

WEDER TÓTOLA NUNES

**PROPOSTA DE UM COMPENSADOR HÍBRIDO DE REATIVOS PARA
O CONTROLE DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Domingos Sávio Lyrio Simonetti, Dr.

Co-orientador: Prof. Gilberto Costa Drumond Sousa, Ph. D.

VITÓRIA
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

N972p Nunes, Weder Tótola, 1973-
Proposta de um compensador híbrido de reativos para o controle de tensão em redes de distribuição / Weder Tótola Nunes. – 2011.
103 f. : il.

Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonett.
Coorientador: Gilberto Costa Drumond Sousa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas de energia elétrica - Controle. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. DS-STATCOM. 4. Compensador híbrido de reativos. I. Simonetti, Domingos Sávio Lyrio. II. Sousa, Gilberto Costa Drumond. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

WEDER TÓTOLA NUNES

**PROPOSTA DE UM COMPENSADOR HÍBRIDO DE REATIVOS PARA
O CONTROLE DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 20 de setembro de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

D. S. Simonetti

**Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti, Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo**

Gilberto C. Sousa

**Prof. Ph. D. Gilberto Costa Drumond Sousa, Co-orientador
Universidade Federal do Espírito Santo**

Lucas F. Encarnação

**Prof. Dr. Lucas F. Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo**

Weder Nunes

**Prof. Dr. - Ing. Maurício Aredes
Universidade Federal do Rio de Janeiro**

Os atos revelam a pessoa.

*“Não existe árvore boa que dê frutos ruins, nem árvore ruim que dê frutos bons;
porque toda árvore é conhecida pelos seus frutos.*

Não se colhe figos de espinheiros, nem se apanham uvas de plantas espinhosas.

*O homem bom tira coisas boas do bom tesouro do seu coração,
mas o homem mau tira do seu mal coisas más,
porque a boca fala daquilo de que o coração está cheio”*

Lucas 6:43-45

*À minha esposa Sandra, meus pais, Enildo e Lourdes
e meu irmão, Wagner.*

Agradecimentos

Ao Senhor Deus, acima de tudo, que permitiu que tudo acontecesse.

À minha esposa Sandra, por permanecer sempre ao meu lado nos momentos bons e, principalmente, nos momentos ruins desse período de nossas vidas, nunca deixando de me apoiar.

Ao Professor Domingos, meu orientador, por estar sempre presente e atencioso, orientando o trabalho a se realizar.

Ao Professor Gilberto, meu co-orientador, pelas orientações prestadas ao longo do curso.

À Escelsa, por ser flexível com meu horário de trabalho, permitindo cursar as disciplinas do mestrado e compensar as horas ausentes na empresa em dias alternativos.

Ao IFES, pela organização do horário de trabalho na Coordenadoria de Eletrotécnica.

A CAPES pelo apoio financeiro concedido.

Aos familiares e amigos por compreenderem minhas ausências durante esse período.

A todos vocês que o Grande Deus os abençoe!

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de um Compensador Híbrido de Reativos para o controle da tensão em redes secundárias de distribuição com o objetivo de promover melhorias na qualidade de energia elétrica. Nele são definidas as estratégias para o controle da tensão no ponto de conexão comum da rede elétrica, utilizando-se de técnicas como a de decomposição da tensão em suas componentes de sequência positiva, negativa e zero, e aplicando-se a elas controles distintos, passivos e ativos. A tensão de sequência positiva é corrigida através da inserção ou retirada de bancos de capacitores, em degraus de reativos bem definidos. Já as tensões de sequência negativa e de sequência zero são corrigidas com o uso de um DS-STATCOM, que opera flutuando em relação à sequência positiva. Também é proposto um procedimento de projeto da malha de controle das tensões componentes. São analisadas várias situações de cargas desequilibradas e fatores de potência diferentes, apresentando-se os resultados e comentários sobre as simulações realizadas.

Abstract

This work proposes a hybrid reactive compensator to control the voltage in secondary distribution networks and improve the quality of electric energy. Strategies are defined to control the electric voltage level at the point of common coupling using techniques such as decomposition of voltage in its positive, negative and zero sequence components, applying to them different controls, passives and actives. The positive sequence is compensated with switched capacitor banks, getting different levels of reactive energy. In another way, negative and zero sequence components are compensated with a DS-STATCOM that operates without affecting the positive sequence. In addition, a procedure to project the controllers of sequence components is presented. Several cases of unbalanced loads and different power factor loads are analyzed and their simulation results and comments are presented.

Sumário

Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
Nomenclatura	
Capítulo 1: Introdução	22
Capítulo 2: Técnicas de Compensação de Energia Reativa	24
2.1. Princípios da Compensação de Reativos	24
2.2. Compensadores de Reativos Tradicionais	25
2.3. Compensadores Síncronos Estáticos - STATCOM.....	27
2.4. O Compensador Estático na Distribuição – DSTATCOM.....	30
Capítulo 3: Componentes Simétricas	31
3.1. Componentes Simétricas e o Desequilíbrio	31
3.2. Referencial Síncrono para Sistemas Desequilibrados.....	33
Capítulo 4: O Compensador Híbrido.....	37
4.1. Compensação da Componente de Sequência Positiva.....	37
4.2. Compensações das Componentes de Sequência Negativa e Zero	42
4.2.1. O Conversor CC-CA Trifásico de Tensão	42
4.2.2. Extração das Componentes Simétricas.....	44
4.2.3. Controle das Tensões de Sequência Negativa e Zero	45
4.3. Modelo Simulado.....	47
4.4. Comentários	48
Capítulo 5: Projeto dos Controladores	50
5.1. Análise do Lugar das Raízes.....	50
5.2. Princípios para Modelagem de um Controlador	51
5.3. Escolha do Controlador.....	51
5.4. Projeto do Controlador.....	52

5.5.	Determinação dos Ganhos do Controlador PI de Sequência Negativa.....	55
5.5.1.	Análise da função de transferência de malha aberta, sem controlador.....	55
5.5.2.	Análise da função de transferência, com controlador.....	56
5.6.	Determinação dos Ganhos do Controlador PI de Sequência Zero.....	58
5.6.1.	Análise da função de transferência de malha aberta, sem controlador.....	58
5.6.2.	Análise da função de transferência, com controlador.....	59
Capítulo 6:	Resultados das Simulações.....	63
6.1.	Carga Variável Crescente: Sem Compensadores	64
6.2.	Carga Variável Crescente: Apenas com Inversor.....	67
6.3.	Carga Variável Crescente: Apenas com Capacitores	71
6.4.	Carga Variável Crescente: Com Compensador Híbrido	76
6.5.	Carga Variável Decrescente: Com Compensador Híbrido.....	81
6.6.	Outros Resultados	85
Capítulo 7:	Conclusões.....	86
	Referências Bibliográficas	90
	Apêndice I: Programa para o Controle do Acionamento Binário dos Bancos de Capacitores.....	93
	Apêndice II: Simulações Realizadas com Bancos de Capacitores de 17,5 kVAr – Carga Variável Crescente.....	96
	Apêndice III: Simulações Realizadas com Bancos de Capacitores de 17,5 kVAr – Carga Variável Decrescente.....	99
	Apêndice IV: Parâmetros do Sistema Simulado.....	102

Lista de Figuras

Figura 2.1: Compensação shunt em um sistema elétrico de potência radial: a) sistema sem a compensação reativa; b) sistema com a compensação reativa. [1] Modificada.	25
Figura 2.2: Compensadores de reativos tradicionais: (a) TSC - Capacitor chaveado a tiristor; (b) TCR – Reator controlado a tiristor. [1] Modificada.....	26
Figura 2.3: Compensadores de reativos tradicionais: (a) TSC-TCR combinados; (b) FC-TCR – Reator controlado a tiristor e capacitor fixo – Configuração para 6 Pulsos. [1] Modificada.	27
Figura 2.4: Compensador de reativos auto-comutado: (a) Topologia do STATCOM; (b) Diagrama vetorial para compensação em avanço ($V_{COM} > V_{PCC}$); (c) Diagrama vetorial para compensação em atraso ($V_{COM} < V_{PCC}$).	28
Figura 3.1: Processo de heterodyning e filtragem.	34
Figura 4.1: Conexão dos bancos de capacitores trifásicos.	38
Figura 4.2: Estágio de potência do banco de capacitor de 10 kVAR: (a) tiristores dentro do delta; (b) tiristores fora do delta.	39
Figura 4.3: Estágio de controle de acionamento dos bancos de capacitores.	39
Figura 4.4: Conversor CC-CA de tensão – estrutura básica.	42
Figura 4.5: Sistema elétrico e conversor CC-CA de tensão com quatro braços e quatro condutores.....	43
Figura 4.6: Sistema elétrico e conversor CC-CA de tensão com três braços e quatro condutores.....	43
Figura 4.7: Extração das Componentes Simétricas.	45
Figura 4.8: Controle das Tensões de Sequência Negativa e Zero.....	45
Figura 4.9: Circuito de controle da componente de sequência negativa no referencial dq.	46
Figura 4.10: Geração do sinal de controle para o gerador de pulsos PWM senoidal.....	47
Figura 4.11: Modelo simulado: sistema de controle e de potência.....	48
Figura 5.1: Sistema a ser Modelado.	52
Figura 5.2: Diagrama de Blocos Geral do Sistema com as Entradas V_i e V_{Ref}	53
Figura 5.3: Diagrama de Blocos do Sistema para o Caso de $V_i=0$	53
Figura 5.4: Diagrama de Blocos do Sistema: a) diagrama geral; b) diagrama com funções de	

transferência.....	54
Figura 5.5: Lugar das raízes de malha aberta para a sequência negativa.....	56
Figura 5.6: Lugar das raízes de malha fechada para a sequência negativa.....	58
Figura 5.7: Lugar das raízes de malha aberta para sequência zero.....	59
Figura 5.8: Lugar das raízes de malha fechada para sequência zero.....	60
Figura 5.9: Lugar das raízes de malha fechada para sequência zero, segunda análise.....	62
Figura 6.1: Tensões e correntes no PCC com carga crescente e sem compensação.....	65
Figura 6.2: Detalhe das tensões e correntes no PCC com carga crescente e sem compensação.	65
Figura 6.3: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga crescente e sem compensação.....	66
Figura 6.4: Tensões de fase eficaz com carga crescente e sem compensação.....	67
Figura 6.5: Tensões e correntes no PCC com carga crescente e compensador ativo.....	68
Figura 6.6: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga crescente e compensador ativo.....	69
Figura 6.7: Correntes no DS-STATCOM com carga crescente e compensador ativo.....	70
Figura 6.8: Potências trifásicas no DS-STATCOM com carga crescente e compensador ativo.	70
Figura 6.9: Tensões de fase eficaz no PCC com carga crescente e compensação ativa.....	71
Figura 6.10: Tensões e correntes no PCC com carga crescente e compensação passiva.....	72
Figura 6.11: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga crescente e compensação passiva.....	73
Figura 6.12: Sinais de controle dos bancos de capacitores para carga crescente e compensação passiva.....	74
Figura 6.13: Tensões de fase eficaz no PCC com carga crescente e compensação passiva.....	75
Figura 6.14: Tensões e correntes de fase do banco de capacitores C com carga crescente e compensação passiva.....	75
Figura 6.15: Tensões e correntes no PCC com carga crescente e compensação híbrida.....	76
Figura 6.16: Detalhe das tensões e correntes no PCC com carga crescente e compensação híbrida.....	77
Figura 6.17: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga crescente e compensação híbrida.....	78
Figura 6.18: Tensões e correntes no DS-STATCOM com carga crescente e compensação híbrida.....	78

Figura 6.19: Tensões para controle do DS-STATCOM enviadas ao gerador de pulsos PWM com carga crescente e compensação híbrida.	79
Figura 6.20: Tensões de fase eficaz no PCC com carga crescente e compensação híbrida.....	80
Figura 6.21: Potências trifásicas no DS-STATCOM e corrente do link DC do inversor com carga crescente e compensação híbrida.	80
Figura 6.22: Tensões e correntes no PCC com carga decrescente e compensador híbrido.	81
Figura 6.23: Detalhe das tensões e correntes no PCC com carga decrescente e compensador híbrido.....	82
Figura 6.24: Componentes de sequência com carga decrescente e compensador híbrido.	83
Figura 6.25: Correntes no DS-STATCOM com carga decrescente e compensador híbrido. ...	83
Figura 6.26: Potências trifásicas no DS-STATCOM e corrente do link DC do inversor com carga decrescente e compensador híbrido.	84
Figura 6.27: Tensões eficazes de fase no PCC com carga decrescente e compensador híbrido.	84
Figura AII.1: Tensões e correntes no PCC com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	96
Figura AII.2: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	97
Figura AII.3: Correntes no DS-STATCOM com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	97
Figura AII.4: Potências trifásicas no DS-STATCOM e corrente do link DC do inversor com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	98
Figura AII.5: Tensões de fase eficaz no PCC com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	98
Figura AIII.1: Tensões e correntes no PCC com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	99
Figura AIII.2: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	100
Figura AIII.3: Tensões e correntes no DS-STATCOM com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	100
Figura AIII.4: Potências trifásicas no DS-STATCOM e corrente do link DC do inversor com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	101
Figura AIII.5: Tensões de fase eficaz com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.	101

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Cálculo para Acionamento dos Bancos de Capacitores.....	40
Tabela 6.1: Características das Cargas Simuladas.....	63
Tabela 6.2: Cronologia de Eventos das Simulações para a Situação de Carga Crescente.....	64
Tabela 6.3: Resultados para carga equilibrada e desequilibrada com diferentes tipos de compensação.....	85
Tabela 6.4: Resultados para diferentes potências de transformadores.	85
Tabela AIV.1: Grandezas Elétricas do Sistema Equivalente.	102
Tabela AIV.2: Grandezas Elétricas do Transformador.....	102
Tabela AIV.3: Grandezas Elétricas dos Tiristores dos Capacitores.	102
Tabela AIV.4: Grandezas Elétricas do DS-STATCOM.	103

Nomenclatura

Símbolos

a	\Rightarrow Operador matemático utilizado na matriz de transformação das componentes simétricas.
C	\Rightarrow Capacitor genérico.
C_1 e C_2	\Rightarrow Capacitores do barramento CC do conversor.
Controle C	\Rightarrow Sinal para disparo dos tiristores do banco de capacitores C.
Controle 2C	\Rightarrow Sinal para disparo dos tiristores do banco de capacitores 2C.
Controle 4C	\Rightarrow Sinal para disparo dos tiristores do banco de capacitores 4C.
$\cos \theta$	\Rightarrow Fator de potência.
d	\Rightarrow Eixo do referencial síncrono.
dV	\Rightarrow Queda de tensão diferencial sobre a impedância equivalente do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC).
Estado	\Rightarrow Variável que armazena a combinação binária para acionamentos dos bancos de capacitores.
G_c	\Rightarrow Função de transferência geral do controlador PI.
G_m	\Rightarrow Função de transferência geral do medidor.
G_s	\Rightarrow Função de transferência geral do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC).
G_{stat}	\Rightarrow Função de transferência geral do DS-STATCOM, incluindo o indutor de saída.
Hab C	\Rightarrow Sinal para habilitar/desabilitar o acionamento do banco de capacitores C.
Hab 2C	\Rightarrow Sinal para habilitar/desabilitar o acionamento do banco de capacitores 2C.
Hab 4C	\Rightarrow Sinal para habilitar/desabilitar o acionamento do banco de capacitores 4C.
i	\Rightarrow Corrente elétrica antes de compensação.
i_2	\Rightarrow Corrente elétrica após a compensação.
IBC	\Rightarrow Vetor das correntes de linha do banco de capacitores C.
I_C	\Rightarrow Corrente de linha no banco de capacitores.
I_{COM}	\Rightarrow Módulo da corrente de compensação.
I_L	\Rightarrow Corrente de linha na carga.

I_{pcc}	⇒ Corrente na linha do PCC.
I_s	⇒ Corrente de linha do sistema de alimentação.
I_{stat}	⇒ Corrente de saída do DS-STATCOM.
j	⇒ Operador matemático complexo.
K_i	⇒ Ganho integral de um controlador.
K_{i0}	⇒ Ganho integral do controlador PI para a componente de sequência zero.
K_{i2}	⇒ Ganho integral do controlador PI para a componente de sequência negativa.
K_{ma0}	⇒ Ganho de malha aberta da função de transferência para a componente de sequência zero.
K_{ma2}	⇒ Ganho de malha aberta da função de transferência para a componente de sequência negativa.
K_{mf0}	⇒ Ganho de malha fechada da função de transferência para a componente de sequência zero.
K_{mf2}	⇒ Ganho de malha fechada da função de transferência para a componente de sequência negativa.
K_p	⇒ Ganho proporcional de um controlador.
K_{p0}	⇒ Ganho proporcional do controlador PI para a componente de sequência zero.
K_{p2}	⇒ Ganho proporcional do controlador PI para a componente de sequência negativa.
L	⇒ Indutância genérica entre o compensador e o sistema.
L_i	⇒ Indutância projetada entre o compensador e o sistema.
L_{i0}	⇒ Indutância de sequência zero projetada entre o compensador e o sistema.
L_{i2}	⇒ Indutância de sequência negativa projetada entre o compensador e o sistema.
L_s	⇒ Indutância equivalente do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC).
L_{s0}	⇒ Indutância equivalente de sequência zero do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC).
L_{s2}	⇒ Indutância equivalente de sequência negativa do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC).
N	⇒ Potência aparente.
P	⇒ Potência ativa
P_{STAT}	⇒ Potência ativa no conversor.
Pulso	⇒ Variável que apresenta o momento dos pulsos enviado ao módulo de controle dos bancos de capacitores.
q	⇒ Eixo do referencial síncrono.

Q	\Rightarrow Potência reativa.
Q_{STAT}	\Rightarrow Potência reativa no conversor.
R	\Rightarrow Resistência equivalente genérica do sistema elétrico.
R_s	\Rightarrow Resistência equivalente do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC).
R_{s0}	\Rightarrow Resistência equivalente de sequência zero do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC).
R_{s2}	\Rightarrow Resistência equivalente de sequência negativa do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC).
s	\Rightarrow Operador da transformada de Laplace.
Sw	\Rightarrow Chave genérica podendo representar um tiristor ou IGBT.
t	\Rightarrow Variável que representa o tempo.
$T_1..T_n$	\Rightarrow N-ésima chave genérica podendo representar um tiristor ou IGBT.
T_θ	\Rightarrow Matriz de transformação do referencial abc para o referencial qd.
T_θ^{-1}	\Rightarrow Matriz de transformação do referencial qd para o referencial abc.
T^0	\Rightarrow Matriz de transformação do referencial qd para a componente simétrica de sequência zero na forma retangular.
T^1	\Rightarrow Matriz de transformação do referencial qd para a componente simétrica de sequência positiva na forma retangular.
T^2	\Rightarrow Matriz de transformação do referencial qd para a componente simétrica de sequência negativa na forma retangular.
T^{-1}	\Rightarrow Matriz de transformação das componentes simétricas para o referencial qd.
$V1$	\Rightarrow Tensão no gerador do sistema elétrico.
$V2$	\Rightarrow Tensão na carga.
V_a	\Rightarrow Tensão da fase A em relação ao neutro.
$V_{a\ rms}$	\Rightarrow Tensão eficaz da fase A no PCC.
V_{abc}^{120*}	\Rightarrow Vetor de referência das componentes da tensão de sequência positiva, negativa e zero das fases a, b e c.
V^{abc}	\Rightarrow Vetor das tensões de fase.
V_{ab}	\Rightarrow Tensão de linha eficaz entre as fases A e B.
V_b	\Rightarrow Tensão da fase B em relação ao neutro.
VBC	\Rightarrow Vetor das tensões de linha do banco de capacitores C.
$V_{b\ rms}$	\Rightarrow Tensão eficaz da fase B no PCC.
V_{bc}	\Rightarrow Tensão de linha eficaz entre as fases B e C.
V_c	\Rightarrow Tensão da fase C em relação ao neutro.
$V_{c\ rms}$	\Rightarrow Tensão eficaz da fase C no PCC.
V_{ca}	\Rightarrow Tensão de linha eficaz entre as fases C e A.

V_{COM}	\Rightarrow Módulo da tensão nos terminais do compensador.
V_{DC}	\Rightarrow Tensão no barramento CC do conversor.
V_d^a	\Rightarrow Componente d da tensão de fase V_a .
V_d^b	\Rightarrow Componente d da tensão de fase V_b .
V_d^c	\Rightarrow Componente d da tensão de fase V_c .
V_d^{abc}	\Rightarrow Vetor das tensões V_a , V_b e V_c projetadas sobre o eixo d do referencial síncrono.
V_d^0	\Rightarrow Componente de sequência zero das tensões de fase no eixo d do referencial síncrono.
V_d^1	\Rightarrow Componente de sequência positiva das tensões de fase no eixo d do referencial síncrono.
V_d^2	\Rightarrow Componente de sequência negativa das tensões de fase no eixo d do referencial síncrono.
V_{neg}	\Rightarrow Tensão de sequência negativa no referencial dq.
V_q^a	\Rightarrow Componente q da tensão de fase V_a .
V_q^b	\Rightarrow Componente q da tensão de fase V_b .
V_q^c	\Rightarrow Componente q da tensão de fase V_c .
V_q^{abc}	\Rightarrow Vetor das tensões V_a , V_b e V_c projetadas sobre o eixo q do referencial síncrono.
V_q^0	\Rightarrow Componente de sequência zero das tensões de fase no eixo q do referencial síncrono.
V_q^1	\Rightarrow Componente de sequência positiva das tensões de fase no eixo q do referencial síncrono.
V_q^2	\Rightarrow Componente de sequência negativa das tensões de fase no eixo q do referencial síncrono.
V_{qd}^a	\Rightarrow Vetor tensão das componentes nos eixos q e d da fase a.
V_{qd}^b	\Rightarrow Vetor tensão das componentes nos eixos q e d da fase b.
V_{qd}^c	\Rightarrow Vetor tensão das componentes nos eixos q e d da fase c.
V_{qd}^{abc}	\Rightarrow Vetor tensão das componentes nos eixos q e d das fases a, b e c.
V_{qd}^0	\Rightarrow Vetor tensão das componentes nos eixos q e d da componente de sequência zero.
V_{qd}^1	\Rightarrow Vetor tensão das componentes nos eixos q e d da componente de sequência positiva.
V_{qd}^2	\Rightarrow Vetor tensão das componentes nos eixos q e d da componente de sequência negativa.
V_{qd}^{120}	\Rightarrow Vetor tensão das componentes nos eixos q e d das componentes de sequência positiva, negativa e zero.
$V\angle_{qd}^0$	\Rightarrow Componente polar, módulo e fase, de sequência zero no referencial qd.

$V_{\angle qd}^1$	⇒ Componente polar, módulo e fase, de sequência positiva no referencial qd.
$V_{\angle qd}^2$	⇒ Componente polar, módulo e fase, de sequência negativa no referencial qd.
$V_{\angle qd}^{0*}$	⇒ Componente polar de referência, módulo e fase, de sequência zero no referencial qd.
$V_{\angle qd}^{1*}$	⇒ Componente polar de referência, módulo e fase, de sequência positiva no referencial qd.
$V_{\angle qd}^{2*}$	⇒ Componente polar de referência, módulo e fase, de sequência negativa no referencial qd.
$V_{qd\ rms}^{1*}$	⇒ Vetor das tensões de fase eficazes da componente de sequência positiva no referencial qd.
V_{ref}	⇒ Tensão de referência.
V_{ref0}	⇒ Tensão de referência para o controlador de sequência zero.
V_{ref2}	⇒ Tensão de referência para o controlador de sequência negativa.
V_{PCC}	⇒ Tensão no ponto de conexão comum.
$V_{PCC\ COM}$	⇒ Tensão compensada no ponto de conexão comum.
V_{pos}	⇒ Tensão de sequência positiva no referencial dq.
$V_{pos\ rms}$	⇒ Tensão de sequência positiva eficaz no referencial dq.
$V_{stat\ control}$	⇒ Tensões de fase de referência para o gerador de pulsos do inversor PWM.
V_t	⇒ Tensão terminal ou do PCC.
V_{t0}	⇒ Tensão terminal ou do PCC para a componente de sequência zero.
V_{t2}	⇒ Tensão terminal ou do PCC para a componente de sequência negativa.
V_{zero}	⇒ Tensão de sequência zero no referencial dq.
V_1	⇒ Componente de sequência positiva das tensões de um sistema trifásico.
V_2	⇒ Componente de sequência negativa das tensões de um sistema trifásico.
V_0	⇒ Componente de sequência zero das tensões de um sistema trifásico.
X	⇒ Reatância equivalente do sistema elétrico
X_L	⇒ Reatância entre o ponto de conexão e o compensador

Letras Gregas

β	⇒ Coeficiente utilizado no cálculo do fator de desequilíbrio
ω	⇒ Frequência angular da rede
θ	⇒ Ângulo instantâneo da tensão da rede em relação à fase A

$\Delta\varphi$	\Rightarrow Ângulo entre o fasor da tensão na fonte de tensão que representa o sistema CA e o fasor que representa a tensão nos terminais do conversor.
ϕ	\Rightarrow Ângulo de deslocamento entre tensão e corrente.
ϕ_a	\Rightarrow Ângulo inicial da fase A
ϕ_b	\Rightarrow Ângulo inicial da fase B
ϕ_c	\Rightarrow Ângulo inicial da fase C
δ	\Rightarrow Ângulo de defasagem entre a tensão do gerador e a tensão na carga.
δ'	\Rightarrow Ângulo de defasagem entre a tensão do gerador e a tensão na carga após compensação.
φ	\Rightarrow Ângulo entre os vetores de potência ativa e aparente.

Siglas

DC	\Rightarrow Direct Current.
D-STATCOM	\Rightarrow Distribution-Static synchronous VAR compensators.
DS-STATCOM	\Rightarrow Distribution secondary-static synchronous VAR compensators.
FD	\Rightarrow Fator de desequilíbrio
FC-TCR	\Rightarrow Fixed capacitor thyristor-controlled reactor.
PCC	\Rightarrow Ponto de conexão comum.
SVC	\Rightarrow Static VAR compensator.
TCR	\Rightarrow Thyristor-controlled reactor.
TL	\Rightarrow Tensão de leitura.
TSC	\Rightarrow Thyristor-switched capacitor.
TSC-TCR	\Rightarrow Combined Thyristor-switched capacitor and Thyristor-controlled reactor.

Capítulo 1: Introdução

Por muito tempo o controle do nível de tensão foi efetuado através de soluções passivas e indiretamente através do controle do fator de potência, ou seja, da energia reativa presente no sistema elétrico de potência.

Com o surgimento de cargas geradoras de harmônicos e sua disseminação também nos ambientes residencial e comercial, tornou-se necessária uma solução diferente, capaz de tratar as distorções provocadas nas ondas de tensão.

Uma solução é a compensação de energia reativa que é definida como o gerenciamento da energia reativa para melhorar o desempenho do sistema de potência CA [1], uma vez que a maioria dos problemas de qualidade da energia pode ser atenuada ou solucionada com um adequado controle da energia reativa.

Este trabalho escolhe uma topologia entre as várias existentes já apresentadas por vários estudiosos e analisa um compensador híbrido de reativos a ser aplicado em redes secundárias de distribuição.

Após a apresentação de alguns conceitos relacionados à compensação de energia reativa e as estratégias de controle utilizadas, são apresentados os resultados das várias simulações efetuadas no ambiente MATLAB/Simulink[®], que permitirão identificar claramente as vantagens da topologia adotada.

Dentre os mais importantes fenômenos indesejados nos sistemas elétricos quando associados às cargas não lineares, se destacam as contaminações de componentes harmônicas, aumento da demanda de potência reativa e flutuações de tensão. Os fenômenos citados produzem efeitos para o aumento de perdas no sistema elétrico, causam aquecimento excessivo em máquinas rotativas, podem gerar interferência significativa em circuitos de controle e regulação, podendo causar ainda operações indevidas ou inconsistentes de equipamentos, trazendo prejuízos enormes ao processo produtivo.

Considerando-se as exigências do setor elétrico brasileiro para uma melhoria da

qualidade do fornecimento de energia elétrica expressa através da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, verifica-se a necessidade de soluções técnicas avançadas, porém de custo competitivo, capazes de atender às exigências de conformidade da tensão elétrica exigida tanto pelos clientes quanto pelo órgão regulador.

Esse tema é tratado atualmente pelo Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, aprovado pela ANEEL através de sua Resolução Normativa nº 395/2009,

Para proteger o consumidor de possíveis falhas de operação ou defeitos decorrentes de valores inadequados de tensão de alimentação, os valores admissíveis de tensão de alimentação estão regulamentados no PRODIST [2]. Tem como faixa adequada de tensão para um sistema secundário com tensão nominal 220/127V os valores $(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$, onde TL é a tensão de leitura.

O trabalho apresentado analisa a aplicação de um compensador híbrido de reativos que, a partir do controle das componentes de sequência da tensão do ponto de conexão comum – PCC, controle a componente de sequência positiva com o emprego de elementos passivos (capacitores), destinando o conversor CC-CA apenas para a correção das componentes de sequência negativa e zero. Não se trabalha com compensação harmônica.

Para alcançar o objetivo, o capítulo dois apresenta de forma resumida as técnicas de compensação de reativos com especial atenção ao STATCOM. O capítulo três aborda a teoria de componentes simétricas e de referencial síncrono para sistemas desequilibrados. De forma bem mais detalhada, o capítulo quatro apresenta o compensador híbrido proposto neste trabalho evidenciando as técnicas de compensação utilizadas para cada uma das componentes de sequência, bem como o modelo simulado no MatLab/Simulink®. No capítulo cinco são projetados os controladores das componentes de sequência negativa e zero através da análise do lugar das raízes. Em seguida, apresentando os resultados das simulações para variações crescentes e decrescentes de carga, o capítulo seis mostra vários gráficos com as tensões e correntes no PCC e nos bancos de capacitores, permitindo observar os efeitos de compensação da tensão por cada uma das técnicas, separadas e juntas. Ao final, o capítulo sete trás os comentários e conclusões sobre a proposta de compensador híbrido apresentada.

Capítulo 2: Técnicas de Compensação de Energia Reativa

As soluções empregadas para compensação da energia reativa sempre foram os condensadores síncronos rotativos, os indutores e capacitores.

De acordo com a configuração adotada, ou seja, de como é conectado o compensador ao sistema elétrico de potência, pode-se ter uma compensação do tipo série ou shunt, ambas utilizadas para modificar as características elétricas naturais desse sistema elétrico. A compensação série modifica os parâmetros do sistema de transmissão, enquanto que a compensação shunt modifica a impedância equivalente da carga. O fluxo de potência reativa que flui pelo sistema pode ser controlado para os dois casos, aumentando-se o desempenho de todo o sistema de potência.

Com o avanço no estudo de soluções para aplicação em eletrônica de potência, obtiveram-se dispositivos com maior confiabilidade, maiores velocidades de chaveamento e maiores capacidades para operação em tensões e correntes elevadas.

2.1. Princípios da Compensação de Reativos

O uso de compensadores de reativos evita a circulação de energia reativa entre carga e fonte, melhorando a estabilidade do sistema elétrico de potência. Na compensação shunt, se a energia é fornecida próxima à carga, a corrente de linha pode ser reduzida, reduzindo-se perdas de energia e melhorando a regulação de tensão no barramento da carga.

Para o caso de cargas indutivas a compensação é realizada por capacitores, fontes de tensão ou fontes de corrente. O uso de fontes de tensão ou corrente ao invés de indutores ou capacitores para realizar a compensação apresenta a vantagem de que a geração de energia reativa é independente do nível de tensão do ponto de conexão comum - PCC.

A compensação série, por sua vez, é realizada em sua maioria por capacitores para diminuir a reatância equivalente da linha na frequência do sistema, podendo ser realizada

também por dispositivo fonte de tensão ou corrente.

Podem ser observados na Figura 2.1 os efeitos da compensação reativa. Quando a aplicação desta ocorre próximo à carga, é possível reduzir a corrente de linha do sistema, o que provoca uma melhoria da tensão no PCC, uma vez que com a redução da corrente do sistema, reduzem-se as perdas e a potência total exigida da fonte.

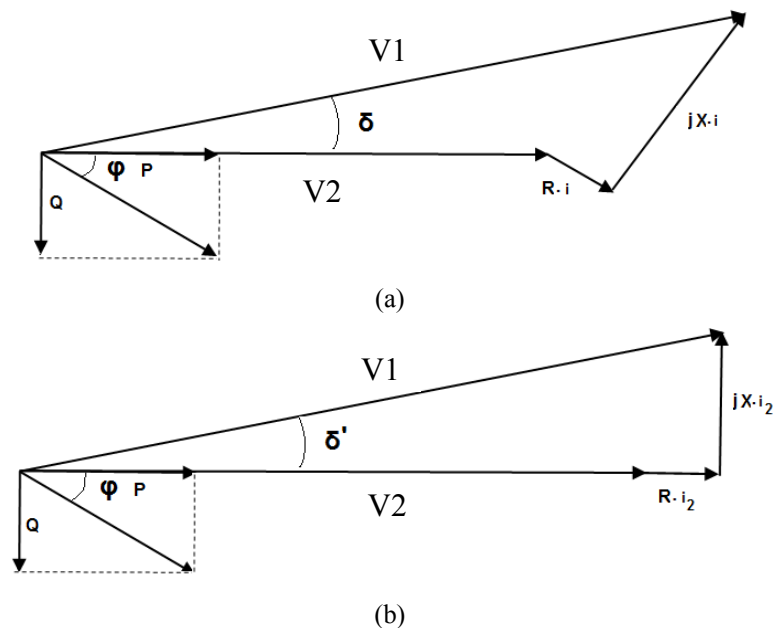


Figura 2.1: Compensação shunt em um sistema elétrico de potência radial: a) sistema sem a compensação reativa; b) sistema com a compensação reativa. [1] Modificada.

2.2. Compensadores de Reativos Tradicionais

Os compensadores de reativos normalmente encontrados são os capacitores fixos ou chaveados mecanicamente, geradores síncronos, compensadores de reativos estáticos, SVC (Static VAR Compensator), como TSC (thyristor-switched capacitor), TCR (thyristor-controlled reactor), apresentados na Figura 2.2, FC-TCR (fixed capacitor thyristor-controlled reactor) e TSC-TCR, apresentados na Figura 2.3.

O emprego de capacitores fixos ou mecanicamente chaveados apresenta como desvantagem o fato de, em determinados momentos do dia, possibilitar a ocorrência de sobretensão, no período considerado de carga leve, e elevadas correntes de inrush.

O TSC e o TCR podem ser controlados pelo ângulo de fase. A energia reativa fornecida ou absorvida pelos compensadores será função da tensão média fornecida aos mesmos que, está diretamente relacionada ao controle efetuado sobre os tiristores.

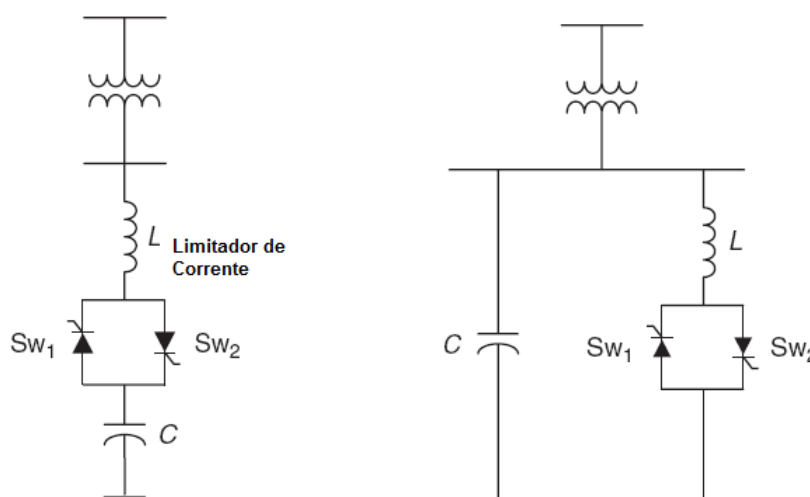


Figura 2.2: Compensadores de reativos tradicionais: (a) TSC - Capacitor chaveado a tiristor; (b) TCR - Reator controlado a tiristor. [1] Modificada.

Os geradores síncronos, por sua vez, melhoram a estabilidade do sistema e mantêm as tensões dentro dos limites desejados sob variações de carga e situações de contingência [1]. No entanto, apresentam elevados custos, incluindo o custo de manutenção, e enorme quantidade de equipamentos de proteção, além de contribuir para aumentar o nível de curto-circuito no ponto de acoplamento e não poder ser controlado suficientemente rápido para atuar nas situações de rápidas variações de carga.

Os TSC's, capacitores chaveados a tiristor, podem ser ligados provocando o mínimo de perturbação se os tiristores forem ligados quando a tensão do capacitor for igual à da rede. Os TSC's apresentam atraso médio de meio ciclo e nenhuma geração de harmônicos se a corrente transitória for, de fato, atenuada. Como desvantagens o TSC apresenta a tensão reversa sobre o tiristor igual ao dobro da tensão de pico da rede e a necessidade de dois tiristores para cada capacitor, o que torna o custo da configuração mais elevado. Uma forma de reduzir o custo é substituir um dos tiristores da configuração antiparalela por um diodo. Dessa forma eliminam-se, também, as correntes de inrush quando os tiristores são disparados fora do tempo adequado.

A configuração TSC-TCR combinados apresenta baixa geração de harmônicos,

flexibilidade de controle e operação, baixa quantidade de transitórios e maiores custos de implementação, uma vez que é composto por dois sistemas de compensação.

A Figura 2.3 (b) apresenta um TCR na configuração trifásica de 6 pulsos. Como o TCR geralmente possui um capacitor fixo sua configuração também é descrita como FC-TCR.

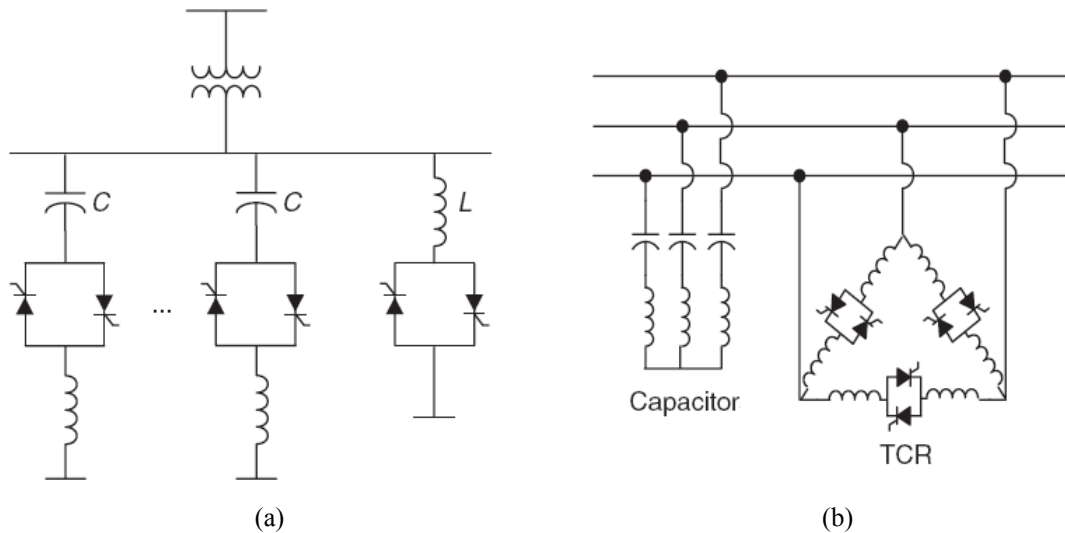


Figura 2.3: Compensadores de reativos tradicionais: (a) TSC-TCR combinados; (b) FC-TCR – Reator controlado a tiristor e capacitor fixo – Configuração para 6 Pulsos. [1] Modificada.

2.3. Compensadores Síncronos Estáticos - STATCOM

Capazes de gerar ou absorver energia reativa sem requerer grandes bancos de capacitores ou reatores, os compensadores síncronos estáticos utilizam dispositivos semicondutores de gate comutado. Suas principais vantagens são a redução significativa de tamanho, a potencial redução de custo alcançada a partir da eliminação de um grande número de elementos passivos e a baixa capacidade relativa requerida para as chaves semicondutoras.

Utilizados para estabilizar sistemas de transmissão, melhorar a regulação de tensão, corrigir o fator de potência e também corrigir desequilíbrio de cargas, esses conversores podem ser utilizados para a implementação de compensadores série ou em derivação.

Quando conectado em derivação, a configuração recebe o nome de STATCOM (Static Compensator), cuja topologia básica está mostrada na Figura 2.4 e a operação é descrita a

seguir.

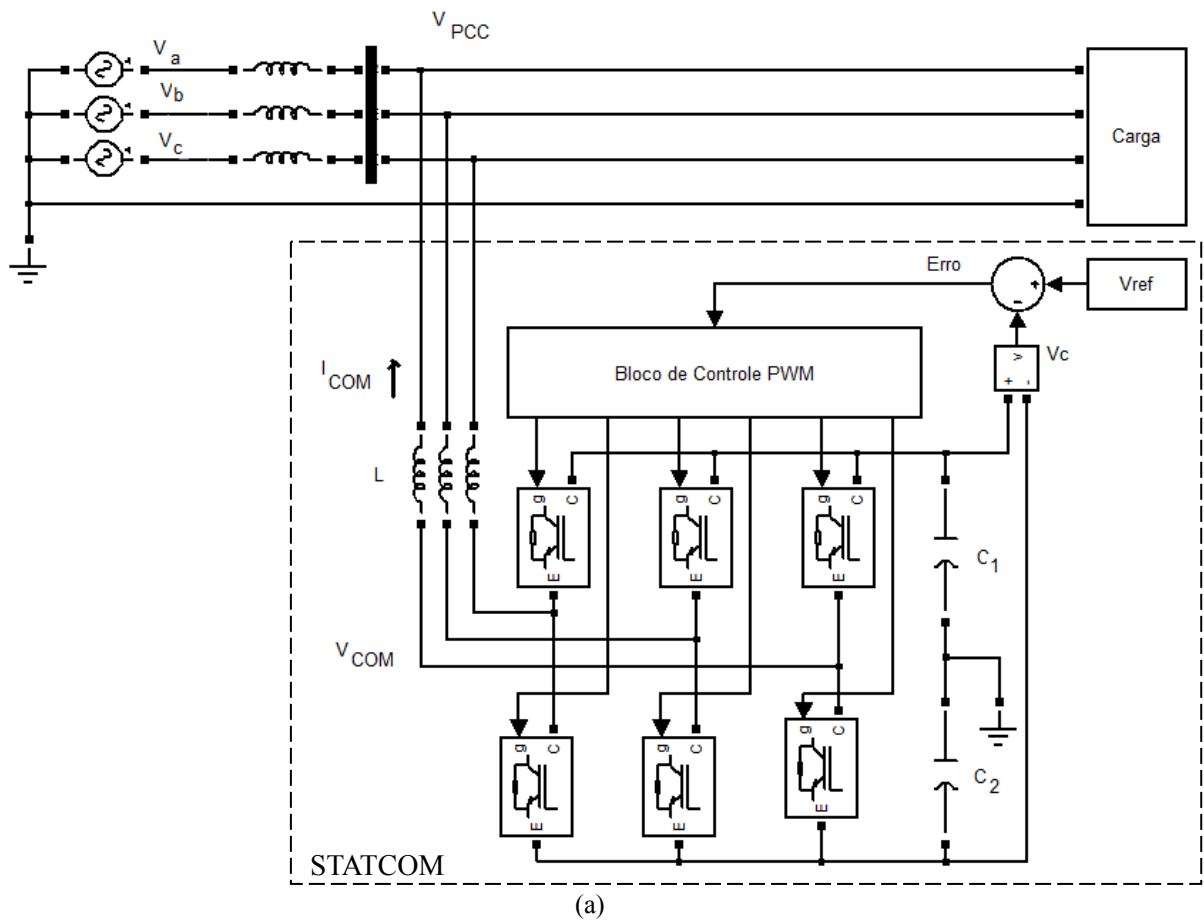


Figura 2.4: Compensador de reativos auto-comutado: (a) Topologia do STATCOM; (b) Diagrama vetorial para compensação em avanço ($V_{COM} > V_{PCC}$); (c) Diagrama vetorial para compensação em atraso ($V_{COM} < V_{PCC}$).

O compensador síncrono estático é implementado com um inversor e conectado em paralelo com o sistema de potência através de um reator de acoplamento, gerando tensões trifásicas senoidais equilibradas na frequência fundamental com amplitude e deslocamento do ângulo de fase controláveis.

Trabalhando como uma fonte de tensão controlada, o STATCOM injeta corrente reativa no sistema de potência, controlando indiretamente o módulo da tensão no PCC.

O controle da energia reativa é feito pelo ajuste da amplitude da componente fundamental da tensão de saída V_{COM} . Quando V_{COM} é maior que a tensão V_{PCC} o compensador de reativos gera energia reativa e quando V_{COM} é menor que a tensão V_{PCC} o compensador absorve energia reativa. Este princípio de operação é similar ao do compensador síncrono. A corrente de compensação pode estar avançada ou atrasada e é dependente da amplitude relativa de V_{PCC} e V_{COM} .

A tensão V_C do capacitor conectado ao link DC do conversor é mantida constante e igual ao valor de referência V_{REF} com uma malha de controle de realimentação especial que controla o deslocamento do ângulo de fase entre V_{PCC} e V_{COM} .

A amplitude da tensão de saída do conversor (V_{COM}) pode ser controlada pela mudança do índice de modulação do padrão de chaveamento ou pela mudança da amplitude da tensão contínua V_C do conversor. Respostas mais rápidas são obtidas pela mudança do índice de modulação ao invés da tensão V_C .

A tensão V_C do conversor é alterada pelo ajuste de uma pequena quantidade de energia ativa absorvida pelo conversor e definida pela equação:

$$P = \frac{V_{PCC} * V_{COM}}{X_L} * \sin(\delta) \quad (2.1)$$

Onde X_L é a reatância conectada ao conversor e δ é o ângulo de deslocamento de fase entre V_{PCC} e V_{COM} .

Para altas tensões são propostas topologias mais sofisticadas para os conversores. Algumas delas são: Compensadores de vários níveis, compensadores de três níveis, compensadores de vários níveis com portadora deslocada, conversores de vários níveis otimizado [1].

Diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura empregando o STATCOM, por exemplo, [3], [4], [5], [6] e [7].

2.4. O Compensador Estático na Distribuição – DSTATCOM

O compensador estático pode ser aplicado tanto na transmissão quanto na distribuição de energia elétrica. Para deixar claro o nível de aplicação, tem-se usado o termo DSTATCOM para uso na distribuição e, mais recentemente, DS-STATCOM nas aplicações em baixa tensão (distribuição secundária). Com tal terminologia emprega-se então, neste trabalho, um DS-STATCOM em conjunto com bancos de capacitores.

Como as tarefas serão repartidas entre eles conforme as componentes de sequência positiva, negativa e zero, este tema é apresentado no próximo capítulo.

Algumas aplicações no nível de distribuição podem ser encontradas em [8], [9], [10], [11], [12] e [13].

Capítulo 3: Componentes Simétricas

3.1. Componentes Simétricas e o Desequilíbrio

Em 1915, o Dr. C. L. Fortescue formulou uma ferramenta que propôs a decomposição de qualquer sistema de “n” fases desequilibradas nas suas respectivas componentes simétricas equilibradas [14].

A teoria das componentes de sequências [15] mostra que uma sequência qualquer de três fasores desequilibrados pode ser decomposta em três sistemas de fasores equilibrados, denominados componentes simétricas dos fasores originais [14]: uma positiva ou direta, uma negativa ou inversa, e uma nula. Esta decomposição é única, e essas componentes somadas reproduzem a sequência dada.

Aplicando a teoria aos fasores de um sistema trifásico de alimentação elétrica, os valores das componentes simétricas são determinados através da seguinte equação [15]:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

E a transformação inversa apresentada em (3.2) determina os valores das tensões desbalanceadas a partir da equação [15]:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

O fasor a é definido na forma polar por:

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (3.3)$$

Dessa forma, a partir de (3.1) pode-se calcular o valor das componentes de sequência

positiva, negativa e zero dos fasores de tensão do PCC e criar a possibilidade de controlá-las com o objetivo de melhorar o nível de tensão para a carga de um sistema elétrico de potência.

É importante lembrar que a componente de sequência zero somente aparece em sistemas trifásicos a quatro fios.

Já o fator de desequilíbrio de um sistema é definido em [15] como (3.4), que representa a relação percentual entre a componente de sequência negativa e a componente de sequência positiva.

$$FD\% = \frac{|\dot{v}_2|}{|\dot{v}_1|} \quad (3.4)$$

Outra formulação citada no PRODIST [2] é apresentada em (3.5):

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \quad (3.5)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3.6)$$

Onde V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são as tensões eficazes de linha do sistema elétrico.

Para a proposta de um compensador híbrido de reativos, estudou-se o controle independente das componentes de sequência positiva, negativa e zero através do uso de compensadores passivo, (para a componente positiva), e ativo, (para as componentes negativa e zero), com o objetivo de melhorar o nível de tensão no PCC.

Uma vez que a compensação será feita diretamente sobre as componentes de sequência, a utilização, por exemplo, da Teoria da potência ativa e reativa instantâneas [16] não se apresenta vantajosa.

3.2. Referencial Síncrono para Sistemas Desequilibrados

Em [17] é apresentada uma nova metodologia para o controle de STATCOM inseridos em sistemas elétricos de potência com tensões desequilibradas. O método sugere que seja realizada uma ação de controle para cada uma das componentes simétricas da tensão da rede elétrica, após passarem por algumas transformações, para que o compensador forneça ou absorva reativos da rede e compense desequilíbrios.

Duas são as etapas necessárias para a extração das componentes simétricas da tensão. Na primeira etapa, a tensão de cada fase é considerada como sendo uma componente senoidal deslocada de um ângulo de fase ϕ , dadas por:

$$V_a(t) = |V_a| \text{sen}(\omega t + \phi_a) \quad (3.7)$$

$$V_b(t) = |V_b| \text{sen}(\omega t + \phi_b) \quad (3.8)$$

$$V_c(t) = |V_c| \text{sen}(\omega t + \phi_c) \quad (3.9)$$

A tensão no domínio do tempo é transformada para a representação vetorial $V_a(t) = V_{qa} - jV_{da}$ onde as componentes do vetor são suas projeções nos eixos ortogonais q e d (referencial síncrono qd), para a fase a. Os eixos qd giram de forma síncrona com a componente fundamental, com $\theta = \omega t$.

Esta primeira etapa da transformação consiste no deslocamento da tensão de fase no domínio do tempo, processo denominado de *heterodyning* e obtido pela multiplicação da tensão por $2\cos(\theta)$ e $-2\text{sen}(\theta)$, com a finalidade de se produzir dois sinais: um sinal contínuo e um sinal de 2º harmônico.

Após o uso de algumas relações trigonométricas, as componentes vetoriais de $V_a(t)$ podem ser simplificadas para:

$$V_{qa} = |V_a| [\text{sen}(\phi_a) + \text{sen}(\phi_a + 2\theta)] \quad (3.10)$$

$$V_{da} = -|V_a| [\cos(\phi_a) - \cos(\phi_a + 2\theta)] \quad (3.11)$$

Este último termo do sinal é filtrado por um filtro passa baixa sintonizado (120 Hz)

para exprimir a projeção das tensões sobre os eixos qd. O uso do filtro elimina o sinal indesejável, atenua ruídos de freqüências superiores e adiciona um atraso de 7 a 10 ms, o que não representa um grande problema. A Figura 3.1 apresenta esta etapa da transformação.

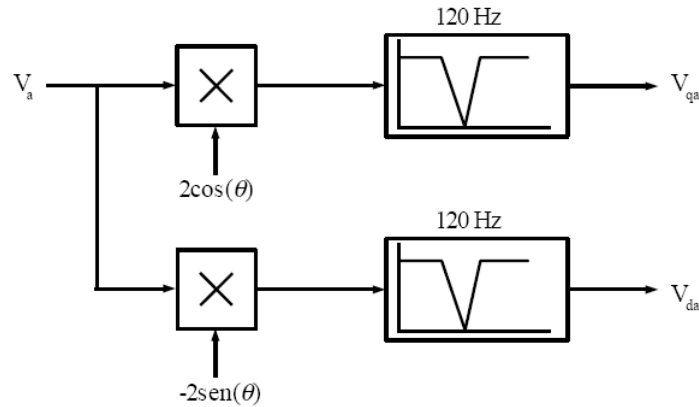


Figura 3.1: Processo de heterodyning e filtragem.

As expressões para as fases V_b e V_c são obtidas de maneira similar.

Os sinais deslocados no domínio do tempo consistem de um termo $\text{sen}(\phi)$ ou $\text{cos}(\phi)$ mais uma componente de segunda ordem filtrada pelo filtro passa baixa. Após a passagem pelo filtro de segunda ordem restam somente sinais contínuos no tempo, $\text{sen}(\phi)$ ou $\text{cos}(\phi)$, que representam a projeção do vetor tensão nos eixos qd. A obtenção do vetor das tensões é mostrado nas equações (3.12) e (3.13).

$$V_{qd}^{abc} = T_{\theta} V^{abc} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qa} \\ V_{da} \\ V_{qb} \\ V_{db} \\ V_{qc} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\cos(\theta) & 0 & 0 \\ -2\text{sen}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 2\cos(\theta) & 0 \\ 0 & -2\text{sen}(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 2\cos(\theta) \\ 0 & 0 & -2\text{sen}(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

A segunda etapa da transformação consiste em obter, a partir do referencial qd, as componentes simétricas, ou seja, as componentes de sequência positiva, negativa e zero, porém com a substituição das tensões V_a , V_b e V_c por suas representações em qd, onde $V_{qd}^{abc} = V_q^{abc} - jV_d^{abc}$.

$$\begin{bmatrix} V_q^1 \\ V_d^1 \\ V_q^2 \\ V_d^2 \\ V_q^0 \\ V_d^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^1 \\ T^2 \\ T^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_q^a \\ V_d^a \\ V_q^b \\ V_d^b \\ V_q^c \\ V_d^c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Onde T^1 , T^2 e T^0 , são definidas como:

$$T^1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{6} & \frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{6} \\ 0 & \frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$T^2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & -\frac{1}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{\sqrt{3}}{6} \\ 0 & \frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{6} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$T^0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Com esta representação, as componentes simétricas podem ser facilmente manipuladas dentro do controlador, pois são representadas por valores constantes.

Na proposta do compensador híbrido de reativos a componente de sequência positiva será utilizada como referência para um controlador que deverá manter a tensão no PCC dentro de uma faixa considerada adequada [2] para utilização, enquanto que as componentes de sequência negativa e zero serão minimizadas pela ação de seus controladores independentes.

A transformação inversa, de componentes simétricas para qd, é dada por:

$$V_{qd}^{abc} = T^{-1} \cdot V_{qd}^{120} \quad (3.18)$$

Onde T^{-1} é dada por:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

As tensões são transformadas de volta para o domínio do tempo por:

$$V^{abc} = T_{\theta}^{-1} \cdot V_{qd}^{abc} \quad (3.20)$$

Onde T_{θ}^{-1} é dada por:

$$T_{\theta}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Estando adequadamente identificadas as componentes de sequência positiva, negativa e zero, é possível atuar no sistema para controlá-las a valores adequados, como é apresentado no próximo capítulo.

Capítulo 4: O Compensador Híbrido

Partindo de estudos anteriores de simulação [3] e implementação [4] que utilizavam um DSTATCOM [8] [9] [18] [19] para efetuar toda a compensação necessária (ajuste da componente de sequência positiva e minimização das componentes de sequência negativa e zero), pensou-se numa solução híbrida para a compensação de reativos, com consequente melhoria do nível de tensão no PCC. Tal solução deveria se apresentar atrativa economicamente, uma vez que a solução apresentada em [3] e [4] exigia um inversor de potência relativamente alta (20kVA) comparado à potência nominal do transformador (75kVA).

A nova proposta de compensador consiste em utilizar a técnica para decomposição da tensão elétrica desequilibrada do PCC em suas componentes simétricas de forma que seja possível compensar a componente de sequência positiva através de compensadores passivos e minimizar as componentes de sequência negativa e zero através de compensador ativo.

4.1. Compensação da Componente de Sequência Positiva

A compensação da componente de sequência positiva é realizada por uma unidade passiva, constituída aqui por três bancos de capacitores trifásicos de capacitâncias C , $2C$ e $4C$, com potências de 5, 10 e 20 kVA [20], respectivamente. Verificou-se que a divisão da potência reativa total em três bancos (Q , $2Q$ e $4Q$) seria suficiente.

De acordo com as características da carga alimentada, o nível de tensão no PCC sofrerá reduções e poderá apresentar desequilíbrios. O presente trabalho propõe que seja utilizada a componente de sequência positiva da tensão medida no PCC, sem nenhuma ação de controle, como parâmetro de entrada do controlador para o acionamento dos bancos de capacitores. Essa medida visa também colaborar para que a unidade de compensação ativa alcance menor valor de potência.

Assim, após a obtenção das componentes simétricas, calcula-se o valor eficaz da componente de sequência positiva que é utilizado como referência para escolha e definição

dos bancos de capacitores que serão acionados, simultaneamente ou não, com o objetivo de adequar o nível de tensão secundário para uma faixa considerada aceitável, entre 124 e 130 V. O fato de a regulamentação [2] delimitar a faixa adequada de tensão, ao invés de um valor único, permite obter maior robustez do controle, com menos comutações. Na Figura 4.1 é apresentado diagrama de conexão dos bancos.

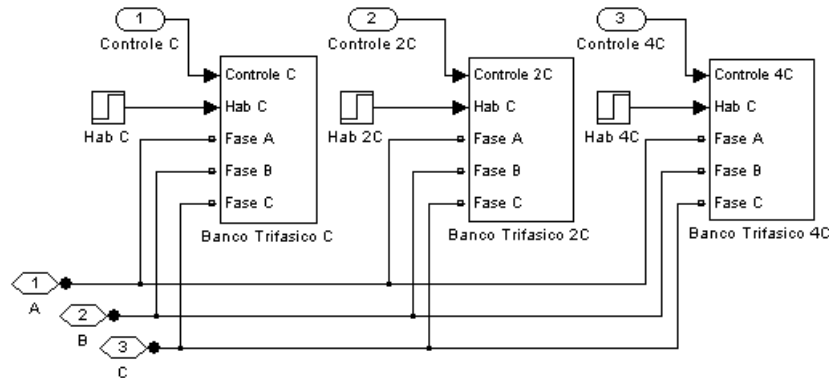


Figura 4.1: Conexão dos bancos de capacitores trifásicos.

Todos os três bancos estão ligados na configuração triângulo (delta), de forma a evitar a circulação de componentes de sequência zero e, principalmente, por proporcionar mais reativos para um mesmo valor de capacitância que uma conexão estrela (Y).

O estágio de potência dos bancos de capacitores é constituído por dois tiristores em antiparalelo por fase. O disparo dos tiristores é realizado quando a tensão da rede se iguala à do capacitor, momento no qual a corrente sobre o mesmo é nula, possibilitando uma entrada suave dos mesmos. Os tiristores em antiparalelo, com operação parecida a de um TRIAC, podem estar inseridos no delta, Figura 4.2 (a), ou fazendo a conexão entre os capacitores em delta e a rede, Figura 4.2 (b). Os dois estágios foram testados e apresentaram bons resultados, sendo o estágio de potência apresentado em 4.2 (a) o escolhido.

Para o acionamento dos bancos de capacitores foi implementada no MatLab/Simulink® uma lógica de controle, apresentada no Apêndice I, através de um bloco “Function” que recebe como entrada a tensão eficaz medida no PCC e um pulso de um sistema de pulsos independente, conforme apresenta a Figura 4.3.

Em seu primeiro processamento, a lógica de controle identifica a tensão no PCC e

propõe a combinação mais apropriada de acionamento dos bancos de capacitores de forma a se obter, já na primeira tentativa, uma tensão secundária entre 124 e 130 volts.

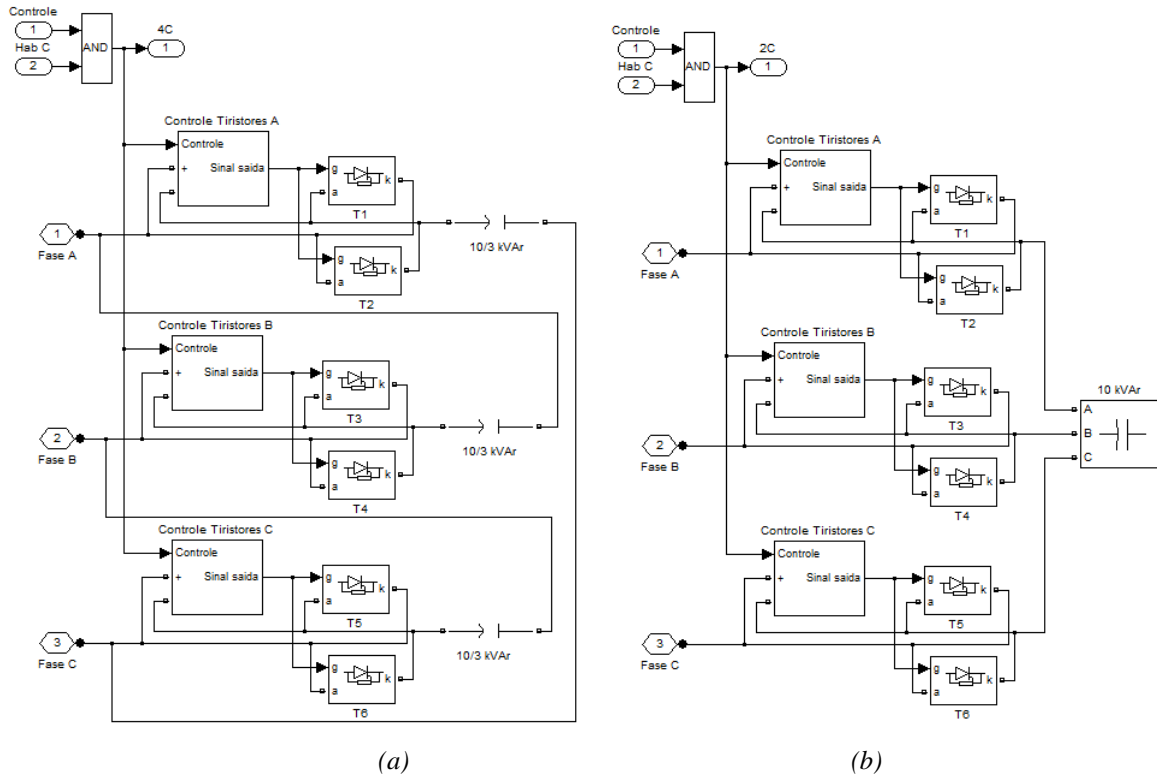


Figura 4.2: Estágio de potência do banco de capacitor de 10 kVAr: (a) tiristores dentro do delta; (b) tiristores fora do delta.

A partir do segundo processamento com a tensão secundária já dentro de níveis desejáveis, ou muito próximo disso, faz-se um ajuste fino da mesma mudando-se para um estado imediatamente acima ou abaixo do estado atual, o que representa ligar ou desligar um ou mais bancos de capacitores.

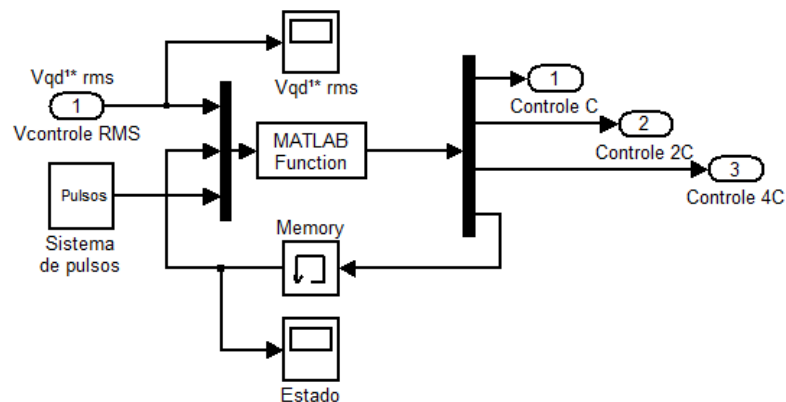


Figura 4.3: Estágio de controle de acionamento dos bancos de capacitores.

O acionamento dos bancos de capacitores é representado por uma variável denominada de “Estado” e identificada por uma combinação binária dos três bancos, variando de 000 a 111, representando oito estados possíveis, onde as combinações 000 e 111 representam todos os capacitores desligados e ligados, respectivamente. A variável “Estado” deve ter n bits, onde n é o número de bancos de reativos utilizados.

Com os níveis de potência especificados para os três bancos de capacitores e suas combinações possíveis, espera-se efetuar a correção da tensão secundária no PCC conforme apresentado na Tabela 4.1.

Controle de acionamento dos capacitores a partir da tensão no PCC. Fator médio de conversão: 3.8kVA / Volt.								
Combinação binária para acionamento.	Tensão no PCC (V)	Potência dos bancos de capacitores trifásicos (kVAr)			Capacitores acionados em função da tensão no PCC			Expectativa de Tensão no PCC após compensação (V)
		C	2C	4C	C	2C	4C	
Estado	V _{PCC}	5	10	20	5	10	20	V _{PCC COM}
000	127	D	D	D	0	0	0	127,0
000	126	D	D	D	0	0	0	126,0
000	125	D	D	D	0	0	0	125,0
000	124	D	D	D	0	0	0	124,0
001	123	L	D	D	5	0	0	124,3
010	122	D	L	D	0	10	0	124,6
011	121	L	L	D	5	10	0	124,9
100	120	D	D	L	0	0	20	125,3
100	119	D	D	L	0	0	20	124,3
101	118	L	D	L	5	0	20	124,6
110	117	D	L	L	0	10	20	124,9
111	116	L	L	L	5	10	20	125,2
111	115	L	L	L	5	10	20	124,2
111	114	L	L	L	5	10	20	123,2
111	113	L	L	L	5	10	20	122,2
111	112	L	L	L	5	10	20	121,2
111	111	L	L	L	5	10	20	120,2
111	110	L	L	L	5	10	20	119,2
111	109	L	L	L	5	10	20	118,2
111	108	L	L	L	5	10	20	117,2
111	107	L	L	L	5	10	20	116,2
111	106	L	L	L	5	10	20	115,2
111	105	L	L	L	5	10	20	114,2
111	104	L	L	L	5	10	20	113,2
111	103	L	L	L	5	10	20	112,2
111	102	L	L	L	5	10	20	111,2
111	101	L	L	L	5	10	20	110,2
111	100	L	L	L	5	10	20	109,2

Tabela 4.1: Cálculo para Acionamento dos Bancos de Capacitores

A tabela foi montada considerando uma carga com fator de potência igual a 0,9 e usando uma potência trifásica de correção de 35 kVAr. No sistema estudado os bancos parciais proporcionam ganho médio de tensão de 1,3 V a cada 5 kVAr. Sendo muito conservador, determinou-se que tensões no PCC abaixo de 124 V requerem correção.

Com isso, para tensões entre 124 V e 130 V não é tomada nenhuma ação. Para tensões no PCC abaixo de 124 V, é selecionada a combinação binária de acionamento dos reativos que, em teoria, eleva a tensão acima de 124 V.

Por outro lado, se há reativos conectados e a tensão sobe acima de 130 V, bancos são desligados de forma à tensão final estar entre 124 V e 130 V.

Como se pode observar, a soma das potências dos bancos de capacitores trifásicos é igual a 35 kVAr e esta proporciona um ganho médio de 9 V para a tensão no PCC, quando alimentando uma carga desequilibrada com fator de potência de 0,9. A lógica de acionamento binário de reativos é apresentada no Apêndice I.

Sabendo-se que existem três faixas de tensão classificadas em [2] como crítica ($tensão < 109V$), precária ($109V \leq tensão < 116V$) e adequada ($116V \leq tensão < 133V$), considerando apenas as tensões inferiores a 133 V, e considerando o ganho médio esperado com a aplicação dos capacitores, seria possível passar da região crítica para a precária (ou adequada, em um ou dois casos) e da precária para a adequada, podendo representar postergação de investimentos na rede de baixa tensão, eliminação da possibilidade de multas para uma concessionária de energia e a melhoria do nível de tensão no PCC através de uma solução sem necessidade de obras imediatas.

Para efeito de registro e comparação, inicialmente foi testado compensar a componente de sequência positiva através de um banco de capacitores de apenas 17,5 kVAr, isto é, metade da potência definida por este estudo. A solução testada, ainda que limitada, poderia ser aplicada em algumas situações. Os resultados das simulações estão apresentados nos Apêndices II e III, mas sua busca e visualização são recomendadas somente no final, de forma a facilitar a compreensão pelo leitor.

4.2. Compensações das Componentes de Sequência Negativa e Zero

Como a proposta é compensar as componentes de sequência negativa e zero através de um compensador ativo, torna-se necessário a utilização de um conversor CC-CA numa topologia a quatro fios, ou seja, que permita a existência de um condutor neutro, sem o qual não seria possível a compensação da componente de sequência zero. Optou-se por utilizar um conversor alimentado em tensão.

4.2.1. O Conversor CC-CA Trifásico de Tensão

O conversor CC-CA trifásico de tensão, com forma de onda retangular na saída, é uma das estruturas mais empregadas na indústria e é normalmente aplicado em altas potências [21].

À estrutura básica do inversor trifásico de tensão, apresentada na Figura 4.4, é necessário acrescentar seis diodos colocados em antiparalelo com cada chave comandada, gerando um interruptor bidirecional em corrente, que permite a circulação de corrente durante a abertura das chaves quando as cargas forem indutivas. Esses diodos desempenham a função de roda-livre para a circulação da corrente de carga.

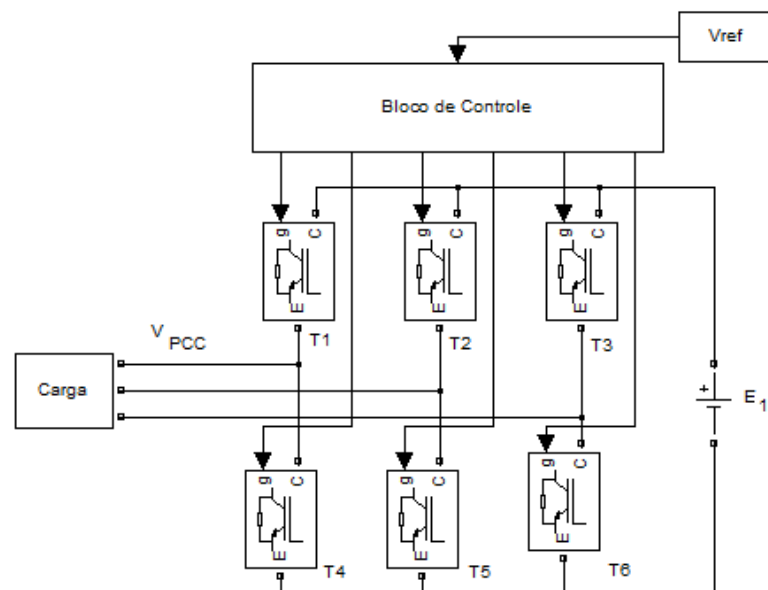


Figura 4.4: Conversor CC-CA de tensão – estrutura básica.

A estrutura é constituída por três braços inversores em meia ponte, onde cada braço representa uma fase do sistema trifásico, que é conectado à carga trifásica. Para se conseguir o efeito de fonte trifásica, cada terminal de saída de cada braço inversor é conectado alternadamente, a cada meio período, no terminal positivo e negativo da fonte de alimentação CC. A tensão de saída trifásica é obtida preservando um ângulo de defasagem de 120° entre as seqüências de chaveamento de cada braço inversor. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam duas formas de se construir um conversor CC-CA de tensão a quatro condutores.

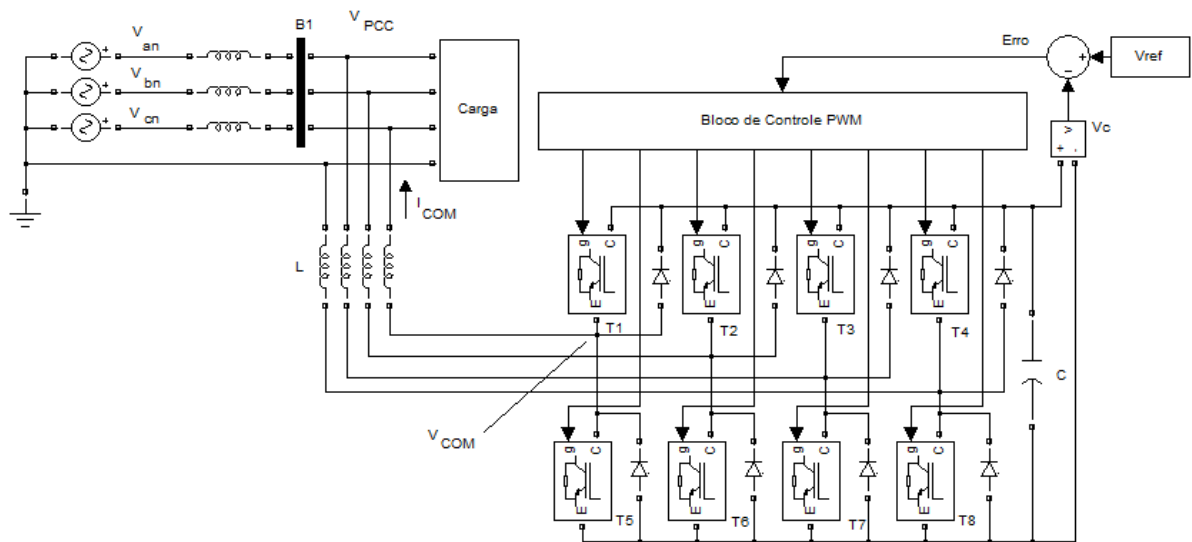


Figura 4.5: Sistema elétrico e conversor CC-CA de tensão com quatro braços e quatro condutores.

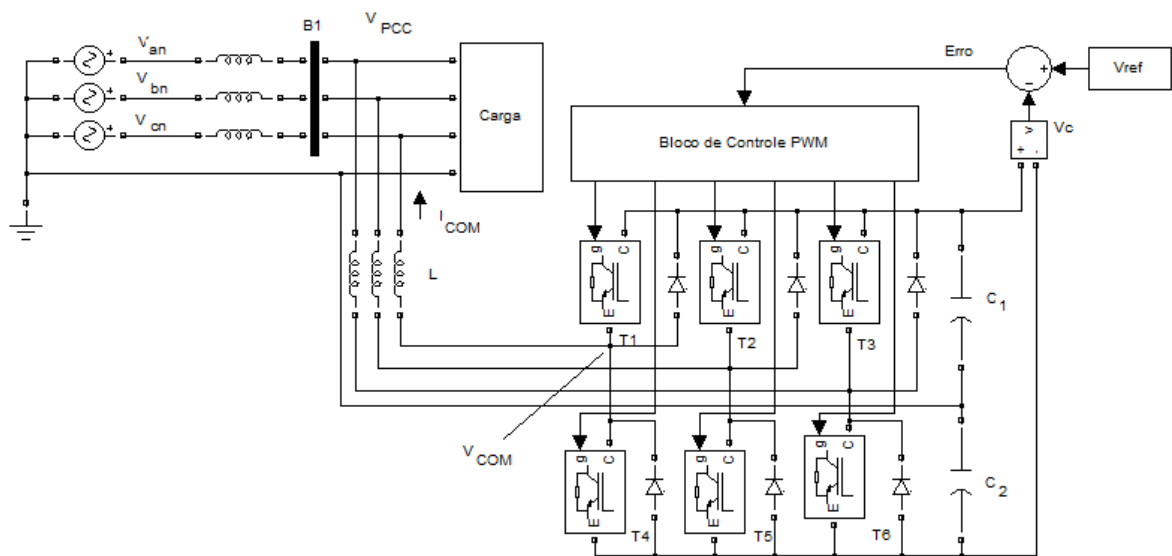


Figura 4.6: Sistema elétrico e conversor CC-CA de tensão com três braços e quatro condutores.

A estrutura da Figura 4.5, apesar de apresentar maior possibilidade de controle,

representa maior custo na implementação por necessitar de duas chaves / diodos a mais.

Uma solução possível, demonstrada pela Figura 4.6, é transformar o capacitor único de uma topologia básica de um conversor de três braços em dois capacitores em série e conectar um condutor neutro ao ponto médio desse barramento CC.

Assim, decidiu-se pela utilização de um conversor trifásico de tensão em ponte com três braços e um ponto neutro. Cada braço da ponte é formado por dois IGBT's com diodos ligados em paralelo, também representado na Figura 4.6, e a tensão de saída do conversor é controlada através de técnica de modulação tipo PWM senoidal. Esta topologia foi selecionada por apresentar um menor custo e fazer uso de um inversor convencional já difundido e confiável.

A topologia adotada, no entanto, exige um mecanismo de controle da tensão dos capacitores, porque haverá circulação das componentes de sequência zero pelos capacitores C1 e C2, com retorno pelo neutro, quando as correntes de linha (I_{COM}) do STATCOM apresentarem tais componentes, o que provoca variação das tensões nos capacitores C1 e C2. A implementação com controle da tensão nos capacitores bem como o efeito da circulação da corrente I_{COM} nos capacitores pode ser visto em [4].

Durante as simulações foi utilizada a estrutura da Figura 4.6 com a inclusão de duas fontes de tensão em substituição aos capacitores citados, para efeito de agilizar a simulação.

4.2.2. Extração das Componentes Simétricas

A extração das componentes simétricas é realizada a partir da teoria explicitada no capítulo 3. As tensões medidas no PCC passam por um filtro anti-aliasing, um filtro passa baixa com frequência de corte em 1kHz e são amostradas a cada 100 μ s.

Após a primeira etapa de transformação denominada “heterodyning”, que consiste na transformação para o referencial qd síncrono e a passagem por um filtro passa baixa sintonizado na 2ª harmônica, passa-se à segunda etapa onde, de fato, se obtém as componentes simétricas dos fasores de tensão do PCC, a partir das tensões no referencial qd.

A Figura 4.7 explicita estas duas etapas.

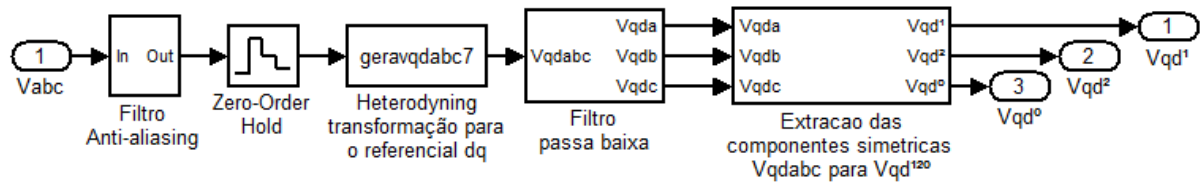


Figura 4.7: Extração das Componentes Simétricas.

4.2.3. Controle das Tensões de Sequência Negativa e Zero

Após o processo de conversão das tensões V_{abc} para V_{qd} , sua filtragem e a obtenção das componentes de sequência positiva, negativa e zero, efetua-se a ação de controle sobre as componentes de sequência negativa e zero que, somadas à componente de sequência positiva, sem que tenha sofrido qualquer ação de controle, irão compor uma referência para o gerador de sinal PWM que comanda o conversor CC-CA de tensão. Com isso, para a rede, o conversor flutua em termos de sequência positiva.

A Figura 4.8 explicita o bloco de controle das componentes de sequência, bem como o valor de referência V_{abc}^{120*} aplicado ao gerador de pulsos PWM.

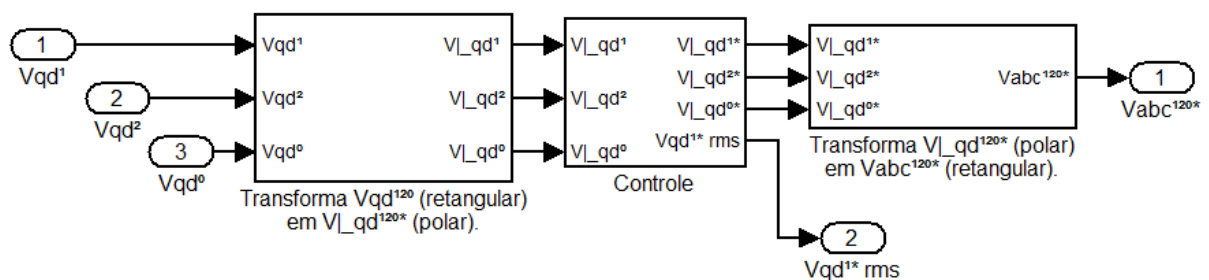


Figura 4.8: Controle das Tensões de Sequência Negativa e Zero.

Na malha de controle as componentes de sequência positiva, negativa e zero são representadas por módulos e fases (fâsor), após transformação para a coordenada polar, o que nos permite manipulá-las ou submetê-las a uma ação de controle.

O controle de tensão de cada sequência, negativa e zero, é feito separadamente, porém de forma semelhante. O valor medido é comparado a um valor de referência, 2,0 para a

componente de seqüência negativa e 0,2 para a componente de seqüência zero, e a diferença ou erro é enviado a um controlador PI. O erro, após a ação de controle, é então somado ao valor medido. A Figura 4.9 mostra o diagrama de controle da componente de seqüência negativa, que é semelhante à de seqüência zero.

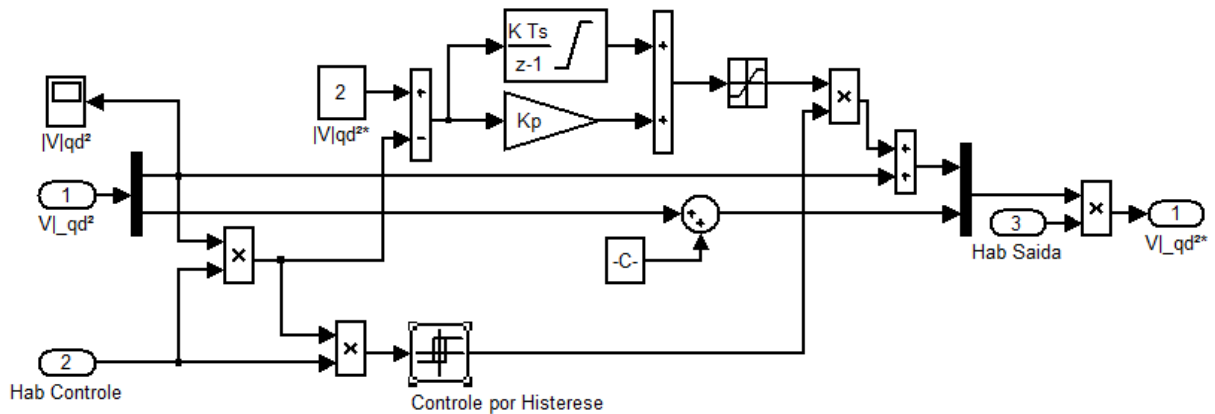


Figura 4.9: Circuito de controle da componente de seqüência negativa no referencial dq.

Sabendo-se que um controlador PI que tenha como referência sinais alternados apresentará erro em regime permanente [22] e que a transformação das tensões do PCC para o referencial síncrono transforma essas tensões alternadas em valores contínuos, conclui-se que o controlador PI atuando sobre as tensões no referencial síncrono, conforme mostrado na Figura 4.9, é uma solução capaz de garantir erro nulo em regime permanente pelo fato de o sinal de referência ser dado por um sinal contínuo.

A componente de seqüência positiva, como já dito, não sofre nenhuma ação de controle, mas é somada às demais componentes de seqüência após passarem pelo controlador, constituindo o sinal V_{abc}^{120*} de controle para as fases a, b e c a ser enviado ao gerador de pulsos PWM senoidal, conforme mostrado na Figura 4.10.

No circuito de controle das componentes de seqüência é necessário somar um ângulo ao ângulo detectado de cada seqüência para se corrigir o atraso no processamento dos sinais (amostragem / processamento), bloco $-C-$ na Figura 4.9. Além disso, em um caso mais realista em que se usem capacitores, a saída do controlador da tensão no barramento CC do inversor também é um ângulo a ser adicionado ao ângulo da seqüência positiva.

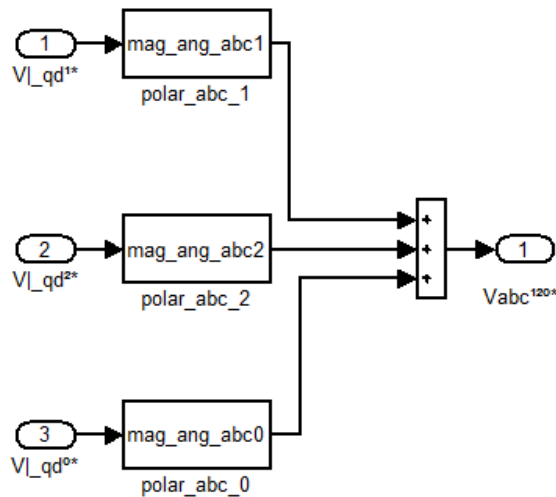


Figura 4.10: Geração do sinal de controle para o gerador de pulsos PWM senoidal.

4.3. Modelo Simulado

Para verificação da técnica proposta realizou-se simulações no MatLab/Simulink® considerando um sistema de distribuição em 13,8 kV que alimenta um transformador de 75 kVA – 13,8/0,22 kV com carga desequilibrada, indutiva e carregamentos em diversos níveis.

O modelo simulado do sistema é apresentado na Figura 4.11. O primário do transformador é conectado a uma fonte de tensão com impedância em série, que representa a impedância de curto-circuito no ponto de entrega de energia da média tensão, aqui pertencente à classe de 15 kV. O PCC, aqui, é considerado o secundário do transformador.

Um conjunto de sensores obtém uma amostra da tensão do PCC que é enviado ao bloco responsável pela decomposição desta em suas componentes de sequência positiva, negativa e zero.

Em seguida, as componentes de sequência negativa e zero passam por um controlador PI que calcula e define o sinal a ser aplicado à entrada do Gerador de Pulsos PWM. No controlador também é calculado o valor eficaz da componente de sequência positiva obtida do PCC que, sem nenhuma ação de controle, é enviado ao controlador do banco de capacitores.

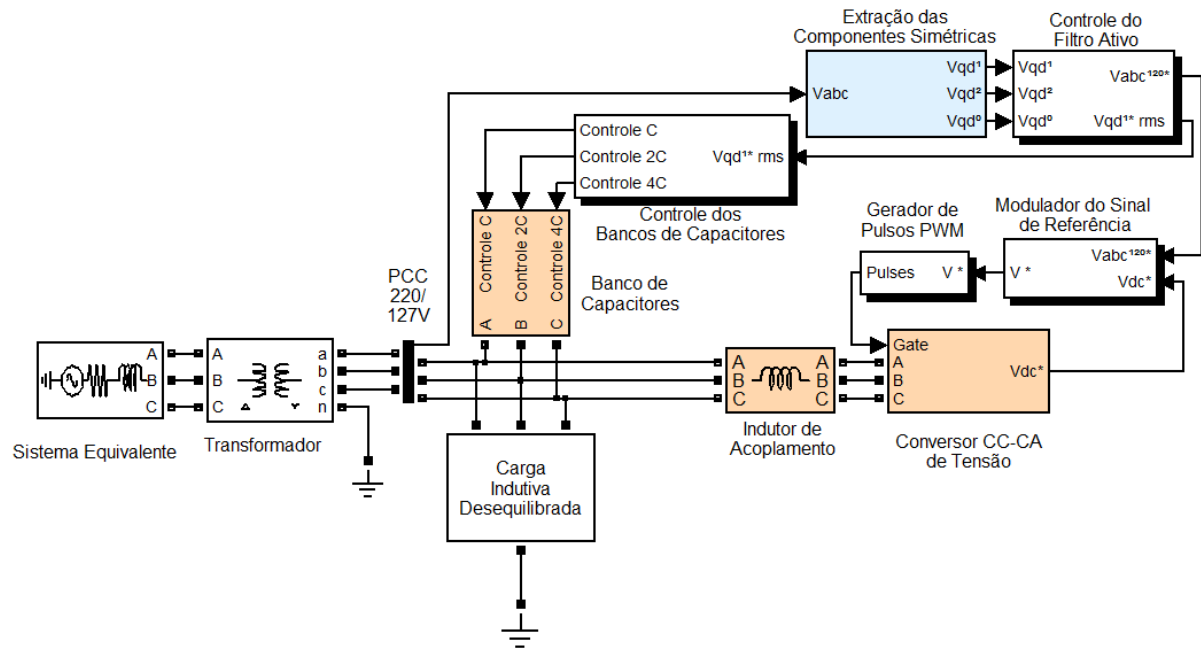


Figura 4.11: Modelo simulado: sistema de controle e de potência.

O conversor, conectado ao PCC através de um indutor de filtro, fornece a energia necessária para a compensação das componentes de sequência negativa e zero, uma vez que a compensação da componente de sequência positiva é realizada pelo banco de capacitores, conforme proposto.

O indutor de filtro/acoplamento L_i que interliga o conversor PWM ao ponto de controle de tensão deve ter um valor entre 0,1 pu e 0,2 pu na base do inversor, valores estes que são baseados na literatura sobre o tema [19]. A necessidade deste indutor é devido ao fato da tensão instantânea na saída do inversor ser um padrão PWM, e diferente, portanto, da tensão de 60 Hz do barramento. O valor deste indutor afeta o desempenho dinâmico do STATCOM, assim como as demais impedâncias do sistema.

Os parâmetros do sistema simulado são apresentados no Apêndice IV.

4.4. Comentários

O controle do banco de capacitores é feito a partir das medidas de tensão do PCC e da lógica de acionamento definida no projeto, resultando em oito combinações possíveis de acionamento dos três bancos existentes, conforme apresentado no capítulo 3, com o objetivo

de se alcançar na saída a faixa de tensão eficaz de referência de sequência positiva.

Já o controle das sequências negativa e zero é realizado com controladores proporcional-integral (PI) no laço de controle, e que desempenham papel fundamental na operação do sistema. Considerando isso, o próximo capítulo faz uma análise do projeto desses reguladores PI.

Capítulo 5: Projeto dos Controladores

O projeto dos controladores das componentes de sequência negativa e zero representa uma etapa de grande importância para o trabalho desenvolvido. Há que se perceber que as componentes de sequência variam seu valor de forma diretamente proporcional à variação dos valores da carga.

A variação destas componentes de sequência com a inserção de banco de capacitores apresenta-se de forma bastante discreta, sendo também diretamente proporcional à quantidade de reativos injetados na rede elétrica.

5.1. Análise do Lugar das Raízes

A característica básica da resposta transitória de um sistema de malha fechada depende essencialmente da localização dos pólos de malha fechada [23].

O lugar das raízes é a localização das raízes da equação característica do sistema de malha fechada quando um parâmetro específico varia de zero a infinito. Com o emprego desse método é possível determinar o valor do ganho de malha K que resulte no coeficiente de amortecimento especificado para os pólos dominantes de malha fechada. O gráfico produzido mostra as contribuições de cada pólo ou zero de malha aberta nas localizações dos pólos de malha fechada.

Dessa forma, com o redesenho do lugar das raízes do sistema pela adição de pólos e zeros na função de transferência de malha aberta do sistema, força-se o novo lugar das raízes a passar pelos pólos de malha fechada desejados no plano- s e que proverão as características de desempenho especificadas, como por exemplo, o coeficiente de amortecimento e a frequência natural não amortecida.

É, todavia, importante observar que a adição de um pólo à função de transferência de malha aberta tem o efeito de deslocar o lugar das raízes para a direita, tendendo a diminuir a estabilidade relativa do sistema e fazendo com que a acomodação da resposta seja mais lenta.

Já a adição de um zero à mesma função de transferência de malha aberta tem o efeito de deslocar o lugar das raízes para a esquerda, tendendo a tornar o sistema mais estável e a acomodação da resposta mais rápida.

5.2. Princípios para Modelagem de um Controlador

Deve-se ter em mente alguns conceitos importantes ao se modelar um controlador: não se pode esquecer que se todos os pólos do sistema são reais, a resposta ao degrau é sobre-amortecida e que os zeros de uma função de transferência de malha fechada podem causar overshoot mesmo se o sistema for sobre-amortecido. Além disso, a resposta de um sistema será sempre dominada pelos pólos mais próximos da origem no plano-s. Quanto mais distantes à esquerda no plano-s estiverem os pólos dominantes, mais rápida será a resposta do sistema, mais cara será a solução e maiores serão os sinais internos [24].

Outro fato importante é que quando um pólo e um zero da função de transferência de um sistema aproximadamente se cancelam, a porção da resposta do sistema associada ao pólo terá uma magnitude menor.

E, finalizando, as especificações no domínio do tempo e frequência são aproximadamente associadas uma com a outra. Enquanto o tempo de subida e a largura de banda são inversamente proporcionais, a margem de fase, margem de ganho e a estabilidade relativa de um sistema em malha fechada estável e amortecimento são inversamente proporcionais.

5.3. Escolha do Controlador

O controlador PI foi escolhido para o controle das componentes de sequência negativa e zero com base na função de transferência do sistema e nos ganhos que o controlador proporciona ao sistema.

A função de transferência de um controlador PI é apresentada na equação (5.1).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{s} \quad (5.1)$$

Entre as vantagens de um controlador PI podemos citar duas que são importantes, devido o sistema utilizado nesse projeto: o fato de o controlador PI ser um filtro passa baixa, filtrando ruídos de alta frequência, e a redução do erro em regime estacionário para zero, ao adicionar um pólo para $s=0$ no caminho direto da função de transferência, aumentando a ordem do sistema original em uma unidade.

O controlador PI também adiciona um zero para $s=-K_i / K_p$ para o caminho direto da função de transferência, melhorando o amortecimento e reduzindo o máximo overshoot com um conseqüente aumento do tempo de subida e melhora a margem de ganho, margem de fase e a estabilidade relativa do sistema.

5.4. Projeto do Controlador

Antes de se projetar o controlador é necessário modelar o sistema, identificando as funções de transferência do inversor, do sistema elétrico de potência e do sistema de medição. A Figura 5.1 mostra o sistema a ser modelado.

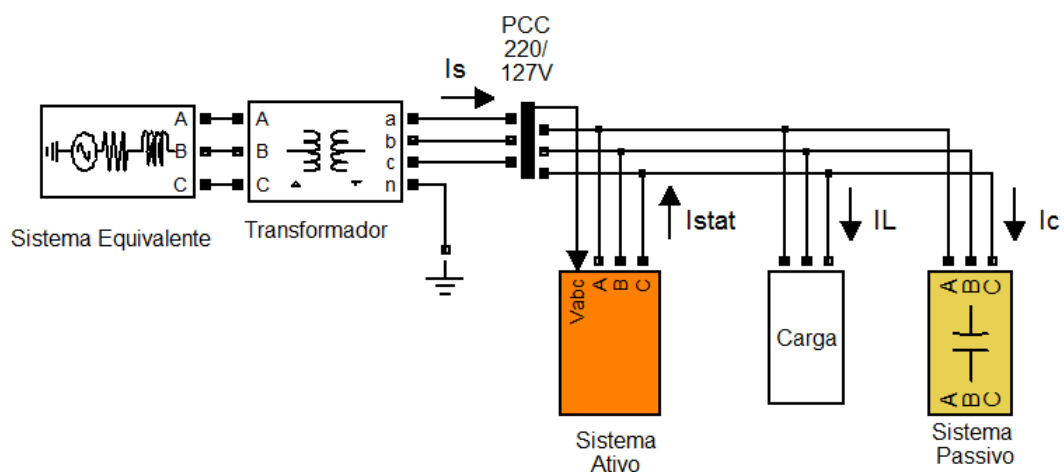


Figura 5.1: Sistema a ser Modelado.

A Figura 5.2 mostra o sistema equivalente através de um diagrama de blocos com suas respectivas funções de transferência.

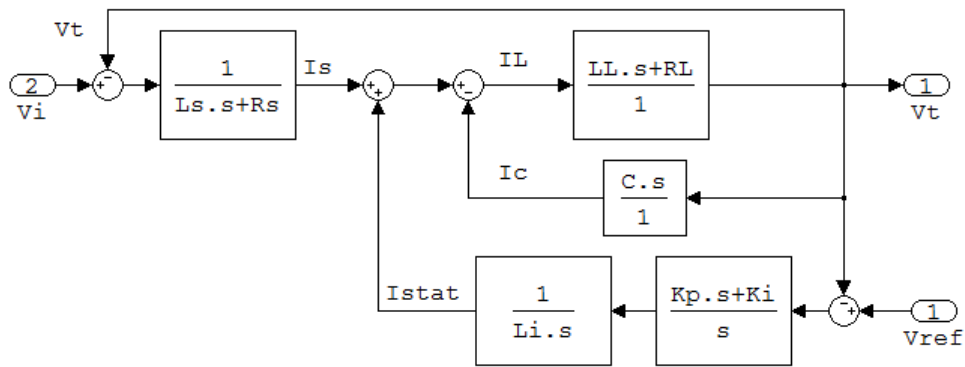


Figura 5.2: Diagrama de Blocos Geral do Sistema com as Entradas V_i e V_{Ref} .

Considerando a entrada V_i nula e rearranjando o diagrama de blocos para a obtenção da relação de interesse, V_t/V_{ref} , obtemos o diagrama da Figura 5.3.

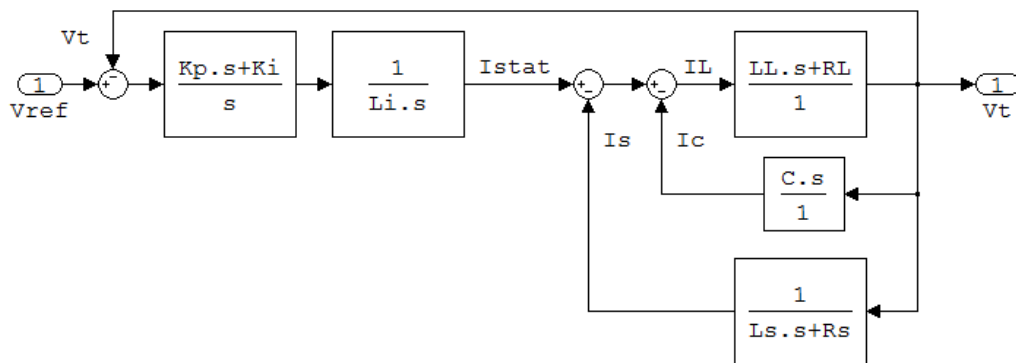


Figura 5.3: Diagrama de Blocos do Sistema para o Caso de $V_i=0$.

A partir da Figura 5.3 é obtida a relação V_t/V_{ref} apresentada através da equação (5.2).

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_p \cdot s + K_i}{L_i \cdot s^2}\right) \cdot \left\{ \frac{(L_S \cdot s + R_S)}{\left[1 + (L_S \cdot s + R_S) \cdot C \cdot s + \frac{(L_S \cdot s + R_S)}{(L_L \cdot s + R_L)}\right]} \right\}}{1 + \left(\frac{K_p \cdot s + K_i}{L_i \cdot s^2}\right) \cdot \left\{ \frac{(L_S \cdot s + R_S)}{\left[1 + (L_S \cdot s + R_S) \cdot C \cdot s + \frac{(L_S \cdot s + R_S)}{(L_L \cdot s + R_L)}\right]} \right\}} \quad (5.2)$$

Considerando que para a frequência fundamental do sistema os termos $(L_S \cdot s + R_S) \cdot C \cdot s$ e $\frac{(L_S \cdot s + R_S)}{(L_L \cdot s + R_L)}$ são muito menores que 1, a equação (5.2) pode ser simplificada de forma a se obter a equação (5.3).

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_p \cdot s + K_i}{L_i \cdot s^2}\right) \cdot (L_s \cdot s + R_s)}{1 + \left(\frac{K_p \cdot s + K_i}{L_i \cdot s^2}\right) \cdot (L_s \cdot s + R_s)} \quad (5.3)$$

A Figura 5.4 mostra o diagrama de blocos equivalente após a simplificação efetuada. A Figura 5.4 (a) mostra os blocos G_c , G_{stat} , G_s e G_m que representam, respectivamente, as funções de transferência do controlador PI que possui os ganhos K_p (proporcional) e K_i (integral), do inversor (com ganho unitário e um indutor de acoplamento L_i), do sistema elétrico (desde a fonte até o PCC) e do medidor, apresentado com ganho unitário.

As variáveis apresentadas na Figura 5.4 (b) (K_p , K_i , L_i , L_s e R_s) recebem o índice 2 e 0, quando as análises envolvem as componentes de sequência negativa e zero, respectivamente. A obtenção dos parâmetros L_{s0} , L_{s2} , R_{s0} , R_{s2} , L_{i0} e L_{i2} levam em consideração a ligação (delta ou estrela) dos componentes do sistema elétrico e são calculados com base em [14] e [15].

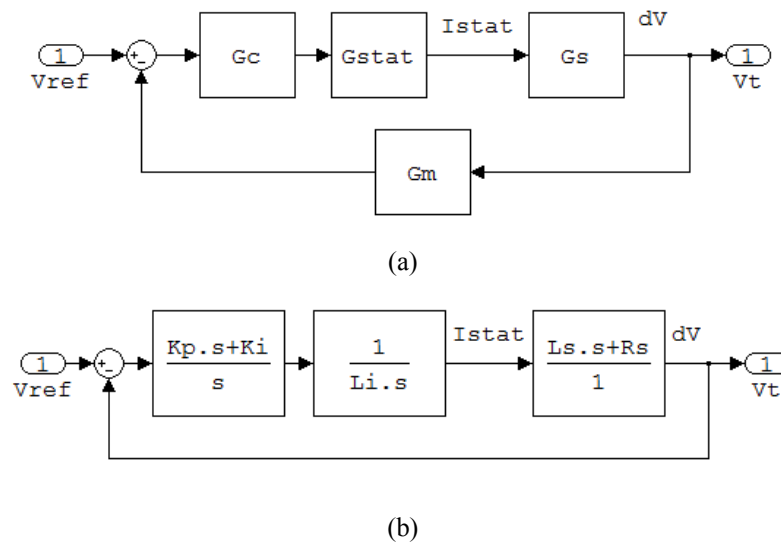


Figura 5.4: Diagrama de Blocos do Sistema: a) diagrama geral; b) diagrama com funções de transferência.

Como se sabe, o método do lugar das raízes, utilizado para o projeto dos controladores, é um método gráfico para a determinação da localização de todos os pólos de malha fechada a partir do conhecimento da localização dos pólos e zeros de malha aberta, à medida que o valor de um parâmetro, normalmente um ganho de malha K , varia de zero a infinito.

Assim, no projeto pelo método do lugar das raízes, o lugar das raízes do sistema é modificado por meio de um compensador, no caso um controlador PI série, de modo que um par de pólos dominantes de malha fechada possa ser colocado na posição desejada. A posição desejada para esses pólos dominantes é obtida a partir da especificação do coeficiente de amortecimento e da frequência natural não amortecida, no domínio da frequência.

5.5. Determinação dos Ganhos do Controlador PI de Sequência Negativa.

5.5.1. Análise da função de transferência de malha aberta, sem controlador

O processo para determinação dos ganhos do controlador se inicia com a análise do lugar das raízes da função de transferência de malha aberta do sistema elétrico de potência e inversor, que representam o ramo direto, cuja função de transferência no caso em estudo é dada por

$$\frac{V_{t2}(s)}{V_{ref2}(s)} = \frac{L_{s2}s + R_{s2}}{L_{i2}s} = \frac{0,0002774.s + 0,01497}{0,0036.s} \quad (5.4),$$

que possui um zero em 53,97 e um pólo em zero, como pode ser observado no lugar das raízes da Figura 5.5.

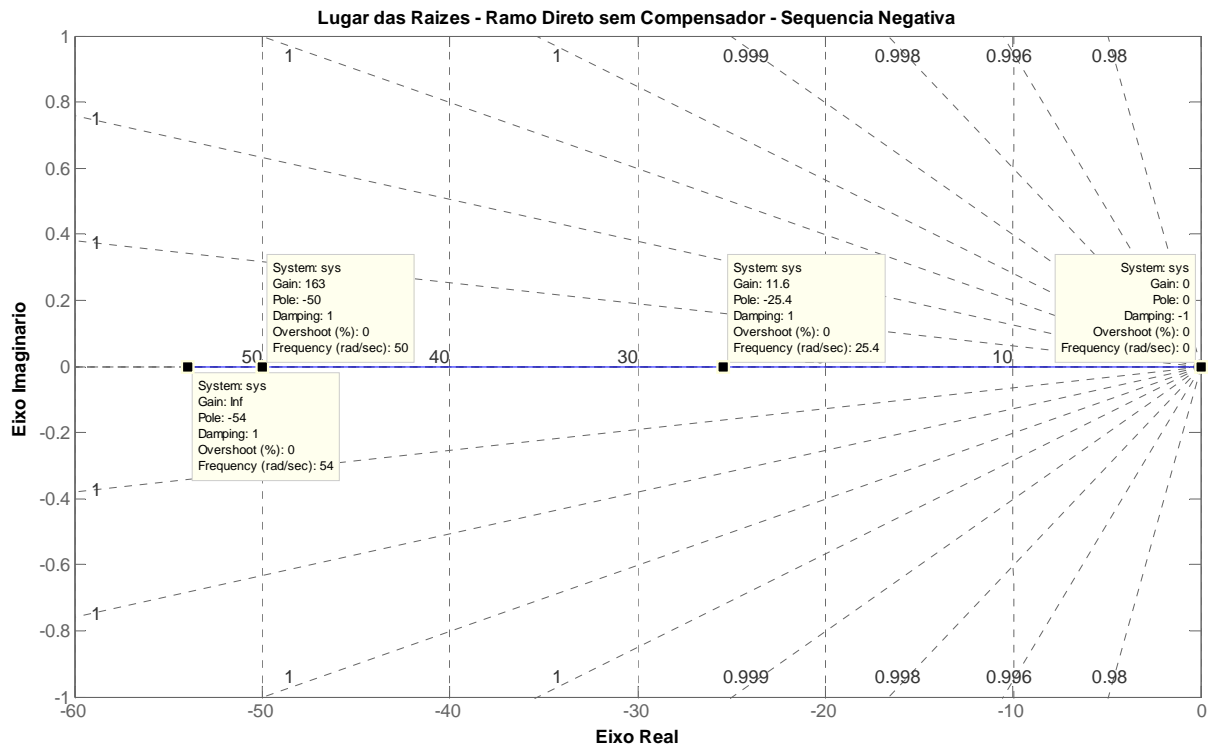


Figura 5.5: Lugar das raízes de malha aberta para a seqüência negativa.

5.5.2. Análise da função de transferência, com controlador

O próximo passo é identificar a adição de pólos e zeros devido à inserção do controlador em série com a função de transferência do sistema. Para esse caso a função de transferência de malha aberta do sistema compensado é dada por

$$\frac{V_{t2}(s)}{V_{ref2}(s)} = K_{ma2} \frac{(s + \frac{K_{i2}}{K_{p2}})(s + \frac{R_{s2}}{L_{s2}})}{s^2} \quad (5.5),$$

o que mostra que o ramo direto tem um pólo duplo na origem e dois zeros: um dado pela relação entre a resistência e indutância do sistema elétrico e outro dado pela relação dos ganhos integral e proporcional do compensador PI. K_{ma2} é dado por:

$$K_{ma2} = \frac{K_{p2} \cdot L_{s2}}{K_{i2}} \quad (5.6)$$

Para que fosse possível construir um Lugar das Raízes que cortasse várias linhas de frequência natural não amortecida, o que permite maiores possibilidades para a escolha de um

fator de amortecimento, utilizou-se o critério de definir o ganho K_p igual a um (1) e o ganho K_i igual ao valor do zero do ramo direto obtido pela relação das variáveis do sistema elétrico de potência. Dessa forma se consegue retirar o lugar das raízes do eixo real, onde o sistema é sobreamortecido.

Assim, ao fechar a malha de controle considerando os ganhos definidos inicialmente para K_p e K_i obtém-se a seguintes equações de transferência geral:

$$\frac{V_{t2}(s)}{V_{ref2}(s)} = K_{mf2} \frac{(s + \frac{K_{i2}}{K_{p2}})(s + \frac{R_{s2}}{L_{s2}})}{\left(s + \frac{K_{p2} \cdot R_{s2}}{K_{p2} \cdot L_{s2} + L_{i2}} + \sqrt{\frac{K_{i2} \cdot R_{s2}}{K_{p2} \cdot L_{s2} + L_{i2}}}\cdot j\right) \left(s + \frac{K_{i2} \cdot L_{s2}}{K_{p2} \cdot L_{s2} + L_{i2}} - \sqrt{\frac{K_{i2} \cdot R_{s2}}{K_{p2} \cdot L_{s2} + L_{i2}}}\cdot j\right)} = \quad (5.7)$$

$$\frac{V_{t2}(s)}{V_{ref2}(s)} = K_{mf2} \frac{0,0002774 \cdot s^2 + 0,02994 \cdot s + 0,8079}{0,003877 \cdot s^2 + 0,02994 \cdot s + 0,8079} \quad (5.8)$$

Essa equação apresenta o ganho K_{mf2} , que representa o ganho de malha fechada de sequência negativa e é dado por:

$$K_{mf2} = \frac{K_{p2} \cdot L_{s2}}{K_{p2} \cdot L_{s2} + L_{i2}} \quad (5.9)$$

É esse ganho que irá variar de zero até infinito para a construção do lugar das raízes. A Figura 5.6 apresenta o Lugar das Raízes de malha fechada para o sistema compensado.

Através do Lugar das Raízes do sistema em malha fechada, escolhe-se o valor de ganho K_{mf2} que atende à especificação de amortecimento definida em 0,707 e que será atribuído ao ganho K_{p2} do compensador PI. Definindo-se K_{p2} , automaticamente define-se K_{i2} , pois a relação entre esses ganhos deverá permanecer constante.

Concluindo a especificação do controlador, determina-se no gráfico do Lugar das Raízes o valor de $K_{p2}=11,7$ e, então, $K_{i2}=631,41$, o que corresponde a deslocar os pólos complexos do sistema mais para a esquerda do plano-s, tornando o sistema mais estável.

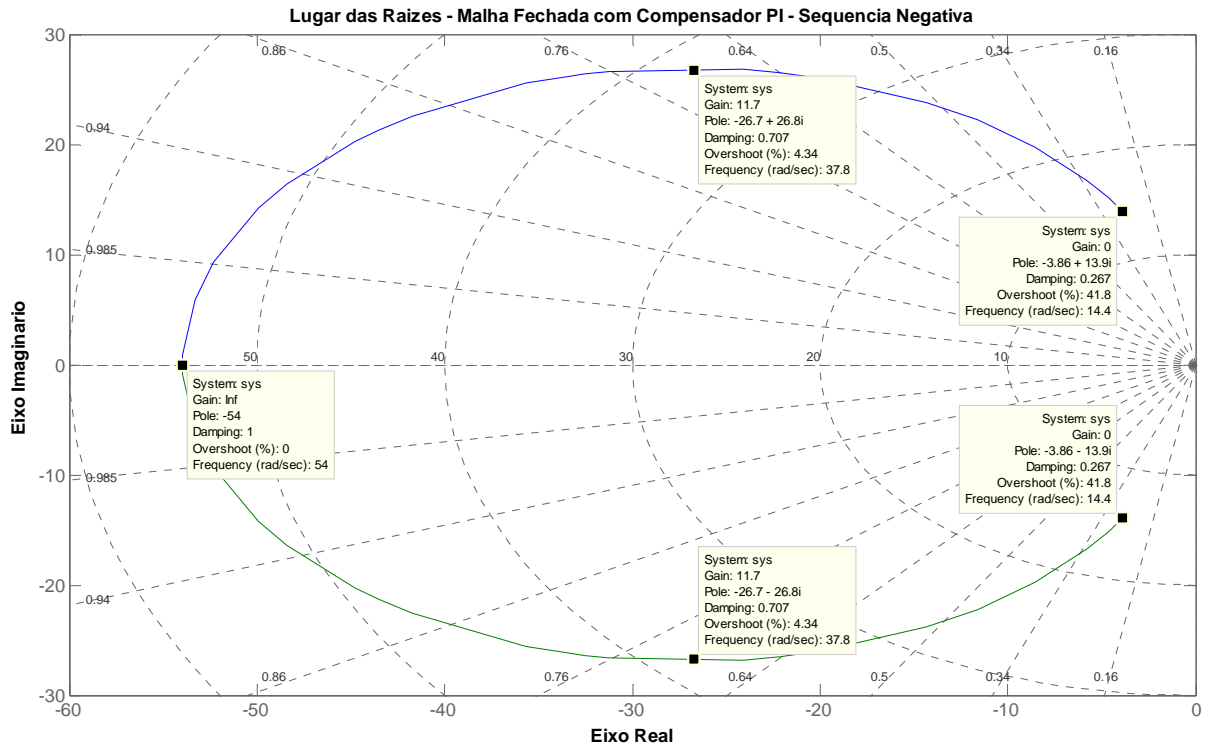


Figura 5.6: Lugar das raízes de malha fechada para a sequência negativa.

5.6. Determinação dos Ganhos do Controlador PI de Sequência Zero

5.6.1. Análise da função de transferência de malha aberta, sem controlador

Seguindo o mesmo procedimento utilizado para determinação dos ganhos do controlador da componente de sequência negativa, obtém-se o gráfico do Lugar das Raízes para a função de transferência do ramo direto da componente de sequência zero, composto pelo sistema elétrico de potência e inversor, que é dada por

$$\frac{V_{t0}(s)}{V_{ref0}(s)} = \frac{L_{S0}S + R_{S0}}{L_{i0}S} = \frac{0,00002329.s + 0,00423}{0,0216.s} \quad (5.10)$$

que possui um zero em 181,63 e um pólo em zero, como pode ser observado na Figura 5.7.

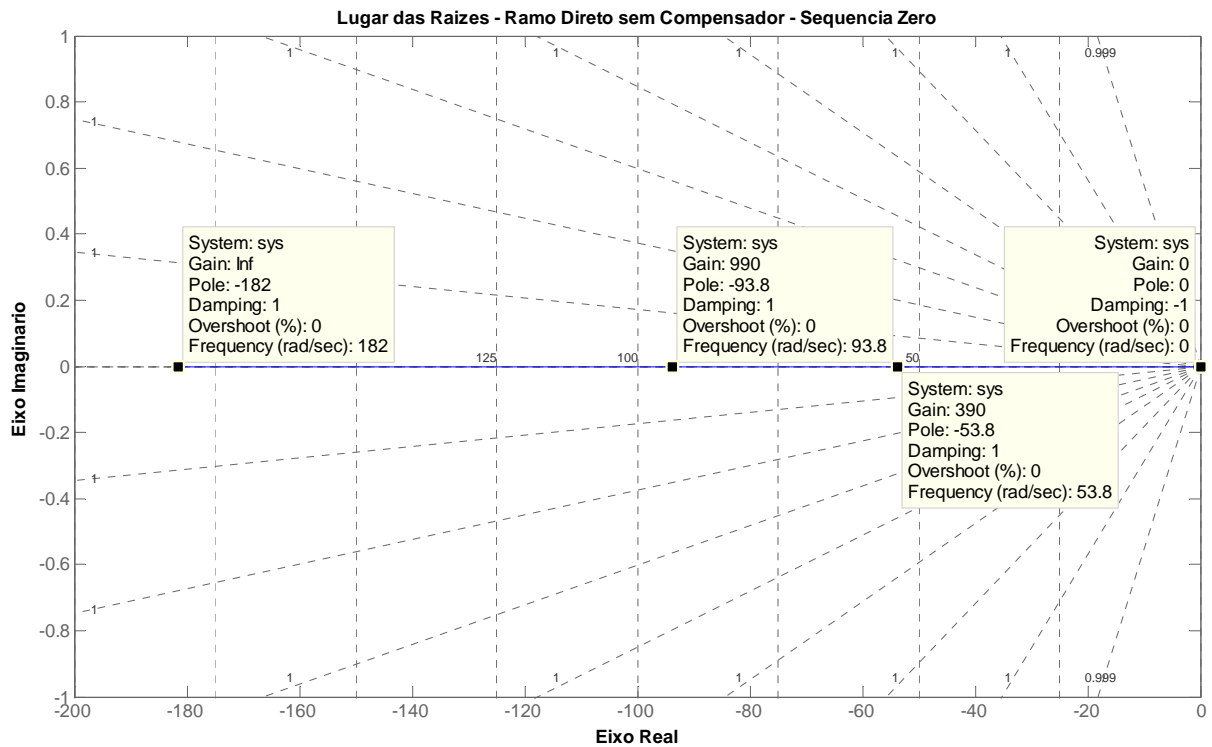


Figura 5.7: Lugar das raízes de malha aberta para sequência zero.

5.6.2. Análise da função de transferência, com controlador

Em seguida, fazendo adaptações às equações obtidas para a componente de sequência negativa, obtém-se a função de transferência de malha aberta do sistema compensado,

$$\frac{V_{t0}(s)}{V_{ref0}(s)} = K_{ma0} \frac{(s + \frac{K_{i0}}{K_{p0}})(s + \frac{R_{s0}}{L_{s0}})}{s^2} \quad (5.11)$$

que, assim como para a componente de sequência negativa, apresenta no ramo direto um pólo duplo na origem e dois zeros: um dado pela relação entre a resistência e indutância de sequência zero do sistema elétrico e outro dado pela relação dos ganhos integral e proporcional do compensador PI.

K_{ma0} é dado por:

$$K_{ma0} = \frac{K_{p0} \cdot L_{s0}}{K_{i0}} \quad (5.12)$$

Utilizando-se $K_{p0}=1$, $K_{i0}=181,63$ e fechando a malha de controle, são obtidas as equações de transferência geral:

$$\frac{V_{t0}(s)}{V_{ref0}(s)} = K_{mf0} \frac{(s + \frac{K_{i0}}{K_{p0}})(s + \frac{R_{s0}}{L_{s0}})}{\left(s + \frac{K_{p0} \cdot R_{s0}}{K_{p0} \cdot L_{s0} + L_{i0}} + \sqrt{\frac{K_{i0} \cdot R_{s0}}{K_{p0} \cdot L_{s0} + L_{i0}}}\right) \left(s + \frac{K_{i0} \cdot L_{s0}}{K_{p0} \cdot L_{s0} + L_{i0}} - \sqrt{\frac{K_{i0} \cdot R_{s0}}{K_{p0} \cdot L_{s0} + L_{i0}}}\right)} = \quad (5.13)$$

$$\frac{V_{t0}(s)}{V_{ref0}(s)} = K_{mf0} \frac{0,00002329 \cdot s^2 + 0,00846 \cdot s + 0,7683}{0,02162 \cdot s^2 + 0,00846 \cdot s + 0,7683} \quad (5.14)$$

Essa equação apresenta o ganho K_{mf0} , que representa o ganho de malha fechada. É esse ganho que varia de zero até infinito para a construção do lugar das raízes. A Figura 5.8 apresenta o Lugar das Raízes de malha fechada para o sistema compensado.

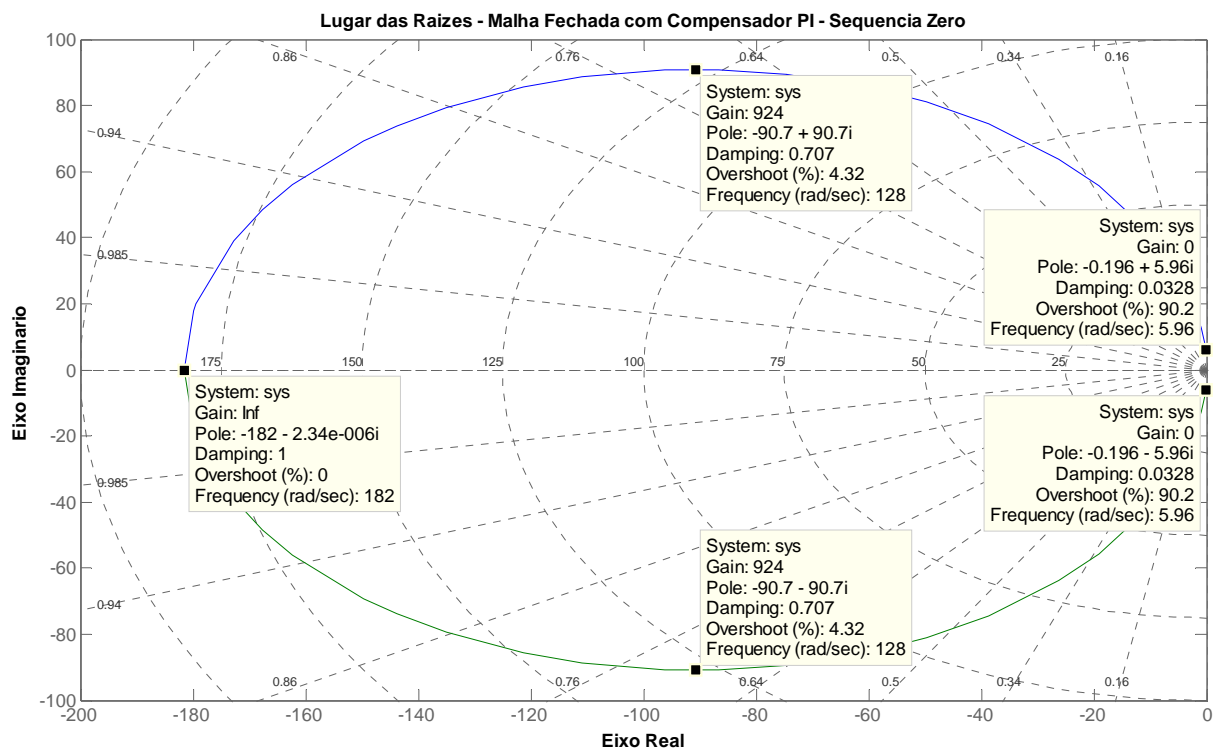


Figura 5.8: Lugar das raízes de malha fechada para seqüência zero.

Através do Lugar das Raízes do sistema em malha fechada, escolhe-se o valor de ganho K_{mf0} que atende à especificação de amortecimento definida em 0,707 e que será atribuído ao ganho K_{p0} do compensador PI. Definindo-se K_{p0} , automaticamente define-se K_{i0} , pois a relação entre esses ganhos deverá permanecer constante.

Concluindo a especificação do controlador, obtém-se do gráfico do Lugar das Raízes o valor de $K_{p0}=924$ e, então, $K_{i0}=167.826,86$.

No entanto, como se sabe, quanto mais à esquerda do plano-s estiverem os pólos, mais estável é o sistema, mais cara a solução e maiores são os sinais internos, o que demanda maior potência elétrica.

Com o objetivo de se obter um inversor com a menor potência possível, alterou-se o zero inserido pelo controlador PI para o mesmo valor do zero inserido pelo controlador da componente de sequência negativa, obtendo-se como novo resultado a seguinte função de transferência:

$$\frac{V_{t0}(s)}{V_{ref0}(s)} = K_{mf0} \frac{0,00002329.s^2+0,005487.s+0,2283}{0,02162.s^2+0,005487.s+0,2283} \quad (5.15)$$

Sendo K_{mf0} dado por

$$K_{mf0} = \frac{K_{p0}.L_{s0}}{K_{p0}.L_{s0}+L_{i0}} \quad (5.16)$$

O gráfico do Lugar das Raízes obtido para os novos parâmetros de K_{p0} e K_{i0} é o apresentado na Figura 5.9.

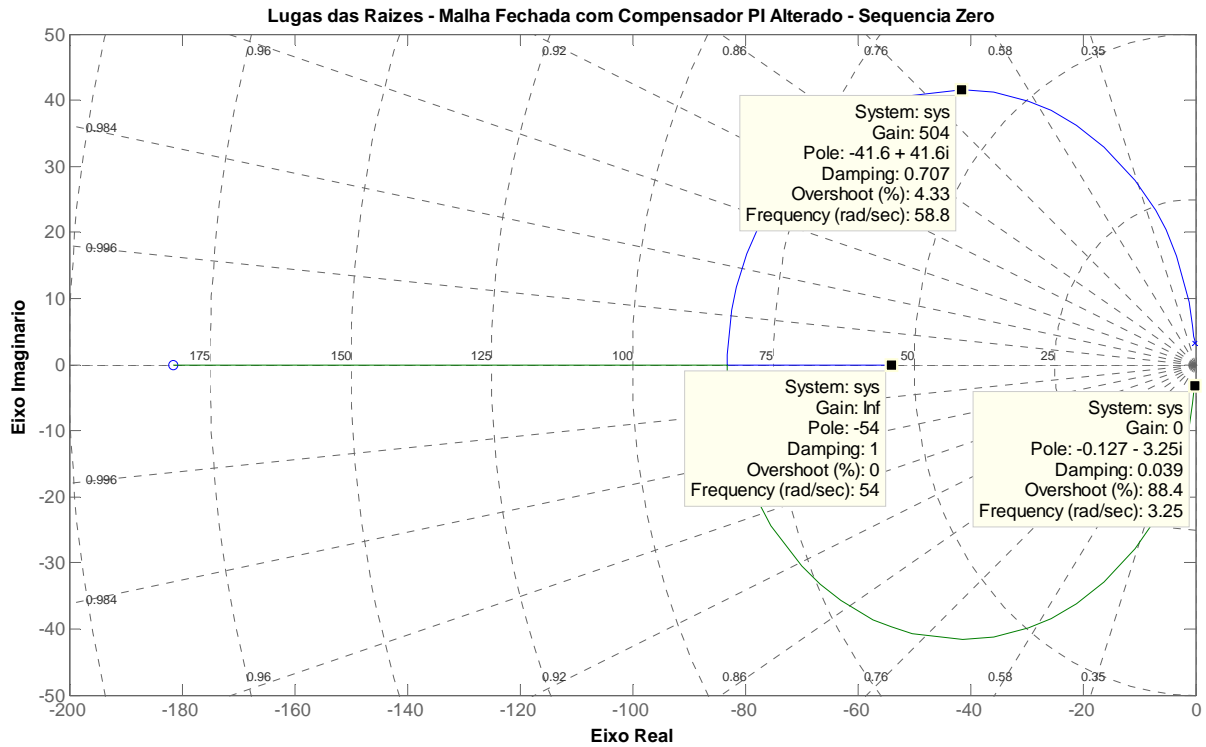


Figura 5.9: Lugar das raízes de malha fechada para sequência zero, segunda análise.

Concluindo, então, a especificação do controlador para a componente de sequência zero, utiliza-se: $K_{p0}=504$ e $K_{i0}=27.199,54$.

Capítulo 6: Resultados das Simulações

Para validar o compensador híbrido foram realizadas simulações no MatLab/Simulink® considerando várias situações possíveis. Entre essas situações estão:

- a) Situação de carga variável crescente: (leve, média e pesada):
 - a.1) Sem compensadores;
 - a.2) Apenas com capacitores;
 - a.3) Apenas com inversores;
- b) Situação de carga variável crescente com compensação híbrida;
- c) Situação de carga variável decrescente com compensação híbrida.

Nesse trabalho, aos níveis leve, média e pesada de carga devem ser associados os percentuais de 29%, 54% e 111,8% respectiva e aproximadamente. A Tabela 6.1 explicita os valores de cargas utilizadas nas diversas simulações.

Fase	Carga Leve				Carga Média				Sobrecarga			
	Potência				Potência				Potência			
	P	Q	N	Cos Θ	P	Q	N	Cos Θ	P	Q	N	Cos Θ
A	6,50	5,50	8,51	0,76	11,50	10,50	15,57	0,74	24,50	21,50	32,60	0,75
B	5,25	2,80	5,95	0,88	10,25	4,80	11,32	0,91	20,75	10,40	23,21	0,89
C	6,75	3,00	7,39	0,91	12,75	6,00	14,09	0,90	26,25	12,00	28,86	0,91
3ϕ	18,50	11,30	21,68	0,85	34,50	21,30	40,55	0,85	71,50	43,90	83,90	0,85

Tabela 6.1: Características das Cargas Simuladas.

Tão importante quanto conhecer as características das cargas simuladas é conhecer o momento em que cada evento ocorre nas simulações: o momento em que as cargas são inseridas no sistema e que os capacitores e o inversor são habilitados. A Tabela 6.2 apresenta essa cronologia de eventos para a situação de carga crescente.

Tempo (s)	Descrição do Evento
0,00	Energização do sistema elétrico.
0,05	Adição de 29% da carga do transformador.
0,10	Habilitação dos bancos de capacitores para entrar em operação.
0,15	Habilitação dos controladores e inversor para entrar em operação.
0,25	Aplicação de 54% da carga do transformador.
0,5	Aplicação de 111,8% da carga do transformador.

Tabela 6.2: Cronologia de Eventos das Simulações para a Situação de Carga Crescente.

Para facilitar o acompanhamento e análise dos resultados, em todos os gráficos apresentados as fases a, b e c são representadas, respectivamente, nas cores azul (linha contínua), verde (linha tracejada) e vermelho (linha pontilhada). A fase a, em todas as simulações, possui o menor fator de potência e é a fase mais carregada para as situações de carga leve, média e sobrecarga.

Variáveis de grande importância, as componentes de sequência negativa e zero são apresentadas como resultado em todas as simulações, para apresentar o efeito dos controladores sobre as mesmas ou seu comportamento sem nenhuma ação de controle, assim como as tensões eficazes de cada uma das fases do PCC. O sistema simulado é aquele já apresentado na Figura 4.11.

6.1. Carga Variável Crescente: Sem Compensadores

Inicialmente foi observado o comportamento do sistema sem que nenhum compensador, passivo ou ativo, estivesse presente. O resultado apresentado é de um sistema com variação crescente de carga que é energizado com 29% do carregamento nominal do transformador e recebe a inserção de mais cargas, totalizando 54% e 111,8% de carga em 0,25s e 0,5 s, respectivamente. Através da Figura 6.1 é possível observar o comportamento das grandezas de tensão e corrente no PCC de acordo com a variação de carga citada.

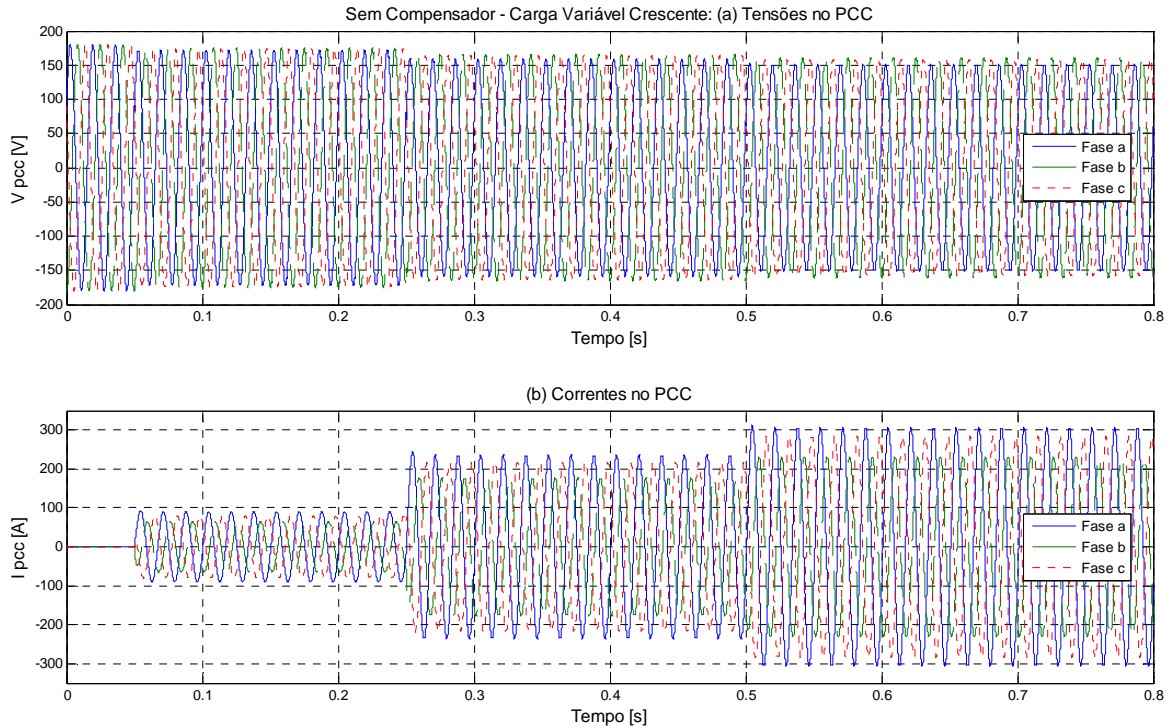


Figura 6.1: Tensões e correntes no PCC com carga crescente e sem compensação.

A Figura 6.2 permite observar no detalhe os níveis de tensão e corrente obtidos no PCC bem como o desequilíbrio de fases da tensão e corrente criado pela carga.

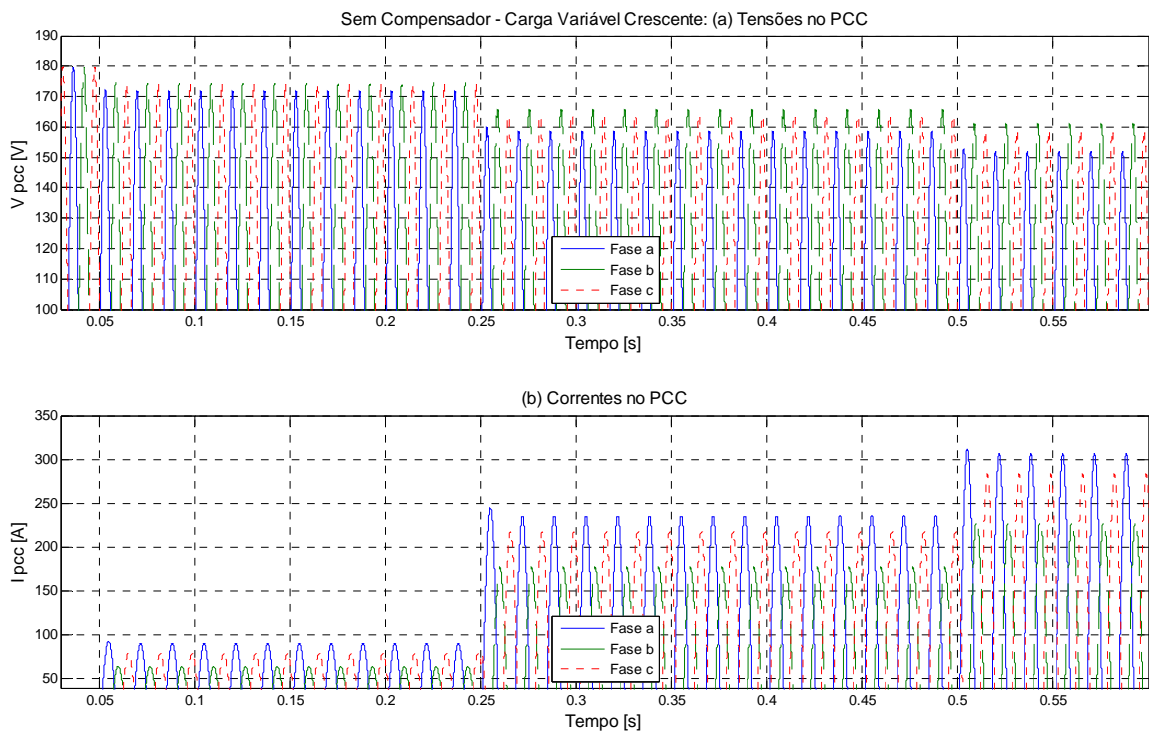


Figura 6.2: Detalhe das tensões e correntes no PCC com carga crescente e sem compensação.

A partir da Figura 6.3 podem ser observados os valores alcançados pelas componentes de sequência positiva, negativa e zero quando nenhuma compensação é aplicada.

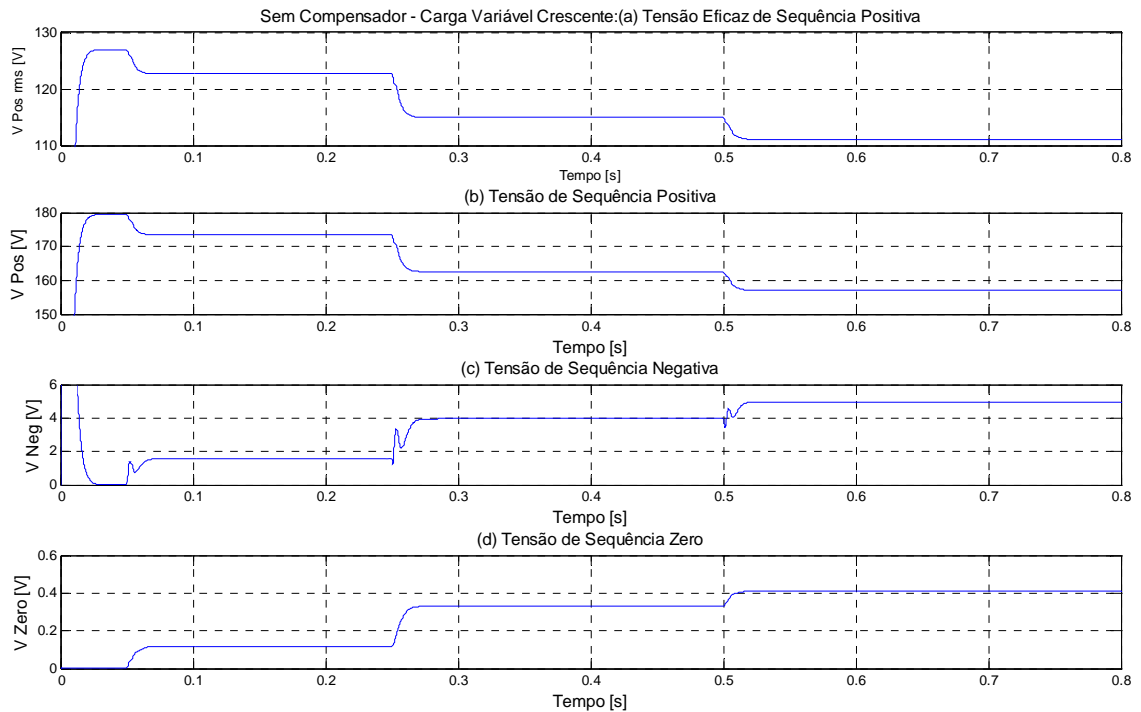


Figura 6.3: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga crescente e sem compensação.

A sequência negativa, por exemplo, alcança 5,0 volts, enquanto que a sequência zero 0,4 volts. Já as tensões de fase do PCC, Figura 6.4, apresentam níveis de tensão nas faixas precária e crítica de tensão, conforme regulamentação da ANEEL.

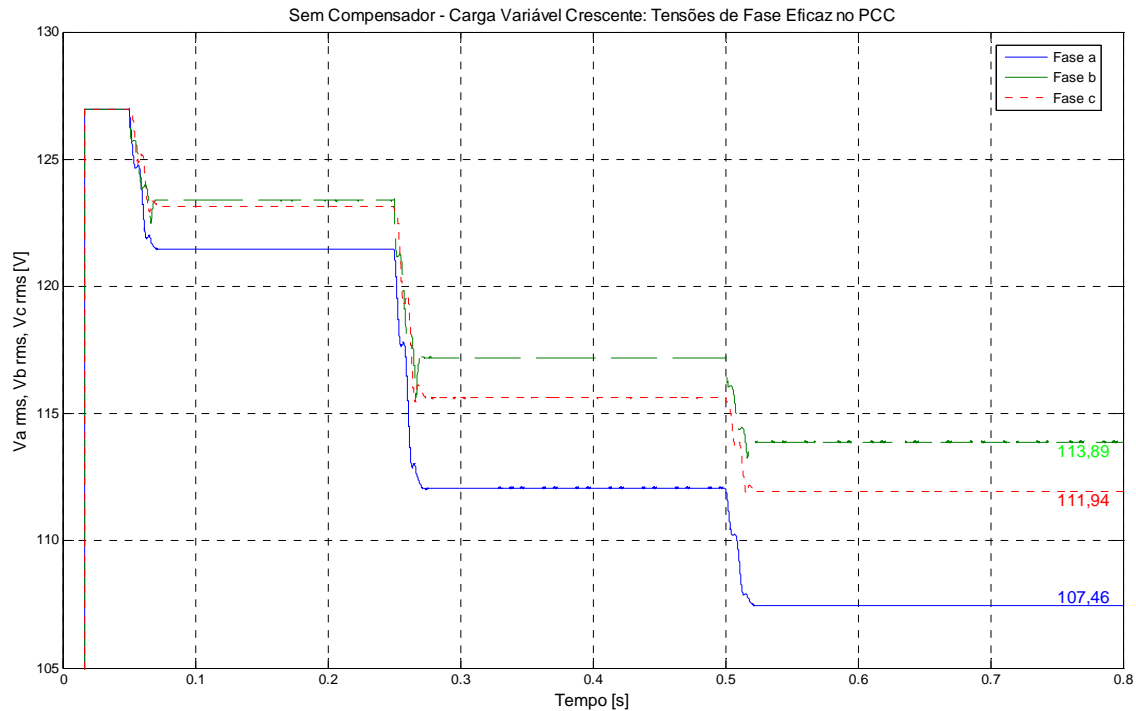


Figura 6.4: Tensões de fase eficaz com carga crescente e sem compensação.

6.2. Carga Variável Crescente: Apenas com Inversor

Esta análise tem o objetivo de apresentar a colaboração isolada do inversor para a melhoria do nível de tensão no PCC. É importante salientar que o inversor compensa apenas as componentes de sequência negativa e zero, o que não é suficiente para proporcionar grandes melhorias no nível de tensão. A malha de controle tem os ganhos vistos no capítulo anterior. A referência de sequência negativa é arbitrada em 2 volts e em 0,2 volts para a sequência zero.

Na Figura 4.9 é apresentado um bloco de controle por histerese utilizado tanto para sequência negativa quanto sequência zero, porém com ajustes diferentes. Este bloco tem a função de habilitar ou desabilitar a soma do erro compensado pelo controle PI ao valor medido no PCC.

No caso da sequência negativa, por exemplo, se o sinal inicialmente medido no PCC estiver abaixo de 2.1 volts, o sinal de saída do controlador por histerese é mantido em zero, ou seja, não há compensação. Quando a tensão medida no PCC ultrapassar 2.1 volts a saída do

controlador por histerese passará para 1 e, então, o erro compensado pelo controle PI será somado ao valor de entrada medido do PCC. Depois de ativado, o controlador por histerese somente será desativado se a tensão medida no PCC atingir valor menor que o limite inferior de controle, no caso, 1,5 volts.

O mesmo comportamento é observado para o controlador por histerese da componente de sequência zero, diferindo-se, no entanto, no valor de ajuste que são 0,15 e 0,2 volts o limite inferior e superior, respectivamente.

A ação do inversor é notada a partir de 0,15s, quando sua entrada em operação é liberada, Figura 6.5-a, e a alteração na forma de onda da tensão provocada pelo inversor PWM é, então, percebida. Nota-se que a melhoria de tensão promovida pelo inversor se reflete num maior equilíbrio também para as correntes do PCC, Figura 6.5-b.

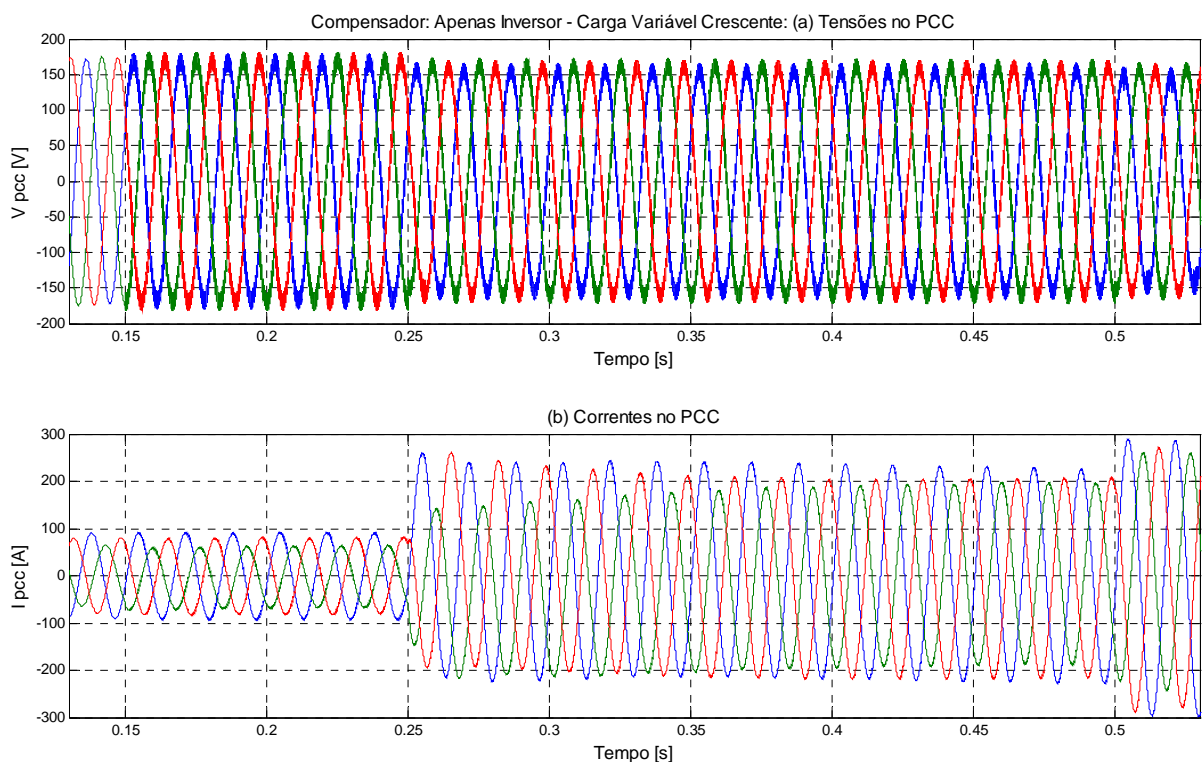


Figura 6.5: Tensões e correntes no PCC com carga crescente e compensador ativo.

A energização do primeiro bloco de carga ocorre em 50ms. Essa carga desequilibrada provoca o aparecimento de tensões de sequência negativa e zero, mas em valores abaixo da referência de controle, 2 volts e 0,2 volts para as componentes de sequência negativa e zero, respectivamente, justificando-se o fato de não haver nenhuma ação de controle até que se

entre o segundo bloco de carga, carga média, quando essas referências são ultrapassadas e os controladores entram em ação.

A tensão instantânea de sequência positiva, Figura 6.6 (a), está apresentada com o propósito de evidenciar que nenhuma ação de controle existe sobre a mesma. Suas alterações refletem exclusivamente as alterações de carga no sistema elétrico. A tensão eficaz de sequência positiva, que é utilizada como referência para o controle de acionamento dos bancos de capacitores, não está aqui representada.

As tensões de sequência negativa e zero, Figuras 6.6 (b) e (c), passam a sofrer pequena alteração a partir de 0,15 s, quando o inversor entra em operação, mas os valores dessas tensões ainda se encontram abaixo da referência de controle.

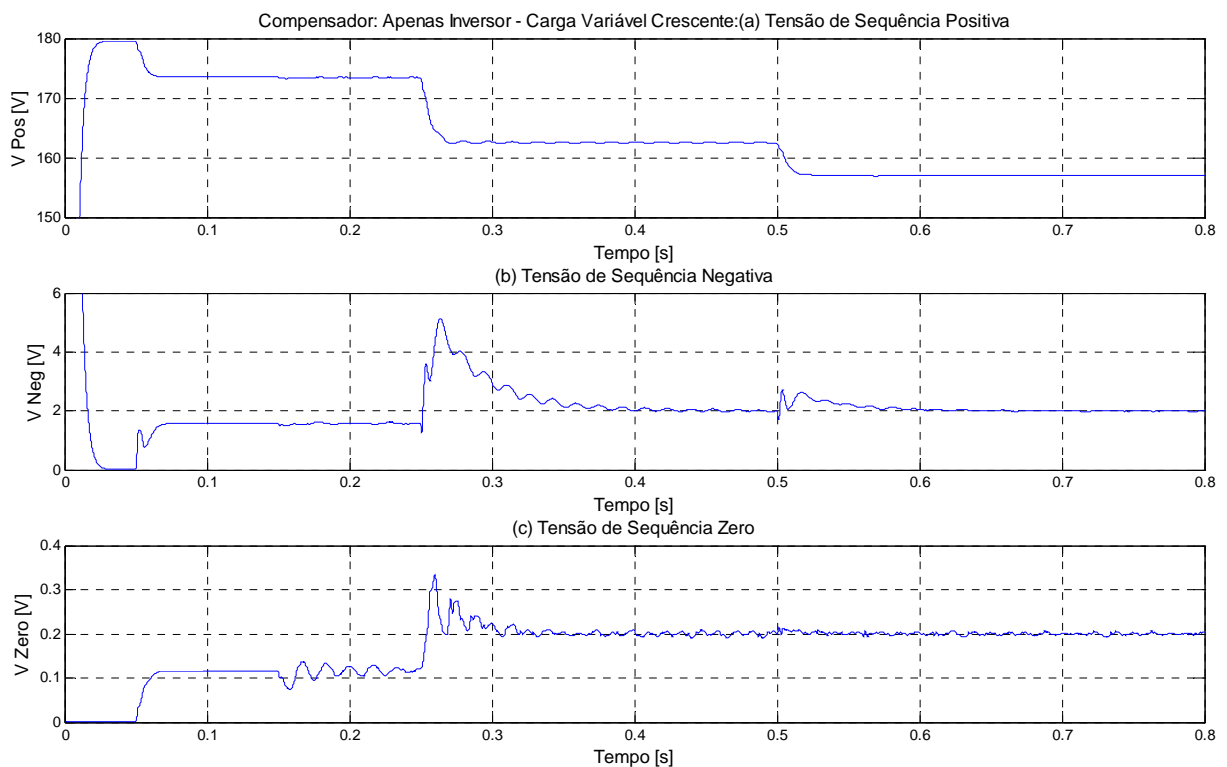


Figura 6.6: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga crescente e compensador ativo.

A ação efetiva dos controladores ocorre de fato a partir de 0,25 s quando entra um novo bloco de carga que faz os níveis de tensão de sequência negativa e zero ultrapassarem seus valores de referência. A ação dos controladores é imediata e leva as tensões para a referência de tensão determinada para cada uma das componentes, Figura 6.6 (b) e (c).

Analisando agora as correntes de saída do inversor, Figura 6.7, é observado um grande aumento da corrente, considerando as devidas proporções, à medida que se adiciona mais carga ao PCC.

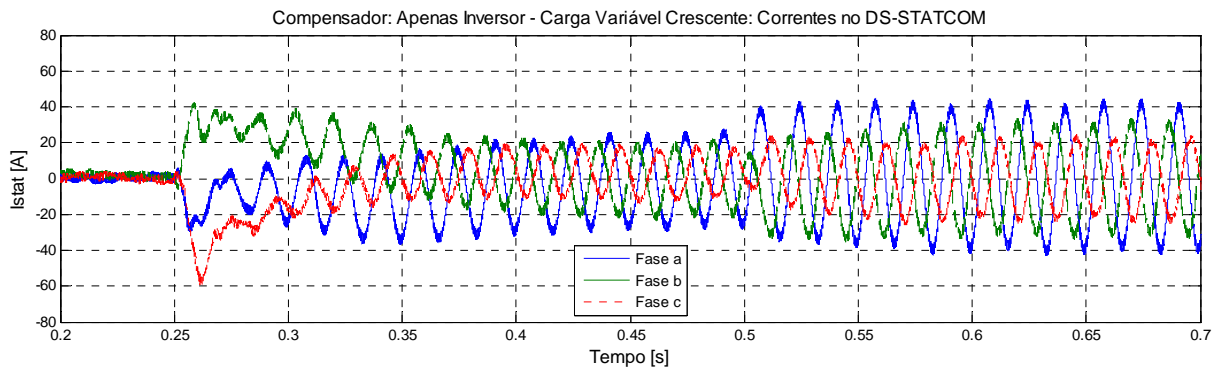


Figura 6.7: Correntes no DS-STATCOM com carga crescente e compensador ativo.

As potências ativa e reativa trocadas com o sistema elétrico pelo inversor são da ordem de 7,5 kW/kVAr, para o sistema com sobrecarga e sem a adição de capacitores, conforme apresenta a Figura 6.8.

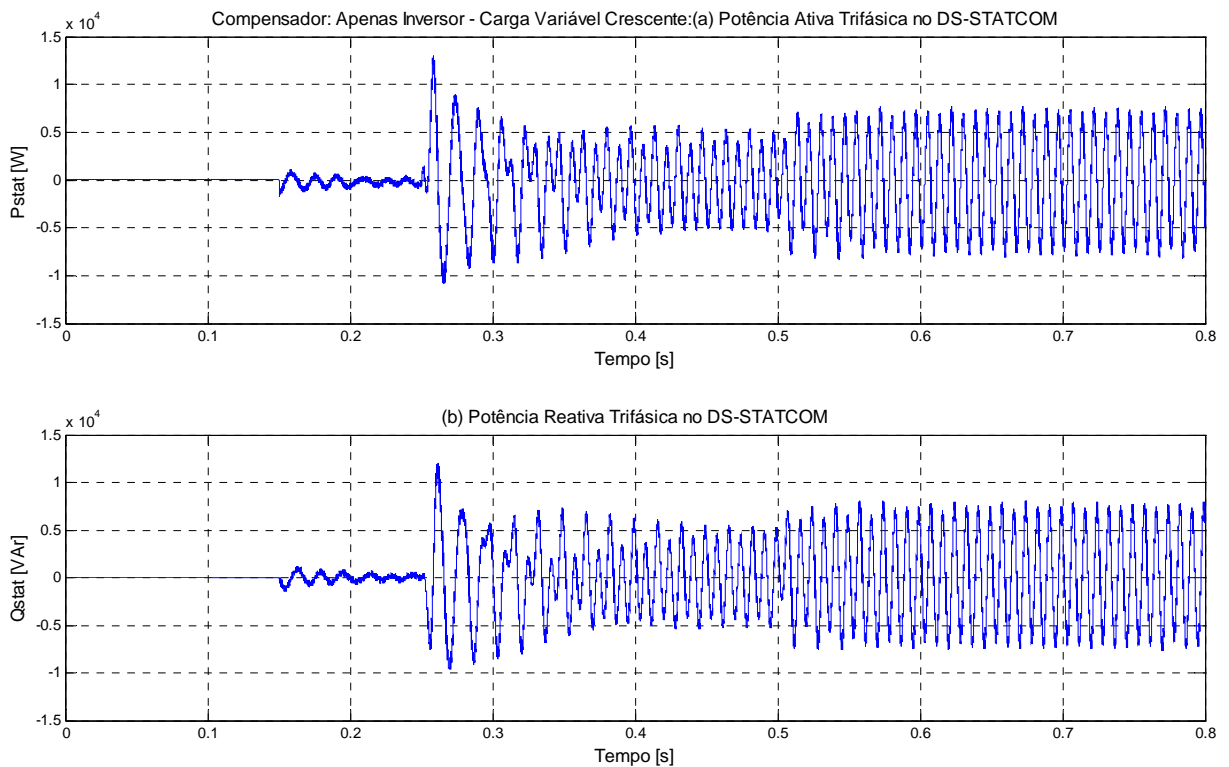


Figura 6.8: Potências trifásicas no DS-STATCOM com carga crescente e compensador ativo.

E para se permitir comparação entre as várias análises que se seguem, são apresentadas na Figura 6.9 as tensões eficazes das fases no PCC, onde se observa claramente que os níveis de tensão estão abaixo dos regulamentados pela ANEEL.

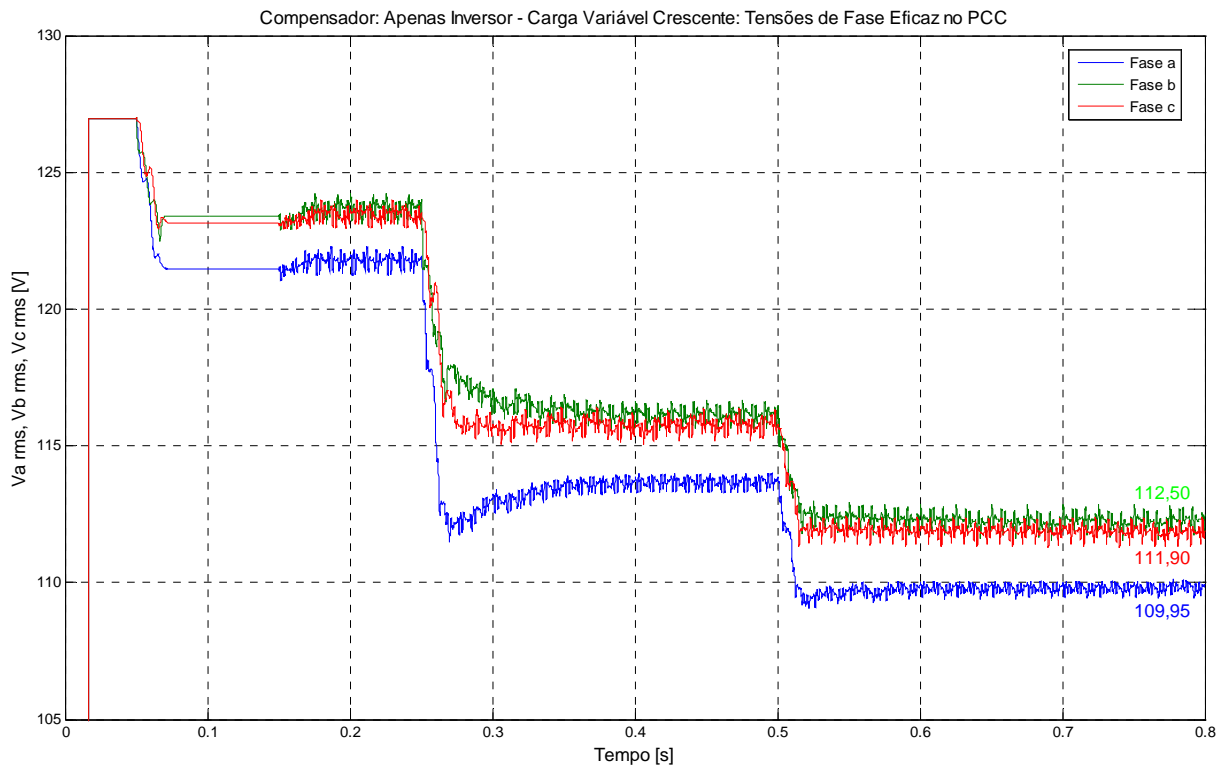


Figura 6.9: Tensões de fase eficaz no PCC com carga crescente e compensação ativa.

6.3. Carga Variável Crescente: Apenas com Capacitores

Com o mesmo propósito da seção anterior que analisou as grandezas de interesse quando apenas o inversor atuava no sistema elétrico, esta seção analisa o efeito provocado nas tensões e correntes quando apenas os bancos de capacitores são acionados. Um fato importante a se considerar é que os bancos de capacitores são acionados com o objetivo de compensar a componente de tensão de sequência positiva, não exercendo ação direta significativa sobre as demais sequências.

Nesta análise o primeiro bloco de cargas é inserido aos 0,05 s e a ação de controle sobre os bancos é liberada em 0,1 s. O primeiro acionamento dos bancos de capacitores gera um estado de controle para o qual se acredita que o nível de tensão alcançará o valor desejado de 127 volts no PCC. Os acionamentos seguintes dos capacitores levam em consideração o

estado atual de controle, ou seja, quais capacitores estão ligados e desligados em cada momento, elevando ou abaixando a variável “Estado” de controle sempre de uma unidade.

A Figura 6.10 mostra as tensões e correntes no PCC e confirma dois fatos esperados: a elevação da tensão para níveis mais elevados que aquele apresentado apenas pelo inversor e a manutenção do desequilíbrio existente nas tensões e correntes do PCC, uma vez que a mesma reatância capacitiva é acrescentada para as três fases.

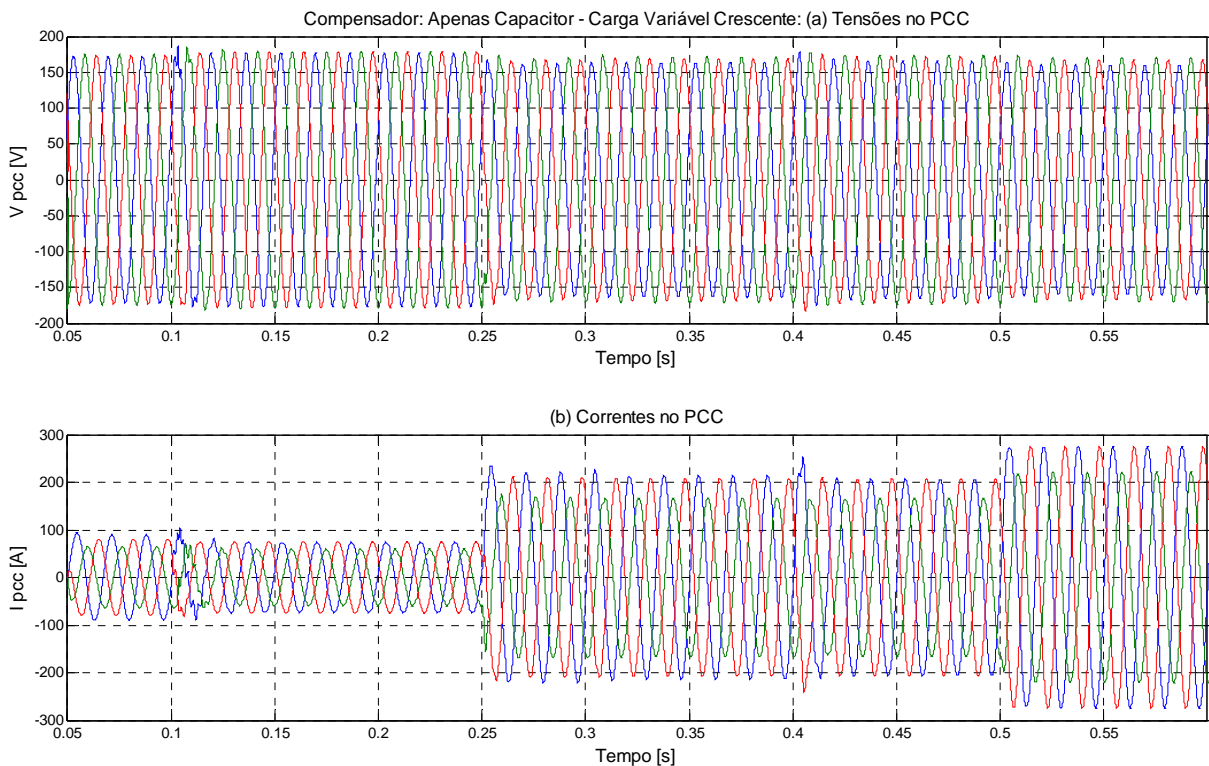


Figura 6.10: Tensões e correntes no PCC com carga crescente e compensação passiva.

A tensão eficaz de sequência positiva, Figura 6.11 (a), é extremamente importante nesta análise, pois é ela que é utilizada como medida representativa da tensão no PCC e, então, utilizada como sinal de referência para acionamento dos bancos de capacitores.

As reduções observadas nas tensões de sequência positiva, Figura 6.11 (a) e (b), são função da adição de novos blocos de cargas em 0,25 s e 0,5 s. Todas as outras variações são crescentes e função da adição de nova combinação de bancos de capacitores.

As tensões de sequência negativa e zero apresentam crescimento significativo quando

se aumenta a carga, Figura 6.11 (c) e (d), e são perturbadas toda vez que há o chaveamento entre os bancos de capacitores.

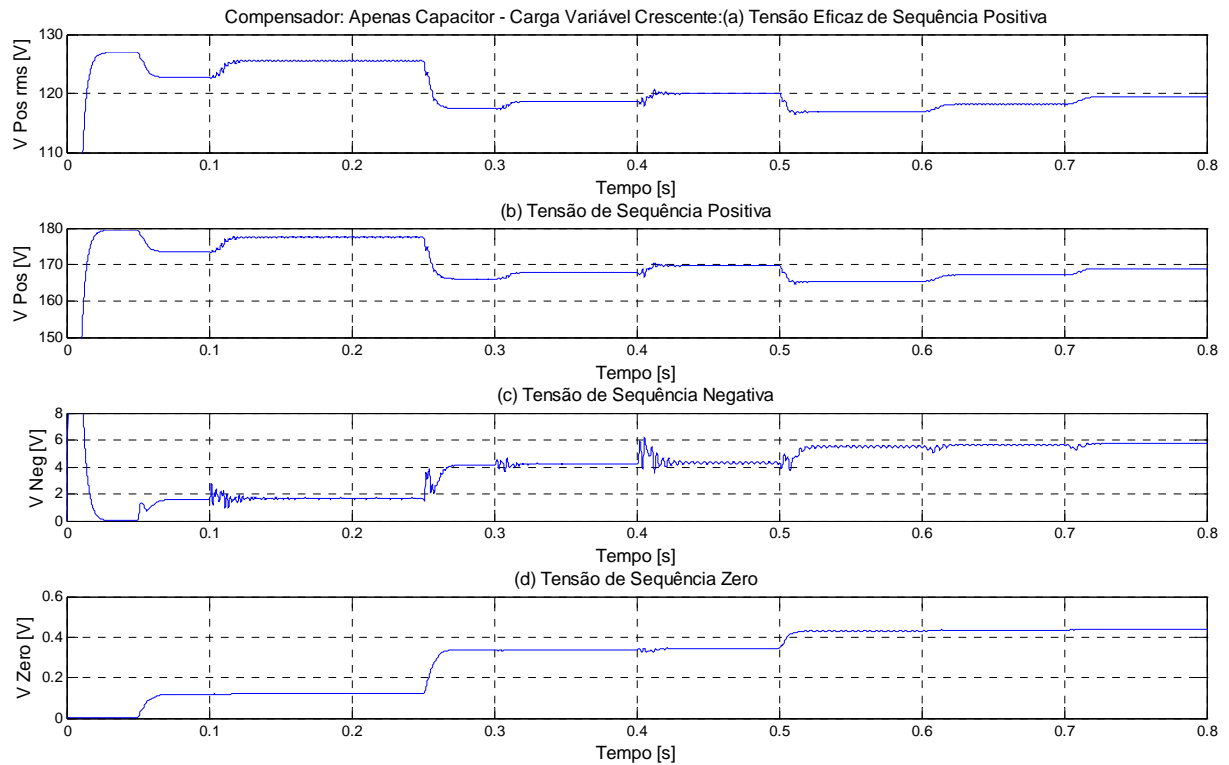


Figura 6.11: Componentes de sequência positiva, negativa e zero com carga crescente e compensação passiva.

O acionamento binário dos bancos de capacitores ocorre a cada 100 ms. Esse intervalo foi especificado para que fosse possível perceber o efeito isolado de cada evento, entrada e saída de carga ou capacitores, bem como a ação dos controles de sequência negativa e zero do inversor. Além disso, algumas restrições relacionadas à quantidade de variáveis no ambiente MatLab/Simulink® e a duração da simulação sempre foram fatores marcantes na especificação desses parâmetros.

Em um protótipo para aplicação em redes secundárias de distribuição, 30 s entre os chaveamentos dos bancos de capacitores é um intervalo de tempo bom, isto é, é tempo suficiente para acomodação de perturbações e estabilização da tensão no PCC, quando comparado à rede primária de distribuição onde, por exemplo, o intervalo de troca de tapes de um regulador de tensão pode ser realizado a cada 90 s.

As Figuras 6.12 (c), (d) e (e) apresentam os sinais de comando enviados aos bancos de

capacitores numa sequência binária de acionamento, onde os bancos C e 4C são, respectivamente, os bancos de capacitores trifásicos de menor e maior potência. Para exemplificar, em 0,4 s temos o “Estado” 100 para acionamento dos capacitores e corresponde ao acionamento do banco 4C e ao desligamento dos bancos 2C e C. Nas análises de outras situações de carga desse trabalho, estes acionamentos serão suprimidos, por se tornarem repetitivos.

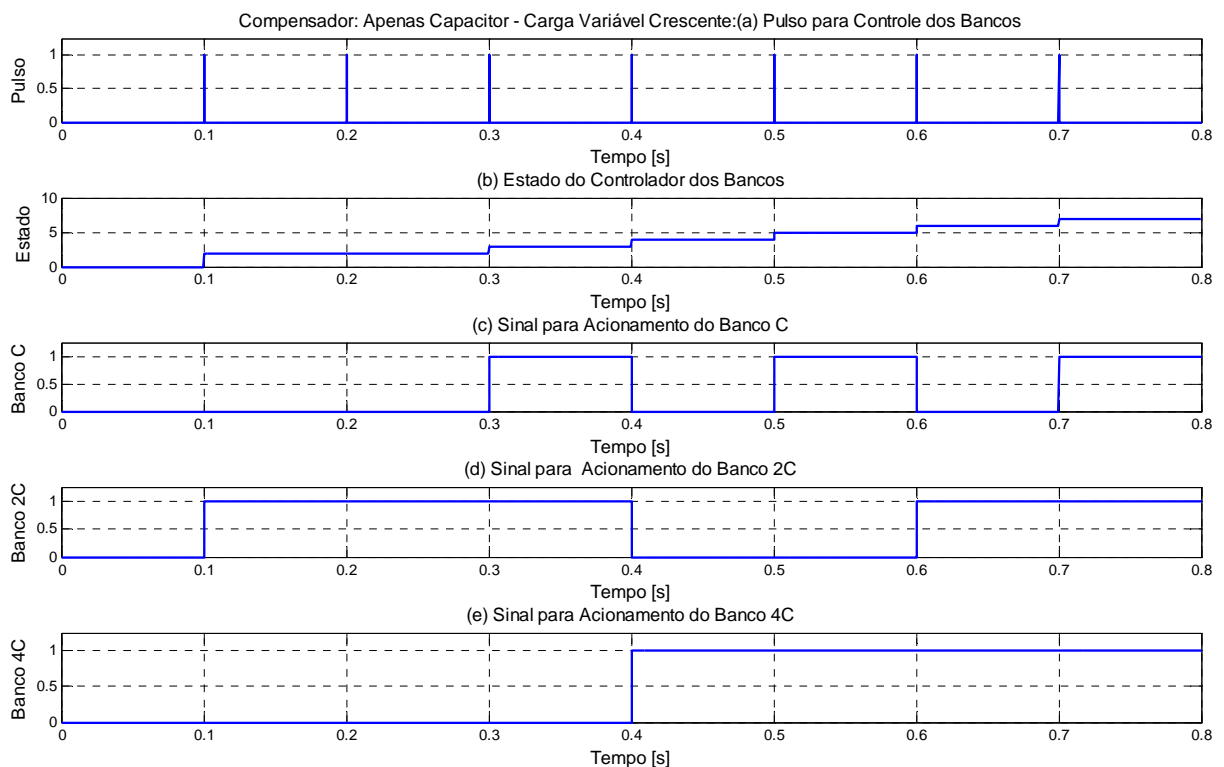


Figura 6.12: Sinais de controle dos bancos de capacitores para carga crescente e compensação passiva.

O estudo dessa situação de compensação apenas com capacitores, permite visualizar que nem todas as tensões de fase no PCC são mantidas dentro da faixa adequada de operação de tensão, entre 116 e 133 volts, para uma potência trifásica total de 35 kVAr dos capacitores. A fase a, a mais carregada, alcança o nível de 115,3 volts para uma carga de 111,8%.

Um fato importante a relatar é que a tensão eficaz de sequência positiva utilizada para o controle de acionamento dos bancos de capacitores alcança 119,4 volts após todos os capacitores estarem ligados, mas nenhuma das tensões de fase é igual a este valor, Figura 6.13.

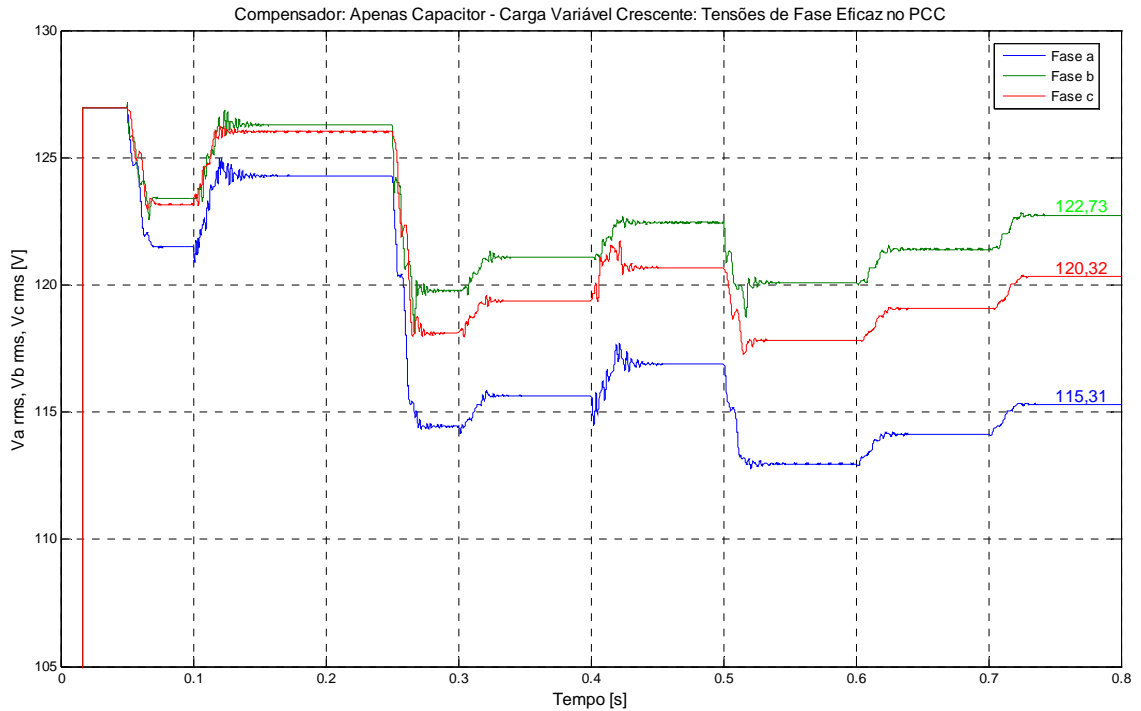


Figura 6.13: Tensões de fase eficaz no PCC com carga crescente e compensação passiva.

As tensões e correntes nos bancos de capacitores têm a forma de onda apresentada nas Figuras 6.14 (a) e (b), diferenciando-se somente pela ordem de grandeza da corrente que varia de acordo com a potência de cada banco trifásico de capacitores.

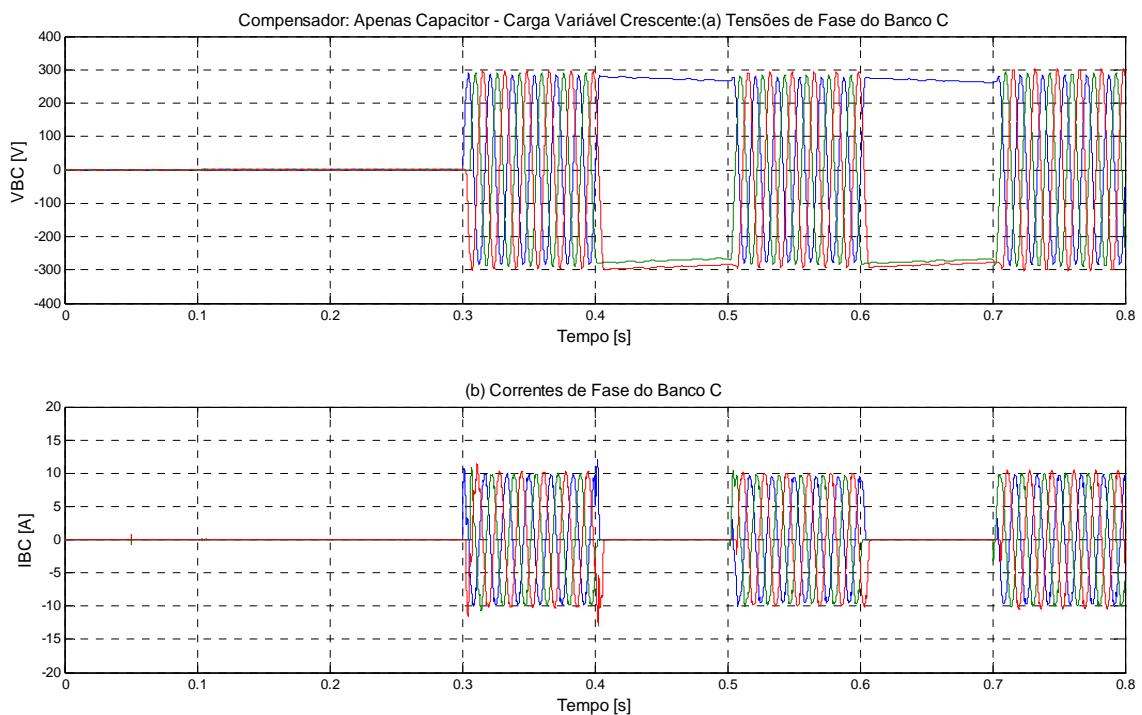


Figura 6.14: Tensões e correntes de fase do banco de capacitores C com carga crescente e compensação passiva.

6.4. Carga Variável Crescente: Com Compensador Híbrido

Na situação de carga variável crescente é inserido o compensador híbrido para controlar o nível de tensão no PCC, formado pelos três bancos de capacitores trifásicos e o conversor de tensão PWM.

Com esse sistema, obtém-se melhor resultado que aqueles apresentados nas seções anteriores, apenas com capacitores ou apenas com inversor, uma vez que se têm os dois tipos de compensadores atuando em conjunto e em busca do mesmo benefício.

O comportamento das tensões e correntes no PCC, agora sob ação de um compensador híbrido de reativos, são apresentadas nas figuras que se seguem, Figura 6.15 e 6.16. A Figura 6.15 mostra a forma de onda das tensões e correntes no PCC, na situação de carregamento analisada anteriormente.

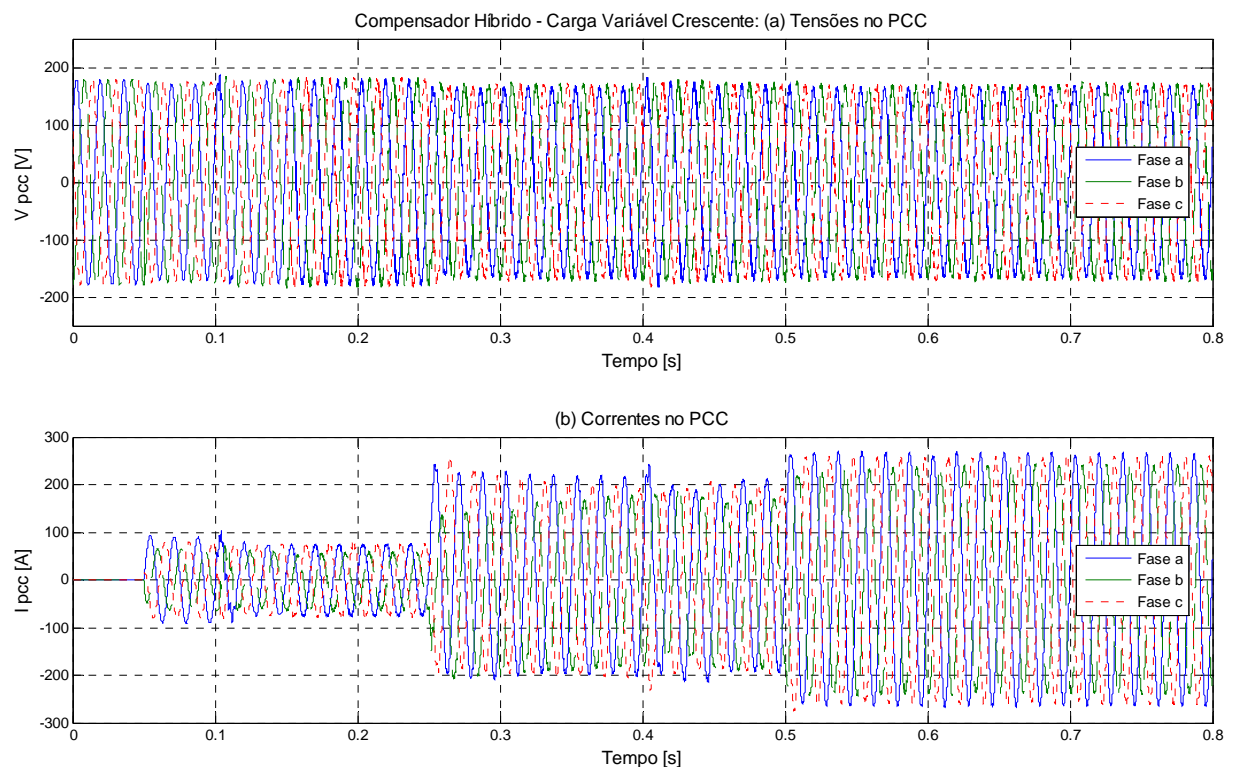


Figura 6.15: Tensões e correntes no PCC com carga crescente e compensação híbrida.

Na Figura 6.16 é possível observar no detalhe a redução do desequilíbrio entre as tensões e correntes de fase no PCC promovida pela ação do inversor à medida que corrige as

componentes de sequência negativa e zero. Este efeito é bem claro no intervalo de tempo de 0,25 s a 0,4 s. Entre 0,35 s e 0,4 s, quando as referências de tensão estão sendo alcançadas pelos controladores (observe a Figura 6.17 (c) e (d)) é possível identificar a menor relação de desequilíbrio. Como as compensações das sequências negativa e zero não são totais, haverá sempre um desequilíbrio.

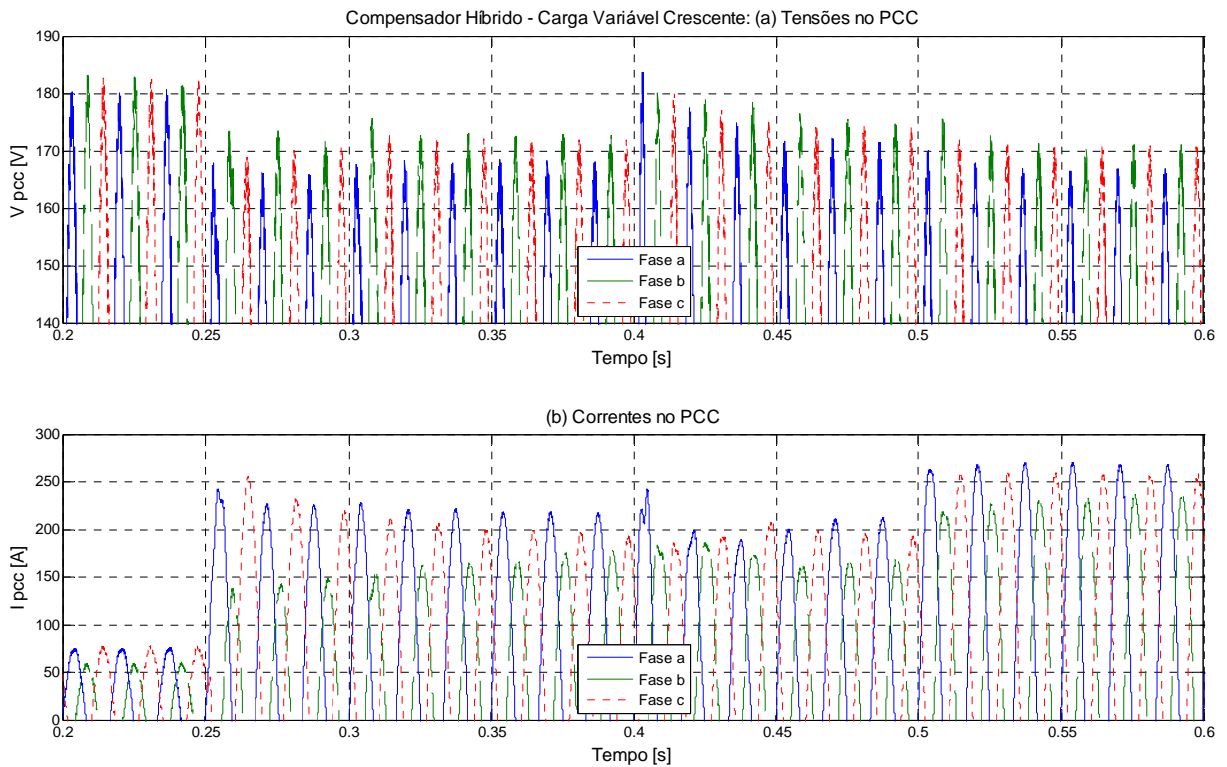


Figura 6.16: Detalhe das tensões e correntes no PCC com carga crescente e compensação híbrida.

O comportamento das componentes de sequência é apresentado na Figura 6.17. A tensão eficaz de sequência positiva, como já dito, é utilizada como referência para acionamento dos bancos de capacitores.

O controle do inversor, liberado somente em 0,15 s, não atua sobre as sequências negativa e zero porque em carga leve essas componentes apresentam valores abaixo da referência de tensão de seus controladores. A partir de 0,25 s, então, quando se atinge 54% de carregamento do transformador, os valores das referidas sequências ultrapassam seus valores de referência e os controladores passam a desempenhar sua função.

É importante lembrar que, sem nenhuma compensação, as componentes negativa e

zero atingem, respectivamente, 5 volts e 0,42 volts. Com a compensação ativa, esses valores são levados para a referência de 2 volts e 0,2 volts. A definição dessas referências leva em consideração dois fatores: o fato de o PRODIST [2] definir o fator de desequilíbrio em 2% para a média tensão e o impacto na elevação da potência do conversor ao se definir valores mais exigentes para serem compensados.

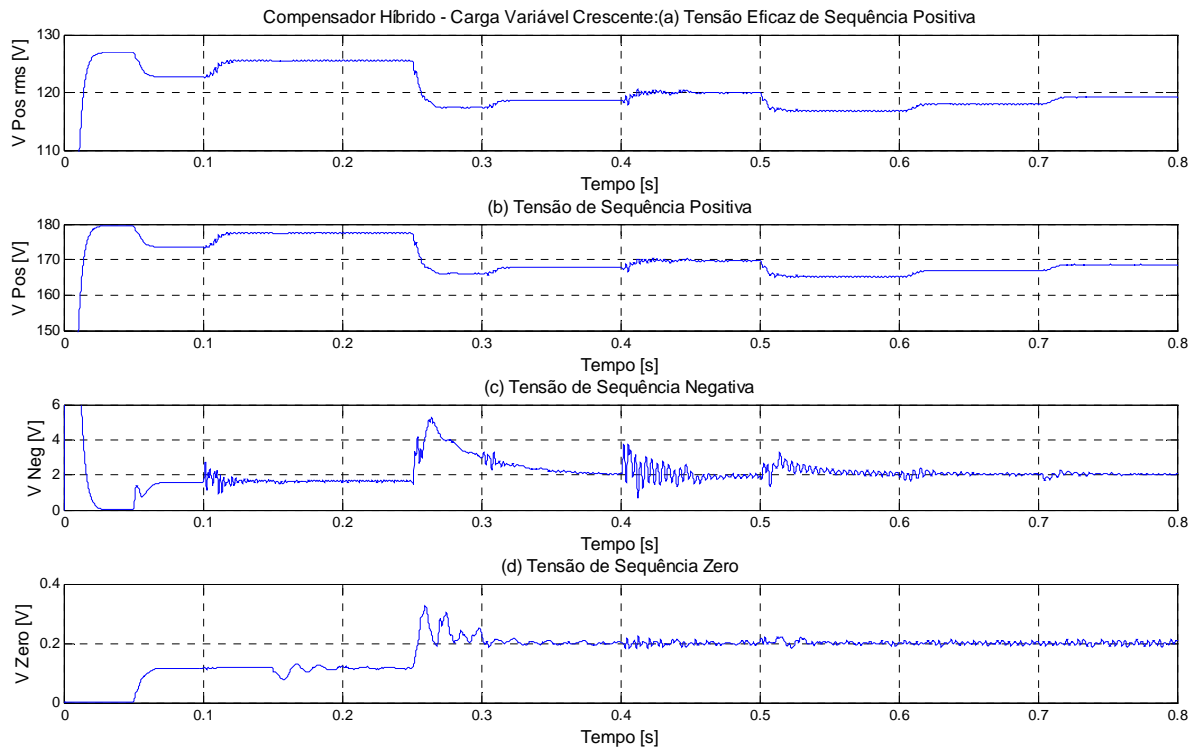


Figura 6.17: Componentes de seqüência positiva, negativa e zero com carga crescente e compensação híbrida.

As correntes do DS-STATCOM com compensação híbrida, Figura 6.18, se apresentam muito parecidas, em ordem de grandeza, às da seção 6.2 (compensação apenas com inversor), mas suas curvas são bem distintas.

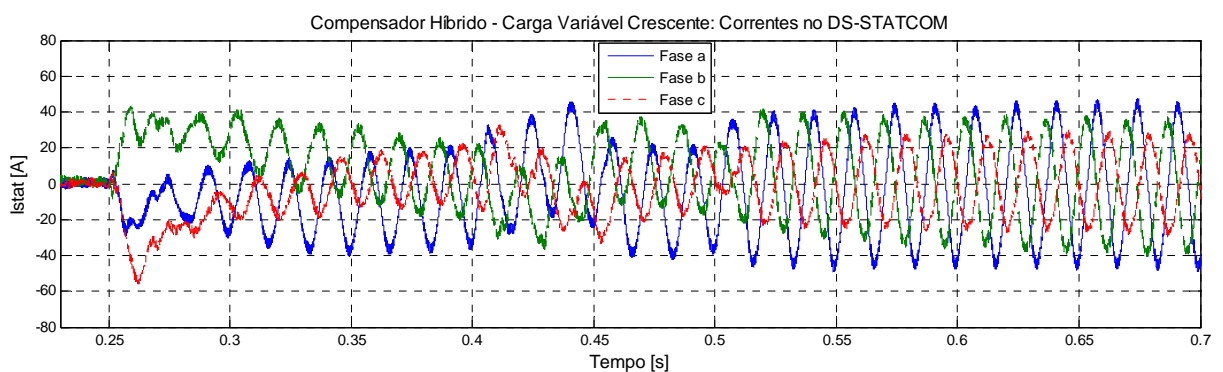


Figura 6.18: Tensões e correntes no DS-STATCOM com carga crescente e compensação híbrida.

Ao analisar o comportamento do DS-STATCOM a partir de 0,5 s, quando são acrescentadas mais cargas chegando-se a uma sobrecarga de 11,8% percebe-se que a configuração de carga muda e a fase a passa a possuir 32,6 kVA, 40% a mais que a fase b, 23,21 kVA, e 13% a mais que a fase c, 28,86 kVA. A fase c apresenta carga 24% superior à fase b. Dessa forma, espera-se que o DS-STATCOM trabalhe no sentido de compensar a tensão no PCC, considerando-se cada fase e seu carregamento. A Figura 6.19 mostra exatamente o sinal de tensão enviado ao gerador de pulsos PWM do inversor para compensação de cada uma das fases do sistema, compensando mais as fases a e c, mais carregadas, que a fase b.

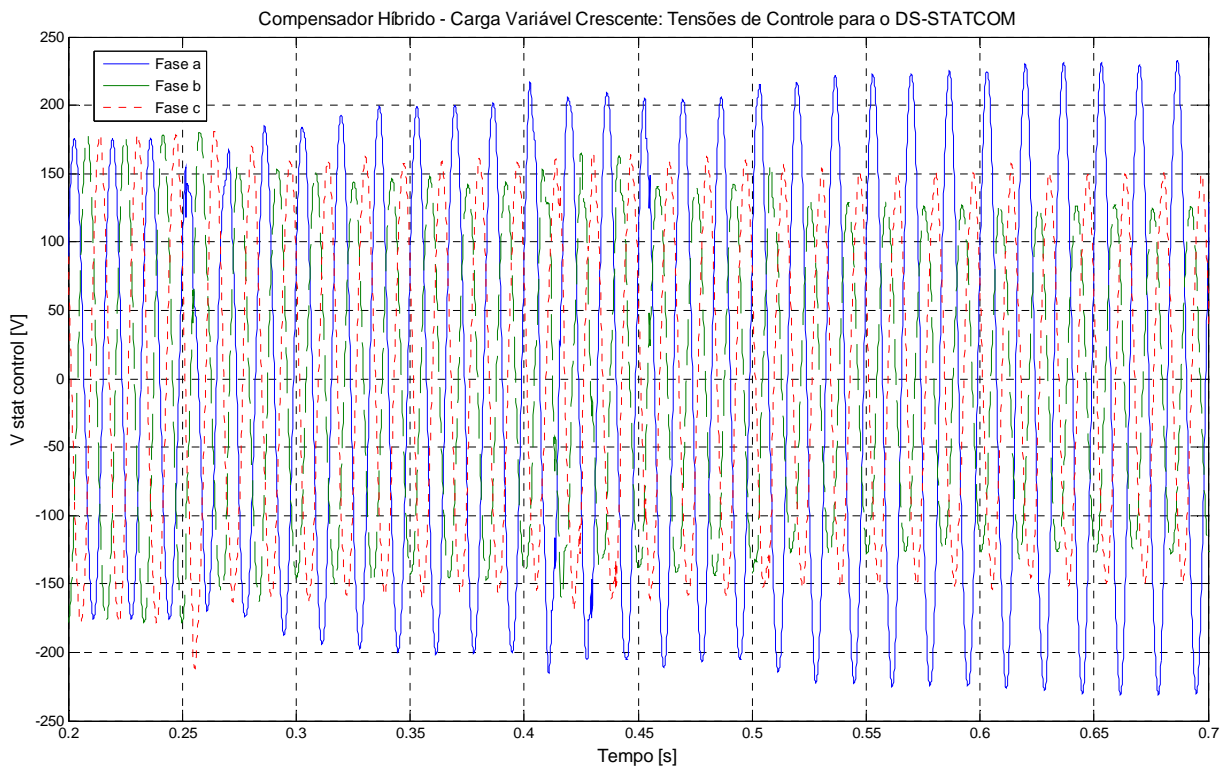


Figura 6.19: Tensões para controle do DS-STATCOM enviadas ao gerador de pulsos PWM com carga crescente e compensação híbrida.

As tensões de fase eficaz no PCC, com compensação híbrida, atingem 117,65 V na fase a, 120,15 V na fase b, e 119,85 V na fase c, conforme apresentado na Figura 6.20.

As potências exigidas do DS-STATCOM, ativa e reativa, são apresentadas na Figura 6.21 e apresentam picos de 9 kW e 9 kVAr, respectivamente. Nessa mesma Figura 6.21 (c), é possível observar a corrente que circula entre o ponto médio capacitivo do inversor, representado por fontes de tensão, e o neutro do sistema elétrico de potência devido à

existência da corrente de sequência zero.

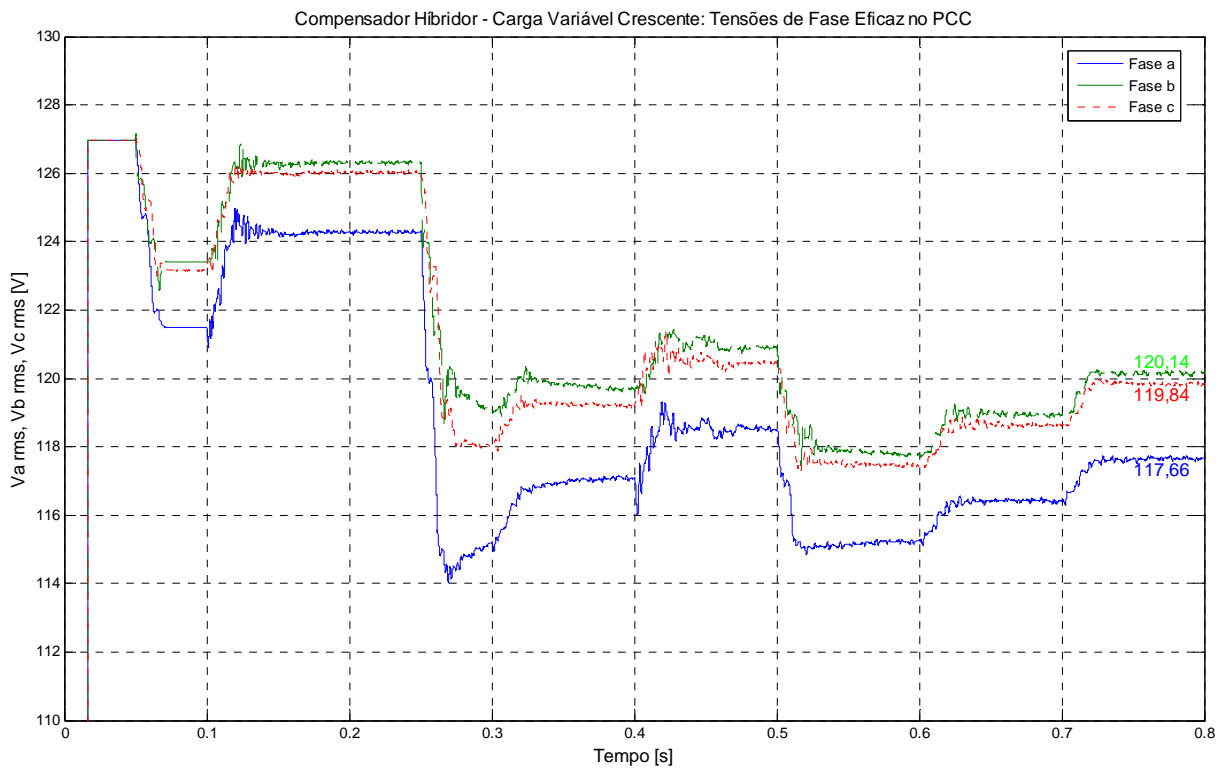


Figura 6.20: Tensões de fase eficaz no PCC com carga crescente e compensação híbrida.

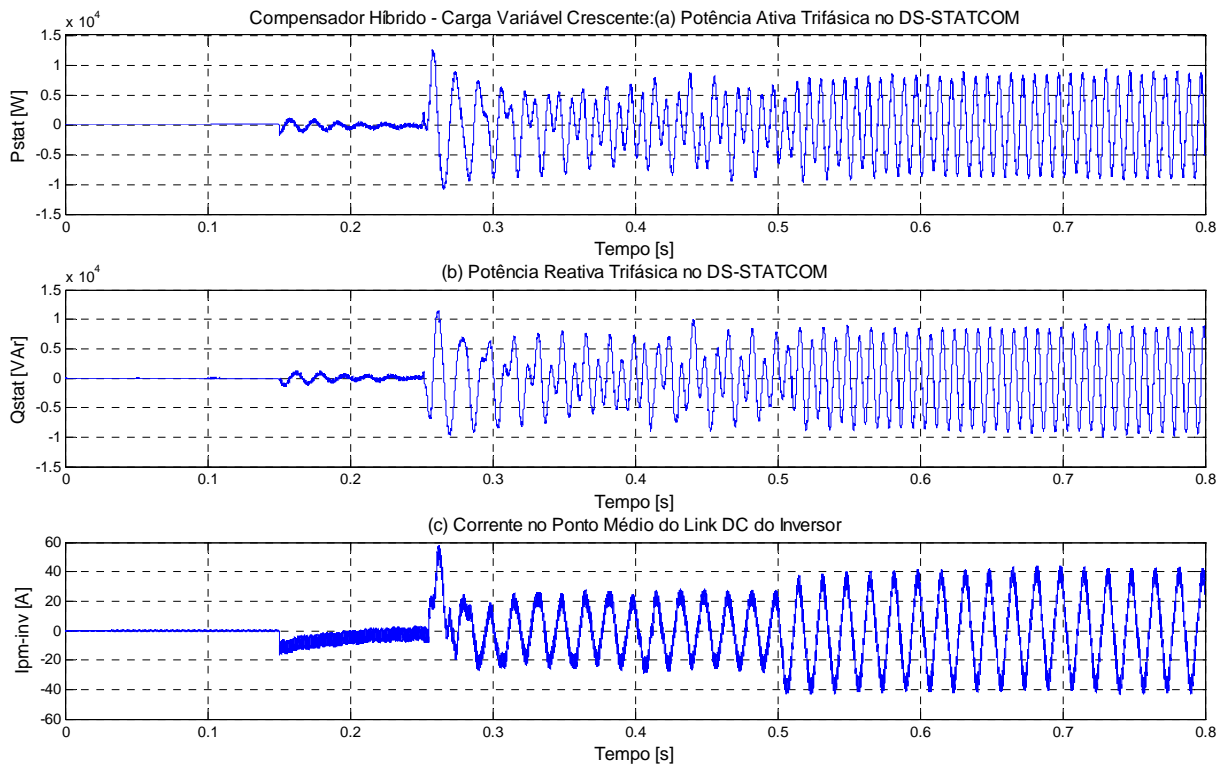


Figura 6.21: Potências trifásicas no DS-STATCOM e corrente do link DC do inversor com carga crescente e compensação híbrida.

6.5. Carga Variável Decrescente: Com Compensador Híbrido

A situação de carga variável decrescente é mostrada para verificar o comportamento dos controladores e do sistema em si numa forma diferente de operação, a de perda de cargas.

Nessa simulação o sistema inicia sem carga e em 0,05 s é inserida 111,8% de carga. Em 0,1 s é habilitado o controle dos bancos de capacitores que envia o sinal de controle para que todos os bancos sejam ligados. Em seguida, em 0,25 s, há uma redução para 54% de carga e em 0,5 s para cerca de 29% da capacidade do transformador. A Figura 6.22 mostra o comportamento das tensões e correntes no PCC para a situação descrita.

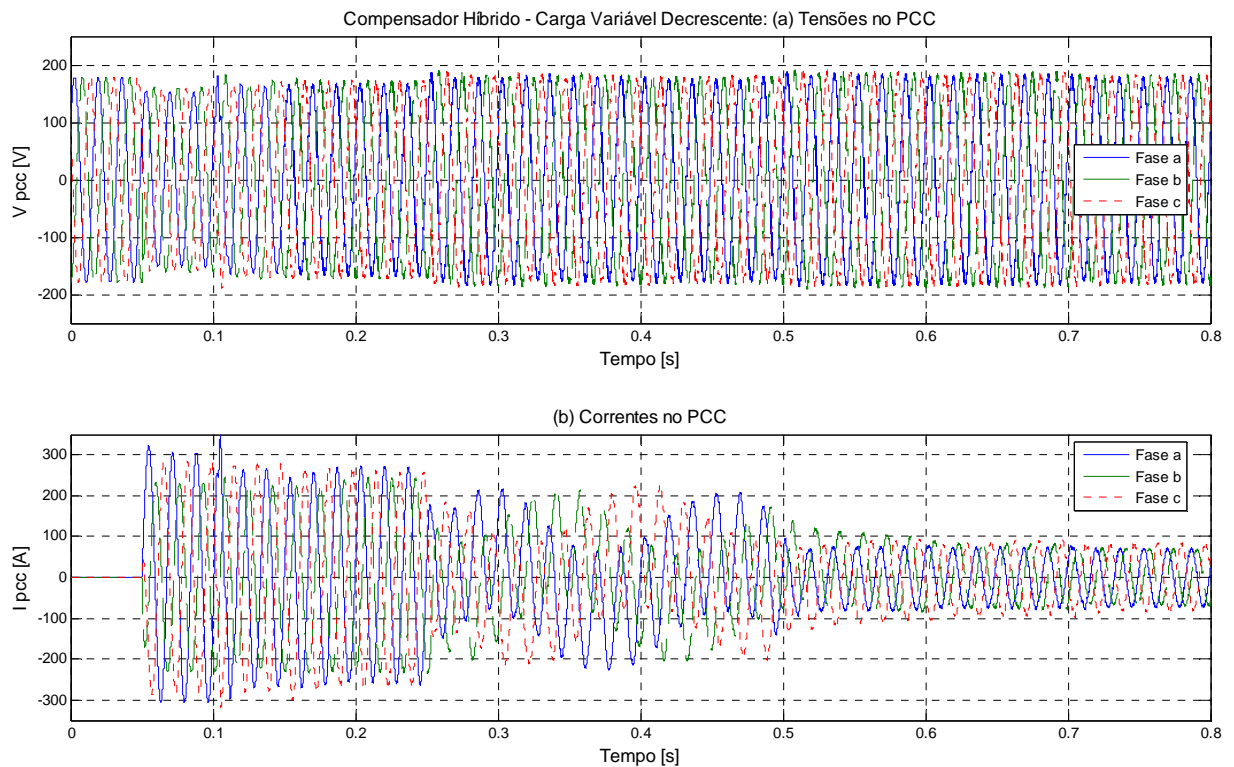


Figura 6.22: Tensões e correntes no PCC com carga decrescente e compensador híbrido.

Um ponto a ser observado é o intervalo de tempo de 0,25 s até 0,5 s onde há a maior perda de carga, 57,8 kVA, e a tensão do sistema fica bem elevada pelo fato de todos os capacitores estarem ligados. O desligamento dos capacitores é feito respeitando um tempo mínimo de intervalo, no caso, 100 ms para a simulação (sugere-se 30 s numa aplicação prática). Durante esse tempo o inversor tenta reduzir o desequilíbrio de tensões criado no PCC e é, então, mais exigido. A Figura 6.23 (a) permite visualizar que somente próximo de 0,5 s as

tensões de fase começam a ter valores próximos, quando outra perda de carga ocorre e recomeça o controle em busca de um novo equilíbrio, de um melhor nível de tensão para o PCC.

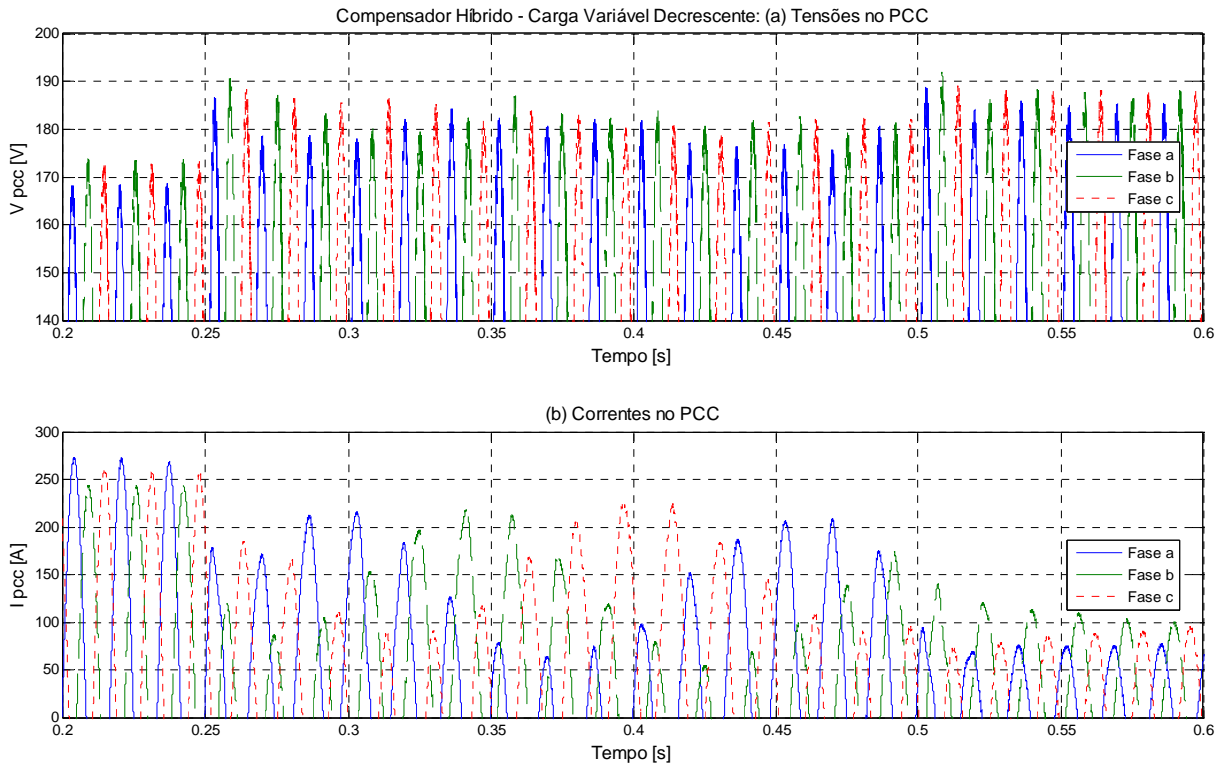


Figura 6.23: Detalhe das tensões e correntes no PCC com carga decrescente e compensador híbrido.

A Figura 6.24 tem o propósito de evidenciar a ação dos controladores de sequência negativa e zero e, mais que isso, que a referência de tensão é alcançada. Um fato interessante, entretanto, a ser notado é que a tensão de sequência negativa apresenta uma oscilação grande em torno da referência, 0,2 V, mas que vai reduzindo à medida que a tensão no PCC diminui pela retirada ou desligamento de alguns capacitores, diminuindo, então, o erro entre a referência de tensão e o valor medido no PCC, aliviando o controlador. A tensão de sequência positiva, como é dependente dos capacitores inseridos no sistema elétrico, somente diminui à medida que os capacitores são desligados, gradativamente.

Atenção deve ser dada às correntes e potências do inversor, Figuras 6.25 e 6.26, quando submetido a uma perda de carga muito grande como a realizada na simulação. Numa aplicação prática, com limitadores de potência, a atuação do inversor seria retardada até que a tensão alcançasse níveis menores, após a retirada de alguns bancos de capacitores.

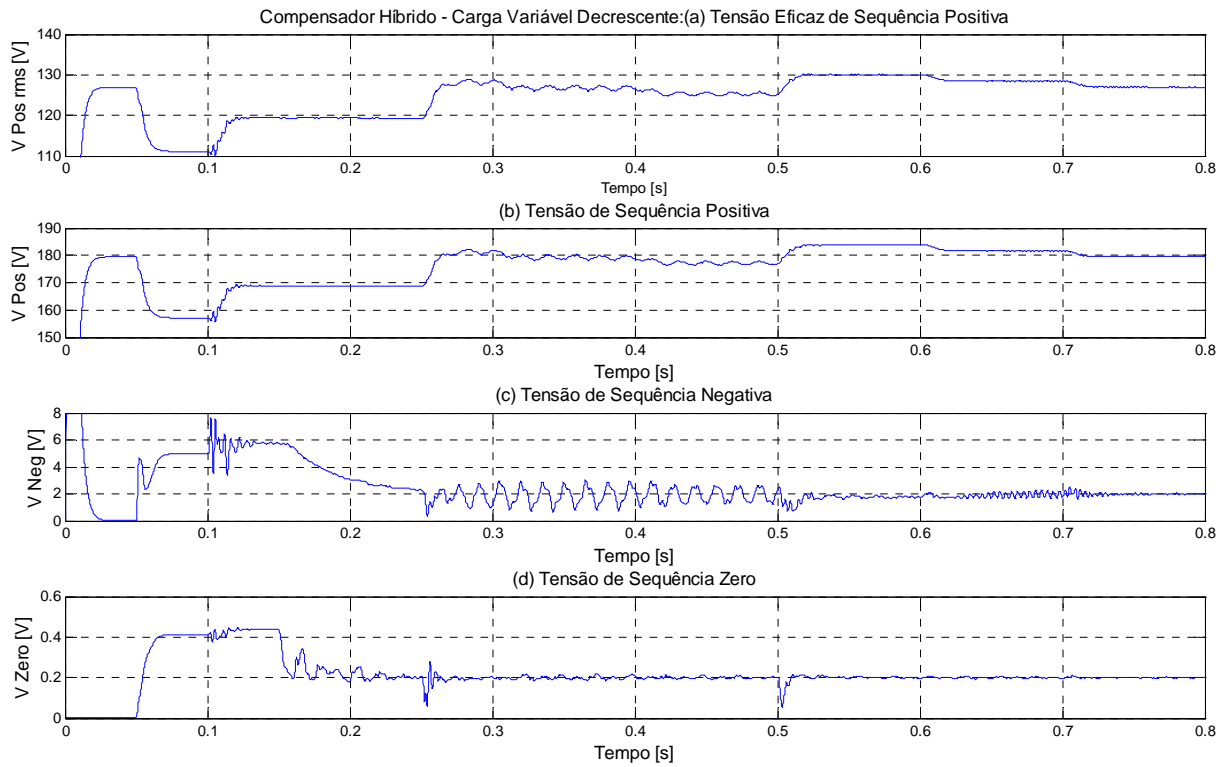


Figura 6.24: Componentes de sequência com carga decrescente e compensador híbrido.

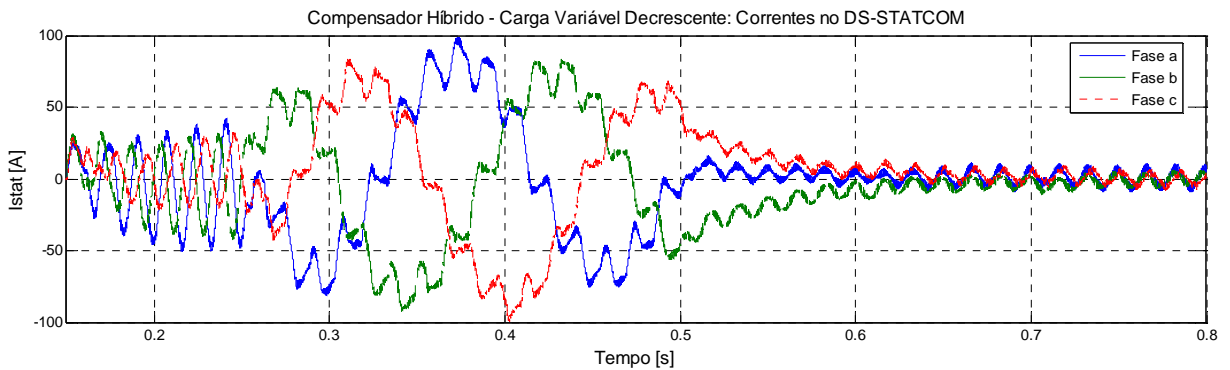


Figura 6.25: Correntes no DS-STATCOM com carga decrescente e compensador híbrido.

Para essa situação de carga analisada a tensão no PCC, devido às duas grandes reduções de carga em um curto intervalo de tempo, chega a atingir 131 volts, Figura 6.27, valor ainda dentro da faixa adequada de fornecimento de energia elétrica.

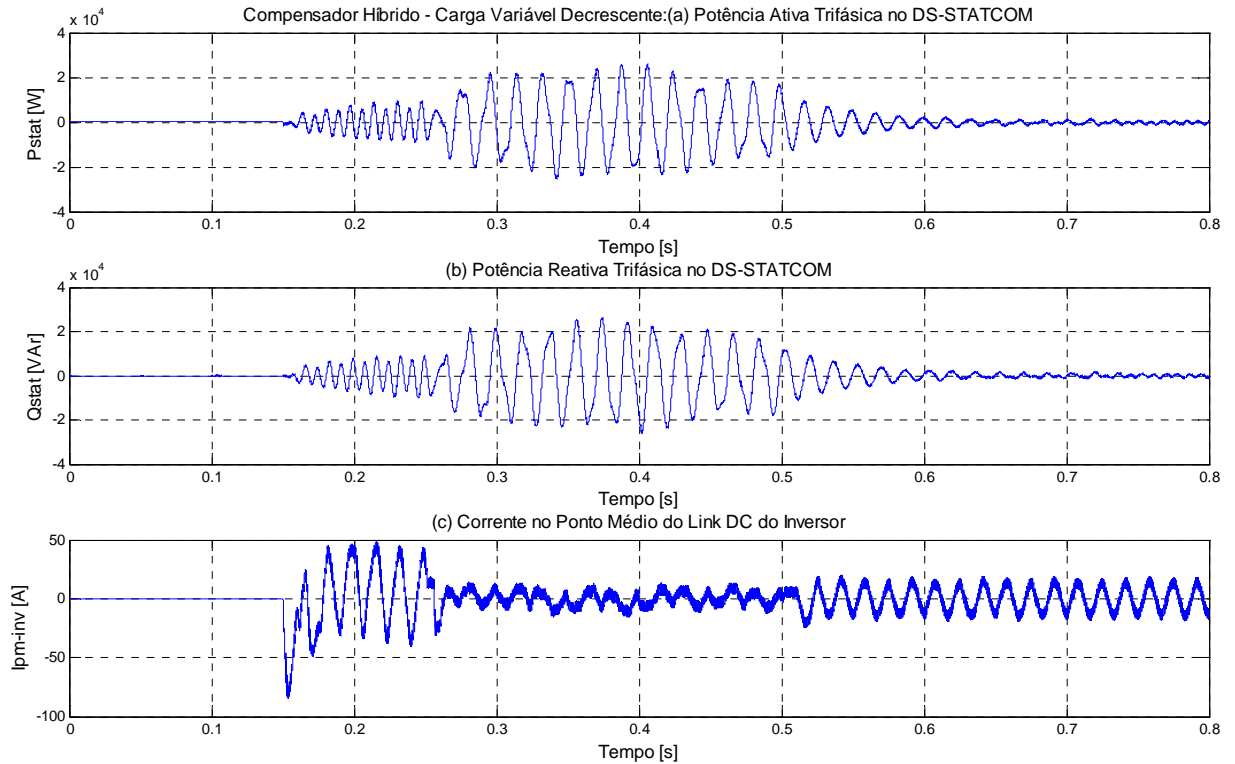


Figura 6.26: Potências trifásicas no DS-STATCOM e corrente do link DC do inversor com carga decrescente e compensador híbrido.

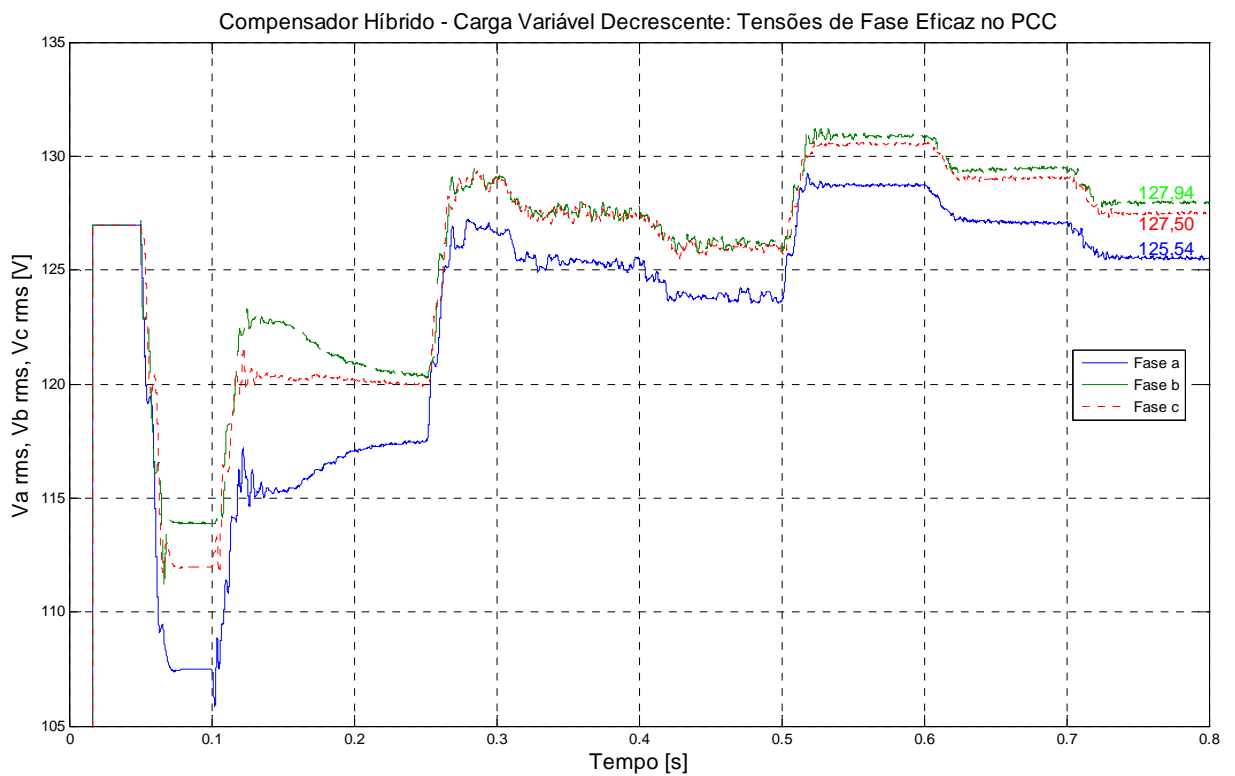


Figura 6.27: Tensões eficazes de fase no PCC com carga decrescente e compensador híbrido.

6.6. Outros Resultados

A Tabela 6.3 apresenta os níveis de tensão alcançados no PCC bem como o nível de desequilíbrio da tensão para os casos de cargas desequilibradas e equilibradas aplicando diferentes formas de compensação.

É nítida a influência negativa de uma carga desequilibrada na tensão final do PCC bem como o efeito positivo do inversor para a diminuição do desequilíbrio entre as tensões de fase.

Tipo de Carga	Tipo de Compensação	Tensão Eficaz (V)			FD (%)
		Fase A	Fase B	Fase C	
Desequilibrada 111,8%	Sem Compensação	107,5	114,0	112,0	3,17%
	Somente com Inversor	109,9	112,5	111,9	1,25%
	Somente com Capacitores	115,3	122,7	120,3	3,41%
	Híbrida sem Ponto Neutro no Inversor	116,7	119,9	119,6	1,44%
	Híbrida	117,7	120,1	119,8	1,21%
	Híbrida com 29% de Carga	125,5	127,9	127,5	1,11%
Equilibrada 110%	Sem Compensação	113,3	113,3	113,3	0,00%
	Híbrida	122,0	122,0	122,0	0,00%

Tabela 6.3: Resultados para carga equilibrada e desequilibrada com diferentes tipos de compensação.

Com o objetivo de verificar o procedimento utilizado para obtenção dos parâmetros do controlador PI, foram realizados novos projetos utilizando outros transformadores e compensadores híbridos, verificando-se que os novos parâmetros obtidos para esses compensadores permitiram alcançar a referência de controle definida. Os resultados são apresentados na Tabela 6.4.

Tipo de Carga	Trafo	Capacitor	Inversor	Tensão Eficaz (V)			FD (%)
	kVA	kVAr	kVA	Fase A	Fase B	Fase C	
Desequilibrada 111,8%	45	35	5	123,7	126,1	125,8	1,13%
	75	35	10	117,7	120,1	119,8	1,21%
	112,5	35	10	110,8	113,3	112,9	1,24%
	112,5	52,5	10	114,6	117,1	116,6	1,21%
	112,5	52,5	15	114,6	117,1	116,6	1,23%

Tabela 6.4: Resultados para diferentes potências de transformadores.

Capítulo 7: Conclusões

O trabalho apresentado analisou o uso de um compensador híbrido de reativos para o controle da tensão secundária em redes aéreas de distribuição. Durante seu desenvolvimento, foram considerados três níveis de cargas denominadas de leve, média e de sobrecarga e avaliado qualitativa e quantitativamente o comportamento das tensões e correntes elétricas em várias partes do sistema elétrico de potência.

Observou-se que o compensador híbrido com bancos trifásicos de capacitores totalizando 17,5 kVAr, Anexo I, não atendeu completamente o objetivo proposto por permitir que algumas das tensões de fase do sistema elétrico ficassem fora da faixa adequada de fornecimento de energia elétrica. Essa proposta inicialmente estudada teve o objetivo de obter um compensador híbrido de baixa potência, cerca de 25 kVA, incluída a potência do inversor.

A segunda proposta estudada, um compensador híbrido de 45 kVA incluindo um inversor de 10 kVA, se mostrou vantajosa em relação à primeira por garantir, junto à ação do compensador ativo, que os níveis de tensão do PCC alcançassem níveis satisfatórios quando inserido em um sistema elétrico com 111,8% de carga desequilibrada e fortemente indutiva.

Uma desvantagem identificada foi que para variações decrescentes muito grandes de carga, 57,8%, exige-se muita potência do inversor para se compensar as componentes de sequência negativa e zero. Tal fato ocorre porque todos os capacitores estão ligados, o que faz aumentar muito e instantaneamente o nível de tensão no PCC, fazendo o inversor trabalhar mais para compensar essa diferença atuando somente sobre as sequências negativa e zero, enquanto os bancos são desligados gradativamente. Esse problema pode ser resolvido através de uma lógica que suspenda ou retarde a ação do inversor sempre que tais variações ocorrerem.

O emprego de um compensador híbrido de reativos por uma concessionária de energia elétrica poderia ser realizado em locais onde se identifique níveis de tensão críticos e precários, cuja solução definitiva para a correção do nível de tensão, como substituição de transformadores, instalação de novos transformadores com a divisão do circuito secundário, substituição por condutores elétricos de maior seção transversal, entre outras soluções

possíveis, possa demorar mais que os prazos determinados pela agência reguladora para se solucionar o problema.

Dessa forma, a solução híbrida apresentada poderia ser empregada, num primeiro momento, sempre de forma temporária na rede secundária de distribuição. O banco de capacitores de 35kVAr, por permitir ganhos de até 9 volts na tensão do PCC, seria a solução recomendada para mudar um cliente de faixa de tensão, conforme definidas pela ANEEL: faixa crítica de tensão ($TL < 109$ volts), faixa precária de tensão ($109 \leq TL \leq 116$) e faixa adequada de tensão ($116 \leq TL \leq 133$).

Analisando a aplicação de uma ferramenta como essa numa rede de distribuição, pode-se concluir que ela seria aplicada, em sua grande maioria das vezes, em sistemas com carregamento extremamente elevado. Isso, na prática, significa dizer que durante o período de carga média, entre 06 e 18 horas, um transformador, com características residenciais, já teria alcançado cerca de 90 a 100% de sua potência nominal, podendo alcançar, no horário de ponta, entre 18 e 21 horas, sobrecargas de 30% ou mais.

Assim, o uso de um sistema binário para o acionamento dos bancos de capacitores não precisa englobar todos os bancos porque sempre haverá pelo menos um dos bancos energizado, mesmo durante o período de carga leve, 21 às 06 horas. Assim, uma boa solução poderia ser um banco de capacitores fixo com cerca de 10 kVAr, 29% da capacidade total dos bancos, e outros dois bancos chaveados conforme a necessidade e com 5 kVAr e 20 kVAr, 14% e 57% da capacidade total dos bancos, respectivamente. Esta solução apresenta uma vantagem econômica por dispensar controle e chaves especiais para a unidade capacitiva fixa.

Durante o desenvolvimento do trabalho várias configurações foram testadas para a conexão dos bancos de capacitores e inversor: capacitores ligados em delta, capacitores ligados em estrela, tiristores dentro ou fora do delta dos capacitores, inversor com filtro LC de saída, inversor com filtro LCL de saída, etc., cada um deles apresentando características associadas a algum benefício. Ao final, adotou-se a configuração para que os capacitores fossem conectados em delta, com o tiristor dentro do delta, por facilitar o retorno à operação dos capacitores, após uma operação de desligamento, e o inversor conectado à rede apenas com um indutor L em sua saída, sempre considerando o fato de que uma menor quantidade de equipamentos envolvidos simplifica o sistema e o torna economicamente mais atrativa.

O controle da tensão no PCC a partir da leitura da componente de sequência positiva da tensão é extremamente interessante, pois não se está controlando o nível de tensão pela tensão da fase mais alta ou mais baixa, mas sim por uma composição das três fases, o que evita que a tensão de uma das fases fique muito alta ou muito baixa.

O uso da técnica de decomposição da tensão em suas componentes de sequência aliada ao uso de controladores PI para comandar o inversor PWM senoidal se mostrou bastante interessante. O sinal de controle aplicado para cada fase faz o inversor injetar níveis de corrente diferente em cada fase, mas com o objetivo de se obter a mesma tensão de referência em todas as fases do sistema, colaborando no sentido de reduzir o desequilíbrio de tensão no PCC. No entanto, pelo fato de controlar somente as componentes de sequência negativa e zero, o ganho de tensão proporcionado pelo uso do inversor é menor, quando comparado ao capacitor.

Um fato identificado é que praticamente toda a potência do inversor é destinada à compensação da componente de sequência negativa, que apresenta valores de tensão cerca de dez vezes maiores que as tensões da componente de sequência zero, o que torna difícil a obtenção de sistemas híbridos com inversores de potência inferior a 5 kVA, por exemplo.

Pelos resultados encontrados, identifica-se a necessidade de um inversor de 10 kVA, totalizando, junto com os capacitores, uma capacidade reativa de 45 kVA. Um fato importante a ser observado é a razão entre a potência do compensador híbrido e a potência do transformador de distribuição: 45 kVA / 75 kVA → 60%. Como sabemos a compensação de energia reativa não é realizada de forma linear. Assim, pode-se demonstrar que são necessários poucos kVAr para se obter grandes melhorias no fator de potência de circuitos com baixíssimo fator de potência, mas são necessários vários quantitativos de kVAr quando se deseja aumentar o fator de potência de circuitos com elevados fatores de potência (acima de 0,92).

A abordagem proposta para escolha dos ganhos dos controles de sequência negativa e zero mostrou-se altamente satisfatória, sugerindo-se seu uso em situações semelhantes. Também a proposta de controle binário da sequência negativa mostrou-se eficiente.

Como idéia de continuidade, pode-se citar:

- Análise de outras estratégias nos laços de controle;
- Implementação da topologia;
- Extensão a aplicações de média tensão, onde o requisito desequilíbrio é mais severo;
- Estudo de sistemas com cargas não lineares.

Referências Bibliográficas

- [1] Dixon, J. W., Morán L., Rodriguez J., Domke R., “Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review”, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 12, December 2005, pp. 2144-2164.
- [2] Resolução Normativa ANEEL nº 395/2009: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Revisão 1.
- [3] Melo, V. S., Giacomini, V. L., Souza, A. M. de, Ventorini, A., Simonetti, D. S. L., Sousa, G. C. D., Macedo JR, J. R.. “Análise para Implantação de STATCOM na Correção de Tensão Secundária”. In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2009, Blumenau. Anais da VIII CBQEE, 2009.
- [4] Melo, V. S. de, “Controle da qualidade da tensão de fornecimento em redes secundárias de distribuição através de compensador estático de reativos”, Dissertação de Mestrado – PPGEE- UFES, 2009.
- [5] CHEN, S.; JOOS, G.; MORAN, L. T.; Dynamic Performance of PWM STATCOMS Operating under Unbalance and Fault Conditions in Distribution Systems. Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE Volume 2, 28 Jan.-1 Feb. 2001 Page(s):950 - 955 vol.2
- [6] Watanabe, E. H., Barbosa, P. G., Almeida, K. C. e Taranto, G. N., "Tecnologia FACTS – Tutorial", SBA Controle & Automação Vol. 9 no.1 / Jan., Fev., Mar. e Abril de 1998.
- [7] Pimentel, D. G. de M., Lopes, F. da C., Rolim, L. G. B., Watanabe, E. H., “Análise e Validação Experimental de um STATCOM para Regulação de Tensão”, CBA, 2004.
- [8] Freitas, F., França, A.. “Modelagem e análise dinâmica de dispositivos DSTATCOM usando o Simpowersystems para MatLab/Simulink, Revista Controle e Automação”, Vol. 16, no. 2, Maio e Junho 2005.

- [9] Jayaprakash, P., Singh, B., Kothari, D. P.. "DSP based implementation of a three-phase four-wire DSTATCOM for voltage regulation and power quality improvement," *Industrial Electronics*, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE , vol., no., pp.3660-3665, 3-5 Nov. 2009
- [10] Soo-Young Jung, Tae-Hyun Kim, Seung-II Moon, Byung-Moon Han, "Analysis and Control of DSTATCOM for a Line Voltage Regulation", *IEEE*, 2002 Pages: 729-734.
- [11] Ledwich, G., Ghosh, A., "A Flexible DSTATCOM Operating in Voltage or Current Control Mode", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* Vol. 149, No. 2, March 2002.
- [12] Mishra, M. K., Ghosh, A., Joshi, A., "Operation of a DSTATCOM in Voltage Control Mode", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, N. 1, January 2003.
- [13] Blažič, B., Papič, I., "Improved D-STATCOM Control for Operation With Unbalanced Currents and Voltages", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, N. 1, January 2006.
- [14] Kindermann, G., "Curto Circuito", Porto Alegre – Sagra Luzzatto, 1997, 1ª edição.
- [15] Oliveira, C. C. B. de, Schmidt, H. P., Kagan, N., Robba, E. J., "Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricas, São Paulo - Blucher, 2000, 2ª edição.
- [16] Akagi, H., Watanabe, E. H., Aredes, M.. "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning", *IEEE*, 2007.
- [17] Hochgraf, C., Lasseter, R. H., "STATCOM controls for operation with unbalanced voltages", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, no.2, April 1998, pp. 538-544.
- [18] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso S. e Beaty, H. W., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, second edition.
- [19] Hingorani, N. G., Gyugyi, L.. "Understanding FACTS – Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", *IEEE Press*, 2000.

- [20] WEG Automação S.A., “Capacitores para Correção do Fator de Potência”, Catálogo Português – V06, disponível em www.weg.net.
- [21] Martins, D. C., Barbi, I., “Eletrônica de Potência: Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA”, Florianópolis - Ed. dos Autores, 2005.
- [22] Riquelme, A. J. O., “Contribuições ao Controle do STATCOM”, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.
- [23] Ogata, K., Engenharia de Controle Moderno, Prentice Hall, 2003, 4ª edição.
- [24] Kuo, B. C., Automatic Control Systems, Prentice Hall International Inc., 1995, 7th edition.

Apêndice I: Programa para o Controle do Acionamento Binário dos Bancos de Capacitores.

```
function [y]=controle(u)

%          4C 2C C
% estado = 0 -- 0 0 0
% estado = 1 -- 0 0 1
% estado = 2 -- 0 1 0
% estado = 3 -- 0 1 1
% estado = 4 -- 1 0 0
% estado = 5 -- 1 0 1
% estado = 6 -- 1 1 0
% estado = 7 -- 1 1 1

% vmin=124;
% vmax=130;

Vref=u(1);
estado=u(2);
pulsos=u(3);

banco(1:3) = 0;

if pulsos ~= 0
    if estado~=0
        if (Vref>130)
            estado=estado-1;
        elseif (Vref>124) & (Vref<=130)
            estado=estado;
        elseif ((123<Vref) & (Vref<=124))
            estado=estado+1;
        elseif ((122<Vref) & (Vref<=123))
            estado=estado+1;
        elseif ((121<Vref) & (Vref<=122))
            estado=estado+1;
        elseif ((119<Vref) & (Vref<=121))
            estado=estado+1;
        elseif ((118<Vref) & (Vref<=119))
            estado=estado+1;
        elseif ((117<Vref) & (Vref<=118))
            estado=estado+1;
        else (Vref<=117)
            estado=estado+1;
        end
    end
else
    if (Vref>124)
        estado=estado;
    elseif ((123<Vref) & (Vref<=124))
        estado=1;
    elseif ((122<Vref) & (Vref<=123))
        estado=2;
    elseif ((121<Vref) & (Vref<=122))
        estado=3;
    elseif ((119<Vref) & (Vref<=121))
```

```

        estado=4;
    elseif ((118<Vref) & (Vref<=119))
        estado=5;
    elseif ((117<Vref) & (Vref<=118))
        estado=6;
    else (Vref<=117)
        estado=7;
    end
end

if estado>7
    estado=7;
elseif estado<0
    estado=0;
end

switch estado

case 0
    banco(1:3)=0;
case 1
    banco(1)=1;
    banco(2)=0;
    banco(3)=0;
case 2
    banco(1)=0;
    banco(2)=1;
    banco(3)=0;
case 3
    banco(1:2)=1;
    banco(3)=0;
case 4
    banco(1:2)=0;
    banco(3)=1;
case 5
    banco(1)=1;
    banco(2)=0;
    banco(3)=1;
case 6
    banco(1)=0;
    banco(2:3)=1;
case 7
    banco(1:3)=1;
end
else

switch estado
case 0
    banco(1:2) = 0;
    banco(3)=0;
case 1
    banco(1) = 1;
    banco(2) = 0;
    banco(3)=0;
case 2
    banco(1) = 0;
    banco(2) = 1;
    banco(3)=0;
case 3

```

```
        banco(1:2) = 1;
        banco(3)=0;
    case 4
        banco(1:2)=0;
        banco(3)=1;
    case 5
        banco(1)=1;
        banco(2)=0;
        banco(3)=1;
    case 6
        banco(1)=0;
        banco(2:3)=1;
    case 7
        banco(1:3)=1;
    end
end

y(4)=estado;
y(1)=banco(1);
y(2)=banco(2);
y(3)=banco(3);
```

Apêndice II: Simulações Realizadas com Bancos de Capacitores de 17,5 kVAR – Carga Variável Crescente.

A seguir são apresentados os principais resultados das simulações de um compensador híbrido utilizando bancos de capacitores de 17,5 kVAR para a situação de carga variável crescente. A Figura AII.1 apresenta as tensões e correntes no PCC.

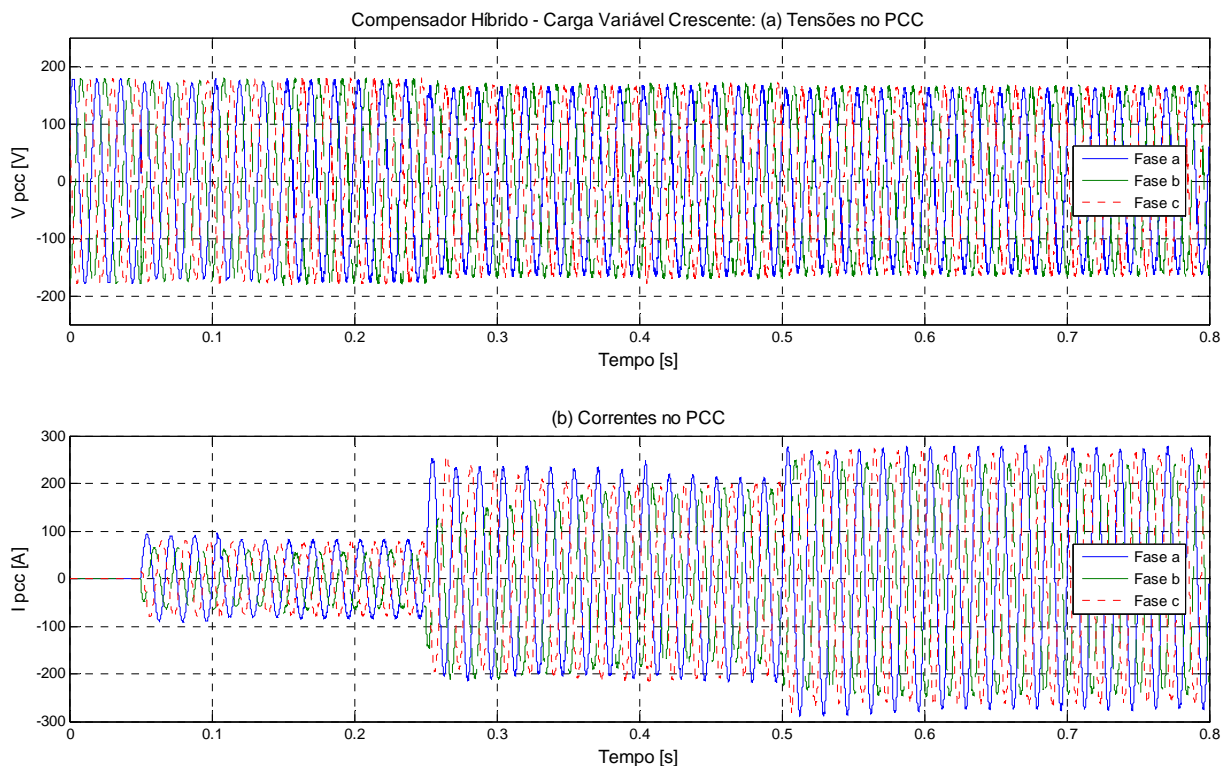


Figura AII.1: Tensões e correntes no PCC com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAR.

Na Figura AII.2 são mostradas as tensões de sequência positiva, negativa e zero. É importante observar que os controladores projetados levam as tensões de sequência negativa e zero para seus valores de referência para os bancos de capacitores não são suficientes para que a tensão de sequência positiva atinja sua referência.

As correntes no DS-STATCOM, apresentadas na Figura AII.3 são quase idênticas as obtidas na simulação da seção 6.2 (compensação apenas com inversor) e muito parecidas com as da seção 6.4 (compensação híbrida com bancos de 35 kVAR).

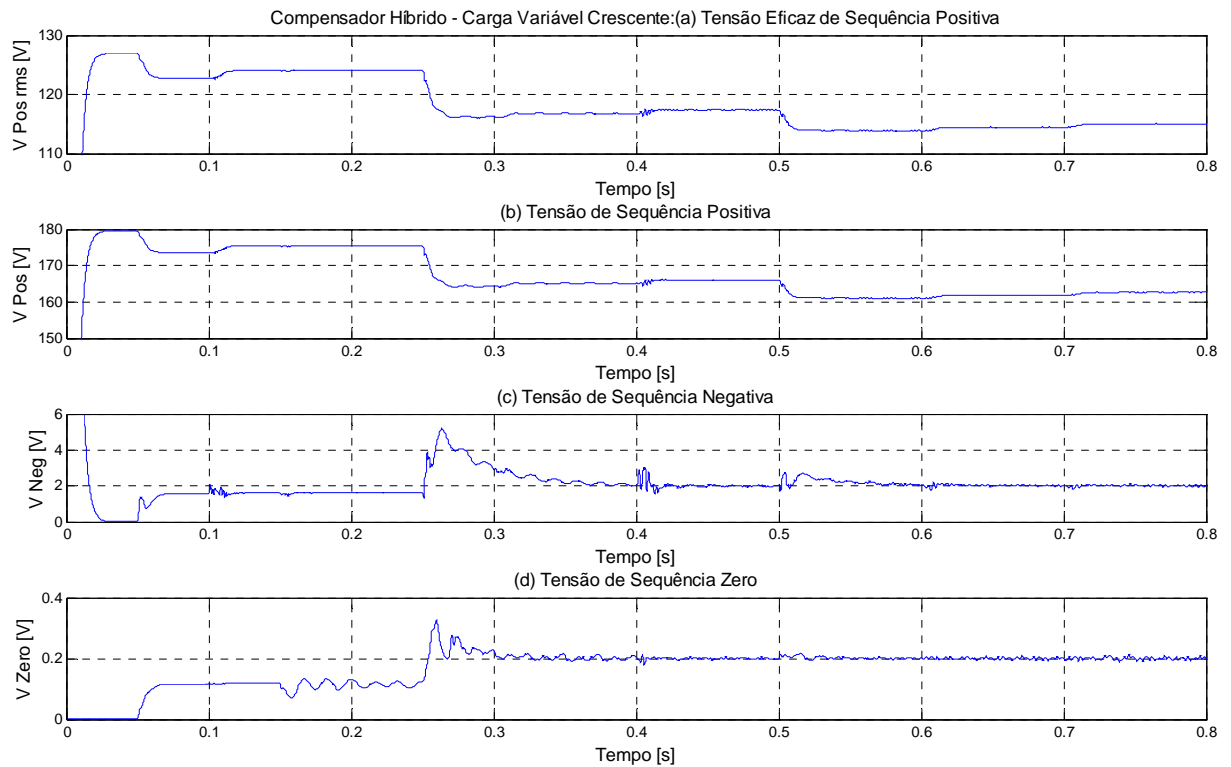


Figura AII.2: Componentes de seqüência positiva, negativa e zero com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.

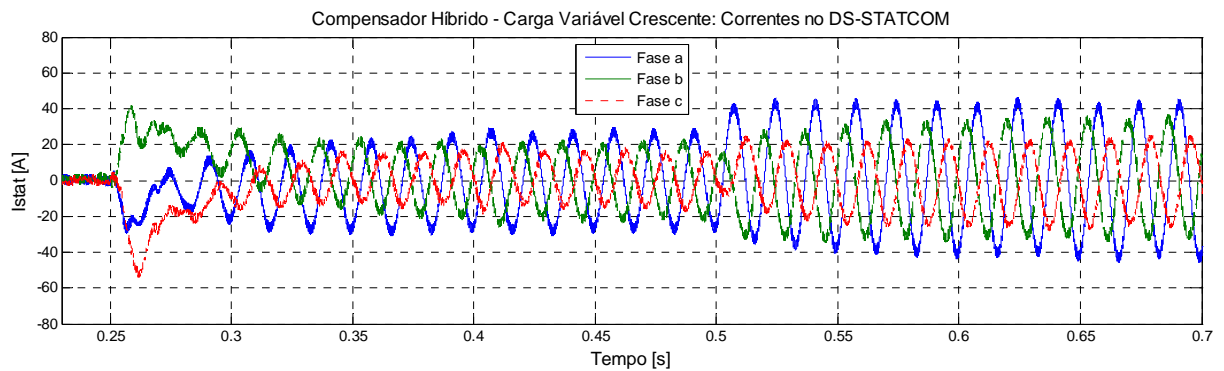


Figura AII.3: Correntes no DS-STATCOM com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.

As potências ativa e reativa do DS-STATCOM, mostradas na Figura AII.4, são um pouco inferiores àquelas apresentadas na compensação híbrida com capacitores de 35 kVAr. Já as tensões de fase eficaz no PCC apresentam valores bem baixos, não ultrapassando o valor mínimo de 116 volts da faixa de tensão considerada adequada.

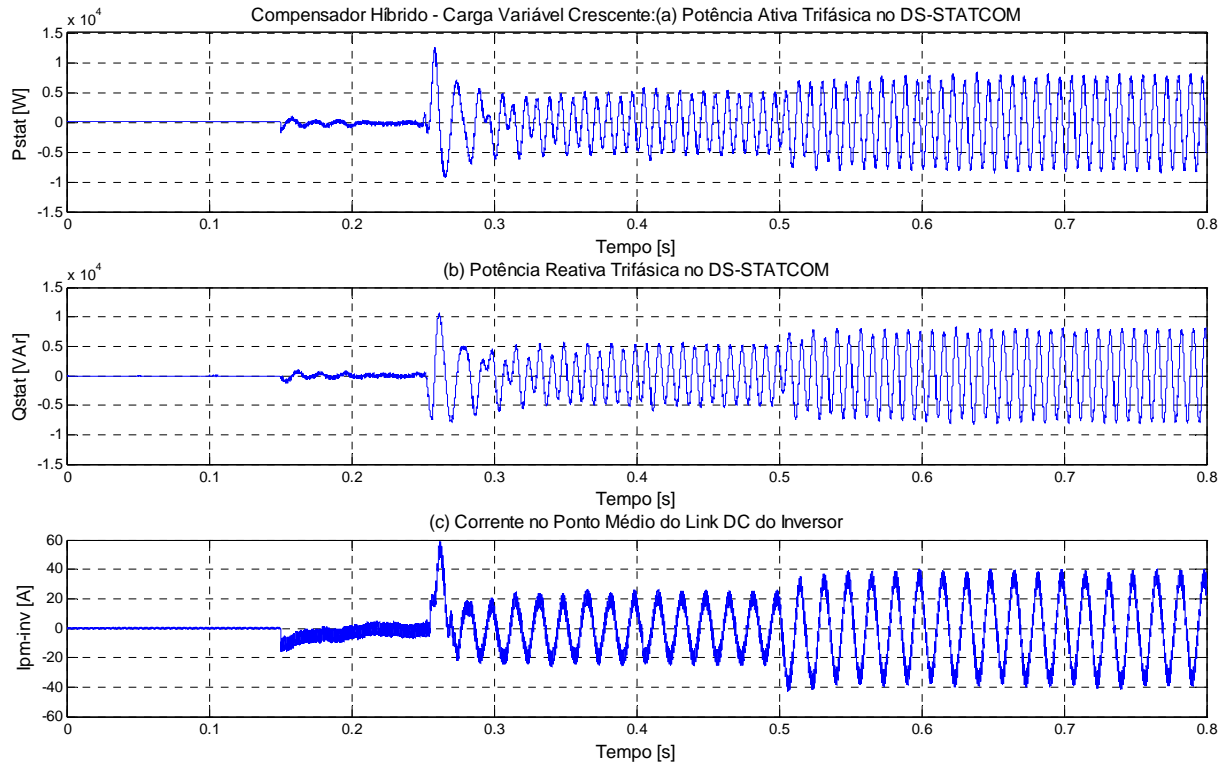


Figura AII.4: Potências trifásicas no DS-STATCOM e corrente do link DC do inversor com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAR.

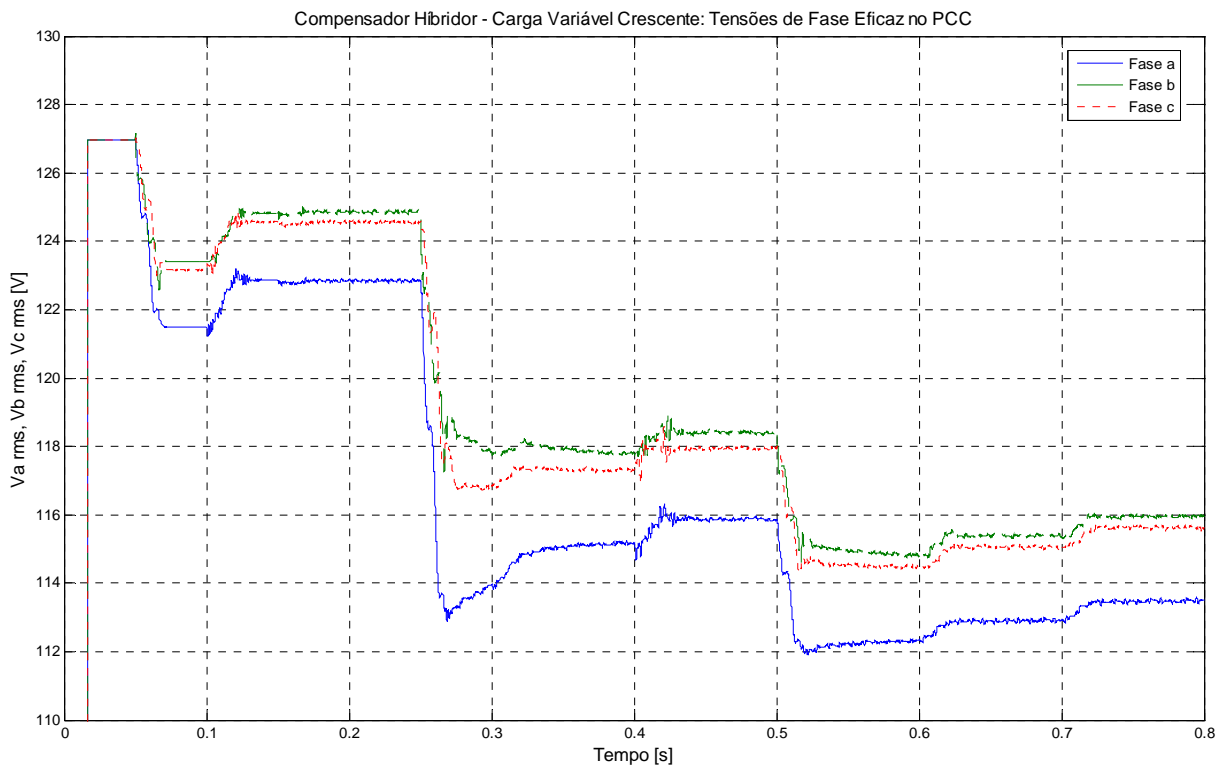


Figura AII.5: Tensões de fase eficaz no PCC com carga crescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAR.

Apêndice III: Simulações Realizadas com Bancos de Capacitores de 17,5 kVAr – Carga Variável Decrescente.

Para a situação de carga variável decrescente utilizando bancos de capacitores de 17,5 kVAr são apresentadas as tensões e correntes no PCC, através da Figura AIII.1, e que devem ser comparadas à Figura 6.22.

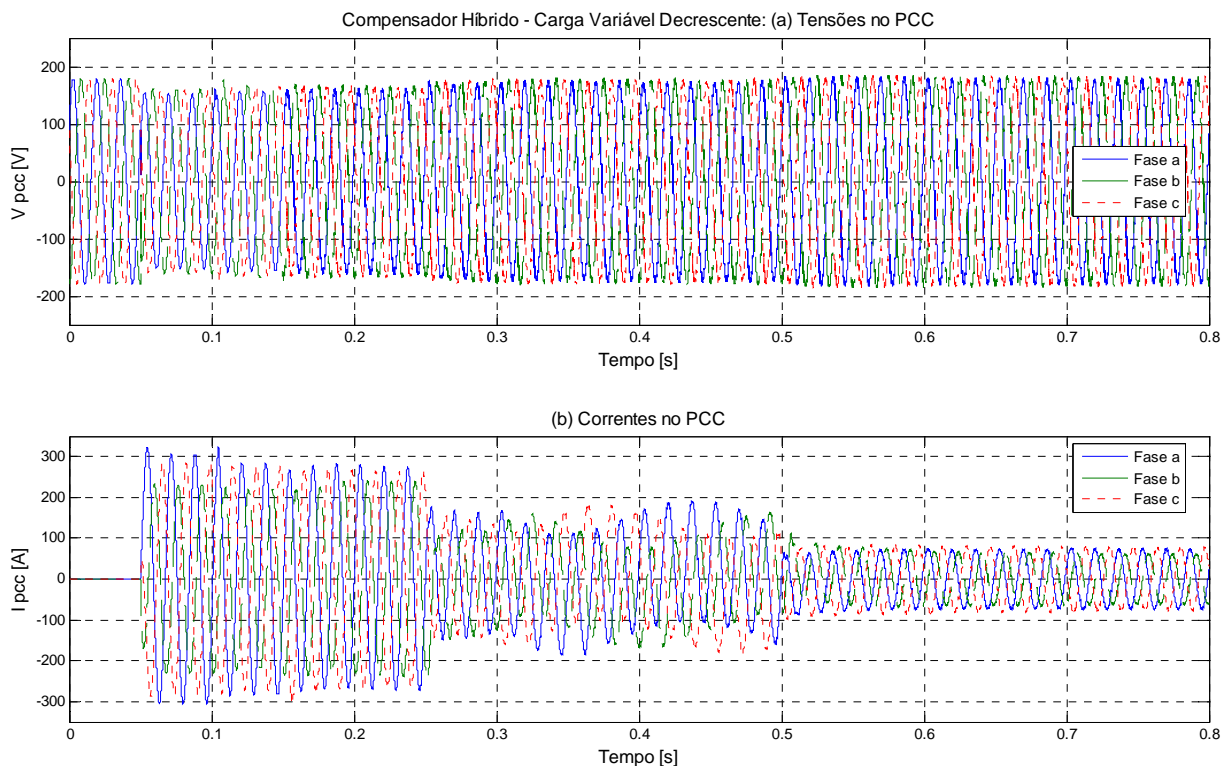


Figura AIII.1: Tensões e correntes no PCC com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr:

Da mesma forma que o Apêndice II, são mostradas as tensões de sequência positiva, negativa e zero na Figura AIII.2. Nesse caso, recomenda-se a comparação com a Figura 6.24. Também para essa situação simulada os controladores projetados levam as tensões de sequência negativa e zero para seus valores de referência, apresentando menores oscilações em torno da referência. Já a tensão de sequência positiva, como se esperava, atinge valores ótimos no final da simulação, pois há redução sistemática da carga.

As correntes no DS-STATCOM, apresentadas na Figura AIII.3, apresentam comportamento semelhante as das outras simulações, porém com valores de corrente bem

mais modestos que aqueles apresentado quando utilizado bancos de capacitores de 35 kVAr (comparar com Figura 6.25).

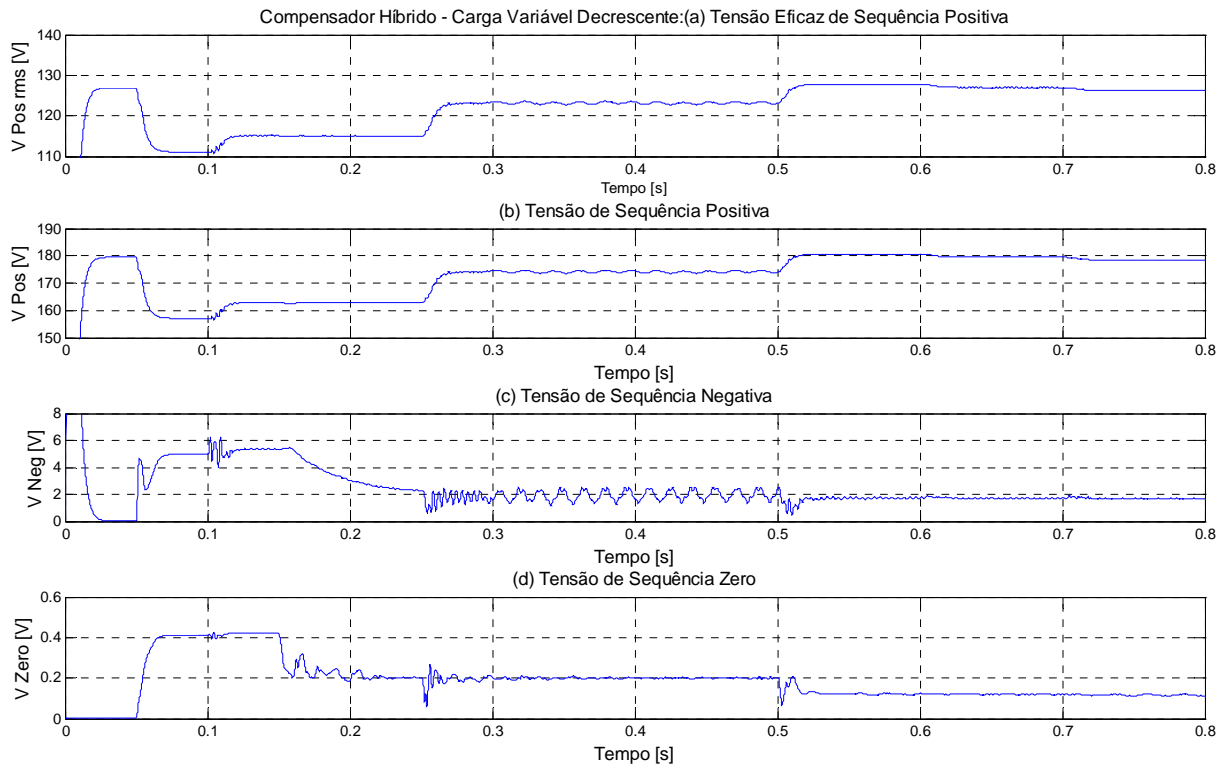


Figura AIII.2: Componentes de seqüência positiva, negativa e zero com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.

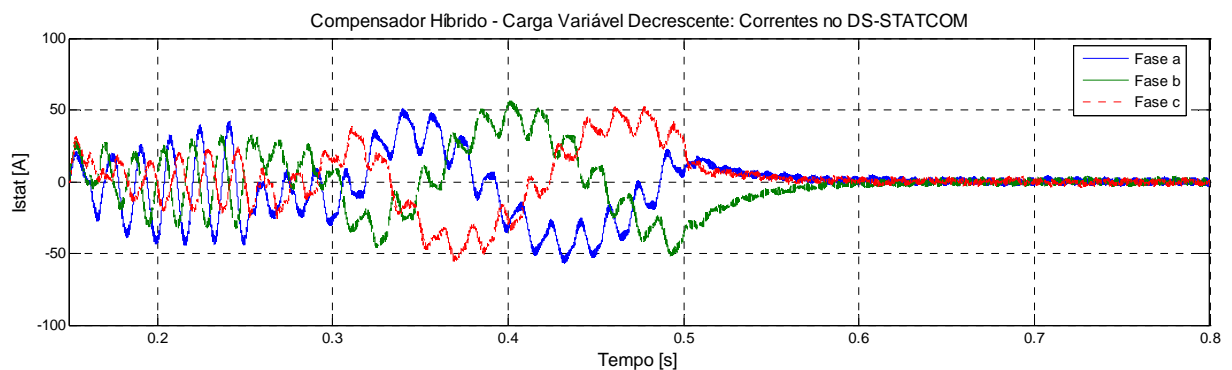


Figura AIII.3: Tensões e correntes no DS-STATCOM com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.

As potências trifásicas são mostradas na Figura AIII.4 e as tensões de fase eficaz na Figura AIII.5. Nesta é possível verificar a ação do algoritmo de controle dos bancos de capacitores levando as tensões de fase para valores próximos da referência, 127 V.

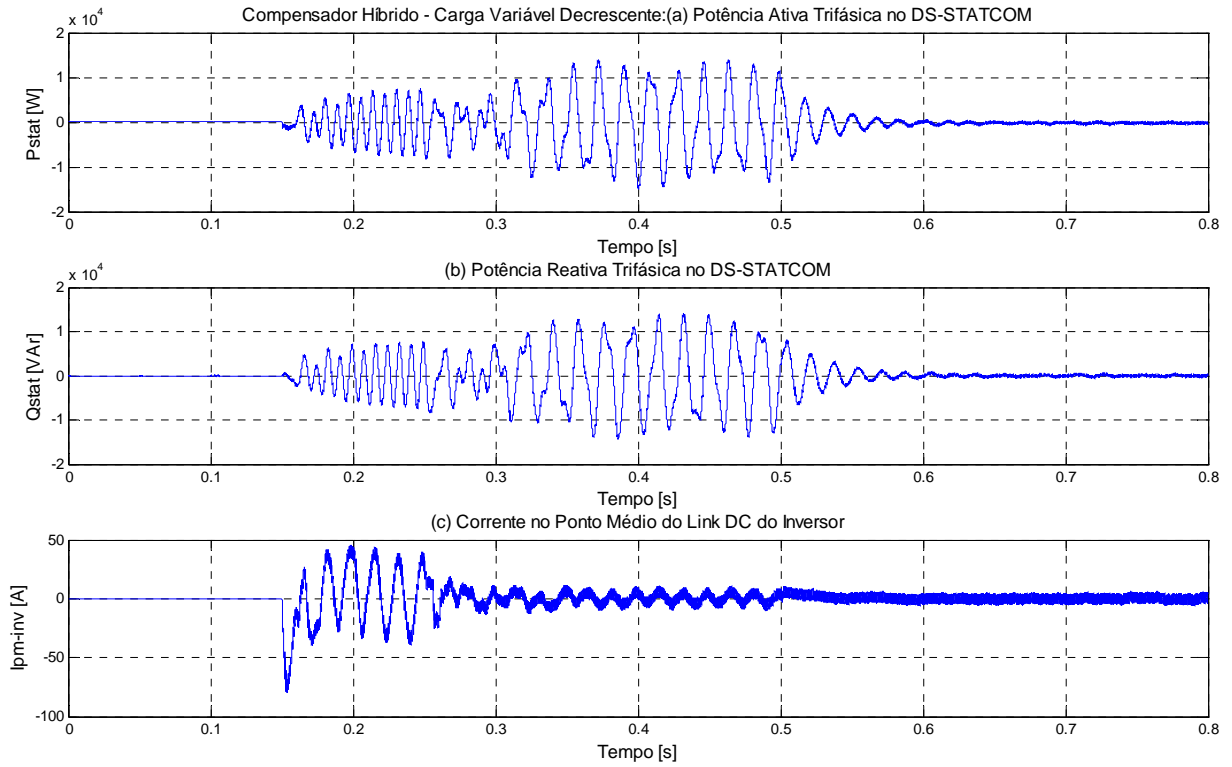


Figura AIII.4: Potências trifásicas no DS-STATCOM e corrente do link DC do inversor com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.

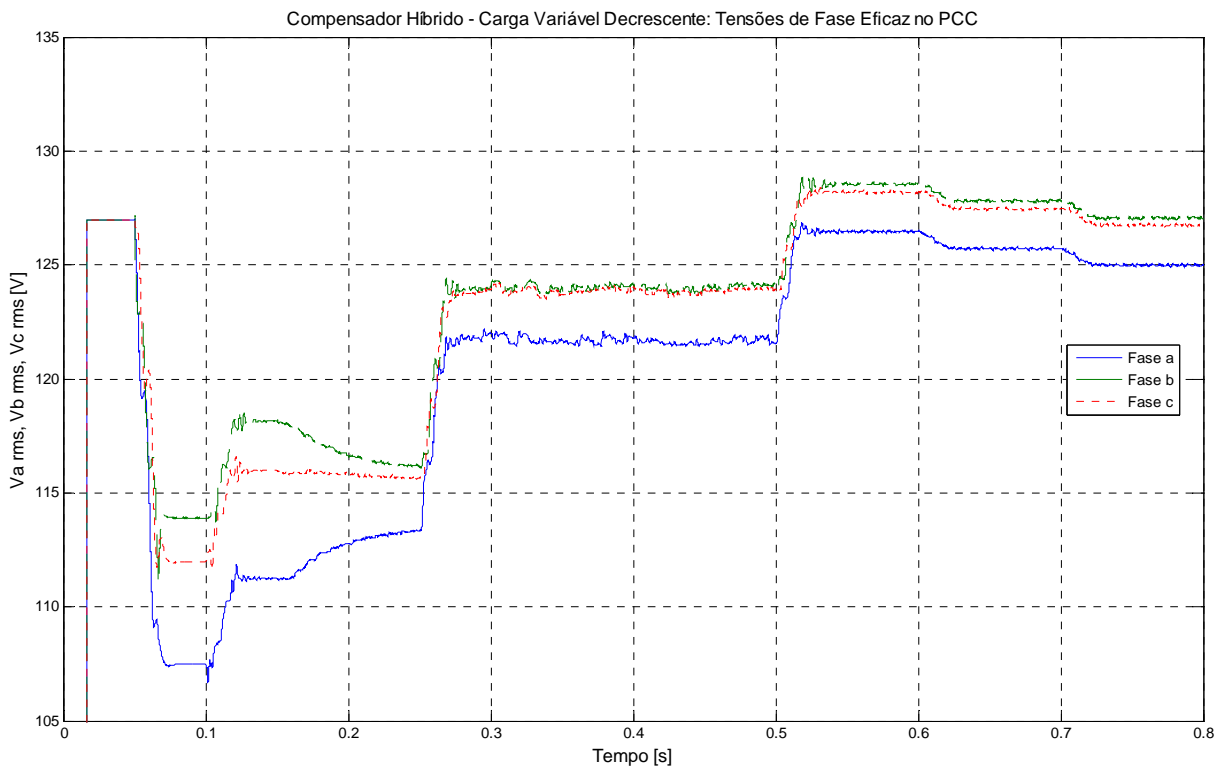


Figura AIII.5: Tensões de fase eficaz com carga decrescente, compensador híbrido e capacitores de 17,5 kVAr.

Apêndice IV: Parâmetros do Sistema Simulado.

Nesta seção são evidenciadas as grandezas elétricas dos componentes (fonte, rede elétrica, transformador, tiristores e DS-STATCOM) utilizados nas várias simulações realizadas. O nível de curto-circuito no PCC é de 1,2 kA.

Grandezas Elétricas do Sistema Equivalente	
Tensão entre Fases (V):	220
Frequência (Hz):	60
Ligação da Fonte (Y / Δ):	Y aterrado
Resistência (Ω):	0,01
Indutância (H):	0,00025

Tabela AIV.1: Grandezas Elétricas do Sistema Equivalente.

Grandezas Elétricas do Transformador	
Potência (kVA):	75
Tensão entre Fases (kV):	13,8 / 0,220
Frequência (Hz):	60
Ligação (Y / Δ):	Δ / Y aterrado
Resistência (pu):	0,0077
Indutância (pu):	0,016
Resistência de Magnetização (pu):	500
Reatância de Magnetização (pu):	500

Tabela AIV.2: Grandezas Elétricas do Transformador.

Grandezas Elétricas dos Tiristores dos Capacitores	
Tensão Direta (V):	0,8
Resistência Interna (Ω):	0,001
Indutância (H):	0
Resistência Snubber (Ω):	500
Capacitância Snubber (F):	2,50E-07

Tabela AIV.3: Grandezas Elétricas dos Tiristores dos Capacitores.

Grandezas Elétricas do DS-STATCOM	
Tensão do Link DC (V):	210 + 210
Ponte Inversora	
Formação:	IGBT / Diodos
Tensão Direta IGBT / Diodos (V):	0
Resistência Interna (Ω):	0,001
Resistência Snubber (Ω):	1,00E+05
Capacitância Snubber (F):	1,00E-07
Gerador de Pulsos PWM	
Frequência Carrier (Hz)	5220
Tempo de Amostragem (s)	2,00E-06
Indutância de Acoplamento ao PCC	
Indutância (H):	3,60E-03
Resistência (Ω):	0,05

Tabela AIV.4: Grandezas Elétricas do DS-STATCOM.