-los de maneira simples e correta para efeito de simulações dinâmicas à frequência industrial.

É importante lembrar que os programas de estabilidade representam a rede em valores por unidade das grandezas eficazes e somente em seqüência positiva. Desta forma, as grandezas apresentadas devem estar em p.u., as constantes de tempo em segundos, e os ganhos em p.u. da grandeza de saída por p.u. da grandeza de entrada do modelo.

5.3.1. - Sistema de Medição.

O sistema de medição recebe sinais de tensão das barras terminais do Compensador e da corrente na linha, através de enrolamentos secundários de transformadores de potencial e de corrente. A partir daí, estes sinais são retificados, amplificados e filtrados, normalmente via

um filtro passa-baixa, dando origem a um sinal contínuo que se constitui na entrada que é realmente vista pelo controlador.

Verifica-se, portanto, um atraso de tempo entre o sinal contínuo recebido pelo controlador e a grandeza medida, devido ao tratamento que é dado a este sinal (retificação e filtragem, principalmente). A representação deste efeito, para modelagem em diagramas de blocos, pode ser feita por um pólo com constante de tempo T_m , como mostra a figura 36. O valor de T_m para os modernos sistemas de medição gira em torno de 10 ms e pode, inclusive, ser desprezado, dependendo dos objetivos da simulação.

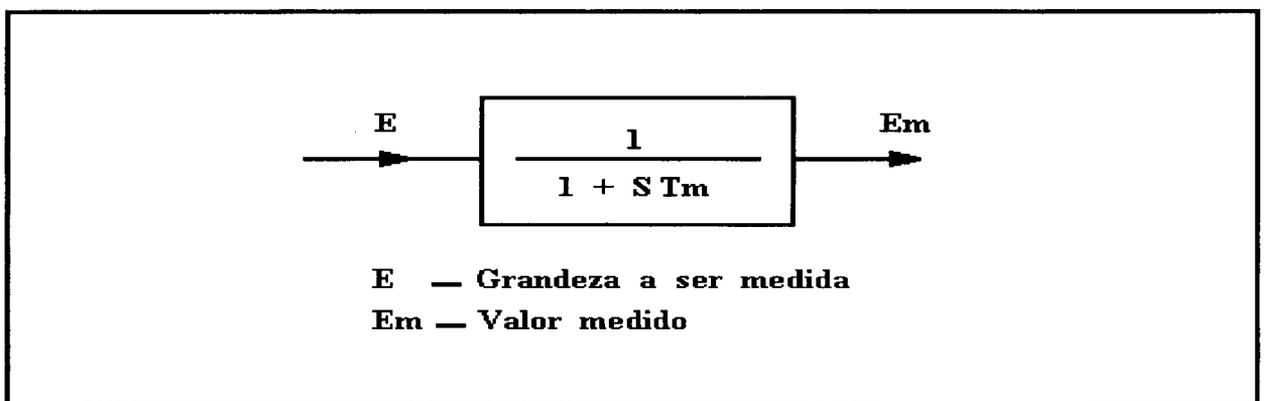


FIGURA 36 - Representação do sistema de medição.

5.3.2. - Controlador.

Para o objetivo deste item, ou seja, obtenção de modelos do Compensador Série Controlado para simulações dinâmicas à frequência industrial, o controlador se constitui, sem dúvida alguma, no quesito de maior interesse. É ele quem determina o desempenho do CSC frente às mais diversas perturbações no sistema elétrico e é nele que se encontram os parâmetros passíveis de ajuste.

A função básica do controlador é a de trabalhar o sinal de entrada, impondo-lhe as características dinâmicas necessárias para atender os objetivos do sistema de controle. Ele tem como saída o sinal que efetivamente comandará o disparo dos tiristores. Dessa forma, o projeto do controlador é fortemente dependente do propósito a ser atingido pelo CSC.

Este trabalho propõe a utilização de um controlador genérico que seja flexível o bastante para representar os três possíveis modos de controle já mencionados, ou sejam, controle de impedância, controle de potência e controle de corrente, além de suportar um sinal adicional para amortecimento de oscilações de potência. A figura 37 apresenta o controlador proposto.

O modo de controle de impedância é realizado em malha aberta (sem realimentação), tomando-se o valor da reatância da solução do fluxo de potência como sendo a referência de reatância (X_{ref}). No modelo da figura 37 esta representação é obtida com a chave C1 colocada na posição 1.

Para os modos de controle de potência e corrente é natural se pensar no projeto de um controlador com erro de regime nulo, como um P.I. (Proporcional Integral) ou mesmo um P.I.D. (Proporcional Integral Derivativo). O P.I. é um controlador de estrutura mais simples e será adotado neste trabalho. A variável " Y_{ref} " representa a referência de potência ou corrente e " Y_m " é a saída do sistema de medição e corresponde ao valor medido da potência ou corrente atual do subsistema elétrico controlado.

Como o objetivo é a regulação de potência ou corrente em regime permanente, este controlador é normalmente ajustado para apresentar resposta lenta. Este fato justifica a introdução do sinal adicional no terceiro comparador do modelo, ou seja, na saída do regulador de potência ou corrente.

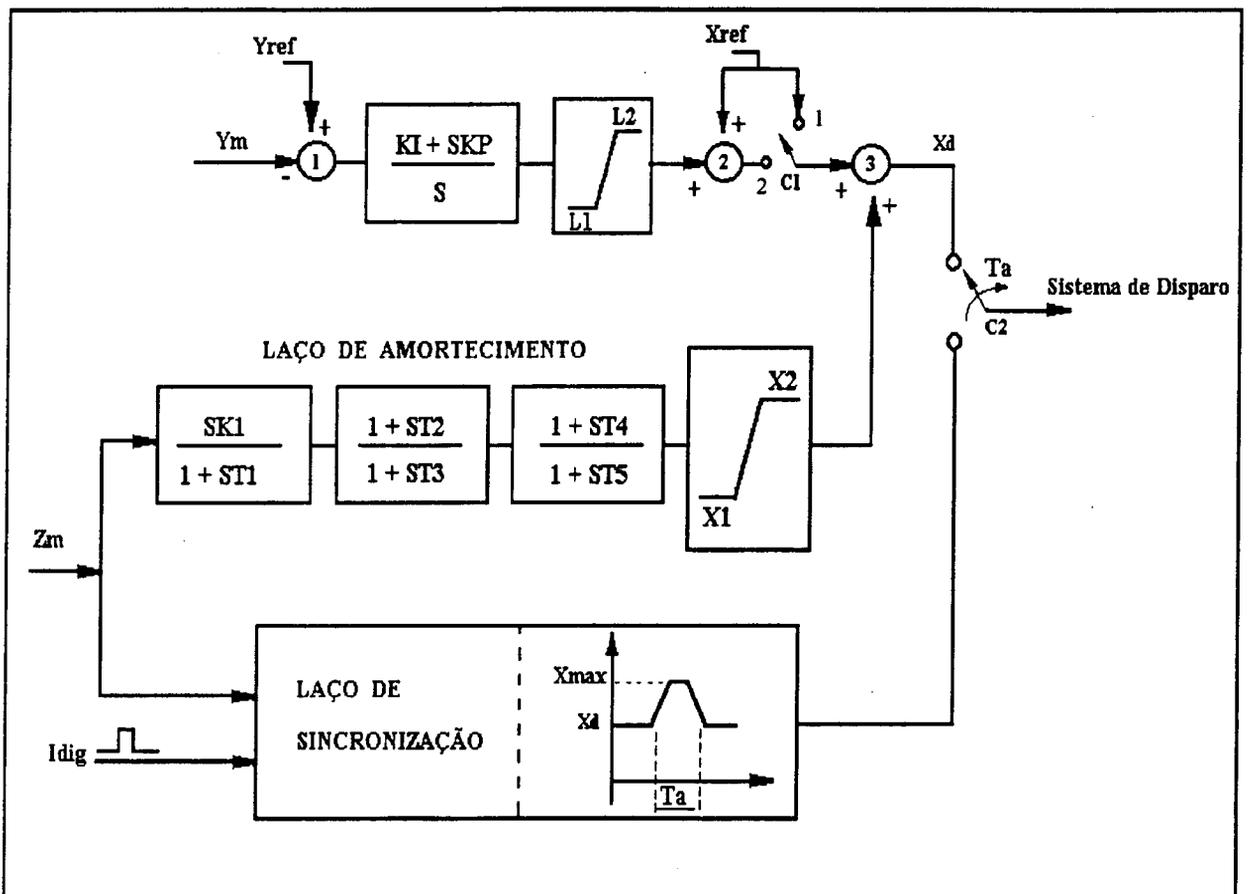


FIGURA 37 - Proposição de Controlador Genérico para o CSC.

Nota-se na figura 37 que todas as modalidades de controle suportam um sinal adicional para amortecimento de oscilações de potência. O estabilizador proposto neste trabalho visa aumentar os limites de estabilidade transitória (primeiro "swing") e dinâmica do sistema.

Neste sentido, após a ocorrência de um distúrbio no sistema, reconhecido pela entrada "Idig", o "laço de sincronização" atua

rapidamente, impondo o nível máximo de compensação série durante o período de tempo ajustável " T_a ". Esta ação aumenta a potência de sincronização do sistema ajudando sua recuperação durante o primeiro "swing". Em seguida, o controle é suavemente transferido para o "laço de amortecimento", responsável pelo amortecimento das oscilações subseqüentes.

Deve ser observado que o estabilizador não tem como objetivo manter constante uma determinada grandeza. Seu objetivo é fornecer uma característica dinâmica ao sinal de entrada, com uma determinada relação de ganho e fase para uma faixa de frequência de interesse (por exemplo: de 0.2 a 4.0 Hz). Isto é obtido através de dois blocos de avanço-atraso ("lead-lag").

Por outro lado, na maioria das aplicações o valor final da impedância deverá permanecer inalterado (igual ao valor de regime pré-falta). Isto justifica a existência de uma função derivativa na entrada do estabilizador (bloco "wash out"). Além disso, esta função evita a atuação indevida do controle em resposta a flutuações lentas do fluxo de potência na linha durante variações de carga.

A escolha do sinal de entrada " Z_m " fica a critério do projetista, mas muito provavelmente recairá sobre uma, ou mesmo a combinação das quatro seguintes alternativas:

- . **potência ativa na linha;**
- . **corrente na linha;**
- . **frequência de uma das barras terminais da linha;**
- . **defasagem angular entre as barras terminais da linha.**

É interessante notar a semelhança entre este controlador e um PSS (sinal estabilizador de potência), tanto no que tange à sua função quanto à sua estrutura. De fato, este controlador nada mais é que um sinal adicional nos mesmos moldes daqueles encontrados em elos de corrente contínua, onde a potência CC é modulada de forma a amortecer oscilações do sistema integrado CA/CC.

Vale ressaltar que outras estruturas podem ser propostas para o estabilizador. Neste trabalho, apenas a estrutura da figura 37 será utilizada nas simulações, uma vez que ela atende perfeitamente ao propósito de exemplificar a potencialidade da compensação controlada.

5.3.3. Sistema de Disparo.

O Sistema de Disparo é a parte responsável pela transformação do sinal proveniente do controlador em um conjunto de pulsos que serão enviados aos tiristores. A maneira de representar esta etapa nas simulações dinâmicas é muito controvertida. O que acontece é que os circuitos envolvidos têm retardos desprezíveis, mas a atuação do controlador pode ser atrasada conforme o instante em que o sinal de controle chegue ao sistema de disparo. Isto acontece porque os pulsos de disparo só podem ser enviados em determinados momentos. Daí resulta que, em média, existirá um atraso da ordem de 2 a 4 milisegundos. Entretanto, a forma de inclusão deste valor no modelo é que traz algumas dúvidas.

Existem autores que representam este atraso pela equação de tempo morto no domínio da frequência (e^{-sT_d}). Outros, por considerarem que o

atraso se dá aleatoriamente, dão um atraso menor na forma anterior, usando uma constante de tempo T_b , da ordem de um milissegundo, e dividem esta por uma função polo real que representa o retardo médio de disparo, conforme a representação da figura 38 (a).

Por fim, existem publicações que adotam apenas a representação por um polo real, considerando que o retardo do sistema de disparo é pequeno frente a outras constantes de tempo, devendo-se, portanto, simplificar sua representação para não carregar o modelo [19]. Este trabalho adotará esta filosofia. Assim, tem-se na figura 38 (b) a representação do sistema de disparo.

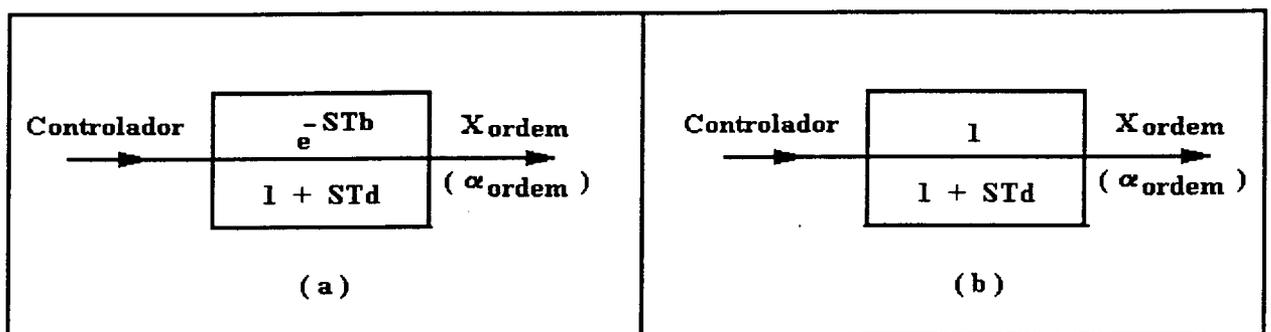


FIGURA 38 - Formas de representação do Sistema de Disparo.

5.3.4 - Unidade de Distribuição de Reatância.

A unidade de distribuição de reatância tem como entrada o valor desejado para a reatância do CSC (X_{ordem}), e como saída o valor de reatância que pode efetivamente ser obtido (X_{atual}), em função das características do CSC e das condições operativas do sistema de potência. Trata-se, portanto, de um limitador dinâmico, cujos valores mínimo e máximo de reatância devem ser calculados a cada passo de integração da simulação.

Conforme já mencionado, este componente representa, em termos de modelagem, a distinção existente entre o TCSC e o TSSC. A seguir serão apresentados quatro modelos da unidade de distribuição de reatância, sendo dois específicos para o TCSC, um para o TSSC e um quarto modelo, bem simplificado, que pode ser usado genericamente em estudos preliminares de planejamento de sistemas de potência.

- Modelo 1 - TCSC Ideal.

No Capítulo 4 (item 4.2.3) foi apresentada e discutida a curva de capacidade real de reatância de um módulo TCSC, ilustrada na figura 25 e aqui reapresentada na figura 39 (b). Para um único módulo TCSC existe uma descontinuidade na faixa de controle entre as regiões capacitiva e indutiva. A figura 39 (a) representa a unidade de distribuição de reatância para um único módulo, indicando que os limites dinâmicos de reatância devem ser calculados a partir da curva da figura 39 (b).

A descontinuidade na faixa de controle, característica intrínseca do TCSC, pode ser idealmente eliminada com um esquema multimodular de compensação com um número infinito de módulos TCSC em série. A figura 40 apresenta o modelo de unidade de distribuição para tal esquema de compensação. É importante lembrar que os limites (X_{cmax} e X_{lmax}) devem ser calculados a cada passo de integração, em função da curva de capacidade do esquema multimodular de TCSC da figura 41.

Este modelo é apropriado para representar os seguintes compensadores:

- um TCSC ideal com capacidade de operação capacitiva e indutiva, que consiste de um número infinito (ou muito elevado) de módulos;

- um TCSC que opere apenas na região capacitiva (exceto durante a condição de "bypass", onde o TCSC é levemente indutivo).

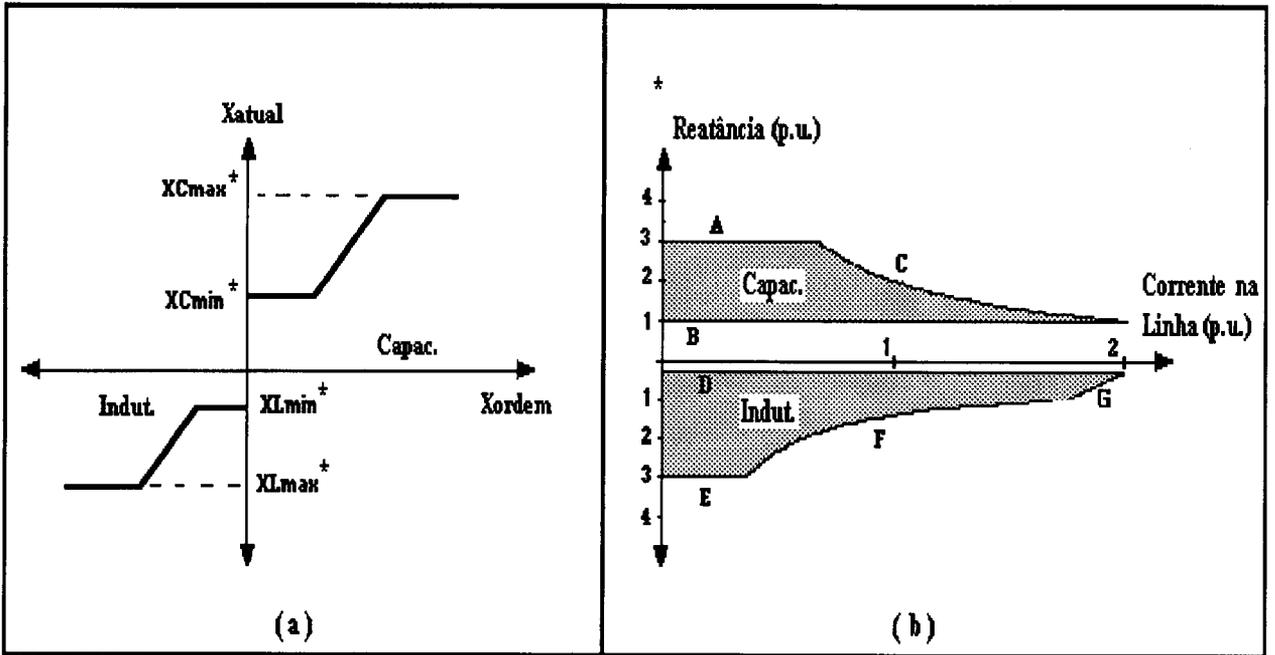


FIGURA 39 - Módulo TCSC: (a) Unidade de distribuição de reatância; (b) Curva de capacidade de reatância.

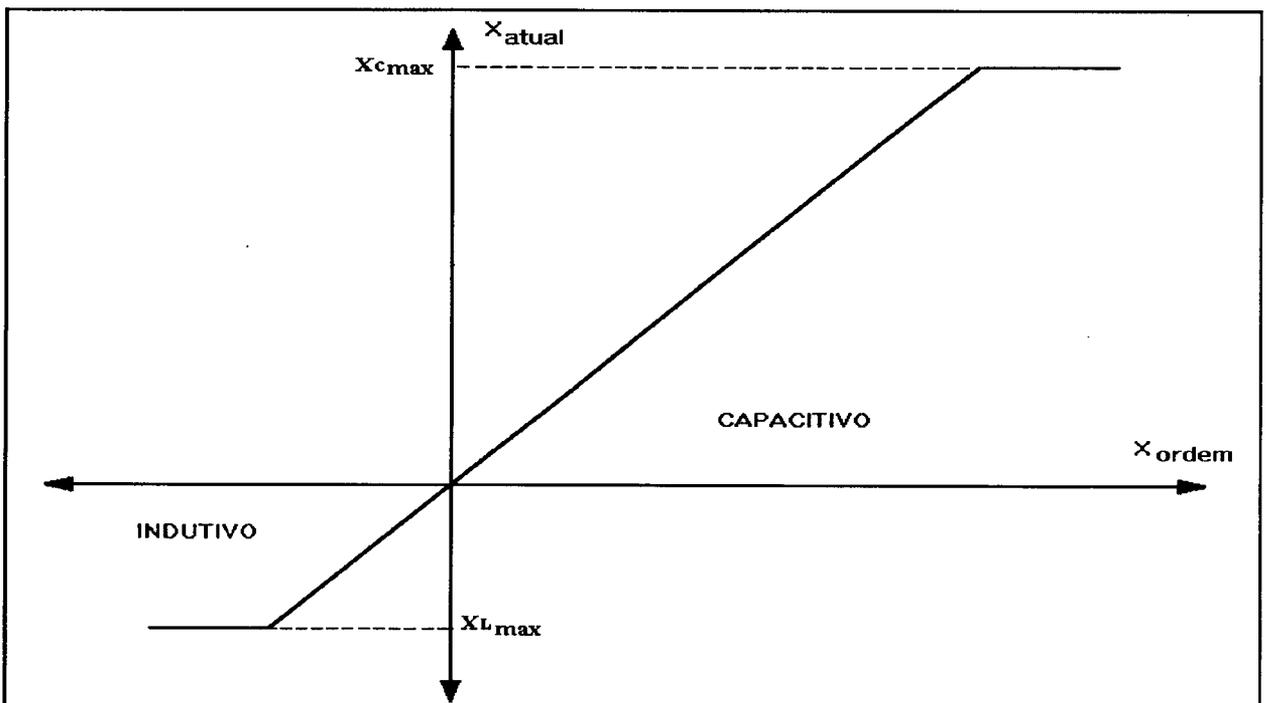


FIGURA 40 - Modelo 1 - TCSC ideal.

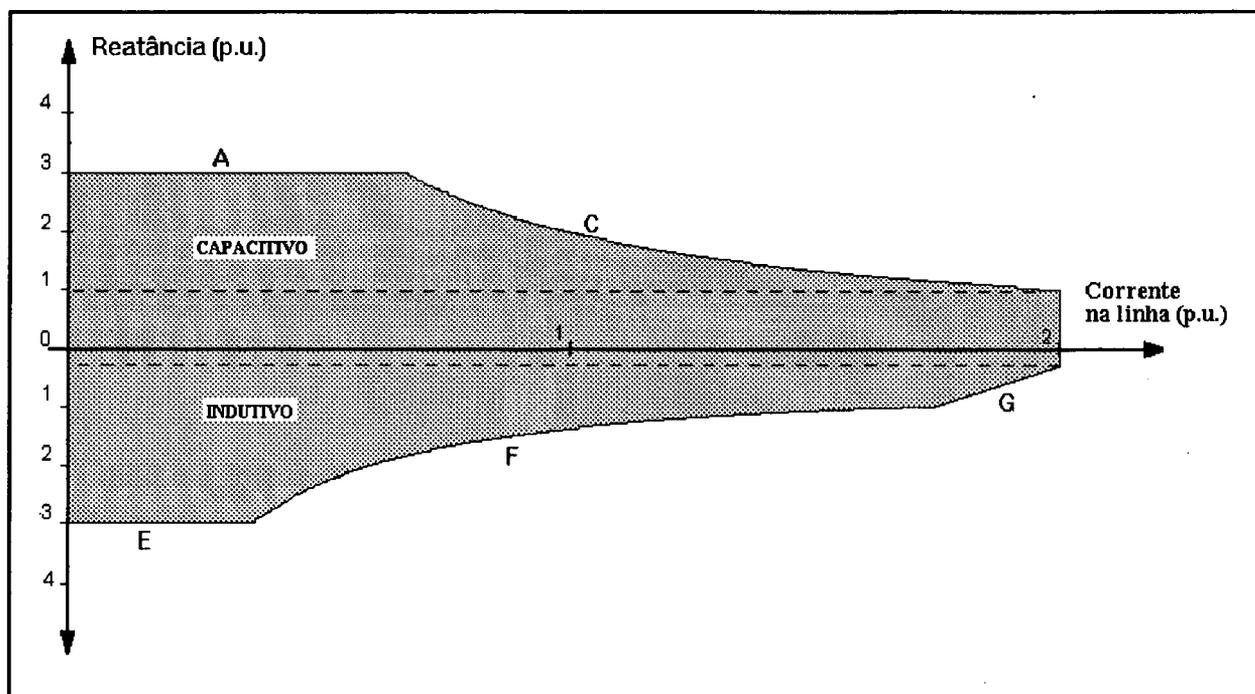


FIGURA 41 - Curva de capacidade de reatância de um TCSC ideal (número infinito de módulos).

- Modelo 2 - TCSC com número limitado de módulos.

Este modelo, mostrado na figura 42, é derivado do anterior, considerando realisticamente um número limitado de módulos TCSC. Os limites X_{cmax_i} e X_{cmin_i} (onde i denota o i -ésimo módulo) e X_{lmax} devem ser calculados a cada passo de integração com base na curva de capacidade de reatância de cada módulo (figura 39 (b)).

Constata-se que este modelo representa a saída do TCSC com mais fidelidade. Por outro lado, ele exige um grau de conhecimento mais avançado das características do compensador (capacidade nominal, número de módulos, etc). Deve, portanto, ser utilizado em estudos operativos ou em fases avançadas do planejamento para subsidiar decisões de especificação e projeto.

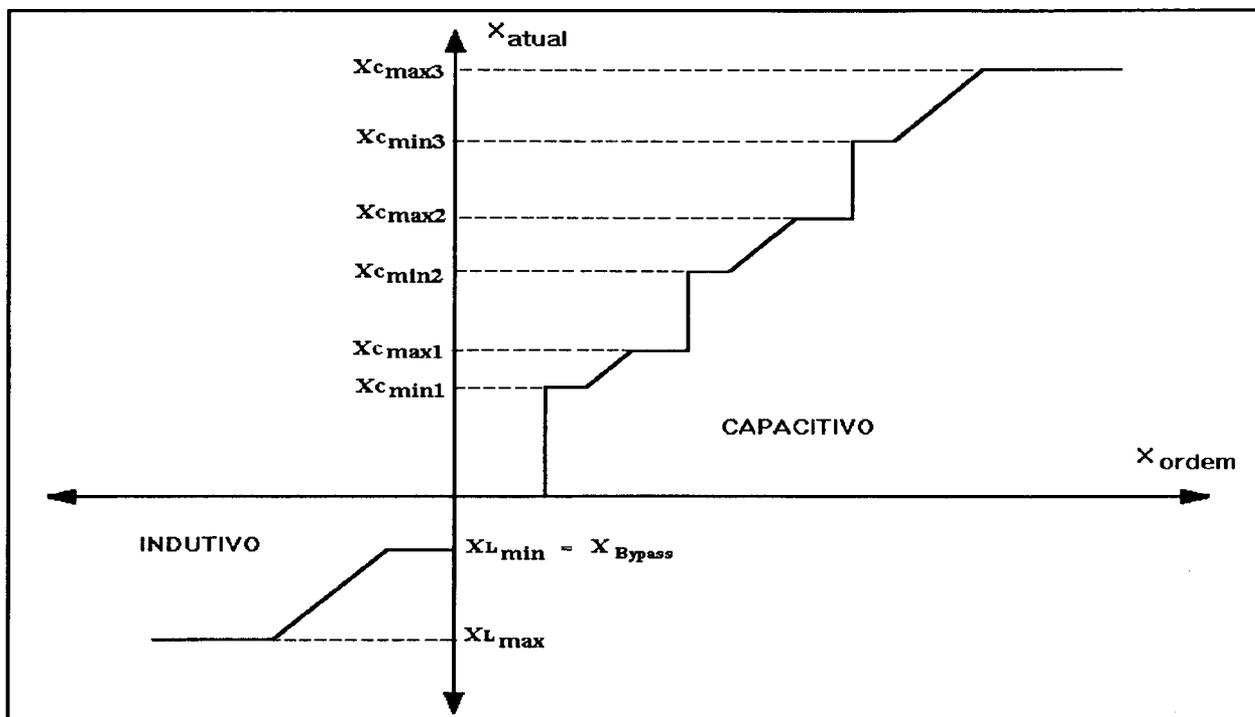


FIGURA 42 - Modelo 2 - TCSC com número limitado de módulos.

- Modelo 3 - TSSC.

A figura 43 apresenta o diagrama de blocos da unidade de distribuição de reatância adotada para o modelo 3, usado na modelagem de esquemas de compensação a base de TSSC. Neste caso, os limites de reatância de cada módulo podem ser considerados estáticos (fixos), conforme discutido no Capítulo 4. Neste Capítulo mostrou-se também que o TSSC só opera na faixa capacitiva, já que na condição de "bypass" sua reatância indutiva é praticamente nula.

A ação de controle deve incluir histerese de forma a se evitem chaveamentos intermitentes (liga-desliga) dos módulos do TSSC, no caso de pequenas excursões da saída do sistema de controle em torno do valor de "Xordem" que comanda a conexão ou desconexão dos módulos.

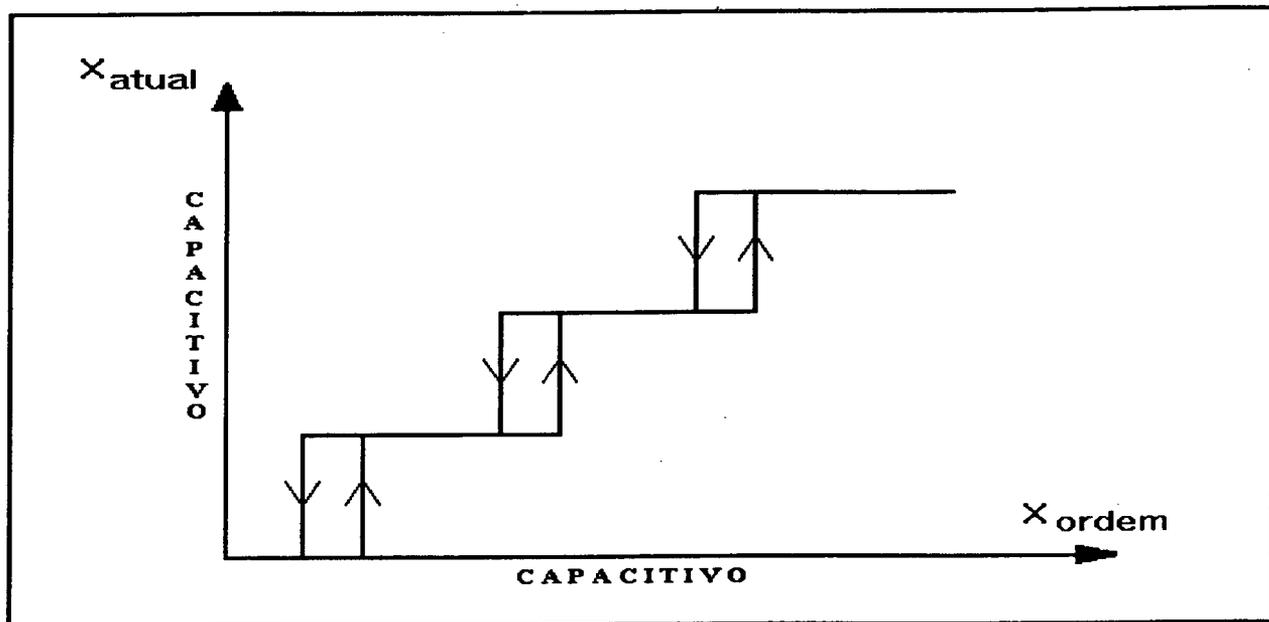


FIGURA 43 - Unidade de distribuição de reatância para TSSC.

- Modelo 4 - Limitador estático.

O modelo 4 consiste de um limitador bem simples mas que pode ser bastante útil em avaliações preliminares da atratividade técnica da compensação série controlada (estudos de viabilidade). A figura 44 mostra este modelo, que pode ser usado tanto para TCSC quanto para TSSC.

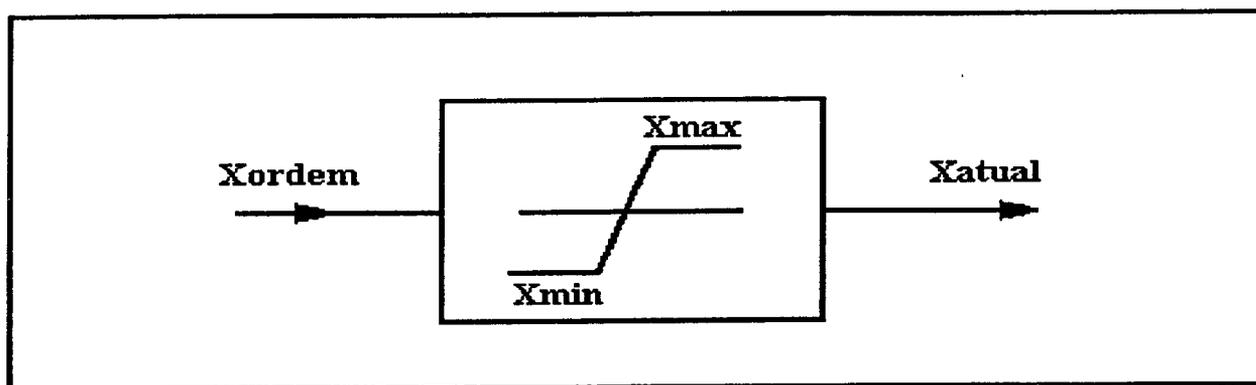


FIGURA 44 - Modelo 4 - Limitador estático.

5.4. - Programa de Estabilidade Linear.

No programa de estabilidade linear, ou estabilidade para pequenas perturbações, o modelo do CSC é semelhante ao proposto para estudos de estabilidade via simulação no domínio do tempo, porém com as devidas simplificações em função da metodologia utilizada e dos objetivos próprios de estudos de sistemas elétricos via análise linear.

Antes de apresentar propriamente o modelo do CSC, será feito um breve resumo da metodologia utilizada na formulação de um programa de análise linear de sistemas de potência. As referências [20,21,22] se dedicam mais objetivamente a esta análise e, dessa forma, são indicadas para aqueles interessados em informações mais abrangentes e específicas a respeito deste tópico.

De maneira genérica, o sistema de potência pode ser descrito por um conjunto de equações algébrico-diferenciais não lineares da forma:

$$\dot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{z}) \quad (5.1)$$

$$\vec{0} = \vec{g}(\vec{x}, \vec{z}) \quad (5.2)$$

Nestas equações tem-se:

\vec{x} é um vetor de variáveis de estado,

$\dot{\vec{x}}$ é a derivada de \vec{x} com relação ao tempo,

\vec{z} é um vetor de variáveis algébricas,

\vec{f} e \vec{g} são vetores de funções que representam o equacionamento do sistema.

As equações (5.1) representam as equações diferenciais dos modelos dos geradores e respectivos controladores, dos compensadores estáticos, das cargas dinâmicas (motores de indução, etc) e dos dispositivos FACTS. É, portanto, neste conjunto de equações que serão incluídas as equações diferenciais representativas do modelo do sistema de controle do CSC.

As equações (5.2) representam as equações algébricas e incluem:

$$1. - \text{ as equações da rede } \bar{I} = \bar{Y} \cdot \bar{V} \quad (5.3)$$

onde: \bar{I} - são as injeções de correntes nas barras,

\bar{V} - são as tensões nas barras,

\bar{Y} - é a matriz de admitâncias.

2. - as equações de conexão da rede com componentes como geradores, motores de indução, compensadores estáticos e dispositivos FACTS. Estas equações relacionam variáveis de estado dos componentes com as injeções de corrente e as tensões nas barras às quais estes equipamentos estão conectados.

Para analisar o comportamento do sistema de potência sujeito a pequenos distúrbios, ou seja, pequenas variações em torno de um ponto de operação (\bar{x}^0, \bar{z}^0) , as equações (5.1) e (5.2) podem ser linearizadas, obtendo-se:

$$\Delta \bar{x} = \left. \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{x}} \right|_{(\bar{x}^0, \bar{z}^0)} \cdot \Delta \bar{x} + \left. \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{z}} \right|_{(\bar{x}^0, \bar{z}^0)} \cdot \Delta \bar{z} \quad (5.4)$$

$$\bar{0} = \left. \frac{\partial \bar{g}}{\partial \bar{x}} \right|_{(\bar{x}^0, \bar{z}^0)} \cdot \Delta \bar{x} + \left. \frac{\partial \bar{g}}{\partial \bar{z}} \right|_{(\bar{x}^0, \bar{z}^0)} \cdot \Delta \bar{z} \quad (5.5)$$

Denotando:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{x}} \Big|_{(\bar{x}^0, \bar{z}^0)} & J_2 &= \frac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{z}} \Big|_{(\bar{x}^0, \bar{z}^0)} \\
 J_3 &= \frac{\partial \bar{g}}{\partial \bar{x}} \Big|_{(\bar{x}^0, \bar{z}^0)} & J_4 &= \frac{\partial \bar{g}}{\partial \bar{z}} \Big|_{(\bar{x}^0, \bar{z}^0)}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

as equações (5.4) e (5.5) podem ser escritas como:

$$\Delta \vec{\dot{x}} = J_1 \cdot \Delta \vec{x} + J_2 \cdot \Delta \vec{z} \tag{5.7}$$

$$\vec{0} = J_3 \cdot \Delta \vec{x} + J_4 \cdot \Delta \vec{z} \tag{5.8}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \vec{\dot{x}} \\ \vec{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \vec{x} \\ \Delta \vec{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \vec{x} \\ \Delta \vec{z} \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

onde J é a matriz Jacobiana do sistema. Da equação (5.8) obtém-se:

$$J_4^{-1} \Delta \vec{z} = J_4^{-1} \cdot J_3 \cdot \Delta \vec{x} \tag{5.10}$$

Substituindo-se na equação (5.7), tem-se:

$$\Delta \vec{\dot{x}} = (J_1 - J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot J_3) \Delta \vec{x} \tag{5.11}$$

$$\text{ou: } \Delta \vec{\dot{x}} = A \cdot \Delta \vec{x} \tag{5.12}$$

$$\text{onde: } A = (J_1 - J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot J_3) \tag{5.13}$$

A matriz A é a matriz de estados do sistema. A análise da estabilidade eletromecânica pode ser feita através do estudo dos autovalores de A .

Em muitos trabalhos encontrados na literatura a matriz A é usada explicitamente, sendo determinada a partir da matriz Jacobiana aumentada, como mostrado anteriormente.

Entretanto, a matriz A não é esparsa e isto se constitui em uma desvantagem para sua plena utilização, especialmente para sistemas de grande porte. Em contraste, a matriz Jacobiana J é altamente esparsa (tipicamente 4 a 6% de elementos não nulos). Além disso, verifica-se que é muito fácil incluir novos componentes, como por exemplo os dispositivos FACTS, na matriz Jacobiana.

De qualquer forma, uma vez obtida a matriz Jacobiana ou mesmo a matriz de estados do sistema, uma série muito ampla de grandezas próprias da análise linear pode ser derivada de operações e/ou transformações lineares efetuadas com base no conhecimento destas matrizes. Apenas a título de exemplos, podem ser citados os autovalores e autovetores do sistema, os fatores de participação, os coeficientes de sensibilidade, os "zeros" de transmissão, os índices de controlabilidade e observabilidade, entre outros, discutidos com muita propriedade nas referências [20,21,22,23,24,25,26].

Não é objetivo deste trabalho apresentar a definição e muito menos discutir as propriedades de cada uma destas grandezas ou ferramentas de análise. É importante, entretanto, lembrar que estas ferramentas têm se mostrado muito promissoras para estudos de análise, projeto e alocação de dispositivos FACTS em sistemas elétricos multimáquinas. As referências [24,25,26] apresentam resultados muito interessantes de estudos realizados para posicionamento e projeto de CSC's em sistemas elétricos malhados, utilizando as ferramentas aqui mencionadas.

O modelo de CSC proposto para estudos em programas de estabilidade linear é apresentado na figura 45. Nota-se que este modelo tem como base o modelo proposto para estudos de estabilidade via simulação não linear no domínio do tempo, sendo que todas as não linearidades e também o laço de sincronização foram suprimidos. Também não há necessidade de se representar a unidade de distribuição de reatância. Os modos de controle são os mesmos já discutidos no item anterior.

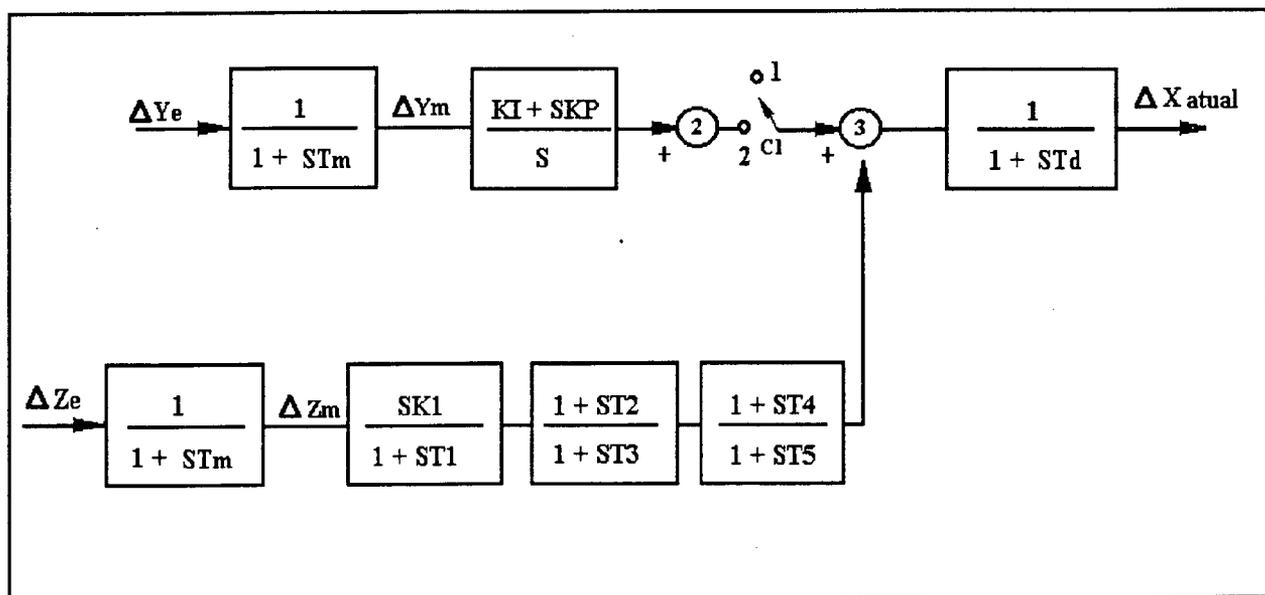


FIGURA 45 - Modelo de CSC para programa de estabilidade linear.

5.5. - Programa de Transitórios Eletromagnéticos.

A simulação do CSC para estudos de transitórios eletromagnéticos utilizando programas como o EMTP envolve uma representação bem mais detalhada do sistema de controle e, principalmente, da válvula e seu respectivo sistema de disparo. Estes modelos podem ser feitos de forma bem acurada, representando precisamente todos os circuitos envolvidos, utilizando-se os recursos de modelagem pelo usuário (TACS) disponíveis

no programa EMTP, desde que se disponha de uma documentação detalhada do equipamento (diagramas trifilares, imagem dos cartões de controle, etc).

Não constitui objetivo deste trabalho investir nesta modelagem. Entretanto, durante sua realização a empresa alemã SIEMENS tornou disponível o modelo por ela desenvolvido para representar o TCSC instalado e já em operação no sistema elétrico da WAPA (EUA), conforme descrito no Capítulo anterior.

De posse deste modelo, que possui uma representação bem detalhada dos circuitos de medição e filtragem, da válvula e do sistema de disparo, foi possível introduzir parte do modelo de controlador do CSC proposto no item 5.3 para estudos de estabilidade eletromecânica no domínio do tempo. Especificamente, foi introduzida a modelagem para permitir os modos de controle de potência e de corrente.

O Apêndice A apresenta resultados de algumas simulações realizadas com este modelo em um sistema elétrico simples, constituído de duas máquinas síncronas interligadas por uma linha de 230 kV compensada, na verdade um sistema equivalente e simplificado da instalação real existente no sistema da WAPA.

Pode-se observar através de três casos exemplos as formas de onda de tensão e corrente no capacitor e nos tiristores do TCSC em condições de regime permanente e transitório. É interessante constatar também como o TCSC pode ser utilizado para reduzir a corrente de curto-circuito próxima à instalação, reduzindo, em consequência, os requisitos de proteção da mesma em comparação com a compensação série fixa.

5.6. - Conclusões.

Este Capítulo se concentrou na proposição de modelos de CSC para serem utilizados em estudos elétricos, notadamente os estudos de fluxo de potência e estabilidade eletromecânica.

Atenção especial foi dispensada à proposição dos modelos de TCSC e TSSC para o programa de estabilidade eletromecânica via simulação não linear no domínio do tempo. A idéia foi a construção de um modelo genérico, adaptável a diversas configurações de CSC, no qual o grau de detalhamento pode ser escolhido em função das necessidades de cada estudo, tanto a nível de planejamento como de operação.

O modelo proposto para o controlador do CSC (figura 37) permite a representação dos diversos modos de controle do mesmo e dispõe de um sinal adicional que atua para melhorar os limites de estabilidade transitória e dinâmica do sistema de potência.

Foram discutidas quatro possibilidades para a representação da unidade de distribuição de reatância, que é a parte do modelo responsável pela adequação da saída desejada (ordem de reatância) às características e valores nominais do equipamento, determinando assim os limites operativos para o mesmo. A maior parte das informações necessárias para esta unidade do modelo foram absorvidas através de discussões mantidas com fabricantes do equipamento. A representação detalhada desta unidade pode ser muito importante até mesmo nos estudos de planejamento e, principalmente, durante a fase de especificação da compensação.

Discutiu-se também como este modelo pode ser simplificado para ser utilizado em programas de estabilidade eletromecânica via análise linear (cálculo de autovalores, autovetores, etc). Esta representação é de fundamental importância, uma vez que esta ferramenta tem se mostrado a mais eficaz nos estudos que envolvem o projeto (estrutura e ajuste dos controladores) e o posicionamento (escolha do local mais efetivo) dos dispositivos FACTS em geral.

Finalmente, foram feitas algumas considerações sobre a modelagem do CSC no programa de transitórios eletromagnéticos (EMTP), indicando a leitura do Apêndice A, onde são apresentadas simulações com o modelo de TCSC da SIEMENS, adaptado para receber um modelo de controlador simplificado, derivado do modelo completo da figura 37.

O Capítulo seguinte se dedica à implementação dos modelos aqui propostos em um programa de estabilidade eletromecânica, via simulação no domínio do tempo, e à verificação da consistência dos mesmos, utilizando-se um pequeno e hipotético sistema de transmissão.

6. - CASOS TESTES.

6.1. - Introdução.

Nesta parte do trabalho, os modelos desenvolvidos no Capítulo anterior serão implementados no programa de estabilidade eletromecânica CYMSTAB [30], recentemente adquirido pela Eletronorte, e posteriormente testados em três casos exemplos com base em um pequeno sistema de transmissão.

O programa CYMSTAB possui uma rotina que permite que a modelagem dos diversos controladores de um sistema de potência seja efetuada externamente, pelo usuário. Esta rotina permite a representação de linhas de transmissão com impedância variável e esta facilidade possibilita que os modelos aqui desenvolvidos sejam implementados.

Os casos exemplos apresentados a seguir objetivam verificar a consistência dos modelos propostos e visam também uma primeira avaliação dos benefícios alcançados com o emprego de compensação série controlada.

6.2. - Caso Teste 1.

O primeiro teste tem por objetivo mostrar como a utilização do Compensador Série Controlado pode incrementar o valor da potência máxima transmitida por uma linha de transmissão. Será utilizado um sistema elétrico bem simples, constando apenas de uma máquina

conectada a uma "barra infinita" via um linha de transmissão longa, na tensão de 500 kV. A figura 46 apresenta o diagrama unifilar deste sistema. As figuras 47 a 50 apresentam os modelos de máquinas, sistemas de excitação e o sistema de controle do CSC.

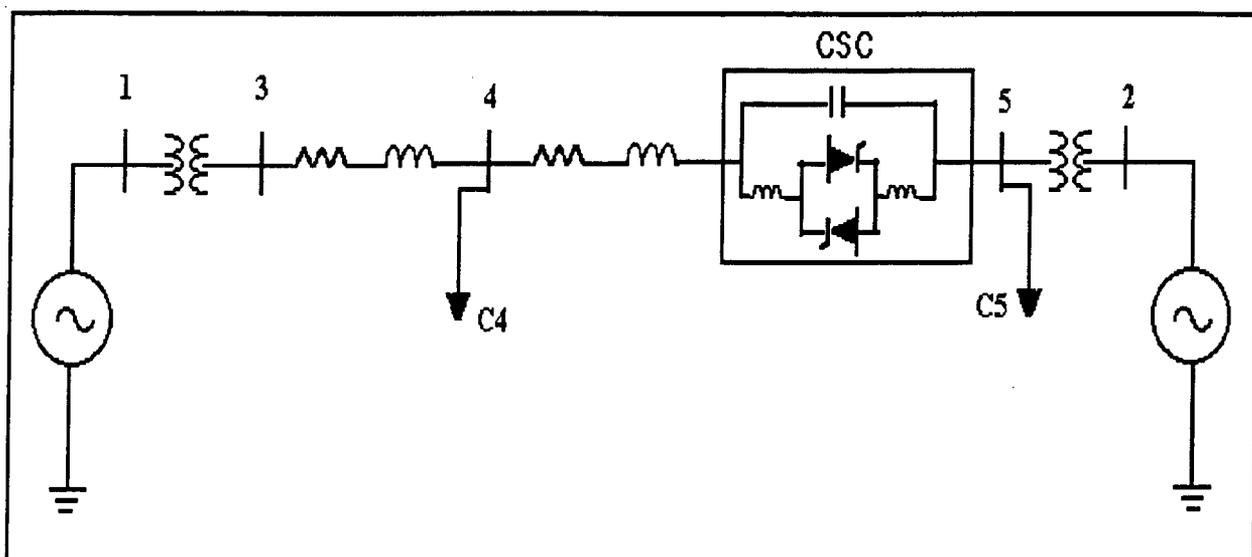


FIGURA 46 - Sistema teste 1 - diagrama unifilar.

♦ **Dados do sistema:** (Base de Potência = 100 MVA)

O quadro 3 abaixo apresenta os parâmetros de linhas de transmissão e transformadores do sistema da figura 46.

CIRCUITO	R (p.u.)	XL (p.u.)	XC (p.u.)	B (p.u.)
1--3		0.0069		
3--4	0.0023	0.0291		2.8429
4--5	0.0046	0.0582	-0.0291	5.6858
2--5		0.0008		

QUADRO 3 - Parâmetros de linhas e transformadores.

◆ **Dados de carga:**

C4 -- (400 + J200) MVA

C5 -- (800 + J400) MVA

◆ **Modelos de Máquinas Síncronas:**

A máquina conectada ao barramento 1 foi representada considerando os efeitos subtransitórios e de saliência. Considera um enrolamento amortecedor de eixo direto e um de eixo em quadratura. Na figura abaixo, DEi representa o efeito de saturação relacionando E'q (tensão proporcional ao enlace de fluxo) com Ei (tensão proporcional à corrente de campo). A máquina 2 é representada pelo modelo "tensão constante atrás da reatância transitória de eixo direto X'd ", conforme ilustra a figura 49.

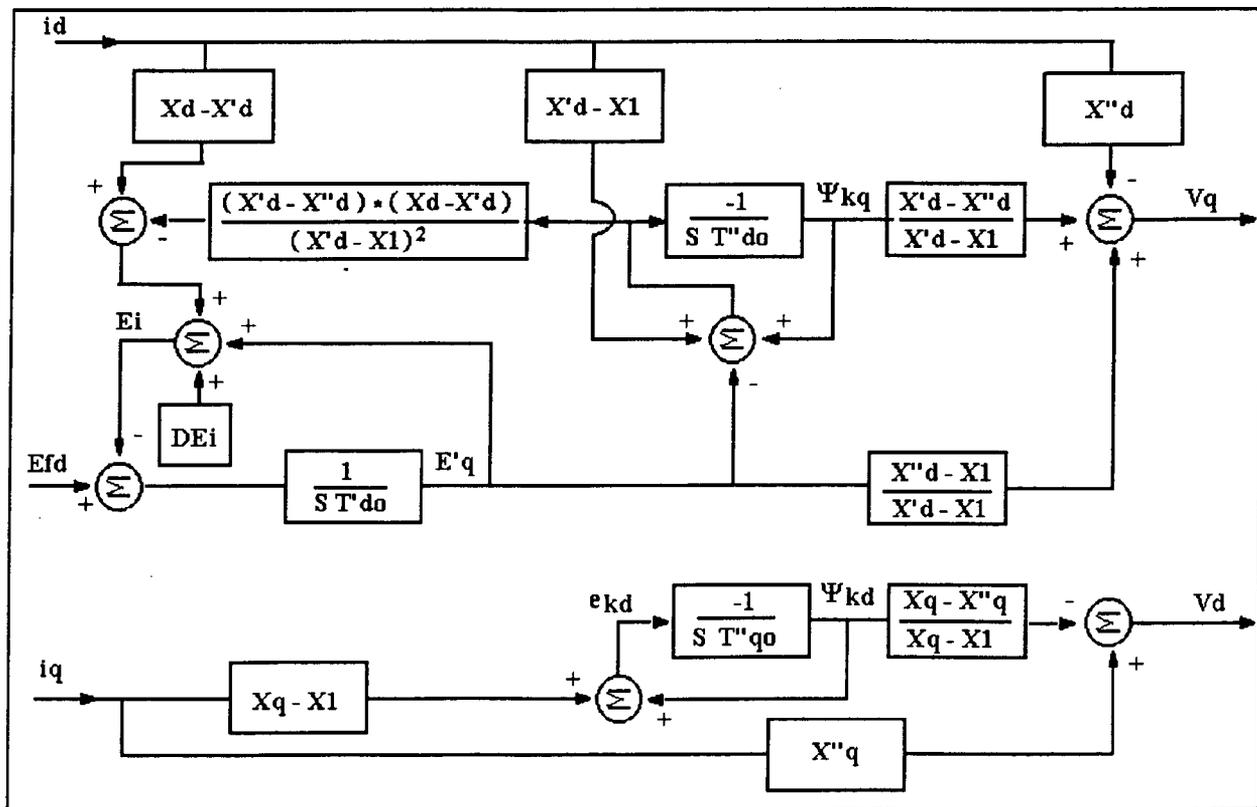


FIGURA 47 - Modelo de gerador síncrono (máquina 1).

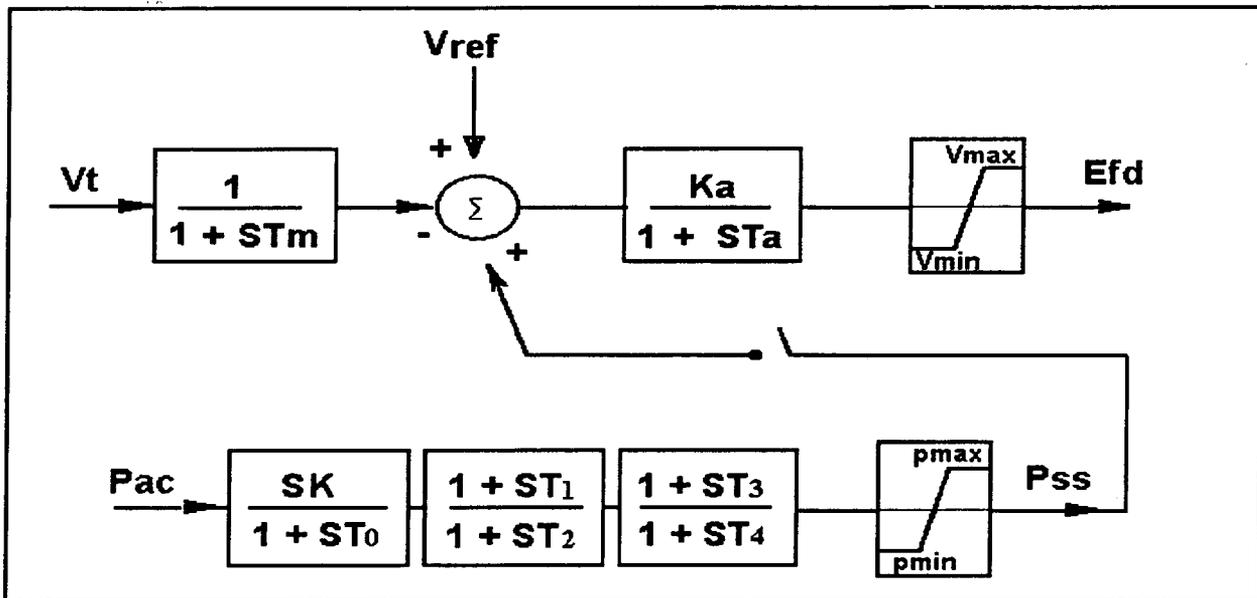


FIGURA 48 - Sistema de excitação da máquina 1.

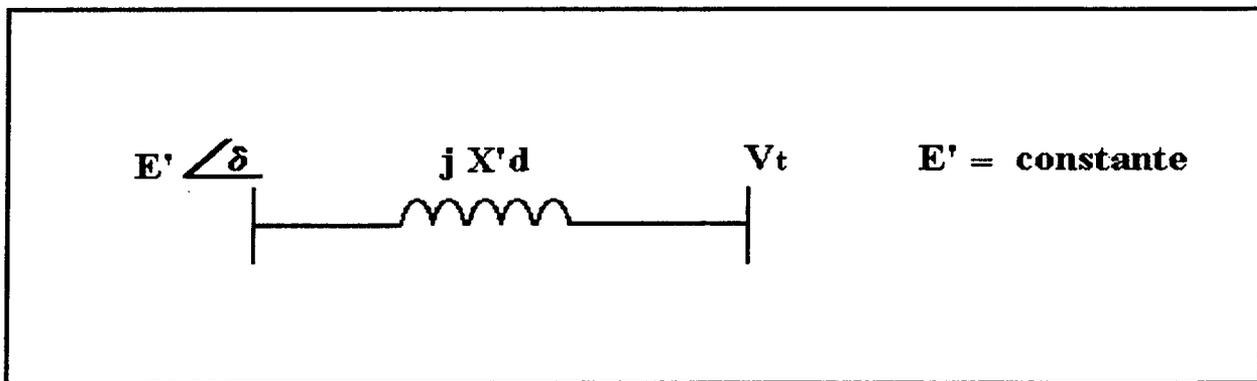


FIGURA 49 - Modelo clássico de máquina (máquina 2).

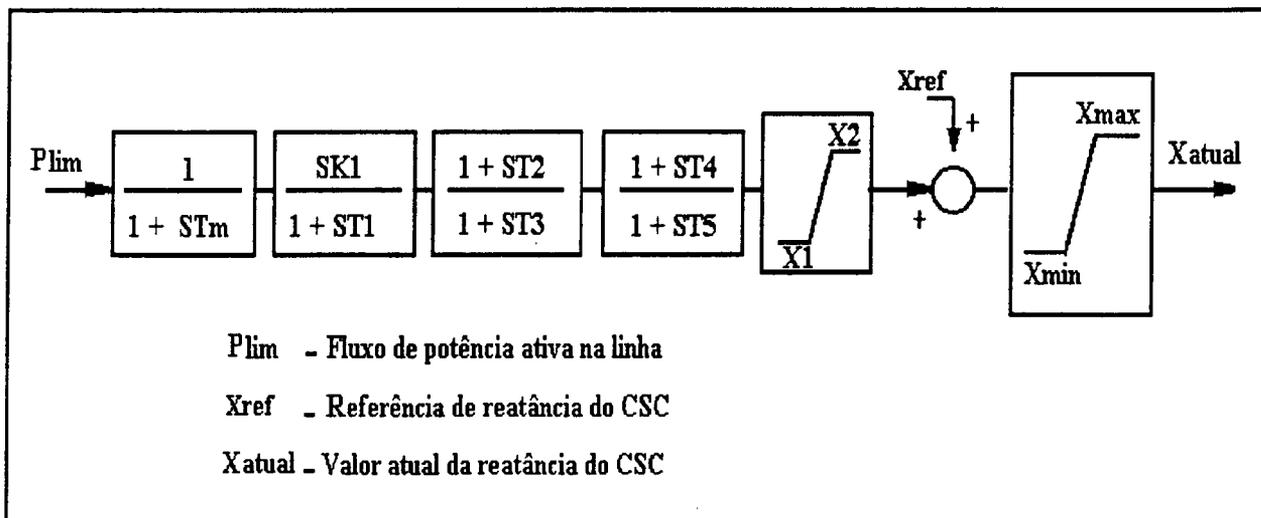


FIGURA 50 - Modelo do CSC para o caso teste 1.

Comparando o modelo do CSC com o proposto no Capítulo 5 (figura 37), nota-se que este modelo consiste de um controlador para regulação de impedância com um sinal suplementar para amortecimento de oscilações eletromecânicas (apenas o laço de amortecimento foi representado). O sistema de disparo não foi simulado, ou seja, considerou-se "Td" igual a zero. A unidade de distribuição de reatância foi representada por um limitador estático (modelo 4), para um CSC que opera apenas na faixa capacitiva (30% a 70% de compensação).

Este modelo é mais apropriado para um TCSC mas pode também representar um TSSC com um número elevado de pequenos módulos, de forma que a variação do nível de compensação seja aproximadamente contínua.

O primeiro teste realizado consistiu em aplicar um curto-circuito trifásico na barra 3 do sistema. Este curto é eliminado após 15 milissegundos (obviamente sem abertura de linha). O CSC encontra-se com valor constante de reatância capacitiva igual a -0.0291 p.u. (50% de compensação) e com o sinal suplementar bloqueado (modo impedância constante). É importante observar também que o sinal adicional da máquina 1 foi retirado de operação.

A figura 51 apresenta a curva ângulo da máquina 1 em função do tempo. Observa-se que o sistema é instável, mesmo sendo compensado, e não poderia transmitir o valor de potência necessária para atender integralmente o valor da carga. O passo seguinte do teste consistiu em repetir a simulação, estando o sinal adicional do CSC desbloqueado. O ajuste dos parâmetros do sistema de controle foi feito de forma a introduzir amortecimento para oscilações eletromecânicas da máquina 1

contra a máquina 2, na faixa de frequência de 0.4 a 2.0 Hz. A figura 52 (ângulo da máquina 1 x tempo), mostra que o sistema é estável, indicando que a potência transmitida pode ser incrementada.

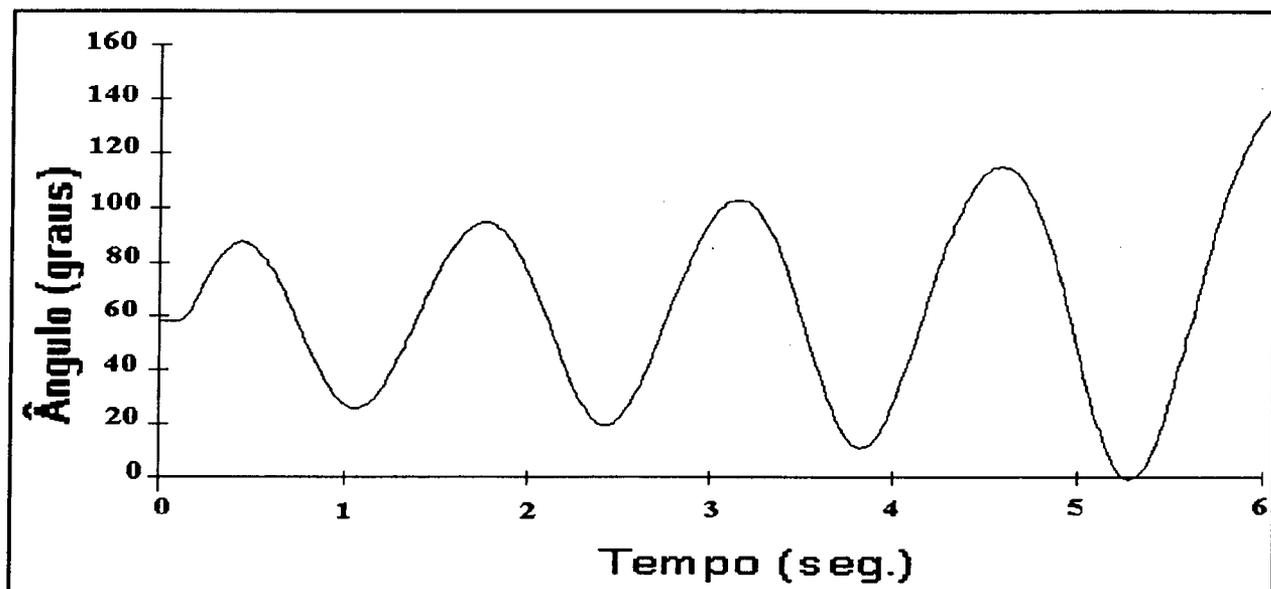


FIGURA 51 - Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com compensação fixa (50%).

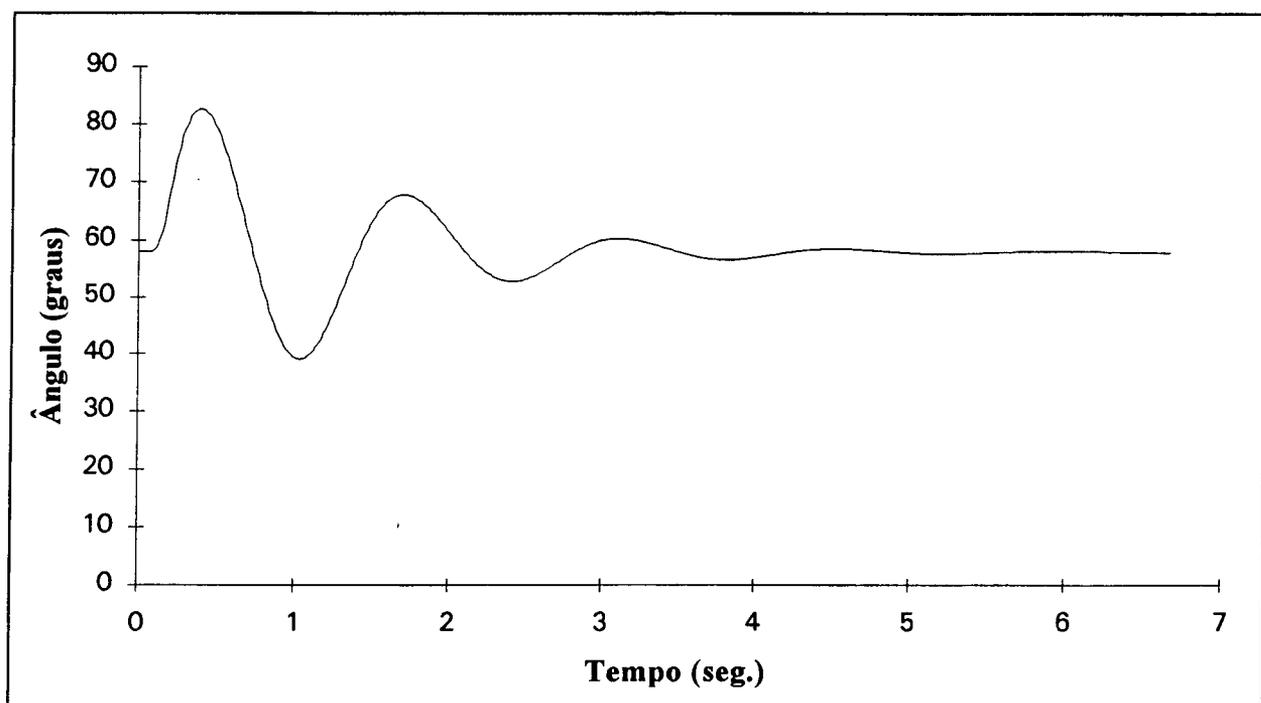


FIGURA 52 - Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 70%).

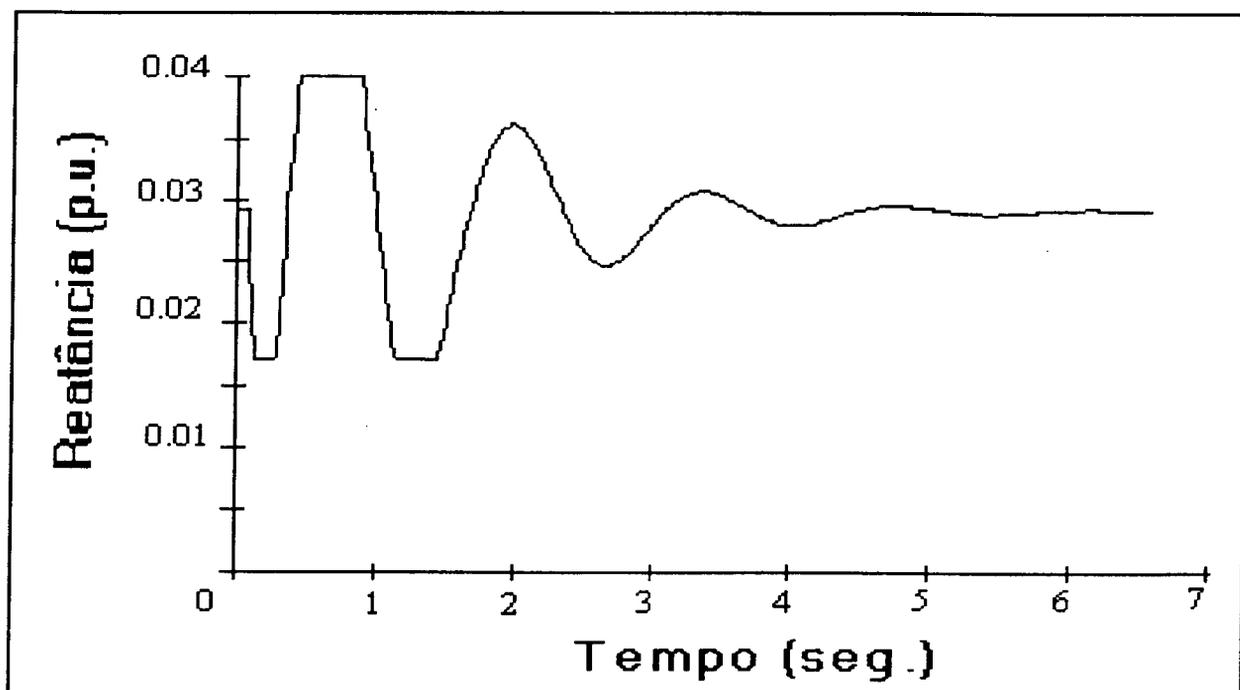


FIGURA 53 - Reatância total da linha em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 70%).

A figura 53 apresenta a curva "reatância total da linha em função do tempo". Nota-se que a reatância atinge valores limites em 0.040 p.u. e 0.017 p.u., ou seja, a compensação mínima é de 30% e a máxima de 70%. Surge aqui uma questão interessante: uma vez que o nível de compensação atinge, ainda que momentaneamente, valores superiores ao de regime (50%), torna-se natural questionar a efetividade da variação da reatância do CSC para amortecimento das oscilações de potência.

Para sanar esta dúvida, dois testes adicionais foram realizados. O primeiro consistiu em simular novamente o sistema com o controle do CSC bloqueado e com valor de reatância correspondente a 70% de compensação. A figura 54 mostra que o sistema continua instável mesmo com 70% de compensação fixa, comprovando assim, os benefícios do controle do CSC. De qualquer forma, simulou-se também o sistema com o controle do CSC desbloqueado, mas com o limite máximo de

compensação igual ao valor de regime (50%), permitindo apenas a modulação no sentido de reduzir o grau de compensação. Ainda assim o CSC conseguiu estabilizar o sistema, conforme mostram as figuras 55 e 56.

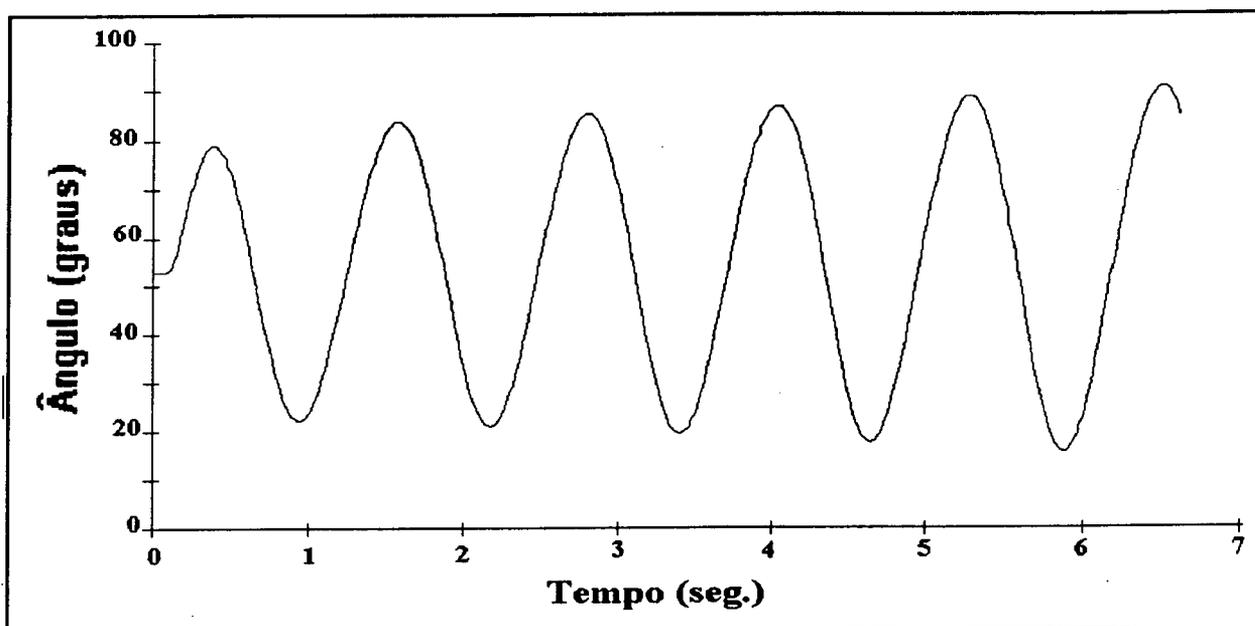


FIGURA 54 - Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com compensação fixa (70%).

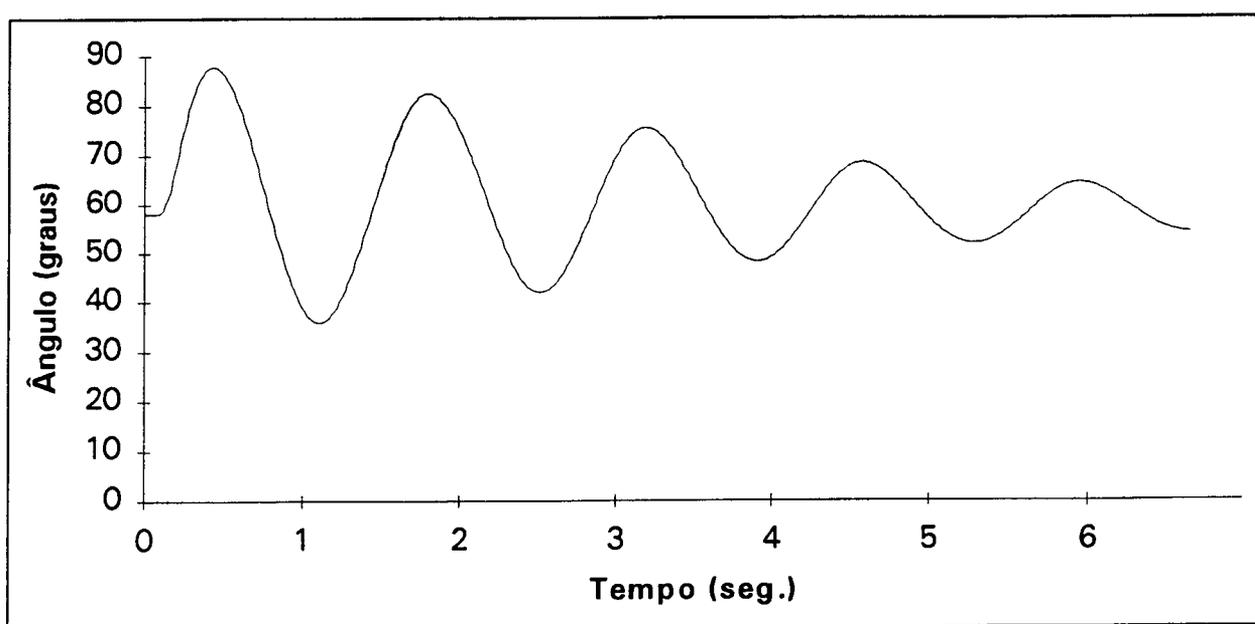


FIGURA 55 - Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 50%).

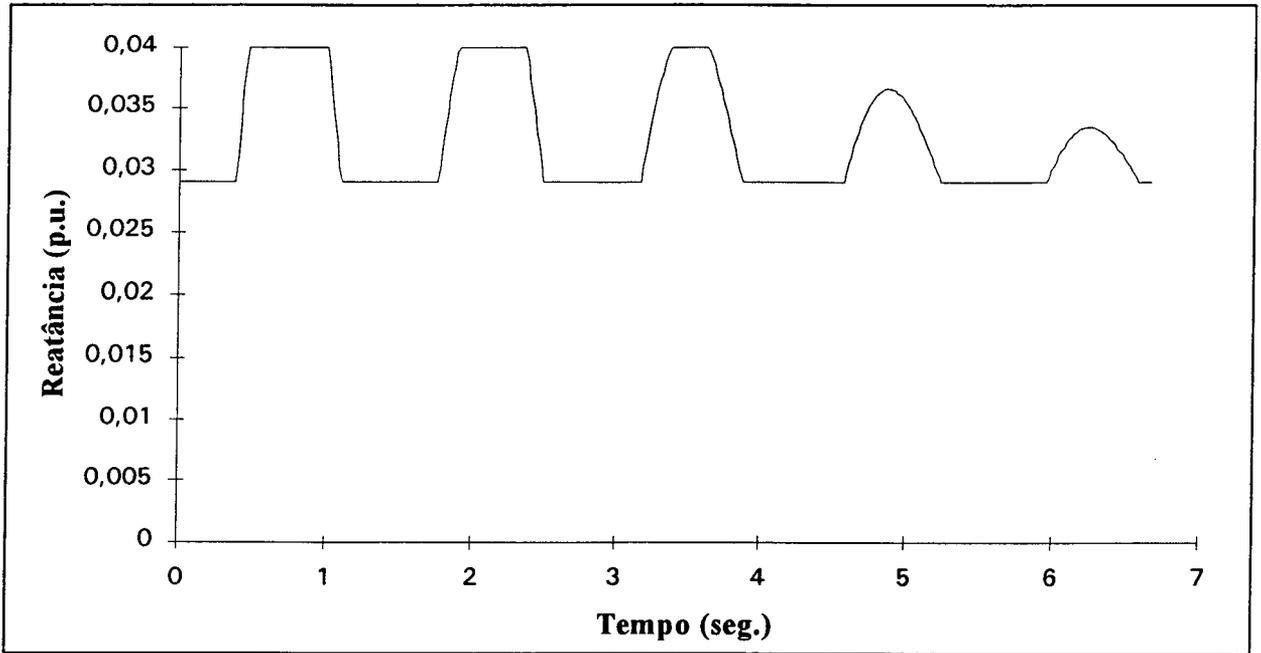


FIGURA 56 - Reatância total da linha em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 50%).

É importante deixar claro que não houve aqui uma maior preocupação em otimizar o ajuste do sistema de controle do CSC. Uma promissora ferramenta para este fim são os programas de análise linear via autovalores, auto-vetores, fatores de participação, etc., conforme mencionado no Capítulo 5. O Apêndice C apresenta o procedimento de ajuste e os valores dos parâmetros usados nas simulações.

Outro ponto a ser destacado é que, uma vez estabilizado o sistema, o despacho da máquina 1 poderia ser aumentado até se obter o novo limite de transmissão para esse sistema.

A principal conclusão deste exemplo é que se a compensação série for controlável, o seu valor pode ser inferior ao que seria necessário, caso ela fosse de valor fixo (convencional). Isto implica que, além dos benefícios intrínsecos de um esquema que apresenta flexibilidade

operativa, a Compensação Série Controlada pode vir bem acompanhada de uma razoável redução de custos.

6.3. - Caso Teste 2.

O segundo caso teste tem por objetivo exemplificar a utilização do Compensador Série Controlado como controlador de fluxo de potência. Para tanto, foi adicionado um novo circuito entre as barras 4 e 5 do sistema original, conforme mostra a figura 57. Este circuito não é compensado e tem parâmetros iguais aos do primeiro circuito.

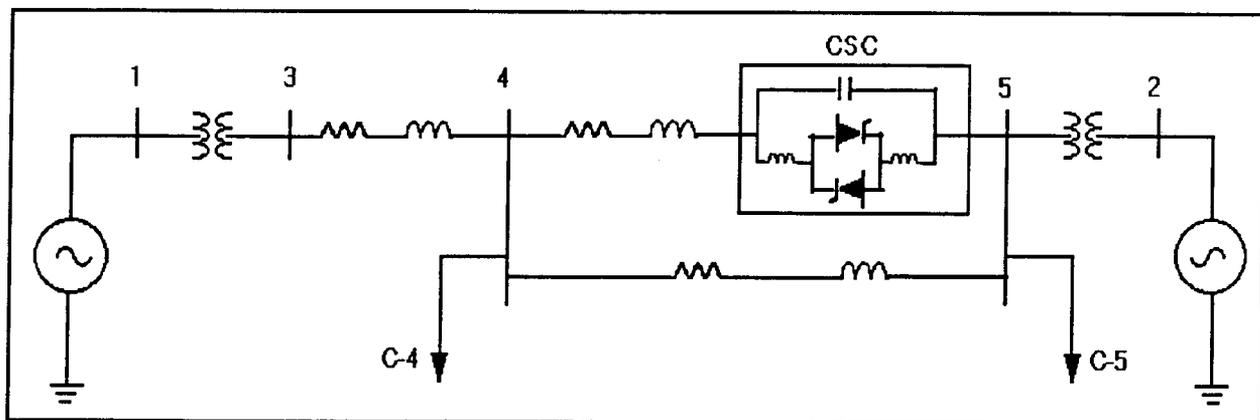


FIGURA 57 - Sistema teste 2 - diagrama unifilar.

O modelo de controlador de potência aplicado ao CSC é apresentado na figura 58. A idéia do teste passa pela aplicação de uma rejeição parcial de carga na barra 4 do sistema e a verificação do comportamento do fluxo de potência na linha compensada, com o CSC operando, ora em controle de impedância, ora em controle de potência.

Antes, porém, um outro problema precisa ser resolvido. Ocorre que, também este sistema, mesmo com dois circuitos entre as barras 4 e 5,

continua sendo instável para o distúrbio aplicado. A introdução do controlador de potência sem um controle adicional para estabilizar o sistema invalida o teste, uma vez que não é possível controlar o fluxo de potência de uma interligação instável. Por esse motivo foi mantido o sinal adicional no controlador do CSC.

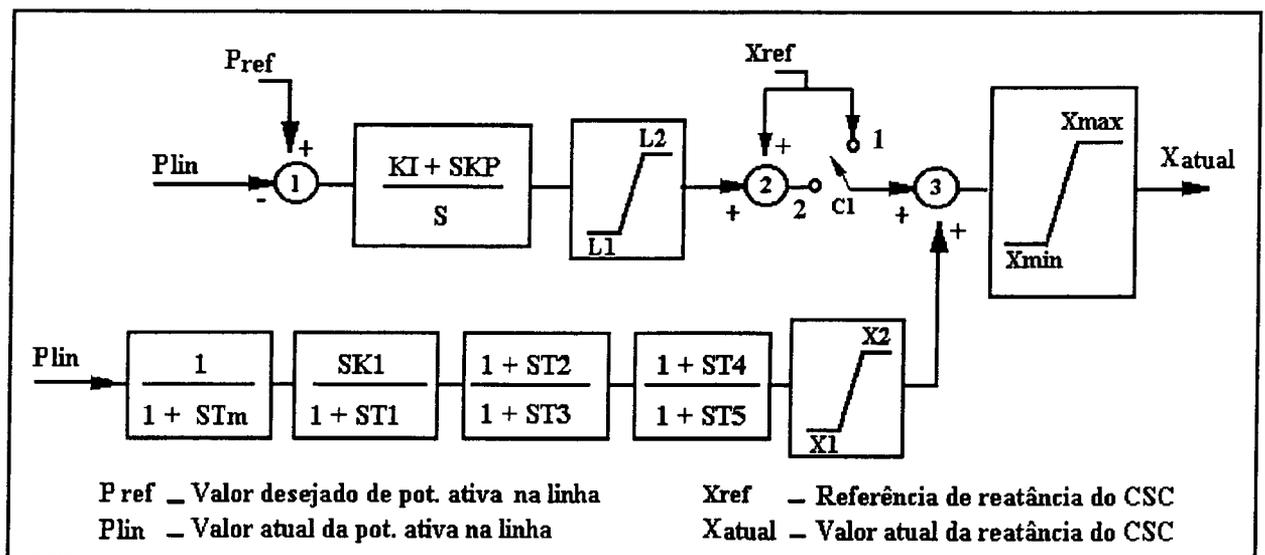


FIGURA 58 - Modelo do CSC para o caso teste 2.

Com o sistema estável, o teste pode então ser realizado. Inicialmente com o CSC em modo de impedância constante, a carga da barra 4 foi reduzida em 40%, causando uma nova distribuição de fluxos entre os dois circuitos. Verifica-se, na figura 59, que o fluxo na linha compensada tem o seu valor incrementado.

A seguir a simulação foi repetida, porém, com o CSC em modo de controle de potência. As figuras 60 e 61 apresentam os resultados. Nota-se que o controle de potência faz aumentar a reatância da linha de transmissão para manter o fluxo de potência no seu valor especificado, após um breve período transitório.

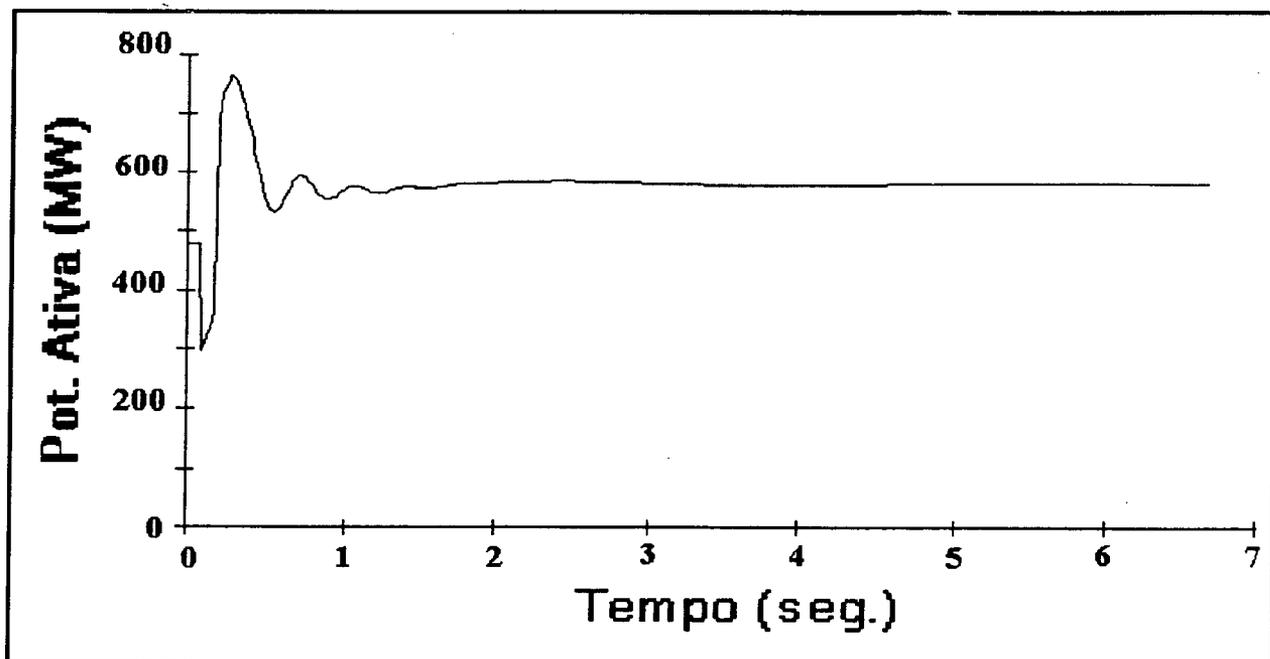


FIGURA 59 - Fluxo de pot. ativa na linha compensada em função do tempo. Sistema com compensação fixa (50%).

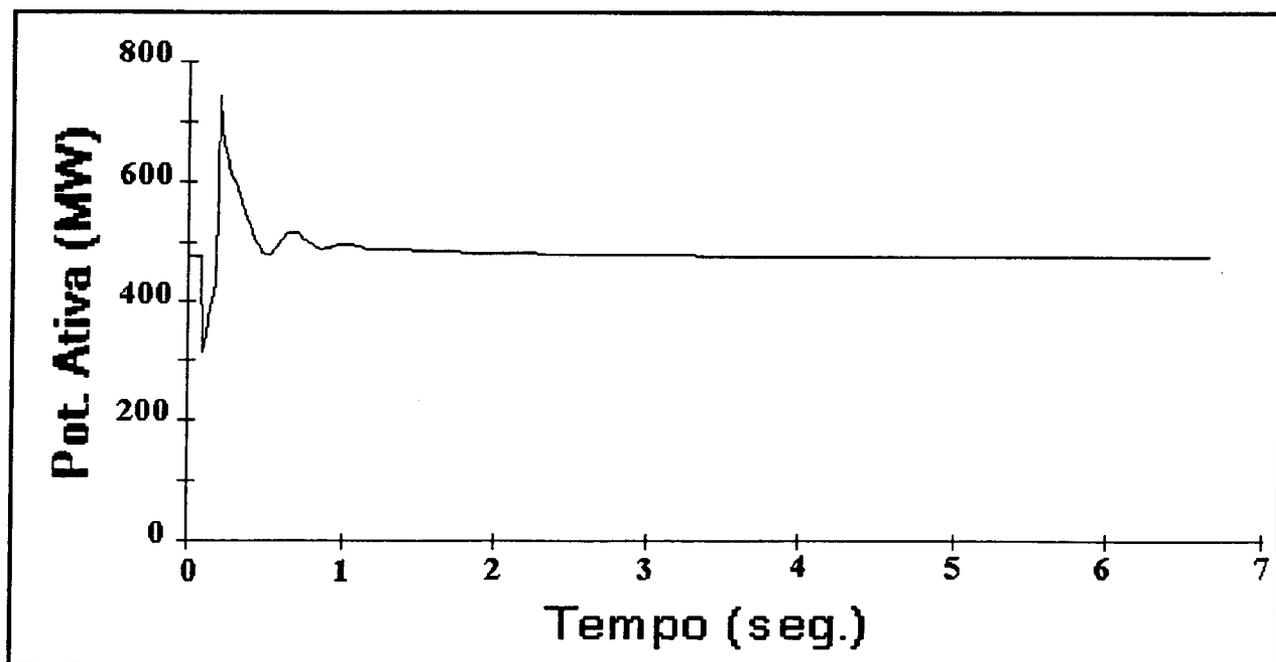


FIGURA 60 - Fluxo de pot. ativa na linha compensada em função do tempo. Sistema com CSC.

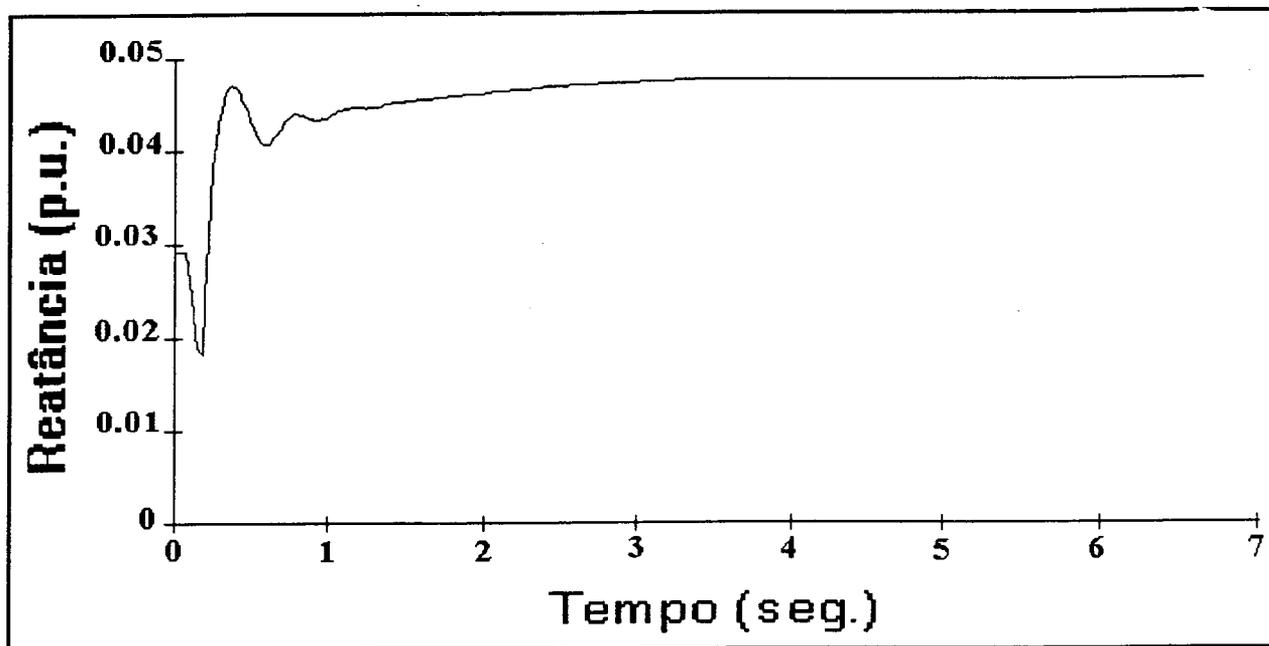


FIGURA 61 - Reatância total da linha compensada em função do tempo. Sistema com CSC.

Este é também um resultado importante e novo em sistemas CA. A exemplo dos elos de transmissão em corrente contínua, agora o fluxo de potência CA também pode ser controlado. É claro que um sistema radial como o do exemplo não é o ideal para este tipo de aplicação. Mas, certamente a adoção desta estratégia em sistemas malhados poderá ser muito útil no que diz respeito à distribuição de fluxos, seja para redução de perdas ou mesmo para atender a requisitos especiais de empresas distintas que tenham sistemas interligados.

6.4. - Caso Teste 3.

Este exemplo é apenas uma extensão do primeiro. O sistema utilizado é o da figura 57. A simulação consiste na aplicação de um curto-circuito trifásico na linha não compensada entre as barras 4 e 5, próximo à barra 4, seguida da abertura da linha. O Compensador opera com o mesmo

controlador do exemplo 1 (figura 50) e a máquina síncrona 1 não tem sinal adicional. Os resultados são apresentados nas figuras 62 e 63. O sistema é instável quando simulado sem o controle do CSC e estável quando este é representado.

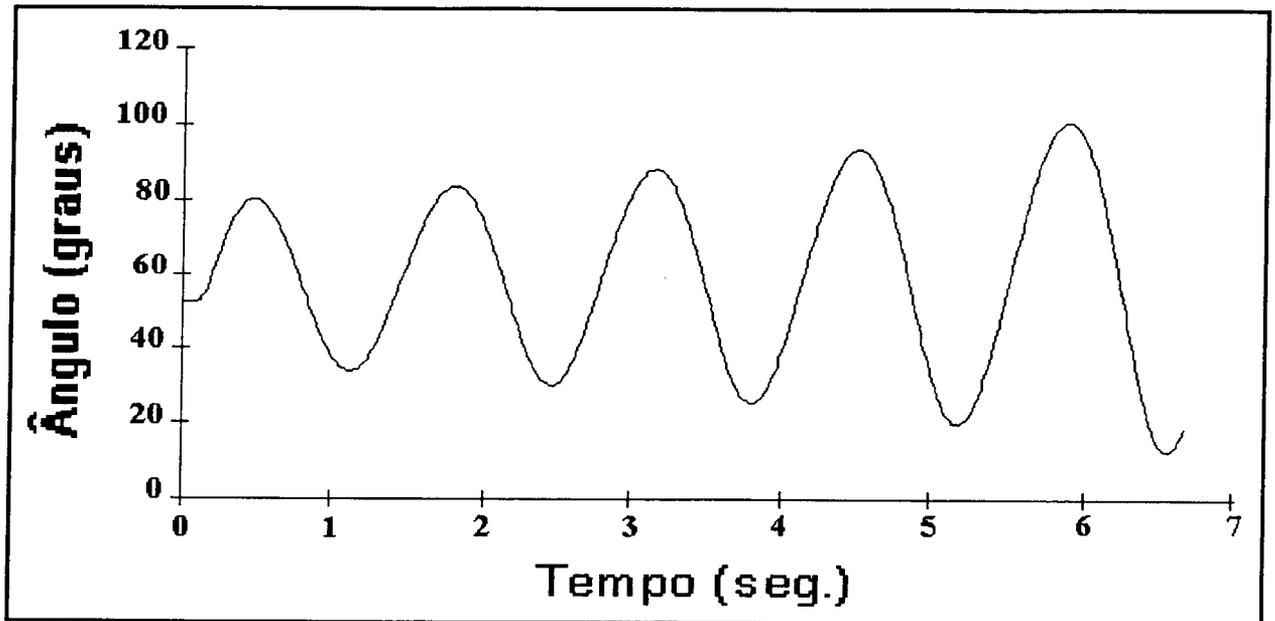


FIGURA 62 - Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com compensação fixa (50%).

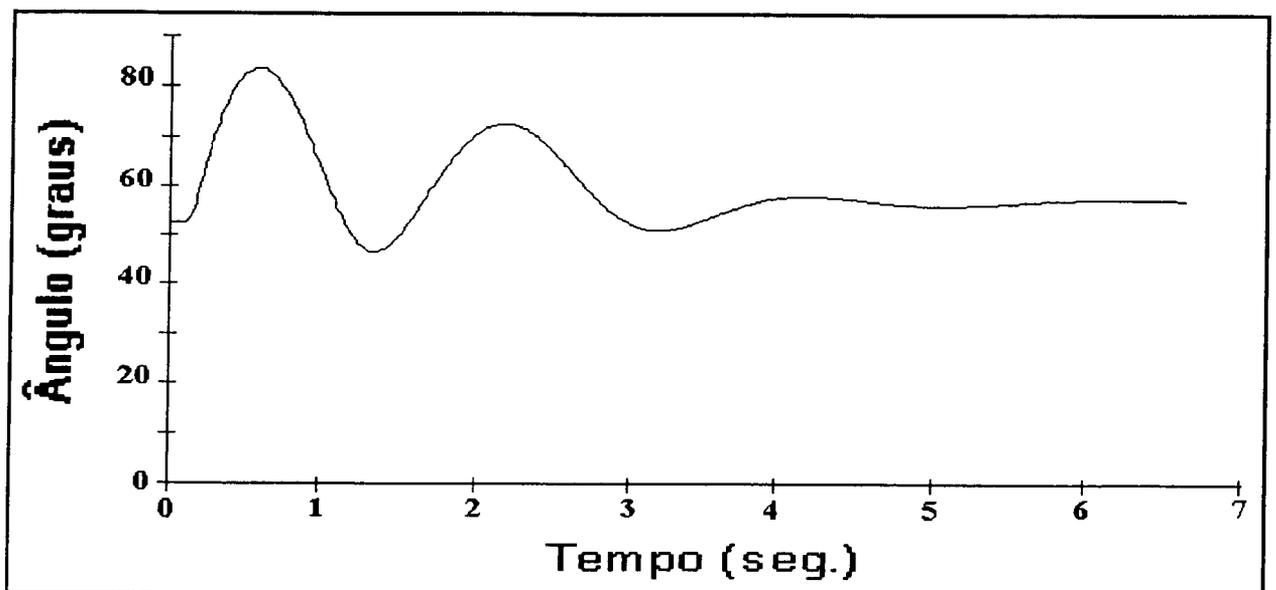


FIGURA 63 - Ângulo da máquina 1 em relação à barra infinita em função do tempo. Sistema com CSC (30% a 70%).

6.5. Conclusões.

Dos três casos exemplos apresentados podem ser destacadas as seguintes conclusões:

- a) Quanto à consistência dos modelos propostos, pode-se dizer que estes, mesmo considerando as simplificações adotadas nos casos exemplos, atendem aos objetivos e necessidades de estudos para verificação da atratividade técnica do emprego da compensação série controlada.
- b) Quanto aos benefícios do CSC, mostrou-se claramente como se pode, ao mesmo tempo, controlar fluxos de potência em linhas CA, além de aumentar os limites de estabilidade do sistema de potência.
- c) Uma conclusão interessante é extraída do exemplo 1, no qual mostrou-se que o CSC pode amortecer oscilações de potência mesmo que a modulação do CSC seja efetuada apenas no sentido de redução do nível de compensação.

Este é um resultado importante porque conduz naturalmente à constatação de que, com um esquema flexível de compensação série, o montante total de MVAR necessário para permitir determinada capacidade de transmissão pode ser bem inferior ao que seria necessário com a adoção de compensação série fixa.

Uma vez constatados a consistência dos modelos e os benefícios potenciais do CSC, serão apresentados, no Capítulo seguinte, os principais resultados de um estudo de planejamento da expansão de um

sistema de transmissão com previsão de utilização de compensação série em linhas de 500 kV para aumento da capacidade de transporte de energia.

7. - APLICAÇÃO A UM SISTEMA ELÉTRICO DE GRANDE PORTE.

7.1. - Introdução.

Os três primeiros testes constaram de um sistema elétrico simples e didático, com o objetivo de validar os modelos desenvolvidos e avaliar o potencial de utilização do Compensador Série Controlado como elemento capaz de propiciar o controle de fluxo de potência em interligações e introduzir amortecimento para oscilações eletromecânicas.

Concluída esta etapa, torna-se interessante verificar o comportamento do CSC em um sistema elétrico real e de grande porte. Tomou-se, desta forma, o sistema Norte-Nordeste brasileiro [29].

Uma vista geral deste sistema é apresentado na figura 64, destacando-se o sistema de transmissão da Eletronorte e os pontos de interligação com o sistema Chesf nas subestações de Boa Esperança e Teresina. O sistema atual conta com cerca de 30 centrais geradoras com uma capacidade total de aproximadamente 11500 MW, 331 subestações e cerca de 140 linhas de transmissão para atender uma carga total de 7500 MW.

A figura 65 apresenta o atual sistema de transmissão em 500 kV da Eletronorte. O dois sistemas são interligados através da LT Presidente Dutra (Eletronorte) / Boa Esperança (Chesf). Este circuito propicia o intercâmbio de energia entre os sistemas Norte e Nordeste em ambas as direções.

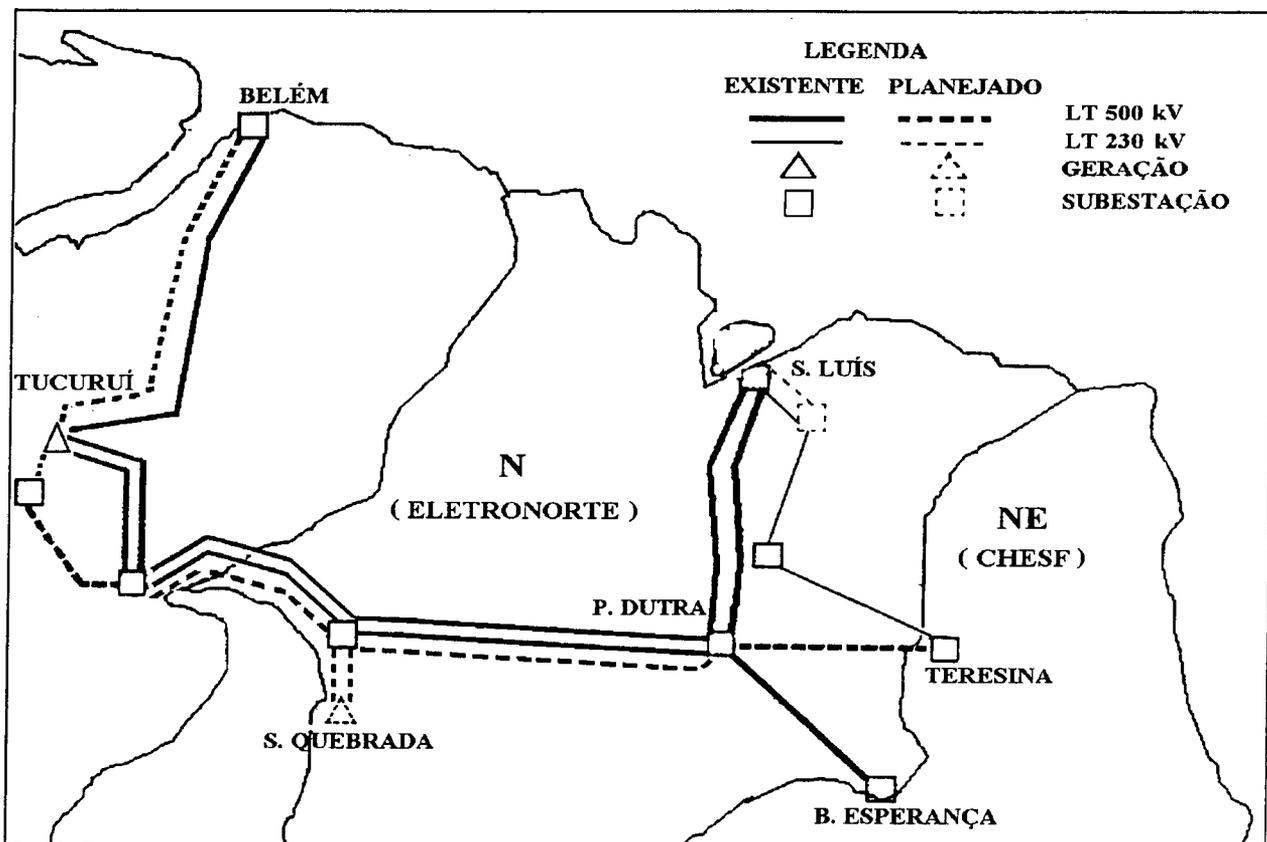


FIGURA 64 - Diagrama eletrogeográfico do sistema Norte-Nordeste.

O quadro 4 apresenta os valores máximos de intercâmbio de potência e energia para os próximos oito anos. Estes resultados foram obtidos através de estudos de estabilidade eletromecânica, considerando faltas monofásicas seguidas de aberturas permanentes das linhas de 500 kV.

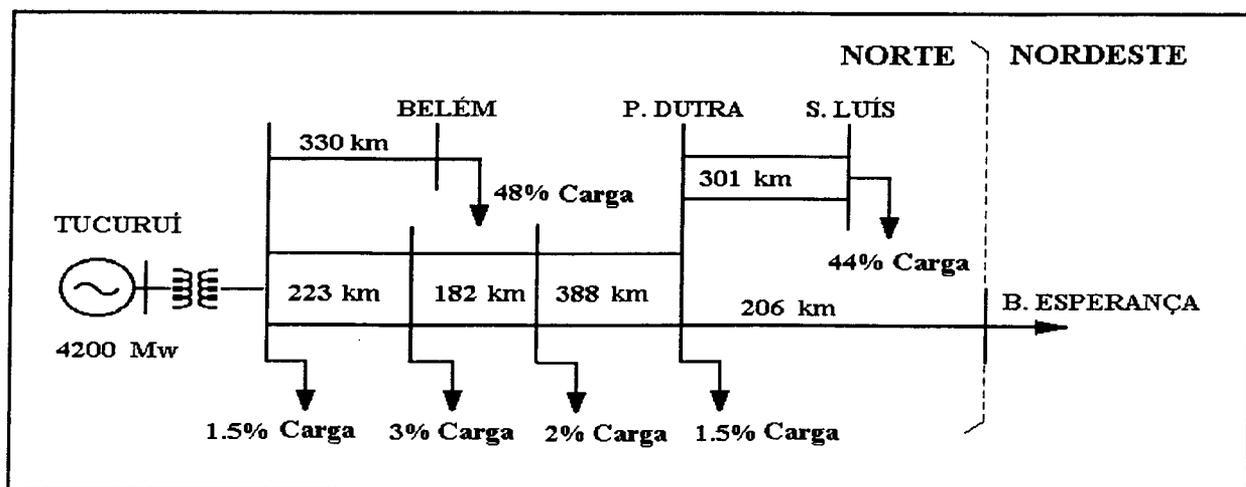


FIGURA 65 - Diagrama unifilar do sistema de 500 kV atual.

ANO	CONDIÇÃO DE CARGA				ENERGIA (MW.ano)	
	PESADA (MW)		LEVE (MW)		SENTIDO	
	N/NE	NE/N	N/NE	NE/N	N/NE	NE/N
1994	351	840	623	700	465	780
1995	489	700	644	800	555	740
1996	515	700	574	850	540	760
1997	560	500	515	1000	542	710
1998	500	500	870	1000	655	710
1999	450	500	850	1000	617	710
2000	350	500	850	1000	559	710
2001	150	800	850	1250	442	990

QUADRO 4 - Valores máximos de intercâmbio

A figura 66 apresenta o sistema com parte da expansão planejada para entrar em operação até o ano 2000. Os principais reforços de geração e transmissão são apresentados no quadro 5.

Observa-se que uma grande quantidade de compensação série fixa está prevista para o ano 2002 nas linhas de 500 kV. De acordo com este planejamento, níveis de compensação acima de 50% deverão ser usados em alguns trechos de linha para assegurar um desempenho estável da interligação após a ocorrência de distúrbios.

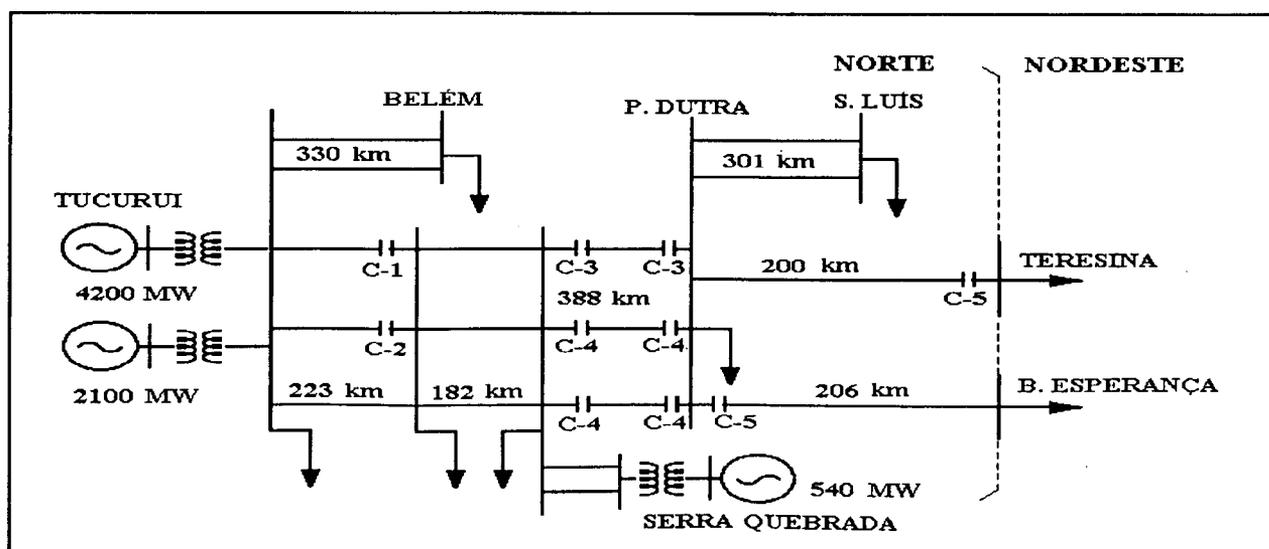


FIGURA 66 - Sistema de 500 kV planejado.

REFORÇO	NOME	MVA		ANO
GERAÇÃO	TUCURUI	2100		2002
	S. QUEBRADA	540		2002
LINHAS DE TRANSMISSÃO	CIRCUITO	TENSÃO (kV)		ANO
	TUCURUI / BELEM	500		1997
	TUCURUI / TERESINA	500		2002
COMPENSAÇÃO SÉRIE	NOME	MVA _r	%	ANO
	C-1	350	30	2002
	C-2	290	30	2002
	C-3	390	27,5	2002
	C-4	315	27,5	2002
	C-5	355	50	2002

QUADRO 5 - Principais reforços planejados.

Tendo-se em mente as vantagens técnicas da compensação série controlada em relação à convencional, conforme apresentado nos tópicos anteriores e ilustrado nos casos exemplos 1,2 e 3, torna-se natural analisar e comparar o desempenho do sistema de transmissão considerando as duas modalidades de compensação série: fixa e controlável.

Antes de apresentar propriamente os resultados, é importante ressaltar que a configuração e valores de compensação série fixa planejados para o sistema Norte-Nordeste são oriundos de estudos realizados em 1983. Esta configuração e ou valores podem, portanto, ser questionados, uma vez que é natural esperar-se que algumas premissas e condicionantes daqueles estudos não sejam válidas atualmente. Estes estudos certamente precisariam ser revisados de forma a se atualizar a configuração representativa da evolução do sistema de 500 kV.

Como este trabalho não tem como objetivo, e muito menos como pretensão, recomendar nova configuração ou mesmo níveis de compensação série, são adotados os valores disponíveis conforme o quadro 5. Isto não imputa ao trabalho nenhum prejuízo considerável, uma vez que a análise é comparativa e tem como objetivo principal avaliar o potencial de aplicação da compensação série controlada, confirmando ou não as esperadas vantagens deste esquema em relação à compensação série convencional (fixa).

Este trabalho pode ser visto como uma referência inicial para futuros estudos de expansão da transmissão que contemplem a alternativa de compensação série.

7.2. - Modelos Utilizados.

O sistema Norte-Nordeste com a configuração básica do ano 2002, apresentado no item anterior, foi integralmente representado e utilizado nas simulações de avaliação da compensação série fixa. Resultados destas simulações mostraram que este sistema apresenta, dependendo principalmente do ponto de operação, um baixo valor de potência sincronizante (tendência a instabilidade no primeiro "swing") e também, em certos casos, sinais de deficiência de amortecimento para oscilações entre os geradores da Eletronorte e os da Chesf (oscilações entre áreas).

Este fato motivou a utilização do modelo completo de controlador do CSC apresentado no Capítulo 5 (figura 37), ou seja, com a representação dos laços de sincronização e amortecimento. O fluxo de potência ativa na linha de transmissão compensada foi adotado como

entrada para o sinal adicional. Como será visto em seqüência, este controlador será utilizado ora no modo de impedância constante, ora no modo de potência constante controlando o fluxo de potência ativa na linha compensada.

Por se tratar de um estudo de viabilidade técnica preliminar, optou-se pela representação mais simples da unidade de distribuição de reatância, que é o limitador estático, com variação contínua do nível de compensação e apenas na faixa capacitiva. A figura 67 apresenta o modelo concebido nesta avaliação para representar um TCSC, mas que pode também representar aproximadamente um TSSC desde que este seja constituído de um número bastante elevado de pequenos módulos. O Apêndice C apresenta o procedimento de ajuste e os valores dos parâmetros usados nas simulações.

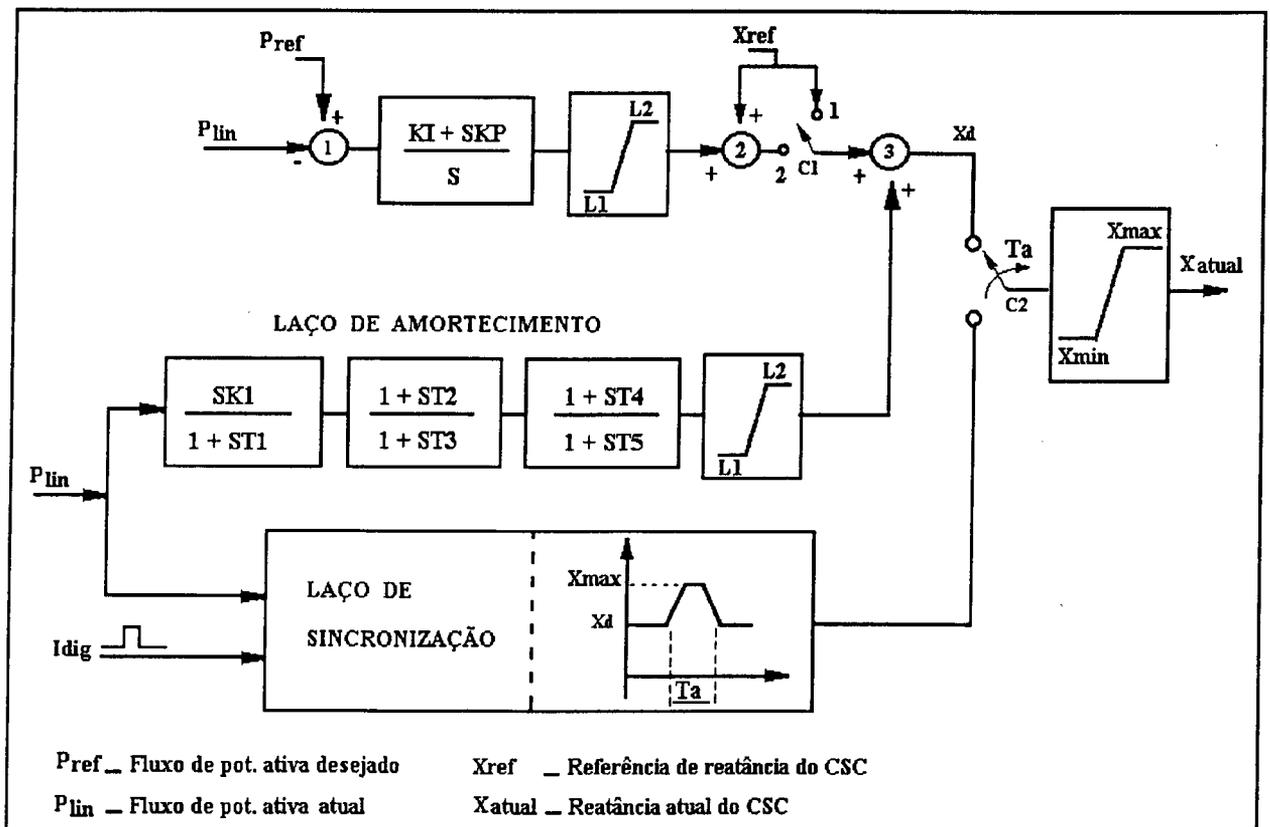


FIGURA 67 - Modelo de CSC utilizado.

7.3. - Resultados Obtidos.

A avaliação técnica do desempenho do CSC foi realizada com objetivos distintos em duas partes do sistema de transmissão em 500 kV. No trecho de linha entre as subestações Tucuruí e P. Dutra, o CSC foi introduzido com o objetivo de aumentar os limites de transmissão desta interligação. Neste caso, o CSC foi simulado em modo de controle de impedância (chave C1 na posição 1). Nas linhas que interligam os sistemas Norte e Nordeste, ou seja, as linhas P. Dutra / B. Esperança e P. Dutra / Teresina, o CSC foi introduzido para permitir o controle de fluxo de potência (chave C1 na posição 2) e também para aumentar os limites de transmissão de potência.

7.3.1. - CSC para Incremento de Transmissão de Potência.

Os níveis de compensação série utilizados são apresentados no quadro 6. Os níveis de compensação série nos circuitos de interligação com a Chesf foram mantidos fixos em 50%.

COMP.	NÍVEL (%)	
	MIN.	MAX.
C-1	30	70
C-2	30	70
C-3	15	35
C-4	15	35

QUADRO 6 - Níveis de compensação série adotados.

Duas configurações básicas foram selecionadas para exemplificar os principais resultados do estudo. A primeira corresponde aos anos de 2002 e 2003 com três circuitos de 500 kV entre Tucuruí e P. Dutra. Considerando a pior contingência nestes circuitos, o intercâmbio de potência do Norte para o Nordeste foi aumentado progressivamente até que o sistema atingisse seu limite de estabilidade (transitória neste caso) para ambos os casos, ou seja, com compensação fixa e com compensação variável.

As figuras 68 e 69 ilustram os resultados. Verifica-se que foi possível aumentar o limite de transmissão de potência, de 2050 MW para 2300 MW. A figura 70 apresenta a saída do CSC, ou seja, a modulação do nível de compensação. Partindo de 50% (valor de regime permanente), o nível de compensação é rapidamente aumentado para o seu valor máximo de 70%, caracterizando assim a atuação do laço de sincronização. Em seguida, a compensação é modulada segundo uma adequada relação de ganho de fase entre a saída do CSC e o sinal de potência ativa, fornecendo amortecimento ao sistema (laço de amortecimento).

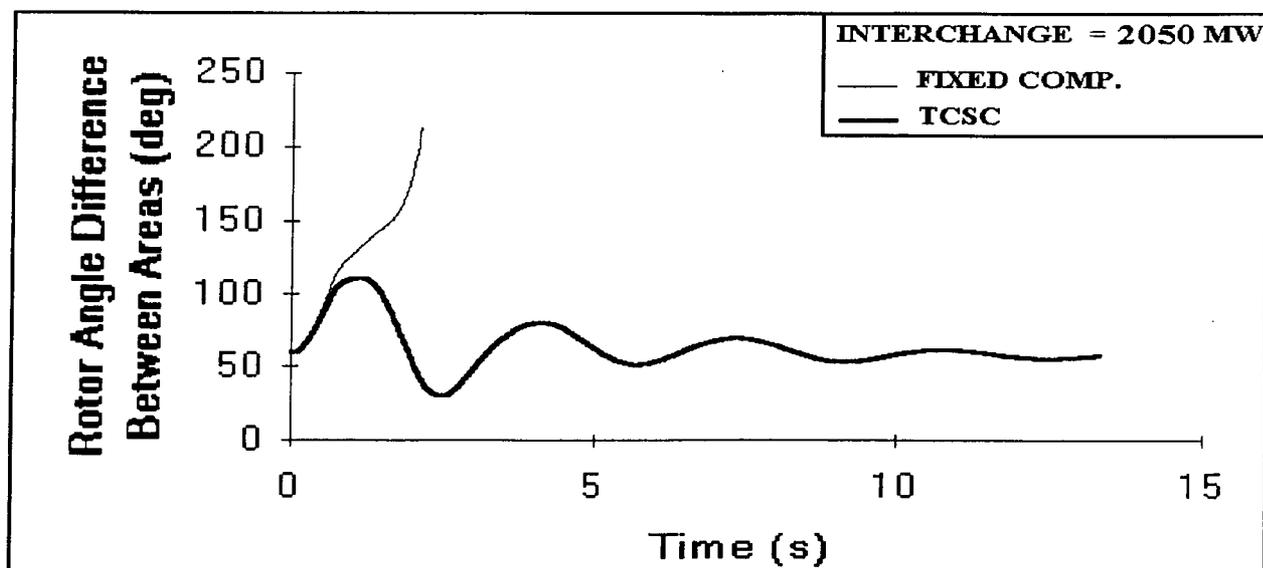


FIGURA 68 - Curto-circuito monofásico com religamento tripolar.

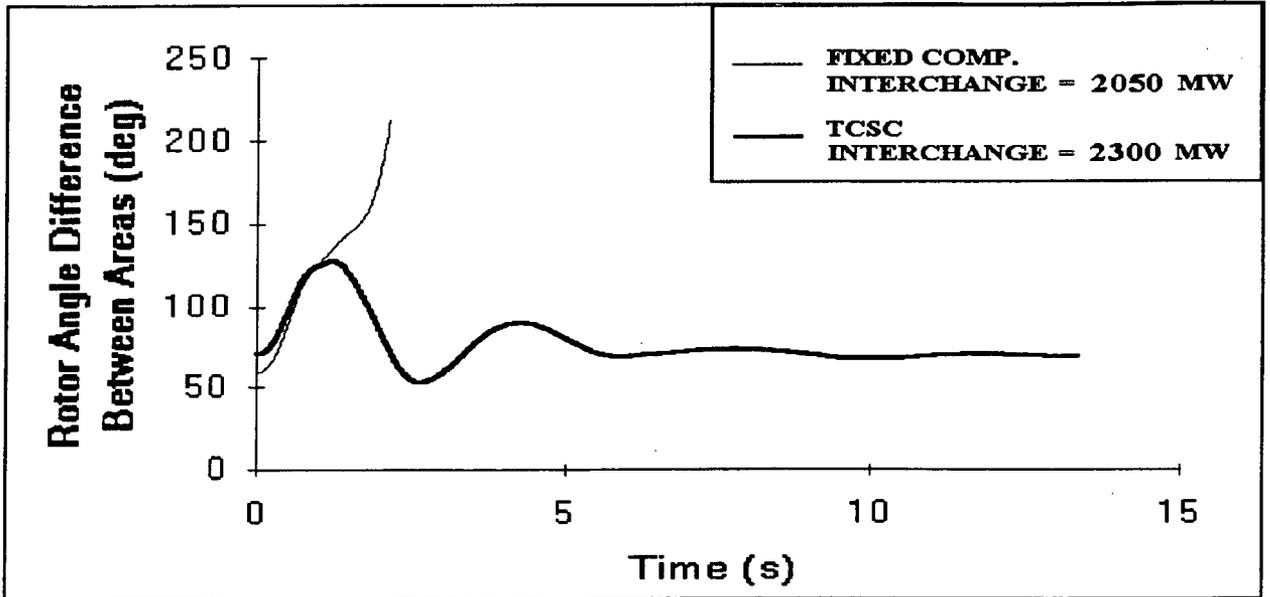


FIGURA 69 - Curto-circuito monofásico com religamento tripolar.

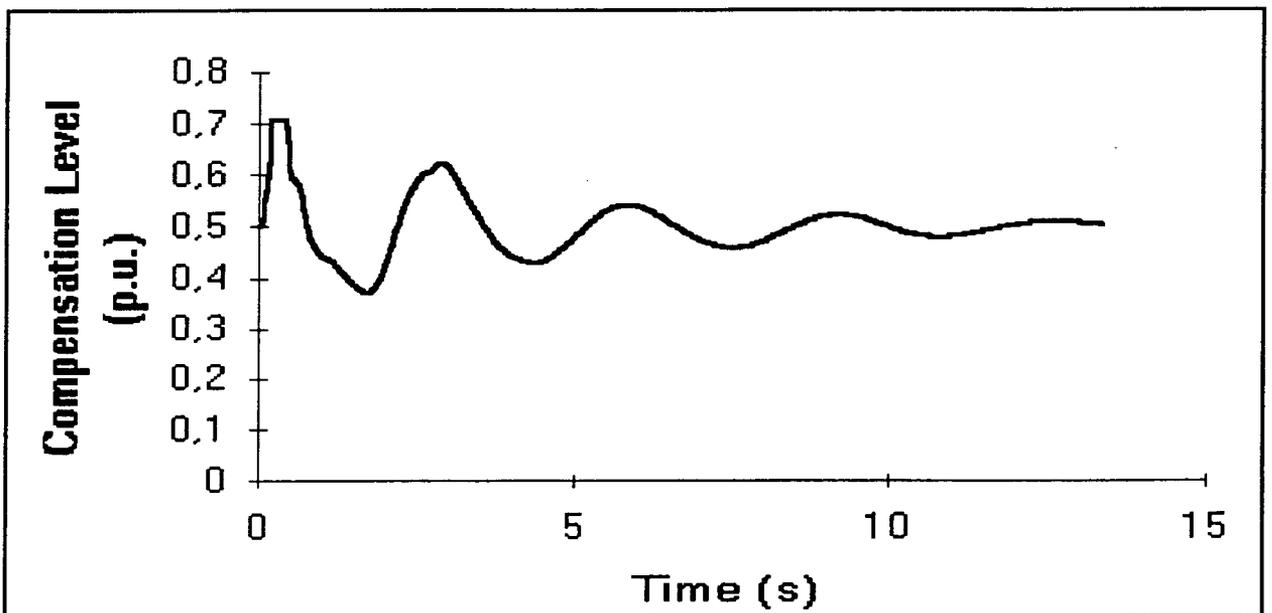


FIGURA 70 - Curto-circuito monofásico com religamento tripolar.
Intercâmbio de 2300 MW.

A outra configuração analisada consiste do sistema apresentado na figura 66, mas com apenas 2 circuitos de 500 kV entre Tucuruí e P. Dutra. O objetivo foi o de assegurar um desempenho adequado do

sistema para o evento de curto-circuito monofásico seguido de religamento tripolar com sucesso.

Para enfatizar o efeito de amortecimento de oscilações proporcionado pelo CSC, o sistema, em regime permanente e com compensação série fixa, foi “estressado” de forma a apresentar oscilações não amortecidas para este tipo de contingência.

A figura 71 ilustra os resultados. O sistema com compensação série fixa é instável (instabilidade oscilatória), mas é estável e bem amortecido com a utilização do CSC. Estes resultados podem indicar que a construção de um terceiro circuito de 500 kV, com 800 km de extensão, pode ser adiado por no mínimo 2 anos. Estudos mais abrangentes devem ser realizados com o objetivo de quantificar, sob o ponto de vista econômico, os benefícios técnicos auferidos com a utilização desta modalidade de compensação.

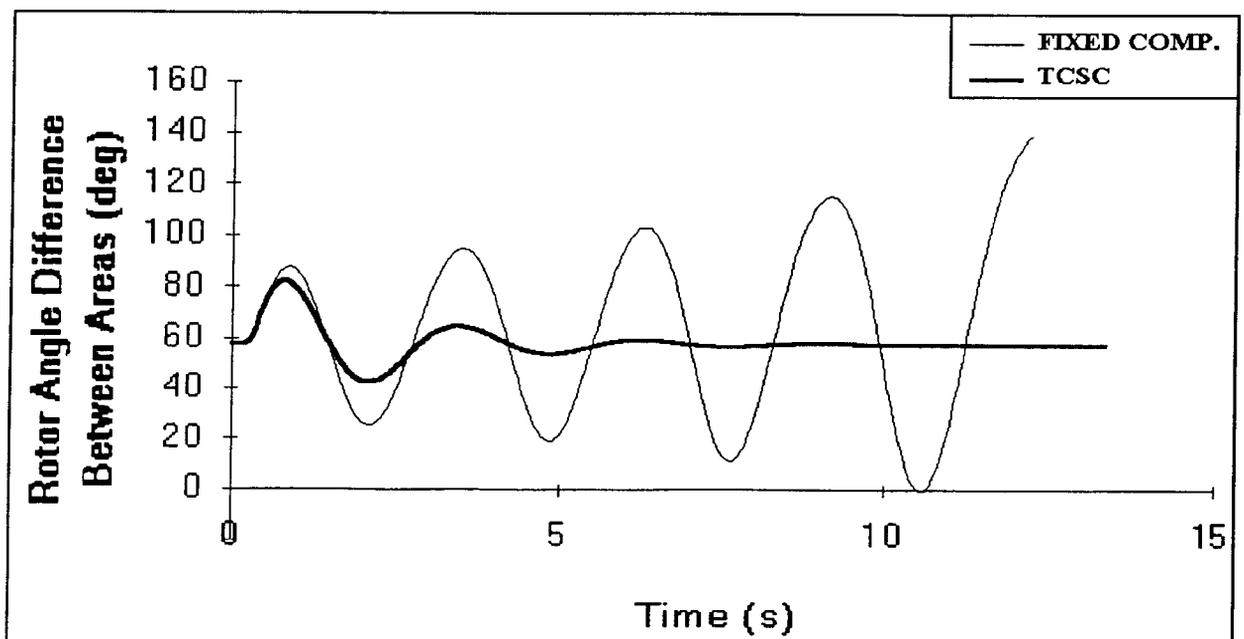


FIGURA 71 - Curto-circuito monofásico com religamento tripolar.

7.3.2. - CSC para Controle de Fluxo de Potência e Incremento de Transmissão de Potência.

Conforme já mencionado, esta aplicação se deu nas linhas de interligação com o sistema Chesf. Com compensação série fixa, a linha P. Dutra / Teresina assume cerca de 80% do intercâmbio total no sentido Norte para Nordeste. Já no sentido oposto, isto passa a ocorrer com a linha P. Dutra / B. Esperança. Além disso, certas condições operativas podem provocar o surgimento de fluxos inadvertidos. Nestes casos, por exemplo, parte da potência que flui do Norte para o Nordeste por uma linha, retorna ao Norte pela outra linha. Estas situações são, naturalmente, indesejáveis e se constituem em claros indicativos de que a compensação adotada até então deve ser revista.

Neste contexto, o CSC aparece como uma alternativa que merece ser avaliada. Através de um simples controlador PI (proporcional-integral), aplicado ao CSC, pode-se obter a uma melhor distribuição de fluxos nos dois circuitos. A simulação aqui apresentada exemplifica o controle de fluxo de potência efetuado pelo CSC, além de evidenciar seus benefícios ao introduzir amortecimento no sistema.

Alguns resultados são apresentados na figura 72 para a simulação de um curto-circuito monofásico em P. Dutra seguido de rejeição parcial de carga. A compensação série da linha P. Dutra / Teresina foi mantida fixa e um CSC com faixa de controle na região capacitiva entre 30% e 70% foi adotado para a linha P. Dutra / B. Esperança.

No caso 1 da figura 72 tem-se o sistema original com compensação fixa e nota-se que o mesmo é instável para esta contingência. No caso 2 o

sistema foi simulado com o CSC atuando apenas para incremento dos limites de estabilidade (modo de controle de impedância). Nota-se que o sistema é estável mas o fluxo de potência na linha P. Dutra / B. Esperança não é mantido no seu valor de pré-falta. Já no caso 3, com a utilização do CSC em modo de controle de potência; ambos os benefícios estão presentes. O sistema é estável e o fluxo na linha em questão retorna ao seu valor de pré-falta (valor desejado).

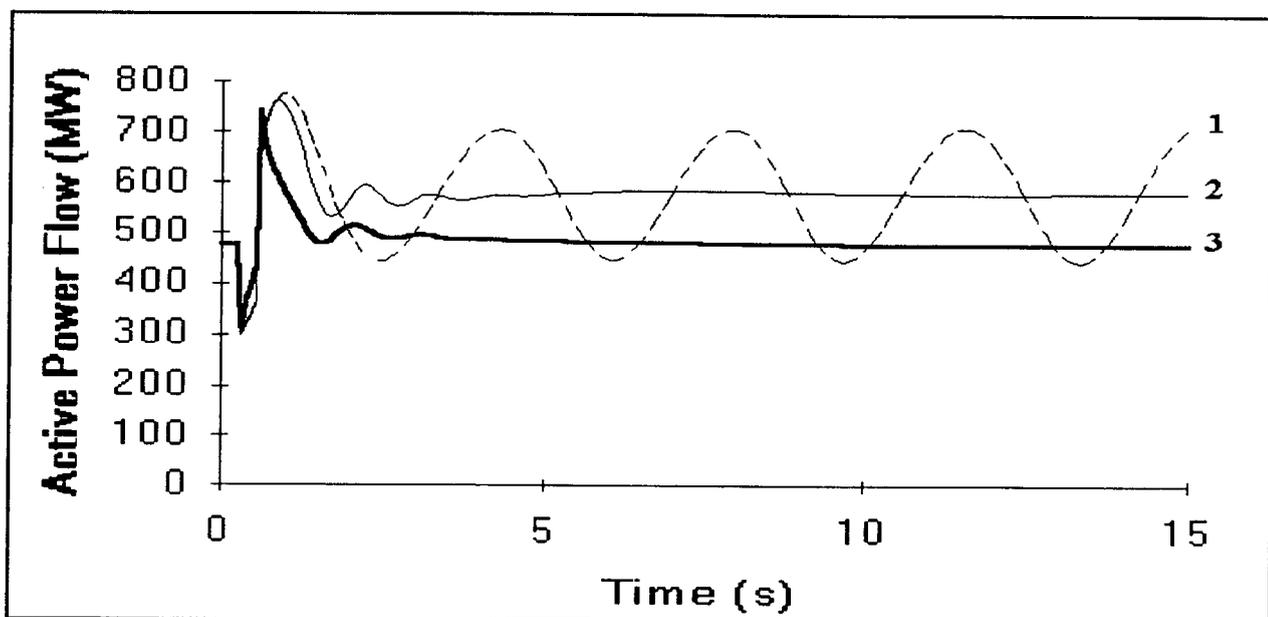


FIGURA 72 - Curto-circuito monofásico seguido de rejeição de carga:
 1- Compensação fixa; 2- CSC para estabilidade; 3- CSC para estabilidade e controle de fluxo de potência.

7.4. - Conclusões.

Este Capítulo apresentou os aspectos e resultados relevantes de uma comparação técnica entre compensação série fixa e controlável, aplicada a um sistema de transmissão real e de grande porte, na tensão de 500 kV. As características principais do sistema de potência atual e de sua

planejada expansão foram discutidas, destacando-se a aplicação de compensação série para aumentar a capacidade de transmissão do sistema.

O sistema de controle para o CSC proposto no Capítulo 5 foi utilizado em sua forma completa, ou seja, com representação dos laços de sincronização e amortecimento. A unidade de distribuição de reatância foi representada pelo modelo mais simples por se tratar de um estudo de viabilidade técnica preliminar do CSC. Entretanto, é importante dizer que a implementação de um modelo mais realista para a unidade de distribuição de reatância, como os modelos 2 e 3 apresentados no Capítulo 5, requer apenas um pequeno esforço adicional de simulação.

Os controladores propostos foram ajustados e usados para avaliar as duas principais possibilidades de aplicação para a compensação série controlável: controle de fluxo de potência e aumento da capacidade de transmissão (melhoria de estabilidade).

A análise comparativa mostrou que o CSC apresenta muitos atributos desejáveis. Em comparação com a compensação série fixa, os principais benefícios do CSC foram:

- a) **Aumento da capacidade de transmissão de potência** - Duas diferentes configurações do sistema foram estudadas. Em uma delas, o TCSC propiciou um ganho de 300 MW na capacidade de transmissão. No outro caso, garantiu-se uma segura operação do sistema próximo aos limites térmicos das linhas de transmissão, sinalizando assim para a possibilidade de se postergar, por dois ou

mais anos, a construção de um terceiro circuito de 500 kV com 800 km de extensão.

b) Controle de fluxo de potência - Este caso mostrou a habilidade do TCSC para promover o controle de fluxo de potência, na configuração do sistema com dois circuitos de 500 kV conectando as áreas Norte e Nordeste. Fluxos de potência inadvertidos podem ser evitados e uma divisão mais adequada da potência transmitida por caminhos paralelos é obtida. Adicionalmente, amortecimento para oscilações de potência pode ser obtido caso o controlador proposto na figura 67 seja utilizado em modo de controle de potência com o sinal adicional ativo.

Um outro ponto a ser considerado é que o nível máximo de compensação usado neste estudo foi de 70%. Este limite superior pode ser aumentado (próximo de 100%) com o TCSC, já que este dispositivo provê meios para a mitigação de ressonância subsíncrona e outros problemas relacionados com altos níveis de compensação série convencional (fixa). É razoável esperar que, com níveis de compensação superiores a 70%, o ganho verificado na capacidade de transmissão possa ser aumentado consideravelmente.

O Capítulo seguinte é dedicado ao encerramento deste trabalho. Nele são revistas as principais conclusões e apontadas algumas sugestões para futuros desenvolvimentos na área de aplicação da tecnologia FACTS.

8. - CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.

8.1. - Conclusões Finais.

O desenvolvimento do tiristor de alta potência possibilitou, nas duas últimas décadas, um grande avanço tecnológico na área de transmissão de energia em corrente contínua em alta tensão (CCAT). Uma das principais razões do sucesso desta tecnologia de transmissão está associada ao seu alto grau de flexibilidade no tocante ao controle do fluxo de potência transmitida.

Com a crescente taxa de utilização de equipamentos baseados em eletrônica de potência deu-se início a um processo de transformação do sistema elétrico, originalmente eletromecânico, num sistema eletroeletrônico. Assim, o processo de substituição dos controladores e dispositivos eletromecânicos dos sistemas CA por equipamentos similares, porém mais rápidos e mais flexíveis, e a concepção de novos equipamentos para dotar os sistemas CA de níveis de flexibilidade comparáveis aos dos sistemas CC, deram origem ao conceito FACTS (Sistemas de Transmissão CA Flexíveis).

Os dispositivos FACTS em utilização no setor elétrico e também aqueles em desenvolvimento atuam no sistema de potência no sentido de atender os mais diversos requisitos operativos. Em geral, esta atuação se dá via o controle do ângulo de potência, da impedância ou da tensão das linhas de transmissão.

Alguns deles têm aplicações bem específicas como os filtros ativos de potência. Outros agem como elementos de proteção como os disjuntores rápidos e os limitadores de corrente de falta. Já os equipamentos para compensação de potência reativa, como os compensadores "shunt" e série, podem ser considerados como controladores de fluxo de potência.

Estudos até então desenvolvidos e relatados na literatura técnica indicam que, do ponto de vista da relação custo/benefício, os controladores de fluxo de potência com tecnologia FACTS são os mais promissores. Três equipamentos desta categoria, os Compensadores Série Controlados (CSC), se encontram já em operação nos EUA desde o ano de 1991.

Considerando as reais possibilidades de utilização de Compensadores Série Controlados no sistema elétrico brasileiro, este trabalho se dedicou a uma análise mais detalhada destes equipamentos, passando pela avaliação de suas características operativas, e à proposição de modelos para serem usados em programas digitais de estudos de sistemas de potência.

Esta análise começou por mostrar, de forma simples e didática, como a compensação série constituída de uma fonte de tensão controlável pode aumentar a capacidade de transporte de energia de um sistema de transmissão.

Em seqüência, o trabalho se concentrou na análise e discussão das características básicas de dois compensadores tipo CSC, o TCSC e o TSSC. A região operativa destes equipamentos foi determinada, identificando-se os diversos limites operativos dos mesmos, de forma a

subsidiar o trabalho de desenvolvimento e proposição do sistema de controle para o CSC.

As possibilidades de aplicação do CSC nos sistemas elétricos foram discutidas, constatando-se que o TCSC e o TSSC podem ser usados para o controle de fluxo de potência e para amortecimento de oscilações eletromecânicas. Além disso o TCSC, e apenas ele, pode ser usado para mitigação de ressonância subsíncrona, possibilitando a adoção de níveis bem mais elevados de compensação série (próximos de 100%). É importante lembrar que, com compensação série fixa, o nível máximo vem sendo limitado a 70% a fim de se evitar o surgimento de oscilações subsíncronas.

Em seqüência, o trabalho dedicou-se à proposição de modelos de CSC para estudos elétricos, notadamente fluxo de potência e estabilidade eletromecânica. Foi proposto um modelo genérico, adaptável a diversas configurações de CSC, no qual o grau de detalhamento pode ser escolhido em função dos objetivos e necessidades de cada estudo, tanto a nível de planejamento como de operação.

Utilizando informações obtidas junto a fabricantes, foram apresentadas quatro possibilidades para a representação da unidade de distribuição de reatância, parte fundamental do modelo e que é responsável pela adequação da saída desejada (reatância desejada) às características e valores nominais do equipamento, determinando assim os limites operativos do mesmo.

Os modelos propostos foram implementados em um programa de estabilidade eletromecânica, via simulação no domínio do tempo, e

testados em um sistema elétrico simples, constituído de duas máquinas. Constatou-se assim a adequação dos modelos para atender os objetivos e requisitos de estudos que contemplam o emprego de compensação série controlável.

Quanto aos benefícios do CSC, mostrou-se claramente como se pode, ao mesmo tempo, controlar fluxos de potência em linhas CA, além de aumentar os limites de estabilidade do sistema de potência.

Verificou-se também que o CSC pode amortecer oscilações de potência, mesmo que a modulação do mesmo seja efetuada apenas no sentido de redução do nível de compensação. Este é um resultado importante porque conduz naturalmente à constatação de que, com um esquema flexível de compensação série, o montante total de MVar necessário para permitir determinada capacidade de transmissão pode ser bem inferior ao que seria necessário com a adoção de compensação série fixa.

Finalmente, foram apresentados os aspectos e resultados relevantes de uma comparação técnica entre compensação série fixa e controlável, aplicada a um sistema de transmissão real e de grande porte, na tensão de 500 kV, utilizando os modelos de CSC propostos neste trabalho.

Trata-se de um estudo pioneiro no qual as características principais do sistema de potência atual e de sua planejada expansão foram discutidas, destacando-se a análise da viabilidade técnica da aplicação de compensação série controlável para aumentar a capacidade de transmissão do sistema.

Uma vez mais, a consistência dos modelos e os esperados benefícios do CSC, em termos de controle de fluxo de potência e aumento da capacidade de transporte de energia, foram constatados.

Ressalta-se, entretanto, a necessidade de aprofundamento do estudo realizado, contemplando, principalmente, a análise de atratividade econômica da alternativa de utilização CSC, para subsidiar a escolha entre as duas modalidades de compensação. Conforme indicado no trabalho, é bem provável que a maioria das aplicações devem convergir para a adoção de um esquema misto de compensação, sendo a parte convencional (fixa) predominante, por ser de custo inferior e porque os benefícios da CSC podem ser auferidos tornando controlável apenas uma pequena parcela da compensação série total.

Estudos mais recentes [15] têm mostrado que esta parcela gira em torno de 10% a 20% do montante total de compensação. O valor exato deve, naturalmente, ser obtido de estudos mais apurados, necessariamente realizados após a fase de viabilidade técnica. Para tais estudos, recomenda-se a utilização dos modelos completos propostos no Capítulo 5, onde a unidade de distribuição de reatância deve ser considerada e representada de acordo com as características reais do equipamento, dados estes que podem ser extraídos de informações de fabricantes.

8.2. - Sugestões para Futuros Trabalhos.

Como sugestões para novos desenvolvimentos surgem naturalmente as seguintes proposições:

a) - **Compensação Série Controlada.**

Com relação à compensação série controlada, pode-se dizer que o seu desempenho técnico é inquestionável, ainda mais que a tecnologia envolvida é praticamente a mesma utilizada nos compensadores estáticos de reativos. Entretanto, três questões não abordadas neste trabalho são fundamentais para o sucesso da utilização desta tecnologia. São elas:

- ♦ **Proteção** - O sistema de proteção é parte fundamental de qualquer projeto de compensação série. Sendo a compensação controlada, é natural esperar-se que a filosofia de proteção seja, em alguns aspectos, diferente da que é utilizada para a compensação fixa. Os trabalhos [12,16] podem servir como referências iniciais para este estudo.

- ♦ **Ajuste do sistema de controle** - Conforme já mencionado, este trabalho não desenvolveu nenhuma ferramenta ou mesmo uma metodologia sistemática para o ajuste dos parâmetros dos controladores dos CSC's. Esta tarefa é fundamental para possibilitar a escolha dos locais mais favoráveis para se alocar os compensadores e para fazer o ajuste coordenado dos mesmos. Os trabalhos [24,25,26] são ótimas referências para este estudo.

- ♦ **Custos** - Esta é uma questão cada vez mais importante, principalmente considerando o contexto atual do setor elétrico, onde os empreendimentos devem, necessariamente, ter viabilidade econômica. É fundamental a quantificação dos benefícios agregados ao sistema com a compensação a fim de se atestar ou não a

atratividade do investimento. Sugere-se aqui o trabalho indicado em [27] como referência inicial para este estudo.

b) - Outros Dispositivos FACTS.

O sucesso dos novos dispositivos FACTS depende fortemente dos avanços das técnicas de controle e também da eletrônica de potência. Espera-se que o crescente desenvolvimento das válvulas a GTO, ou outro dispositivo como o IGBT, o MCT ou o SITH possa trazer um grande impulso à tecnologia FACTS como um todo nos próximos anos. A título de sugestão, dois equipamentos descritos no Capítulo 2 são indicados para trabalhos de desenvolvimento. São eles:

- ◆ **Compensador Universal** - Mais conhecido por UPFC (Unified Power Flow Control), este equipamento, que já existe a nível de protótipo e para baixa tensão, sinaliza com boas perspectivas de utilização comercial em um futuro próximo. Vem recebendo atenção especial dos principais fabricantes e centros de pesquisa do mundo elétrico. Como referência inicial é indicado o trabalho [28].

- ◆ **Gerador Estático de Potência Ativa** - Também já existente como protótipo, este equipamento também apresenta forte potencial para utilização nos próximos anos. Como referência inicial é indicado o trabalho [7].

9. - REFERÊNCIAS.

- [1] - Antônio G. G. Lima; Eurico S. Sobrinho; Márcio Szechtman - "Eletrônica de Potência: uma Revolução no Setor Elétrico." - Revista Eletricidade Moderna - ano XXII, número 244, jul./1994.
- [2] - Narain G. Hingorani - "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Systems" - Proceedings of the IEEE, vol. 76, número 4, abril de 1988.
- [3] - Narain G. Hingorani - "FACTS - Flexible AC Transmission Systems" - Workshop on the Future in High Voltage Transmission: Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Cincinnati, Ohio, novembro de 1990.
- [4] - "Pesquisa para Avaliação Preliminar da Tecnologia FACTS Aplicada na Exploração de Energia Elétrica na Região Amazônica" - Relatório Técnico - Convênio UFRJ/COPPE - ELETROBRÁS - 1992.
- [5] - E. Salgado, M. Schzetman, J.C. Oliveira, M. Drumond - "Some Aspects of FACTS Applications in Brazil" - Workshop on the Future in High Voltage Transmission: Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Cincinnati, Ohio, novembro de 1990.
- [6] - Matsuno, K.; Hasegawa, T.; e Que, Y. - "Development of Static Var Generator for Power Systems and its Applications Effects." -

IERE Workshop on Applications of Power Electronics to Power Facilities, set. 11-14/1990, Tokyo, pp. 69-93.

- [7] - Fujita, H. - "Effects of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Adapting in Power Systems" - IERE Workshop on Applications of Power Electronics to Power Facilities, nov./1990, pp. 240-249.
- [8] - Astakhov, J.N.; Antonova, N.P.; Venikov, V.A.; Lyskov, J.I.; Postolaty, V.M.; e Tchaly, G.V. - "USSR Study of Electrical Transmission Lines of Increased Capacity and Reduced Ecological Influence." - Electrical Power & Energy Systems, vol. 3, número 1, jan./1981, pp. 45-90.
- [9] - L. Gyugyi - "Solid State Control of AC Power Transmission" - Workshop on the Future in High Voltage Transmission: Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Cincinnati, Ohio, novembro de 1990.
- [10] - Antônio Guilherme G. Lima, Antônio Ricardo, Wo Wei Ping, Nelson Martins - "Sistemas de Transmissão CA Flexíveis" - Relatório Técnico - CEPEL - 1993.
- [11] - N. Christl; R. Hedin; K. Sadek; P. Lutzberger; P. E. Krause; S. M. McKenna; A. H. Montoya; D. Torgerson - "Advanced Series Compensation (ASC) with Thyristor Controlled Impedance." - CIGRÉ Session 1992.

- [12] - N. Christl, P. Luetzelberger, M. Pereira, K. Sadek, A. H. Montoya, D. R. Torgerson, B. A. Vossler - "Advanced Series Compensation with Variable Impedance" - Ibidem EPRI Workshop.
- [13] - ABB Transmission Technology Institute - "CSC Transient Stability Model." - Technical Report, May 23, 1994.
- [14] - E. Larsen, C. Bowler, B. Damsky, S. Nilson - "Benefits of Thyristor Controlled Series Compensation" - CIGRÉ 34 Session, Paris, 1992.
- [15] - Technical Report from CIGRÉ Working Group 14.18 - "Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) and Reactors (TCSR)" - jan./1994.
- [16] - A. H. Montoya, D. R. Torgerson, B.A. Vossler, W.Feldmann, G. Juette, K. Sadek, A. Schultz - "Advanced Series Compensation Kayenta Substation" - EPRI Workshop, The Future in High Voltage Transmission: Flexible AC Transmission Systems, Cincinnati, Ohio, novembro de 1990.
- [17] - R. M. Maliszewski, B. M. Pasternack, H. N. Scherer, M. Chamia, H. Frank, L. Paulsson - "Power Flow Control in a Highly Integrated Transmission Network" - Ibidem EPRI Workshop.
- [18] - Josimar Oliveira Silva - "Controle de Emergência em Sistemas Elétricos de Potência com Rejeição de Carga" - Tese de Mestrado, UFSC - 1992.

- [19] - Eduardo Henrique Ellery Filho - "Modelagem de Compensadores Estáticos para Estudos Dinâmicos à Frequência Industrial" - Tese de Mestrado, EFEI - 1985.
- [20] - Carlos A. Gama; Benjamin Zimler; Carlos E. Pereira; G. Sarcinelli Luz; José M. M. da Silva - "Desenvolvimento de um Programa de Análise Dinâmica de Sistemas de Potência (DINAM)." - III SEPOPE - Belo Horizonte, 1992.
- [21] - Benjamin Zimler; Carlos A. Gama; Carlos E. Pereira; Eduardo Henrique Filho; Walter M. da Silva - "Avaliação de Estabilidade Dinâmica e Ressonância Subsíncrona de Sistemas, por Determinação de Auto-Valores, Auto-Vetores e Coeficientes de Sensibilidade, Através do Programa Resub." - II SEPOPE - São Paulo, 1989.
- [22] - Nelson Martins & L. T. G. Lima, "Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small-Signal Electromechanical Stability Problems" - IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for Dynamic Performance, publication 90TH0292-3PWR, pp. 17-33, 1990.
- [23] - Aguinaldo Silveira e Silva - "Aspectos Dinâmicos do Controle de Sistemas de Potência." Notas de aula, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFSC, 1993.
- [24] - Nelson Martins; Hermínio J. C. Pinto; André Bianco; Nilo J. P. Macedo - "TCSC Control Structures for Line Power Scheduling

and Methods to determine their Location and to Damp System Oscillations." - IV SEPOPE - maio, 1994.

- [25] - A. J. A. Simões Costa; F. D. Freitas; A. S. Silva - "Determination of Globally Coordinated Settings for Power System Stabilizers and FACTS Devices." - International Conference on Power System Technology - Beijing, China, outubro/94.
- [26] - Glauco N. Taranto; Joe H. Chow; Hismam A. Othman - "Robust Decentralized Control Design for Damping Power System Oscillations." - N.York, 1994.
- [27] - A. Clerici; G. DI Manici; G. Testi; L. Valfre; L. Paris - "Means to Enhance the Capability of Existing Transmission Facilities" - CIGRÉ, Session 1992 - Paris.
- [28] - E. Lerch; D. Povh; R. Witzmann; B. Hlebcar; R. Mihalic - "Simulation and Performance Analysis of Unified Power Flow Controller" - CIGRÉ, Session 1994, Paris.
- [29] - Carlos A. Gama, J. L. Scavassa, W. M. Silva, J. M. Silva, J. R. Ponte - "Prospective Application of Advanced Series Compensation to Improve Transmission System Performance" - CIGRÉ, 35 Session, Paris, 1994.
- [30] - Ali Moshref, A. J. Rodolakis - "CYMSTAB - User's Guide & Reference Manual" - CYME INTERNATIONAL INC., Canada, 1993.

[31] - SIEMENS - "EMPT/ATP Model for Advanced Series Compensation" - User's Guide - 1993.

APÊNDICE A - Simulações no programa ATP.

A.1. - Introdução.

Conforme mencionado no item 4.5.1, um Compensador Série Controlado desenvolvido pela SIEMENS e instalado na subestação de Kayenta, de propriedade da empresa Americana WAPA (Western Area Power Administration), encontra-se em estágio de operação comercial desde o ano de 1991. Trata-se do primeiro equipamento deste gênero a entrar em operação e pode também ser considerado o primeiro equipamento da nova geração de dispositivos com tecnologia FACTS.

Esta parte do trabalho apresenta resultados de algumas simulações realizadas com o programa ATP (Estudos de Transitórios Eletromagnéticos), com o modelo do CSC fornecido pela SIEMENS. Três exemplos são apresentados, utilizando-se o sistema CA simplificado mostrado na figura 73 [31].

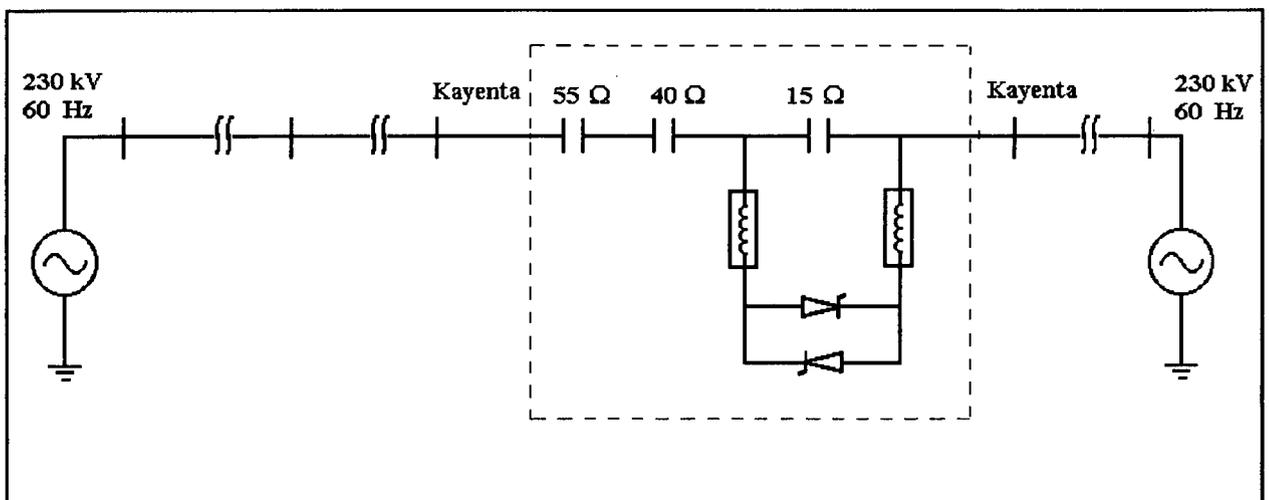


FIGURA 73 - Sistema simplificado representado no ATP.

As simulações foram escolhidas de forma a exemplificar três funções principais do CSC. Conforme dito no item 4.5.1, este equipamento pode operar em "controle de impedância", em "controle de corrente ou potência" e também no chamado modo de controle "bang bang". Este último modo de controle representa uma ação protetiva, atuando para situações de curto-circuito na linha. A válvula permanece totalmente em condução, levando o CSC a operar como um indutor.

A.2. - Caso Exemplo 1.

Este exemplo simula a aplicação de degrau no valor da impedância do CSC, estando este operando em modo de controle de impedância, sem nenhuma ação de regulação ("open loop control"). Desta forma, o degrau no valor de impedância pode ser diretamente realizado pela aplicação de um degrau no ângulo de disparo dos tiristores, conforme mostra a figura 74.

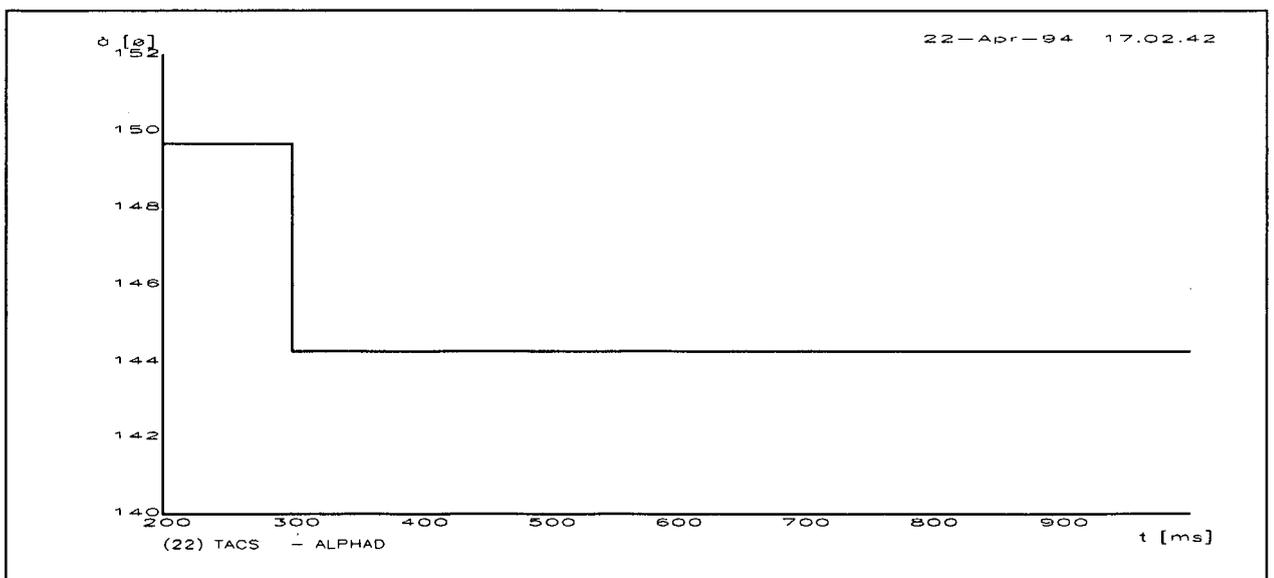


FIGURA 74 - Degrau na ordem de impedância do TCSC. Ângulo de disparo dos tiristores.

As figuras 75 a 79 ilustram as demais grandezas de interesse do sistema. A figura 79 mostra as formas de onda da corrente na válvula e no capacitor do CSC, já em condição de regime (mais de 500 ms após a aplicação do degrau).

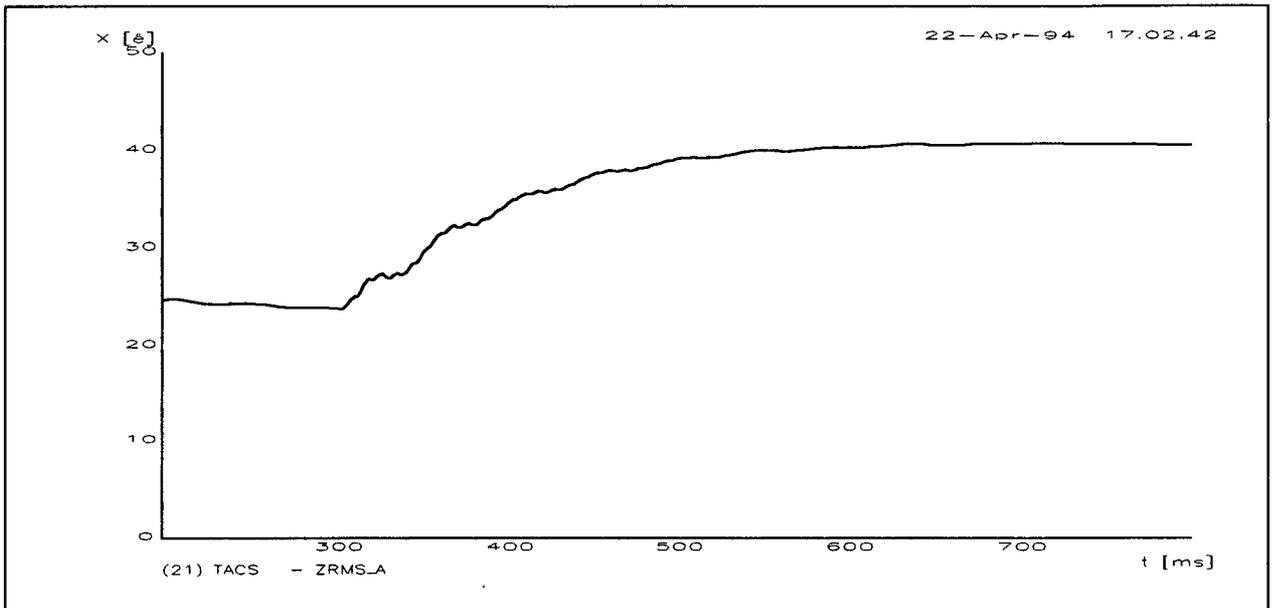


FIGURA 75 - Degrau na ordem de impedância do TCSC. Impedância do TCSC.

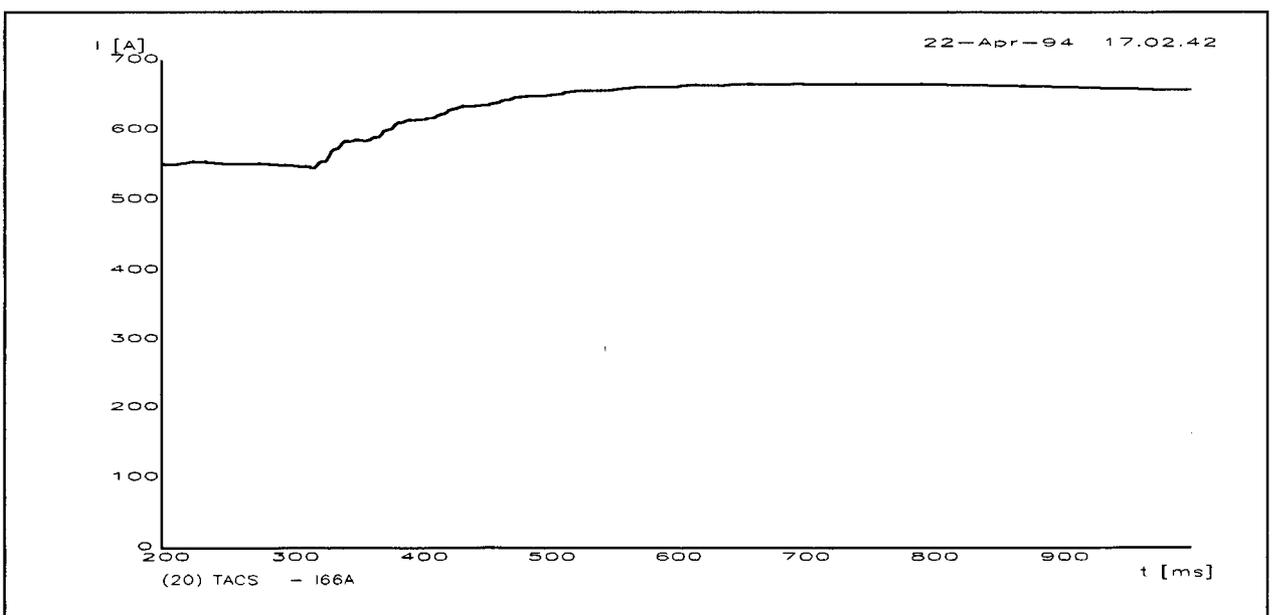


FIGURA 76 - Degrau na ordem de impedância do TCSC. Corrente na linha de transmissão.

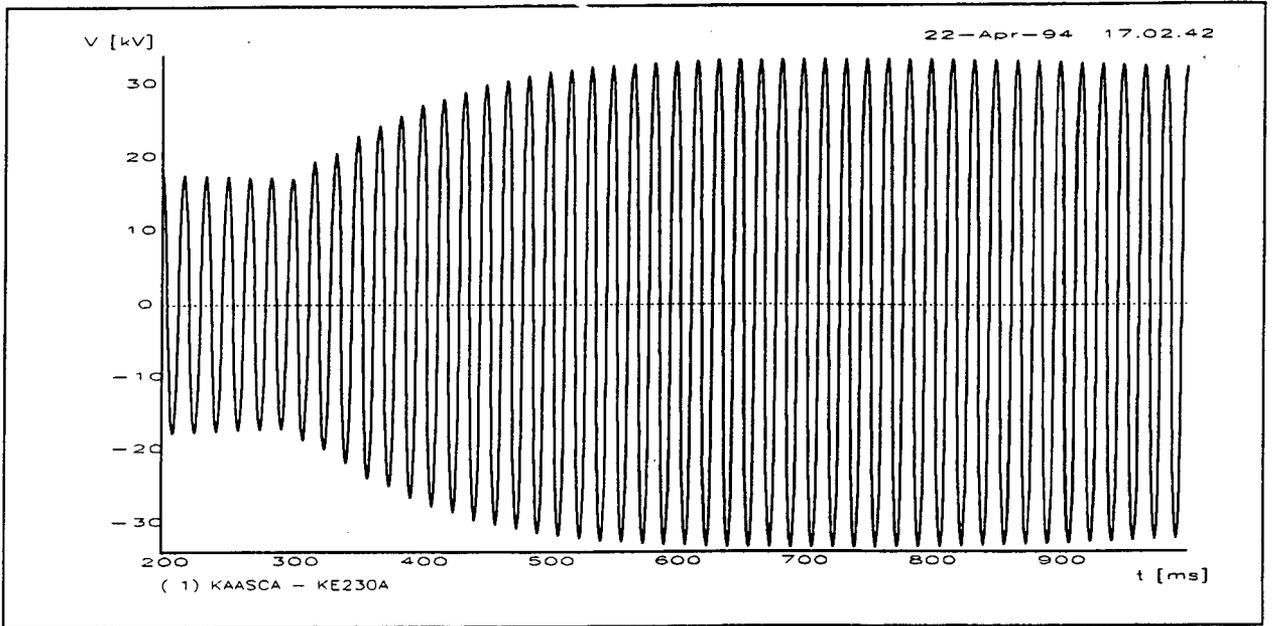


FIGURA 77 - Degrau na ordem de impedância do TCSC. Tensão no capacitor do TCSC.

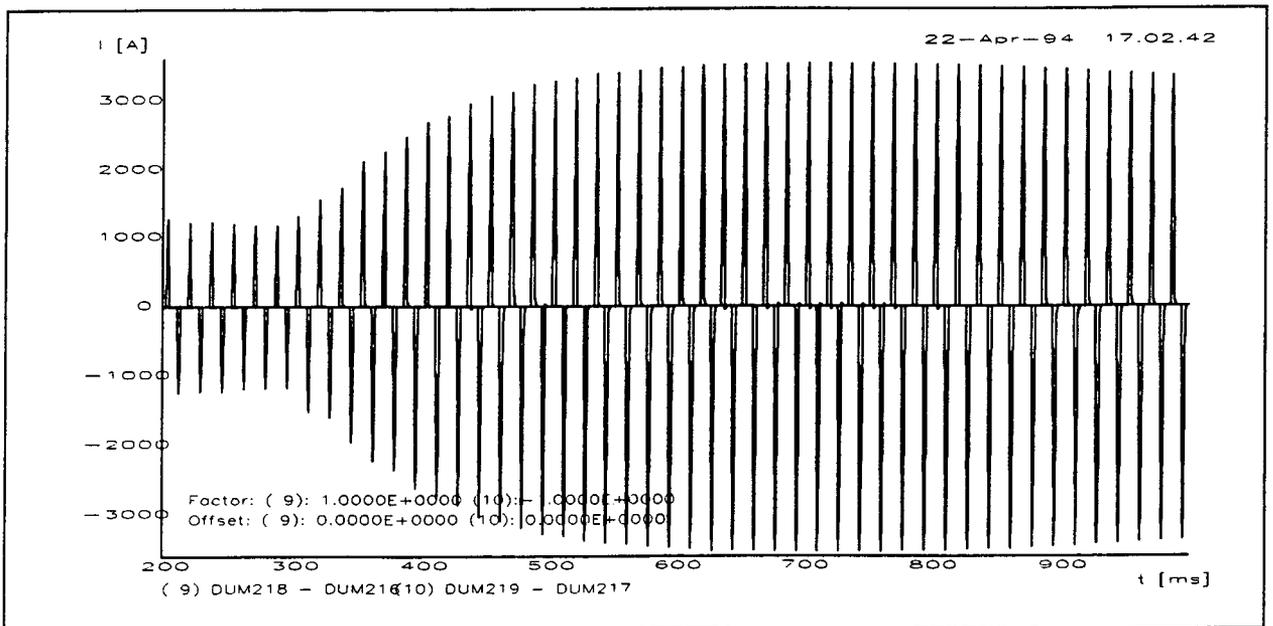


FIGURA 78 - Degrau na ordem de impedância do TCSC. Corrente na válvula de tiristores.

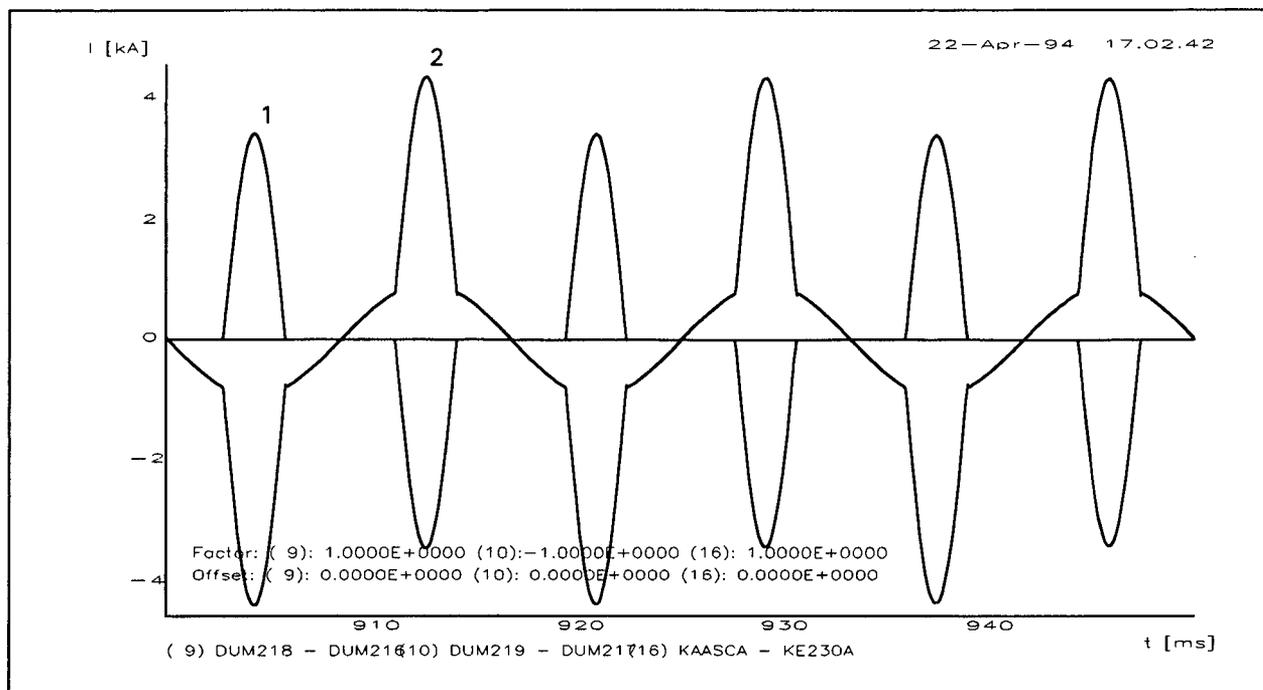


FIGURA 79 - Corrente no TCSC em condições de regime permanente:
 1- corrente nos tiristores; 2- corrente no capacitor.

A.3. - Caso Exemplo 2.

O segundo exemplo apresenta uma simulação com o CSC operando em modo de controle de corrente. O sistema opera inicialmente com uma corrente de 500 A na linha, quando um degrau positivo de 100 A é aplicado na referência do sistema de controle do CSC.

As figuras 80 a 84 ilustram os resultados. Na figura 81 observa-se que a corrente na linha é elevada ao valor de 600 A pela ação do CSC que, através de um controlador do tipo P.I. (proporcional-integral), atua no ângulo de disparo das válvulas, alterando conseqüentemente o valor da impedância do mesmo até que a corrente assumo o valor desejado.

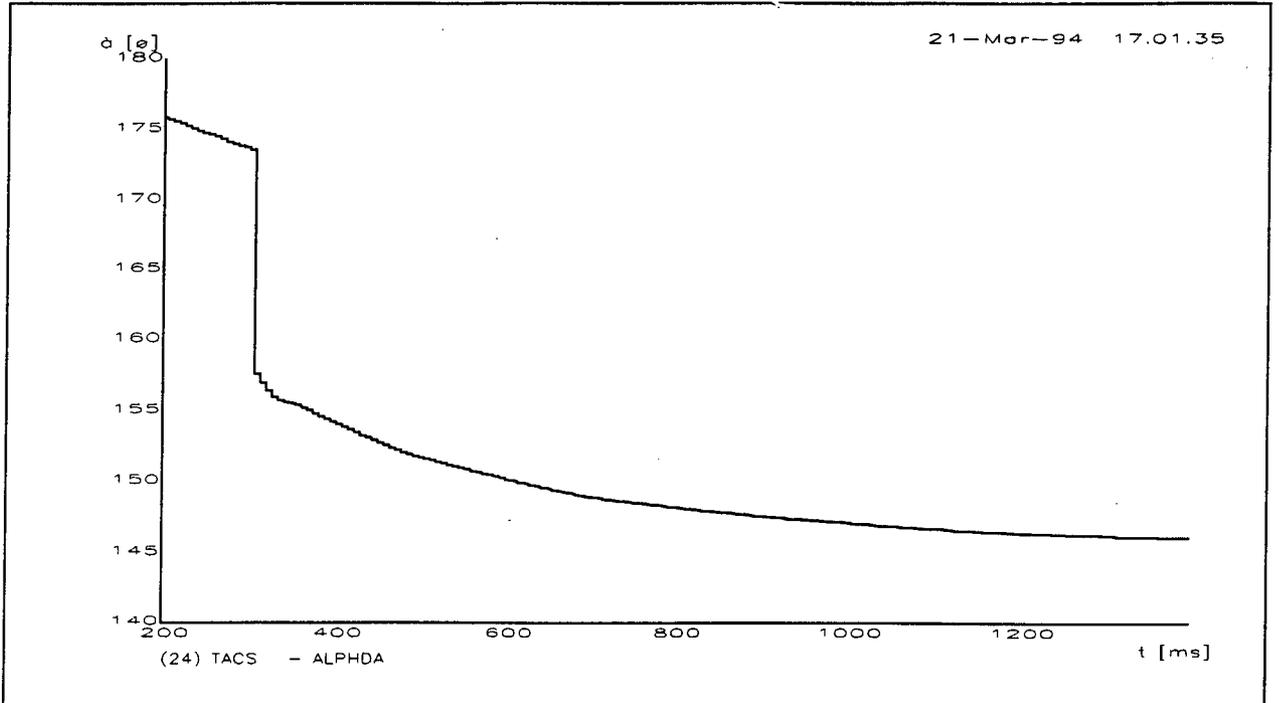


FIGURA 80 - Degrau na ordem de corrente. Ângulo de disparo dos tiristores.

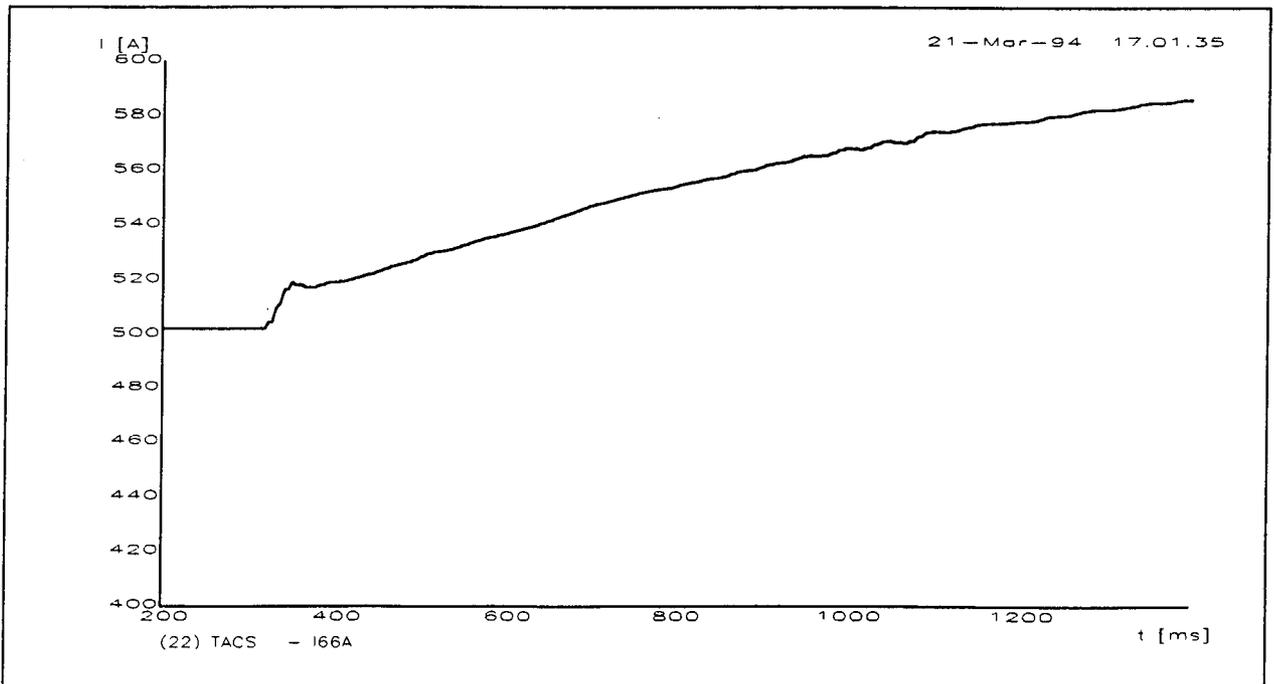


FIGURA 81 - Degrau na ordem de corrente. Corrente na linha.

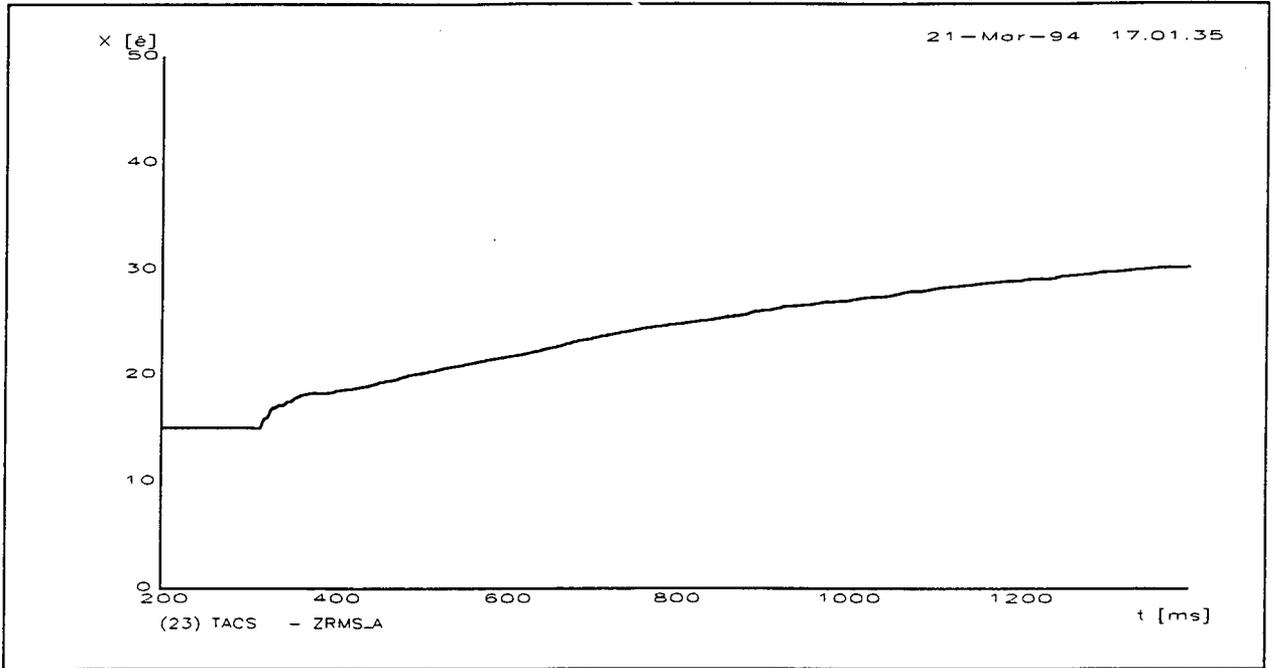


FIGURA 82 - Degrau na ordem de corrente. Impedância do TCSC.

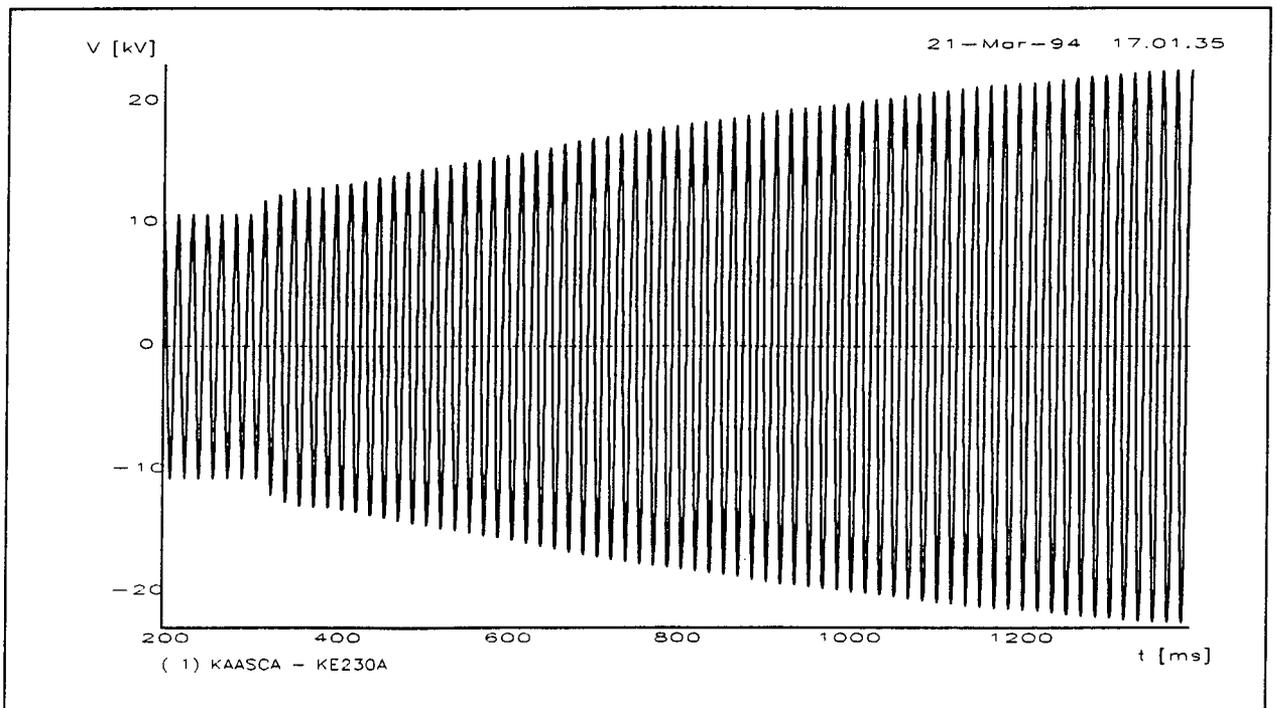


FIGURA 83 - Degrau na ordem de corrente. Tensão no capacitor do TCSC.

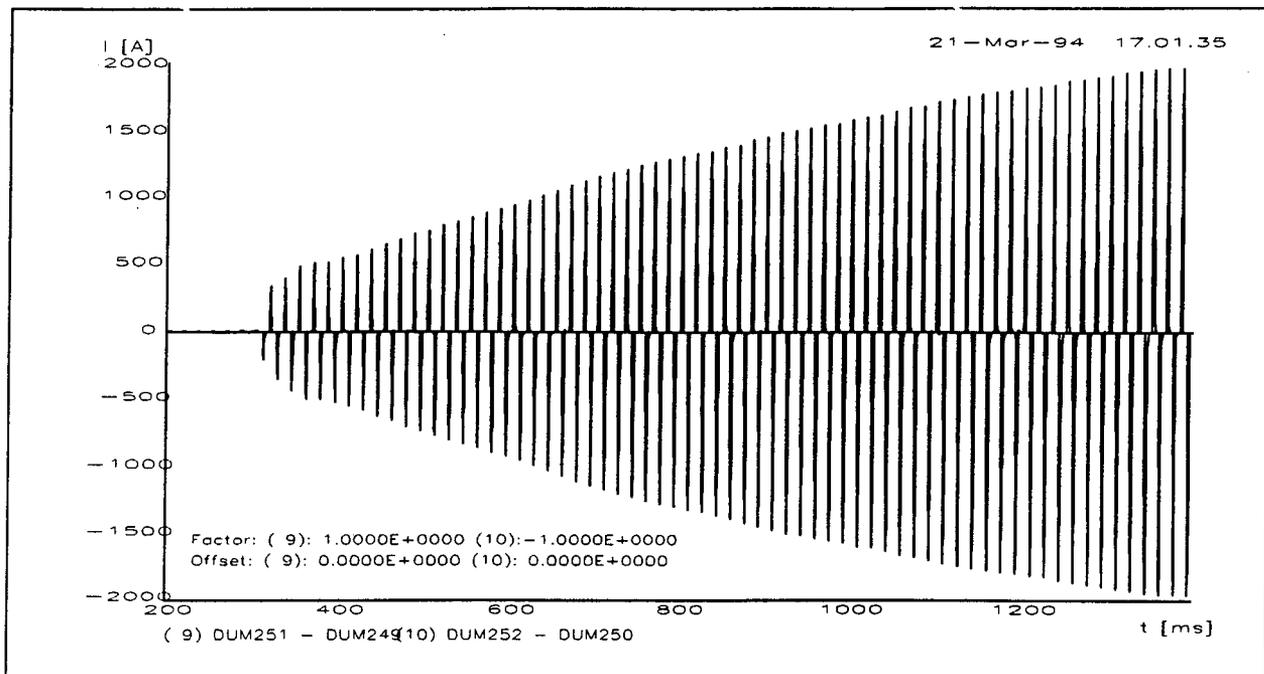


FIGURA 84 - Degrau na ordem de corrente. Corrente na válvula de tiristores.

A.4. - Caso Exemplo 3.

O terceiro exemplo demonstra o comportamento do CSC durante a ocorrência de um curto-circuito trifásico próximo à subestação de Kayenta.

Esta instalação conta com dispositivos chamados de Varistores de Óxido Metálico (MOV), conectados em paralelo com os bancos de capacitores para evitar ocorrência de sobretensões nos mesmos. As válvulas de tiristores são intrinsecamente protegidas de sobretensões via a utilização de "Break-Over Diodes" (BOD). Nesta simulação esta proteção não está presente devido à inclusão dos varistores, porém uma função protetiva do CSC foi representada. Esta função atua quando a corrente na linha atinge valores superiores a 1.8 p.u., levando o CSC a

operar como indutor até que a corrente assuma valores inferiores a 1.4 p.u.

Os resultados podem ser vistos nas figuras 85 a 88. É interessante observar na figura 87 que a energia absorvida pelo varistor em paralelo com o CSC é bem inferior àquela absorvida pelos varistores dos demais capacitores. Este fato se deve à ação protetiva desempenhada pelo sistema de controle do CSC. Isto sugere que, com a ação protetiva executada pelos BOD's, intrínseca à válvula (efeito não simulado aqui), o varistor (MOV) em paralelo com o CSC pode ser removido.

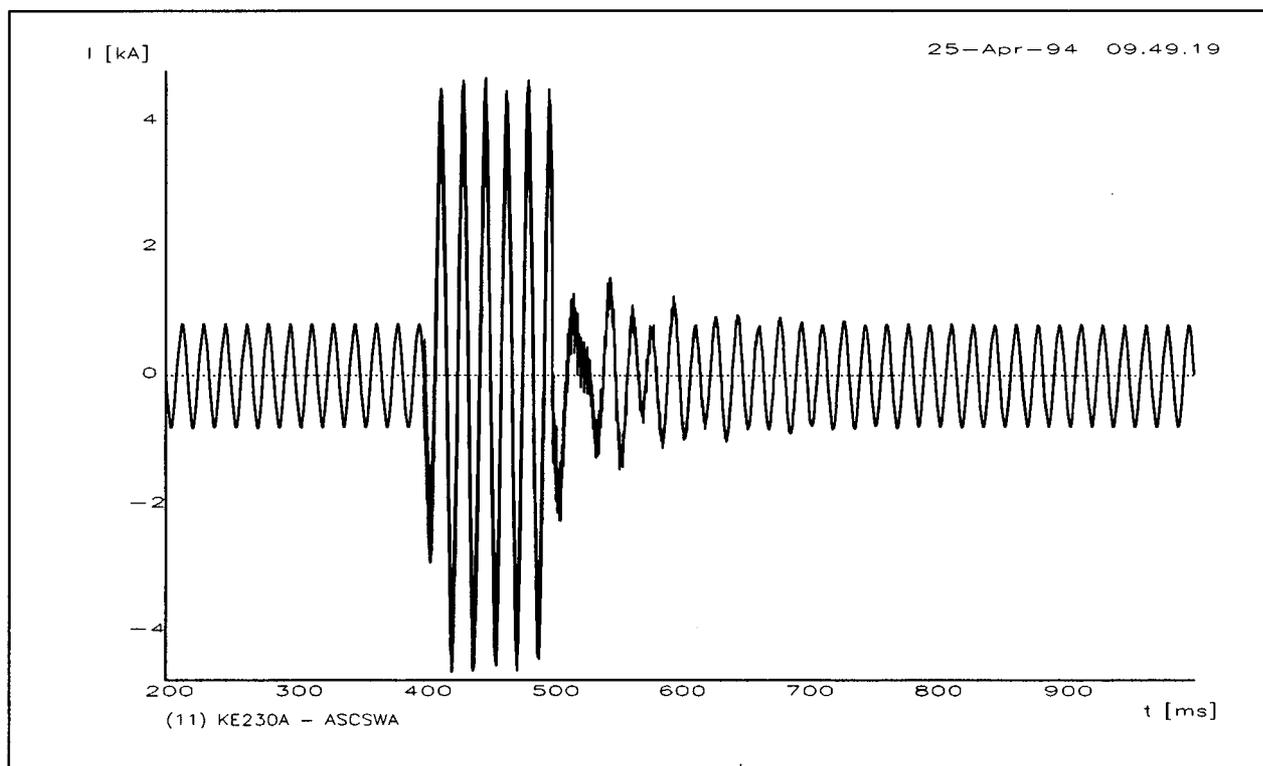


FIGURA 85 - Curto trifásico próximo ao TCSC. Corrente na linha de transmissão.

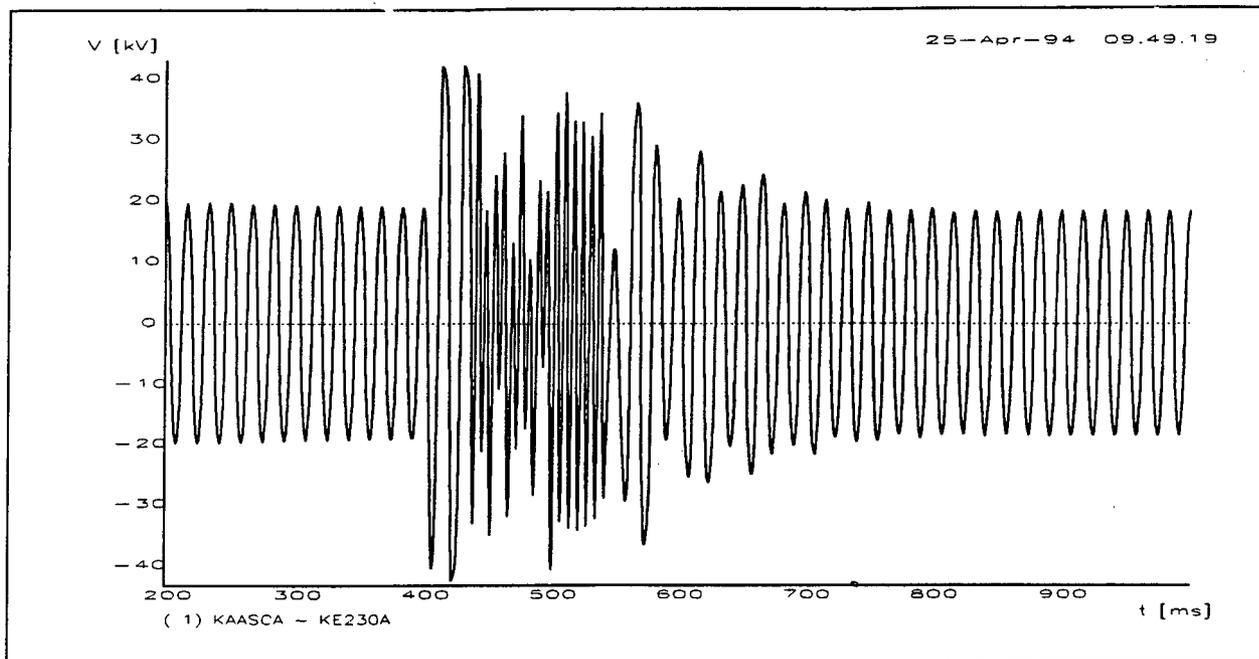


FIGURA 86 -Curto próximo ao TCSC. Tensão no capacitor do TCSC.

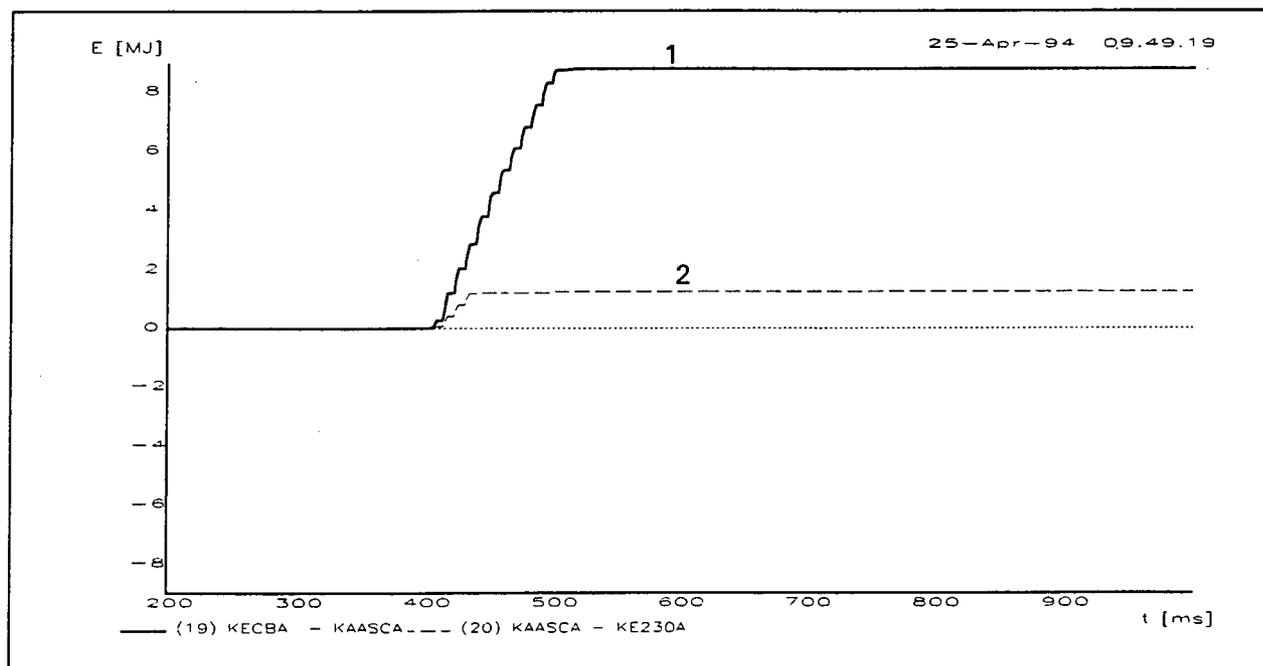


FIGURA 87 - Curto trifásico próximo ao TCSC. Energia absorvida pelos varistores (MOV): 1- Capacitor fixo (40Ω); 2- Capacitor do TCSC.

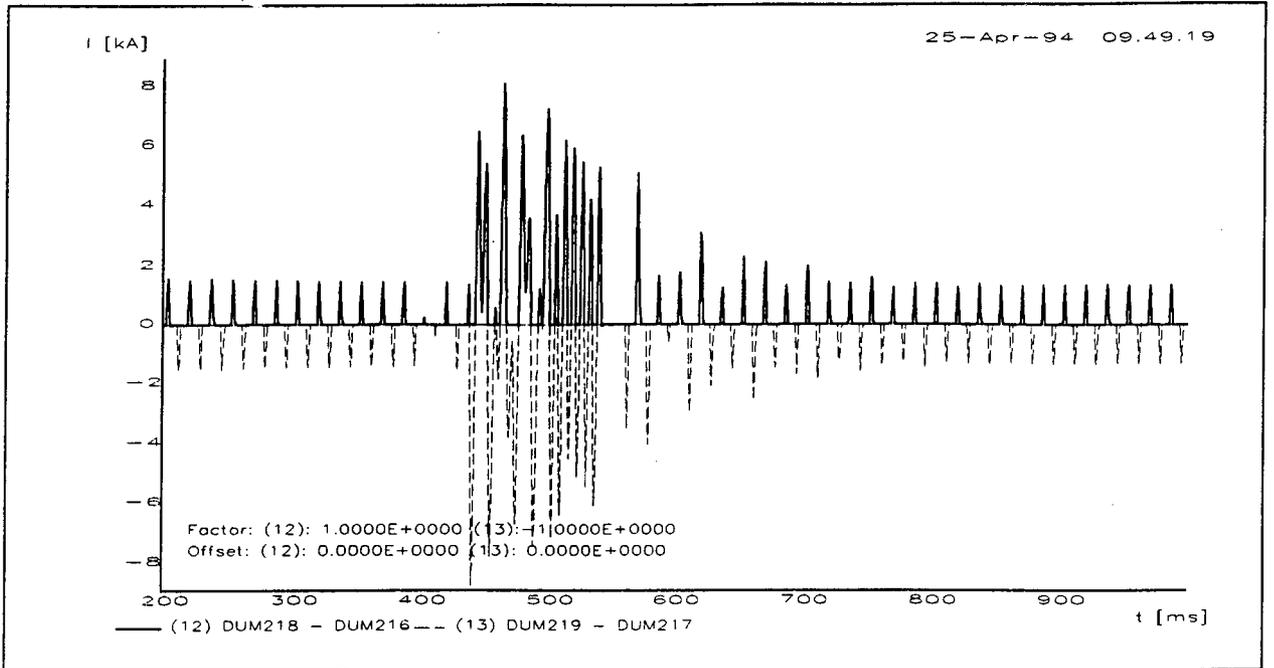


FIGURA 88 - Curto trifásico próximo ao TCSC. Corrente na válvula de tiristores.

APÊNDICE B - Ressonância Subsíncrona.

B.1. - Introdução.

O fenômeno de ressonância subsíncrona constitui-se em séria preocupação sempre que se cogita da utilização de compensação série de linhas de transmissão, principalmente quando unidades geradoras termoelétricas estão presentes. No Capítulo 4 deste trabalho viu-se que o TCSC pode ser usado para mitigação de ressonância subsíncrona, possibilitando níveis bem mais elevados de compensação do que os até então utilizados com a alternativa de compensação série fixa. Este Apêndice objetiva apresentar uma descrição do fenômeno de ressonância subsíncrona, tendo como base a referência [23].

A denominação “oscilações subsíncronas” é aplicada aos fenômenos de interação eletromecânica, seja entre o conjunto turbina-gerador e elementos passivos do sistema de potência, seja entre o conjunto turbina-gerador e elementos ativos como os controladores de sistemas de transmissão CC e de compensadores estáticos de potência reativa.

O primeiro caso de oscilação subsíncrona, ou seja, a interação entre o conjunto turbina-gerador e os elementos passivos da rede, tem sido tradicionalmente chamado de ressonância subsíncrona. Neste caso há o envolvimento de dois osciladores, um dos quais é motriz, dando origem ao fenômeno de ressonância. O surgimento de fenômenos de oscilação associados principalmente a componentes ativos da rede elétrica e não necessariamente causados por ressonância, como no primeiro caso, levou ao uso generalizado do termo oscilações subsíncronas para englobar

todos estes fenômenos, independentemente da origem ou causa dos mesmos.

B.2. - Ressonância no sistema mecânico.

O sistema mecânico dos turbogeradores é composto de massas girantes acopladas entre si por seções de eixos, conforme mostra genericamente a figura 89. Um sistema de n massas apresenta $n-1$ modos torsionais (frequências naturais de torção) denotados genericamente por f_n . Estas frequências estão situadas entre 5 e 45 Hz para as centrais térmicas e entre 5 e 10 Hz para as hidráulicas.

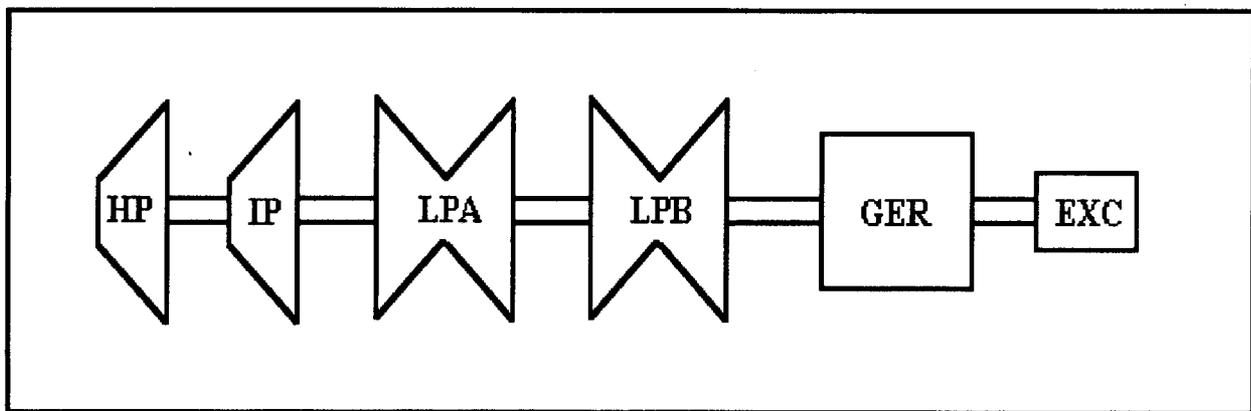


FIGURA 89 - Sistema mecânico de unidades geradoras.

B.3. - Ressonância na rede elétrica.

Seja o circuito mostrado na figura 90 onde:

X_L - reatância da linha,

X_G - reatância subtransitória média dos eixos do gerador,

X_c - reatância capacitiva (compensação série).

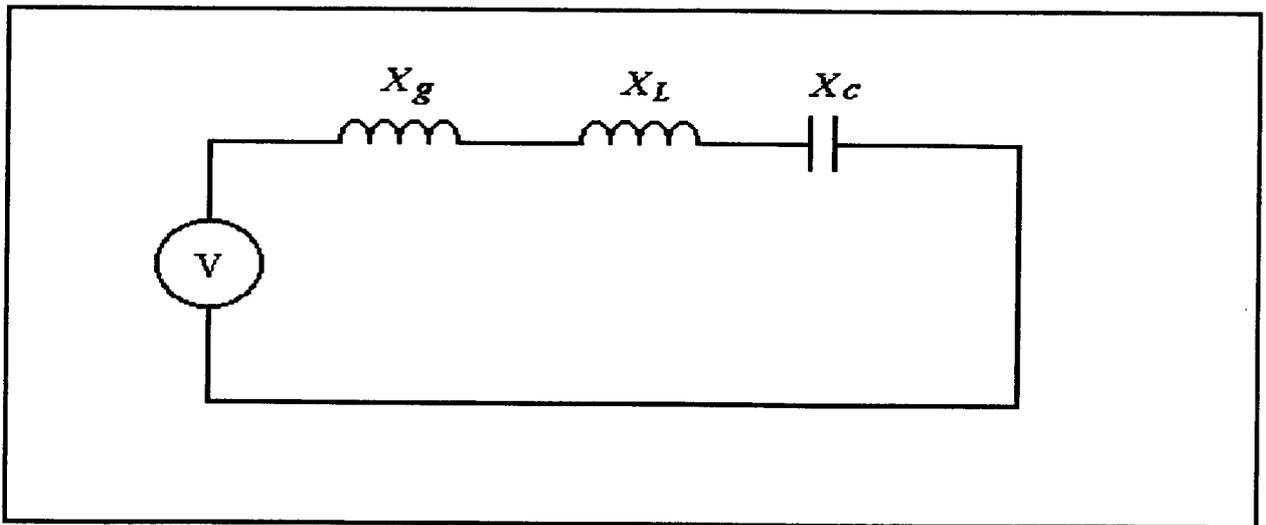


FIGURA 90 - Circuito ressonante.

A condição de ressonância neste circuito ocorre quando:

$$X_L + X_G - X_C = 0, \text{ ou:}$$

$$W_{RE}(L_L + L_G) - \frac{1}{W_{RE} \cdot C} = 0 \quad (\text{b.1})$$

ou ainda:

$$W_{RE} = W_O \frac{1}{\sqrt{W_O C (W_O L_L + W_O L_G)}} \quad (\text{b.2})$$

onde:

W_{RE} é a frequência de ressonância, e

W_O é a frequência nominal do sistema.

Então:

$$W_{RE} = W_o \sqrt{\frac{X_C}{X_L + X_G}} \quad (\text{b.3})$$

ou ainda:

$$f_{RE} = f_o \sqrt{\frac{X_C}{X_L + X_G}} \quad (\text{b.4})$$

Com os níveis usuais de compensação série ($X_C / X_L < 0,80$), f_{RE} é inferior a f_o e situa-se na faixa de 10 a 45 Hz.

B.4. - Mecanismos de Ressonância Subsíncrona.

A análise de ressonância subsíncrona tem sido realizada considerando a existência de dois fenômenos distintos: a interação torsional e o efeito gerador de indução.

B.4.1. - Interação Torsional.

A distribuição de força magnetomotriz (fmm) no rotor tem a forma mostrada na figura 91, ou seja:

$$B_f = B_{max} \cos \theta \quad \text{para } (t = 0) \quad (\text{b.5})$$

Como o rotor gira a uma frequência angular de $2\pi f_o$, segue que, a medida que o tempo avança, a onda se desloca como mostra a figura 92. Pode-se, portanto, dizer que a onda de fmm é dada por:

$$B_f = B_{max} \cos(\theta - 2\pi f o t)$$

(b.6)

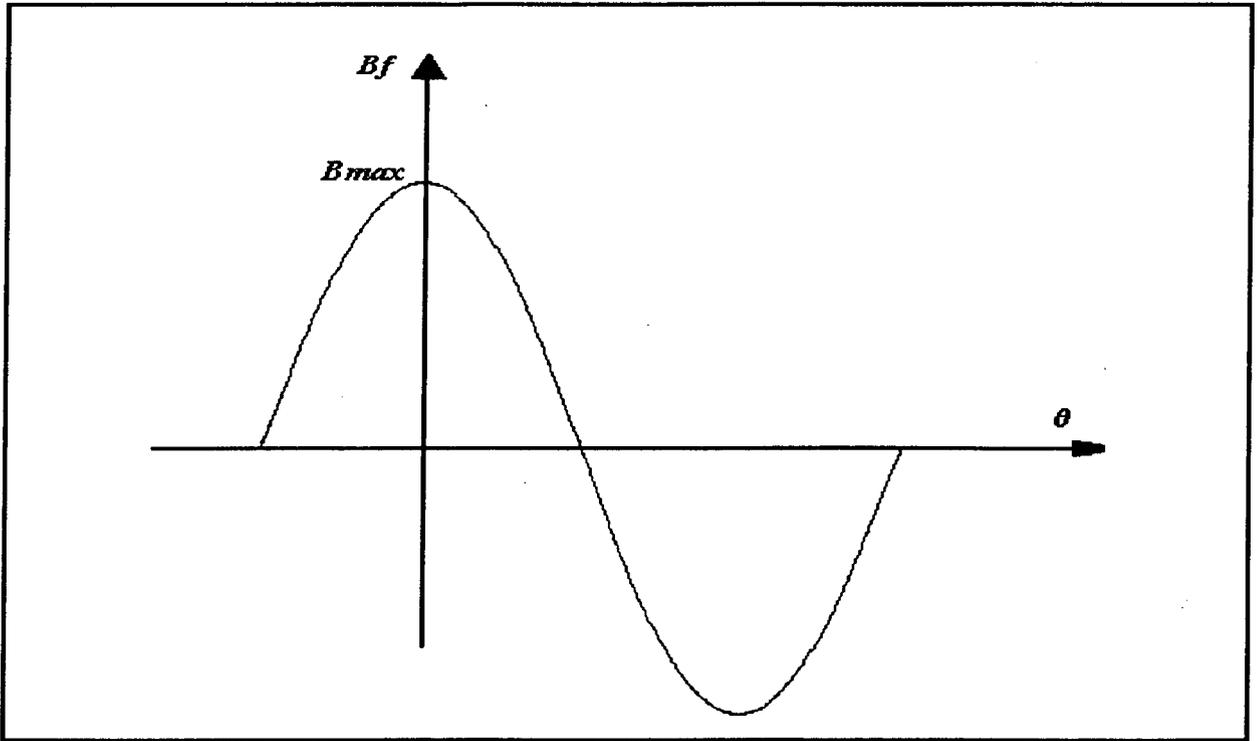


FIGURA 91 - Força magnetomotriz no rotor.

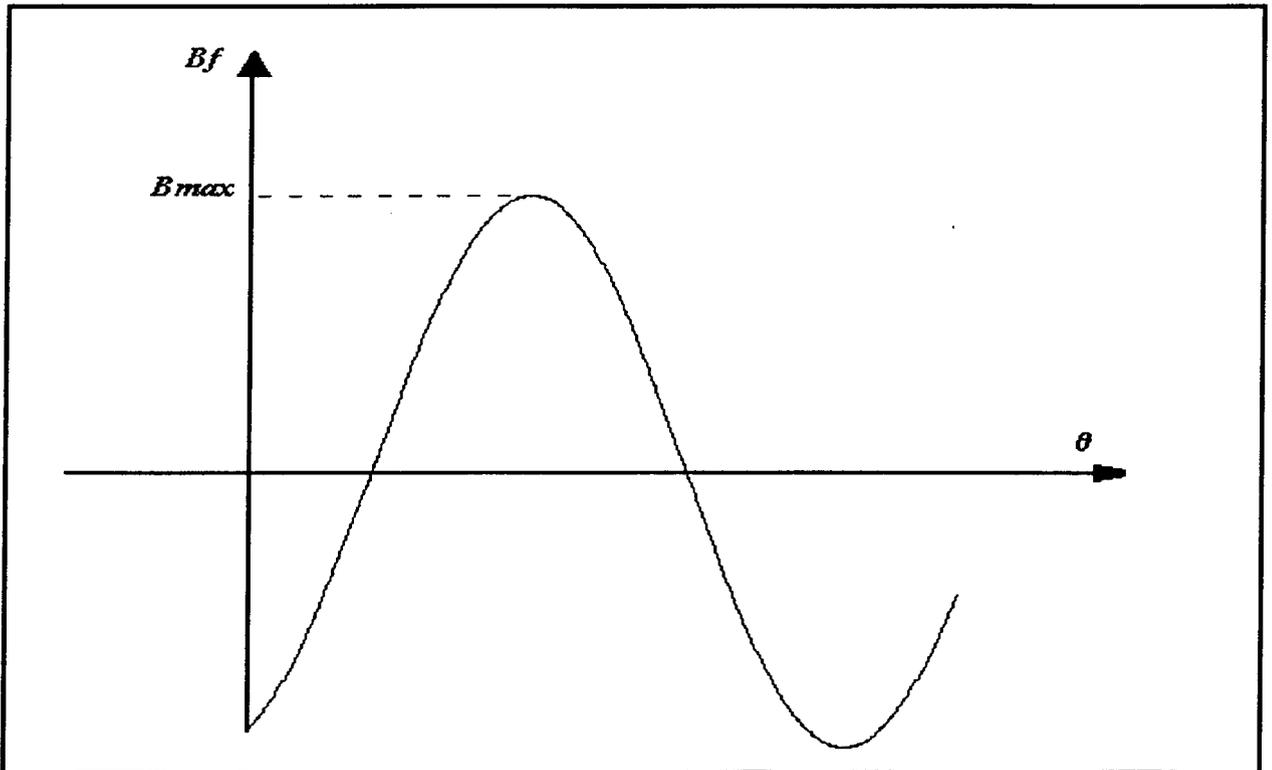


FIGURA 92 - Força magnetomotriz deslocada.

A equação (b.6) representa a distribuição da onda de fmm no espaço e no tempo. Supondo agora que o rotor oscile com a frequência f_n , o efeito é introduzir uma variação em θ para cada instante de tempo, dada por:

$$\theta_r = \theta_{max} \cos 2\pi f_n t, \quad (b.7)$$

tal que a indução magnética é dada por:

$$B_f = B_{max} \cos(\theta - 2\pi f_o t + \theta_r) \quad (b.8)$$

Dessa forma:

$$B_f = B_{max} [\cos(\theta - 2\pi f_o t) \cos \theta_r - \text{SEN}(\theta - 2\pi f_o t) \text{SEN} \theta_r] \quad (b.9)$$

Supondo agora que as oscilações sejam de pequena amplitude tal que:

$$\cos \theta_r \approx 1$$

$$\text{SEN} \theta_r \approx \theta_r$$

Então:

$$\text{SEN}(\theta - 2\pi f_o t) \text{SEN}(\theta_{max} \cos 2\pi f_n t) \approx \text{SEN}(\theta - 2\pi f_o t) \theta_{max} \cos 2\pi f_n t =$$

$$\frac{\theta_{max}}{2} [\text{SEN}(\theta - 2\pi f_o t - 2\pi f_n t) + \text{SEN}(\theta - 2\pi f_o t + 2\pi f_n t)] =$$

$$\frac{\theta_{max}}{2} \{ \text{SEN}[\theta - 2\pi(f_o + f_n)t] + \text{SEN}[\theta - 2\pi(f_o - f_n)t] \}$$

Portanto, o fluxo total é dado por:

$$B_f = B_{max} \left\{ \cos(\theta - 2\pi f_o t) - \frac{\theta_{max}}{2} \left[\text{SEN}[\theta - 2\pi(f_o + f_n)t] + \text{SEN}[\theta - 2\pi(f_o - f_n)t] \right] \right\} \quad (\text{b.10})$$

As componentes de fluxo de frequências supersíncronas ($f_o + f_n$) e subsíncronas ($f_o - f_n$) geram tensões e correntes no estator da máquina com estas mesmas frequências. A circulação de uma componente supersíncrona dá origem a uma componente de torque elétrico que tem direção oposta à da variação de velocidade do rotor, caracterizando-se, portanto, pelo aparecimento de amortecimento elétrico positivo. Para a componente subsíncrona ocorre exatamente o contrário e o amortecimento elétrico resultante é, portanto, negativo.

Se a frequência de ressonância f_{RE} do circuito for próxima da frequência $f_o - f_n$, então correntes de valor elevado circulam na armadura. As fmm destas correntes interagem com o fluxo principal do rotor e produzem torques na frequência f_n , o que reforça as oscilações e, conseqüentemente, as tensões geradas. Se o amortecimento de natureza mecânica for reduzido, então estas oscilações crescerão e o processo pode levar a fadiga e avarias no eixo da máquina.

B.4.2. - Efeito Gerador de Indução.

As correntes de armadura com frequências $f_o + f_n$ e $f_o - f_n$ produzem fmm 's que induzem correntes no rotor na frequência de escorregamento f_n . O rotor gira com velocidade angular $2\pi f_o$ e as correntes subsíncronas e supersíncronas produzem fmm 's que giram com velocidades angulares

$2\pi(f_o - f_n)$ e $2\pi(f_o + f_n)$. Para cada uma destas freqüências pode-se estabelecer um circuito equivalente da máquina de indução.

Os escorregamentos para as freqüências $f_o + f_n$ e $f_o - f_n$ são dados, respectivamente, por:

$$s_1 = \frac{(f_o - f_n) - f_o}{f_o - f_n} = -\frac{f_o}{f_o - f_n} \quad (\text{b.11})$$

e

$$s_1 = \frac{(f_o + f_n) - f_o}{f_o + f_n} = \frac{f_n}{f_o + f_n} \quad (\text{b.12})$$

Portanto, para a freqüência subsíncrona o escorregamento é negativo. O circuito equivalente do gerador de indução é apresentado na figura 93.

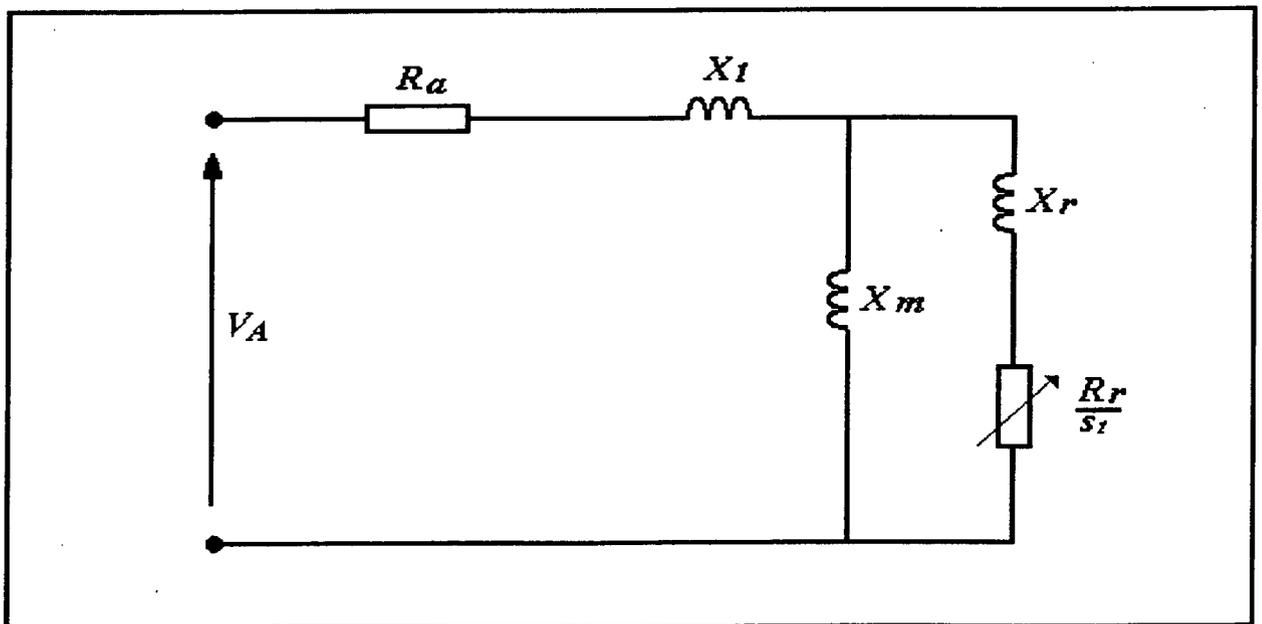


FIGURA 93 - Circuito equivalente do gerador de indução.

Para a freqüência subsíncrona, $s_1 < 0$ e a resistência do rotor vista dos terminais da armadura é negativa. A tensão aplicada na armadura, neste

circuito equivalente, é a tensão (na frequência subsíncrona) gerada pela oscilação do rotor. O circuito equivalente é apresentado na figura 94.

Com isto, se $\frac{R_r}{s_1} > R_a + R_{rede}$, a resistência total do circuito será negativa e as correntes de armadura crescerão (sem amortecimento). Este é o chamado efeito gerador de indução.

Para completar o circuito da figura 94, uma impedância em série, na frequência de ressonância, e equivalente ao efeito dos demais componentes do sistema, deve ser incluída. O valor desta impedância determina a magnitude e a fase das correntes oscilantes. Esta impedância equivalente requer a representação de todas as cargas e máquinas, assim como do sistema de transmissão. Para as barras de carga, as resistências de curto-circuito podem ser usadas (ajustadas para a frequência subsíncrona). Outras máquinas síncronas são representadas pelos seus circuitos equivalentes de máquinas de indução.

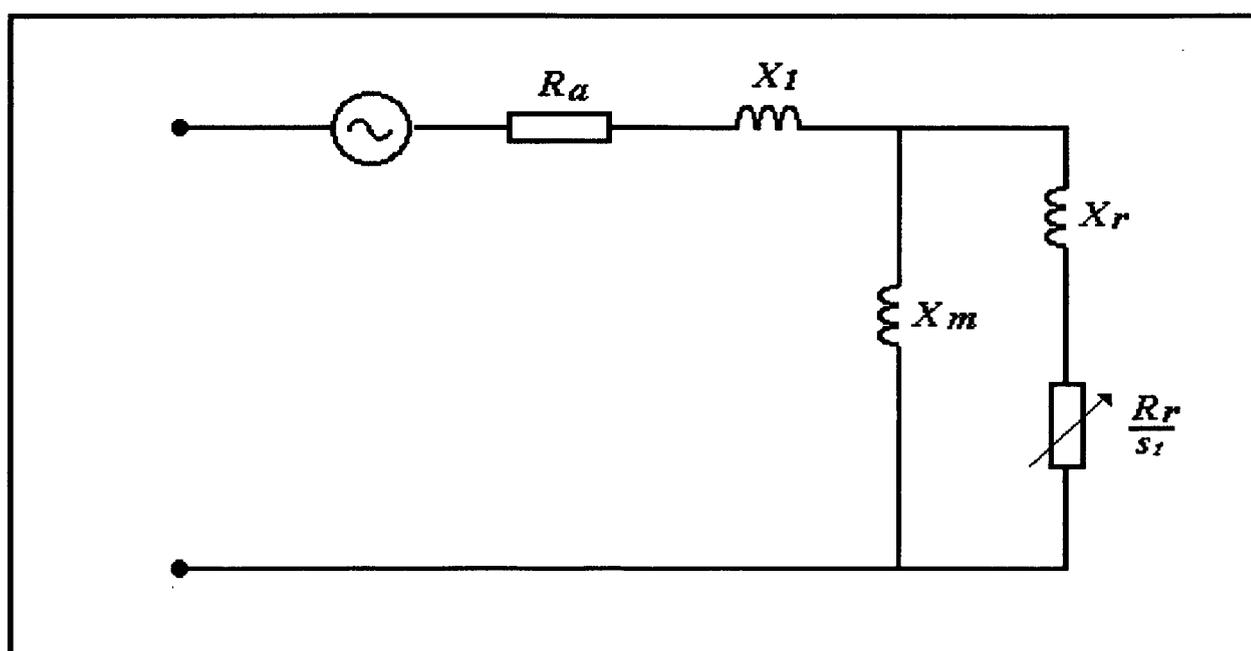


FIGURA 94 - Circuito equivalente para frequência subsíncrona.

É importante ressaltar que a interação torsional ocorre quando a frequência de ressonância f_{RE} do circuito é próxima de $f_o - f_n$, ou seja, $f_{RE} \approx f_o - f_n$, ou ainda, $f_n \approx f_o - f_{RE}$. Em outras palavras, existirá interação quando um dos modos torsionais f_n for próximo de $f_o - f_{RE}$. Quando isto não ocorre, existe pouca interação torsional mas mesmo assim o efeito gerador de indução pode ser importante. Normalmente, os dois efeitos coexistem.

A interação torsional domina quando $f_o - f_{RE}$ está próxima de um dos modos torsionais f_n . O efeito gerador de indução domina quando $f_o - f_{RE}$ é bem diferente de f_n . Como os modos torsionais são de baixa frequência para as unidades hidráulicas, segue que o valor $f_o - f_{RE}$ deve ser baixo, ou seja, f_{RE} deve ser alta com relação a f_o . Isto ocorre justamente quando a relação X_C / X_L é alta, isto é, para níveis elevados de compensação série.

A título de exemplificação, se $f_n \approx 10 \text{ Hz}$ deve-se ter f_{RE} da ordem de 50 Hz . Isto requer uma grande quantidade de compensação série, o que reduz a possibilidade de oscilação subsíncrona para o caso de unidades hidráulicas. O mesmo já não ocorre para as centrais térmicas, que podem apresentar modos torsionais bem acima de 10 Hz .

APÊNDICE C - Ajuste do Sistema de Controle do CSC.

C.1. - Procedimento de Ajuste.

Conforme já mencionado, não constituiu objetivo deste trabalho desenvolver e propor uma metodologia de ajuste ou projeto do sistema de controle do Compensador Série Controlado. Entretanto, para possibilitar as simulações apresentadas nos Capítulos 6 e 7, obviamente os parâmetros dos controladores dos CSCs tiveram que ser determinados. Isto foi efetuado de acordo com um procedimento cuja explanação é apresentada a seguir.

O modelo de controlador do CSC proposto no trabalho é apresentado na figura 37 (Capítulo 5). Conforme já explicado, este modelo consta de um controlador P.I. para controle de fluxo de potência (ou corrente) e de um sinal adicional para melhoria de estabilidade eletromecânica.

Para ajustar o controlador P.I., o sistema de potência deve ser inicialmente simulado em uma condição operativa estável para pequenas perturbações. Como o objetivo é o controle de potência ou corrente em regime permanente, este controlador deve ser ajustado para apresentar resposta lenta.

Considerando o sinal adicional desligado, os parâmetros "KI" e "KP" (figura 37) são escolhidos de forma que o sistema apresente resposta lenta e estável após a aplicação de uma rejeição de carga de pequeno valor (cerca de 10% da potência ativa na linha compensada) em uma das barras terminais da linha compensada. Isto é obtido via simulação não-

linear no domínio do tempo, explorando diversas combinações de valores para “KI” e “KP”. Tem-se assim um ajuste inicial que pode então ser refinado, procedendo-se a outras simulações envolvendo grandes perturbações.

O processo de ajuste do sinal adicional leva em conta a característica radial das diversas configurações estudadas nos Capítulos 6 e 7. O primeiro passo consiste em determinar a frequência de oscilação do sistema (modo inter-área “ λ ”) sem a compensação série controlada.

O segundo passo consiste em ajustar os pólos e zeros do sinal adicional de forma que a modulação do nível de compensação seja feita em fase com a oscilação angular “ δ ” entre os dois sistemas. Como a grandeza de entrada do sinal adicional é o fluxo de potência ativa na linha compensada “*Plin*”, torna-se necessário conhecer a relação de fase entre “*Plin*” e “ δ ” para o modo de oscilação “ λ ”. Esta informação é obtida via simulação não-linear no domínio do tempo.

O ganho “K1” pode ser obtido através de simulações sucessivas de forma a encontrar o maior valor possível que não cause a operação tipo “bang-bang” do controlador.

Este ajuste inicial pode ser otimizado, alterando-se os pólos e zeros, tomando-se o cuidado de alterar também o ganho “K1” de forma que a alteração de fase não altere o ganho dinâmico do sinal adicional. Neste trabalho, os ajustes mais adequados foram obtidos com a modulação do nível de compensação série adiantada de 45 graus elétricos em relação à oscilação angular “ δ ”.

A constante "Ta" do laço de sincronização deve ser escolhida em função da duração do primeiro "swing" das oscilações de potência. Este tempo pode ser estimado conhecendo-se a frequência de oscilação do modo de interesse. O sistema real estudado no Capítulo 7 apresenta um modo inter-área com frequência de oscilação "f" = 0,40 Hz. Para este caso a constante "Ta" foi ajustada em 0,40 segundos.

C.2. - Valores Adotados.

O quadro 7 apresenta o ajuste base adotado nas simulações efetuadas neste trabalho. Ressalta-se que pequenas variações em alguns parâmetros foram efetuadas, uma vez que diversas configurações e diferentes condições operativas foram investigadas.

Parâmetro	Unidade	Valor
KP	$\frac{p.u.(OHM)}{p.u.(MW)}$	0,0154
KI	$\frac{p.u.(OHM)}{p.u.(MW)}$	0,4000
K1	$\frac{p.u.(OHM)}{p.u.(MW)}$	5,0000
T1	Segundo	1,5000
T2	Segundo	0,8500
T3	Segundo	1,2100
T4	Segundo	0,0500
T5	Segundo	1,1200
Tm	Segundo	0,0000
Base de Potência - 100 MVA		

QUADRO 7 - Ajuste base do controlador do CSC.

Em todas as simulações efetuadas, foi utilizado um limitador estático (figura 44) para representar a unidade de distribuição de reatância do modelo do CSC.

Os valores de “Xmin” e “Xmax” são estabelecidos em função do valor da reatância indutiva da linha de transmissão compensada, “X”, e da faixa de controle desejada. Se a linha tem uma reatância “X” = 0,40 p.u. e deseja-se compensá-la com um CSC com faixa de controle de 30% a 70% de compensação, então os valores de “Xmin” e “Xmax” serão 0,12 p.u. e 0,28 p.u., respectivamente.