



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Utilização de Conversores como
Fonte de Tensão no Controle do
Fluxo de Potência**

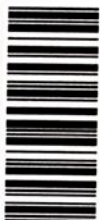
Ronaldo Aparecido Manzano Pin

1210001496



Ilha Solteira - SP

1210001496



Universidade Estadual Paulista – Unesp
 Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

“UTILIZAÇÃO DE CONVERSORES COMO FONTE DE TENSÃO NO CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA.”

Proc. 063/04 - NPD 125/04

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCN. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
02.08.04	31.08.04
REGISTRADOR	TOMBO
Ailza	Te. 1496
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Ilhaçã Auto R\$10.00	P645M

Dissertação submetida à
 Faculdade de Engenharia de
 Ilha Solteira – UNESP – como
 parte dos requisitos para
 obtenção do título de Mestre em
 Engenharia Elétrica.
 Área de Concentração:
 Engenharia Elétrica

Candidato : Ronaldo Aparecido Manzano Pin
 Orientador : Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior

Ilha Solteira - SP

CO
 Sys 227812
 Sys 56345
 30400007

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FEIS/UNESP

Pin, Ronaldo Aparecido Manzano

P645u Utilização de conversores como fonte de tensão no controle de fluxo de potência.
/ Ronaldo Aparecido Manzano Pin. - Ilha Solteira : [s.n.], 2004
167 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004.

Orientador: Dionízio Paschoareli Junior

Bibliografia: p. 145-148

1. Conversores como fonte de tensão. 2. FACTS. 3. Controle de fluxo de potência. 4. Modulação vetorial. 5. Potência ativa e reativa. 6. Controle da tensão. 7. Geração de energia fotovoltaica.

1-6 / 690

Utilização de Conversores como Fonte de Tensão no Controle do Fluxo de Potência

Ronaldo Aparecido Manzano Pin

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE
ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. *Dionízio Paschoareli Junior* – orientador


Prof. PhD. *João Onofre Pereira Pinto*


Prof. Dr. *Falcones José Mendes de Seixas*

Ilha Solteira-SP, maio de 2004

À minha família

Meus pais José e Helena, minha
irmã Natalia e minha namorada
Walkiria, que sempre estiveram ao
meu lado, obrigado e que Deus
retribua tudo o que fizeram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por ter me dado a oportunidade de cumprir mais um passo na minha vida.

Ao prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior um agradecimento em especial pela competência, dedicação e estímulo não medindo esforços e recebendo-me com disposição durante a orientação deste trabalho;

Ao prof. Dr. Percival Bueno de Araújo pela grandiosa colaboração nas valiosas sugestões sobre o uso do Matlab;

Aos meus colegas de departamento pela excelente convivência e pela amizade ao longo deste trabalho, em especial: Alexandre, Rodrigo, Ricardo, Renato Marcelo, Marcelo Sanches, Marcelo Mattos, Patrick, Anastácio, Tadao e Edni, pela amizade e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho;

A todos os docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica-FEIS/UNESP, que diretamente ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho;

À secretaria de Pós-Graduação (Arlindo, Fátima, Paulo, Onilda e Adelaide) que estavam sempre prontos para atender às necessidades;

Aos técnicos do laboratório de computação Deoclécio e Carlos Alex;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro deste trabalho;



Resumo

Nos últimos anos, a operação de sistemas de energia elétrica foram aperfeiçoados, resultando em um desenvolvimento de controladores que tornam estes sistemas mais flexível. O acrônimo FACTS (Flexible AC Transmission Systems) surgiu em 1988, proposto por Narain Hingorani, com a finalidade de propor o uso da eletrônica de potência para o controle de parâmetros dos sistemas de potência em corrente alternada.

Este trabalho propõe um controlador de fluxo de potência conectado em derivação com a barra a ser controlada. O controlador é formado por um conversor como fonte de tensão (VSC). A função deste controlador é prover suporte de tensão para a barra conectada através da injeção de potência reativa (capacitiva ou indutiva). Outra função deste controlador é fornecer ou absorver potência ativa, gerada por fontes assíncronas de energia ou armazenada na forma de corrente contínua, para o sistema de corrente alternada, através do controle do ângulo de defasamento entre a tensão do conversor e a tensão do sistema. O conceito dos parâmetros envolvidos na transferência de potência são discutidos.

As equações de controle de vetor espacial deste controlador são definidas e o uso da modulação por largura de pulso (PWM) no controle desse conversor são apresentadas.

Um sistema trifásico é simulado para mostrar a eficácia deste controlador no controle do fluxo de potência. São realizadas várias simulações para mostrar a eficiência deste controlador conectado em derivação. O controle da magnitude de tensão e o ângulo de transmissão foram ilustrados através de simulações computacionais.

Abstract

In recent years, the electric power systems have been improved with the development of dynamic power controllers, which allow a flexible operation of such systems. The acronym FACTS (Flexible AC Transmission Systems), proposed by Hingorani in 1988, comprise power electronics-based controllers that perform a quick and safe control of system parameters.

This work propose a power flow controller which is shunt-connected to a ac system busbar. The controller is composed of a Voltage-Sourced Converter (VSC). The controller function is to perform voltage magnitude control in the coupling busbar by reactive power control. Also, the controller supply or absorb active power, generated by asynchronous generators or storage in the direct current form, to the alternating current system. This active power control is achieved by controlling the phase angle between the VSC output voltage and the ac system busbar voltage. The concepts of the parameters involved in the power transmission limits are discussed.

The equations of the space vector modulation are defined and the pulse width modulation, using space vector control, is proposed.

A simplified three-phase system is simulated to validate the computational model of the power flow controller, proposed in the present work. Several computational simulations, using Matlab® are performed to present voltage and both the reactive power and active power control using the VSC-based controller. The results are discussed.

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvii
Notação e Simbologia	xviii
Capítulo 1. Introdução Geral	22
1.1. Introdução	22
1.2. Controladores FACTS	28
1.2.1. SVC	29
1.2.2. TCSC	30
1.2.3. STATCOM	32
1.2.4. SSSC	33
1.2.5. UPFC	34
1.2.6. Conversores estáticos como comp. de potência.....	35
Capítulo 2. Transferência de Potência	37
2.1. Introdução.....	37
2.2. Característica da Transferência de Potência	38
2.3. Impedância de Transferência (x_{Th})	40
2.4. Fator de Potência de Transferência (f_{P_t})	42
2.5. Magnitude de Tensão (V_L)	43
2.6. Controle do Fluxo de Potência	45
2.6.1. Compensador em Derivação na Barra de Recepção	45

2.6.2.	Compensador em Derivação Ideal	47
2.6.3.	Compensador Série Ideal	49
2.6.4.	Compensador de Ângulo de Fase Ideal	51
2.7.	Conclusão	53
Capítulo 3.	Fontes Alternativas	54
3.1.	Introdução	54
3.2.	Energia Eólica	55
3.2.1.	Custo da Energia Eólica	56
3.2.2.	Sistema Elétrico da Turbina Eólica	57
3.2.3.	Geradores para Sistemas Eólicos	58
3.2.4.	Componentes do Sistema Eólico	59
3.3.	Energia Fotovoltaica	61
3.3.1.	Custo da Energia Fotovoltaica	62
3.3.2.	Composição Física e Fabricação dos Disp. Fotov.....	63
3.3.3.	Principais Componentes	64
3.4.	Armazenadores de Energia	66
3.4.1.	Armazenamento em Capacitores	66
3.4.2.	Armazenamento em Baterias	67
3.4.3.	SMES	68
3.5.	Conclusão	69
Capítulo 4.	VSC como Controlador de Fluxo de Potência	70
4.1.	Introdução	70
4.2.	Modo de Funcionamento	71
4.2.1.	Estrutura do Compensador em Derivação.....	71

4.2.2. Princípios de Operação do VSC	72
4.3. Controle da Tensão	75
4.3.1. Sem Compensação	77
4.3.2. Compensação Capacitiva	77
4.3.3. Compensação Indutiva	79
4.4. Controle da Potência Ativa	82
4.5. Conclusão	83

Capítulo 5. Modulação por Vetores Espaciais	84
5.1. Introdução	84
5.2. Representação do Vetor Espacial	85
5.2.1. Transformação do Vetor de Rotação Espacial	86
5.3. Modulação do Vetor Espacial Passo a Passo	88
5.3.1. Exemplos de Chaveamento para Vetores Nulos	92
5.3.2. Exemplos de Chaveamento para Vetores Ativos	93
5.4. Sequência de Comutação	96
5.5. Possibilidade de Chaveamento	98
5.6. Conclusão	102

Capítulo 6. Implementação Computacional do Controle	
do Fluxo de Potência	103
6.1. Introdução	103
6.2. Simulação do Compensador	104
6.3. Exemplos de Simulações do compensador em Derivação ...	116
6.3.1. 1º Exemplo.....	116
6.3.2. 2º Exemplo.....	126

6.3.3. 3º Exemplo.....	128
6.3.4. 4º Exemplo.....	132
6.3.5. 5º Exemplo.....	134
6.3.6. 6º Exemplo	137
6.4. Conclusão	139
Capítulo 7. Conclusões e Futuros Trabalhos	140
7.1. Conclusão	140
7.2. Contribuição e Proposta para Trabalhos Futuros	144
Referências Bibliográficas	145
Apêndice	149

Lista de Figuras

Figura 1.1.	- Fluxo de potência em laço	27
Figura 1.2.	- Fluxo paralelo	27
Figura 1.3.	- Modelo do SVC	29
Figura 1.4.	- Modelo TCSC	31
Figura 1.5.	- Modelo do STATCOM	32
Figura 1.6.	- Modelo do SSSC	33
Figura 1.7.	- Modelo do UPFC	34
Figura 2.1.	- Diagrama de circuito	38
Figura 2.2.	- Diagrama fasorial	39
Figura 2.3.	- Característica P-V para valores distintos de x_{Th}	41
Figura 2.4.	- Característica P-V para fator de potência distinto	42
Figura 2.5.	- Característica da potência para dois valores de V_L	44
Figura 2.6.	- Compensador em derivação conectado na barra de recepção	46
Figura 2.7.	- Compensador shunt conectado no meio do ponto	47
Figura 2.8.	- Diagrama fasorial para compensação shunt	47
Figura 2.9.	- Curvas da compensação shunt no barramento de recepção e compensação no ponto médio	48
Figura 2.10.	- Compensador série ideal	49
Figura 2.11.	- Diagrama fasorial da compensação série	50
Figura 2.12.	- Gráfico da potência transmitida pelo sistema	51
Figura 2.13.	- Compensador de ângulo de fase ideal	52
Figura 2.14.	- Diagrama fasorial de um compensador defasador	52

Figura 2.15.	- Compensação shunt, série, ângulo de fase e sem compensação de ponto médio	53
Figura 3.1.	- Turbina eólica de velocidade variável	57
Figura 3.2.	- Esquema de distribuição de energia	59
Figura 3.3.	- Componentes do sistema elétrico	60
Figura 3.4.	- Sistema Fotovoltaico	62
Figura 3.5.	- Composição física dos dispositivos fotovoltaicos	63
Figura 3.6.	- Sistema fotovoltaico genérico	65
Figura 3.7.	- Taxa de Transferência (Potência/Energia)	66
Figura 4.1.	- Princip. compon. de um compensador em derivação ..	71
Figura 4.2.	- Conversor conectado em derivação	73
Figura 4.3.	- Diagramas fasoriais do terminal ca e do terminal cc	73
Figura 4.4.	- Diagramas fasoriais	75
Figura 4.5.	- Circuito equivalente da regulação da tensão	75
Figura 4.6.	- Diagrama fasorial para o circuito sem compensação ...	77
Figura 4.7.	- Diagrama fasorial da compensação capacitiva	78
Figura 4.8.	- Diagrama de vetor para a compensação capacitiva	79
Figura 4.9.	- Diagrama fasorial da compensação indutiva	80
Figura 4.10.	- Diagrama de vetor para a compensação indutiva	81
Figura 4.11.	- Diagramas fasoriais do conversor shunt	82
Figura 5.1.	- Transformação da representação ortogonal trifásica	86
Figura 5.2.	- Representação do vetor espacial	87
Figura 5.3.	- Representação da posição dos vetores	89
Figura 5.4.	- Posição dos vetores de estado	90
Figura 5.5.	- Inversor trifásico com modulação PWM	91
Figura 5.6.	- Conversor conectado na polaridade positiva e negativa	92

Figura 5.7.	- Posição do vetor em (PNN)	93
Figura 5.8.	- Tensões trifásicas com modulação de vetor espacial e formas de ligação do conversor	94
Figura 5.9.	- Posição do vetor entre (PNN) e (PPN)	94
Figura 5.10.	- Tensões trifásicas com modulação de vetor espacial	95
Figura 5.11.	- Formas de ligação do conversor	95
Figura 5.12.	- Vetor espacial no domínio do tempo	98
Figura 5.13.	- Setor I no domínio do espaço	99
Figura 5.14.	- Área a ser modulada pelo SVPWM	100
Figura 6.1.	- Sistema elétrico onde está inserido o compensador.....	104
Figura 6.2.	- Formas de onda das tensões do gerador	106
Figura 6.3.	- Tensões de referência do SVM	107
Figura 6.4.	- Parte interna de um VSC	108
Figura 6.5.	- Valores médios e instantâneos da tensão de saída do conversor	109
Figura 6.6.	- Tensões trifásicas com modulação vetorial	109
Figura 6.7.	- Circuito equivalente	110
Figura 6.8.	- Tensão do gerador e barra compensada e corrente resultante	117
Figura 6.9.	- Potência ativa: gerador, carga e total	117
Figura 6.10.	- Potência reativa: gerador, carga e total	118
Figura 6.11.	- Correntes do circuito, tensões do conversor e barra compensada	119
Figura 6.12.	- Tensões do conversor e da barra compensada e corrente shunt	119
Figura 6.13.	- Potência ativa e reativa fornecida pelo gerador	120
Figura 6.14.	- Potência ativa e reativa fornecida pelo conversor	121
Figura 6.15.	- Potência ativa e reativa utilizada entre o conversor e a barra	122

Figura 6.16. - Potência ativa e reativa utilizada entre o gerador e a barra	122
Figura 6.17. - Potência ativa e reativa utilizada na barra	123
Figura 6.18. - Potência ativa: gerador, conversor, shunt, carga e total	124
Figura 6.19. - Potência reativa: gerador, conversor, shunt, carga e total	125
Figura 6.20. - Correntes: shunt, carga e total	125
Figura 6.21. - Tensões do conversor e da barra e corrente shunt	126
Figura 6.22. - Potência ativa: gerador, conversor, shunt, carga e total	127
Figura 6.23. - Potência reativa: gerador, conversor, shunt, carga e total	127
Figura 6.24. - Correntes: shunt, carga e total	128
Figura 6.25. - Correntes do circuito, tensões do conversor e barra compensada	129
Figura 6.26. - Tensões do conversor e da barra e corrente shunt	129
Figura 6.27. - Potência ativa: gerador, conversor, shunt, carga e total	130
Figura 6.28. - Potência reativa: gerador, conversor, shunt, carga e total	130
Figura 6.29. - Correntes: shunt, carga e total	131
Figura 6.30. - Tensões do conversor e da barra e corrente shunt	132
Figura 6.31. - Potência ativa: gerador, conversor, shunt, carga e total	133
Figura 6.32. - Potência reativa: gerador, conversor, shunt, carga e total	133
Figura 6.33. - Correntes: shunt, carga e total	134

Figura 6.34. - Tensão do gerador e tensão de saída do conversor 135

Figura 6.35. - Correntes: shunt, carga e total 136

Figura 6.36. - Tensão na barra compensada e tensão de linha 136

Figura 6.37. - Tensão na barra sem o uso do compensador 137

Figura 6.38. - Tensão na barra com o uso do compensador 138

Tabela 6.1. - Características do sistema de potência 50

Tabela 6.2. - Resultados da simulação 56

Tabela 6.3. - Valores parâmetros de comutação do inversor 57

Lista de Tabelas

Tabela 1.1.	- Matriz energética nacional	23
Tabela 1.2.	- Usinas em construção	24
Tabela 3.1.	- Custos das fontes alternativas	56
Tabela 5.1.	- Seqüência de comutação	96
Tabela 5.2.	- Valores possíveis de comutação do inversor trifásico ..	97

Notação e Simbologia

C	- capacitor
ca	- corrente alternada
cc	- corrente contínua
C_1	- matriz de transformação espacial
D_1	- diferença entre as tensões $v_a(t)$ e $v_b(t)$
D_2	- diferença entre as tensões $v_b(t)$ e $v_c(t)$
E	- tensão do capacitor
E_c	- energia armazenada no capacitor
FACTS	- Flexible Alternating Currents Transmission Systems
f_{pr}	- fator de potência de transferência
GI	- gerador de indução
GS	- gerador síncrono
GTO	- Gate Turn-Off Thyristor
hpwm	- frequência de chaveamento
IGBT	- Insulated Gate Bipolar Transistor
I_{LM}	- corrente entre a barra L e a barra M
I_{MR}	- corrente entre a barra M e a barra R
I_M	- corrente da barra M
I_{total}	- corrente total na linha
I_{sh}	- corrente da reatância de acoplamento
I_{carga}	- corrente de carga
I'_{total}	- corrente na linha do compensador shunt (capacitivo)
I''_{total}	- corrente na linha do compensador shunt (indutivo)
I'_{sh}	- corrente do compensador shunt (capacitivo)
I''_{sh}	- corrente do compensador shunt (indutivo)

I'_{carga}	- corrente depois do compensador shunt (capacitivo)
I''_{carga}	- corrente depois do compensador shunt (indutivo)
kHz	- kilo Hertz
K	- constante igual a 2/3
k	- constante de proporção igual a 2,5
kk	- constante de proporção igual 12e-4
kW	- kilo-Watt
kWh	- kilo Watt hora
L_{sh}	- indutor shunt
l_{carga}	- indutor de carga
l_{total}	- indutor da linha
IT1, IT2, IT3	- intervalos de tempo em que as chaves permanecem fechadas
MCT	- Mos Controlled Thyristor
MW	- Mega Watt
P_{MAP}	- máxima potência disponível
P_T	- potência ativa de transferência
PWM	- Pulse Width Modulation
Prms	- Soma da potência trifásica
Pref	- valor desejado da potência
Q_T	- potência reativa de transferência
r_{sh}	- resistor shunt
r_{carga}	- resistor da carga
r_{total}	- resistor da linha
SFV	- Sistema fotovoltaico
SSSC	- Static Synchronous Series Capacitor
STATCOM	- Static Synchronous Compensator
SVC	- Static Var Compensator
SVPWM	- Space Vector Pulse Width Modulation

TCSC	- Thyristor Controlled Series Capacitor
t_1, t_2	- períodos ativos totais de chaveamento
t_{ona}	- período total em que a chave S1 permanece fechada
t_{onb}	- período total em que a chave S2 permanece fechada
t_{onc}	- período total em que a chave S3 permanece fechada
$tolP$	- tolerância aceitável da potência igual a 0,6
UPFC	- Unified Power Flow Controller
U_1	- começo do setor I
U_2	- começo do setor II
$\bar{U}_N$	- vetor conectado na polaridade negativa
$\bar{U}_P$	- vetor conectado na polaridade positiva
$\hat{u}$	- vetor espacial
$u_d(t)$	- projeção do vetor espacial $\hat{u}$ com o eixo direto
$u_q(t)$	- projeção do vetor espacial $\hat{u}$ com o eixo em quadratura
$u_0(t)$	- componente de seqüência zero, para sistema desbalanceado
VSC	- Voltage Source Converter (conversor como fonte de tensão)
V_{pq}	- tensão do compensador defasador
V_L	- tensão rms na barra L
V_R	- tensão rms na barra R
V_{xTh}	- queda de tensão na linha
V_M	- tensão onde vai ser conectado o compensador
V_C	- tensão do compensador série ideal
V_{pq}	- compensador de ângulo de fase
V	- rms da tensão
$\dot{V}$	- fasor de tensão
V_{ord}	- valor ordenado
V'_{barra}	- tensão em V_{barra} compensado (capacitivo)

V''_{barra}	- tensão em V_{barra} compensado (indutivo)
V'_{sh}	- tensão do compensador (capacitivo)
V''_{sh}	- tensão do compensador (indutivo)
V'_{xL}	- queda de tensão entre V_{ger} e V_{barra} (capacitivo)
V''_{xL}	- queda de tensão entre V_{ger} e V_{barra} (indutivo)
V_{cc}	- tensão do conversor do lado cc
V_{ord}	- valor ordenado em que a tensão na barra deva atingir
vsd	- vetor de rotação espacial do eixo direto
vsq	- vetor de rotação espacial do eixo em quadratura
$V_{\text{barra_a}}$	- tensão em V_{barra} da fase a
$V_{\text{barra_b}}$	- tensão em V_{barra} da fase b
$V_{\text{barra_c}}$	- tensão em V_{barra} da fase c
X_{c}	- compensador de reativos genérico
X_{LR}	- impedância série da linha
X_{Th}	- impedância de transferência
α	- ângulo de controle de fase
δ	- ângulo de fase entre $\dot{V}_{\text{L}}$ e $\dot{V}_{\text{R}}$
ϕ	- ângulo de carga entre Q e P
ϵ	- permissividade do dielétrico
φ	- ângulo entre V_{barra} e I_{carga}
λ	- variável de integração do tempo
τ_1, τ_2, τ_3	- intervalos de tempo
$\tau'_1, \tau'_2, \tau'_3$	- complemento dos intervalos de tempo
τ	- período de chaveamento
ΔP	- diferença de potência entre a desejada e a calculada

Capítulo 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - Introdução

Um dos grandes desafios atuais é a solução para a falta de energia. O mercado brasileiro de energia elétrica experimenta atualmente um crescimento da ordem de 4,5% ao ano, devendo ultrapassar 100 mil MW em 2008. O planejamento governamental prevê a necessidade de investimentos de médio prazo da ordem de US\$ 2 a 2,5 bilhões por ano para a expansão da matriz energética brasileira, em atendimento à demanda do mercado consumidor. Para o futuro, algumas alterações devem ocorrer na estrutura dos investimentos em energia, incluindo a instalação de centrais termelétricas a gás natural, que exigem prazos de implementação e investimentos menores que as hidrelétricas [1]. As principais oportunidades de negócios no mercado de energia elétrica nacional estão ligadas à novos empreendimentos de geração para exploração pela iniciativa privada e à construção de linhas de transmissão, bem como à privatização de sistemas de distribuição e de geração. O sistema elétrico brasileiro apresenta, como particularidade, grandes extensões de linhas de transmissão e um parque produtor de geração predominantemente hidráulica. O mercado consumidor (47,2 milhões de unidades) concentra-se nas regiões Sul e Sudeste, mais industrializadas. A região Norte é atendida de forma

intensiva por pequenas centrais geradoras, a maioria termelétricas a óleo diesel. Ao longo das últimas duas décadas, o consumo de energia elétrica apresentou índices de expansão bem superior ao Produto Interno Bruto (PIB), fruto do crescimento populacional concentrado nas zonas urbanas, do esforço de aumento da oferta de energia e da modernização da economia. As classes de consumo residencial, comercial e rural cresceram substancialmente, enquanto o segmento industrial teve participação menor neste crescimento, principalmente pela utilização de tecnologias mais eficientes no uso final da eletricidade, aliada às medidas de racionalização de consumo posta em prática especialmente na década de 90 [1].

O Brasil possui no total 1.332 empreendimentos em operação no ano de 2004, gerando 87.064.216 kW de potência.

Está prevista para os próximos anos uma adição de 37.860.866 W na capacidade de geração do país, proveniente dos 70 empreendimentos atualmente em construção e mais 502 outorgados [1].

Tabela 1.1 - Matriz energética nacional [1].

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	Porcentagem
CGH	165	90.480	89.705	0,10
EOL	10	28.075	26.825	0,03
PCH	244	1.237.068	1.212.825	1,39
SOL	1	20	20	0
UHE	141	69.857.975	66.425.154	76,29
UTE	764	20.482.903	17.302.678	19,87
UTN	2	2.007.000	2.007.000	2,31
Total	1.332	94.035.872	87.064.216	100

Tabela 1.2 - Usinas em Construção.

Empreendimentos em Construção			
Tipo	Quantidade	Potência (kW)	Porcentagem
CGH	1	848	0,01
PCH	33	388.017	4,5
UHE	18	4.451.268	51,68
UTE	18	3.773.534	43,81
Total	70	8.613.667	100

sendo:

CGH - Central Geradora Hidrelétrica (até 5 MW)

EOL - Central Geradora Eólica

PCH - Pequena Central Hidrelétrica (até 30 MW)

SOL - Central Geradora Solar Fotovoltaica

UHE - Usina Hidrelétrica de Energia (acima de 30 MW)

UTE - Usina Termelétrica de Energia

UTN - Usina Termonuclear

Embora a solução mais adequada para atender ao passivo energético seja a implantação de novas gerações ou ampliação dos sistemas de transmissão e distribuição para suprir tal demanda, o aumento dos custos e o tempo de construção de novas usinas, aliadas às restrições ambientais, tornam essas alternativas economicamente inviáveis.

A complexidade da operação e planejamento de um sistema de potência se deve, em grande parte, a problemas relacionados com o sistema de transmissão que tem, como principal objetivo, fazer com que a potência gerada chegue aos centros de carga, bem como prover a interligação entre áreas de maneira eficiente e flexível.

Entretanto, as linhas de transmissão estão sujeitas a limites (térmicos e/ou de estabilidade) que restringem o nível de potência que pode ser transmitido com segurança. Desta forma, linhas críticas acabam criando pontos de estrangulamento de fluxo de potência no sistema de transmissão. Estes pontos não são fixos; eles se modificam de acordo com as alterações nos

fluxos de potência resultantes do despacho de geração, das características da carga e das contingências.

Nota-se que, com as restrições impostas às ampliações nos sistemas de potência, torna-se cada vez mais importante controlar os fluxos de potência nas linhas de transmissão, para direcioná-los para regiões que possuam capacidade ociosa de carregamento aliviando, assim, as regiões sobrecarregadas, obedecendo-se as restrições do sistema, de forma a melhorar sua capacidade de utilização, levando-o a operar mais próximo de seus limites operacionais.

Por isso, faz-se necessário o estudo de métodos e dispositivos que possibilitem controlar diretamente os fluxos de potência em determinadas linhas de transmissão. Neste sentido, flexibiliza-se a transmissão em corrente alternada (ca) através da utilização do controle de variáveis elétricas do sistema tais como a potência, a tensão, as impedâncias etc.

A busca por uma maior flexibilidade dos sistemas de potência é justificada pela necessidade dos planejadores e operadores em lidar com sistemas cada vez mais dinâmicos e com menor margem operacional. Embora o conceito de flexibilidade seja bastante geral, no que se diz respeito aos sistemas elétricos é definido como: “a habilidade dos sistemas de potência em se adaptarem rapidamente a novas circunstâncias, de modo a operarem permanentemente da melhor forma possível” [2].

O planejamento dos sistemas de potência necessita atender a dois requisitos principais:

- Confiabilidade: assegurar um suprimento confiável de potência, levando em consideração o crescimento da demanda.
- Baixo custo: minimizar investimentos, operação e manutenção.

O acrônimo FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) surgiu em 1988, quando Hingorani propôs o uso da eletrônica de potência para o controle do sistema de potência em corrente alternada [3].

A utilização dos controladores FACTS foi impulsionada na década de oitenta pelo desenvolvimento de dispositivos eletrônicos com entrada em condução e bloqueio controlados,

tais como o GTO (*Gate Turn-off Thyristor*), o MCT (*Mos Controlled Thyristor*), o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), entre outros.

Os controladores FACTS compreendem, de maneira geral, equipamentos que utilizam a eletrônica de potência, aplicados a sistemas de transmissão para o controle dinâmico do fluxo de potência e suporte de tensão, otimizando o fluxo de potência nas linhas de transmissão e determinando um ponto de operação adequado para os sistemas [4].

Os controladores FACTS normalmente são compactos, de fácil deslocamento e instalação, de baixa manutenção e de rápida resposta, o que representa grande vantagem quando comparados aos controladores eletro-mecânicos.

Em sistemas de transmissão de energia elétrica interligados por linhas (ou caminhos) paralelos, a potência transferida é proporcionalizada entre as linhas. Esta potência entregue por cada uma das linhas não é, necessariamente, a potência desejada, devido à impossibilidade de controle de fluxo, pois uma vez definidos os valores das injeções das barras (demanda ou geração), a distribuição das potências depende da topologia e das impedâncias (das linhas/transformadores) da rede.

Então, por vezes, pode ocorrer uma circulação indesejável de blocos de potência através de caminhos paralelos, ocasionando sobrecarga em alguns trechos do sistema e subutilização em outros.

O fluxo de potência numa rede de transmissão está limitado por uma combinação dos seguintes fatores:

- **Estabilidade:** O ângulo entre tensões de barras vizinhas está diretamente relacionado a estabilidade do sistema. Quanto maior o ângulo, que pode ser denominado “ângulo de transmissão”, menor a margem de estabilidade para variações dinâmicas do sistema [5]. A margem de estabilidade limita a capacidade de carregamento da linha de transmissão para comprimentos acima de 320 km [6]

Os controladores FACTS são aplicáveis às restrições de transmissão de potência relacionadas com problemas de estabilidade. Com estes objetivos, tem sido testados, por exemplo, compensadores séries controlados a tiristor e compensadores em derivação de maneira a manter estáveis sistemas sujeitos a instabilidade dinâmica.

- **Fluxos de malha ou fluxos paralelos:** Os fluxos de malha são aqueles que se formam entre dois sistemas interligados por uma malha fechada, mesmo que sejam capazes de suprir sua própria carga [7]. A figura 1.1 apresenta o fluxo de potência em laço, o gerador de 300 MW fornece 175 MW para uma carga e 125 MW para outra carga.

fonte: Taranto et al [7].

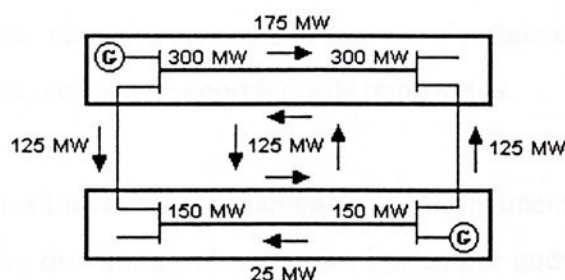


Figura 1.1 - Fluxo de potência em laço.

Os fluxos paralelos são aqueles que, mesmo fazendo parte da transmissão de potência entre dois subsistemas, afetam regiões não desejáveis do sistema interligado [7]. A figura 1.2 apresenta o fluxo paralelo, o gerador fornece potência para a carga B diretamente e também passando pela carga C.

fonte: Taranto et al [7].

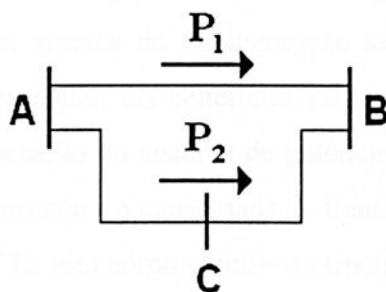


Figura 1.2 - Fluxo paralelo.

Esses dois tipos de fluxos são um problema principalmente na operação em regime permanente. O efeito pode ser observado no perfil das tensões, nas perdas de transmissão ou na redução da região segura de operação.

- **Limites de tensão :** As curvas de St. Clair descrevem a relação entre o comprimento e a capacidade da linha de transmissão. Nas curvas, a região da queda de tensão determina os limites de capacidade de transferência de potência para linhas de transmissão de 80 km à 320 km [6]. O controle da tensão na barra permite a transferência de potência em condições controladas, evitando a violação dos limites da tensão. O controle da tensão é normalmente feito por uma combinação de ajustes na potência reativa de geradores, compensadores em derivação, fixos ou controláveis mecanicamente, e transformadores de tensão. Dispositivos baseados em componentes eletrônicos permitem um controle dinâmico das tensões, no caso de ocorrência de transitórios.
- **Limites térmicos nas linhas ou equipamentos :** Normalmente os sistemas de potência operam muito abaixo dos limites térmicos das linhas, por questão de segurança, no caso de contingências, manobras, descargas atmosféricas, etc, e devido as restrições relacionadas a queda de tensão e estabilidade, anteriormente discutidas.

1.2 - Controladores FACTS.

A principal idéia dos controladores FACTS é atuar sobre os parâmetros da rede para controlar o fluxo de potência, eliminando problemas causados pelo fluxo de potência em malha e pelo fluxo paralelo não desejado, através de compensação série, e a magnitude das tensões, através de compensadores em derivação. Os benefícios potenciais trazidos por esta tecnologia incluem uma flexibilização na operação do sistema de potência e o adiamento de investimentos na transmissão, aumentando a segurança e a capacidade de transferência de potência do sistema.

Os controladores FACTS têm como objetivos principais:

- aumentar a transmissão de energia elétrica nas redes, sob condições seguras
- controlar o fluxo de potência em rotas específicas de transmissão

A seguir, serão apresentados os principais controladores FACTS e suas funções.



1.2.1 - Compensador Estático de Reativos

O compensador estático de reativos (*Static Var Compensator - SVC*) utiliza componentes passivos (reatores e banco de capacitores) que são devidamente ajustados de modo a realizar a compensação reativa desejada.

O compensador tanto fornece quanto absorve reativos. Como a potência varia rapidamente, dependendo do comportamento da carga, é necessário um sistema ágil de controle dinâmico deste tipo de compensação. Para isto, dispositivos de potência do tipo tiristores são utilizados para efetuar a regulação necessária.

O SVC é um dos mais conhecidos controladores e vem sendo utilizado desde a década de 70. A precisão e rápida resposta tornaram-no um eficiente dispositivo para o controle da tensão durante transitórios, além de redução das perdas devido ao controle de reativos, alta confiabilidade, flexibilidade e baixo custo de operação. A figura 1.3 apresenta o modelo do SVC.

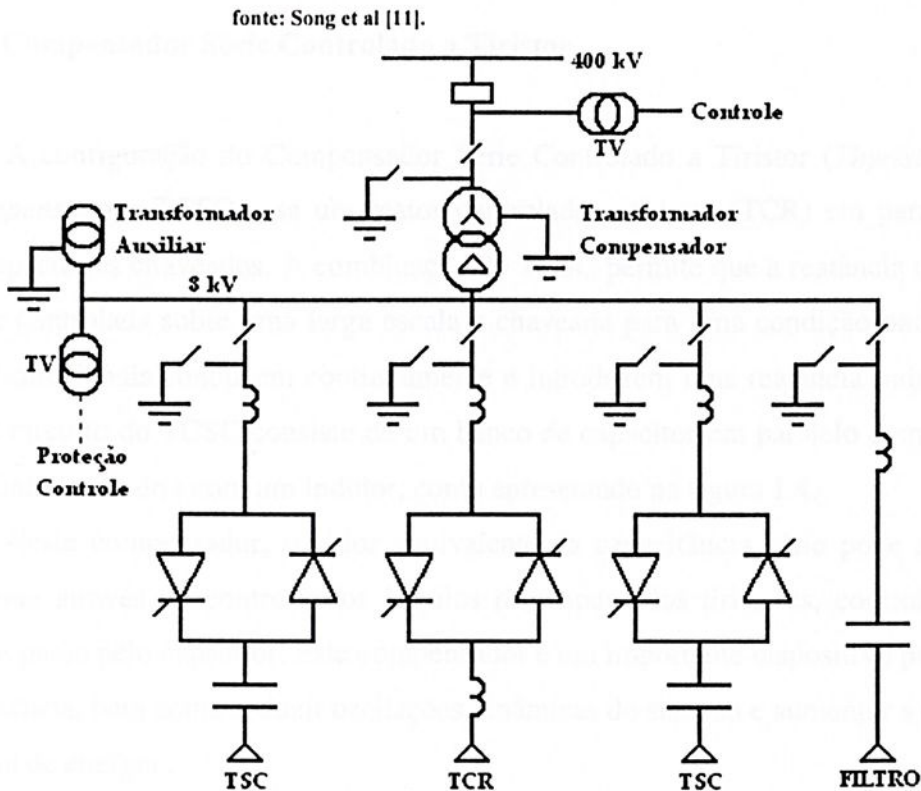


Figura 1.3 - Modelo do SVC.

Este compensador de reativos gera ou absorve potência reativa em derivação no ponto do sistema onde estiver conectado (ponto de acoplamento).

O SVC é composto por um capacitor chaveado a tiristor – TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) e reator controlado a tiristor – TCR (*Thyristor Controlled Reactor*). O reator controlado a tiristor é formado por um reator linear, conectado em série com dois tiristores bi-direcionais, ou pares conectados em “*back-to-back*” para alta potência. O capacitor chaveado a tiristor (TSC) é o único tipo de SVC que pode dar o efeito de uma capacitância variável, embora a variação se dá em degraus e em conjunto com o reator pode ser controlado suavemente. O SVC utiliza tiristores bi-direcionais, geralmente similares aqueles usados para o TCR, usados para dar um rápido chaveamento.

O SVC é capaz de absorver ou fornecer reativos dependendo da estratégia de controle adotada em função da necessidade do sistema [8].

1.2.2 - Compensador Série Controlado a Tiristor

A configuração do Compensador Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Compensator* - TCSC) usa um reator controlado a tiristor (TCR) em paralelo com um banco de capacitores chaveados. A combinação do TCSC permite que a reatância capacitiva seja suavemente controlada sobre uma larga escala e chaveada para uma condição onde os pares de tiristores bi-direcionais conduzem continuamente e introduzem uma reatância indutiva na linha. O principal circuito do TCSC consiste de um banco de capacitor em paralelo com tiristores que estão conectados em série com um indutor, como apresentado na figura 1.4.

Neste compensador, o valor equivalente da capacitância série pode ser controlada continuamente através do controle dos ângulos de disparo dos tiristores, controlando assim a corrente que passa pelo capacitor. Este compensador é um importante dispositivo para controlar o fluxo de potência, bem como reduzir oscilações dinâmicas do sistema e aumentar a capacidade de transferência de energia .

A figura 1.4 apresenta o modelo do TCSC.



fonte: Song et al [11].

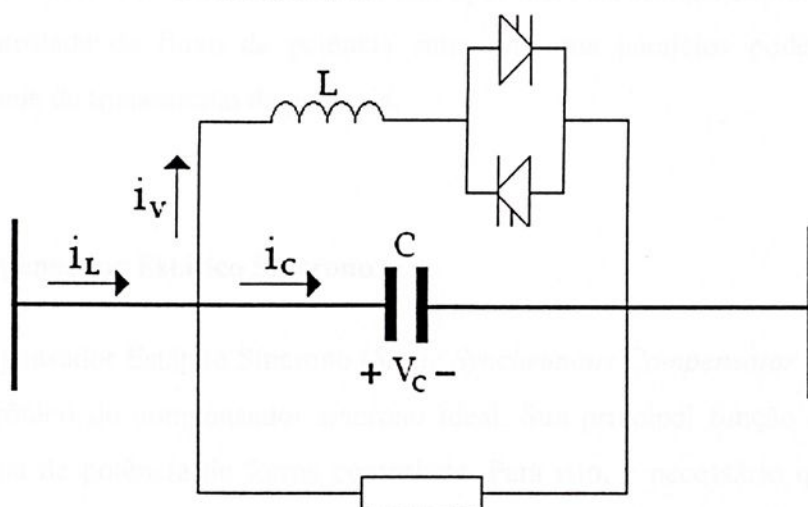


Figura 1.4 - Modelo do TCSC.

O TCSC é uma ferramenta eficiente na transmissão de potência e vem sendo utilizado com sucesso em sistemas elétricos. Com a compensação série é possível aumentar a capacidade de transferência do sistema com baixo custo de investimento a um curto prazo de instalação se comparado com a construção de linhas de transmissão adicionais [9].

Um exemplo da utilização de um TCSC no Brasil é encontrado na linha de transmissão que conecta os sistemas norte e sul. Esta linha consiste em um único circuito compacto de 500 kV e 1.020 km de comprimento, com potência na ordem de 1 GW, onde estão instalados dois compensadores séries, um em Imperatriz, no estado do Maranhão, e outro em Serra da Mesa, no Distrito Federal, em cada uma das extremidades da linha. Estes TCSCs têm a função de controlar as tensões nas extremidades da linha (ângulo de transmissão), reduzindo oscilações entre os dois sistemas e evitando possíveis perdas de sincronismo [10].

Analisando a equação 1.1, o fluxo de potência ativa pode ser aumentado, para um mesmo ângulo de transmissão diminuindo-se a reatância série efetiva da linha.

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \cdot \sin(\delta) \quad (1.1)$$

Controlando a reatância de transmissão, por meio da compensação série, tem-se uma distribuição controlada de fluxo de potência entre circuitos paralelos podendo-se aumentar, assim, a capacidade de transmissão de potência.

1.2.3 - Compensador Estático Síncrono

Compensador Estático Síncrono (*Static Synchronous Compensator - STATCOM*) é o equivalente eletrônico do compensador síncrono ideal. Sua principal função é injetar corrente reativa no sistema de potência de forma controlada. Para isto, é necessário que o STATCOM trabalhe como uma fonte de tensão controlada [12]. É formado por um conversor como fonte de tensão (*Voltage Sourced Converter - VSC*) acoplado ao barramento do sistema através de uma reatância indutiva. Essa reatância tem uma importância fundamental neste controlador, já que provoca a ortogonalidade da corrente de compensação em relação a tensão do sistema, além de promover a filtragem da corrente entre o compensador e o sistema ca. A figura 1.5 apresenta o diagrama simplificado do STATCOM.

fonte: Song et al [11].

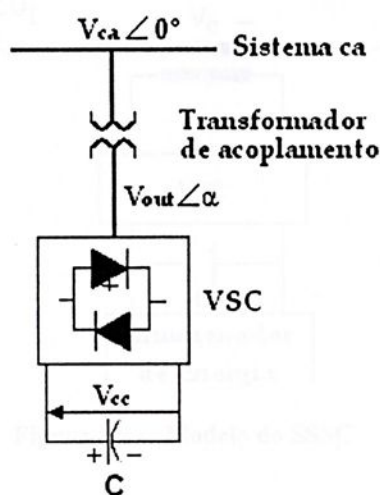


Figura 1.5 - Modelo do STATCOM.

Este compensador apresenta várias características funcionais desejáveis, tais como a capacidade de injetar elevadas correntes capacitivas durante períodos transitórios de sub-tensão e uma impedância interna indutiva, cujos valores típicos não causam ressonância com a rede de

transmissão. Ao contrário dos compensadores passivos, que possuem tempo lento de resposta, baixa impedância de curto circuito e necessitam de manutenções freqüentes, o STATCOM atende aos requisitos modernos de flexibilidade no controle dinâmico de fluxo de potência, dentro dos novos conceitos de sistemas flexíveis.

1.2.4 - Compensador Série Estático Síncrono

O Compensador Série Estático Síncrono (*Static Synchronous Series Compensator - SSSC*) é constituído por um conversor estático como fonte de tensão, com saída controlada em magnitude e ângulo, conectado em série com a linha de transmissão. O SSSC oferece uma alternativa à compensação série passiva, podendo gerar ou absorver potência ativa, além da reativa, através do controle da posição angular e da magnitude da tensão inserida, independente da corrente de linha.

A figura 1.6 apresenta o modelo do SSSC.

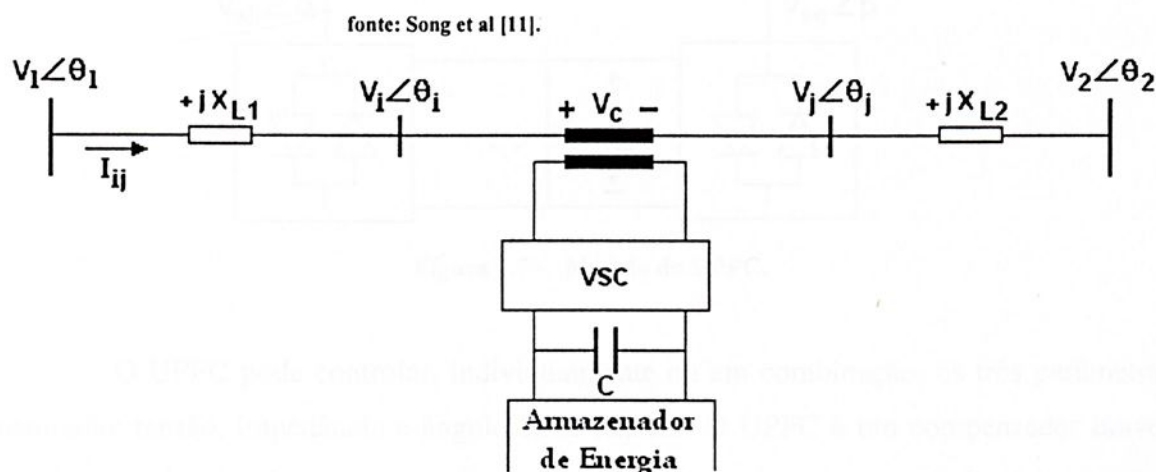


Figura 1.6 - Modelo do SSSC.

As potências ativa e reativa trocadas entre o SSSC e o sistema ca é dada pela relação entre a corrente que está passando pela linha de transmissão e a tensão de saída da fonte série. A corrente na linha é resultante do fluxo de potência no sistema e, portanto, não pode ser localmente modificado.

1.2.5 - Controlador de Fluxo de Potência Unificado

O Controlador de Fluxo de Potência Unificado (*Unified Power Flow Controller – UPFC*) é constituído, basicamente, do agrupamento do STATCOM com o SSSC num único equipamento [13]. É formado por dois conversores ligados "back-to-back" pelo lado cc, sendo que um deles é ligado em série com a linha de transmissão e o outro, em derivação com o barramento do sistema. A figura 1.7 apresenta o modelo do UPFC.

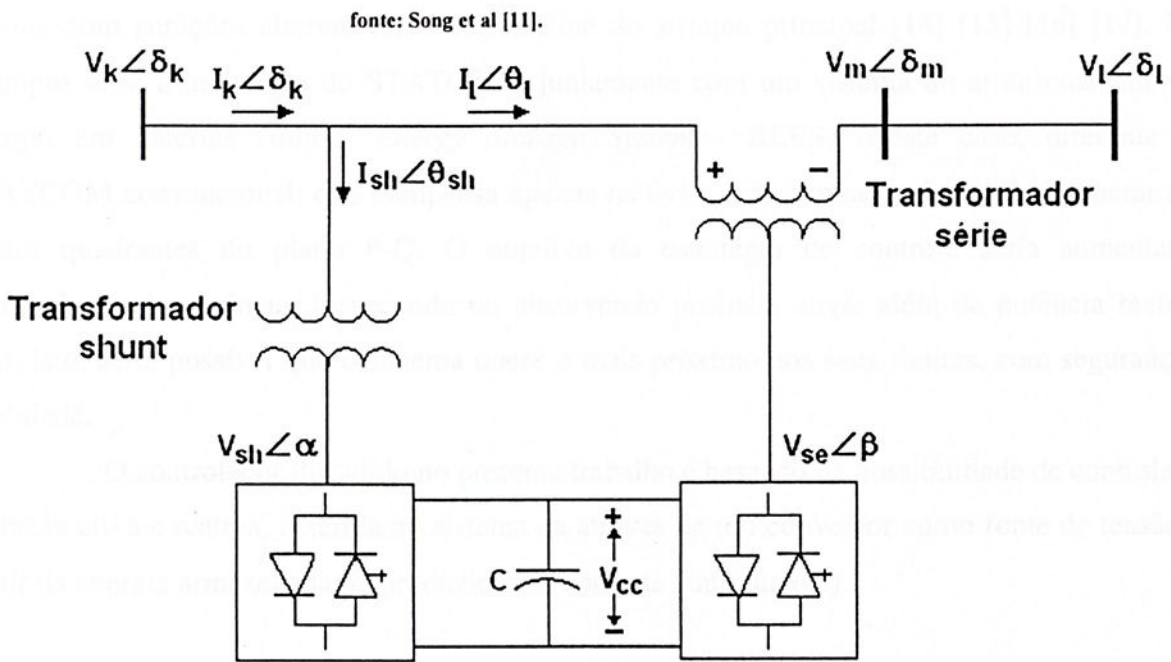


Figura 1.7 - Modelo do UPFC.

O UPFC pode controlar, individualmente ou em combinação, os três parâmetros de transmissão: tensão, impedância e ângulo entre tensões. O UPFC é um compensador universal, capaz de controlar simultaneamente o fluxo de potência que passa por uma linha de transmissão e a tensão ca de uma barra controlada. Este controlador tem resposta muito rápida quando comparado com o desempenho de compensadores passivos.

A capacidade de armazenar energia no elo cc geralmente é pequena, pois a potência ativa absorvida pelo conversor em derivação é igual à potência ativa inserida no sistema pelo conversor série e vice-versa. A potência reativa compensada pelos conversores em derivação ou

série podem ser escolhidas independentemente uma da outra, dando assim uma grande flexibilidade no controle do fluxo de potência pela linha [11].

1.2.6 - Conversores Estáticos como Compensadores de Potência

Atualmente, várias pesquisas tem sido desenvolvidas de modo a combinar a flexibilidade dos conversores como fonte de tensão com sistemas acumuladores de energia, ou mesmo com gerações alternativas, independente do sistema principal [14] [15] [16] [17]. Um exemplo seria a utilização do STATCOM, juntamente com um sistema de armazenamento de energia em baterias (*Battery Energy Storage System* - BEES). Neste caso, diferente do STATCOM convencional, que compensa apenas reativos, este compensador poderia operar nos quatro quadrantes do plano P-Q. O objetivo da estratégia de controle seria aumentar a transferência de potência, fornecendo ou absorvendo potência ativa, além da potência reativa. Com isto, seria possível que o sistema opere o mais próximo aos seus limites, com segurança e qualidade.

O controlador discutido no presente trabalho é baseado na possibilidade de controle de potência ativa e reativa, inserida no sistema ca através de um conversor como fonte de tensão, a partir da energia armazenada ou produzida em corrente contínua (cc).

O trabalho de pesquisa aqui descrito foi então dividido em sete capítulos.

O presente capítulo (Capítulo 1) define o conceito de sistemas flexíveis e apresenta os principais controladores FACTS.

No Capítulo 2 é definida "Transferência de Potência" e são avaliados os limites de transferência de potência devido aos parâmetros do sistema de transmissão (impedância de transferência, fator de potência de transferência e magnitude de tensão).



No Capítulo 3 são apresentados alguns tipos de fontes renováveis que utilizam energia eólica ou energia fotovoltaica, bem como os principais componentes para a sua construção, os custos dos equipamentos e a forma como é gerada a energia elétrica.

No Capítulo 4 é apresentado o funcionamento do compensador síncrono estático conectado em derivação com o barramento em que se deseja fazer a compensação. É feito o controle da tensão (magnitude e/ou ângulo) do conversor como fonte de tensão (VSC) atuando de maneira capacitiva e indutiva, a modelagem do conversor, sua composição, bem como sua operação e controle.

No Capítulo 5 é discutida a modulação por vetores espaciais (SVPWM) que permite reduzir o número de comutações das chaves eletrônicas.

No Capítulo 6 são apresentados resultados de simulações do VSC modulado por vetores espaciais PWM, comprovando o seu funcionamento.

No Capítulo 7, são mencionadas as conclusões mais importantes e os futuros trabalhos.



Capítulo 2

TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução

O sistema de transmissão tem como principal função fornecer energia proveniente dos geradores para os consumidores (cargas). Entretanto, os parâmetros físicos do sistema elétrico acabam por limitar a transferência de potência.

Neste capítulo, são estudados limites na transferência de potência devido à impedância de transferência, ao fator de potência e à magnitude de tensão nos barramentos.



2.2 - A Característica da Transferência de Potência

A característica da transferência de potência é determinada pela tensão na barra de envio (V_L), fator de potência na barra de recepção e impedância de transferência entre as barras de envio e recepção. Para ilustrar a característica da transferência de potência, um sistema simplificado é apresentado na figura 2.1. O sistema é composto por dois subsistemas. O subsistema I é representado por uma tensão de Thevenin e transfere potência para o subsistema II através da impedância de transferência denominada x_{Th} . Um segundo subsistema é conectado no barramento V_R . Normalmente, a potência ativa pode fluir em ambas direções, dependendo da localização e da capacidade das fontes de energia disponíveis em ambos os subsistemas, bem como da localização das cargas.

As potências ativa e reativa na barra V_R , transferidas através de x_{Th} , são denominadas P_T e Q_T , respectivamente. O fator de potência de transferência (f_{pr}) na barra V_R resulta de uma relação entre P_T e Q_T , de acordo com as equações 2.1 e 2.2 [18]:

$$f_{pr} = \cos(\varphi) \quad (2.1)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Q_T}{P_T} \right) \quad (2.2)$$

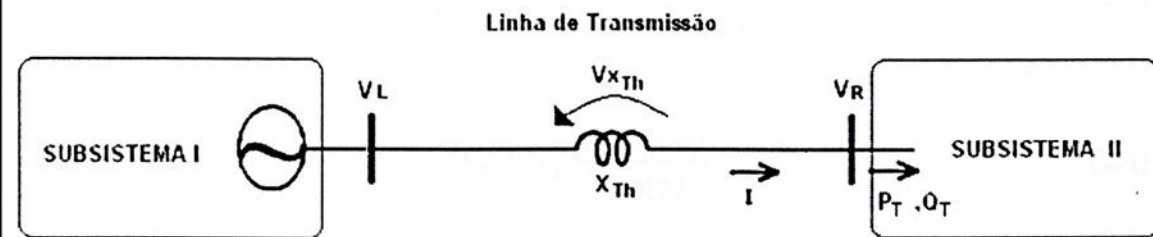


Figura 2.1 - Diagrama de circuito.

Na figura 2.1, se o subsistema II está absorvendo potência reativa, Q é positivo, de acordo com a convenção adotada para a potência na carga. A potência reativa total absorvida pela impedância de transferência e pela carga deve ser suprida pelo subsistema I. Se o subsistema II estivesse injetando potência reativa na barra R, Q seria negativo. Neste caso, o subsistema I poderia, inclusive, receber potência reativa do subsistema II, dependendo da quantidade de potência reativa absorvida pela impedância de transferência. O diagrama fasorial da tensão e da corrente para uma carga resistiva-indutiva conectada na barra R é apresentado na figura 2.2. $\dot{V}_L$ e $\dot{V}_R$ são representações fasoriais das tensões de envio e recepção.

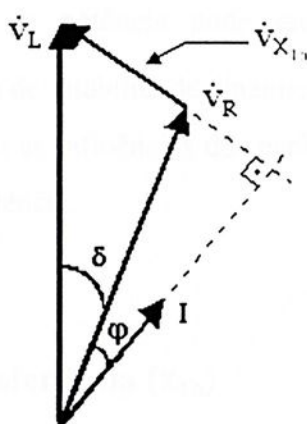


Figura 2.2 - Diagrama fasorial.

A equações 2.3 e 2.4, são derivadas das relações trigonométrica dos vetores da figura 2.2, dadas da seguinte maneira:

$$P_T = \frac{V_L^2 \sin(\delta) \cos(\delta + \varphi)}{x_{Th} \cos(\varphi)} \quad (2.3)$$

$$V_R = V_L \frac{\cos(\delta + \varphi)}{\cos(\varphi)} \quad (2.4)$$

sendo:

δ - ângulo de transmissão entre $\dot{V}_L$ e $\dot{V}_R$

φ - ângulo de carga ($\varphi = \text{tg}^{-1}(Q_T/P_T)$)

V_L - valor rms de $\dot{V}_L$

V_R - valor rms de $\dot{V}_R$

Variando o ângulo de transmissão δ nas equações 2.3 e 2.4 e plotando P em função de V , resulta em uma curva denominada “característica de transferência de potência” ou “característica P-V” do sistema de potência apresentado na figura 2.1. Como visto anteriormente, a característica da transferência de potência é influenciada pela magnitude das tensões (V_L e V_R), pela impedância de transferência entre as barras (x_{Th}) e pelo fator de potência de transferência (f_{p_T}). O limite de transferência de potência pode ser definido como *máxima potência transmissível* e é associado ao limite de estabilidade dinâmica do sistema.

A seguir serão discutidas as influências dos parâmetros do sistema de transmissão na característica de transferência da potência.

2.3 - Impedância de Transferência (x_{Th})

A influência da impedância de transferência pode ser analisada mantendo-se a tensão de envio e de recepção, bem como o fator de potência de transferência inalterados [18]. Supondo que a impedância da carga varie do infinito para zero (de circuito aberto para curto-circuito). Analisando a equação 2.4, o ângulo de transmissão δ varia de $(\delta+\phi)=0^\circ$ para $(\delta+\phi)=90^\circ$. A característica da transferência de potência do sistema apresentado na figura 2.1, variando-se δ em ambas as equações 2.3 e 2.4 e plotando P_T em função de V_R [18].

Analisando a figura 2.1, admitindo que o subsistema II possui uma carga puramente resistiva (potência reativa igual a zero), as equações 2.3 e 2.4 tornam-se:

$$P_T = \frac{V_L^2 \sin(2\delta)}{2x_{Th}} \quad (2.5)$$

$$V_R = V_L \cos(\delta) \quad (2.6)$$

Adotando três valores para x_{Th} ($x_{Th1} = 0,7$, $x_{Th2} = 0,5$ e $x_{Th3} = 0,3$) e mantendo-se as duas tensões e o fator de potência inalterados, temos que cada curva na figura 2.3, representa a característica de transferência de potência para cada um dos três valores de x_{Th} substituídos na equação 2.5.

Nessa figura, a máxima potência de transferência da curva 1 é $P_{M1} = 0,93$ pu; para a curva 2 é $P_{M2} = 1,25$ pu e para a curva 3 é $P_{M3} = 2,08$ pu. Essas três máximas potências de transmissão ocorrem com a mesma tensão de V_M .

Analizando a característica P-V na figura 2.3, para uma dada demanda de potência e um fator de potência especificado, quanto maior a impedância de transferência x_{Th} , maior será a redução da magnitude da tensão na barra V_R .

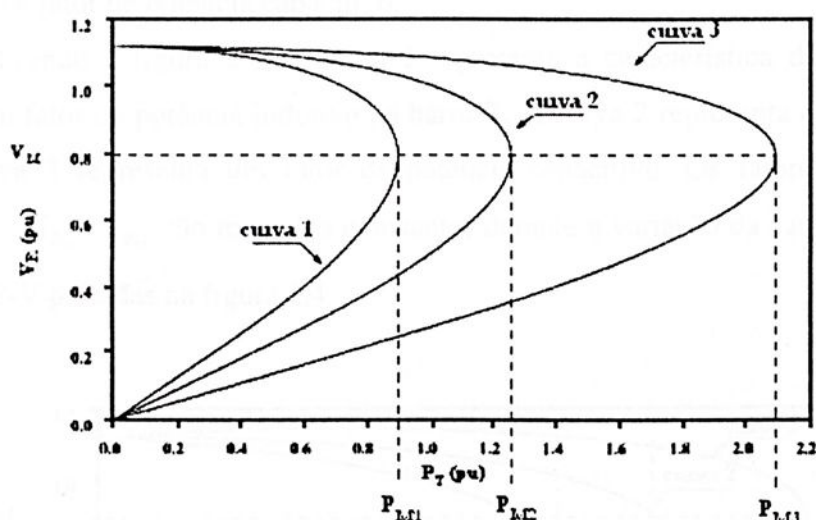


Figura 2.3 - Característica P-V para valores distintos de x_{Th} .

A mudança de x_{Th} afeta principalmente o ângulo de transmissão (δ). Se a potência ativa P_T é alterada, a tensão $\dot{V}_{x_{Th}}$ produzida pela corrente de linha I passando por x_{Th} também muda. P_T está relacionado com a componente de corrente I em fase com $\dot{V}_R$ (componente ativa). Se a impedância x_{Th} é puramente indutiva, $\dot{V}_{x_{Th}}$ será ortogonal à corrente (ver figura 2.2) e $\dot{V}_{x_{Th}}$ é quase ortogonal a $\dot{V}_R$. Se x_{Th} é alterado, $\dot{V}_{x_{Th}}$ e, conseqüentemente, o ângulo de transmissão δ entre $\dot{V}_L$ e $\dot{V}_R$, também será.

2.4 - Fator de Potência de Transferência (f_{P_T})

As equações 2.3 e 2.4 relacionam a transferência de potência P_T e a tensão V_R com o fator de potência de transferência ($\cos\phi$). Se o fator de potência for capacitivo, indicando injeção de potência reativa na barra R através do subsistema II, a potência reativa em x_{Th} é parcialmente (ou totalmente, dependendo da quantidade de potência reativa injetada) compensada [18].

Adotando-se o mesmo sistema simplificado apresentado na figura 2.1a, observa-se o efeito do f_{P_T} na curva P-V.

Mantendo-se a tensão de envio e a impedância de transferência inalterados, três cargas, com fator de potência distintos são consideradas: fator de potência indutivo, fator de potência unitário e fator de potência capacitivo.

Analisando a figura 2.4, a curva 1 representa a característica da transferência de potência para um fator de potência indutivo na barra R. A curva 2 representa o fator de potência unitário. A curva 3 representa um fator de potência capacitivo. Os fatores de potência de transferência $f_{P_{T1}}$, $f_{P_{T2}}$ e $f_{P_{T3}}$ são mantidos constantes durante a variação da carga, para cada uma das três curvas P-V plotadas na figura 2.4.

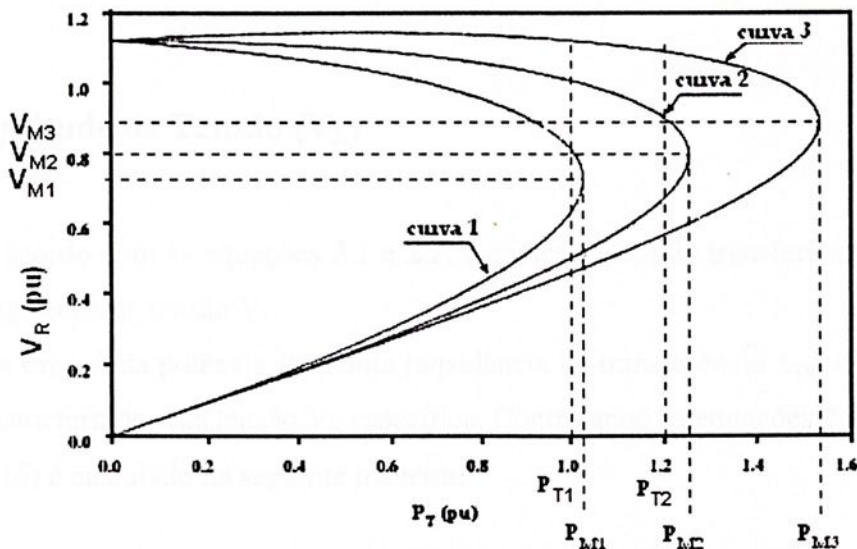


Figura 2.4 - Característica P-V para fator de potência distinto.

Na figura 2.4, quando a potência P_{T1} é igual a 1,0 pu, a tensão V_R é igual a 0,79 pu para $f_{P_{T1}}$, na curva 1. Para $f_{P_{T2}}$ (curva 2, fator de potência unitário) e o mesmo P_{T1} a tensão é igual a 1,0 pu. Para $f_{P_{T3}}$ (curva 3), a tensão é igual a 1,12 pu. Considerando a segunda transferência de potência P_{T2} igual 1,19 pu, não é possível transferir potência com $f_{P_{T1}}$, a máxima potência disponível na curva 1 é menor que 1,19 pu. Para $f_{P_{T2}}$, a tensão V_R é igual a 0,9 pu, na qual é 10% menor que a tensão final igual a 1,0 pu (P_{T1}). Para $f_{P_{T3}}$, V_R é igual a 1,09 pu.

O aumento da potência transferida não resulta, necessariamente, em uma redução da magnitude tensão V_R . Para um fator de potência capacitivo, a tensão será reduzida apenas nas proximidades da máxima transferência de potência.

Analizando a figura 2.4, se fator de potência de transferência é corrigido, a máxima potência disponível pode ser significativamente aumentada. Alterando-se o fator de potência de transferência, a máxima potência pode ser transferida a uma queda de tensão aceitável na barra V_R .

Na figura 2.4, a máxima potência disponível P_{MAP1} é igual a 1,03 para $f_{P_{T1}}$ (curva 1), com a tensão $V_{M1} = 0,72$ pu. P_{MAP2} é igual a 1,25 para $f_{P_{T2}}$ (curva 2), com $V_{M2} = 0,79$ pu. P_{MAP3} é igual a 1,53 para $f_{P_{T3}}$ (curva 3), com $V_{M3} = 0,88$ pu.

2.5 - Magnitude de Tensão (V_L)

De acordo com as equações 2.1 e 2.2, a característica da transferência de potência é afetada pela magnitude de tensão V_L .

Para uma dada potência P_T e uma impedância de transferência x_{Th} , a tensão V_L pode ser controlada para termos uma tensão V_R específica. Controlando as equações 2.3 e 2.4, o ângulo de transmissão (δ) é calculado da seguinte maneira:

$$\delta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{P_T x_{Th}}{V_L^2 + x_{Th} Q_T} \right) \quad (2.7)$$

A tensão V_R é calculada substituindo o ângulo δ da equação 2.7, na equação 2.4. A influência da tensão V_L na característica P-V é demonstrado.

Neste exemplo, mantendo-se a impedância de transferência e o fator de potência (valor unitário) inalterados, a equação 2.7 é simplificada como segue:

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{P_T x_{Th}}{V_L^2} \right) \quad (2.8)$$

Na figura 2.5, é apresentado um sistema simplificado da figura 2.1, com dois valores diferentes de V_L (V_{L1} e V_{L2}). O subsistema I necessita prover potência ativa para a carga conectada na barra L com uma tensão de 1,0 pu.

Na curva 1, a potência ativa P_{T1} é 1,0 pu. A tensão V_{L1} é 1,12 pu para resultar na tensão V_R igual a 1,0 pu.

Na curva 2, a potência ativa é aumentada para P_{T2} é 1,2 pu e também deve suprir $V_R=1,0$ pu. Para satisfazer cada condição, a tensão V_L é aumentada para $V_{L2} = 1,16$ pu.

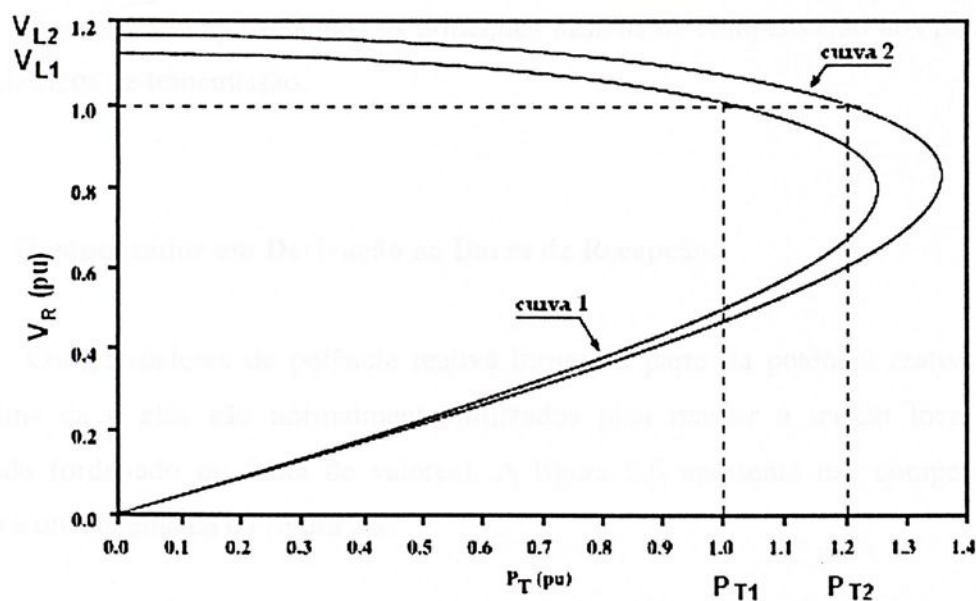


Figure 2.5 Característica da potência para dois valores de V_L .

Analisando a figura 2.5 conclui-se que, a influência da magnitude de V_L na característica da transferência de potência controla a tensão V_R através do controle apropriado da tensão V_L .

Nessa figura, a magnitude da tensão V_L não afeta significativamente a máxima potência disponível.

2.6 - Controle do Fluxo de Potência.

Conforme observado anteriormente, alterando-se a impedância de transferência (x_{Th}) ou o fator de potência de transferência (f_{p_r}), a característica do fluxo de potência no sistema de transmissão é afetado. Se estes parâmetros são controlados, o fluxo de potência pode ser modificado para atender a uma demanda de potência numa condição de operação desejada [18].

Os controladores FACTS são utilizados para controlar a impedância de transferência através dos compensadores série influenciando diretamente no ângulo de transmissão (δ). A magnitude da tensão através de compensadores em derivação (shunt) que influenciam no f_{p_r} .

A seguir são apresentados os princípios básicos de compensação dos parâmetros dos sistemas elétricos de transmissão.

2.6.1 - Compensador em Derivação na Barra de Recepção.

Compensadores de potência reativa fornecem parte da potência reativa requisitada pelo sistema ca e eles são normalmente utilizados para manter a tensão local num valor especificado (ordenado ou faixa de valores). A figura 2.6 apresenta um compensador shunt conectado a um sistema ca da figura 2.1.

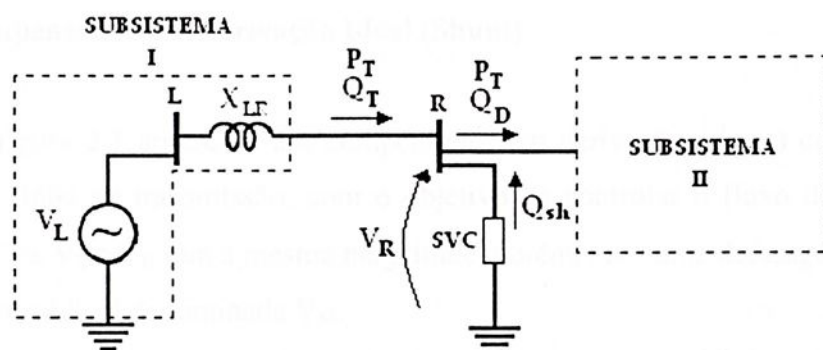


Figure 2.6 - Compensador em derivação conectado na barra de recepção.

O compensador shunt ilustrado na figura 2.6 é um compensador que fornece potência capacitiva e indutiva. O compensador shunt injeta potência reativa Q_{sh} na barra de carga R. A potência reativa total alcançada na barra de carga R, Q_T , é agora a soma de potência reativa requisitada pelo subsistema II, Q_D , mais a potência reativa injetada pelo compensador reativo, Q_{sh} . A potência reativa injetada Q_{sh} pode ser adiantada (capacitiva) ou atrasada (indutiva), dependendo das exigências do sistema ca. Considerando uma operação ideal do compensador, por exemplo, a tensão V_R seria mantida em um valor controlado V_{Rord} .

O fluxo de potência é dado por:

$$P_T = \frac{V_L^2 \sin(\delta)}{X_{LR}} \quad (2.9)$$

A máxima transferência de potência calculada usando a equação 2.9 é precisamente duas vezes a máxima transferência de potência calculada usando equação 2.3. Além disso, a máxima potência calculada na equação 2.9 acontece num determinado ângulo de transmissão δ que é duas vezes o ângulo δ calculado na equação 2.3 para a máxima potência.

Examinando a equação 2.3 (uma condição geral) e a equação 2.9, pode-se deduzir que dada uma determinada potência ativa, a transferência se dá com um menor ângulo de transmissão δ quando a tensão de recepção é mantido através da compensação de reativos. Adicionalmente, a máxima potência disponível é melhorada.

2.6.2 - Compensador em Derivação Ideal (Shunt)

A figura 2.7 apresenta um compensador em derivação (shunt) conectado no ponto médio de uma linha de transmissão, com o objetivo de controlar o fluxo de potência. Para a análise, as tensões V_L e V_R têm a mesma magnitude, porém, com uma defasagem angular de δ . A tensão do ponto médio é denominada V_M .

O compensador shunt injeta potência reativa Q_{sh} na barra M. Essa injeção de potência reativa pode ser capacitiva ou indutiva, dependendo do que o sistema está requerendo [19].

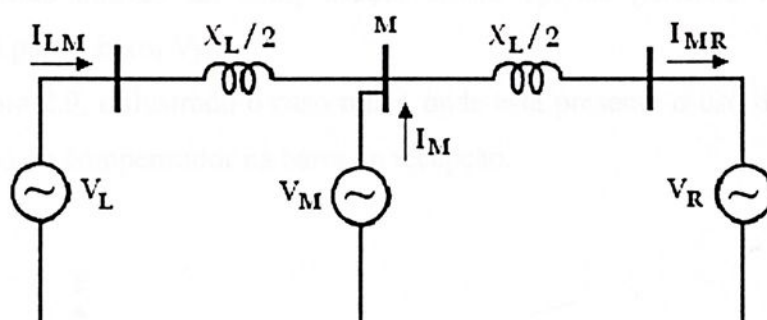


Figura 2.7 - Compensador shunt conectado no ponto médio.

A figura 2.8 apresenta o diagrama fasorial para o sistema da figura 2.7.

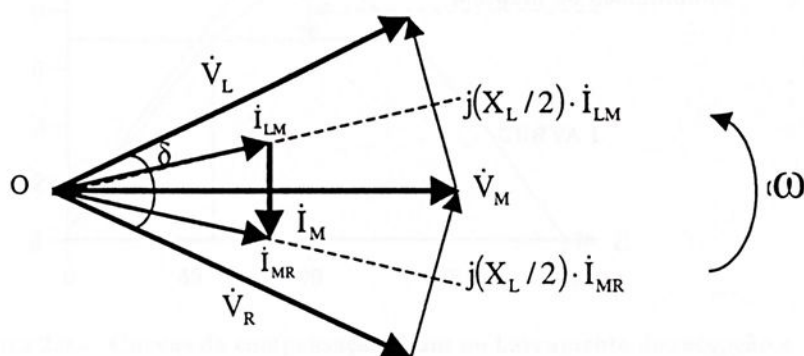


Figura 2.8 - Diagrama fasorial para a compensação shunt.

Da figura acima, a tensão $\dot{V}_M$ tem a mesma magnitude das tensões $\dot{V}_L$ e $\dot{V}_R$.

Portanto, a potência transferida da barra L para a barra R é dada por:

$$P_{L-R} = \frac{2 \cdot V^2}{X_{L-R}} \cdot \sin(\delta/2) \quad (2.10)$$

sendo: $V = V_M = V_L = V_R$.

Comparando-se a equação 2.3 com a 2.10, há um aumento na transmissão de potência ativa na linha. Na figura 2.8, quando a defasagem angular (δ) entre as barras L e M for igual a $\delta/2$ o fasor corrente de linha $\dot{I}_M$ está em quadratura com a tensão $\dot{V}_M$, portanto, não há fluxo de potência ativa fluindo através do compensador shunt, apenas potência reativa fluindo do compensador shunt para a barra V_M .

Na figura 2.9, é ilustrado o caso típico onde está presente o uso do compensador no ponto médio e o uso do compensador na barra de recepção.

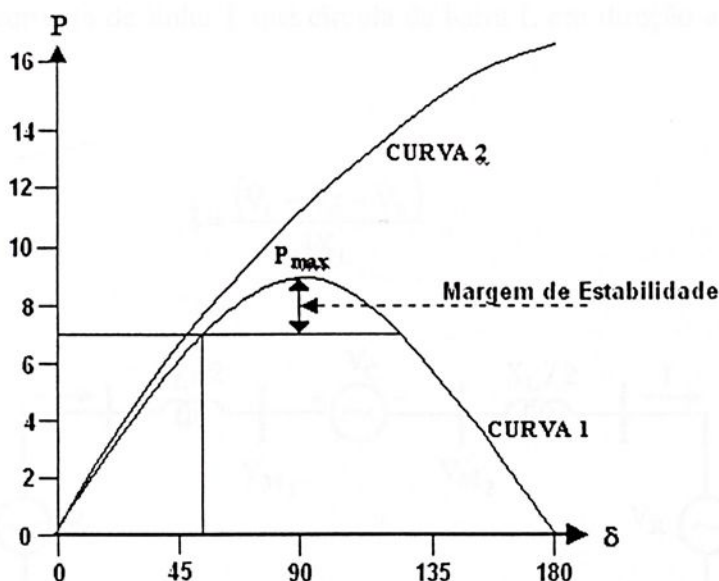


Figura 2.9 - Curvas da compensação shunt no barramento de recepção e compensação no ponto médio.

A curva 1 apresenta a compensação shunt no barramento de recepção, portanto, é usada a equação 2.3, onde há um incremento na estabilidade do sistema e também um ganho máximo na potência transmitida.

A curva 2 apresenta a compensação no ponto médio, portanto, é usada a equação 2.10, onde se tem um aumento na capacidade de transferência de potência na linha de transmissão.

2.6.3 - Compensador Série Ideal

A figura 2.10 apresenta um compensador série ideal conectado a linha, representado por uma fonte de tensão V_C . O objetivo da compensação série é controlar a reatância equivalente da linha fazendo, assim, o controle do ângulo de transmissão.

Para exemplificar o efeito da compensação série na característica de transferência de potência, uma fonte de tensão V_C é inserida entre $X_L/2$, como apresenta a figura 2.10.

Da figura 2.11, admitindo que $\dot{V}_L$ tem a mesma magnitude e uma defasagem angular em relação à $\dot{V}_R$, a corrente de linha $\dot{I}$ que circula da barra L em direção a barra R, é dada pela equação 2.11:

$$\dot{I} = \frac{(\dot{V}_L - \dot{V}_C - \dot{V}_R)}{jX_L} \quad (2.11)$$

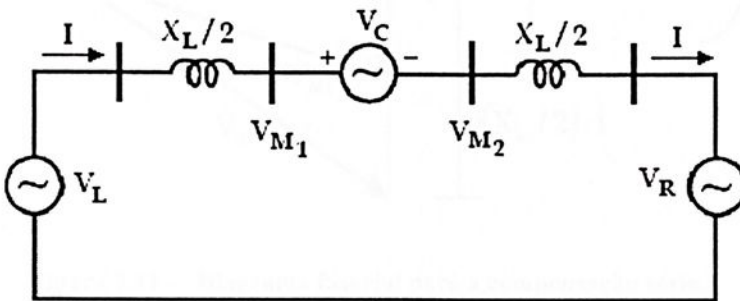


Figura 2.10 - Compensador série ideal.

Analisando a corrente de linha $\dot{I}$, se a tensão $\dot{V}_C$ estiver em quadratura com esta corrente, o compensador série não irá fornecer ou absorver potência ativa, trocando apenas potência reativa na fonte V_C com o sistema.

A equação 2.12, apresenta o fluxo de potência na linha:

$$P_{L-R} = \frac{V^2}{X_L(1-s)} \cdot \sin(\delta) \quad (2.12)$$

sendo: $V = V_L = V_R$

s - taxa de compensação série dada por:

$$s = \frac{X_C}{X_L} \quad (2.13)$$

sendo: X_C - compensador de reativos genérico inserido em série com X_L .

Concluimos que, a potência transferida pode ser aumentada variando-se a taxa de compensação série.

Na figura 2.11, a fonte V_C está fornecendo uma potência reativa capacitiva, portanto, a corrente $\dot{I}$ está adiantada em quadratura com o fasor $\dot{V}_C$.

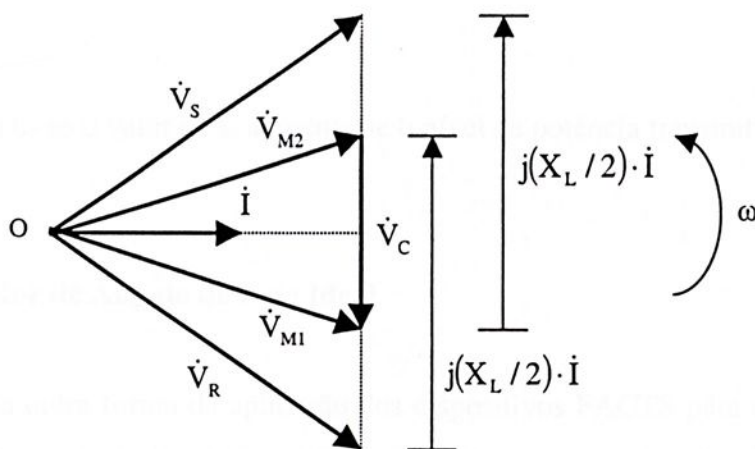


Figura 2.11 - Diagrama fasorial para a compensação série.

A figura 2.12 apresenta a potência em relação ao ângulo de transmissão (δ), com variações de s .

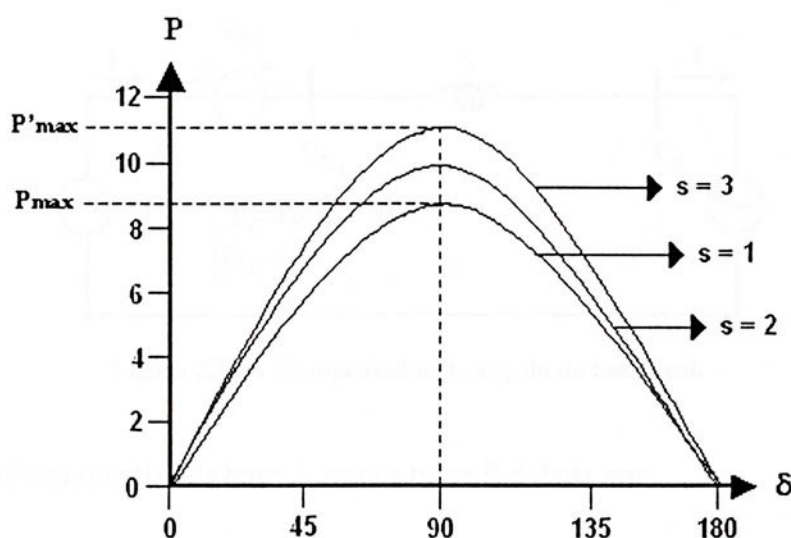


Figura 2.12 - Gráfico da potência transmitida pelo sistema.

Na figura 2.12, a compensação série aumenta a máxima potência, de $P_{\max}$ para $P'_{\max}$, mas o ângulo de transmissão permanece inalterado como verificado na equação 2.12, sendo:

$$S_1 < S_2 < S_3$$

ou seja, quando aumenta-se o valor de s , aumenta-se o nível de potência transmitida pelo sistema.

2.6.4 - Compensador de Ângulo de Fase Ideal

Esta é uma outra forma da aplicação dos dispositivos FACTS para controlar o fluxo de potência na linha de transmissão. A figura 2.13 apresenta um compensador de ângulo de fase conectado no sistema ca. O seu objetivo é alterar seus módulos ou suas defasagens angulares, ou seja, este compensador controla a diferença entre os ângulos de fase de dois sistemas ca, atuando no controle do fluxo de potência trocado entre os sistemas [8].

Analisando a figura 2.14, os fasores $\dot{V}_L$, $\dot{V}_{LI}$ e $\dot{V}_R$ possuem a mesma magnitude, onde a tensão $\dot{V}_{pq}$ pode assumir qualquer defasagem em relação a corrente de linha $\dot{I}$ e sua região de operação é de acordo com o círculo, tendo o seu raio máximo igual a máxima tensão $\dot{V}_{pq}$ de compensação, ou seja, este fasor $\dot{V}_{pq}$ pode ser controlado em magnitude e ângulo. Este controlador pode absorver ou suprir potência ativa ou reativa.

A figura 2.15 apresenta as três formas de compensação da potência em função ao ângulo de carga [19].

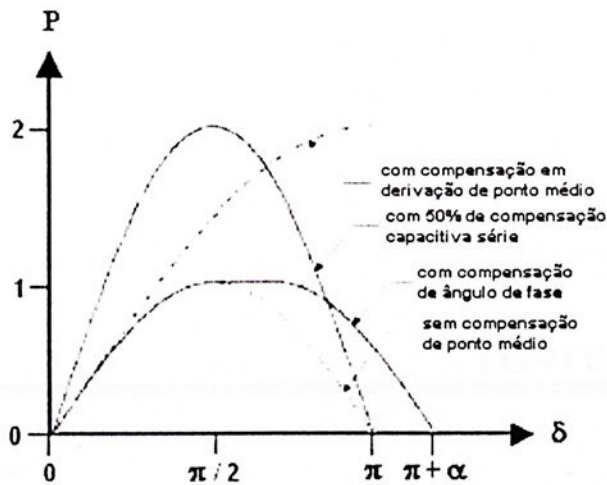


Figura 2.15- Compensação shunt, série, ângulo de fase e sem compensador de ponto médio.

2.7 - Conclusão

Neste capítulo foi discutido o efeito da impedância de transferência, do fator de potência de transferência e da magnitude de tensão na transferência de potência. Se as variáveis do sistema trifásico são controladas, a potência ativa pode ser transferida de acordo com condições de operação pré-definidas. Foram apresentados três tipos de compensação numa linha de transmissão: compensação em derivação (aumentar a margem de estabilidade dinâmica), compensação série (aumentar a capacidade de transferência de potência ativa) compensador de ângulo de transmissão (quando se deseja conectar dois sistemas distintos que possuem um ângulo grande de transmissão).

Capítulo 3

FONTES ALTERNATIVAS

3.1 - Introdução

A maior parte da energia utilizada no planeta é de origem não renovável, seja de fonte mineral, atômica ou combustíveis fósseis. A energia pode ser utilizada de forma mais racional e menos dispendiosa, por meios de fontes renováveis como a eólica, solar, marés, geotérmica e outras.

Fontes renováveis de energia são aquelas que, depois de utilizadas, são disponibilizadas para nova utilização.

As fontes de energia denominadas alternativas são aquelas que não aparecem em quantidade significativa na matriz energética considerada. No sistema elétrico brasileiro, por exemplo, a principal fonte primária é a hidráulica. Desta forma, em princípio, a utilização dos recursos hídricos não se constituem uma forma alternativa de energia. Entretanto, sob o ponto de vista da conversão, há de se considerar o impacto de micro e pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) de modo distinto das grandes centrais.



Vários geradores de energia elétrica que utilizam fontes primárias renováveis produzem energia elétrica cuja frequência é distinta daquelas utilizadas nos sistemas de corrente alternada que, no caso do sistema elétrico brasileiro, é de 60 Hz. Algumas fontes geram em corrente contínua e outras, como é o caso de aerogeradores, em frequência variável. Nestes casos, faz-se necessário a adequação da energia gerada de maneira que o gerador possa ser acoplado ao sistema de distribuição e possa fornecer energia com as características exigidas pelas cargas. A utilização de conversores estáticos baseados em chaves eletrônicas de potência, do tipo liga e desliga (*turn on, turn off*), tem permitido o condicionamento de grandes blocos de energia com velocidade e qualidade cada vez mais apropriadas. Assim, o acoplamento dos geradores assíncronos aos sistemas de corrente alternada pode ser realizado com o uso dos conversores estáticos, que permitem a inversão da energia gerada em corrente alternada e o controle automático de frequência, no caso de geradores com frequência de saída variável.

Os ventos e os raios solares são fontes abundantes de energia renovável, limpas e disponíveis em praticamente todos os lugares. Além de serem renováveis, as energias eólica e fotovoltaica podem ser utilizadas para o fornecimento de energia para pequenas populações onde não há acesso da energia do sistema.

A seguir, será apresentada uma descrição de cada uma dessas fontes alternativas, eólica e fotovoltaica, e respectivas conexões ao sistema elétrico em corrente alternada [20].

3.2 - Energia Eólica

No início dos anos 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse dos países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para a produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e do carvão. Atualmente, a indústria de turbinas eólicas vem acumulando crescimentos anuais acima de 30% e movimentando cerca de 2 bilhões de dólares em vendas por ano [21].

No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cata-ventos múltiplos para bombeamento d'água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado.

A capacidade instalada no Brasil, mais precisamente em Pernambuco e no Ceará, 28,075 MW, com turbinas eólicas de médio e grande porte conectado à rede elétrica. Além disso existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas - bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural.

3.2.1 - Custo da Energia Eólica

O custo dos equipamentos, um dos principais entraves no aproveitamento comercial da energia eólica, diminuiu muito entre os anos 1980 e 1990. Estimativas conservadoras indicam que o custo de um aerogerador moderno está em torno de US\$ 1.000,00 por kW instalado. Os custos de operação e manutenção variam de US\$ 4 à US\$ 12 por MWh de energia gerada nos primeiros anos, e de US\$ 15 à US\$ 2 por MWh, após dez anos de operação. A tabela apresenta uma comparação dos custos das fontes alternativas.

Tabela 3.1 - Custos das fontes alternativas [21].

TECNOLOGIA	CUSTO INVESTIMENTOS US\$ / kW	CUSTO OPERAÇÃO MANUTENÇÃO US\$ / MWh	CUSTO COMBUSTÍVEL US\$ / MWh	CUSTO GERAÇÃO US\$ / MWh
Fotovoltaica	4000 à 9000	4 à 20	0	250 à 500
Eólica	700 à 1200	4 à 12	0	50 à 120
Biomassa	500 à 2500	6 à 12	20 à 100	38 à 78
Hidráulica	1000 à 3000	6 à 15	0	35 à 100

Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, na aerodinâmica, estratégias de controle e operação dos aerogeradores, etc.) têm reduzido e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. Espera-se, portanto, que a energia eólica venha a ser muito mais competitiva economicamente na próxima década.

3.2.2 - Sistema Elétrico do Aerogerador

O sistema elétrico de um aerogerador de velocidade fixa é composta de um gerador de indução do tipo gaiola de esquilo diretamente conectado na rede. Para reduzir a demanda de potência reativa, um banco de capacitores é instalado para compensar a corrente de carga do gerador.

As turbinas eólicas de velocidade variável possuem três componentes principais: o gerador, o retificador e o inversor, apresentados na figura 3.1. O sistema pode ser dividido em dois subsistemas: inversor - rede e retificador - gerador.

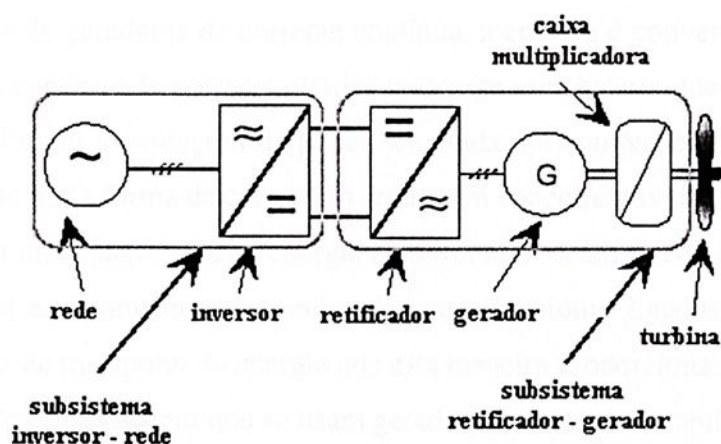


Figura 3.1 - Turbina eólica de velocidade variável.

Dois tipos principais de geradores são usados: os síncronos ou os assíncronos (geradores de indução).

Os geradores síncronos (GS) podem usar dois métodos de excitação: imã permanente ou o campo devido ao eletroímã. O gerador mais usado é o gerador de campo, porque ele tem uma vantagem de controlar o módulo da tensão trifásica. Se o módulo da tensão terminal for fixo, a geração de potência reativa pode ser controlada. Ao usar imã permanente, as perdas elétricas da máquina ficam menores. Porém, o módulo da tensão é proporcional à velocidade. Devido a demanda de potência reativa, o gerador síncrono pode ser conectado com um retificador de carga comutado, um retificador à diodo ou um retificador à tiristor. O conversor como fonte de tensão (VSC), porém, pode ser usado como um retificador. Observando que o controle do VSC requer um mínimo de tensão cc para o gerador operar corretamente.

3.2.3 - Geradores para Sistemas Eólicos

A eletricidade é uma forma muito cômoda de se transmitir energia, assim, é importante falar um pouco sobre os instrumentos que fazem esta conversão, da energia mecânica - fornecida pelos ventos - para a eletricidade, uma forma prática e limpa de se transmitir e usar a energia.

Os geradores podem ser basicamente de dois tipos ca (corrente alternada) ou cc (corrente contínua), onde convertem a energia para a forma de corrente alternada ou contínua, respectivamente.

Nos tipos de geradores de corrente contínua, a energia é convertida, como o nome já indica, para a forma contínua de corrente elétrica e carrega uma bateria que acumula esta energia para uso posterior. Possui a vantagem de poder ser usada em equipamentos que funcionam em corrente contínua, etc. Esta forma de conversão requer um banco relativamente grande de baterias para que se possa ter uma quantidade de energia razoável num determinado lugar. A desvantagem é que a maioria dos equipamentos são projetados para funcionar ligados a corrente alternada devido as facilidades de transporte da energia que esta maneira proporciona.

Assim, nos sistemas em que se usam geradores de corrente contínua, é necessário que se tenha ligado juntamente ao sistema um inversor para que se possa utilizar aparelhos elétricos que operam em corrente alternada.

Já a energia gerada pelos geradores de corrente alternada pode ser utilizada diretamente nos nossos aparelhos elétricos ca.

Existem, porém, dois inconvenientes deste tipo de produção de eletricidade: o primeiro é que não é possível armazenar energia na forma de corrente alternada, tendo que retificá-la por meio de diodos, por exemplo, para a forma contínua e armazená-la em bancos de baterias; o segundo inconveniente é que os geradores de corrente alternada geram correntes em frequências que variam com a velocidade de giro do rotor, e como os ventos variam muito, as frequências geradas pelo gerador também variam muito, para controlar este problema, visto que nosso sistema de energia tem que estar em 60 Hz, é preciso ligar ao sistema um dispositivo que mantenha a frequência em torno dos desejados 60 Hz; este dispositivo é chamado de inversor síncrono.



A figura 3.2 apresenta um diagrama de como a energia é gerada através dos cata-ventos e, posteriormente, como é distribuída na rede elétrica.

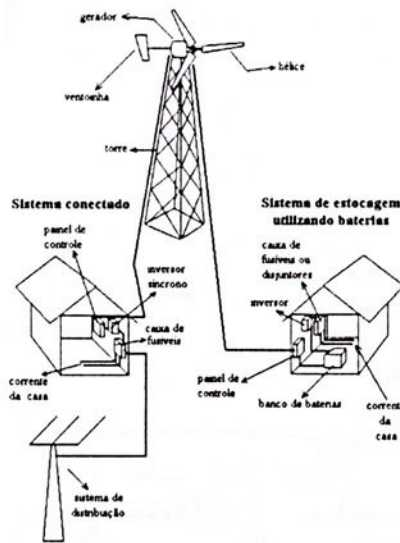


Figura 3.2 - Esquema de geração e distribuição de energia.

No sistema conectado na rede elétrica, a conversão é feita diretamente para corrente alternada e como já explicado acima, passa por um inversor síncrono para que sua frequência seja em torno dos 60 Hz desejados. Após isto, a corrente vai para a caixa de fusíveis e passa aí por um dispositivo seletor, que verifica se a corrente gerada pelo cata-vento é suficiente para suprir as necessidades do consumo; se for suficiente o dispositivo não faz nada, porém se a energia gerada pelo cata vento não for suficiente, este dispositivo seletor começa a "aceitar" também a energia fornecida pelo sistema de eletrificação da rede. Desta maneira, o usuário deste sistema só usa a energia vinda da rede em situações em que o vento não é suficiente ou quando sua demanda supera a energia gerada por seu equipamento.

3.2.4 - Componentes do Sistema Eólico

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final [20]. A figura 3.3 apresenta os principais componentes da conversão eólica.

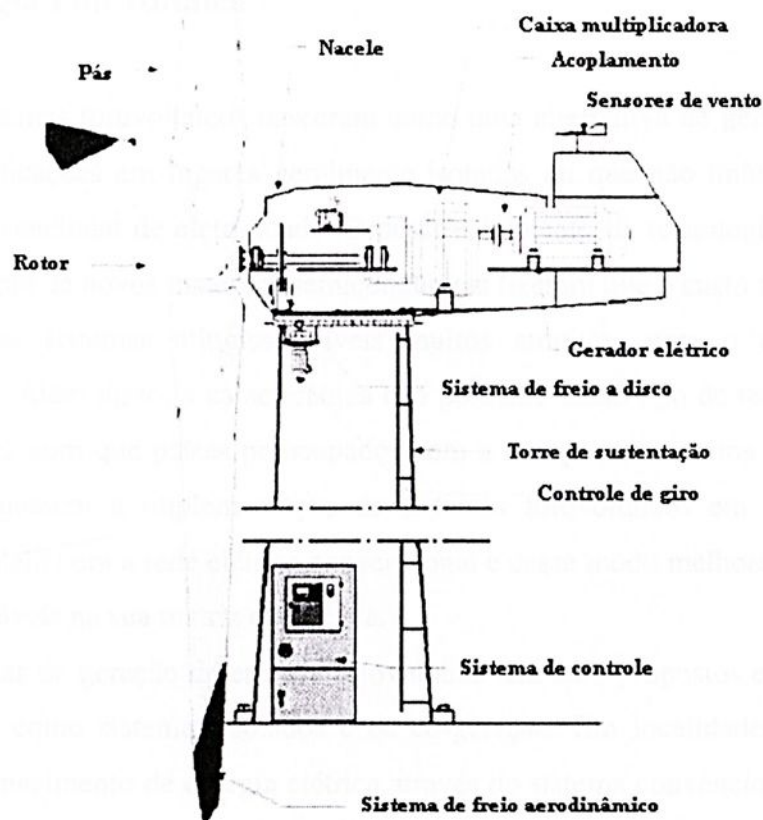


Figura 3.3 - Componentes do sistema eólico.

Vento: disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico.

- **Rotor:** responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.
- **Transmissão e Caixa Multiplicadora:** responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador.
- **Gerador elétrico:** responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.
- **Mecanismo de Controle:** responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc.

- **Torre:** responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente.
- **Sistema de Armazenamento:** responsável por armazenar a energia excedente para as baterias.
- **Transformador:** responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.
- **Acessórios:** são os componentes periféricos.

3.3 - Energia Fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos nasceram como uma alternativa de geração de eletricidade para pequenas aplicações em lugares geralmente isolados ou que não tinham possibilidade de fornecimento convencional de eletricidade. O desenvolvimento da tecnologia de fabricação das células e a utilização de novos materiais semicondutores fizeram que o custo médio de geração de eletricidade desses sistemas atingisse níveis muito atrativos para o caso específico da eletrificação rural. Além disso, a característica não poluente desse tipo de tecnologia de geração de eletricidade, fez com que países preocupados com a redução dos efeitos ambientais do setor energético encorajassem a implementação de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas para operarem em paralelo com a rede elétrica convencional e desse modo melhorar a participação das tecnologias renováveis na sua matriz energética.

Sistemas de geração de energia fotovoltaica têm sido propostos e utilizados em duas formas possíveis: como sistemas isolados e de co-geração. Em localidades remotas, que não contam com o fornecimento de energia elétrica através do sistema convencional ou em locais de difícil acesso à rede de energia, sistemas fotovoltaicos isolados podem ser utilizados. Nesta situação, a energia gerada pelos painéis deve ser parcialmente armazenada em bancos de baterias. A idéia aqui é que o excesso de energia elétrica gerada durante períodos de elevada irradiação solar ou de baixo consumo seja armazenada para utilização em períodos de baixa irradiação e durante a noite. Sistemas fotovoltaicos deste tipo podem ser utilizados como fonte principal de energia para consumo residencial e outras atividades, como por exemplo, o bombeamento de água da fonte para um reservatório elevado num sistema de irrigação.

Uma outra situação possível envolve a utilização de um sistema de geração fotovoltaico como uma fonte local de eletricidade conectada em paralelo com a rede elétrica, num esquema de co-geração. No esquema de co-geração, o consumidor utiliza primariamente a

energia gerada localmente pelos painéis fotovoltaicos. Qualquer diferença entre o consumo e a geração local é fornecida ou consumida pela rede de energia, dispensando o uso de baterias.

O sistema de co-geração fotovoltaica apresenta vantagens específicas tanto para o consumidor como para o próprio sistema de energia elétrica, além dos ganhos ambientais associados à fonte de energia renovável. Do ponto de vista do consumidor, a vantagem é a redução direta do custo da conta de energia elétrica. Do ponto de vista do sistema de energia, as vantagens são a liberação de capacidade de geração e transmissão de energia, o nivelamento da curva de carga, a redução de custos e a descentralização da geração, entre outros. A figura 3.4 apresenta um sistema fotovoltaico genérico.

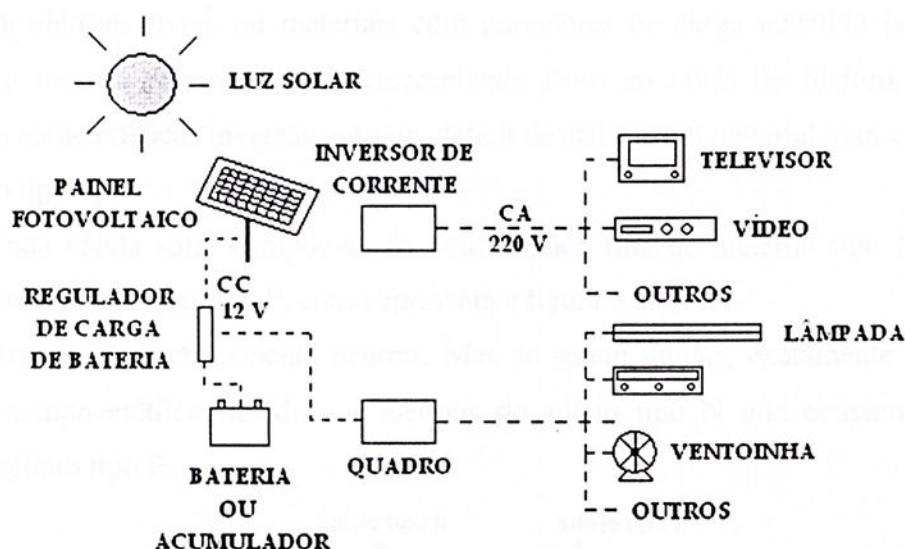


Figura 3.4 - Sistema fotovoltaico.

3.3.1 - Custo da Energia Fotovoltaica

Para a geração de eletricidade em escala comercial, o principal obstáculo tem sido o custo das células solares. Atualmente os custos de capital variam entre 5 e 15 vezes os custos unitários de uma usina a gás natural. Tem-se observado, contudo, grandes reduções. Nos últimos dez anos, os custos de capital foram reduzidos em cerca de 40%, e espera-se o mesmo nos próximos dez anos. Os valores estão situados na faixa de US\$ 200 a US\$ 300 por MWh e entre US\$ 4 e US\$ 9 mil por kW instalado.

3.3.2 - Composição Física e Fabricação dos Dispositivos Fotovoltaicos

Os módulos são compostos de células solares de silício. Essas células são semicondutoras de eletricidade porque o silício é um material com características intermediárias entre um condutor e um isolante.

O silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto é um mal condutor elétrico. Para alterar isto acrescentam-se porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. Mediante a dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N). Realizando o mesmo processo, mas acrescentando Boro ao invés de fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, déficit de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

Cada célula solar compõe-se de uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P, como apresenta a figura 3.5.

Ambas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, exatamente na união P-N, gera-se um campo elétrico devido aos elétrons do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P.

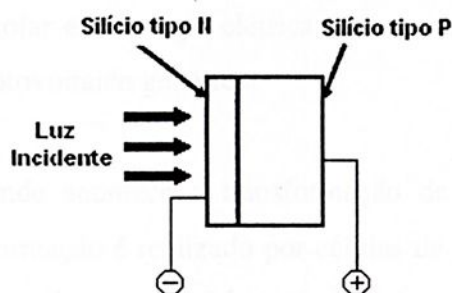


Figura 3.5- Composição física dos dispositivos fotovoltaicos

Ao incidir a luz sobre a célula fotovoltaica, os prótons que a integram chocam-se com os elétrons da estrutura do silício dando-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado na união P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada "P" para a camada "N".

Por meio de um condutor externo, conecta-se a camada negativa à positiva. Gera-se assim um fluxo de elétrons (corrente elétrica) na conexão. Enquanto a luz continue a incidir na célula, o fluxo de elétrons manter-se-á.

A intensidade da corrente gerada variará proporcionalmente conforme a intensidade da luz incidente.

Cada módulo fotovoltaico é formado por uma determinada quantidade de células conectadas em série. Como se viu anteriormente, ao unir-se a camada negativa de uma célula com a positiva da seguinte, os elétrons fluem através dos condutores de uma célula para a outra. Este fluxo repete-se até chegar à última célula do módulo, da qual fluem para o acumulador ou a bateria.

É por isso que se considera inesgotável um dispositivo fotovoltaico. Produz energia elétrica em resposta à energia luminosa que entra no mesmo.

Deve-se esclarecer que uma célula fotovoltaica não pode armazenar energia elétrica.

3.3.3 - Principais Componentes

Um sistema fotovoltaico (SFV) é definido como um conjunto de equipamentos que permite transformar energia solar em energia elétrica. A seguir, são apresentados os seguintes componentes de um sistema fotovoltaico genérico:

1. Gerador Fotovoltaico: onde acontece a transformação de energia luminosa em energia elétrica. O processo de transformação é realizado por células de material semicondutor, capazes de produzir corrente elétrica quando expostas à luz solar. Para sua aplicação prática, essas células são agrupadas eletricamente em diferentes combinações que permitem obter os valores de corrente e tensão necessários.

2. Gerador Auxiliar: que complementa ao gerador fotovoltaico nos momentos de insuficiente irradiação. Na maioria dos casos este equipamento é um gerador termoelétrico independente que opera com diesel ou gasolina.



3. Acumulador de Energia: que se encarrega de armazenar energia quando a demanda é menor do que a produção do gerador ou de entregar energia caso contrário. Na maioria das aplicações o acumulador está constituído por baterias.

4. A Carga: que utiliza a energia elétrica produzida pelos geradores e que pode adotar várias formas: equipamentos cc (lâmpadas de iluminação, rádios, etc.), equipamentos ca (líquidificador, televisão), e também a própria rede de distribuição elétrica convencional.

5. Um conjunto de equipamentos: que atuam como interface entre todos os definidos acima e que exercem as funções de proteção e controle. De maneira geral, agrupam-se sob o nome de condicionamento de potência.

A figura 3.6 apresenta um esquema que relaciona os diferentes componentes de um sistema fotovoltaico genérico. Dependendo da aplicação requerida, o sistema deverá ter uma combinação dos componentes mostrados.

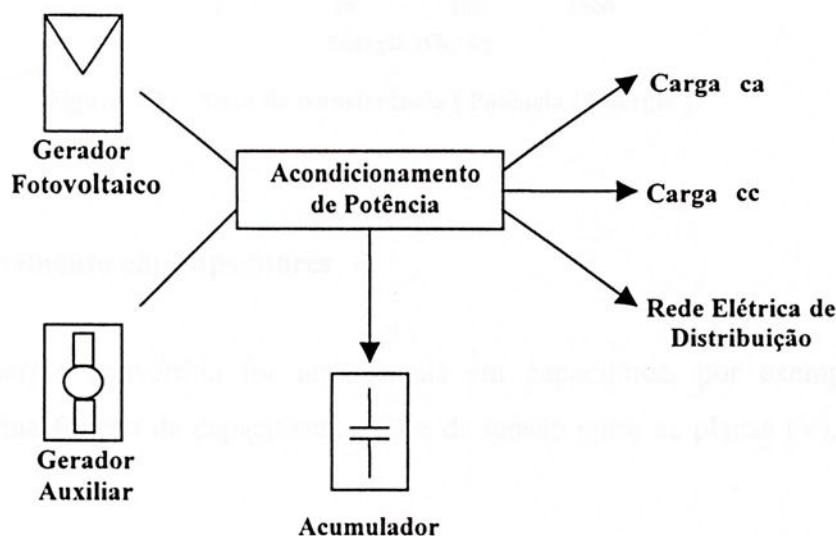


Figura 3.6 - Sistema fotovoltaico genérico.

3.4 - Armazenadores de Energia

Em sistemas de corrente alternada, para que a energia seja armazenada, é necessário que esta energia seja convertida para a forma contínua por meio de retificadores. Para ser novamente utilizada, a energia armazenada deve ser transformada em corrente alternada, através de inversores. Cada tecnologia de armazenamento de energia inclui geralmente uma unidade de conversão de potência para converter a energia de uma forma para outra.

As tecnologias de armazenamento mais comuns são as capacitores, baterias e sistemas supercondutores de armazenamento de energia, a seguir será apresentado cada um.

A figura 3.7 apresenta a taxa de energia que pode ser transferida.

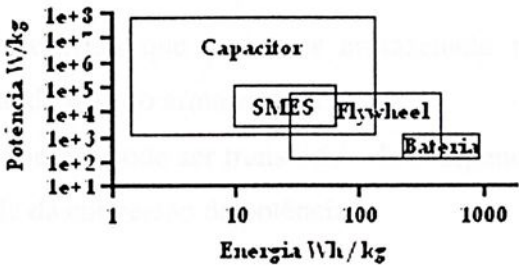


Figura 3.7 - Taxa de transferência (Potência / Energia).

3.4.1 - Armazenamento em Capacitores

Se a energia convertida for armazenada em capacitores, por exemplo, a carga armazenada (q) é uma função da capacitância (C) e da tensão entre as placas (V), conforme a equação 3.1.

$$q = C \cdot V \tag{3.1}$$

A capacitância depende da permissividade do dielétrico (ϵ), da área das placas do capacitor (A) e da distância entre as placas (d), como apresenta a equação 3.2.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} \quad (3.2)$$

A equação 3.3 demonstra que a energia armazenada no capacitor depende da capacitância e do quadrado da tensão [20].

$$E = \frac{1}{2} C \cdot V^2 \quad (3.3)$$

Dois fatores caracterizam a aplicação de uma tecnologia de armazenamento de energia.

- 1- A quantidade de energia que pode ser armazenada no dispositivo, que depende fundamentalmente do tipo do armazenador.
- 2- A taxa em que a energia pode ser transferida. Isto depende principalmente da potência de pico da unidade da conversão de potência.

3.4.2 - Armazenamento em Baterias

É a tecnologia de armazenamento mais eficiente em relação ao custo, de energia disponível, com a energia armazenada eletroquímica.. Um sistema de baterias é composto de módulos de baterias de baixa tensão e potência conectados em paralelo ou em série para ter uma característica elétrica desejada. As baterias são carregadas quando se submetem a uma reação química interna sob um potencial aplicado aos terminais e fornecem energia quando invertem a reação química.

As principais tecnologias incluem baterias híbridas de níquel-metal, baterias de níquel-cadion e baterias de lítium-ion. Devido a química cinética envolvida, as baterias não podem operar-se em níveis de potência elevada por períodos longos.

O sistema de armazenamento de energia em baterias (BEES) está se tornando uma das tecnologias de armazenamento mais promissoras para aplicações nos sistemas de potência, oferecendo uma larga escala de aplicações nos sistemas de potência tais como: proteção, correção

do fator de potência, etc. A aplicação desse sistema de armazenamento em conjunto com os controladores FACTS pode melhorar o sistema de potência na operação e controle do fluxo de potência.

3.4.3 - Sistemas Supercondutores de Armazenamento de Energia (SMES)

A SMES é um dispositivo que armazena energia no campo magnético, gerado pela corrente contínua, que passa através da bobina super condutora. A energia armazenada e a potência estimada são dados como seguem:

$$E_{SMES} = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (3.4)$$

$$P = V \cdot I \quad (3.5)$$

sendo:

L - indutância da bobina

I - corrente cc

V - tensão da bobina

Essa tecnologia de armazenamento é aplicada para o nivelamento da carga, estabilidade dinâmica, estabilidade transitória, estabilidade da tensão, regulação da frequência, melhoria na qualidade da potência, etc. Quando comparados com outras tecnologias de armazenamento de energia se tornam muito caros. São aplicados com os controladores FACTS.

São usados dois tipos de conversão. Uma opção seria o uso do conversor como fonte de corrente (CSC) e a outra maneira seria o uso do conversor como fonte de tensão (VSC) conectado ao sistema de corrente alternada. A bobina do SMES é carregada ou descarregada aplicando uma tensão positiva ou negativa através da bobina supercondutora.

3.5 - Conclusão

Neste capítulo foram apresentados dois tipos de energia renováveis: eólica e a fotovoltaica, bem como o respectivo acoplamento dessas fontes alternativas de energia na rede de transmissão em corrente alternada.

A turbina eólica de velocidade fixa pode ser conectada diretamente na rede elétrica. Já a turbina eólica de velocidade variável, por produzir uma energia da saída com frequência variável, necessita de controle ou mesmo da conversão, através de retificadores, da energia produzida para corrente contínua, para depois ser invertida em frequência síncrona em relação a rede principal (60 Hz).

Os geradores fotovoltaicos são utilizados em sistemas isolados ou em co-geração. Nos sistemas de co-geração, a energia fotovoltaica é conectada à rede elétrica por meio de acoplamento síncrono. Nesse esquema, o consumidor utiliza a energia local e, só em momentos onde o consumo é maior, utiliza a energia da rede como back-up.

Foi apresentado o armazenamento de energia que pode ser utilizado, em conjunto com conversores estáticos, na compensação de sistemas elétricos de potência.

Os recentes desenvolvimentos das tecnologias de armazenamento de energia, associado com a utilização de conversores estáticos para controle de fluxo de potência ativa e reativa, torna possível a utilização de energia excedente no controle de potência nos sistemas. Embora diversas destas tecnologias foram inicialmente propostas para atendimento de demanda, o armazenamento de energia pode ser uma ferramenta para incrementar a estabilidade do sistema, interferir na transferência de potência e melhorar a qualidade da potência fornecida pelos sistemas de energia elétrica [20].

Capítulo 4

VSC COMO COMPENSADOR DE POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA

4.1 - Introdução

Na década de 90, surgiram os controladores FACTS que utilizam conversores como fonte de tensão (Voltage Source Converter - VSC) para efetuar o controle do fluxo de potência e dos níveis de tensão em determinadas barras de um sistema de energia.

Exemplos destes FACTS são o STATCOM, o SSSC e o UPFC, anteriormente definidos. Todos estes compensadores utilizam conversor como fonte de tensão.

Controladores compostos por VSC podem ser implementados usando várias topologias. Neste capítulo, é analisado o funcionamento do conversor como fonte de tensão, composto por chaves eletrônicas ideais, utilizado na compensação em derivação [22].

4.2 - Modo de Funcionamento

O funcionamento do compensador em derivação está baseado na utilização de uma fonte de tensão controlada para a compensação, conectada em derivação com a linha de transmissão [7].

4.2.1- Estrutura do Compensador em Derivação.

A figura 4.1 apresenta a estrutura básica de um compensador em derivação e também o sistema elétrico onde está inserido. O compensador é conectado à barra através do transformador de potência.

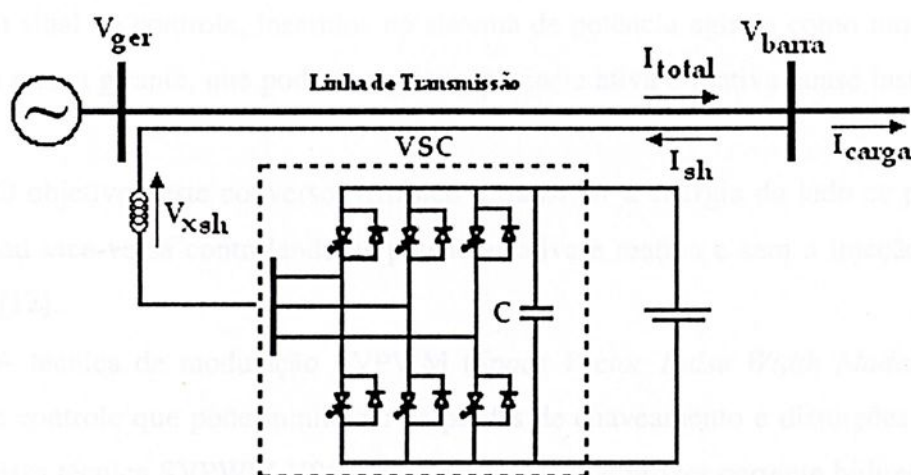


Figura 4.1 - Principais componentes de um compensador em derivação.

No circuito, o gerador produz uma tensão igual a V_{ger} , alimentando uma carga conectada a uma barra com tensão V_{barra} , através de linha de transmissão. Admite-se um conversor como fonte de tensão utilizando chaves eletrônicas ideais controladas por modulação vetorial espacial, (*Space Vector Pulse Width Modulation* - SVPWM), com uma frequência de chaveamento de 2 kHz. Uma indutância na linha entre a barra e o conversor, para reduzir as amplitudes dos transitórios de corrente provocados pelos chaveamentos de tensão de saída dos conversores. Esse conversor trifásico consiste de uma ponte com seis tiristores GTO (*Gate Turn-Off*) [8].

Os interruptores com capacidade de bloqueio (GTO) permitem a troca de potência entre a fonte trifásica ca e uma fonte cc constante. O módulo do interruptor é composto de diodos conectados em antiparalelo com GTO's para permitir o fluxo de corrente depois de cada comutação [12].

Através da modulação PWM, é possível controlar o ângulo de fase ou a amplitude da tensão de saída do conversor, o que pode ser feito quase instantaneamente. Portanto, o VSC pode controlar as potências ativa e reativa independentemente [29].

4.2.2 - Princípios de Operação do VSC

O conversor VSC é baseado em semicondutores que podem ser chaveados em "on" e "off" por um sinal de controle, inseridos no sistema de potência agindo como um motor ou um gerador sem massa girante, que pode controlar a potência ativa e reativa quase instantaneamente [29].

O objetivo deste conversor trifásico é transferir a energia do lado cc para o sistema trifásico ca ou vice-versa controlando as potências ativa e reativa e sem a injeção de correntes harmônicas [12].

A técnica de modulação SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulating*) é uma estratégia de controle que pode minimizar as perdas de chaveamento e distorções harmônicas e transitória. Essa técnica SVPWM VSC tem a capacidade de prover corrente bidirecional no lado cc, e a tensão no lado cc pode ser regulada para um valor desejado [28, 29].

Fazendo um controle apropriado da sequência de chaveamento, o VSC é capaz de transformar uma tensão cc que está no lado do terminal do conversor cc em uma tensão ca que está no lado do terminal ca. Isso só é possível através de um controle da frequência, da magnitude e do ângulo de fase.

No conversor apresentado na figura 4.1, o lado cc é conectado na fonte assíncrona (também poderia ser um capacitor) e o lado ca é conectado no sistema de potência através de um transformador. A configuração deste conversor é aplicada aos controladores FACTS.

O conversor como fonte de tensão (VSC) converte a tensão cc aos terminais de entrada para sistema ca com controle de magnitude e ângulo de fase. A figura 4.2 apresenta o compensador em derivação conectado no sistema ca [30].

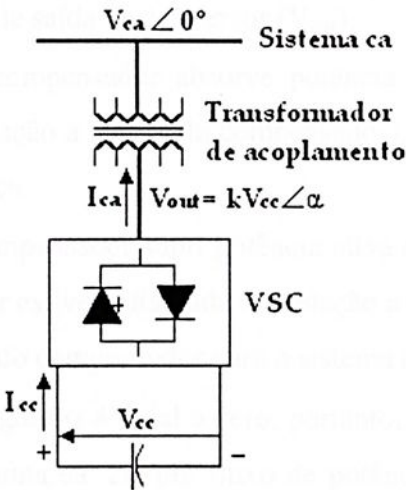


Figura 4.2 - Conversor conectado em derivação.

A troca de potência ativa e reativa gerada ou absorvida pelo conversor como fonte de tensão podem ser controlados independentemente como apresentado na figura 4.3.

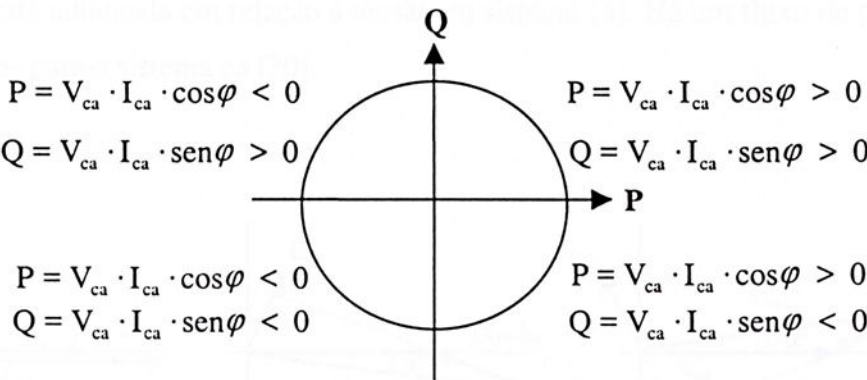


Figura 4.3 - Diagramas fasoriais do terminal ca e do terminal cc.

O VSC tem a capacidade de trocar potência ativa bi-direcional, que é uma habilidade de absorver energia do sistema ca e fornecer energia cc para o elemento armazenador de energia (capacitor, bateria, supercondutores) e para reverter este processo fornecendo potência para o sistema ca, proveniente do elemento armazenador.

Na figura 4.4a, o ângulo α é igual a zero, portanto, não há transferência de potência ativa entre o conversor e o sistema ca. Há um fluxo de potência reativa do compensador para o sistema ca. A troca de potência ativa entre o conversor e o sistema ca pode ser controlada pelo deslocamento de fase da tensão de saída do conversor (V_{out}).

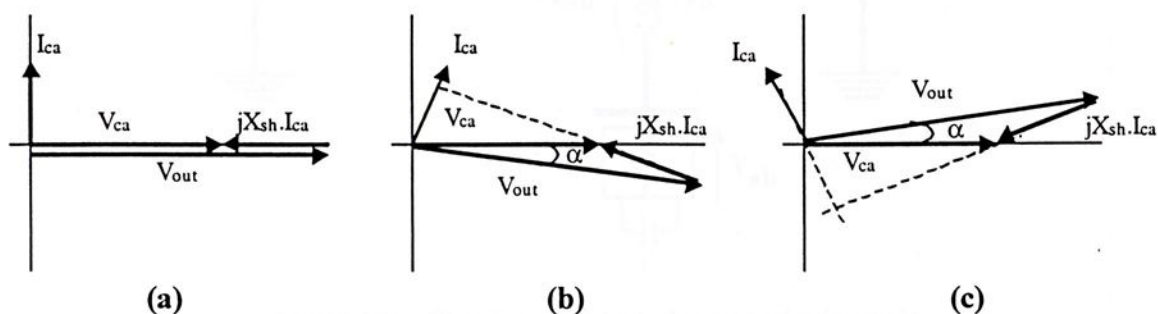
Na figura 4.4b, o compensador absorve potência ativa do sistema ca (tensão do sistema ca está adiantada em relação a tensão do compensador). Há um fluxo de potência reativa do compensador para o sistema ca.

Na figura 4.4c, o compensador supri potência ativa do capacitor cc para o sistema ca se a tensão de saída do conversor estiver adiantada em relação a tensão do sistema ca. Neste caso, há um fluxo de potência reativa do compensador para o sistema ca.

Na figura 4.4d, o ângulo α é igual a zero, portanto, não há transferência de potência ativa entre o conversor e o sistema ca. Há um fluxo de potência reativa do sistema ca para o compensador.

Na figura 4.4e, o compensador absorve ativa do sistema ca (tensão do sistema ca está adiantada em relação a tensão do compensador). Há fluxo de potência reativa do sistema ca para o compensador.

Na figura 4.4f, o compensador fornece potência ativa para o sistema ca (tensão do compensador está adiantada em relação a tensão do sistema ca). Há um fluxo de potência reativa do compensador para o sistema ca [30].



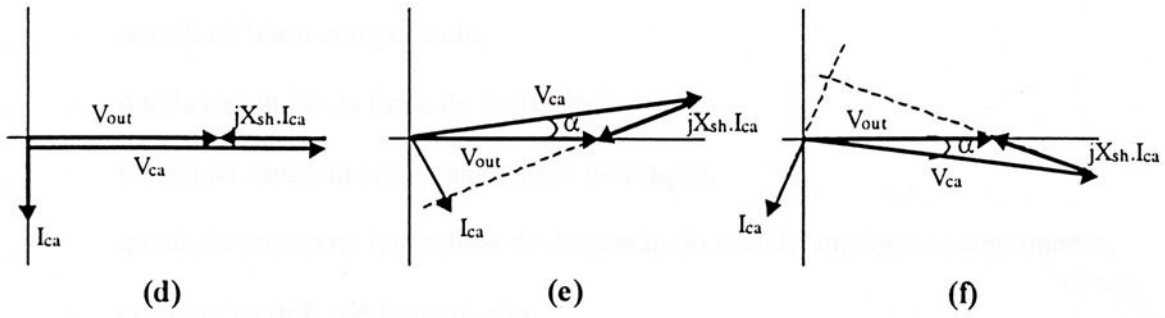


Figura 4.4 - Diagramas fasoriais (a) – fornecendo potência reativa,

(b) – fornecendo potência reativa e absorvendo potência ativa, (c) – fornecendo potência reativa e fornecendo potência ativa, (d) – absorvendo potência reativa, (e) – absorvendo potência reativa e absorvendo potência ativa, (f) – absorvendo potência reativa e fornecendo potência ativa.

4.3 - Controle da Tensão

A figura 4.5 apresenta o circuito equivalente de um compensador para regulação da tensão, onde V_{barra} é regulada pelo compensador em derivação.

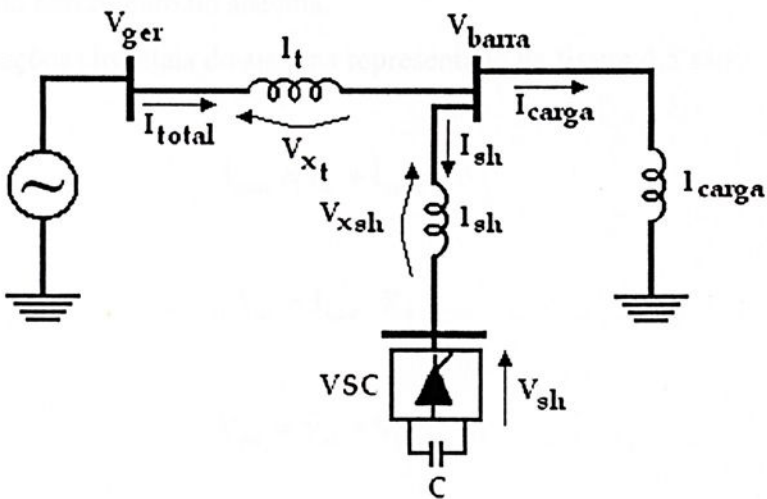


Figura 4.5 - Circuito equivalente da regulação da tensão.

sendo:

$\dot{V}_{ger}$ - tensão do gerador;

- $\dot{V}_{\text{barra}}$ - tensão na barra compensada;
 $\dot{V}_{\text{xt}}$ - queda de tensão na linha de transmissão;
 $\dot{V}_{\text{sh}}$ - tensão na saída do compensador em derivação;
 $\dot{V}_{\text{xsh}}$ - queda de tensão na indutância de dispersão do transformador de acoplamento;
 $\dot{I}_{\text{total}}$ - corrente na linha de transmissão;
 $\dot{I}_{\text{sh}}$ - corrente do compensador em derivação;
 $\dot{I}_{\text{carga}}$ - corrente na carga;
 C - capacitor

O compensador gera uma corrente adiantada ou atrasada 90° com a V_{barra} , para o caso ideal (sem perdas). A figura apresenta a regulação da tensão V_{barra} através da injeção (capacitivo) ou absorção (indutivo) de potência reativa devido a corrente I_{sh} , ortogonal com a o fasor de tensão V_{barra} [23]. O compensador em derivação é acoplado a barra por um transformador representado pela indutância de dispersão (l_{sh}). Esta indutância provoca uma ortogonalidade da corrente em relação a tensão da barra do sistema, quando a tensão na saída do conversor está em fase com a tensão do barramento do sistema.

As equações circuitais do sistema representado na figura 4.5 são:

$$\dot{I}_{\text{total}} = \dot{I}_{\text{sh}} + \dot{I}_{\text{carga}} \quad (4.1)$$

$$\dot{V}_{\text{xt}} = \dot{I}_{\text{total}} \cdot X_t \quad (4.2)$$

$$\dot{V}_{\text{ger}} = \dot{V}_{\text{xt}} + \dot{V}_{\text{barra}} \quad (4.3)$$

São realizadas três análises do sistema em relação a operação do compensador:

- sem compensação
- com compensação capacitiva
- com compensação indutiva

4.3.1 - Sem compensação.

Considerando $\dot{V}_{sh} = \dot{V}_{barra}$, não há corrente circulando pelo ramo shunt ($\dot{I}_{sh}$). O diagrama fasorial para esta condição é apresentado na figura 4.6:

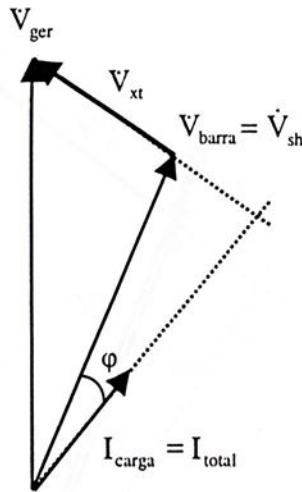


Figura 4.6 - Diagrama fasorial para o circuito sem compensação.

Na figura acima, $\dot{I}_{carga} = \dot{I}_{total}$, pois não há circulação de corrente pelo conversor, a corrente é ortogonal à queda de tensão na linha ($\dot{V}_{xt}$).

4.3.2- Compensação capacitiva.

Na compensação capacitiva, o compensador em derivação fornece potência reativa para a barra em que estiver conectado. Este compensador faz com que a amplitude do fasor $\dot{V}_{barra}$ aumente para $\dot{V}'_{barra}$. Com isso, a corrente $\dot{I}_{sh}$ vai fluir do compensador para a barra. Esta corrente é perpendicular aos fasores $\dot{V}'_{barra}$ e $\dot{V}_{sh}$, que estão em fase entre si. Neste caso, não há troca de potência ativa entre o compensador e a rede (caso idealizado).

Analisando a figura 4.7, a tensão $\dot{V}_{ger}$ é usada como referência. A tensão na barra compensada $\dot{V}'_{barra}$ fica maior que $\dot{V}_{barra}$ sem o uso do compensador. O fator de potência $\cos(\varphi')$

é igual ao $\cos(\varphi)$ antigo. A tensão $\dot{V}'_{xt}$ é deslocado de fase, porém, continua com a mesma magnitude do que a anterior. O fasor da corrente total $\dot{I}'_{total}$ é ortogonal a $\dot{V}'_{xt}$, o fasor da corrente de carga $\dot{I}'_{carga}$ é um pouco maior que $\dot{I}_{carga}$. O fasor da corrente $\dot{I}'_{sh}$ é ortogonal a $\dot{V}'_{barra}$ e $\dot{V}'_{sh}$.

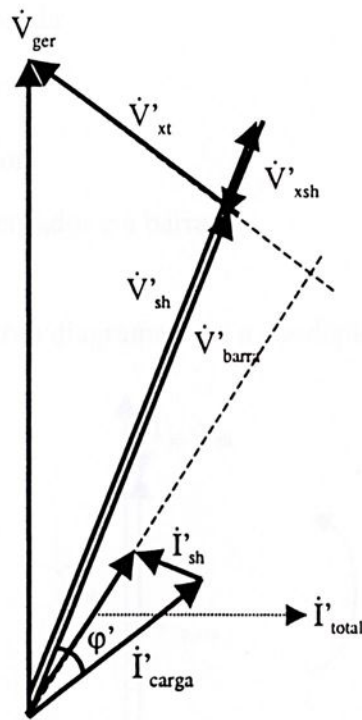


Figura 4.7 - Diagrama fasorial da compensação capacitiva.

Podemos calcular a corrente total e a tensão na barra da seguinte maneira:

$$\dot{I}'_{total} = \dot{I}'_{carga} + \dot{I}'_{sh} \quad (4.4)$$

$$\dot{V}'_{barra} = \dot{V}'_{sh} + \dot{V}'_{xsh} \quad (4.5)$$

A magnitude da tensão $\dot{V}'_{sh}$ é maior que $\dot{V}'_{barra}$. Portanto, a corrente $\dot{I}'_{sh}$ flui do conversor para $\dot{V}'_{barra}$. Com isso, o sistema interpreta a fonte de tensão como capacitiva. Para satisfazer essa afirmação temos que: $\dot{V}'_{barra} < \dot{V}'_{sh}$.

A equação para a compensação é dada por:

$$\dot{V}'_{\text{barra}} = \dot{V}'_{\text{sh}} - \dot{I}'_{\text{sh}} \cdot X_{\text{sh}} \quad (4.6)$$

sendo:

$\dot{V}'_{\text{barra}}$ - tensão da barra compensada

$\dot{V}'_{\text{sh}}$ - tensão do compensador

$\dot{I}'_{\text{sh}}$ - corrente do compensador

X_{sh} - reatância entre o compensador e a barra

Na figura 4.8, é descrito o diagrama para a condição descrita pela equação 4.6:

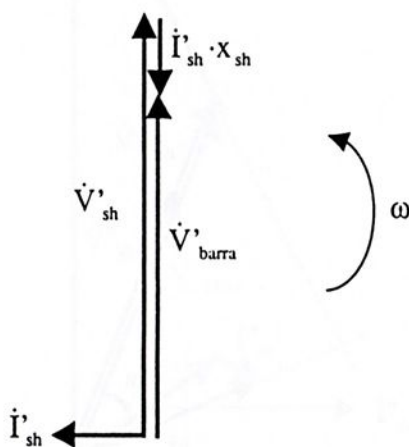


Figura 4.8- Diagrama de vetor para a compensação capacitiva.

4.3.3- Compensação indutiva.

Na compensação indutiva, o compensador em derivação vai absorver potência reativa da barra. O compensador faz com que a magnitude da tensão em $\dot{V}'_{\text{barra}}$ diminua. Com isso, a corrente ($\dot{I}''_{\text{sh}}$) flui do sistema para o compensador. Esta corrente é perpendicular aos fasores $\dot{V}'_{\text{barra}}$ e $\dot{V}'_{\text{sh}}$, que estão em fase entre si.

A corrente de carga $\dot{I}_{\text{carga}}''$ é menor que $\dot{I}_{\text{carga}}$, porque houve um afundamento da tensão $\dot{V}_{\text{barra}}''$. O fator de potência não é alterado se a carga permanecer a mesma ($\cos(\varphi'') = \cos(\varphi)$).

Com a redução, a tensão $\dot{V}_{\text{barra}}''$ se torna menor que $\dot{V}_{\text{barra}}$ devido a compensação indutiva. A queda de tensão $\dot{V}_{\text{xt}}''$ é ortogonal a $\dot{I}_{\text{total}}''$.

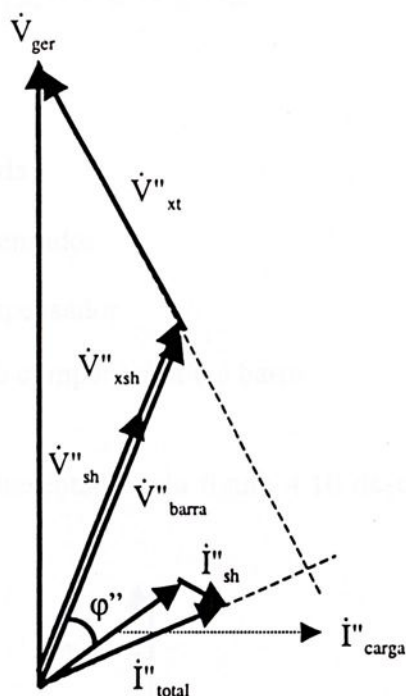


Figura 4.9 - Diagrama fasorial da compensação indutiva.

A corrente total é dada pela seguinte equação:

$$\dot{I}_{\text{total}}'' = \dot{I}_{\text{carga}}'' + \dot{I}_{\text{sh}}'' \quad (4.7)$$

O módulo de $\dot{V}_{\text{xt}}''$ é um pouco maior que o módulo de $\dot{V}_{\text{xt}}$. Os fasores $\dot{V}_{\text{xsh}}''$, $\dot{V}_{\text{sh}}''$ e $\dot{V}_{\text{barra}}''$ estão todos em fase e são ortogonais a $\dot{I}_{\text{sh}}''$. A equação da tensão compensada é dada por:

$$\dot{V}''_{\text{barra}} = \dot{V}''_{\text{sh}} + \dot{V}''_{\text{xsh}} \quad (4.8)$$

O fasor $\dot{V}''_{\text{sh}}$ é menor que $\dot{V}''_{\text{barra}}$. A corrente de compensação $\dot{I}''_{\text{sh}}$ flui de $\dot{V}''_{\text{barra}}$ para o conversor. Neste caso, a fonte de tensão funciona como uma carga indutiva para o sistema ca, ou seja, $\dot{V}''_{\text{barra}} > \dot{V}''_{\text{sh}}$. Para esta condição, temos:

$$\dot{V}''_{\text{barra}} = \dot{V}''_{\text{sh}} + \dot{I}''_{\text{sh}} \cdot X_{\text{sh}} \quad (4.9)$$

sendo:

- $\dot{V}''_{\text{barra}}$ - valor da barra compensada
- $\dot{V}''_{\text{sh}}$ - valor da tensão do compensador
- $\dot{I}''_{\text{sh}}$ - valor da corrente do compensador
- X_{sh} - reatância indutiva entre o compensador e a barra

O diagrama fasorial representado pela figura 4.10 descreve a condição descrita pela equação 4.9:

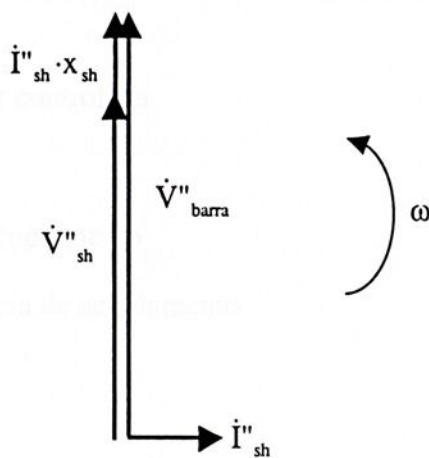


Figura 4.10 - Diagrama de vetor para a compensação indutiva.

4.4 - Controle da Potência Ativa

O compensador em derivação pode absorver potência ativa do sistema ca e enviar para o lado cc, ou vice-versa, dependendo do ângulo entre a tensão de saída do conversor e a tensão da barra de acoplamento. Se a tensão de saída do conversor está atrasada em relação a tensão da barra do sistema, a potência ativa do sistema ca flui em direção ao lado cc. Caso contrário, se a tensão do compensador estiver adiantada em relação a tensão do sistema ca, a potência ativa flui do lado cc do conversor para o sistema ca.

A figura 4.11 apresenta os diagramas fasoriais para a troca de potência ativa.

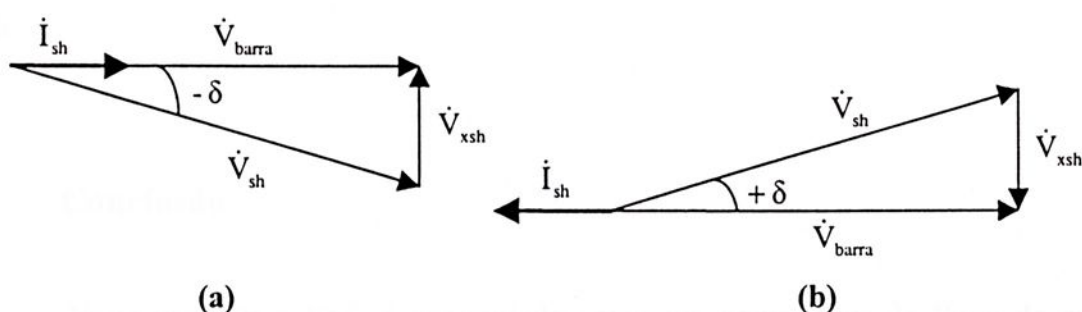


Figura 4.11 - Diagramas fasoriais do conversor shunt

(a) absorvendo potência (b) fornecendo potência.

sendo:

- $\dot{V}_{\text{barra}}$ - tensão da barra que vai ser controlada
- $\dot{V}_{\text{sh}}$ - tensão do conversor
- $\dot{I}_{\text{sh}}$ - corrente da reatância de acoplamento
- $\dot{V}_{\text{xsh}}$ - queda de tensão da reatância de acoplamento
- δ - ângulo de defasagem

Nos diagramas fasoriais da figura 4.11, $\dot{V}_{\text{sh}}$ representa o fasor de tensão que será fornecido ou absorvido ao sistema ca.

Através da figura 4.11a, $\dot{V}_{\text{sh}}$ está atrasada em relação a tensão do sistema ca ($\dot{V}_{\text{barra}}$), através de um ângulo δ . A queda de tensão $\dot{V}_{\text{xsh}}$ é provocada pela corrente $\dot{I}_{\text{sh}}$, que está em

quadratura com $\dot{V}_{\text{barra}}$, e atrasada de $\dot{V}_{\text{xsh}}$ de 90° . Portanto, o conversor está absorvendo potência ativa do sistema ca. De maneira oposta, analisando a figura 4.11b, a tensão $\dot{V}_{\text{sh}}$ está adiantada em relação a tensão do sistema ca, sendo que a corrente $\dot{I}_{\text{sh}}$ está do lado oposto a tensão do sistema. Portanto, o conversor fornece potência ativa ao sistema.

O compensador em derivação pode fornecer ou absorver potência ativa ao sistema ca. Essa potência absorvida ou fornecida pelo compensador é controlada através da fase da tensão de saída ($\dot{V}_{\text{sh}}$) em relação a tensão do sistema ca ($\dot{V}_{\text{barra}}$).

Para realizar a troca de potência ativa do conversor com o sistema ca, é requerida uma fonte de energia do lado cc. Essa fonte pode ser um gerador ou elemento armazenador de energia.

4.5 - Conclusão

Neste capítulo o VSC é apresentado como um controlador de fluxo de potência conectado em derivação com a barra a ser controlada. O objetivo desse controlador FACTS é controlar a potência reativa através da magnitude de tensão do conversor em relação a magnitude da tensão da barra e também controlar a potência ativa através do defasamento entre a tensão da barra e a tensão do conversor.

Três tipos de análises do funcionamento do compensador shunt são apresentados: sem compensação (a tensão do conversor tem a mesma magnitude da tensão da barra, com isso, não há circulação de corrente no ramo shunt), compensação capacitiva (a magnitude da tensão do conversor é maior que a tensão da barra – fornece potência reativa) e compensação indutiva (a magnitude da tensão na barra é maior que a tensão de saída do conversor – absorve potência reativa).

Capítulo 5

MODULAÇÃO POR VETORES ESPACIAIS

5.1 - Introdução

Os recentes avanços da eletrônica de potência resultaram em um considerável aumento da potência que pode ser controlada por dispositivos semicondutores [31].

A estratégia da modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) utilizando vetor espacial (*Space Vector Modulation* - SVM) tem sido usada em sistemas de pequena e média potência (até 20 MVA), permitindo uma redução no número de comutações das chaves eletrônicas, diminuindo o conteúdo harmônico da saída dos conversores estáticos [32].

A SVM é uma estratégia de modulação baseada na determinação dos períodos em que as chaves eletrônicas de um conversor estático permanecem ligadas (“on”) e desligadas (“off”), em função da posição instantânea do vetor espacial. Este vetor é determinado a partir da transformação de variáveis trifásicas em uma representação de coordenadas ortogonais. Entre as principais vantagens da SVM estão a possibilidade de modulação senoidal, baixa distorção harmônica, utilização de equações algébricas para o cálculo dos períodos de chaveamento, ao

invés de sinais de controle, a saída do conversor apresenta uma modulação trifásica e equilibrada, entre outras. A SVM somente precisa de uma referência, que pode ser obtida de um sinal de tensão ou corrente no controle do processo [33].

Esse tipo de modulação é muito atrativa para ser usada com os conversores como fonte de tensão (VSC), na qual tem sido amplamente proposto para serem usados nos controladores FACTS denominados “avançados” [28].

5.2 - Representação do Vetor Espacial

Os valores instantâneos das variáveis trifásicas são indicados no eixo trifásico estacionário, deslocados 120° uns dos outros. Um conjunto de eixos complexos ortogonais é superposto à representação trifásica. Um dos eixos, que é chamado de eixo direto (d), está sobre uma das fases do eixo trifásico, normalmente a fase a . O segundo eixo, o qual é ortogonal ao eixo direto, é chamado de eixo em quadratura (q). O vetor espacial $\vec{u}$ é definido como tendo sua origem na interseção dos eixos ortogonais e tendo seu módulo limitado pela interseção das projeções ortogonais dos valores instantâneos trifásicos, indicados nos eixos trifásicos. O vetor espacial $\vec{u}$ gira com velocidade síncrona e é deslocado de $\theta = \beta + \omega \cdot t$ do eixo direto, de acordo com a figura 5.1. Se as variáveis trifásicas são simétricas, balanceadas e são representadas por uma função senoidal, o vetor espacial descreve uma trajetória circular cujo raio é igual ao módulo do vetor. Se as variáveis não são senoidais, o vetor descreve uma trajetória aleatória [18].

No plano complexo, o eixo (d) corresponde ao eixo real, e o eixo (q) corresponde ao eixo imaginário.

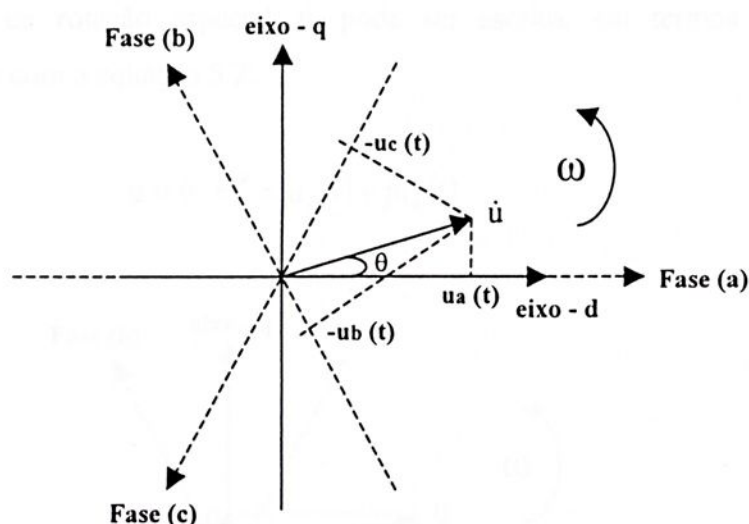


Figura 5.1- Transformação da representação ortogonal trifásica.

5.2.1- Transformação da Representação Trifásica para a Representação Ortogonal

Conhecendo as variáveis trifásicas $u_a(t)$, $u_b(t)$ e $u_c(t)$, descritas por uma função senoidal, simétricas e equilibrada, o vetor espacial pode ser definido de acordo com a equação 5.1:

$$\hat{u} = \frac{2}{3} [u_a(t) + a^2 \cdot u_b(t) + a \cdot u_c(t)] \quad (5.1)$$

sendo:

$u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ - variáveis senoidais trifásicas

$a = e^{j2\pi}$ - operador espacial

De acordo com a figura 5.2, o vetor de rotação espacial $\hat{u}$ pode ser representado por componentes nos dois eixos ortogonais. No plano complexo, a componente $u_d(t)$ corresponde a projeção do vetor de rotação espacial $\hat{u}$ no eixo real. A componente $u_q(t)$ é a projeção de $\hat{u}$ no eixo imaginário.

O vetor de rotação espacial $\dot{u}$ pode ser escrito, em termos de componentes ortogonais, de acordo com a equação 5.2:

$$\dot{u} = \dot{u} \cdot e^{j\theta} = u_d(t) + ju_q(t) \quad (5.2)$$

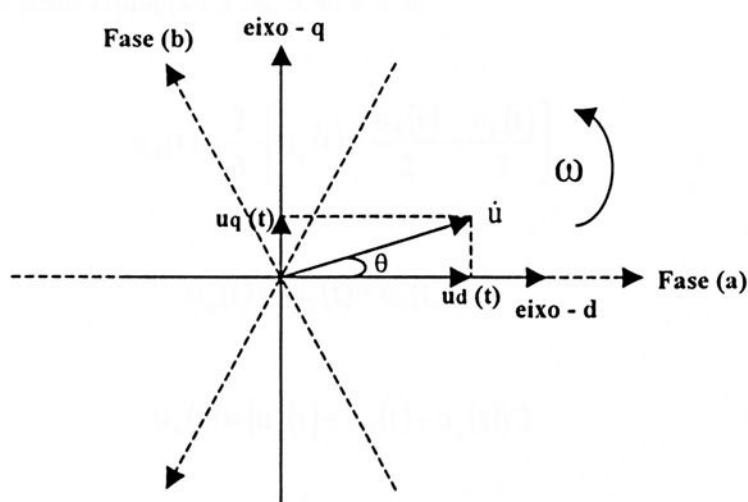


Figura 5.2- Representação do vetor espacial.

A transformação matemática para representar as variáveis instantâneas trifásicas no conjunto de eixos ortogonais é dada pela equação 5.3:

$$\begin{bmatrix} u_d(t) \\ u_q(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} = |C_1| \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

sendo:

- $u_d(t)$ - Projeção do vetor espacial $\dot{u}$ no eixo real (direto);
- $u_q(t)$ - Projeção do vetor espacial $\dot{u}$ no eixo imaginário (quadratura);
- $u_o(t)$ - Componente de seqüência zero, para sistema desequilibrado;
- C_1 - Matriz de transformação espacial;

$$|C_1| = K \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{vmatrix} \quad (5.4)$$

Na equação 5.4, K é uma constante igual a $2/3$. As componentes ortogonais do vetor espacial são dadas pelas equações 5.5a, 5.5b e 5.5c.

$$u_d(t) = \frac{2}{3} \cdot \left[u_a(t) - \frac{u_b(t)}{2} - \frac{u_c(t)}{2} \right] \quad (5.5a)$$

$$u_q(t) = [u_b(t) - u_c(t)] / \sqrt{3} \quad (5.5b)$$

$$u_o(t) = [u_a(t) + u_b(t) + u_c(t)] / 3 \quad (5.5c)$$

5.3 - Modulação Espacial Passo a Passo.

Se as tensões são senoidais trifásicas e equilibradas, conforme a figura 5.4, elas possuem seis pontos de cruzamento num intervalo de 60° , durante um ciclo de 360° . Através da figura 5.4, os pontos de cruzamento estabelecem o começo e o final de cada intervalo denominado “setor”. Um vetor de estado é associado ao ponto de cruzamento, considerando-se as polaridades das tensões trifásicas deste ponto de cruzamento.

A saída do conversor trifásico da figura 5.3 pode assumir, em cada fase, duas polaridades, de acordo com o estado das chaves superiores e inferiores, as quais são complementares. Tomando a fase a como exemplo, se a chave superior S_1 , estiver fechada (e, portanto, a chave inferior S_4 estiver aberta), o ponto 1 terá valor positivo, igual a $+V_{cc}/2$ (polaridade P). Por outro lado, se a chave superior S_1 estiver aberta, com S_4 fechada, o ponto 1 assumirá valor negativo, igual a $-V_{cc}/2$ (polaridade N). Existem oito possibilidades de combinação dos estados de saída do conversor trifásico, seis combinações denominadas “ativas”

e duas combinações denominadas “nulas”. Cada tipo de combinação é denominada “vetor de estado” do chaveamento.

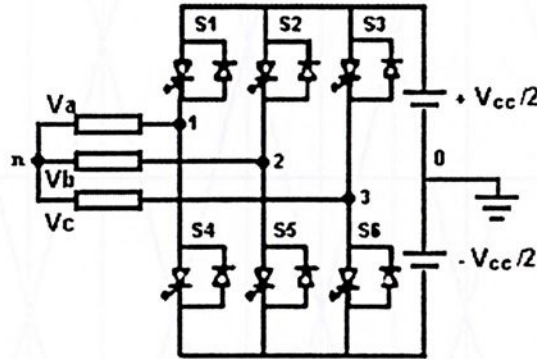


Figura 5.3 - Inversor trifásico com modulação PWM.

Os dois vetores de chaveamento nulos representam as fases de saída do conversor quando conectadas a um mesmo potencial, ou seja, todas as fases estão ligadas na polaridade positiva (chaves S_1 , S_2 e S_3 ligadas) ou todas as fases estão ligadas na polaridade negativa (chaves S_4 , S_5 e S_6 ligadas). Neste caso, o lado cc não interfere na corrente do sistema ca. Quando as fases do conversor são conectadas à polaridade positiva, o vetor de saída é denominado $\vec{U}_P$, ou seja, saída PPP. De outra maneira, quando as fases do conversor são conectadas na polaridade negativa, o vetor de saída é denominado $\vec{U}_N$, ou seja, saída NNN.

Os outros seis tipos de saídas representadas pelos “vetores ativos” são apresentadas a seguir:

$$\vec{U}_1 \Rightarrow \text{PNN}$$

$$\vec{U}_2 \Rightarrow \text{PPN}$$

$$\vec{U}_3 \Rightarrow \text{NPN}$$

$$\vec{U}_4 \Rightarrow \text{NPP}$$

$$\vec{U}_5 \Rightarrow \text{NNP}$$

$$\vec{U}_6 \Rightarrow \text{PNP}$$

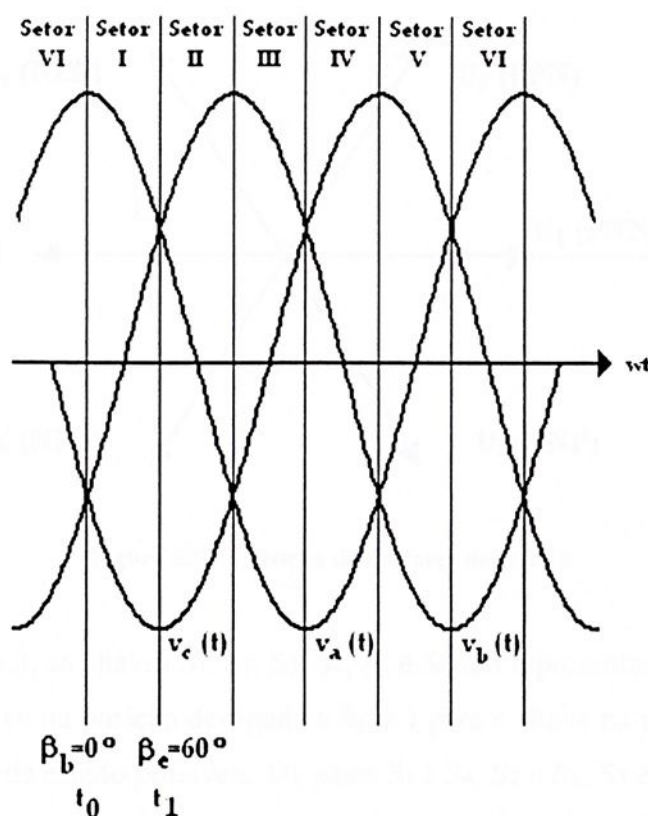


Figura 5.4- Representação da posição dos vetores.

Na figura 5.4, a máxima tensão positiva instantânea na fase a é tomada como referência e corresponde a uma posição de 0° (tempo t_0). As tensões $v_b(t_0)$ e $v_c(t_0)$ se cruzam nesta posição, considerada como o início do setor I. Nesse ponto, a tensão $v_a(t_0)$ é positiva, enquanto $v_b(t_0)$ e $v_c(t_0)$ são negativas, sendo representadas pelo vetor de estado U_1 . A combinação de chaveamento nesse ponto é PNN, conforme a figura 5.5. O final do setor I, segundo a figura 5.4, acontece após 60° e está localizado no cruzamento das tensões $v_a(t_1)$ e $v_b(t_1)$. Esse ponto também corresponde ao início do setor II. No instante t_1 , as tensões $v_a(t_1)$ e $v_b(t_1)$ são positivas e $v_c(t_1)$ é negativa. No começo do setor II, o vetor de estado é representado por U_2 e a combinação de chaveamento é PPN. Os quatro últimos setores são similares aos dois primeiros completando um ciclo de 360° ao final do setor VI [18].

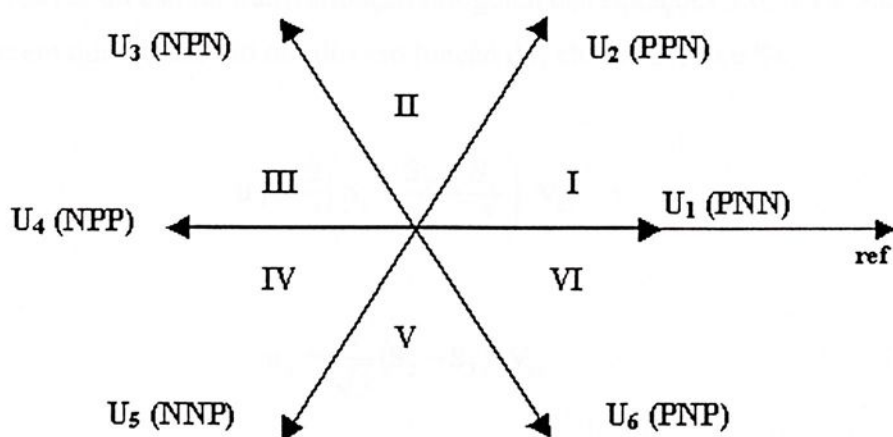


Figura 5.5 - Posição dos vetores de estado.

Na figura 5.3, as chaves S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 e S_6 são representadas por valores binários, onde $S_k = 0$ para a chave na posição desligada e $S_k = 1$ para a chave na posição ligada. Portanto, existem $2^3 = 8$ vetores de estado possíveis. Os pares S_1 e S_4, S_2 e S_5, S_3 e S_6 são complementares e, portanto, $S_4 = 1 - S_1, S_5 = 1 - S_2$ e $S_6 = 1 - S_3$. As tensões de fase trifásicas podem ser escritas pelas equações 5.6, 5.7 e 5.8:

$$V_1 = v_{10} + v_{0n} = S_1 \cdot \frac{V_{cc}}{2} - S_4 \cdot \frac{V_{cc}}{2} + v_{0n} = (2S_1 - 1) \frac{V_{cc}}{2} + v_{0n} \quad (5.6)$$

$$V_2 = v_{20} + v_{0n} = S_2 \cdot \frac{V_{cc}}{2} - S_5 \cdot \frac{V_{cc}}{2} + v_{0n} = (2S_2 - 1) \frac{V_{cc}}{2} + v_{0n} \quad (5.7)$$

$$V_3 = v_{30} + v_{0n} = S_3 \cdot \frac{V_{cc}}{2} - S_6 \cdot \frac{V_{cc}}{2} + v_{0n} = (2S_3 - 1) \frac{V_{cc}}{2} + v_{0n} \quad (5.8)$$

sendo:

- v_{0n} - é a tensão entre o neutro da carga N e o ponto médio 0 da tensão cc
- v_{10}, v_{20}, v_{30} - é a tensão entre cada uma das fases e o ponto médio 0 da tensão cc

Através do uso da transformação ortogonal das equações 5.6, 5.7 e 5.8, as tensões nos eixos direto e em quadratura são obtidos em função das chaves S_1 , S_2 e S_3 :

$$u_d = \frac{2}{3} \left(S_1 - \frac{S_2}{2} - \frac{S_3}{2} \right) \cdot V_{cc} \quad (5.9)$$

$$u_q = \frac{1}{\sqrt{3}} (S_2 - S_3) \cdot V_{cc} \quad (5.10)$$

Como descrito anteriormente, existem oito possibilidades de combinação nas comutações de S_1 , S_2 e S_3 , das quais originam dois vetores de estado nulos e seis vetores de estado ativos como apresenta a tabela 5.1.

5.3.1 - Exemplos de Chaveamento para Vetores Nulos.

Nas figuras abaixo são apresentadas as possíveis combinações de ligação dos vetores nulos.

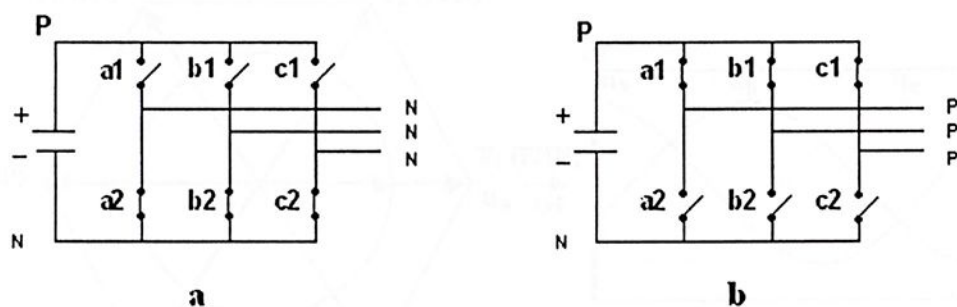


Figura 5.6 (a) - Conversor conectado na polaridade negativa,
(b) - Conversor conectado na polaridade positiva.

Analisando a figura 5.6, há dois estados de chaveamento onde não há passagem de corrente para o lado cc (vetores nulos).

Nos exemplos seguintes são apresentados três estados de chaveamento, bem como a sua posição instantânea e seu tamanho.

5.3.2 - Exemplos de Chaveamento Para Vetores Ativos.

- Fazendo a posição (PNN) como referência na figura 5.7a, ou seja, nesse ponto será o início do ciclo de 360°:

A figura 5.7a apresenta o eixo direto coincidente com a fase a da representação trifásica. Quando o vetor espacial $\vec{u}$ está sobre o eixo direto, o valor instantâneo de $u_a(t)$ é máximo e positivo. O vetor $\vec{u}$ descreve uma trajetória circular cujo raio é o valor máximo tensão. A mesma posição é representada na figura 5.7b, usando a representação senoidal trifásica no domínio do tempo. A figura 5.7b apresenta o valor instantâneo de $u_a(t)$ que é máximo positivo enquanto os valores de $u_b(t)$ e $u_c(t)$ são negativos e iguais a metade de $u_a(t)$. Para sistema equilibrado, o vetor espacial possui uma magnitude constante e gira com uma velocidade síncrona dada por:

$$\omega = d\theta/dt \tag{5.11}$$

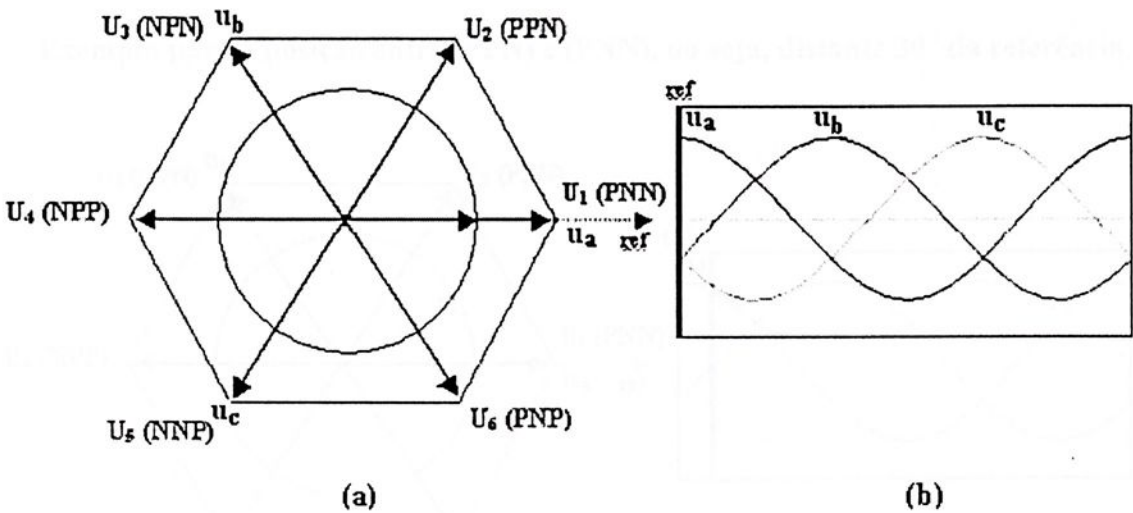


Figura 5.7 (a) - Posição do vetor em (PNN) e
(b) - posição do vetor no sistema trifásico.

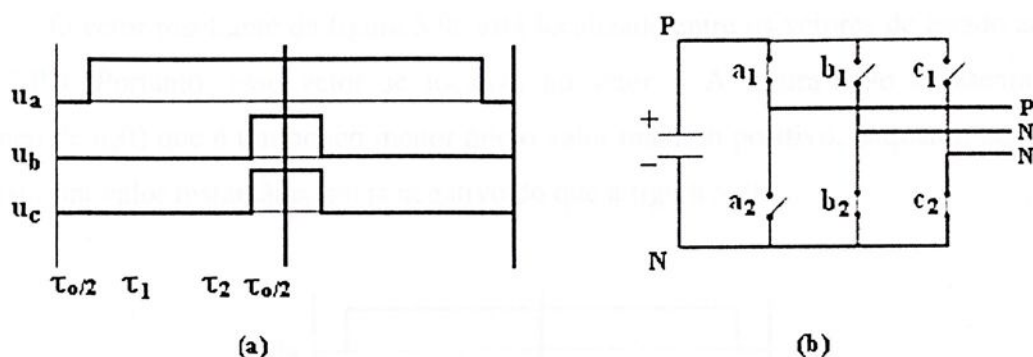


Figura 5.8 (a) - Tensões trifásicas com modulação de vetor espacial,
(b) - formas de ligação do conversor.

A figura 5.8a apresenta os intervalos $\tau_0/2$ que são os períodos nulos durante no qual o vetor de saída do conversor fica no estado nulo do SVPWM, τ_1 e τ_2 significam os períodos ativos de chaveamento, podendo ser visualizado na figura 5.8a,. Durante τ_1 , u_a está ligado enquanto u_b e u_c estão desligados. Durante τ_2 , u_a continua ligado enquanto u_b e u_c permanecem desligados. A figura 5.8b apresenta as formas de ligação do conversor para o período τ_1 . O chaveamento PNN representa o início do setor I enquanto o chaveamento PPN representa o final do setor I.

- Exemplo para a posição entre (PPN) e (PNN), ou seja, distante 30° da referência.

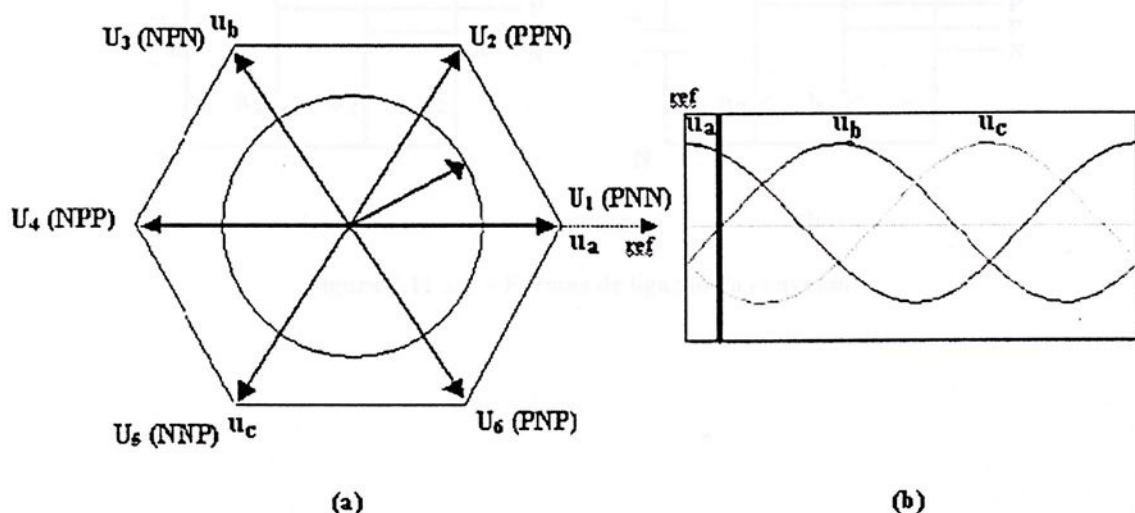


Figura 5.9 (a) - Posição do vetor entre (PNN) e (PPN) e
(b) posição do vetor no sistema trifásico.

O vetor resultante da figura 5.9a está localizado entre os vetores de estado adjacentes PNN e PPN. Portanto, esse vetor se localiza no setor I. A figura 5.9b apresenta o valor instantâneo de $u_a(t)$ que é um pouco menor que o valor máximo positivo, enquanto $u_b(t)$ é nulo e $u_c(t)$ possui um valor instantâneo mais negativo do que a figura 5.7b.

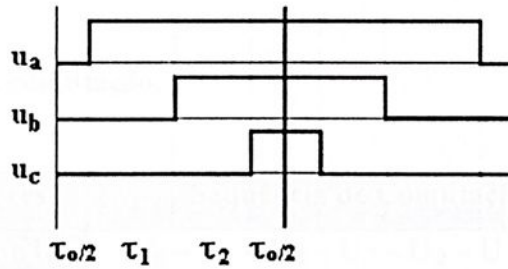


Figura 5.10 - Tensões trifásicas com modulação de vetor espacial.

A figura 5.10 apresenta os dois tipos de chaveamento deslocados de um intervalo regular de 60° um do outro, no período de chaveamento τ_1 , apenas u_a está ativo, enquanto u_b e u_c estão desativados (PNN), como apresenta a figura 5.11a, apenas a chave a_1 está ativada. No outro intervalo de chaveamento, τ_2 está deslocado de 60° , u_a e u_b estão ativos, enquanto u_c está desativado (PPN), como apresenta a figura 5.11b.

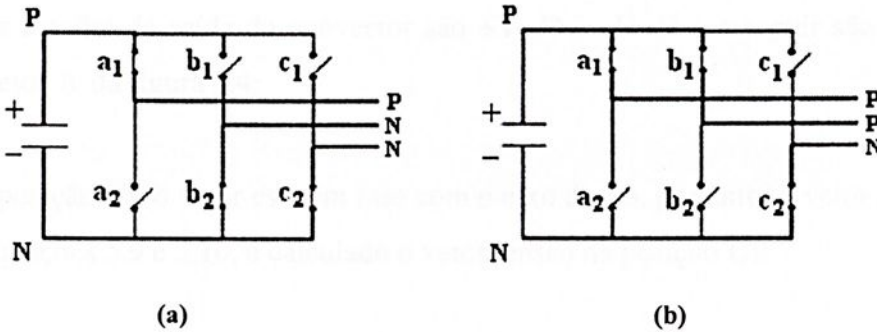


Figura 5.11 a,b - Formas de ligação do conversor.

5.4 - Sequência de Comutação

A tabela 5.1 apresenta uma sequência de comutação simétrica, onde os três braços do inversor comutam em alta frequência, resultando em uma baixa distorção harmônica (THD) da tensão de saída [12, 34, 35].

Tabela 5.1 – Sequência de comutação.

Setores	Sequência de Comutação
Setor I	$U_0 - U_1 - U_2 - U_7 - U_2 - U_1 - U_0$
Setor II	$U_0 - U_3 - U_2 - U_7 - U_2 - U_3 - U_0$
Setor III	$U_0 - U_3 - U_4 - U_7 - U_4 - U_3 - U_0$
Setor IV	$U_0 - U_5 - U_4 - U_7 - U_4 - U_5 - U_0$
Setor V	$U_0 - U_5 - U_6 - U_7 - U_6 - U_5 - U_0$
Setor VI	$U_0 - U_1 - U_6 - U_7 - U_6 - U_1 - U_0$

Os vetores de estado ativo são separados 60° um do outro, limitando os setores. Os setores da figura 5.4, são identificados, no sentido anti horário, do I ao VI.

As tensões de saída do conversor são $+V_{cc}/2$ e $-V_{cc}/2$ e a seguir são mostradas três posições do vetor $\vec{u}$ da figura 5.4:

- Na posição U_1 , o vetor está em fase com o eixo direto, portanto, o vetor ativo será PNN e usando as equações 5.9 e 5.10, é calculado o vetor tensão na posição U_1 :

$$u_{1d} = \frac{2}{3} \left(\frac{V_{cc}}{2} + \frac{V_{cc}}{4} + \frac{V_{cc}}{4} \right) \quad (5.12)$$

$$u_{1q} = 0 \quad (5.13)$$

A magnitude do vetor estado correspondente para começar no setor I é:

$$U_1 = u_{1d} = \frac{2}{3} V_{cc} \tag{5.14}$$

• A magnitude do vetor ativo U_2 é calculado da mesma maneira. Neste caso, o vetor ativo será PPN, portanto, S_1 e S_2 são positivos e substituídos por $+V_{cc}/2$ e S_3 é negativo e sendo substituído por $-V_{cc}/2$:

$$u_{2d} = \frac{2}{3} \left(\frac{V_{cc}}{2} - \frac{V_{cc}}{4} + \frac{V_{cc}}{4} \right) = \frac{1}{3} V_{cc} \tag{5.15}$$

$$u_{2q} = \left(\frac{V_{cc}}{2} + \frac{V_{cc}}{2} \right) / \sqrt{3} = \frac{\sqrt{3}}{3} V_{cc} \tag{5.16}$$

$$U_2 = \sqrt{u_{2d}^2 + u_{2q}^2} = \frac{2}{3} V_{cc} \tag{5.17}$$

A tabela 5.2 apresenta as formas de ligação do conversor para cada setor correspondente.

Tabela 5.2 – Valores possíveis de comutação do inversor trifásico [32].

Vetores	S ₁	S ₂	S ₃	V _{a0} '	V _{b0} '	V _{c0} '
U ₀	0	0	0	0	0	0
U ₁	1	0	0	+V _{cc} /2	-V _{cc} /2	-V _{cc} /2
U ₂	1	1	0	+V _{cc} /2	+V _{cc} /2	-V _{cc} /2
U ₃	0	1	0	-V _{cc} /2	+V _{cc} /2	-V _{cc} /2
U ₄	0	1	1	-V _{cc} /2	+V _{cc} /2	+V _{cc} /2
U ₅	0	0	1	-V _{cc} /2	-V _{cc} /2	+V _{cc} /2
U ₆	1	0	1	+V _{cc} /2	-V _{cc} /2	+V _{cc} /2
U ₇	1	1	1	0	0	0

5.5 - Possibilidade de Chaveamento.

Analisando a figura 5.5, o eixo direto do esquema ortogonal coincide com o começo do setor I, na qual está o ângulo de referência. Se a tensão for senoidal, trifásica e equilibrada, é transformada no vetor espacial $\dot{u}$. Quanto este vetor rotativo encontra-se na posição igual a um ângulo θ , pode ser decomposto em dois vetores $U_x k_1$ e $U_{x+1} k_2$, onde $x=1, 2, \dots, 6$, e $U_x = U_{x+1} = 2/3 V_{cc}$, a equação 5.18 é obtida através da figura 5.12 [28]:

$$|u(t)| \cdot \begin{vmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{vmatrix} = \frac{2}{3} V_{cc} \cdot k_1 \begin{vmatrix} \cos\beta_b \\ \sin\beta_b \end{vmatrix} + \frac{2}{3} V_{cc} \cdot k_2 \begin{vmatrix} \cos\beta_e \\ \sin\beta_e \end{vmatrix} \quad (5.18)$$

sendo:

k_1, k_2 - variáveis proporcionais para uma dada posição angular θ de $u(t)$;

$|u(t)|$ - magnitude do vetor de rotação espacial $u(t)$;

β_b, β_e - deslocamento angular dos vetores de estados adjacentes de $u(t)$;

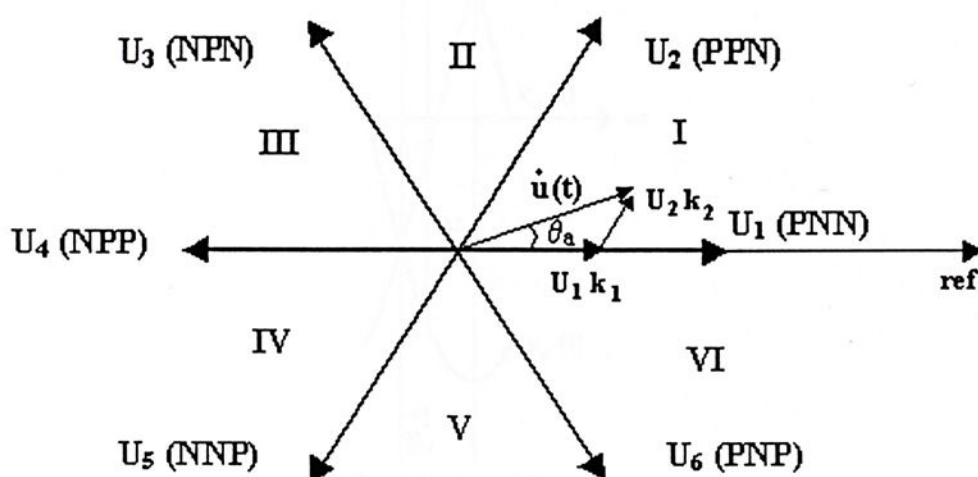


Figura 5.12 - Vetor espacial no domínio do tempo.

Para um exemplo a ser analisado, na figura 5.5, o vetor de rotação espacial $u(t)$ é deslocado numa posição menor que 60° do eixo direto, na qual será apresentado a posição

instantânea $u(t_a)$ no setor I. Para esse setor tem-se que $\beta_b = 0^\circ$ e $\beta_c = 60^\circ$, com isso, as variáveis proporcionais podem ser escritas da seguinte maneira:

$$k_1 = \frac{3}{2} \frac{|u(t_a)|}{V_{cc}} \cdot \cos\theta_a - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{|u(t_a)|}{V_{cc}} \cdot \sin\theta_a \quad (5.19)$$

$$k_2 = \sqrt{3} \frac{|u(t_a)|}{V_{cc}} \cdot \sin\theta_a \quad (5.20)$$

A figura 5.13 apresenta a região senoidal trifásica que representa o setor I no domínio do tempo. D_1 representa a diferença entre as tensões instantâneas $v_a(t_a)$ e $v_b(t_a)$, e D_2 representa a diferença entre $v_b(t_a)$ e $v_c(t_a)$, para uma posição angular θ_a [28].

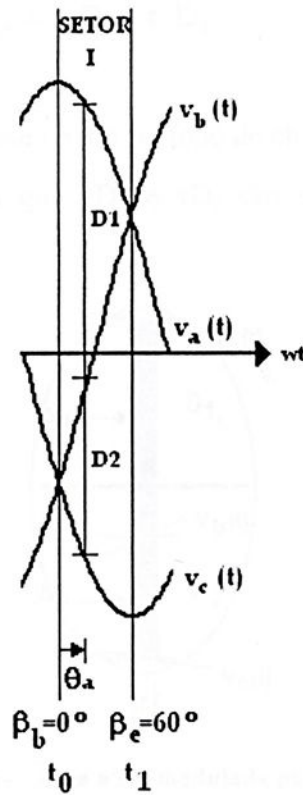


Figura 5.13 - Setor I no domínio do espaço.

Analisando a figura 5.13, os segmentos D_1 e D_2 são calculados como seguem:

$$D_1 = v_a(t_a) - v_b(t_a) = \frac{3}{2} \cdot |u(t_a)| \cdot \cos\theta_a - |u(t_a)| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin\theta_a \quad (5.21)$$

$$D_2 = v_b(t_a) - v_c(t_a) = \sqrt{3} |u(t_a)| \cdot \sin\theta_a \quad (5.22)$$

A integral de D_1 e D_2 , para um período τ , é dado como segue:

$$A_A = \int_t^{t+\tau} D_1 dt + \int_t^{t+\tau} D_2 dt \quad (5.23)$$

Considerando um pequeno período τ , a equação 5.23 pode ser simplificada para:

$$A_A = \tau \cdot D_1 + \tau \cdot D_2 \quad (5.24)$$

sendo: A_A - área das tensões de fase de um período de chaveamento τ .

A figura 5.14 apresenta que τD_1 e τD_2 são representados pelas áreas A_1 e A_2 , respectivamente.

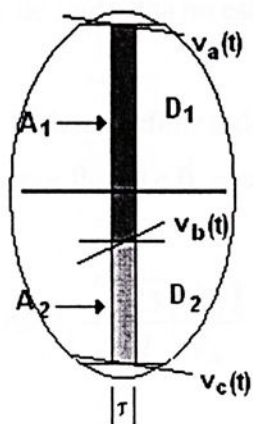


Figura 5.14 - Área a ser modulada pelo SVPWM.

Para realizar a modulação desejada, o SVPWM pode criar pulsos positivos e negativos de tensão cc. Multiplicando ambos os termos da equação 5.18 por τ , tem-se:

$$\tau |u(t)| \cdot \left| \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right| = \frac{2}{3} V_{cc} \tau \cdot k_1 \left| \frac{\cos \beta_b}{\sin \beta_b} \right| + \frac{2}{3} V_{cc} \tau \cdot k_2 \left| \frac{\cos \beta_c}{\sin \beta_c} \right| \quad (5.25)$$

O período de chaveamento τ pode ser aproximado para τ_1 e τ_2 :

$$\tau_1 = \tau \cdot k_1 \quad (5.26)$$

$$\tau_2 = \tau \cdot k_2 \quad (5.27)$$

Substituindo as equações 5.26 e 5.27 na 5.25, tem-se:

$$\tau |u(t)| \cdot \left| \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right| = \frac{2}{3} V_{cc} \tau_1 \cdot \left| \frac{\cos \beta_b}{\sin \beta_b} \right| + \frac{2}{3} V_{cc} \tau_2 \cdot \left| \frac{\cos \beta_c}{\sin \beta_c} \right| \quad (5.28)$$

sendo:

- τ - período de chaveamento total;
- τ_1 - período em que o conversor de saída fica no estado descrito no começo do setor;
- τ_2 - período em que o conversor de saída fica no estado descrito no final do setor;

Utilizando a equação 5.28, pode-se definir todos os setores da figura 5.4. Os períodos ativos do setor I podem ser substituídos por $\beta_b = 0$ e $\beta_c = \pi/3$ [28]:

$$\tau_1 = \tau \frac{3 |u(t_a)|}{2 V_{dc}} \cdot \cos \theta_a - \tau \frac{\sqrt{3} |u(t_a)|}{2 V_{dc}} \cdot \sin \theta_a \quad (5.29)$$

$$\tau_2 = \tau \sqrt{3} \frac{|u(t_a)|}{V_{dc}} \cdot \sin \theta_a \quad (5.30)$$

Os períodos τ_1 e τ_2 indicam quanto tempo o vetor de estado permanece em cada setor.

5.6 - Conclusão

Neste capítulo, a modulação senoidal SVPWM foi apresentada. O principal objetivo dessa modulação é definir todos os períodos nulos e ativos, como também determinar uma relação direta entre uma forma de onda trifásica senoidal e uma sequência de pulsos formada pelo SVPWM.

A modulação SVPWM é muito usada em sistemas de média e pequena potência, pois permite reduzir o número de comutações, diminuindo o conteúdo harmônico.

Os períodos “on” e “off” de chaveamento são baseados na posição instantânea do vetor espacial, que gira a uma velocidade síncrona, em relação aos vetores estacionários. A estrutura ortogonal de dois eixos é obtida através da transformação matemática das variáveis instantâneas trifásicas.

Capítulo 6

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA

6.1 - Introdução

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um compensador que seja capaz de controlar de forma simultânea o fluxo de potência ativa e reativa de uma fonte assíncrona para uma barra do sistema de transmissão.

Neste capítulo, são verificadas as condições de operação deste controlador de fluxo de potência.

Para avaliar a modelagem do controlador, são apresentadas simulações computacionais utilizando o software Matlab[®] para realizar as simulações.



6.2 - Simulação do Compensador

O compensador utilizado como controlador de fluxo de potência é composto por um conversor como fonte de tensão (VSC) cuja saída é controlada em magnitude e ângulo. Este controlador é conectado em derivação com a barra do sistema, como apresenta a figura 6.1. Este controlador possui a função de suprir ou absorver potência ativa e reativa, simultânea ou separadamente, do sistema ca, utilizando o VSC nesta troca de potência.

Para discutir o funcionamento do controlador de fluxo de potência em derivação, é apresentado um sistema ca trifásico pelo seu diagrama unifilar, na figura 6.1, composto por um gerador ligado a uma carga através de uma linha de transmissão.

Analisando a figura 6.1, o controlador é conectado à barra através de uma impedância z_{sh} . Nas simulações, serão considerados perdas ôhmicas representadas pelos resistores inseridos no sistema. A queda tensão entre o gerador e a barra é denominada V_{Z_t} e a queda de tensão entre a barra e o compensador é denominada $V_{Z_{sh}}$.

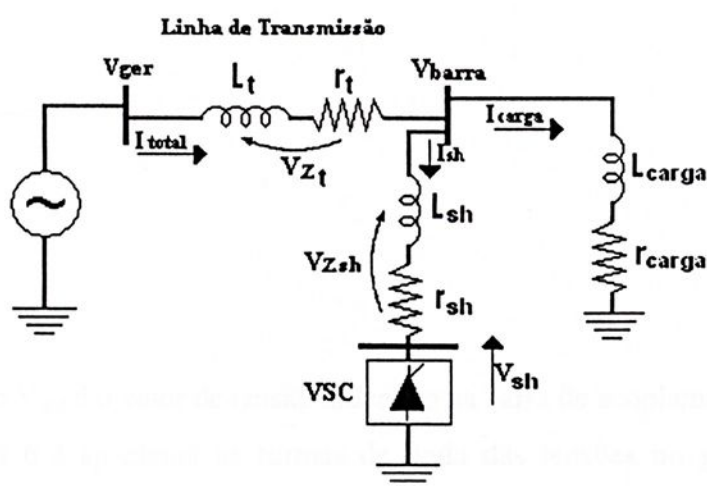


Figura 6.1 - Sistema elétrico onde está inserido o compensador em derivação.

No diagrama unifilar da figura 6.1 define-se:

$\dot{V}_{ger}$ - tensão no gerador

$\dot{V}_{barra}$ - tensão no barramento de acoplamento

- $\dot{V}_{sh}$ - tensão na saída do controlador
 $\dot{V}_{z_t}$ - queda de tensão na reatância
 $\dot{V}_{z_{sh}}$ - queda de tensão na reatância de acoplamento
 $\dot{I}_{sh}$ - corrente da reatância de acoplamento
 $\dot{I}_{carga}$ - corrente da carga
 $\dot{I}_{total}$ - corrente total

Os parâmetros do sistema são dados como seguem:

$$\dot{V}_{ger} - 138\angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_{ord} - 125.6 \text{ e } 101.78 \text{ V}$$

$$L_t - 0.132 \text{ H}$$

$$r_t - 10 \Omega$$

$$L_{carga} - 0.261 \text{ H}$$

$$r_{carga} - 162 \Omega$$

$$L_{sh} - 0.26 \text{ H}$$

$$r_{sh} - 10 \Omega$$

$$f - 60 \text{ Hz}$$

A tensão V_{ord} é o valor de tensão ordenado na barra de acoplamento.

A figura 6.2 apresenta as formas de onda das tensões no gerador. Essas tensões possuem um valor de pico de 195,15 V e são defasadas de 120° umas das outras, como apresenta as equações 6.1 (a,b,c):

$$\dot{V}_{g1} = \dot{V}_{ger} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (6.1a)$$

$$\dot{V}_{g2} = \dot{V}_{ger} \cdot \cos(\omega \cdot t - 120^\circ) \quad (6.1b)$$

$$\dot{V}_{g3} = \dot{V}_{ger} \cdot \cos(\omega \cdot t + 120^\circ) \quad (6.1c)$$

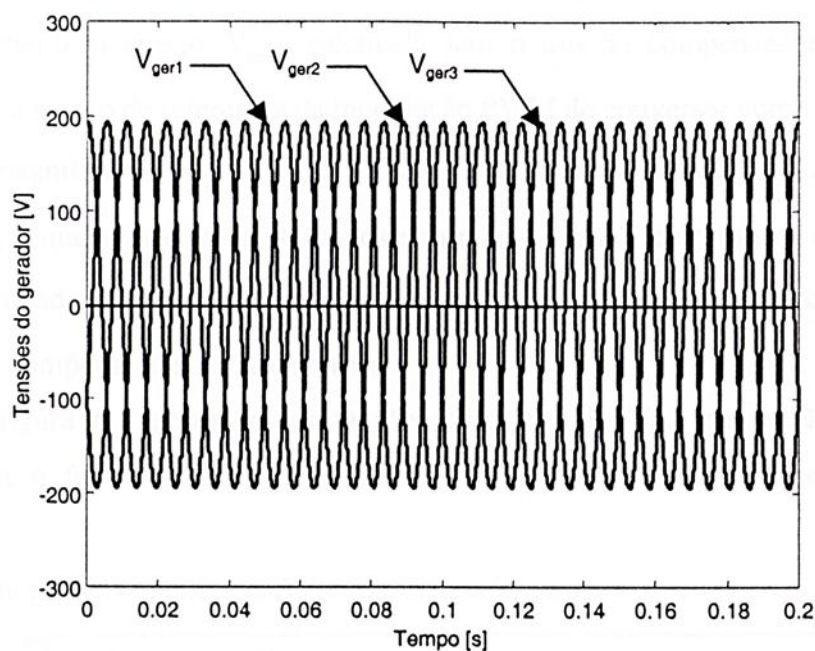


Figura 6.2 - Formas de ondas das tensões do gerador.

Para uma primeira análise, o compensador não está conectado com V_{barra} . Com isso, a tensão em V_{barra} é calculada da seguinte maneira:

$$Z_{\text{eq}} = Z_t + Z_{\text{carga}} = r_t + jx_t + r_{\text{carga}} + jx_{\text{carga}} \quad (6.2)$$

A partir daí, calcula-se a corrente resultante na linha:

$$\dot{I}_t = \frac{\dot{V}_{\text{ger}}}{Z_{\text{eq}}} \quad (6.3)$$

A tensão V_{barra} é dada por:

$$\dot{V}_{\text{barra}} = \dot{V}_{\text{ger}} - (\dot{I}_t \cdot Z_{\text{eq}}) \quad (6.4)$$

A modulação SVM requer uma tensão trifásica de referência para o funcionamento do conversor. Portanto, a tensão $\dot{V}_{\text{barra}}$ calculada sem o uso do compensador será usada como referência para a tensão de referência da modulação PWM do conversor como fonte de tensão.

A magnitude da tensão $\dot{V}_{\text{barra}}$, no programa será chamada de $V_{\text{bus}} \angle \theta$. Essa tensão de referência V_{bus} é que será incrementada posteriormente um ΔV de tensão e o ângulo da tensão $\dot{V}_{\text{barra}}$ é denominado de θ e será incrementado um $\Delta \theta$. Portanto, esse conversor será capaz de fazer ambas as compensações ativa e reativa.

A figura 6.3 apresenta as tensões trifásicas de V_{bus} que serão utilizadas como referência para o funcionamento do conversor conectado em derivação com a barra a ser compensada.

Num primeiro momento ΔV e $\Delta \theta$ são iguais a zero.

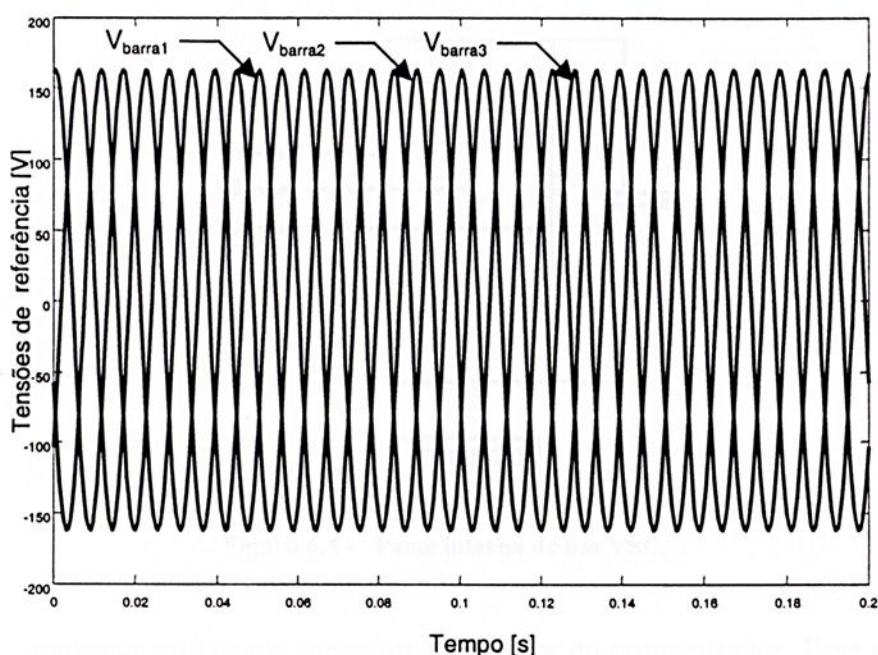


Figura 6.3 - Tensões de referência do SVM.

Essa tensão trifásica será transformada em coordenadas d e q:

$$v_{sd} = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot (v_{\text{bus1}} - 0.5 \cdot (v_{\text{bus2}} + v_{\text{bus3}})) \quad (6.5)$$

$$v_{sq} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \cdot (v_{\text{bus2}} - v_{\text{bus3}}) \quad (6.6)$$

Com esses dois valores de v_{sd} e v_{sq} , variantes no tempo, são calculadas as modulações PWM para cada período de chaveamento do conversor.

Analisando a figura 6.1, o compensador é formado por um conversor como fonte de tensão (VSC) conectado em derivação com a barra (V_{barra}) através de uma impedância z_{sh} ($r_{sh} + jL_{sh}$) que tem como objetivo controlar o fluxo de potência.

A frequência de chaveamento usada pelo conversor como fonte de tensão será de 2 kHz. Essa frequência foi usada na simulação do programa, porque se fosse aumentada e o passo de integração permanecesse o mesmo, o tempo de simulação do programa demorava dias para convergir, então foi escolhido esse valor. A figura 6.4 apresenta como o VSC é constituído e também como é realizada a modulação PWM. A fonte de tensão do lado cc é representada por um capacitor C, cuja tensão é igual a E.

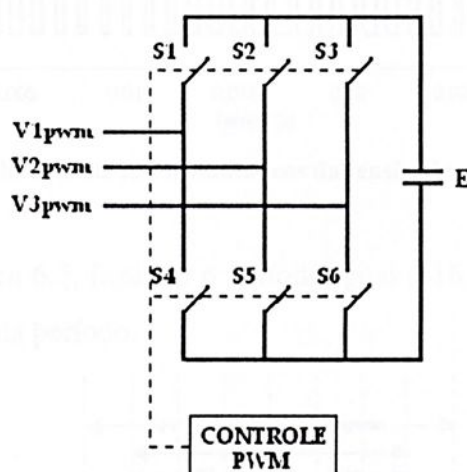


Figura 6.4 - Parte interna de um VSC.

Na simulação será usado capacitor no lado cc do compensador. Esse capacitor terá a função de absorver ou fornecer potência. Do contrário, a fonte teria apenas a função de fornecer potência. Para a análise do fluxo de potência, serão consideradas chaves eletrônicas ideais controladas.

A figura 6.4 apresenta as chaves que compõe o VSC. Essas chaves são controladas por sinais digitais produzidos através da modulação PWM. As chaves em cada braço têm comandos complementares uma da outra. Se a chave superior estiver na posição "on", a chave inferior vai estar na posição "off".

A tensão média instantânea do circuito é dado pela figura 6.5. Nesta figura, o semi-ciclo positivo da tensão média do conversor coincide com maior largura de pulso da saída PWM. O semi-ciclo negativo coincide com a menor largura de pulso da saída do PWM.

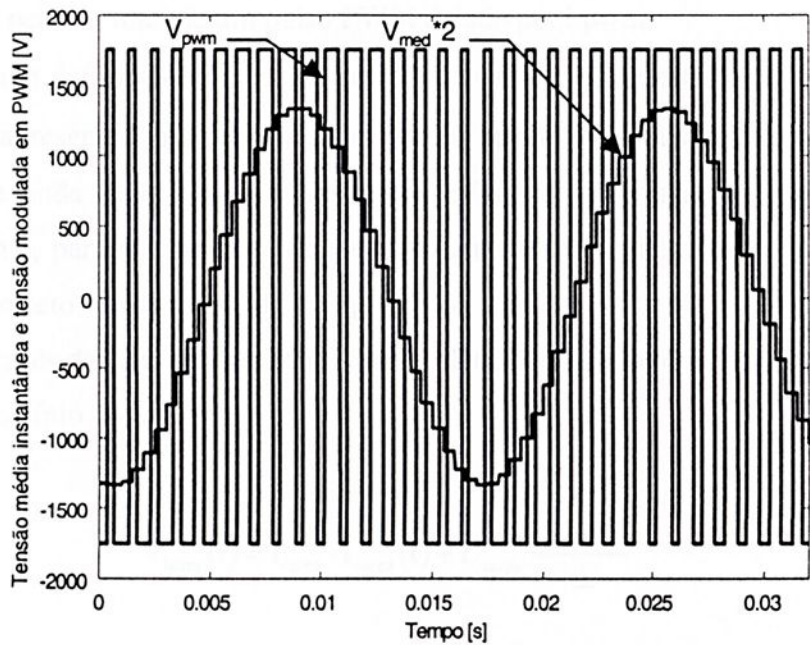


Figura 6.5 - Valores médios e instantâneos da tensão de saída do conversor.

Analisando a figura 6.5, fazendo o período igual a 16,6 ms (1/f), os pulsos do PWM começam a se repetir após cada período.

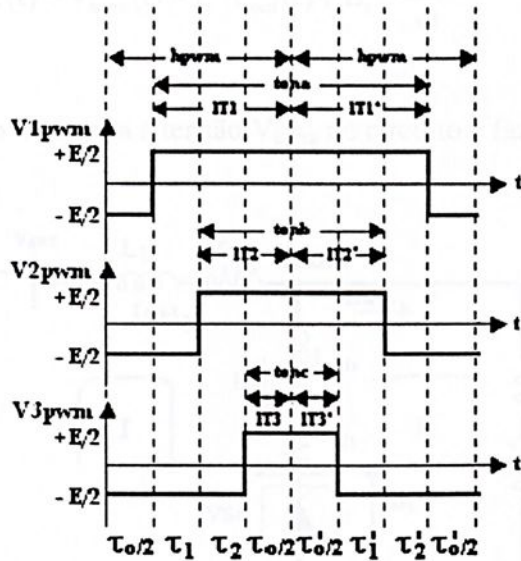


Figura 6.6 - Tensões trifásicas com modulação vetorial.

Analisando a figura 6.6, IT1, IT2 e IT3 são os intervalos de tempo em que as chaves S1, S2 e S3 permanecem fechadas, respectivamente. Quando a técnica SVPWM é usada, os intervalos de tempo da aplicação dos vetores nulos são proporcionalizadas conforme apresentado no item 5.3. O período total de um pulso PWM é dado por h_{pwm} .

Tendo definidos todos os subperíodos dos vetores de estado ativos e nulos ($\tau_0/2$, τ_1 e τ_2), conforme apresentado no item 5.3.2, um pulso de tensão cc cuja área é igual à área dada por uma forma de onda senoidal, para um dado período de chaveamento, é criado. Isto é feito, simultaneamente, para as três fases de saída do conversor. A modulação SVM, apresentado no item 5.4, para o setor I é apresentado na figura 6.6.

Através da “Lei de Kirchhoff”, será calculado a tensão em V_{barra} e as correntes i_{total} , i_{carga} e i_{sh} no domínio do tempo.

$$V_{barra}(t) = r_{carga} \cdot i_{carga}(t) + L_{carga} \frac{di_{carga}(t)}{dt} \quad (6.7)$$

$$V_{barra}(t) - V_{sh} = r_{sh} \cdot i_{sh}(t) + L_{sh} \frac{di_{sh}(t)}{dt} \quad (6.8)$$

$$V_{ger}(t) - V_{barra}(t) = r_t \cdot i_{total}(t) + L_t \frac{di_{total}(t)}{dt} \quad (6.9)$$

Admitindo como incógnita a tensão V_{barra} no circuito e fazendo a análise de malhas na figura 6.7:

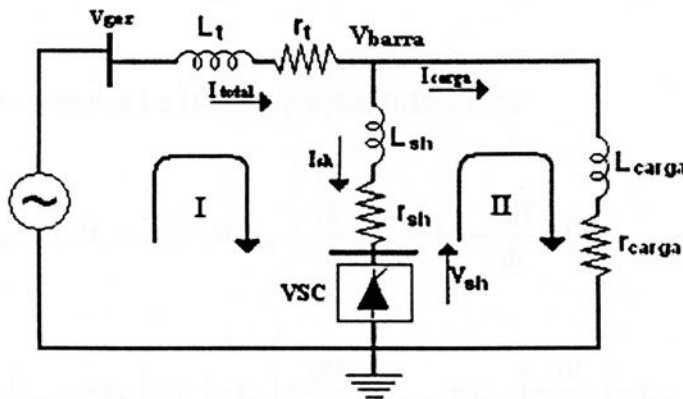


Figura 6.7 - Circuito equivalente.

Simplificando as correntes:

$$I = I_{\text{total}}(t) \quad (6.10)$$

$$II = I_{\text{carga}}(t) \quad (6.11)$$

$$I - II = I_{\text{sh}}(t) \quad (6.12)$$

Utilizando as equações 6.10, 6.11 e 6.12, será analisada as duas malhas:

$$V_{\text{ger}} - V_{\text{sh}} = r_t \cdot I + L_t \frac{dI}{dt} + (I - II) \cdot r_{\text{sh}} + L_{\text{sh}} \frac{d(I - II)}{dt} \quad (6.13)$$

$$V_{\text{sh}} = r_{\text{carga}} \cdot II + L_{\text{carga}} \frac{dII}{dt} + (II - I) \cdot r_{\text{sh}} + L_{\text{sh}} \frac{d(II - I)}{dt} \quad (6.14)$$

Simplificando:

$$V_{\text{dif}} = V_{\text{ger}} - V_{\text{sh}} \quad (6.15)$$

Rearranjando:

$$V_{\text{dif}} = I \cdot r_t + L_t \frac{dI}{dt} + I \cdot r_{\text{sh}} - II \cdot r_{\text{sh}} + L_{\text{sh}} \frac{dI}{dt} - L_{\text{sh}} \frac{dII}{dt} \quad (6.16)$$

$$V_{\text{sh}} = II \cdot r_{\text{carga}} + L_{\text{carga}} \frac{dII}{dt} - I \cdot r_{\text{sh}} + II \cdot r_{\text{sh}} - L_{\text{sh}} \frac{dI}{dt} + L_{\text{sh}} \frac{dII}{dt} \quad (6.17)$$

Isolando as correntes I e II das equações 6.16 e 6.17:

$$V_{\text{dif}} = I \cdot (r_t + r_{\text{sh}}) - II \cdot r_{\text{sh}} + \frac{dI}{dt} \cdot (L_t + L_{\text{sh}}) - \frac{dII}{dt} \cdot (L_{\text{sh}}) \quad (6.18)$$

$$V_{\text{sh}} = II \cdot (r_{\text{carga}} + r_{\text{sh}}) + I \cdot (-r_{\text{sh}}) + \frac{dII}{dt} \cdot (L_{\text{carga}} + L_{\text{sh}}) + \frac{dI}{dt} \cdot (-L_{\text{sh}}) \quad (6.19)$$

Simplificando as equações:

$$K_1 = r_t + r_{sh}$$

$$K_4 = -l_{sh}$$

$$K_2 = l_t + l_{sh}$$

$$K_5 = r_{sh} + r_{carga}$$

$$K_3 = -r_{sh}$$

$$K_6 = l_{sh} + l_{carga}$$

Substituindo as variáveis nas equações 6.18 e 6.19:

$$V_{dif} = K_1 \cdot I + K_3 \cdot II + K_2 \cdot \frac{dI}{dt} + K_4 \cdot \frac{dII}{dt} \quad (6.20)$$

$$V_{sh} = K_3 \cdot I + K_5 \cdot II + K_4 \cdot \frac{dI}{dt} + K_6 \cdot \frac{dII}{dt} \quad (6.21)$$

Isolando a derivada da corrente em 6.20:

$$\frac{dII}{dt} = \frac{V_{dif}}{K_4} - \frac{K_1}{K_4} \cdot I - \frac{K_3}{K_4} \cdot II - \frac{K_2}{K_4} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (6.22)$$

Substituindo 6.22 em 6.21:

$$V_{sh} = K_3 \cdot I + K_5 \cdot II + K_4 \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{K_6}{K_4} \cdot V_{dif} - \frac{K_1 K_6}{K_4} \cdot I - \frac{K_3 K_6}{K_4} \cdot II - \frac{K_2 K_6}{K_4} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (6.23)$$

Isolando a derivada da corrente I:

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} = & V_{sh} \cdot \left[\frac{K_4}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] + I \cdot \left[\frac{K_3 K_4 - K_1 K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_4}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] \cdot (-1) + \\ & + II \cdot \left[\frac{K_5 K_4 - K_3 K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_4}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] \cdot (-1) + V_{dif} \cdot \left[\frac{K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_4}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] \cdot (-1) \end{aligned} \quad (6.24)$$

Substituindo 6.24 em 6.22:

$$\begin{aligned} \frac{dII}{dt} = & V_{dif} \cdot \frac{1}{K_4} - \frac{K_1}{K_4} \cdot I - \frac{K_3}{K_4} \cdot II - V_{sh} \cdot \left[\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] + I \cdot \left[\frac{K_3 K_4 - K_1 K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] + \\ & + II \cdot \left[\frac{K_5 K_4 - K_3 K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] + V_{dif} \cdot \left[\frac{K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] \end{aligned} \quad (6.25)$$

Agrupando as variáveis:

$$\begin{aligned} \frac{dII}{dt} = & \left[-\frac{K_1}{K_4} + \left[\frac{K_3 K_4 - K_1 K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] \right] \cdot I + \\ & + \left[-\frac{K_3}{K_4} + \left[\frac{K_5 K_4 - K_3 K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] \right] \cdot II + \\ & + \left[\left[\frac{1}{K_4} \right] + \left[\frac{K_6}{K_4} \right] \cdot \left[\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] \right] \cdot V_{dif} + \left[\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right] \cdot (-1) \cdot V_{sh} \end{aligned} \quad (6.26)$$

Construindo a matriz de estado:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I \\ II \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} \left(\frac{K_3 K_4 - K_1 K_6}{K_4^2 - K_2 K_6} \right) \cdot (-1) & \left(\frac{K_5 K_4 - K_3 K_6}{K_4^2 - K_2 K_6} \right) \cdot (-1) \\ \left(-\frac{K_1}{K_4} \right) + \left(\frac{K_3 K_4 - K_1 K_6}{K_4} \right) \cdot \left(\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right) & \left(-\frac{K_3}{K_4} \right) + \left(\frac{K_5 K_4 - K_3 K_6}{K_4} \right) \cdot \left(\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ II \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} \left(\frac{K_6}{K_4^2 - K_2 K_6} \right) \cdot (-1) & \left(\frac{K_4}{K_4^2 - K_2 K_6} \right) \\ \left(\frac{1}{K_4} \right) + \left(\frac{K_6}{K_4} \right) \cdot \left(\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right) & \left(\frac{K_2}{K_4^2 - K_2 K_6} \right) \cdot (-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dif} \\ V_{sh} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.27)$$

Através da matriz de estado da equação 6.27, calculamos as correntes i_{total} , $i_{carga_1,2,3}$ e suas derivadas.

Após isso, calcula-se o valor da tensão compensada onde está conectado o con em derivação.

$$V_{barra} = V_{ger} - r_t \cdot i_{total} - L_t \cdot \frac{di_{total}}{dt} \quad (6.28)$$

O tempo de cada amostragem da tensão é de 0,2s de simulação, ou seja, durante cada amostragem será calculado o valor rms de V_{barra} . Esse valor rms será comparado com um valor ordenado (V_{ord}) (valor da amplitude da tensão em que V_{barra} deva chegar) e a diferença será multiplicada por uma constante $k=2,5$ (equação 6.29) usada para corrigir a própria V_{barra} . Essa diferença de tensão (ΔV) será somada com a tensão de referência (V_{bus}), equação 6.30. Se essa soma de ΔV em V_{bus} se estabiliza, ou seja, não provoca mais aumento na tensão, um outro ΔV atua multiplicado por um k_{int} depois de 3 iterações. Esse k_{int} é um controle integrativo.

A diferença de tensão (ΔV) é dada por:

$$\Delta V = V_{\text{ord}} - |V_{\text{rms}}| \quad (6.29)$$

Essa diferença de tensão é incrementada na tensão de referência da barra.

$$V_{\text{barra_novo}} = V_{\text{barra}} + \Delta V \cdot k \quad (6.30)$$

sendo: k - constante de proporção

Para diminuir o erro dessa componente corrigida, é adicionada uma integral na equação 6.30:

$$V_{\text{barra_novo}} = V_{\text{barra}} + \Delta V \cdot k + \int_0^t \Delta V \cdot dt \quad (6.31)$$

onde: t - varia de 0 até 3 intervalos iguais;

A tensão $V_{\text{barra_novo}}$ pode ser controlada em magnitude e ângulo, dependendo do que o sistema esteja requerendo. Se o sistema requer um incremento de tensão, na $V_{\text{barra_novo}}$ será somado um ΔV , com esta soma a magnitude de $V_{\text{barra_novo}}$ sofrerá um aumento em relação ao eixo direto da componente ortogonal e nenhuma diferença no eixo em quadratura.

O programa verifica-se essa diferença de tensão (ΔV) é menor que uma certa tolerância estipulada, que neste caso é 0.0001. Caso essa diferença de tensão nunca alcance a tolerância, o programa é finalizado após atingir um número de iteração permitido, que nesta simulação é de 20.

O controle da amplitude de V_{barra} é obtido variando-se o padrão PWM do conversor.

Há um processo iterativo no programa onde é feito o controle do ângulo de fase da tensão de saída do conversor, que será utilizado para controlar o fluxo de potência ativa entre o compensador e a barra.

Nas equações 6.32a,b,c, serão calculadas as potências instantâneas da saída do conversor:

$$P_{\text{vsc}_1} = V_{\text{out}_1} \cdot i_{\text{tpmshunt}_1} \quad (6.32a)$$

$$P_{\text{vsc}_2} = V_{\text{out}_2} \cdot i_{\text{tpmshunt}_2} \quad (6.32b)$$

$$P_{\text{vsc}_3} = V_{\text{out}_3} \cdot i_{\text{tpmshunt}_3} \quad (6.32c)$$

A potência total instantânea é dada pela soma das três equações acima:

$$P_{\text{tvsc}} = P_{\text{vsc}_1} + P_{\text{vsc}_2} + P_{\text{vsc}_3} \quad (6.33)$$

Calculando o valor rms dessa potência e multiplicando por uma constante kk , esse valor será comparado com uma certa potência estipulada (P_{ref}) para que o conversor injete ou absorva potência ativa e reativa, equação 6.34. Essa diferença de potência é chamada de ΔP e será somada junto com o ângulo da tensão V_{bus} de referência, equação 6.35. O objetivo de ΔP é corrigir o defasamento angular entre a tensão do barramento e do conversor.

O programa verifica essa diferença até atingir uma tolerância dada por tolP , caso essa diferença de potência não atinja P_{ref} o programa é finalizado após atingir um número de interação permitido, que nesta simulação é 10.

Essa diferença de potência é dada por:

$$\Delta P = P_{\text{ref}} - |P_{\text{rms}}| \quad (6.34)$$

A relação entre ΔP e $\Delta\delta$ é quase linear, ou seja:

$$\Delta\delta = \Delta P \cdot kk \quad (6.35)$$

A constante kk é a relação entre a diferença de potência com o ângulo, isso porque, a potência é dada em MW e o ângulo é dado em graus.

Esse ângulo $\Delta\delta$ será somado com o ângulo de V_{sh} . No início da simulação as tensões V_{sh} e V_{barra} estão em fase, com isso, não há fluxo de potência ativa, no decorrer da simulação esse $\Delta\delta$ passa a deslocar V_{sh} de V_{barra} permitindo o fluxo de potência ativa.

$$\delta_{novo} = \delta + \Delta\delta \quad (6.36)$$

$$\dot{V}_{sh_novo} = |\dot{V}_{sh}| \angle \delta_{novo} \quad (6.37)$$

6.3 - Exemplos de Simulações do Compensador em Derivação

6.3.1 - 1º Exemplo

Nos exemplos apresentados a seguir, os valores da tensão e potência foram escolhidos aleatoriamente, podendo ser outros valores.

Neste presente exemplo, o compensador em derivação vai corrigir a tensão V_{barra} para 125,6 V (rms), ou seja, o compensador vai funcionar como um compensador reativo capacitivo e o conversor vai fornecer 20,04 W de potência ativa para o sistema.

A simulação começa com uma fonte de tensão cc, que neste caso é um capacitor de 3500 V, do lado cc do conversor. No começo da simulação, a tensão de referência do conversor é a tensão sem o uso do compensador.

A figura 6.8 apresenta as formas de onda do circuito sem a compensação, ou seja, o compensador não está conectado na barra. No circuito, as impedâncias Z_{total} e Z_{carga} estão em série.

A corrente nesse circuito será chamada de I_{circ} . A tensão do gerador é 138 V (rms), a tensão da barra é 115,2 V (rms, como apresenta a figura 6.8).

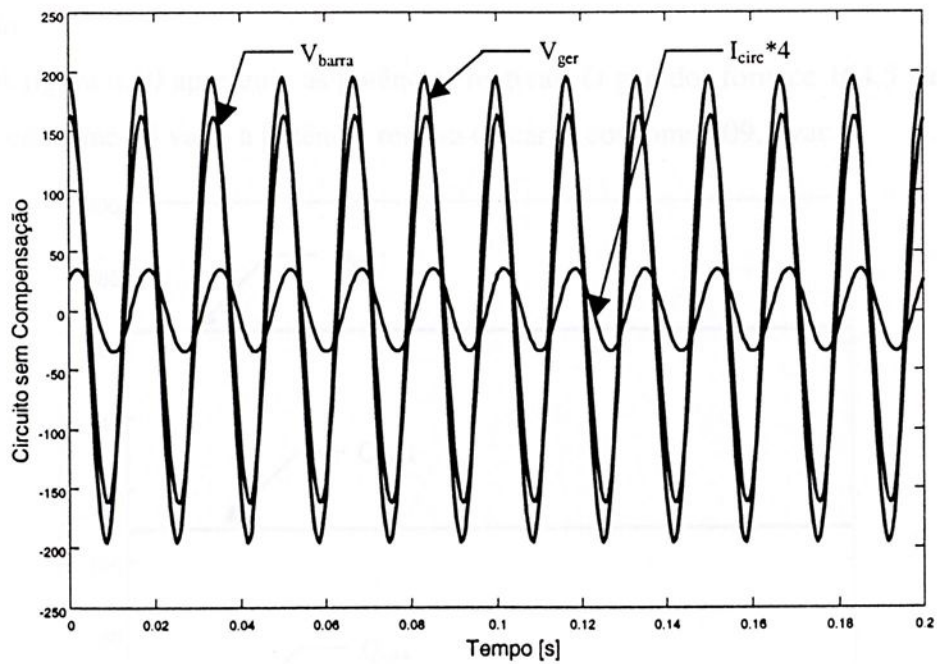


Figura 6.8 - Tensão do gerador e da barra a ser compensada e corrente resultante.

Através desta figura 6.8, pode-se calcular a potência que o gerador está fornecendo para a carga sem o uso do compensador em derivação.

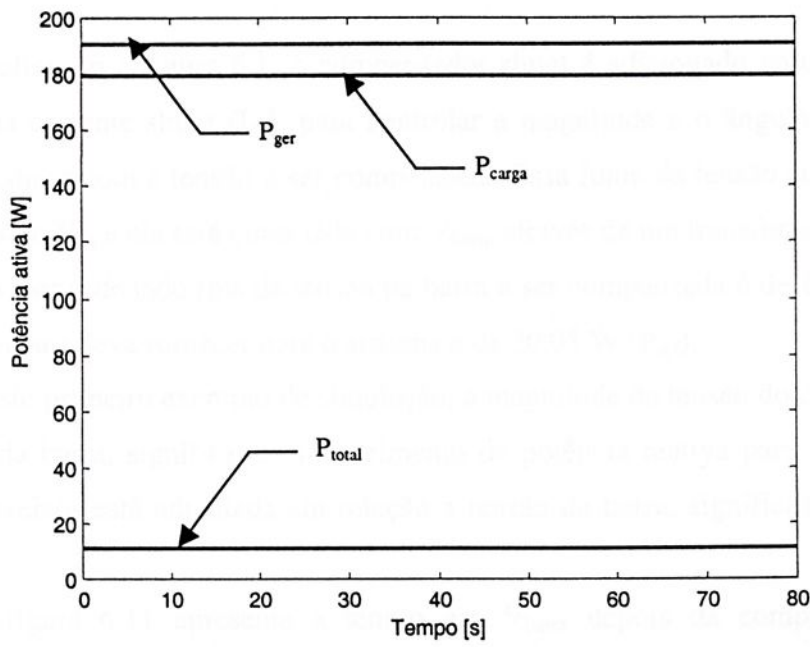


Figura 6.9 - Potência ativa: gerador, carga e total sem compensação.

Analisando a figura 6.9, o gerador fornece 190,7 W e a potência total e de carga dissipadas são 11,1 W e 179,6 W, respectivamente. Neste caso, é para o circuito sem compensação.

A figura 6.10 apresenta as potências reativas. O gerador fornece 164,5 var, a potência reativa total consome 55 var e a potência reativa de carga consome 109,5 var.

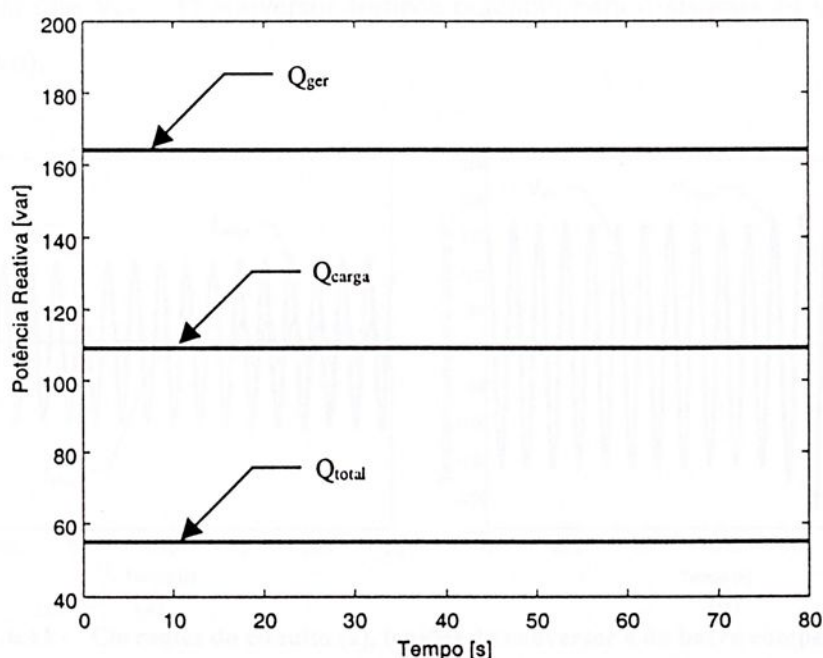


Figura 6.10 - Potência reativa: gerador, carga e total sem compensação.

Analisando a figura 6.1, o compensador shunt é adicionado ao circuito. É realizado um controle da corrente shunt (I_{sh}), para controlar a magnitude e o ângulo da fonte de tensão conectada em shunt com a tensão a ser compensada. Essa fonte de tensão conectada em shunt é identificada como V_{sh} e ela está conectada com V_{barra} através de um transformador de potência.

O valor ordenado rms da tensão na barra a ser compensada é de 125,6 V e a potência em que o conversor deve fornecer para o sistema é de 20,05 W (P_{ref}).

Neste primeiro exemplo de simulação, a magnitude da tensão do conversor é maior do que a tensão da barra, significando fornecimento de potência reativa para a barra e também a tensão do conversor está adiantada em relação a tensão da barra, significando fornecimento de potência ativa.

A figura 6.11 apresenta a tensão em V_{barra} depois da compensação. Durante a simulação, a cada 0,2s o compensador realiza a comparação do valor rms da tensão compensada

com o valor ordenado e a diferença é incrementado na tensão de referência. Nos primeiros 0,2s, a tensão V_{barra} é igual a tensão do conversor, com isso, não há diferença de potencial no ramo shunt. A corrente de circulação nesse ramo shunt será igual a zero, como visto na figura 6.11 a,b.

Após 0,2s, a tensão passa a ser comparada com um valor ordenado, a partir daí, essa tensão começa a aumentar até atingir o valor desejado. Neste caso, a tensão V_{sh} possui uma magnitude maior que V_{barra} . O conversor fornece potência para o sistema ca vindo do capacitor (modo capacitivo).

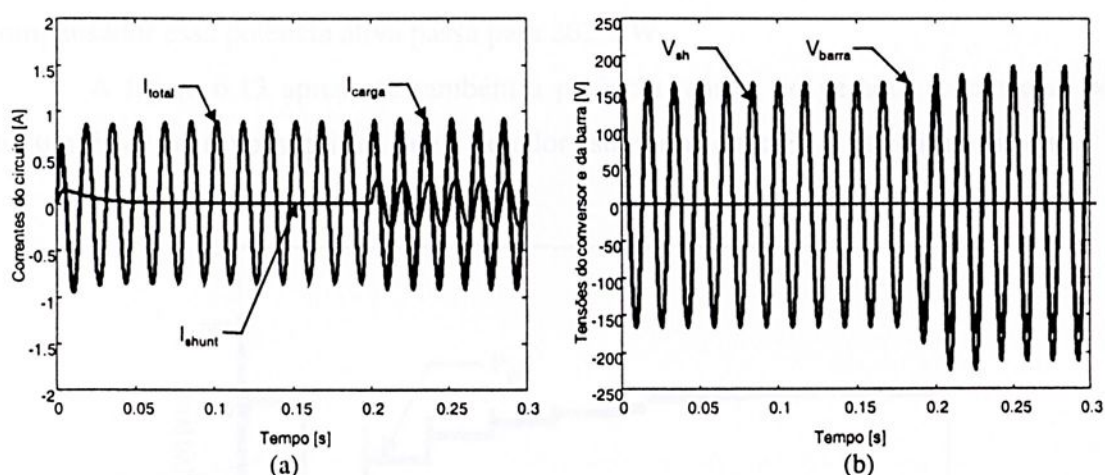


Figura 6.11 - Correntes do circuito (a), tensões do conversor e da barra compensada (b).

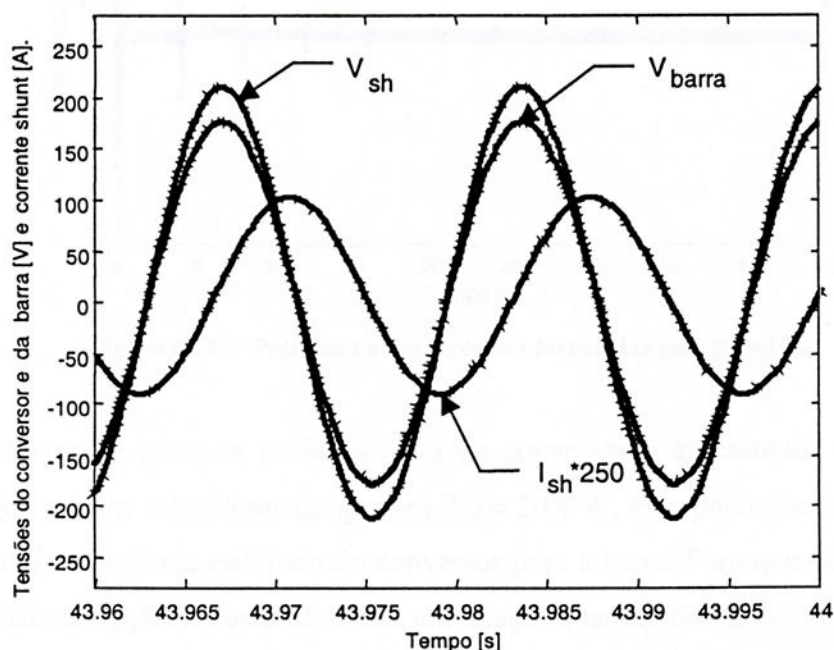


Figura 6.12 - Tensões do conversor e da barra compensada e corrente shunt.

A figura 6.12 apresenta o incremento da tensão de V_{barra} produzido pela diferença de tensão entre a barra e o conversor. Analisando esta figura 6.12, para que a tensão na barra chegasse ao valor desejado de 177,8 de pico a tensão do conversor foi maior em magnitude e adiantada em relação a tensão da barra. A corrente I_{sh} está quase ortogonal a V_{barra} (atrasada) indicando que o sistema está absorvendo a potência reativa fornecida pelo conversor.

A figura 6.13 apresenta a potência ativa que é fornecida pelo gerador. Essa potência será entregue para a carga.

Analisando a figura 6.9 a potência sem o compensador é igual a 190,7 W, com o uso do compensador essa potência ativa passa para 202,2 W.

A figura 6.13 apresenta também a potência reativa do gerador, como essa potência possui um valor positivo, significa que o gerador está fornecendo 81,2 var para o sistema.

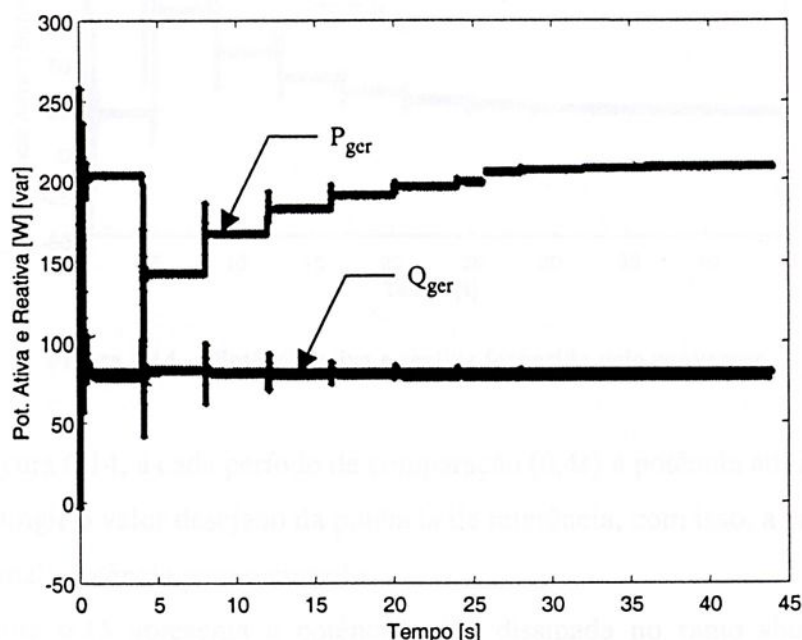


Figura 6.13 - Potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador.

A forma de onda da potência ativa do conversor é apresentada na figura 6.14. A potência chegou até um valor desejado que era $P_{\text{ref}} = 20,4$ W, essa potência, como tem um valor positivo, o fluxo de potência está indo do conversor para a barra. Para que ocorra esse fluxo de potência a tensão do conversor está adiantada em relação a tensão da barra.

A figura apresenta também a potência reativa do conversor. O conversor fornece 106,3 var de potência reativa indutiva, analisando esta figura, a partir do momento em são realizadas as comparações da tensão, esse valor aumenta, dando a entender que o fluxo vai em direção do conversor para o sistema, fornecendo potência reativa (fluxo capacitivo). Para que ocorra esse fluxo de potência, a magnitude da tensão do conversor é maior em relação a barra do sistema.

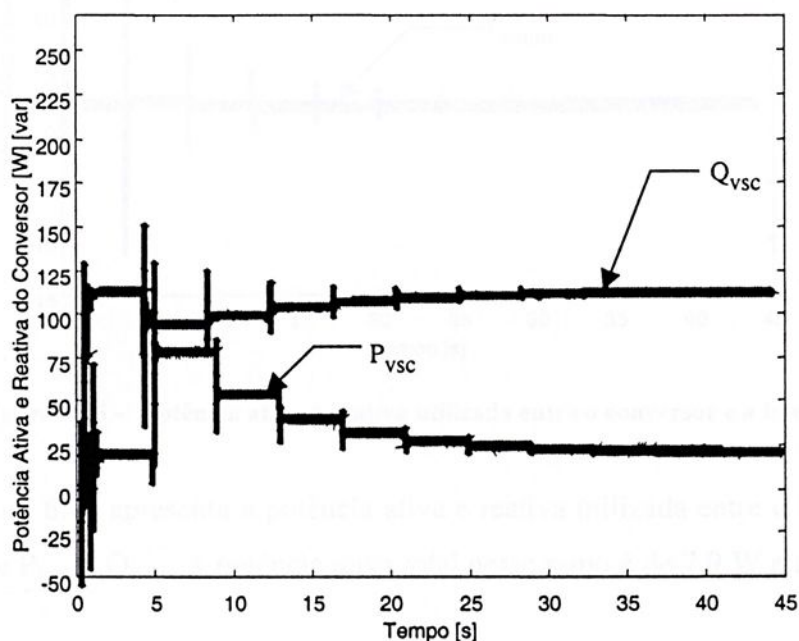


Figura 6.14 - Potência ativa e reativa fornecida pelo conversor.

Na figura 6.14, a cada período de comparação (0,4s) a potência ativa do conversor vai diminuindo até atingir o valor desejado da potência de referência, com isso, a cada 0,4s o gerador passa a fornecer mais potência para o circuito.

A figura 6.15 apresenta a potência ativa dissipada no ramo shunt. Essa potência dissipada será de 1,69 W. Nessa figura o indutor do ramo shunt absorve 17,1 var de potência reativa.

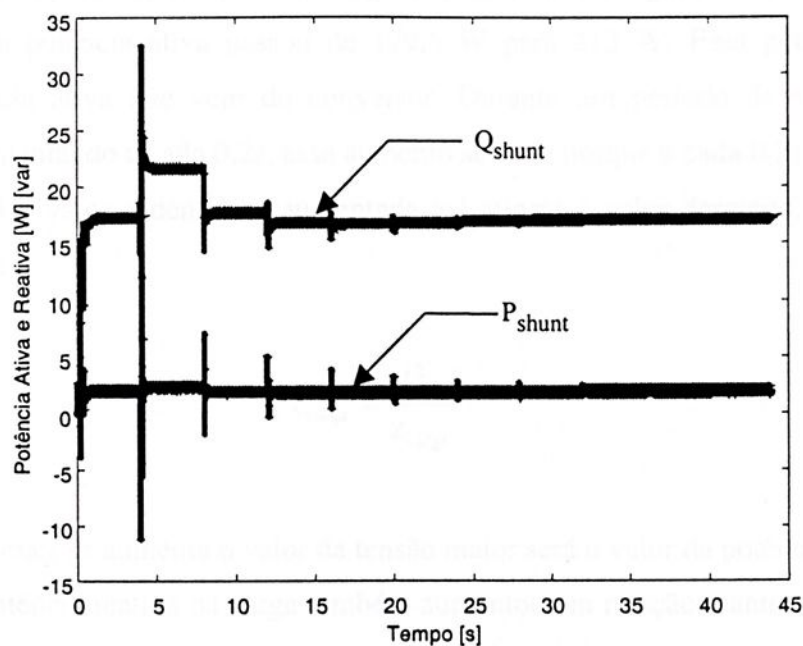


Figura 6.15 - Potência ativa e reativa utilizada entre o conversor e a barra.

A figura 6.16 apresenta a potência ativa e reativa utilizada entre o barra e o gerador, que é chamada de P_{total} e Q_{total} . A potência ativa total nesse ramo é de 7,9 W e a reativa total é de 41,4 var.

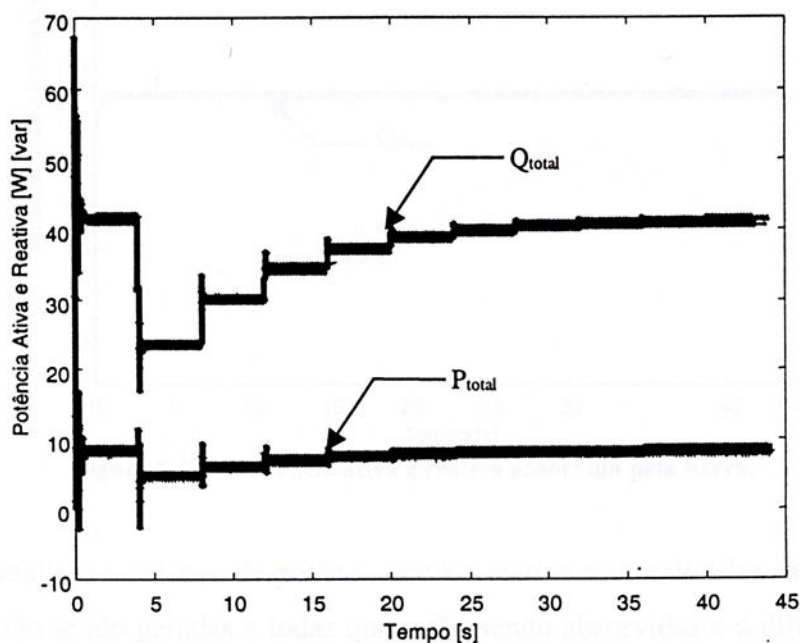


Figura 6.16 - Potência: ativa e reativa utilizada entre o gerador a barra.

A potência ativa dissipada na carga é apresentada na figura 6.17, comparando-se com a figura 6.10, a potência ativa passou de 179,6 W para 213 W. Essa potência vai passar a “aceitar” potência ativa que vem do conversor. Durante um período de simulação de 4s, a potência vai aumentando a cada 0,2s, esse aumento se deve porque a cada 0,2s a tensão na barra é comparada com o valor ordenado e aumentada até atingir o valor desejado, com isso, como a potência ativa é:

$$P_{\text{carga}} = \frac{V_{\text{barra}}^2}{Z_{\text{carga}}} \quad (6.38)$$

ou seja, quanto mais se aumenta o valor da tensão maior será o valor da potência da carga.

A potência reativa da carga também aumentou em relação a anterior sem o conversor passou de 55 var para 129,28 var, como apresenta a figura 6.17.

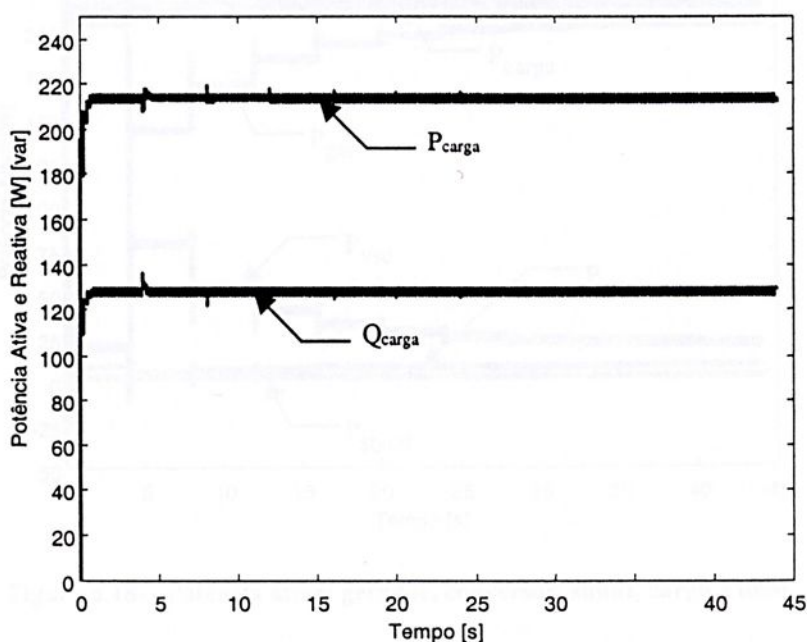


Figura 6.17 - Potência ativa e reativa absorvida pela barra.

Para realizar o balanço de potência ativa e reativa são realizadas as somas de todas as potências que estão sendo geradas e todas que estão sendo absorvidas e a diferença dessas duas somas tem que ser zero.

Para realizar este cálculo, serão analisados os sinais de P e Q que estão sendo gerados. Caso o valor de P seja positivo, isso quer dizer que P está gerando (fornecendo). Caso seja negativo, P está dissipando (absorvendo) potência do sistema.

Quando o valor de Q é positivo, significa que Q está gerando potência reativa capacitiva, e quando é negativo, significa que Q está absorvendo potência reativa indutiva do sistema.

$$P_{cg} + P_{vsc} = P_{shunt} + P_{carga} + P_{total} \quad \Rightarrow \quad 202,2 + 20,4 = 1,69 + 7,9 + 213$$

$$Q_{cg} + Q_{vsc} = Q_{shunt} + Q_{carga} + Q_{total} \quad \Rightarrow \quad 81,2 + 106,5 = 17,1 + 41,4 + 129,2$$

A figura 6.18 apresenta todas as potências ativa do circuito em questão e na figura 6.19, mostra as potências reativa.

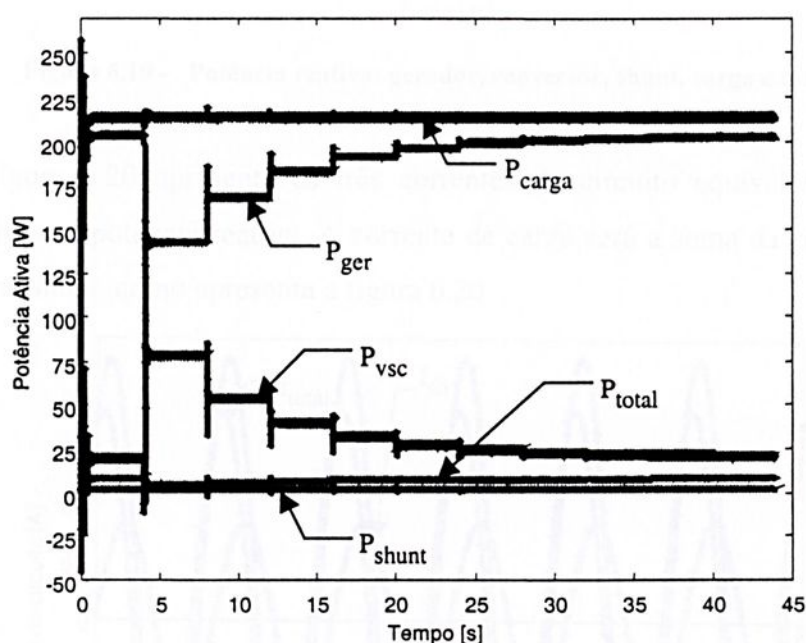


Figura 6.18- Potência ativa: gerador, conversor, shunt, carga e total.

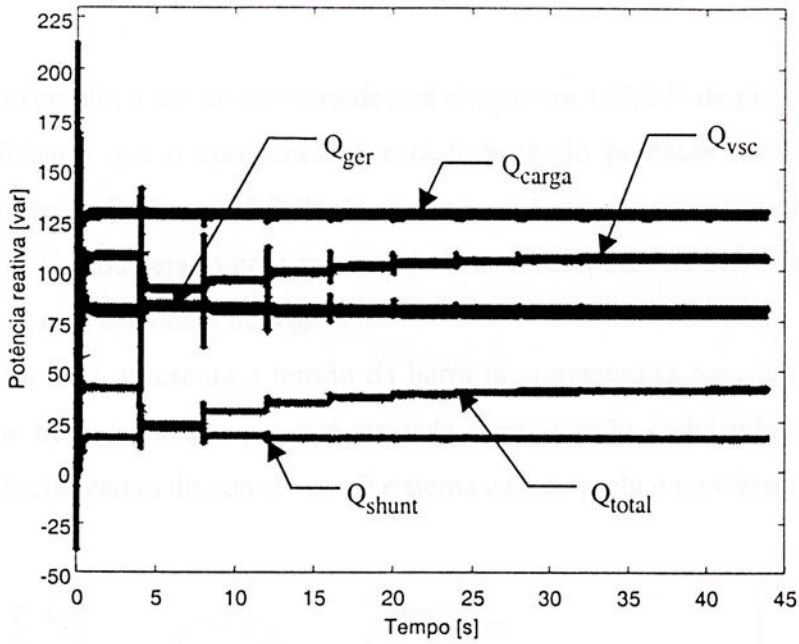


Figura 6.19 - Potência reativa: gerador, conversor, shunt, carga e total.

A figura 6.20 apresenta as três correntes do circuito equivalente. Neste caso, o compensador fornece potência reativa. A corrente de carga será a soma da corrente total com a corrente do ramo shunt, como apresenta a figura 6.20.

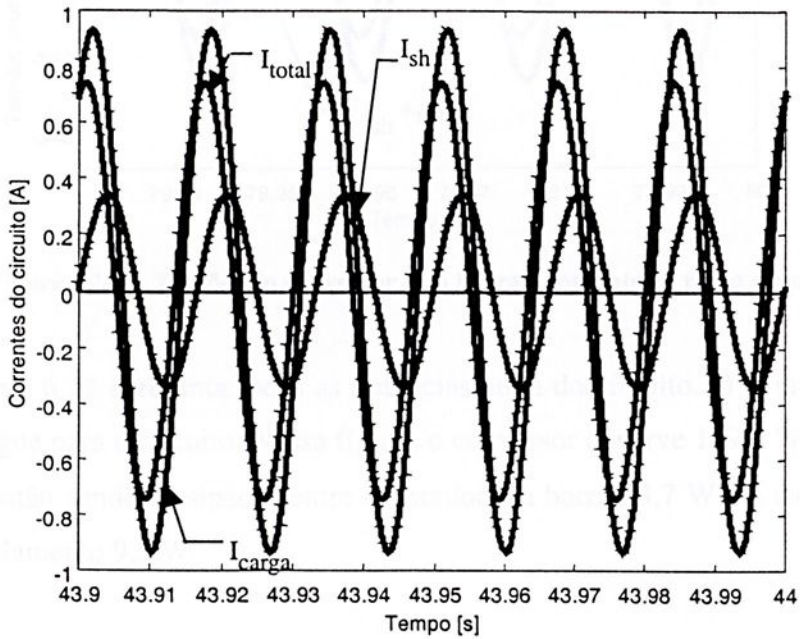


Figura 6.20 - Correntes: shunt, carga e total.

6.3.2 - 2º Exemplo

Neste exemplo, a tensão na barra deverá chegar em 177,6 V de pico, como apresenta a figura 6.8, significando que o compensador está fornecendo potência reativa. A potência de referência deverá ser de $P_{ref} = -125,2 \text{ W}$. Neste caso, o fluxo de potência ativa está saindo de V_{barra} em direção a V_{sh} , ou seja, o conversor está absorvendo potência ativa do sistema ca, com isso, a fase de V_{barra} está adiantada de V_{sh} .

A figura 6.21 apresenta a tensão da barra já compensada para um valor ordenado e também a corrente do ramo shunt que está atrasada a esta tensão, indicando que o sistema está absorvendo a potência reativa do conversor. O sistema ca interpreta o conversor como capacitivo.

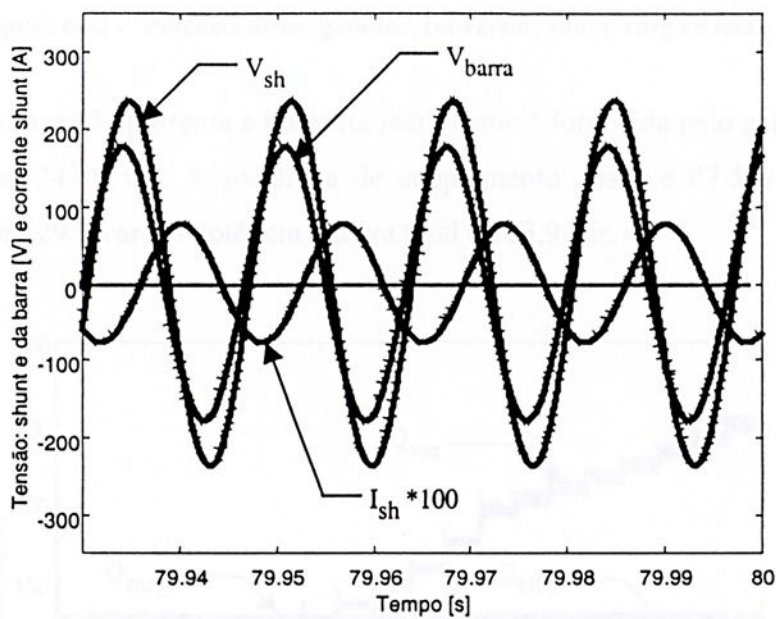


Figura 6.21 - Tensões do conversor e da barra e corrente do ramo shunt.

A figura 6.22 apresenta todas as potências ativa do circuito. O gerador fornece 365,5 W que será entregue para o circuito. Nessa figura, o conversor absorve 119,8 W de potência ativa do sistema ca e estão sendo dissipadas entre o gerador e a barra 23,7 W, na carga 212,7 W e na reatância de acoplamento 9,5 W.

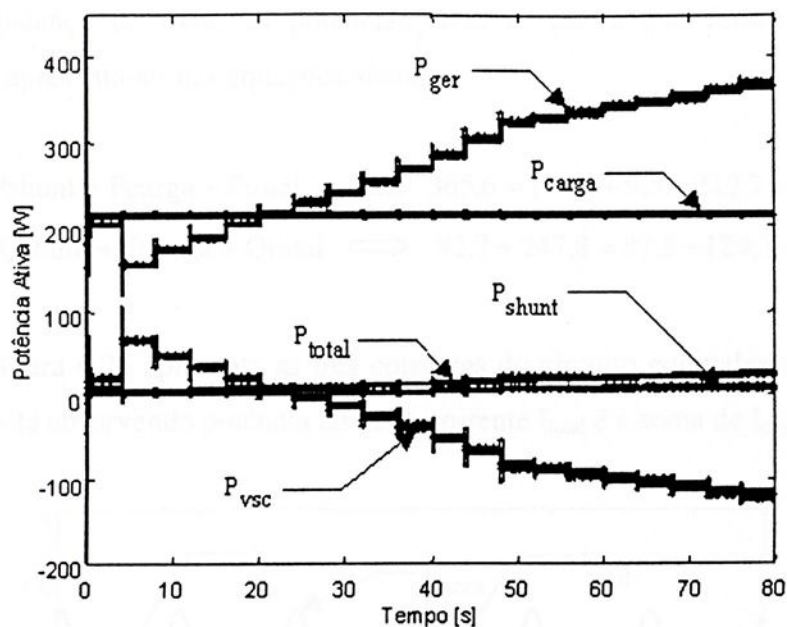


Figura 6.22 - Potência ativa: gerador, conversor, shunt, carga e total.

A figura 6.23 apresenta a potência reativa que é fornecida pelo gerador, 92,7 var e pelo conversor, 247,8 var. A reatância de acoplamento absorve 87,5 var, a potência reativa da carga é 129,3 var e a potência reativa total é 123,9 var.

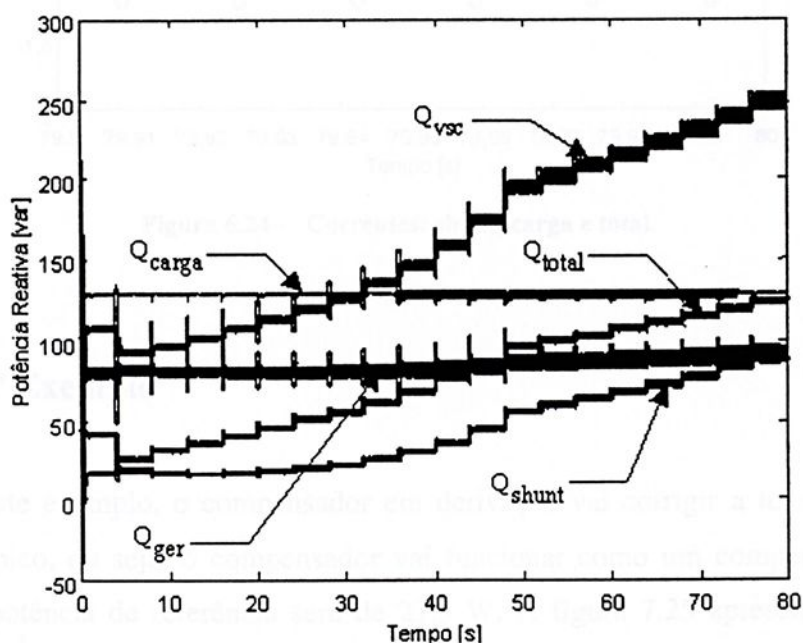


Figura 6.23 - Potência reativa: gerador, conversor, shunt, carga e total.

O balanço de todas as potências ativa e reativa que foram fornecidas ou absorvidas são apresentadas nas equações abaixo:

$$P_{cg} = P_{vsc} + P_{shunt} + P_{carga} + P_{total} \quad \Rightarrow \quad 365,6 = 119,8 + 9,5 + 212,7 + 23,7$$

$$Q_{cg} + Q_{vsc} = Q_{shunt} + Q_{carga} + Q_{total} \quad \Rightarrow \quad 92,7 + 247,8 = 87,5 + 129,3 + 123,9$$

A figura 6.24 apresenta as três correntes do circuito equivalente. Neste caso o compensador está absorvendo potência ativa. A corrente I_{total} é a soma de I_{carga} com I_{sh} .

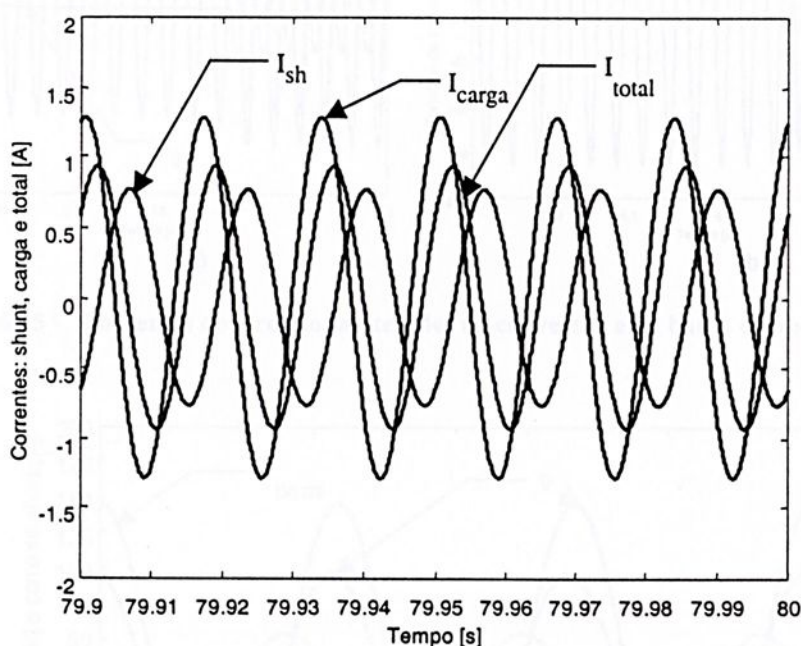


Figura 6.24 - Correntes: shunt, carga e total.

6.3.3 - 3º Exemplo

Neste exemplo, o compensador em derivação vai corrigir a tensão V_{barra} para 143,93 V de pico, ou seja, o compensador vai funcionar como um compensador reativo indutivo e a potência de referência será de 27,5 W. A figura 7.25 apresenta o início da simulação. No tempo $t=0s$ até $t=0,2s$, a tensão do conversor é igual a tensão de V_{barra} , com isso, não vai haver diferença de potencial entre o conversor e a barra (corrente $I_{sh} = 0$).

Logo após $t = 0,2s$, realiza-se a primeira comparação das tensões e V_{barra} começa a diminuir até atingir o valor desejado, como apresenta a figura 6.26. O conversor estará fornecendo potência ativa para a barra. A tensão do conversor é menor em magnitude em relação a V_{barra} e a corrente I_{sh} está quase ortogonal à V_{barra} (adiantada) indicando que o conversor está absorvendo a potência reativa fornecida pelo sistema, como apresenta a figura 6.26.

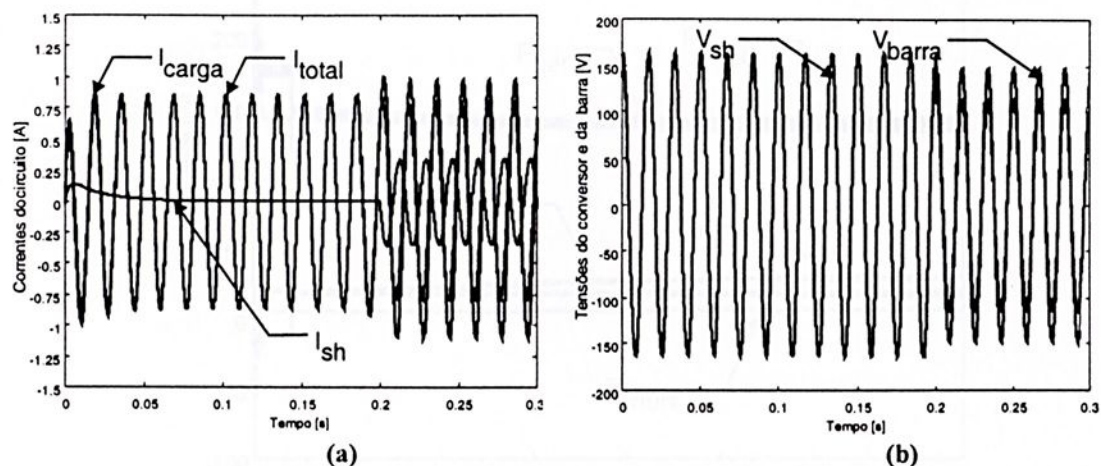


Figura 6.25 - Correntes do circuito (a), tensões do conversor e da barra compensada (b).

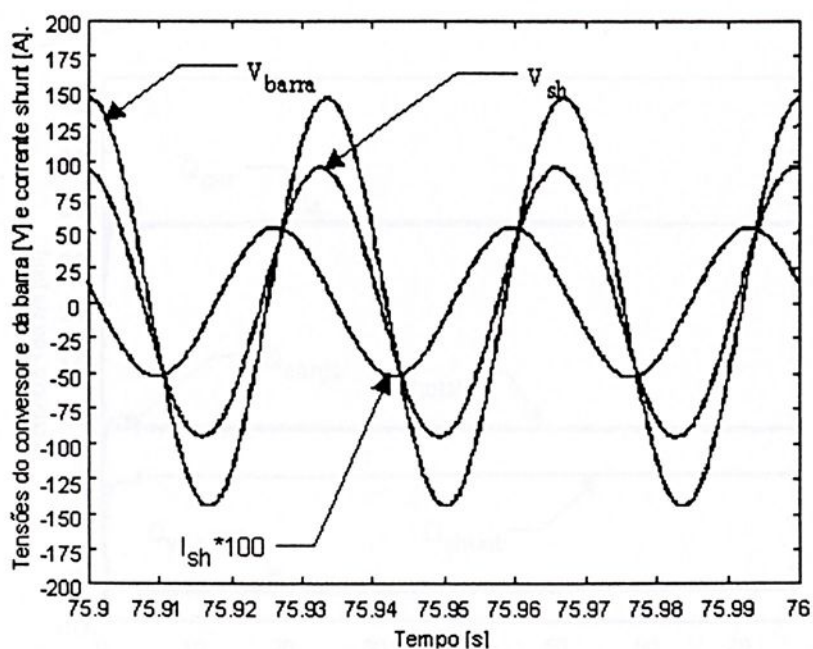


Figura 6.26 - Tensões do conversor e da barra e corrente do ramo shunt.

A figura 6.27 apresenta a potência ativa fornecida pelo gerador, 133,09 W e pelo conversor, 27,5 W que será entregue para o circuito. Nessa figura, estão sendo dissipadas entre o gerador e a barra 16,0 W, na carga 140,1 W e na resistência de acoplamento 4,5 W.

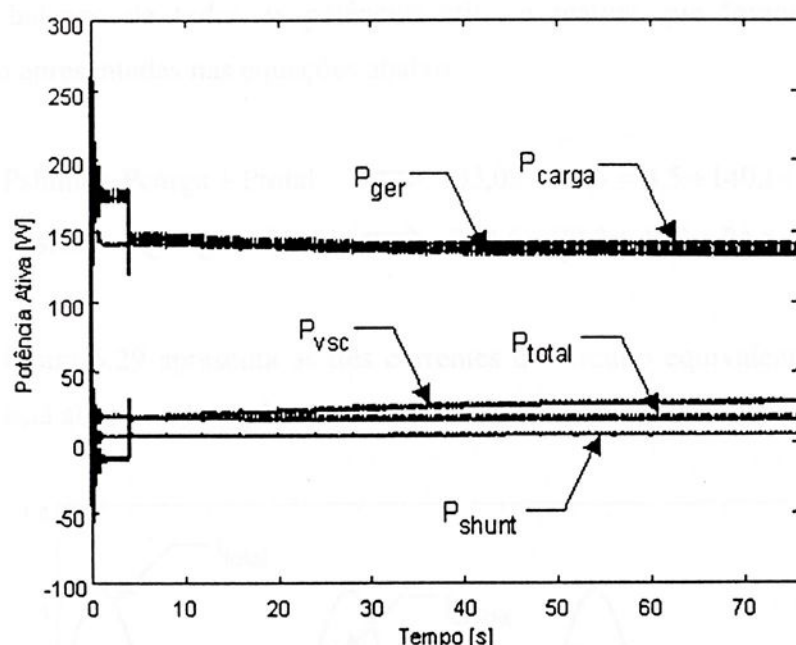


Figura 6.27 - Potência ativa: gerador, conversor, shunt, carga e total.

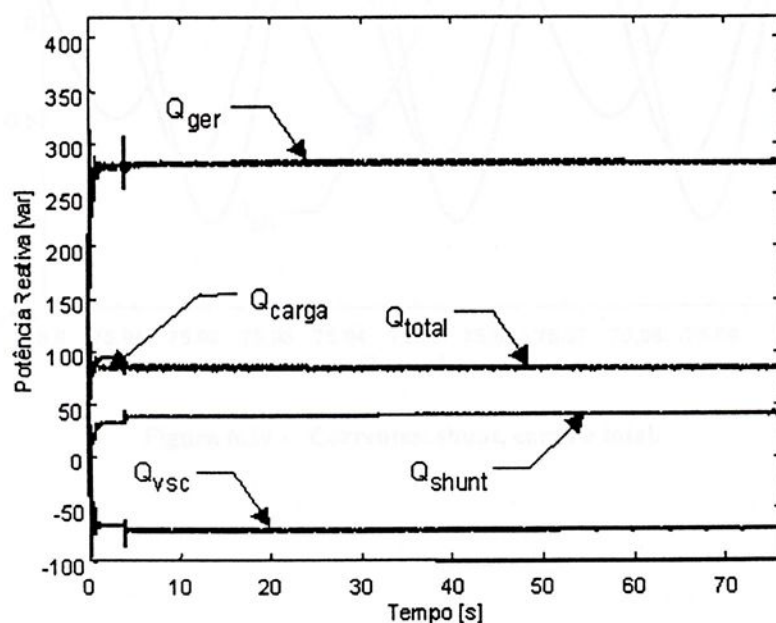


Figura 6.28 - Potência reativa: gerador, conversor, shunt, carga e total.

A figura 6.28 apresenta a potência reativa que o gerador fornece, 279,6 var e o conversor absorve 70,3 var. Estão sendo absorvidas 41,2 var na reatância de acoplamento, 84,5 var de potência reativa da carga e 83,5 var de potência reativa total.

O balanço de todas as potências ativa e reativa que foram fornecidas ou absorvidas são apresentadas nas equações abaixo:

$$P_{cg} + P_{vsc} = P_{shunt} + P_{carga} + P_{total} \quad \Rightarrow \quad 133,09 + 27,5 = 4,5 + 140,1 + 16,0$$

$$Q_{cg} = Q_{vsc} + Q_{shunt} + Q_{carga} + Q_{total} \quad \Rightarrow \quad 279,6 = 70,3 + 41,2 + 84,5 + 83,5$$

A figura 6.29 apresenta as três correntes do circuito equivalente. Neste caso o compensador está absorvendo potência ativa. A corrente I_{total} é a soma de I_{carga} com I_{sh} .

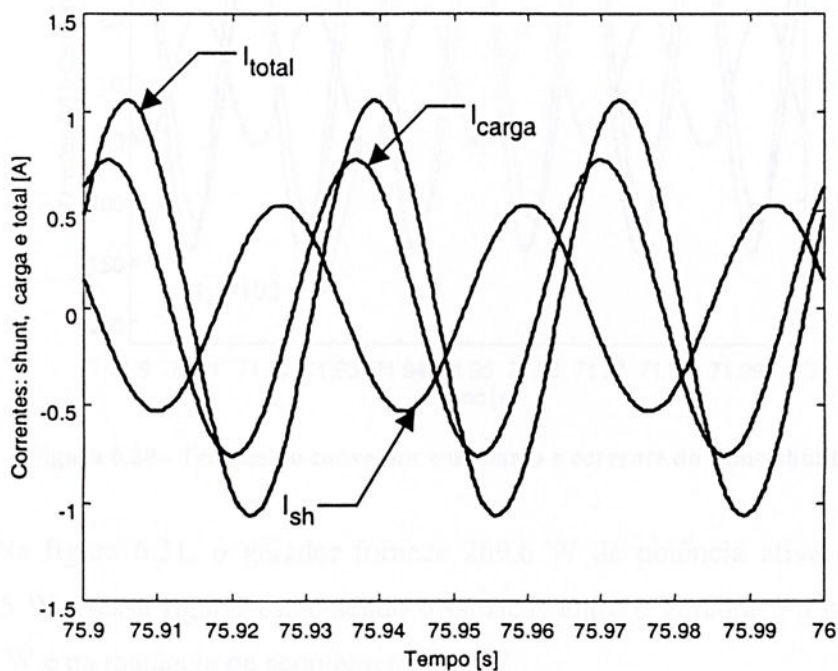


Figura 6.29 - Correntes: shunt, carga e total.

6.3.4 - 4º Exemplo

Neste exemplo, o compensador em derivação vai corrigir a tensão V_{barra} para 143,3 V de pico, ou seja, o compensador vai funcionar como um compensador reativo indutivo. A potência de referência do conversor será de -100 W, ou seja, o conversor absorve potência ativa e reativa do sistema ca. A tensão do conversor é menor em magnitude em relação à V_{barra} e a corrente I_{sh} está quase ortogonal à V_{barra} (adiantada) indicando que o conversor está absorvendo a potência reativa fornecida pelo sistema, como mostra a figura 6.30.

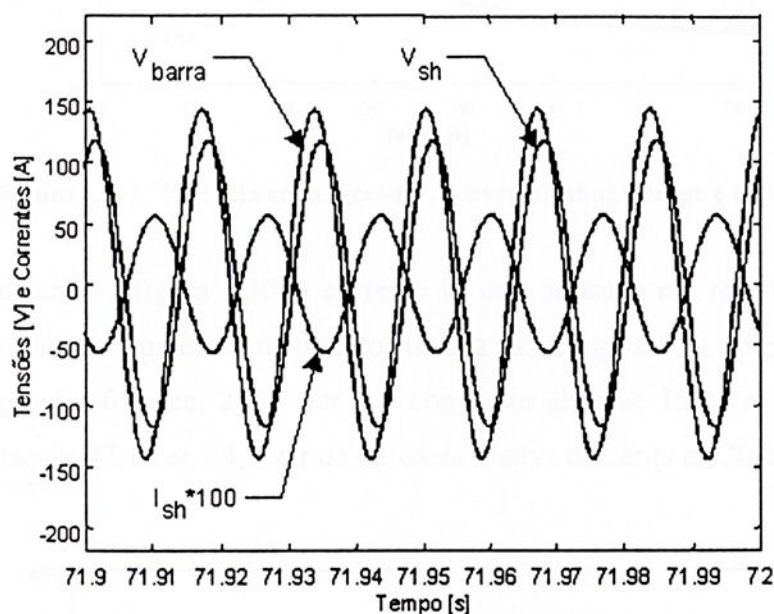


Figura 6.30 - Tensões do conversor e da barra e corrente do ramo shunt.

Na figura 6.31, o gerador fornece 269,6 W de potência ativa e o conversor absorve 99,5 W. Nessa figura, estão sendo dissipadas entre o gerador e a barra 25 W, na carga 139,8 W e na reatância de acoplamento 5,4 W.

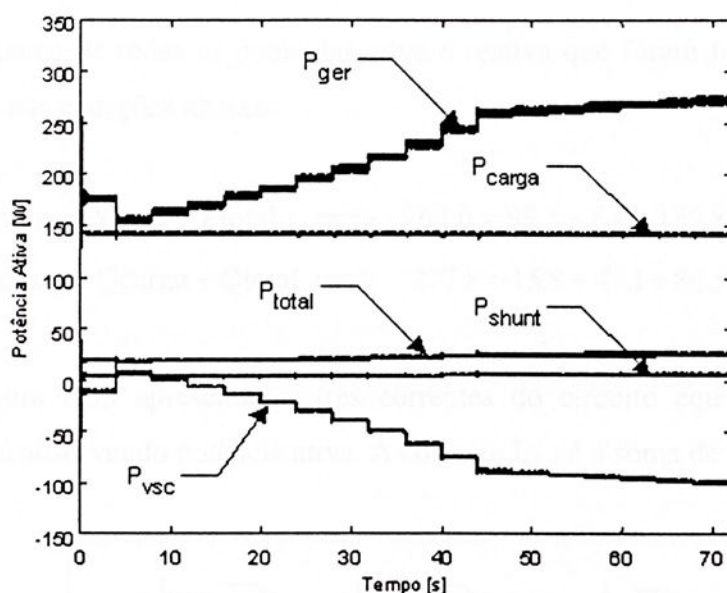


Figura 6.31 - Potência ativa: gerador, conversor, shunt, carga e total.

Analisando a figura 6.30, a corrente I_{sh} está atrasada em relação a V_{barra} , com isso, o conversor absorve potência reativa do sistema ca. A figura 6.31 apresenta a potência reativa que o gerador fornece, 277,8 var e o conversor absorve 15,8 var. A reatância de acoplamento absorve 47,1 var, 84,5 var de potência reativa da carga e 130,6 var de potência reativa total.

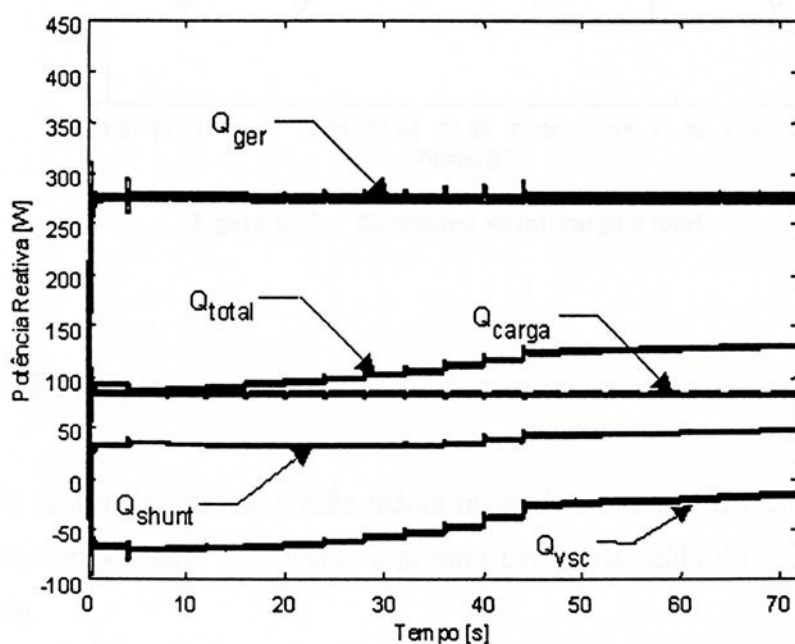


Figura 6.32 - Potência reativa: gerador, conversor, shunt, carga e total.

O balanço de todas as potências ativa e reativa que foram fornecidas ou absorvidas são apresentadas nas equações abaixo:

$P_{cg} = P_{vsc} + P_{shunt} + P_{carga} + P_{total} \implies 269,6 = 99,5 + 5,4 + 139,8 + 25,1$

$Q_{cg} = Q_{vsc} + Q_{shunt} + Q_{carga} + Q_{total} \implies 277,8 = 15,8 + 47,1 + 84,5 + 130,6$

A figura 6.33 apresenta as três correntes do circuito equivalente. Neste caso, o compensador está absorvendo potência ativa. A corrente I_{total} é a soma de I_{carga} com I_{sh} .

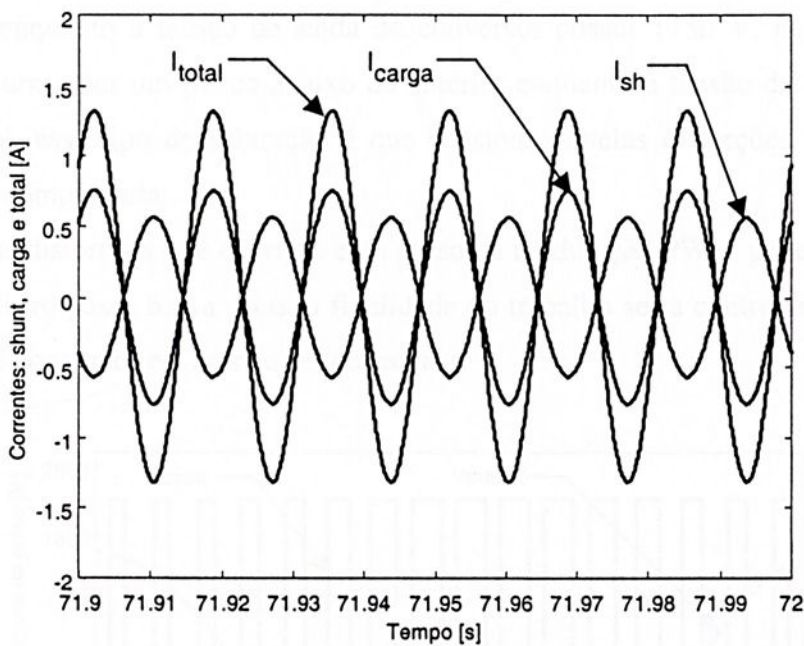


Figura 6.33 - Correntes: shunt, carga e total.

6.3.5 - 5º Exemplo

Não será mais usada a tensão média instantânea do PWM (senoidal) para calcular o valor da tensão compensada. Será usada a própria tensão de saída do conversor modulada em largura de pulso.

Neste exemplo, será basicamente igual ao primeiro, ou seja, a tensão compensada deverá atingir um valor de 177,62 V. A figura 6.5 apresenta a tensão de saída do conversor. Durante os períodos de incremento de tensão, mais largo vai ficando os pulsos de PWM.

A figura 6.35 apresenta as correntes resultantes do circuito. As correntes não são mais senoidais, possuindo distorções nas suas formas de onda, a explicação para isso é que o programa realiza a subtração entre a tensão do gerador que é senoidal com a tensão de saída do conversor que é quadrada. Durante essa subtração, o programa possui um vetor que constitui a tensão do gerador e um vetor que constitui a tensão do conversor, como apresentado na figura 7.34. Analisando um ciclo de simulação na primeira coluna temos que a tensão do gerador possui um valor máximo enquanto a tensão de saída do conversor possui 1750 V, na segunda coluna o gerador possui um valor um pouco abaixo do anterior enquanto a tensão de saída do conversor possui -1750 V, esse tipo de subtração é que ocasiona aquelas distorções nas correntes e da tensão na barra compensada.

Essas distorções que ocorrem com o uso da modulação PWM poderiam ser corrigidas através de um filtro passa baixa. Mas, a finalidade do trabalho seria controlar apenas o fluxo de potência entre o conversor e a barra a ser conectada.

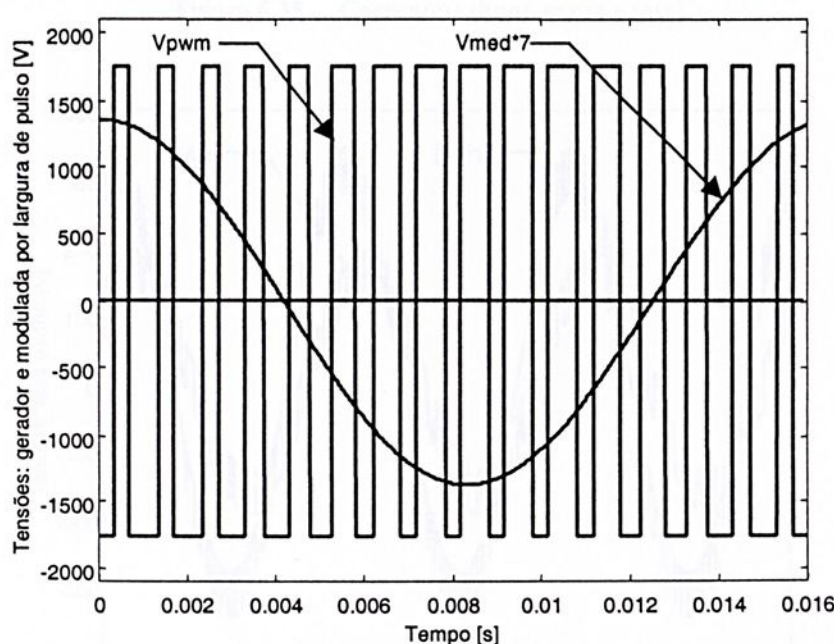


Figura 6.34 - Tensão do gerador e tensão de saída do conversor.

A figura 6.35 apresenta as formas de onda das correntes. A soma de I_{sh} com I_{total} da a I_{carga} .

A corrente I_{sh} está atrasada em relação as outras correntes indicando que o sistema está absorvendo potência reativa fornecida pelo conversor.

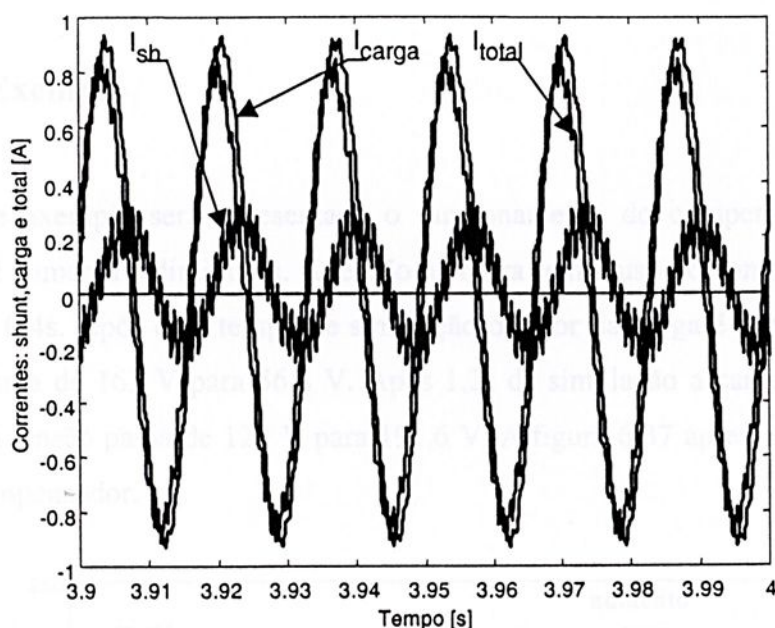


Figura 6.35 - Correntes: shunt, carga e total.

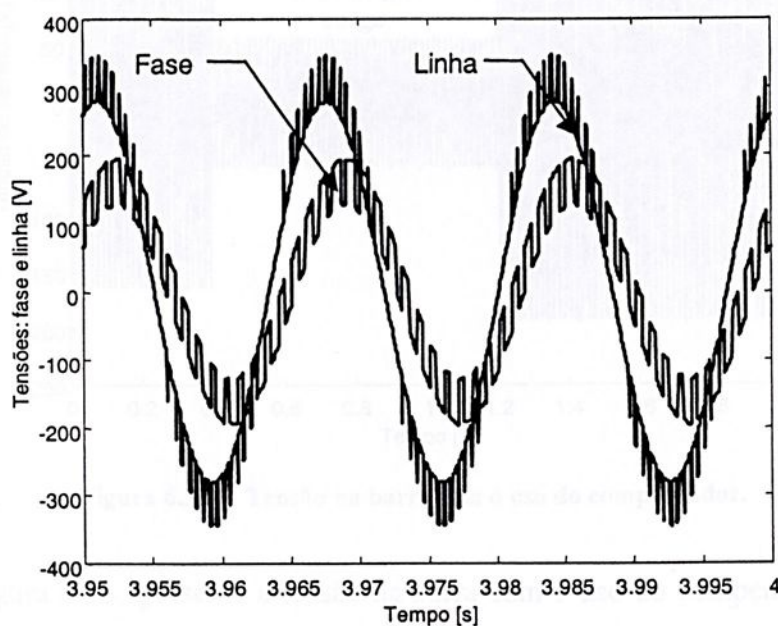


Figura 6.36 - Tensão na barra compensada e tensão de linha.

Calculando o valor rms da tensão compensada, 125,2 V e comparando com o valor ordenado, 125,6 V, a tensão chegou ao seu valor ordenado dentro do limite de tolerância, como pode ser visto na figura 6.36, nessa figura apresenta também o valor da tensão de linha entre a fase a e a fase b.

6.3.6 - 6º Exemplo

Neste exemplo será apresentado o funcionamento do compensador em derivação quando a carga é aumentada e diminuída. A tensão na barra sem o uso do compensador é de 163 V de pico, durante 0,4s. Após esse tempo de simulação o valor da carga é dividido por dois, com isso, a tensão passa de 163 V para 56,8 V. Após 1,2s de simulação a carga é multiplicada por dois, com isso, a tensão passa de 120 V para 191,6 V. A figura 6.37 apresenta a tensão na barra sem o uso do compensador.

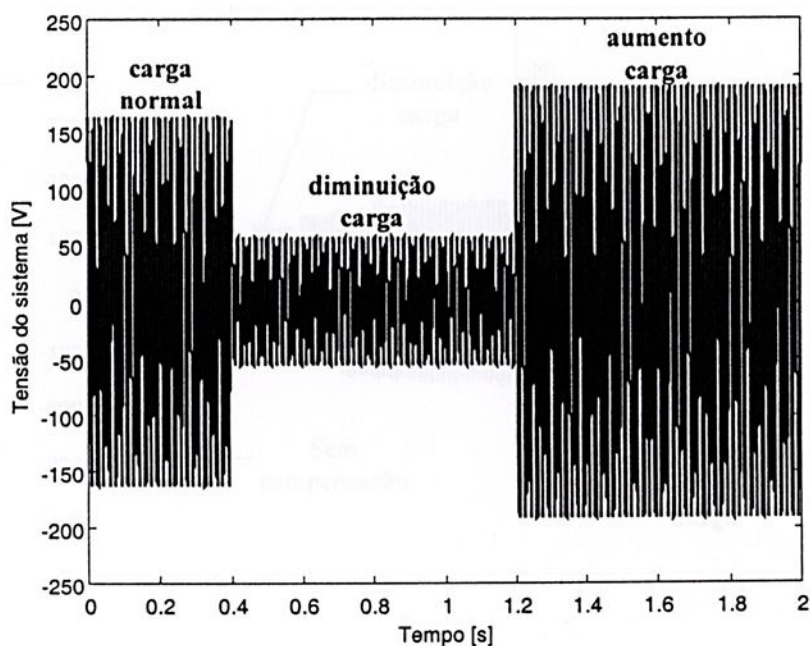


Figura 6.37 - Tensão na barra sem o uso do compensador.

A figura 6.38 apresenta a tensão na barra com o uso do compensador em derivação. No começo da simulação, $t=0s$, a tensão na barra está com o valor desejado, com isso, a tensão de

saída do conversor é igual a tensão do sistema. A corrente da reatância de acoplamento é igual a zero.

Após 0,4s a carga é dividida por dois. A tensão no sistema passa de 163 V para 73,2V. Neste caso, a magnitude do conversor é maior em relação a magnitude do sistema. O compensador passa a fornecer potência reativa para o sistema. A magnitude da tensão V_{barra} começa a aumentar até atingir o valor inicial desejado. A corrente da reatância está atrasada em relação as outras correntes indicando que o sistema está absorvendo potência reativa do conversor.

Após 1,2s, a carga é multiplicada por dois. A tensão no sistema passa de 163 V para 404,3 V. Neste caso, a magnitude do conversor é menor em relação a magnitude do sistema. O compensador passa a absorver potência reativa do sistema. A magnitude da tensão V_{barra} começa a diminuir até atingir o valor inicial da simulação. A corrente da reatância está adiantada em relação as outras correntes indicando que o conversor está absorvendo a potência reativa do sistema.

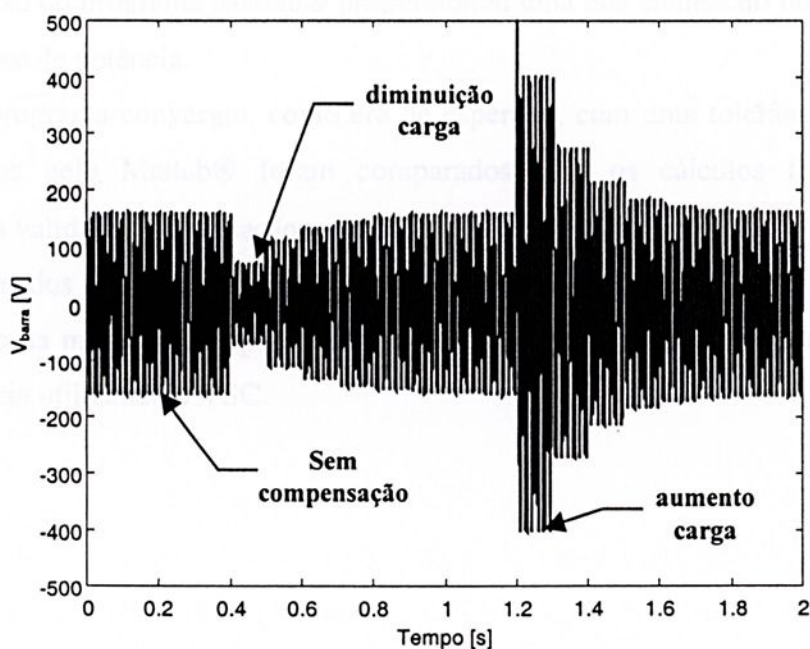


Figura 6.38 - Tensão na barra com o uso do compensador.

6.4 - Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as simulações do controle do fluxo de potência utilizando o VSC. Foi apresentada a modulação vetorial espacial, SVM, como forma de se controlar a tensão trifásica de saída do VSC, em magnitude e ângulo, para que se promova o controle da tensão na barra de acoplamento e o fluxo de potência ativa entre o controlador e o sistema ca.

A grande dificuldade encontrada foi calcular o valor da tensão na barra, uma vez que foi usada a “Lei de Kircchoff” para calcular a matriz de estado sem usar esta tensão.

Foram realizados 6 exemplos, analisando em diferentes simulações, a grande dificuldade em convergir o programa foi no uso do controlador integrativo cuja função era dar um salto no valor de ΔV quando este se estabilizava. Os valores nominais de tensões, potências e correntes do sistema são apenas ilustrativos, não representando, necessariamente, valores reais. No entanto, tais valores nominais não invalidam a análise do controlador.

O uso do programa Matlab® proporcionou uma boa análise no domínio do tempo no controle do fluxo de potência.

O programa convergiu, como era de esperado, com uma tolerância especificada. Os valores gerados pelo Matlab® foram comparados com os cálculos feitos manualmente, comprovando a validade da simulação.

Baseados nos resultados ilustrativos das formas de onda da tensão, corrente e potência, o uso da modulação espacial senoidal provou ser uma boa alternativa no controle do fluxo de potência utilizando o VSC.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

7.1 - Conclusão

Neste trabalho, foi realizado o estudo do controle do fluxo de potência ativa utilizando conversores como fonte de tensão. O VSC permite a inserção, em uma barra de compensação, de tensão controlada em magnitude e ângulo, atuando como um gerador síncrono.

As principais dificuldades encontradas para a realização desta pesquisa são relacionadas com a simulação dinâmica do sistema. O uso do software Matlab® para as simulações demonstrou deficiências, uma vez que o tempo de convergência do programa se tornou alto devido ao número de iterações necessárias para a solução das equações de modulação PWM. O elevado número de iterações deve-se basicamente a frequência de chaveamento. É necessário que o passo de integração seja pequeno para tornar a modulação

PWM mais precisa. Caso o passo fosse aumentado, a forma de onda de PWM tornar-se-ia triangular, não sendo possível fazer a modulação PWM.

A característica indutiva do modelo resultou em fortes oscilações quando o controle é operado, aumentando o tempo para que o sistema atingisse o regime permanente.

Para um intervalo de análise do sistema longo (por volta de 2400 ciclos) e utilizando um passo de integração pequeno ($5e-5$), o programa levava aproximadamente 30 horas para atingir o resultado esperado.

O controle da tensão na barra controlada foi alcançado focalizando os três diferentes parâmetros que influenciam na característica de transferência de potência: magnitude de tensão, impedância série, fator de potência. A influência destes três parâmetros na transferência de potência foi detalhado no Capítulo 1. Foram mostrados exemplos do funcionamento dos controladores FACTS, onde foi considerada sua conexão em um sistema de corrente alternada composto por uma máquina ideal ligada a uma carga através de uma linha de transmissão curta e sem perdas.

No Capítulo 2 foi estudado limites para a transferência de potência devido a impedância de transferência, fator de potência e magnitude de tensão. A influência da impedância de transferência foi analisada mantendo-se a tensão de envio e de recepção, bem como o fator de potência de transferência inalterados e foram apresentados três valores de impedância z_{th} verificando que, quanto maior a impedância de transferência maior a redução da magnitude da tensão na barra.

A influência do fator de potência foi analisado mantendo-se a tensão e a impedância de transferência inalterados para três cargas com fator de potência distintos. Neste exemplo, foi observado que o aumento da potência transferida não resulta necessariamente em uma redução da magnitude da tensão na barra. Este efeito dependerá das características da carga.

A influência da magnitude da tensão é analisado mantendo-se a impedância e o fator de potência inalterados e com dois valores diferentes de tensão. Com isso, a influência da magnitude de V_L permite o controle remoto da tensão V_R .

No Capítulo 3 foram apresentadas duas das fontes renováveis mais comuns aos sistemas de geração atuais: as eólicas e as fotovoltaicas.



Por se tratarem de fontes de potência assíncronas, é necessário o uso de controladores para que essas fontes alternativas possam ser acopladas ao sistema elétrico de potência. Essas fontes normalmente fornecem energia na forma contínua. Essa tensão cc deve ser convertida na forma alternada, geralmente trifásica, através de um conversor estático.

No Capítulo 4 foi demonstrado que o controle das potências ativa e reativa pode ser alcançado através da inserção de uma fonte de tensão controlada, conectada em derivação com o sistema ca, que pode ser um gerador síncrono ou um gerador estático, implementado através de um conversor atuando como fonte de tensão (VSC). A compensação é realizada através da diferença de potencial entre a tensão do conversor como fonte de tensão e a tensão da barra de acoplamento do sistema ca, e não através de elementos passivos (capacitores e indutores) ou geradores síncronos, como no caso das compensações tradicionais.

Para que houvesse troca de potência ativa entre o conversor e o sistema ca é requerido uma fonte ou armazenador de energia do lado cc, que pode ser uma fonte alternativa ou um capacitor.

Foi estudado o controle da potência ativa através do uso do conversor como fonte de tensão (VSC). Este conversor é baseado em semicondutores chaveados, em estados ligado (“on”) ou desligado (“off”), por um sinal de controle. O objetivo deste conversor é transferir energia do elo cc para o sistema trifásico (ou vice-versa), controlando a potência ativa, e controlando a potência reativa através do controle da componente da corrente de compensação ortogonais a tensão do barramento de acoplamento do sistema ca, através de diferença de tensão.

No capítulo 5 foi apresentada a modulação por vetores espaciais (SVM). Através do controle da sequência de chaveamento, o VSC foi capaz de converter a tensão que está do lado cc do conversor em uma tensão ca senoidal trifásica e equilibrada, controlada em magnitude e ângulo.

A vantagem de se usar o SVM é que os períodos “on” e “off” do chaveamento, são baseados na posição instantânea do vetor espacial, que pode ser obtida através de um sinal do sistema a ser usado como referência, que pode ser um sinal de tensão ou de corrente.

A vantagem do uso da SVM é que esta modulação dispensa sinais de controle para determinação dos instantes de chaveamento. Os períodos ligados (“on”) e desligados (“off”) são calculados a partir da solução de equações algébricas, de fácil implementação computacional.

No capítulo 6 foram apresentadas simulações de um sistema simplificado, com um gerador alimentando uma carga através de uma linha de transmissão, com o controle da magnitude de tensão na barra de acoplamento, bem como de potência ativa e reativa entre o controlador e o sistema ca.

Durante as simulações foram feitos quatro exemplos usando a tensão média instantânea do PWM e foi feito um exemplo usando a tensão de saída modulada em PWM.

Durante as simulações, o compensador em derivação atuou como era esperado. No primeiro exemplo, a tensão do conversor foi feita maior em magnitude e adiantada do que a tensão a ser compensada. Com isso, a tensão na barra passou de um valor calculado para um valor desejado e também forneceu potência ativa e reativa. Durante o início da simulação, a tensão na barra era igual a tensão média do conversor e a corrente do ramo shunt seria igual a zero. Com isso, a corrente de carga e a corrente total estariam em fase e com a mesma magnitude. O que era esperado seria que a corrente do ramo shunt fosse quase que ortogonal e atrasada em relação a tensão da barra. A soma da corrente do ramo shunt com a corrente entre o barra e o gerador daria o valor da corrente de carga. O controle da potência ativa permitiu que ela atingisse o valor desejado, dentro de uma tolerância. Através do funcionamento deste controle, conforme foi mostrado no capítulo anterior, é possível determinar o quanto de potência deve fluir do conversor para a barra do sistema ca, nos momentos em que o gerador não consegue suprir a carga ou que a utilização da energia armazenada (ou gerada) do lado cc se torna economicamente atrativa.

Nos outros exemplos, o programa forneceu ou absorveu potência ativa e reativa, conforme proposto.

No 5º exemplo, não foi utilizada a tensão média do PWM e sim a própria saída do PWM. Este exemplo foi mostrado apenas para efeito de entendimento como seria as correntes e a tensão compensada com o uso de uma tensão modulada por largura de pulso na saída.



No 6º exemplo, foi apresentada uma simulação do funcionamento do compensador em derivação atuando no sistema para corrigir a tensão da barra de acoplamento para um valor desejado, com a entrada e saída de carga.

7.2 - Contribuição e Proposta para Trabalhos Futuros

A principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliar a possibilidade do controle de fluxo de potência ativa e reativa, a partir da utilização de um conversor como fonte de tensão. Além disso, um vasto material bibliográfico a respeito desta possibilidade de controle foi investigado, dando origem a um texto que servirá de base para próximos trabalhos que vierem a ser realizados nesta linha de pesquisa.

Como proposta para novos trabalhos, é importante que o programa seja aperfeiçoado de modo que possa convergir com um menor tempo de simulação e, se possível, com formas de onda dos sinais mais próximas da realidade. O sistema de controle, proporcional-integral, também deve ser melhorado, utilizando-se técnicas de controle moderno. Do ponto de vista do sistema elétrico, é importante que sejam avaliados sistemas de maior porte, inclusive com múltiplos geradores.

Referências Bibliográficas

- [01] Site: <http://www.aneel.gov.br> Matriz energética brasileira
- [02] BRANCART, D., ANTOINE, J.P., Flexibility of Power Systems Principles, mea Achievement and Approaches for Facing Uncertainty by Planning Flexible Develop of Power Systems. Electra, nº 135, 1991.
- [03] HINGORANI, N.G., Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electron Future Power Systems. Proceedings of the IEEE, vol. 76, nº 4, April, 1998.
- [04] WATANABE, E. H., AREDES, M. Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantâ Aplicações – Filtros Ativos FACTS. Laboratório de Eletrônica de Potência COPPE/ 1-21p.
- [05] DINELEY, J. L., Power System Stability. Power Engineering Journal, 29 – 46p, Ja 1991.
- [06] H. P. St. Clair., Practical Concepts in Capability and Performance of Transmission AIEE Transactions, 1152 – 1157 p, December 1953.
- [07] TARANTO, G. N., et al. Representation of FACTS Devices in Power System Eco Dispatch. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 07, N 02, 572 - 576p, May 199.
- [08] SANTOS, SILMÁRIO BATISTA. Análise de Unidades IPFC sob o Enfoq Qualidade da Energia Elétrica. 1998 70p. Tese de Mestrado – Universidade Fede Uberlândia. Minas Gerais.
- [09] Site: www.abb.com/powersystems. FACTS – Solutions to Power Flow Cont Stability Problems.

- [10] Site: <http://www.coe.ufrj.br/bolsa98a.htm> Aplicações de Eletrônica de Potência em Sistemas de Potência.
- [11] SONG, Y., JOHNS, H., A.T. Flexible ac Transmission Systems (FACTS). IEE Power and Energy Series. 1ª edição, Rio de Janeiro, 576p (1999).
- [12] BARBOSA, P.G. et al. Control Strategy for Grid-Connected DC-AC Converters with Load Power Factor Correction. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, EUA, 145(5):487-491p. 1998.
- [13] GYUGYI, L. Unified Power Flow Control Concept for Flexible ac Transmission System. IEE Proceedings, 139(4):323-331, July 1992
- [14] ARSOY, A. et al. Power Converter and SMES in Controlling Power System Dynamics. The Proceedings of the IEEE Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, October 2000, Italy.
- [15] CASADEI, D., et al. A Supercapacitor Based Power Conditioning System for Power Quality Improvement and Uninterruptible Power Supply. Proc. Of IEEE ISIE , L' Aquila, Italy, July 2002, 1247 – 1252p.
- [16] NERGAARD, T. A, et al. Design considerations for a 48V Fuel Cell to Split Single Phase Inverter System with Ultracapacitor Energy Storage. CD-ROM of the IEEE PESC, Cairns, Australia, June 2002.
- [17] POMILIO, J. A et al. Dynamic Modelling and Regulators Design for Multiple Input Power Converters for the Propulsion System of Electric Vehicles. 7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP, Fortaleza, Ceará, 21 a 24 Setembro 2001.
- [18] PASCHOARELI, DIONIZIO. Modelling and Implementation of a Unified Voltage Controller. 1999. 241p. PhD Thesis - University of Aberdeen. Escócia.

- [19] WATANABE, EDSON H, et al. Tecnologia FACTS Tutorial. SBA Controle & Automação, Vol 09, 39 – 43p, Janeiro 1998.
- [20] RIBEIRO, P.F. et al. Energy Storage Systems for Advanced Power Applications. IEEE Power Electronics Specialists Conference. Vol. 89, nº12, 1744-1756p. December 2001.
- [21] Site: <http://www.cresesb.cepel.br> Fontes Alternativas de Energia
- [22] CAVALIERE, C.A.C. Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados. Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brasil. 2001. 191p.
- [23] BABU, C. S. Control of a Unified Power Flow Controller (UPFC) – A Simulation Study using Matlab/Simulink. 2002. 94p. PhD Thesis University of Calicut
- [24] CHEN, J., VILATHGAMUWA, D.M., Basic Control of Interline Power Flow Controller. IEEE Transaction on Power Systems . 521 – 525p, 2002.
- [25] HAFNER, Y. et al. Improvement of Subsynchronous Torsional Damping Using VSC HVDC. IEEE Power Systems Technology. Vol. 02. 998 –1103p, October 2002.
- [26] SAADATE, S. et al. PWM Force Commutated GTO Converter in Four Quadrant Operation. IEEE Transactions on Industry Application, 600-605p, 1991.
- [27] BITTENCOURT, S., ERIKSSON, K., BILEDT, G., HVDC Light para Transmissão de Energia Elétrica num Mercado Desregulamentado, Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil, 06p, 1999.
- [28] PASCHOARELI, D.J., YACAMINI, R. A Smart Representation of the Space Vector Sinusoidal Modulation. Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference (XII Congresso Brasileiro de Automática), vol. VI, pp. 2099-2091, Sept. 14-18, 1998, Uberlândia, MG, Brasil.

- [29] PARK, G., KIM, S.I. A Thyristor Phase-Controlled Voltage-Source Converter with Bidirectional Power Flow Capability. IEEE Transactions on Industry Applications. 1147-1155p. 1998.
- [30] UZUNOVIC, E. EMTP, Transient Stability and Power Flow Models and Controls of VSC Based FACTS Controllers. 2001. 231p. Tese de Doutorado - University of Waterloo – Canadá.
- [31] FUNATO, H., et al. A New Instantaneous Power Flow Control Method Using Variable Inductance Realized by Variable Active Passive Reactance (VAPAR), 1205 – 1211p.
- [32] H. PINHEIRO. et al. Modulação Space Vector para Inversores Alimentados em Tensão: uma Abordagem Unificada. XIV – Congresso Brasileiro de Automática. 787-794p, Setembro 2002.
- [33] PENG, F.Z., AKAGI, H., NABAE, A. A Study of Active Power Filters Using Quad-Series Voltage Source PWM Converters for Harmonic Compensation, IEEE Transactions on Power Electronics, 5(1):9-14p, 1990.
- [34] JACOBINA, C. B. et al. Digital Scalar Pulse Width Modulation: A Simple Approach to Introduce Non-Sinusoidal Modulating Waveforms. IEEE Transactions on Power Electronics. 351-359p. may 2001.
- [35] JACOBINA, C. B. et al. PWM Space Vector Based in Digital Scalar Modulation. IEEE Power Electronics Specialists Conference. 606-611p. 1997.

Apêndice

Programa para realizar o controle do fluxo de potência ativa e reativa em uma linha de transmissão

----- VARIÁVEIS DE ENTRADA -----

```
clear
ff=60; % Freqüência do sistema
w=2*pi*ff;
vger=138; % Tensão do gerador
E=4000; % Tensão do lado cc
vord=125.6;%101.78; % Valor da tensão ordenada

deltav=0; % Condição inicial da tensão a ser somada
deltaold=1; % Condição inicial da tensão antiga
deltavold=0;
delt=0;
gamacorold=0;
pi23=2*pi/3; %Constante

h=5.0e-5; % Passo de cálculo

tfinal=0.2; % Tempo total de simulação para T
tefinal=4; % Tempo total de simulação para Te

tsave0=0.; % Tempo inicial de gravação de vetores de saída
tsave=tsave0;
npt=5000; % Número de pontos dos vetores de saída
hpwm=2e-5 % Freqüência de chaveamento
Periodo=hpwm/2;
Per=hpwm; % Período de chaveamento
tsw=Per/100;
gg=1; % Armazenamento do numero de interações
ll=1;
d=1;
hsave=(tfinal-tsave0)/npt; % Período de amostragem dos vetores de saída
sdelta=0; %_mas perde um pouco a precisão do PWM)

XX01=zeros(4002,2); %
XX02=zeros(4002,2); %
XX03=zeros(4002,2); %
% Condição inicial da equação de estado
X01=XX01(4002,:); %
X02=XX02(4002,:); %
X03=XX03(4002,:); %
```



```

j=0; % Índice dos vetores de dados de saída para T
f=0; % Índice dos vetores de dados de saída para Te

jj=sqrt(-1); % Modo cartesiano
deritotal=0;

ninter=0; % Início do número de iterações
nintermax=19; % Número máximo de iterações
tol=0; % Tolerância máxima da diferença da tensão
tt=1; % Condição inicial maior que a tolerância
sodelta=0;
cha=0;

k=2.5; % Constante de multiplicação para deltav

lsh=0.26;
rsh=10;

lcarga=0.261;
rcarga=162;

lt=0.132;
rt=10;

xlsh=w*lsh;
xlcarga=w*lcarga;
xlt=w*lt;

zsh=rsh+xlsh*jj; %
zcarga=rcarga+xlcarga*jj; % Impedâncias
zt=rt+xlt*jj; %

chave=0; %
ch=0; %
deltavintold=0; % Condições iniciais de simulação
deltavint=0; %
deltavant=0; %
deltavvold=0; %
kint=1;

-----

% Cálculo da tensão na barra SEM O USO DO COMPENSADOR

zeq=zt+zcarga;
ic=vger/zeq; % Corrente do circuito
vbus=vger-(zt*ic); % Tensão na barra
vbord=abs(vbus);
hhh=0;
gamacornew=angle(vbus);
gamacorold=0;

-----

```

```
% Loop da potência
```

```
deltaPold=0;      % valor inicial da potência antiga
deltaPe=0;

tolP=0.6;         % tolerância aceitável da potência
ttt=2;            % condição inicial maior que a tolerância
ninterp=0;        % numero de interação da potência
nintermaxp=19;    % n° máximo de interações da potência
```

```
while ttt >= tolP & ninterp <= nintermaxp %----(inicio)
```

```
ninter=0;         %zera a interação depois de comparar com Pref
tt=1;
te=0;
hhh=0;
```

```
% Início do loop da soma de deltav na barra a ser compensada
```

```
while tt >= tol & ninter <= nintermax      %----(01)
```

```
t=0;              % Tempo inicial de simulação
hh=0;             % Condição inicial de simulação
tpwm=0;          % Var de tempo para def dos inst do cálc. pwm
```

```
q1=0;%
q2=0; %           % Estado lógico das chaves iniciais
q3=0; %
```

```
sw=1;            % Condição inicial da chave
```

```
toffa=5.0e-3; %   % Tempo inicial em que as chaves permanecem
toffb=5.0e-3; %   desl tem que ser maior que o tempo t inicial
toffc=5.0e-3; %
```

```
% Inicio do loop de controle variável de tempo
```

```
if te <= tefinal    %----(03)
while t < tfinal    %----(02)
```

```
    t = t + hh;      % tempo de simulação
```

```
    hh=h;           % Implemento de h no tempo de simulação
```

```
    te = te + hhh;
```

```
    hhh = h;
```

```
% Cálculo da senoide do gerador e da tensão deltav
```

```
vg1=abs(vger)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vger));
vg2=abs(vger)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vger)-pi/3);
vg3=abs(vger)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vger)+pi/3);
```

```
vbord1=(vbord)*sqrt(2)*cos(w*t+gamacornew);
vbord2=(vbord)*sqrt(2)*cos(w*t+gamacornew-pi/3);
vbord3=(vbord)*sqrt(2)*cos(w*t+gamacornew+pi/3);
```

```
vvbord1=vbord1+vbord2+vbord3;
```

```
vn1=abs(vbus)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vbus));
vn2=abs(vbus)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vbus)-pi/3);
vn3=abs(vbus)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vbus)+pi/3);
```

```
ic1=abs(ic)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(ic));
ic2=abs(ic)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(ic)-pi/3);
ic3=abs(ic)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(ic)+pi/3);
```

```
vna1=abs(vord)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vord));
vna2=abs(vord)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vord)-pi/3);
vna3=abs(vord)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vord)+pi/3);
```

```
vnb1=abs(vord)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vord));
vnb2=abs(vord)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vord)-pi/3);
vnb3=abs(vord)*sqrt(2)*cos(w*t+angle(vord)+pi/3);
```

```
-----
% Início do loop de controle PWM
```

```
if t>=tpwm %----(04)
```

```
% Transformação do sistema trifásico em coordenadas dq
```

```
vsd=(2/3)*(vbord1-0.5*(vbord2+vbord3));
vsq=(1/sqrt(3))*(vbord2-vbord3);
```

```
u=sqrt(vsd^2+vsq^2); % Tensão de u tem que ser <= que max
maximo=(E/4)*(tan(30)); % Máxima tensão de u para não saturar
```

```
gama=atan(vsq/vsd);
```

```
if (vsd ~= 0) %----(05)
    if (vsd > 0 & vsq >= 0) %----(06)
        gama=atan(vsq/vsd);
    end %----(06)
```

```
    if (vsd < 0 & vsq > 0) %----(07)
        gama=pi+atan(vsq/vsd);
    end %----(07)
```

```
    if (vsd < 0 & vsq < 0) %----(08)
```



```

    gama=pi+atan(vsq/vsd);
end                                     %----(08)

if (vsd > 0 & vsq < 0)                 %----(09)
    gama=(2*pi)+atan(vsq/vsd);
end                                     %----(09)

else
    if (vsq > 0)                       %----(10)
        gama=pi/2;
    end                                 %----(10)

    if (vsq < 0)                       %----(11)
        gama=(3*pi)/2;
    end                                 %----(11)

    if (vsq==0)                       %----(12)
        gama=0
    end                                 %----(12)
end                                     %----(05)

modu=sqrt(vsd^2+vsq^2);
if (gama >= 0 & gama < pi/3)           %----(13)
    sec=1;
end                                     %----(13)

if (gama >= pi/3 & gama < 2*pi/3)     %----(14)
    sec=2;
end                                     %----(14)

if (gama >= 2*pi/3 & gama < pi)       %----(15)
    sec=3;
end                                     %----(15)

if (gama >= pi & gama < 4*pi/3)       %----(16)
    sec=4;
end                                     %----(16)

if (gama >= 4*pi/3 & gama < 5*pi/3)   %----(17)
    sec=5;
end                                     %----(17)

if (gama >= 5*pi/3 & gama < 2*pi)     %----(18)
    sec=6;
end                                     %----(18)

if (sec==6)                           %----(19)
    Tp=Per*(1-((2*modu/E)*cos(gama-(5*pi/3))));
    Tn=Per*(1-((2*modu/E)*cos(-gama)));
    kk3=0;
    kk4=-2/sqrt(3);
    kk1=1;
    kk2=1/sqrt(3);
end                                     %----(19)

```



```

if (sec==1)          %----(20)
    Tn=Per*(1-((2*modu/E)*cos(gama)));
    Tp=Per*(1-((2*modu/E)*cos((pi/3)-gama)));
    kk1=1;          kk2=-1/sqrt(3);
    kk3=0;
    kk4=2/sqrt(3);
end                  %----(20)

if (sec==2)          %----(21)
    Tp=Per*(1-((2*modu/E)*cos(gama-(pi/3))));
    Tn=Per*(1-((2*modu/E)*cos((2*pi/3)-gama)));
    kk3=1;
    kk4=1/sqrt(3);
    kk1=-1;
    kk2=1/sqrt(3);
end                  %----(21)

if (sec==3)          %----(22)
    Tn=Per*(1-((2*modu/E)*cos(gama-(2*pi/3))));
    Tp=Per*(1-((2*modu/E)*cos(pi-gama)));
    kk1=0;
    kk2=2/sqrt(3);
    kk3=-1;
    kk4=-1/sqrt(3);
end                  %----(22)

if (sec==4)          %----(23)
    Tp=Per*(1-((2*modu/E)*cos(gama-pi)));
    Tn=Per*(1-((2*modu/E)*cos((4*pi/3)-gama)));
    kk3=-1;          kk4=1/sqrt(3);
    kk1=0;
    kk2=-2/sqrt(3);
end                  %----(23)

if (sec==5)          %----(24)
    Tn=Per*(1-((2*modu/E)*cos(gama-(4*pi/3))));
    Tp=Per*(1-((2*modu/E)*cos((5*pi/3)-gama)));
    kk1=-1;
    kk2=-1/sqrt(3);
    kk3=1;
    kk4=-1/sqrt(3);
end                  %----(24)

if (Tn < 0 & Tp >= 0)    %----(25)
    Tp0=Tp/2;
    Tn0=Tp/2;
end                  %----(25)

T1=((Per*(3/2))/E)*(kk1*vsd+kk2*vsq);    % Cálculo do T1
T2=((Per*(3/2))/E)*(kk3*vsd+kk4*vsq);    % Cálculo do T2

tnulo=Per-(T1+T2);

Tp0=tnulo*Tn/(Tp+Tn);    % Cálculo do T7
Tn0=tnulo*Tp/(Tp+Tn);    % Cálculo do T0

```

```

if (modu >= (E/2))           %----(26)
    Tp0=tnulo/2;
    Tn0=tnulo/2;
end                           %----(26)

TT1=T1;
TT2=T2;

if (sec==1)                   %----(27)
    lT1=Tn0+TT1+TT2;          % Largura do pulso da fase 1
    lT2=Tn0+TT2;              % Largura do pulso da fase 2
    lT3=Tn0;                   % Largura do pulso da fase 3
end                             %----(27)

if (sec==2)                   %----(28)
    lT1=Tn0+TT2;
    lT2=Tn0+TT1+TT2;
    lT3=Tn0;
end                             %----(28)

if (sec==3)                   %----(29)
    lT1=Tn0;
    lT2=Tn0+TT1+TT2;
    lT3=Tn0+TT2;
end                             %----(29)

if (sec==4)                   %----(30)
    lT1=Tn0;
    lT2=Tn0+TT2;
    lT3=Tn0+TT1+TT2;
end                             %----(30)

if (sec==5)                   %----(31)
    lT1=Tn0+TT2;
    lT2=Tn0;
    lT3=Tn0+TT1+TT2;
end                             %----(31)

if (sec==6)                   %----(32)
    lT1=Tn0+TT1+TT2;
    lT2=Tn0;                   lT3=Tn0+TT2;
end                             %----(32)

sw=sw*(-1);                   % Chave para inverter o nível inicial dos pulsos de
comando

tsim=0;
if (q1==0 & sw== -1)          %----(33)
    tona=tpwm+lT1;             % Tempo em que as chaves
    tonb=tpwm+lT2;             % a,b,c permanecem na posição 1
    tonc=tpwm+lT3;             % Mudança de estado da chave
    sw=-1;
end                             %----(33)

if (q1==1 & sw==1)            %----(34)
    toffa=(Per)+tpwm-lT1;      % Tempo em que as chaves

```



```

    toffb=(Per)+tpwm-lT2; % % a,b,c permanecem na posição 0
    toffc=(Per)+tpwm-lT3; %
sw=1; % Mudança de estado da chave
end %----(34)

    tpwm = tpwm + hpwm; % tempo para definição dos instantes do
                        % calculo do PWM

end %----(04) fim do loop do controle pwm

if (t >= tona) %----(35)
    q1=1;
end %----(35)

if (t >=tonb) %----(36)
    q2=1;
end %----(36)

if (t >=tonc) %----(37)
    q3=1;
end %----(37)

if (t >= toffa & toffa > tona) %----(38)
    q1=0;
end %----(38)

if (t >= toffb & toffb > tonb) %----(39)
    q2=0;
end %----(39)

if (t >= toffc & toffc > tonc) %----(40)
    q3=0;
end %----(40)

% Fim do cálculo PWM
-----

v1pwm = (2*q1-1)*(E/2); %
v2pwm = (2*q2-1)*(E/2); % % Tensão de saída do conversor PWM
v3pwm = (2*q3-1)*(E/2); %

qq1=(2*q1-1)*1;
qq2=(2*q2-1)*1;
qq3=(2*q3-1)*1;

vout1=( E/2*(lT1-(hpwm-lT1))) / hpwm;
vout2=( E/2*(lT2-(hpwm-lT2))) / hpwm; % Tensão média do PWM
vout3=( E/2*(lT3-(hpwm-lT3))) / hpwm;
-----

```

```
% Armazenamento de valores dos vetores
```

```
j=j+1;
f=f+1;
T(j)=t;
J(j)=j;
Te(f)=te;
F(f)=f;
```

```
VVg1(f)=vg1;
VVg2(f)=vg2;           % Tensão do gerador
VVg3(f)=vg3;
```

```
Q1(f)=qq1;
Q2(f)=qq2;           % Tensão do conversor PWM
Q3(f)=qq3;
```

```
Vg1(j)=vg1;
Vg2(j)=vg2;           % Tensão do gerador
Vg3(j)=vg3;
```

```
Vbord1(j)=vbord1;
Vbord2(j)=vbord2;     % Valor ordenado + deltav
Vbord3(j)=vbord3;
```

```
VVbord1(f)=vvbord1;
VVbord2(f)=vbord2;     % Valor ordenado + deltav
VVbord3(f)=vbord3;
```

```
Vn1(f)=vn1;
Vn2(f)=vn2;           % Tensão na barra sem o compensador
Vn3(f)=vn3;
```

```
Ic1(f)=ic1;
Ic2(f)=ic2;           % Corrente do circuito sem o compensador
Ic3(f)=ic3;
```

```
Vsd(j)=vsd;           % Coordenadas dq
Vsq(j)=vsq;
Tona(j)=tona;
Tonb(j)=tonb;         % Tempo em que as chaves permanecem fechadas
Tonc(j)=tonc;
```

```
Toffa(j)=toffa;
Toffb(j)=toffb;       % Tempo em que as chaves permanecem abertas
Toffc(j)=toffc;
```

```
Sec(j)=sec;
```

```
TTT1(j)=lT1;
TTT2(j)=lT2;
```

```
Tsim(j)=tsim;
Tpwm(j)=tpwm;
```

```
LT1(j)=lT1;
LT2(j)=lT2;
```

```

LT3(j)=lT3;

V1pwm(j)=v1pwm;
V2pwm(j)=v2pwm;           % Tensão de saída do conversor pwm
V3pwm(j)=v3pwm;

VV1pwm(f)=v1pwm;
VV2pwm(f)=v2pwm;           % Tensão de saída do conversor pwm
VV3pwm(f)=v3pwm;

Vout1(j)=vout1;
Vout2(j)=vout2;
Vout3(j)=vout3;           % Tensão média do conversor pwm

VVout1(f)=vout1;
VVout2(f)=vout2;
VVout3(f)=vout3;           % Tensão média do conversor pwm

end                          %----(02)

-----

% Cálculo das tensões da barra compensada e das correntes do circuito

a1=(Vg1-Vout1);           % Diferença de tensão entre o gerador e a
a2=Vout1;                 % Tensão média instantânea do conversor

a3=(Vg2-Vout2);
a4=Vout2;

a5=(Vg3-Vout3);
a6=Vout3;

u1=a1;
u2=a2;

u3=a3;
u4=a4;

u5=a5;
u6=a6;

U1=[u1; u2]';           %
U2=[u3; u4]';           % Vetores de entrada da matriz de estado
U3=[u5; u6]';           %

k1=rt+rsh;               %
k2=lt+lsh;               %
k3=-rsh;                 % Variáveis de entrada da matriz de estado
k4=-lsh;                 %
k5=rcarga+rsh;           %
k6=lsh+lcarga;           %

A=[ ((k3*k4-k1*k6)/k4)*(k4/((k4^2)-k2*k6))*(-1)      ((k5*k4-
k3*k6)/k4)*(k4/((k4^2)-k2*k6))*(-1)

```



```
((-k1/k4)+((k2/k4)*((k3*k4-k1*k6)/k4)*(k4/((k4^2)-k2*k6))))      ((-
k3/k4)+((k2/k4)*((k5*k4-k3*k6)/k4)*(k4/((k4^2)-k2*k6))))];
```

```
B=[(k6/k4)*(k4/((k4^2)-k2*k6))*(-1)      (k4/((k4^2)-k2*k6))
((1/k4)+((k2/k4)*(k6/k4)*(k4/((k4^2)-k2*k6))))      ((k2/k4)*(k4/((k4^2)-
k2*k6))*(-1))];
```

```
C=[1 0
0 1];
```

```
D=[0 0
0 0];
```

```
y1=lsim(A, B, C, D, U1, T, X01); %
y2=lsim(A, B, C, D, U2, T, X02); % Vetores de saída
y3=lsim(A, B, C, D, U3, T, X03); %
```

```
X01=y1(4002,:);
X02=y2(4002,:);
X03=y3(4002,:);
```

```
ipwmtotal1=y1(:,1); %
ipwmcargal=y1(:,2); %
ipwmtotal2=y2(:,1); % Corrente total
ipwmcarga2=y2(:,2); % Corrente da carga
ipwmtotal3=y3(:,1); %
ipwmcarga3=y3(:,2); %
deri1=diff(ipwmtotal1)/h; %
deri1(4002)=deri1(4001); %
```

```
deri2=diff(ipwmtotal2)/h; % Derivada da corrente total
deri2(4002)=deri2(4001); %
deri3=diff(ipwmtotal3)/h; %
deri3(4002)=deri3(4001); %
```

```
-----
% Cálculo da tensão compensada
```

```
res1=rt*ipwmtotal1; %
res1l=res1'; %
ind1=lt*deri1; % Fase A
ind1l=ind1'; %
Vbarrapwm1=Vg1-res1l-ind1l; %
```

```
res2=rt*ipwmtotal2; %
res2l=res2'; %
ind2=lt*deri2; % Fase B
ind2l=ind2'; %
Vbarrapwm2=Vg2-res2l-indu2; %
```

```

res3=rt*ipwmtotal3;          %
resi3=res3';                 %
ind3=lt*deri3;               % Fase C
indu3=ind3';                 %
Vbarrapwm3=Vg3-resi3-indu3; %

-----

% Cálculo do valor rms e comparação com o valor ordenado

N=length(T);
S=0;
U=0;

for n=1:N                      %----(42)
    if n >= 2000                %----(43)
        U=U+Vbarrapwm1(n)^2;
        S=S+Vg1(n)^2;
    end                        %----(43)
end                            %----(42)

Vrmsg=sqrt(S/2006);           % Valor rms da tensão do gerador
Vrms=sqrt(U/2006);            % Valor rms da tensão da barra compensada

j=0;
end                            %----(01)
vb1=Vbarrapwm1(1,3001);
vb2=Vbarrapwm2(1,3001);
vb3=Vbarrapwm3(1,3001);

vsdcor=(2/3)*(vb1-0.5*(vb2+vb3));
vsqcor=(1/sqrt(3))*(vb2-vb3);

ucor=(sqrt(vsdcor^2+vsqcor^2))/sqrt(2);
gamacor=atan(vsqcor/vsdcor);

if (vsdcor ~= 0)              %----(44)
    if (vsdcor > 0 & vsqcor >= 0)    %----(45)
        gamacor=atan(vsqcor/vsdcor);
    end                        %----(45)

    if (vsdcor < 0 & vsqcor > 0)    %----(46)
        gamacor=pi+atan(vsqcor/vsdcor);
    end                        %----(46)

    if (vsdcor < 0 & vsqcor < 0)    %----(47)
        gamacor=pi+atan(vsqcor/vsdcor);
    end                        %----(47)

    if (vsdcor > 0 & vsqcor < 0)    %----(48)
        gamacor=(2*pi)+atan(vsqcor/vsdcor);
    end                        %----(48)

```

```

else
    if (vsqcor > 0)                                %----(49)
        gamacor=pi/2;
    end                                              %----(49)

    if (vsqcor < 0)                                %----(50)
        gamacor=(3*pi)/2;
    end                                              %----(50)

    if (vsqcor==0)                                %----(51)
        gamacor=0
    end                                              %----(51)
end                                                  %----(44)

Dv=+vord-ucor;                                     % Comparação da tensão ordenada com a média
                                                    % Incremento do número de iterações
tt=abs(Dv);
deltavnew=k*Dv;

delta=deltavnew/deltaold;
deltaold=deltavnew;
vbordold=vbord;

if abs(delta) <= 1.05 & abs(delta) >= 0.95;      %----(52)

    if ch < 3;                                     %----(53)
        vbord=vbordold+deltavnew;
        chave=chave+1;
    end                                             %----(53)

    if ch >= 3;                                    %----(54)
        vbord=vbordold+(deltavnew*kint)+deltavnew;
        chave=0;
    end                                             %----(54)

else
    vbord=vbordold+deltavnew;
    chave=0;
end                                                  %----(52)

ch=chave;
deltavold=deltav;

-----

% Armazenamento das variáveis

VVbarrapwm1(gg,:)=Vbarrapwm1; %      Todos os valores compensados das
VVbarrapwm2(gg,:)=Vbarrapwm2; %      tensões
VVbarrapwm3(gg,:)=Vbarrapwm3; %

iipwmtotal1(gg,:)=ipwmtotal1'; %      Todos os valores das correntes
iipwmtotal2(gg,:)=ipwmtotal2'; %      totais
iipwmtotal3(gg,:)=ipwmtotal3'; %

iipwmcarga1(gg,:)=ipwmcarga1'; %      Todos os valores das correntes de
iipwmcarga2(gg,:)=ipwmcarga2'; %      carga

```



```

iipwmcarga3(gg,:)=ipwmcarga3'; %

gg=gg+1;
ninter=ninter+1;          % Incremento do número de iteração

end                          %----(03)

gg=1;

for ii=1,ninter              %----(55)
    Vtbarrapwm1(1,:)=Vvbarrapwm1(ii,:);
    Vtbarrapwm2(1,:)=Vvbarrapwm2(ii,:);
    Vtbarrapwm3(1,:)=Vvbarrapwm3(ii,:);

    itpwmtotal1(1,:)=iipwmtotal1(ii,:);
    itpwmtotal2(1,:)=iipwmtotal2(ii,:);
    itpwmtotal3(1,:)=iipwmtotal3(ii,:);

    itpwmcarga1(1,:)=iipwmcarga1(ii,:);
    itpwmcarga2(1,:)=iipwmcarga2(ii,:);
    itpwmcarga3(1,:)=iipwmcarga3(ii,:);
end                          %----(55)
-----
% Cálculo da corrente shunt

itpwmshunt1=-(-(itpwmtotal1)+(itpwmcarga1));
itpwmshunt2=-(-(itpwmtotal2)+(itpwmcarga2));
itpwmshunt3=-(-(itpwmtotal3)+(itpwmcarga3));

ishuntdc=(itpwmshunt1.*Q1)+(itpwmshunt2.*Q2)+(itpwmshunt3.*Q3);
-----

% Potência instantânea

% Potência fornecida pelo gerador SEM O COMPENSADOR
Psc1=(VVg1.*Ic1);
Psc2=(VVg2.*Ic2);
Psc3=(VVg3.*Ic3);

Ptsc=Psc1+Psc2+Psc3;

Qtsc=sqrt(3)*((VVg2.*Ic1)-(VVg1.*Ic2));

% Potência total sem compensação

Psct1=((VVg1-Vn1).*Ic1);
Psct2=((VVg2-Vn2).*Ic2);
Psct3=((VVg3-Vn3).*Ic3);

Ptsct=Psct1+Psct2+Psct3;

Qtsct=sqrt(3)*(((VVg2-Vn2).*Ic1)-((VVg1-Vn1).*Ic2));

```

% Potência da carga sem compensação

Psccl=(Vn1.*Ic1);

Psc2=(Vn2.*Ic2);

Psc3=(Vn3.*Ic3);

Ptsc=Psccl+Psc2+Psc3;

Qtsc=sqrt(3)*((Vn2.*Ic1)-(Vn1.*Ic2));

% Potência fornecida pelo gerador COM O COMPENSADOR

% Potência do gerador

Pgc1=(VVg1.*itpwmtotal1);

Pgc2=(VVg2.*itpwmtotal2);

Pgc3=(VVg3.*itpwmtotal3);

Ptgc=Pgc1+Pgc2+Pgc3;

Qtgc=sqrt(3)*((VVg2.*itpwmtotal1)-(VVg1.*itpwmtotal2));

% Potência total

Ptotal1=((VVg1-Vtbarrapwm1).*itpwmtotal1);

Ptotal2=((VVg2-Vtbarrapwm2).*itpwmtotal2);

Ptotal3=((VVg3-Vtbarrapwm3).*itpwmtotal3);

Pttotal=Ptotal1+Ptotal2+Ptotal3;

Qttotal=sqrt(3)*(((VVg2-Vtbarrapwm2).*itpwmtotal1)-((VVg1-Vtbarrapwm1).*itpwmtotal2));

% Potência carga

Pcarga1=(Vtbarrapwm1.*itpwmcarga1);

Pcarga2=(Vtbarrapwm2.*itpwmcarga2);

Pcarga3=(Vtbarrapwm3.*itpwmcarga3);

Ptcarga=Pcarga1+Pcarga2+Pcarga3;

Qcarga1=(Vtbarrapwm1.*itpwmcarga1)*sin(arctgc);

Qcarga2=(Vtbarrapwm2.*itpwmcarga2)*sin(arctgc);

Qcarga3=(Vtbarrapwm3.*itpwmcarga3)*sin(arctgc);

Qtcarga=sqrt(3)*((Vtbarrapwm2.*itpwmcarga1)-(Vtbarrapwm1.*itpwmcarga2));

% Potência shunt

Pshunt1=((VVout1-Vtbarrapwm1).*itpwmshunt1);

Pshunt2=((VVout2-Vtbarrapwm2).*itpwmshunt2);

Pshunt3=((VVout3-Vtbarrapwm3).*itpwmshunt3); % SHUNT

```

Ptshunt=Pshunt1+Pshunt2+Pshunt3;

Qtshunt=sqrt(3)*(((VVout2-Vtbarrapwm2).*itpwmshunt1)-((VVout1-
Vtbarrapwm1).*itpwmshunt2));

% Potência de saída do conversor (tensão média instantânea

Pvsc1=(VVout1.*itpwmshunt1); % ou Pvsc1=(VVlpwm.*itpwmshunt1)
Pvsc2=(VVout2.*itpwmshunt2);
Pvsc3=(VVout3.*itpwmshunt3);

Ptvsc=Pvsc1+Pvsc2+Pvsc3;

Qtvsc=sqrt(3)*((VVout2.*itpwmshunt1)-(VVout1.*itpwmshunt2));

% Cálculo do valor da Potência

NN=length(Te);
P=0;
for nn=1:NN %----(56)

if nn >= 1 %----(57)
    P=P+Ptvsc(nn)^2;
end %----(57)

end %----(56)

Pr=sqrt(P/80040)

Pref=20.04;-125,2;27,5;-100 % valor desejado da potência
ttt=abs(abs(Pref)-abs(Pr));

Dp=Pref-Pr % diferença da potência

kkk=12e-4; % constante de multiplicação
Dpnew=Dp*kkk;
gamacornew=gamacorold+Dpnew
gamacorold=gamacornew;

-----

% Armazenamento dos valores calculados

ninterp=ninterp+1

f=0;

if ll >= 1 %----(58)
    Ptvscn(1,ll)=Ptvsc(1,80040);
    Qtvscn(1,ll)=Qtvsc(1,80040);
end %----(58)

Pttsc(ll,:)=Ptsc; % GERADOR
Qttsc(ll,:)=Qtsc;

```



```

Pttsccto(11,:)=Pttsc;          % TOTAL SEM COMPENSAÇÃO
Qttsccto(11,:)=Qttsc;

Pttsccta(11,:)=Pttsc;          % CARGA SEM COMPENSAÇÃO
Qttsccta(11,:)=Qttsc;

Pttgc(11,:)=Pttgc;             % GERADOR COM COMPENSAÇÃO
Qttgc(11,:)=Qttgc;

Ptttotal(11,:)=Ptttotal;        % TOTAL COM COMPENSAÇÃO
Qtttotal(11,:)=Qtttotal;

Pttcarga(11,:)=Pttcarga;        % CARGA COM COMPENSAÇÃO
Qttcarga(11,:)=Qttcarga;

Pttshunt(11,:)=Pttshunt;        % SHUNT COM COMPENSAÇÃO
Qttshunt(11,:)=Qttshunt;

Pttvsc(11,:)=Pttvsc;           % CONVERSOR COM COMPENSAÇÃO
Qttvsc(11,:)=Qttvsc;

Vvtout1(11,:)=Vvtout1;

Vttbarrapwm1(11,:)=Vttbarrapwm1;
Vvtbord1(11,:)=Vvtbord1;

ittpwmshunt1(11,:)=ittpwmshunt1;
ittpwmcarga1(11,:)=ittpwmcarga1;
ittpwmtotal1(11,:)=ittpwmtotal1;

d=d+1;
11=11+1;

end                               %----(inicio)

```

% Transformação de linhas e colunas em uma única linha com várias colunas
tempo=ninterp*4;

```

Pttscct=Pttsc';                % GERADOR S/C
Qttscct=Qttsc';

Pttscctot=Pttsccto';           % TOTAL
Qttscctot=Qttsccto';

Pttscctat=Pttsccta';           % CARGA
Qttscctat=Qttsccta';

Pttgct=Pttgc';                 % GERADOR COMP
Qttgct=Qttgc';

Ptttotalt=Ptttotal';           % TOTAL
Qtttotalt=Qtttotal';

Pttcargat=Pttcarga';           % CARGA
Qttcargat=Qttcarga';

```

```

Pttshuntt=Pttshunt';          % SHUNT
Qttshuntt=Qttshunt';

Pttvsct=Pttvsc';              % CONVERSOR
Qttvsct=Qttvsc';

Pttddct=Pttddc';              % CAPACITOR

Vvtoutlt=Vvtoutl';
Vtbarrapwmlt=Vttbarrapwml';
Vvtbordlt=Vvtbordl';

itpwmshuntlt=ittpwmshuntl';
itpwmcargalt=ittpwmcargal';
itpwmtotallt=ittpwmtotall';

tamPttvsct=size(Pttvsct);
multi=tamPttvsct(1,1)*tamPttvsct(1,2);

```

Variaveis a serem plotadas

```

Pscg=reshape(Pttsct,1,multi);
Qscg=reshape(Qttsct,1,multi);

Psctotal=reshape(Pttsctot,1,multi);
Qsctotal=reshape(Qttsctot,1,multi);

Pscarga=reshape(Pttsccat,1,multi);
Qscarga=reshape(Qttsccat,1,multi);

Pcg=reshape(Pttgct,1,multi);
Qcg=reshape(Qttgct,1,multi);

Ptotal=reshape(Ptttotalt,1,multi);
Qtotal=reshape(Qtttotalt,1,multi);

Pcarga=reshape(Pttcargat,1,multi);
Qcarga=reshape(Qttcargat,1,multi);

Pshunt=reshape(Pttshuntt,1,multi);
Qshunt=reshape(Qttshuntt,1,multi);

Pvsc=reshape(Pttvsct,1,multi);
Qvsc=reshape(Qttvsct,1,multi);

Vmcl=reshape(Vvtoutlt,1,multi);

Vmb1=reshape(Vtbarrapwmlt,1,multi);

Vref1=reshape(Vvtbordlt,1,multi);

Ish1=reshape(itpwmshuntlt,1,multi);

Icargal=reshape(itpwmcargalt,1,multi);

```



```
Itotal1=reshape(itpwmtotal1t,1,multi);
```

```
% Cálculo do tamanho das variáveis
```

```
nvotor=size(Pvsc);
nuvetor=nvotor(1,2);
passo=tempo/nuvetor;
Tee=0:passo:tempo;
```

```
nvet=size(Tee);
nvetoeres=nvet(1,2);
```

```
-----
% Variáveis a serem plotadas em função do tempo (Tee)
```

```
Pscg(nvetoeres)=Pscg(nvetoeres-1);          % GERADOR S/C
Qscg(nvetoeres)=Qscg(nvetoeres-1);
```

```
Psctotal(nvetoeres)=Psctotal(nvetoeres-1);  % TOTAL
Qsctotal(nvetoeres)=Qsctotal(nvetoeres-1);
```

```
Pscarga(nvetoeres)=Pscarga(nvetoeres-1);    % CARGA
Qscarga(nvetoeres)=Qscarga(nvetoeres-1);
```

```
Pcg(nvetoeres)=Pcg(nvetoeres-1);            % GERADOR COMP
Qcg(nvetoeres)=Qcg(nvetoeres-1);
```

```
Ptotal(nvetoeres)=Ptotal(nvetoeres-1);      % TOTAL
Qtotal(nvetoeres)=Qtotal(nvetoeres-1);
```

```
Pcarga(nvetoeres)=Pcarga(nvetoeres-1);      % CARGA
Qcarga(nvetoeres)=Qcarga(nvetoeres-1);
```

```
Pshunt(nvetoeres)=Pshunt(nvetoeres-1);      % SHUNT
Qshunt(nvetoeres)=Qshunt(nvetoeres-1);
```

```
Pvsc(nvetoeres)=Pvsc(nvetoeres-1);          % CONVERSOR
Qvsc(nvetoeres)=Qvsc(nvetoeres-1);
```

```
Vmcl(nvetoeres)=Vmcl(nvetoeres-1);          % TENSÃO CONVERSOR
```

```
Vmb1(nvetoeres)=Vmb1(nvetoeres-1);          % TENSÃO BARRA
```

```
Vref1(nvetoeres)=Vref1(nvetoeres-1);
```

```
Ish1(nvetoeres)=Ish1(nvetoeres-1);
```

```
Icargal(nvetoeres)=Icargal(nvetoeres-1);
```

```
Itotal1(nvetoeres)=Itotal1(nvetoeres-1);
```

```
##### FINAL DO PROGRAMA #####
```




**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

**Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br**

