



COPPE/UFRJ

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O DSTATCOM OPERANDO
COMO FONTE DE CORRENTE CONTROLADA
E COMO FONTE DE TENSÃO CONTROLADA

Rafael Michalsky Campinhos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Maurício Aredes

Rio de Janeiro

Junho de 2009

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O DSTATCOM OPERANDO
COMO FONTE DE CORRENTE CONTROLADA
E COMO FONTE DE TENSÃO CONTROLADA

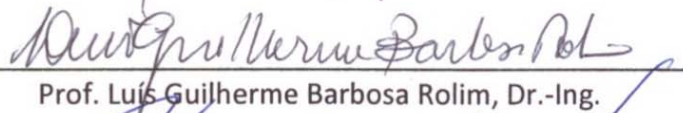
Rafael Michalsky Campinhos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:



Prof. Mauricio Aredes, Dr.-Ing.



Prof. Luis Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.



Prof. Paulo Fernando Seixas, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2009

CAMPINHOS, RAFAEL MICHALSKY

Estudo comparativo entre o DSTATCOM operando como fonte de corrente controlada e como fonte de tensão controlada / Rafael Michalsky Campinhos. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009

XII, 97 p. 29,7 cm

Orientador: Maurício Aredes

Dissertação – UFRJ / COPEE / Programa de Engenharia Elétrica, 2009

Referências Bibliográficas: p. 93-97

1. Compensadores Estáticos. 2. Controle por referência de corrente. 3. Controle por referência de tensão. I. Aredes, Mauricio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me permitir cumprir mais uma etapa da minha vida.

A meus pais, Erildo e Marilêda que em todos os momentos da minha vida estiveram ao meu lado me apoiando. E meus irmãos, Érico, Carolina e Gabriela, pelo incentivo e confiança.

Agradeço a minha noiva, Fernanda, que esteve ao meu lado durante todo este percurso, me apoiando e incentivando.

A todos os amigos do laboratório LEMT, com quem tive o privilégio de conviver.

Agradeço ao professor Maurício Aredes, por acreditar no meu trabalho e me incentivar na busca pelo conhecimento.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O DSTATCOM OPERANDO
COMO FONTE DE CORRENTE CONTROLADA
E COMO FONTE DE TENSÃO CONTROLADA

Rafael Michalsky Campinhos

Junho / 2009

Orientador: Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho estuda o compensador estático (DSTATCOM) operando sob duas formas distintas. O primeiro modo de operação é como fonte de corrente controlada, onde através do cálculo das potências ativa e reativa instantâneas são obtidas as correntes de compensação necessárias ao suporte de energia reativa. O segundo modo de operação é como uma fonte de tensão controlada, onde através do controle de amplitude e fase da tensão do conversor, controlam-se as potências ativa e reativa de compensação. Os estudos foram realizados através da análise de funcionamento de ambos os modos de operação em simulações computacionais no programa PSCAD/EMTDC e validadas em ensaios laboratoriais, impondo condições reais de funcionamento aos algoritmos de controle.

Desta forma, com os resultados obtidos, tanto em simulações quanto em bancada, foram apresentadas as vantagens e desvantagens de cada modo de operação estudado. Como a principal característica obtida destaca-se, a eliminação de componentes harmônicos quando na operação por referência de tensão.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CONTROLLED-CURRENT
SOURCE AND -VOLTAGE SOURCE
OPERATION OF A D-STATCOM

Rafael Michalsky Campinhos

June / 2009

Advisor: Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

This work studies the static compensator (D-STATCOM) operating in two distinct ways. The first operation mode is current source controlled, where the necessary compensation currents for the reactive energy support are obtained through the calculation of the active and passive instantaneous powers. The second operation mode is voltage source controlled, where the active and reactive compensation is controlled by the converter voltage-amplitude and -phase. The analysis of the behavior of both the operation modes were realized through PSCAD/EMTDC software and validated with experimental results, imposing real working conditions to the control algorithms.

With the obtained simulation and experimental results, the advantages and drawbacks of both the operation mode under study are presented. The principal obtained characteristic is the elimination of harmonic components with operation by voltage reference.

Sumário

Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabeas.....	xii
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Motivações para a realização do trabalho.....	3
1.2 Principais Objetivos.....	3
1.3 Organização e Estrutura da Dissertação	4
Capítulo 2 Aspectos Gerais da Compensação em Derivação.....	6
2.1 Compensador ideal em derivação	7
2.1.1 Capacidade de transmissão de potência ativa.....	8
2.1.2 Regulação de tensão	10
2.2 Bancos de Capacitores	11
2.3 Compensadores Síncronos	12
2.4 TSC - <i>Thyristor Switched Capacitor</i>	12
2.5 TCR - <i>Thyristor Controlled Reactance</i>	13
2.6 SVC – <i>Static Var Compensator</i>	13
2.7 Compensador Estático (STATCOM)	14
2.7.1 Histórico do STATCOM	14
2.7.2 Princípio de Funcionamento.....	15
2.7.3 Principais Componentes.....	17
2.7.4 Controladores do DSTATCOM	21
2.8 Conclusões Parciais	22
Capítulo 3 DSTATCOM Operando como uma Fonte de Corrente Controlada	23
3.1 PLL (<i>Phase Locked Loop</i>).....	25
3.2 Detector de Sequência Positiva.....	29
3.3 Controle da Potência Ativa.....	31
3.3.1 Controle para Regulação do elo CC.....	31
3.4 Controle da Potência Reativa.....	33
3.4.1 Compensação do Fator de Potência	33

3.4.2	Regulação das Tensões do Sistema.....	34
3.5	Cálculo das correntes de compensação e dos sinais de acionamento das chaves.....	37
3.6	Conclusões Parciais	38
Capítulo 4	DSTATCOM Operando como uma Fonte de Tensão Controlada	40
4.1	Controle da Potência Ativa	43
4.1.1	Controle para Regulação do elo CC.....	43
4.2	Controle da Potência Reativa	45
4.2.1	Compensação do Fator de Potência	46
4.2.2	Regulação das Tensões do Sistema.....	47
4.3	Cálculo das tensões de compensação e dos sinais de acionamento das chaves	48
4.4	Conclusões Parciais	49
Capítulo 5	Resultados de Simulação	51
5.1	Circuito sem compensação	54
5.2	Transitórios de partida do DSTATCOM	55
5.3	Regulação das tensões no barramento.....	57
5.4	Correção do fator de potência	60
5.5	Eliminação de harmônicos	63
5.6	Conclusões Parciais	70
Capítulo 6	Resultados Experimentais.....	71
6.1	Descrição do circuito de potência.....	72
6.2	Regulação das tensões no barramento	74
6.2.1	Tensão de linha 220V	75
6.2.2	Tensão de linha 110V	79
6.3	Correção do fator de potência.....	80
6.4	Eliminação de harmônicos	83
6.5	Conclusões Parciais	89
Capítulo 7	Conclusões e trabalhos futuros	90
	Referências Bibliográficas	93

Lista de Figuras

2.1	Sistema de Potência sem Compensação.....	8
2.2	Sistema de Potência com Compensação.....	9
2.3	Banco de capacitores.....	11
2.4	(a) TSC - Thyristor Switched Capacitor, (b) - Thyristor Controlled Reactance, (c) SVC - Static Var Compensator.	13
2.5	Diagrama simplificado de compensação paralela.....	16
2.6	Diagramas fasoriais de tensões e correntes.....	17
2.7	Circuito de Potência do DSTATCOM.....	18
2.8	Inversor trifásico em ponte.	19
2.9	Arquitetura do controle de um DSTATCOM.....	22
3.1	DSTATCOM controlado por referência de corrente.....	24
3.2	Algoritmo de controle do DSTATCOM operando por referência de corrente.	25
3.3	Arquitetura básica de um PLL.....	26
3.4	Algoritmo de um PLL baseado na Teoria p-q.	27
3.5	Sinais de entrada e saída do PLL.	29
3.6	Algoritmo do Detector de Sequência Positiva.	29
3.7	Sinais de Entrada e Saída do Detector de Sequência Positiva.	31
3.8	Algoritmo de Controle para Regulação de Tensão do Capacitor.....	32
3.9	Algoritmo de Controle para Correção do Fator de Potência.	34
3.10	Amplitude Coletiva da Tensão.....	35
3.11	Algoritmo de Controle para Regulação dos Níveis de Tensão.	36
3.12	Algoritmo de Controle para Cálculo da Corrente de Compensação.	37
4.1	DSTATCOM controlado por referência de tensão.....	41
4.2	Algoritmo de controle do DSTATCOM operando por referência de tensão....	42
4.3	Algoritmo de Controle para Regulação de Tensão do Capacitor.....	44
4.4	Algoritmo de Controle para Correção do Fator de Potência.	47
4.5	Algoritmo de Controle para Regulação dos Níveis de Tensão.	48
4.6	Algoritmo de Controle para Cálculo da Tensão de Compensação.....	48
5.1	Diagrama do sistema implementado no simulador PSCAD/EMTDC.....	53

5.2	Tensões do PCC sem DSTATCOM.	54
5.3	(a) Tensão e corrente – carga indutiva, (b) Tensão e corrente – carga capacitiva.....	55
5.4	Correntes de compensação no início do chaveamento.....	56
5.5	Características de sistemas de fase mínima e não-mínima.	58
5.6	Tensão do PCC para operação como fonte de tensão: (a) V_{rms} ; (b) Transitório entrada DSTATCOM; (c) Transitório mudança de carga.	58
5.7	Tensão do PCC para operação como fonte de corrente: (a) V_{rms} ; (b) Transitório entrada DSTATCOM; (c) Transitório mudança de carga.....	59
5.8	Tensão Vdc: (a) referência por tensão, (b) referência por corrente.....	60
5.9	Correntes de entrada da carga indutiva.....	61
5.10	Correção do fator de potência carga indutiva com afundamento.....	62
5.11	Correção do fator de potência carga capacitiva.	62
5.12	Tensão Vdc: (a) controle por tensão, (b) controle por corrente.....	63
5.13	Correntes da fonte sem o DSTATCOM.	64
5.14	Tensões do barramento sem o DSTATCOM.	64
5.15	Correntes da fonte com o DSTATCOM: (a) controle por tensão, (b) controle por corrente.....	65
5.16	Correntes do conversor: (a) controle por tensão, (b) controle por corrente. .	66
5.17	Tensões do barramento com DSTATCOM: (a) controle por tensão, (b) controle por corrente.....	67
5.18	Espectro harmônico de tensão.....	68
5.19	Espectro harmônico das correntes da fonte e do conversor.....	69
6.1	Protótipo do DSTATCOM.....	72
6.2	Diagrama do protótipo desenvolvido.....	73
6.3	Tensões do barramento sem o DSTATCOM.	75
6.4	Transitório de partida do DSTATCOM.	76
6.5	Tensões do barramento com compensação para os dois modos de operação do DSTATCOM.	77
6.6	Tensão Vdc	78
6.7	Tensões do sistema sem compensação.	79
6.8	Tensões do barramento para sobretensão de 10%.	80

6.9	Tensão e corrente da fase “a”	81
6.10	Tensão V_a regulada e corrente i_a do conversor, (a) controle por corrente, (b) controle por tensão.....	81
6.11	Transitório de entrada da carga.	82
6.12	Tensão e corrente da fase “a”	83
6.13	Diagrama do protótipo com carga harmônica.	84
6.14	Correntes da fonte sem DSTATCOM.	84
6.15	Tensões de linha do barramento sem DSTATCOM.	85
6.16	Correntes da fonte com DSTATCOM.	86
6.17	Correntes do conversor.....	87
6.18	Tensões do barramento com DSTATCOM.....	88

Lista de Tabelas

1.1	Distúrbios de Qualidade de Energia.	2
5.1	Dados do sistema elétrico.	51
5.2	Dados do conversor.	52
5.3	Parâmetros das cargas.....	52
5.4	Dados dos componentes harmônicos.	52
6.1	Dados do sistema elétrico.	72
6.2	Dados do Conversor.	73
6.3	Dados da carga indutiva.	73

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A utilização de conversores baseados em eletrônica de potência tem se tornado cada vez mais necessária aos sistemas de potência. Seja para controle da estabilidade, para controle de fluxo de energia, para regulação dos níveis de tensão ou para correção do fator de potência, estes conversores são componentes utilizados no controle da potência reativa. Ultimamente, com a introdução das energias renováveis nos sistemas de geração, tornou-se um componente utilizado na interligação dessas fontes de energia ao Ponto de Conexão Comum (PCC).

Com o uso crescente de controles e equipamentos eletrônicos sofisticados, nas instalações elétricas, a confiabilidade e a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) têm se tornado importantes para a maioria dos consumidores de energia. Os sistemas elétricos estão sujeitos a uma ampla variedade de distúrbios na qualidade de energia, oriundos das instalações elétricas dos consumidores ou propagados nos sistemas supridores das concessionárias. Tais distúrbios podem interromper processos de produção, afetar o desempenho de equipamentos sensíveis e causar indisponibilidades e prejuízos.

Estes problemas vêm se agravando por diversas razões. Destaca-se a instalação cada vez maior de cargas não-lineares, aumentando os níveis de distorções harmônicas e maior sensibilidade dos equipamentos instalados.

Tais distúrbios podem ter origem na energia elétrica entregue pela concessionária de energia ou na rede interna de distribuição do próprio consumidor. Os principais distúrbios de QEE apresentados na Tabela 1.1 são definidos e descritos pelo IEEE *Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality* e outros comitês internacionais.

Distúrbio	Descrição
Afundamento momentâneo (Sag)	Diminuição para 0,9p.u. até 0,1p.u. do valor nominal RMS da tensão com uma duração de meio período até um minuto.
Sobre-Elevação momentânea (Swell)	Elevação para 1,1p.u. até 1,8p.u. do valor nominal RMS da tensão com uma duração de meio período até um minuto.
Subtensão	Diminuição para 0,9p.u. até 0,8p.u. do valor RMS da tensão com uma duração superior a um minuto.
Sobretensão	Elevação para 1,1p.u. até 1,2p.u. do valor RMS da tensão com uma duração superior a um minuto.
Interrupção	Diminuição para abaixo de 0,1p.u. do valor RMS da tensão por um período não superior a um minuto.
Transitório	Fenômenos oriundos de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema.
Harmônicos	Alteração do padrão normal de tensão ou corrente causada por frequências múltiplas da fundamental.

Tabela 1.1 – Distúrbios de Qualidade de Energia.

Proposto inicialmente para aplicações em sistemas de transmissão e posteriormente no conceito *Custom Power*, introduzido em 1995 por Hingorani, o STATCOM é um equipamento que atua na QEE. Este equipamento é destinado ao controle da potência reativa capacitiva ou indutiva e pode ser utilizado com a finalidade de regular os níveis de tensão no PCC ou controlar o fator de potência [1-2].

1.1 Motivações para a realização do trabalho

A utilização do STATCOM no conceito *Custom Power* encontra-se constantemente em pesquisa, buscando configurações e estratégias de controle capazes de atuar com alto desempenho e eficiência frente a distúrbios na rede.

O STATCOM é um compensador baseado em um conversor fonte de tensão (VSC), sendo, portanto, uma fonte de tensão alternada e controlada. Entretanto devido a sua conexão em derivação, o STATCOM é um equipamento de injeção de corrente.

Duas formas distintas de operação do STATCOM podem ser realizadas. Operação como uma fonte de corrente controlada, agindo sobre a corrente de compensação, ou operação como uma fonte de tensão controlada, agindo sobre a tensão na saída do conversor.

Muitos estudos têm sido realizados sobre o STATCOM operando como uma fonte de corrente controlada [3-6], entretanto há carência de trabalhos sobre o STATCOM operando como uma fonte de tensão controlada.

Desta forma, este trabalho tem como motivação, apresentar estes dois modos de operação e realizar um estudo comparando e avaliando suas vantagens e desvantagens, frente a distúrbios na rede elétrica, para atuação na regulação das tensões da rede e correção do fator de potência.

1.2 Principais Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de avaliar o desempenho operacional do STATCOM frente a duas estratégias de controle. Objetiva-se, assim, avaliar o funcionamento de dois modos de operação do STATCOM através de simulações no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC e uma validação através de protótipos de baixa tensão.

Portanto, os principais objetivos desta dissertação são:

- Apresentar os principais distúrbios de QEE e abordar os conceitos de compensação em derivação, expondo alguns equipamentos utilizados com tal finalidade;
- Apresentar os controles estudados para os dois modos de operação do STATCOM;
- Avaliar os resultados obtidos através de simulação computacional e experimentos realizados em protótipo laboratorial, comparando os dois modos de operação do STATCOM;
- Apresentação das conclusões obtidas.

1.3 Organização e Estrutura da Dissertação

Este trabalho está organizado em sete capítulos, incluindo este capítulo inicial onde são apresentadas as motivações para realização deste trabalho e os objetivos alcançados durante os estudos.

No capítulo 2 são apresentados os princípios de funcionamento dos compensadores em derivação utilizados para compensação de potência reativa. Também são apresentados os principais dispositivos utilizados para compensação em derivação. Por fim, é apresentado o princípio de funcionamento e a estrutura do STATCOM.

Em seguida, nos capítulos 3 e 4, são apresentados os controles estudados: STATCOM operando como uma fonte de corrente controlada e STATCOM operando como uma fonte de tensão controlada, respectivamente. Nestes capítulos, são apresentados todos os componentes do controle necessários para regulação dos níveis de tensão do barramento e controle do fator de potência.

No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos através da simulação computacional com o software PSCAD/EMTDC para avaliação dos controles estudados.

Posteriormente, no capítulo 6, são apresentados os resultados experimentais, obtidos em um protótipo de 5kVA, para validação dos resultados obtidos na etapa de simulação.

Por fim, são apresentadas no capítulo 7, as conclusões obtidas com o trabalho desenvolvido.

Capítulo 2

ASPECTOS GERAIS DA COMPENSAÇÃO EM DERIVAÇÃO

Uma das alternativas encontrada pelo setor elétrico para o problema do aumento da demanda é a utilização de dispositivos FACTS (*Flexible Alternate Current Transmission Systems*) conectados nas linhas ou nas barras do sistema elétrico. Esses dispositivos possuem resposta dinâmica rápida, o que incrementa significativamente o grau de segurança e níveis de estabilidade do sistema de transmissão. Em consequência, permitem elevar os níveis de carregamento das linhas de transmissão, podendo em alguns casos até mesmo dobrar essa capacidade [7], até o limite máximo teórico correspondente ao limite térmico dos condutores.

O conceito FACTS foi introduzido no final da década de 80 por Hingorani [8]. Este conceito agrupa um conjunto de equipamentos baseados na eletrônica de potência, que permitem alterar de forma rápida e contínua os parâmetros de controle de sistemas de potência.

Em 1995, foi introduzido também por Hingorani o conceito de condicionadores de energia denominados por "*Custom Power*" [10]. Estes condicionadores de energia caracterizam-se por equipamentos compostos por dispositivos de eletrônica de potência utilizados para melhorar a qualidade de energia nos sistemas elétricos de distribuição. Esses condicionadores consistem nos filtros ativos, reguladores dinâmicos de tensão, compensadores estáticos (STATCOM), entre outros.

Atualmente, parte das cargas elétricas presentes nas residências, comércios e indústrias é baseada em dispositivos eletrônicos. Como exemplo, as fontes chaveadas

de equipamentos eletro-eletrônicos, reatores eletrônicos, inversores para acionamentos de motores elétricos, entre outros, que permitem o uso da eletricidade de forma mais eficiente e permitem um controle mais preciso sobre os processos industriais. Entretanto, junto a esses benefícios, tais elementos trouxeram perturbações significativas à qualidade da energia. Este fato se deve a características de não linearidade dessas cargas e, por conseqüência, acabam distorcendo a forma de onda da corrente e da tensão, deteriorando a qualidade de energia.

Diante desse cenário, estudos têm sido realizados acerca da qualidade da energia elétrica, buscando soluções que minimizem os distúrbios presentes nos sistemas elétricos. Alguns dos principais motivos para tais estudos são:

- crescimento na utilização de equipamentos sensíveis a distúrbios elétricos, como controladores de velocidade em indústria utilizados em acionamento de motores elétricos, sistemas de informática, lâmpadas fluorescentes compactas, entre outros;
- aumento do uso de equipamentos, buscando otimizar a utilização da energia elétrica, aumentando os níveis de distorções harmônicas, levando o sistema elétrico a condições de ressonância.

Dentre estes estudos, encontram-se os compensadores em derivação. Estes equipamentos propiciam um aumento na capacidade de transmissão e na margem de estabilidade de sistemas elétricos como dispositivos FACTS, além de permitir a regulação dos níveis de tensão e correção do fator de potência, como equipamentos *Custom Power*.

2.1 Compensador ideal em derivação

Nesta seção, serão apresentadas as características funcionais dos compensadores em derivação, abordando os aspectos para aumento da capacidade de transmissão de energia e regulação dos níveis de tensão do sistema elétrico.

2.1.1 Capacidade de transmissão de potência ativa

A utilização da compensação em derivação para aumento da capacidade de transmissão de energia pode ser avaliado observando-se o diagrama da Figura 2.1. Neste diagrama, está representado um sistema de potência onde duas fontes de tensão são conectadas através de uma linha curta – linhas com comprimento inferior a 80km [11]– sendo sua reatância série dividida em duas partes para facilitar as análises que serão apresentadas. Assume-se que as tensões das fontes V_S e V_R têm amplitudes iguais e são defasadas entre si de um ângulo δ .

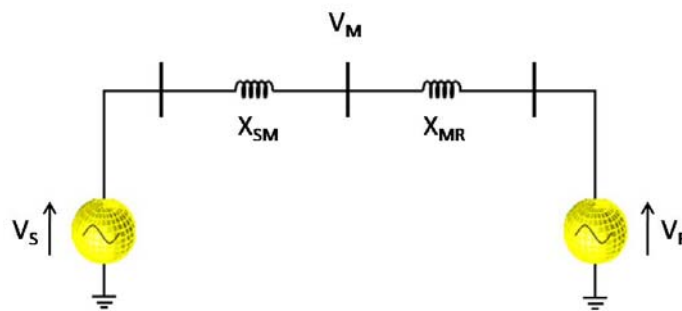


Figura 2.1 – Sistema de Potência sem Compensação.

Para o sistema elétrico da Figura 2.1, pode se escrever que o fluxo de potência ativa é o mesmo em qualquer ponto da linha e é dado por:

$$P_s = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta). \quad (2.1)$$

e que a potência reativa nos terminais das fontes V_S e V_R são iguais em módulo e pode ser escrita por:

$$Q_s = \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos(\delta)) \quad (2.2)$$

onde considera-se que as tensões V_S e V_R das fontes são iguais, ou seja, $V = V_S = V_R$ e que a reatância total da linha é representada pela soma das reatâncias presentes no sistema, ou seja, $X_L = X_{SM} + X_{MR}$ onde $X_{SM} = X_{MR}$.

Analisando as duas equações anteriores, pode-se observar que para um ângulo de defasagem δ igual a $\pi/2$ rad o valor da energia transmitida pelo sistema será

máxima, enquanto que para δ igual a π rad será nula e a potência reativa terá seu valor máximo igual ao dobro da capacidade de transferência de energia.

O aumento da capacidade de transmissão da linha pode ser obtido através da conexão de um compensador em derivação no ponto médio da linha da Figura 2.1. Conforme pode ser observado, a Figura 2.2 mostra o digrama unifilar, onde uma fonte de tensão controlada é conectada em derivação ao ponto médio da linha, representando uma compensação em derivação.

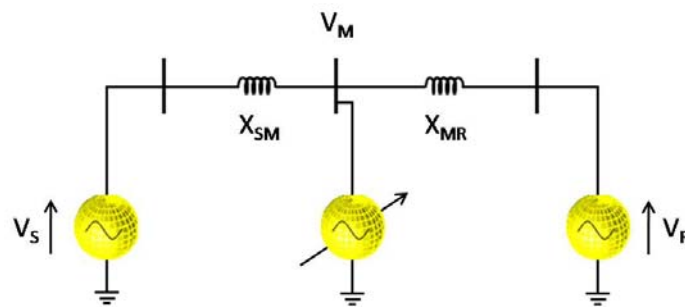


Figura 2.2 – Sistema de Potência com Compensação.

Dessa forma, assumindo que com a inserção desse compensador a tensão no ponto médio da linha tenha seu valor de amplitude regulada e que este valor seja igual às tensões das fontes V_S e V_R , ou seja, $V = V_S = V_R = V_M$, tem-se que as potências ativas e reativas nos terminais de V_S , para esta nova configuração, podem ser escritas, respectivamente, por:

$$P_s = 2 \frac{V^2}{X_L} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right), \quad (2.3)$$

$$Q_s = 2 \frac{V^2}{X_L} \left(1 - \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)\right). \quad (2.4)$$

Observa-se nas equações (2.1) e (2.3), com base no cálculo da potência ativa, um aumento da capacidade de transmissão da linha.

A seguir, serão apresentados os aspectos dos compensadores em derivação para regulação dos níveis de tensão, destacando os equipamentos utilizados, desde a conexão de bancos de capacitores até a utilização de equipamentos FACTS.

2.1.2 Regulação de tensão

Para compensação destinada à regulação dos níveis de tensão, o compensador pode funcionar suprindo afundamentos ou elevações de tensão. Para suprir afundamentos de tensão, o compensador gera uma corrente capacitiva, ou seja, adiantada de 90° com relação à tensão, produzindo uma potência reativa capacitiva. Já para suprir elevações de tensão, o compensador gera uma corrente indutiva 90° atrasada com relação à tensão, produzindo uma potência reativa indutiva.

Em sistemas elétricos fracos, com baixa potência de curto circuito, ou em sistemas radiais, com linhas longas e grande concentração de carga nas barras terminais, as variações das cargas podem provocar significativas variações na tensão da barra de conexão.

Seja para aumento da capacidade de transmissão, para regulação dos níveis de tensões dos sistemas elétricos ou para correção do fator de potência, os compensadores em derivação são dispositivos que operam fornecendo potência reativa capacitiva ou indutiva ao sistema elétrico.

Os principais dispositivos utilizados para compensação em derivação para regulação dos níveis de tensão e correção do fator de potência são:

- bancos de capacitores;
- compensadores síncronos rotativos;
- TSC: *Thyristor Switched Capacitor*;
- TCR: *Thyristor Controlled Reactance*;
- SVC: *Static Var Compensator*;
- STATCOM: *STATic Synchronous COMpensator*.

Embora existam diferentes tipos de equipamentos que realizem compensação de reativos em derivação, como apresentado anteriormente, cada um com suas

vantagens e desvantagens, este trabalho limitará seu foco apenas na operação do STATCOM. Entretanto, serão apresentados a seguir uma síntese desses equipamentos. Porém, o STATCOM é abordado de forma detalhada, descrevendo seus componentes, princípio de funcionamento e controles utilizados.

2.2 Bancos de Capacitores

A utilização de bancos de capacitores em sistemas de potência iniciou-se por volta de 1910. Entretanto, sua utilização foi limitada, devido a seu tamanho e alto custo [12].

Com o aperfeiçoamento dos materiais dielétricos houve uma redução dos custos, propiciando desde então a utilização destes dispositivos no suporte de tensão.

A Figura 2.3 ilustra a topologia de um banco de capacitores conectados a uma barra qualquer do sistema.

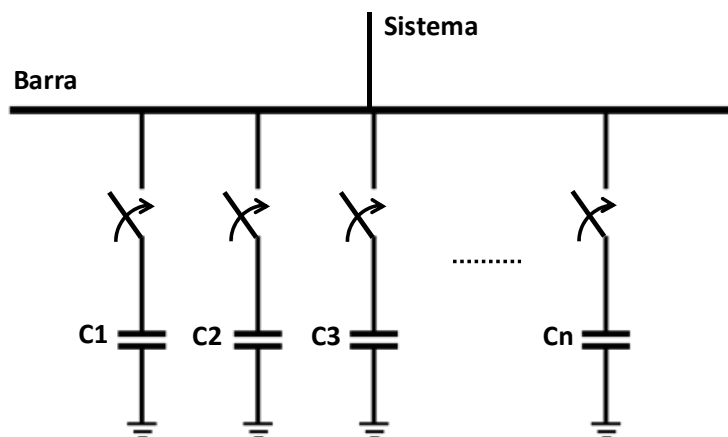


Figura 2.3 – Banco de capacitores.

Como principal vantagem na utilização de bancos de capacitores tem-se o baixo custo e a flexibilidade de instalação e operação. Como desvantagem tem-se que a produção de potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão. Desta forma, a

produção de potência reativa é reduzida quando o sistema sofre um afundamento e necessita de compensação.

2.3 Compensadores Síncronos

Os compensadores síncronos são máquinas síncronas, que dependendo da excitação podem absorver ou gerar potência reativa.

Uma das vantagens do compensador síncrono é sua flexibilidade de operação em todas as condições de carga do sistema.

Quando utilizado para regulação de tensão, o compensador pode operar sobreexcitado em períodos de carga pesada, dando suporte de potência reativa capacitiva e subexcitado em períodos de carga leve dando suporte de potência reativa indutiva.

Desta forma, os compensadores síncronos têm como vantagens em relação aos outros equipamentos, capacidade de fornecer potência reativa, tanto capacitiva quanto indutiva, dando maior flexibilidade à sua operação.

2.4 TSC - *Thyristor Switched Capacitor*

Os TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) são capacitores chaveados a tiristor. A Figura 2.4 (a) mostra a topologia destes equipamentos. Devido à característica de chaveamento utilizada, a atuação dos tiristores está apenas em conectar e desconectar o banco de capacitores do sistema de potência. Conseqüentemente, como desvantagem, o controle da potência reativa gerada pelo TSC é feito de forma descontínua.

O TSC é um dos componentes do compensador estático de reativos (SVC - *Static Var Compensator*).

2.5 TCR - Thyristor Controlled Reactance

Os TCR (*Thyristor Controlled Reactance*) são reatores controlados a tiristor. A Figura 2.4 (b) mostra a topologia destes equipamentos. Uma de suas vantagens é a produção de uma reatância variável através do controle dos tiristores. E como desvantagem tem-se a geração de harmônicos de baixa ordem, provenientes do chaveamento utilizado.

O TCR é um dos componentes do compensador estático de reativos (SVC - *Static Var Compensator*).

2.6 SVC – Static Var Compensator

Os compensadores estáticos de reativos (SVC - *Static Var Compensator*) são os precursores dos dispositivos FACTS existentes na atualidade. Estes dispositivos foram inicialmente utilizados no final da década de 60 para a compensação reativa de grandes cargas industriais.

No final da década de 70, o SVC começou a ser aplicado em sistemas de transmissão com o propósito de melhorar o controle de tensão. Uma das configurações do SVC, Figura 2.4 (c), é constituída da combinação de um TSC ligado em paralelo a um TCR. Dessa forma, visto que o SVC altera a tensão da barra na qual está conectado, este pode ser visualizado como uma carga reativa variável.

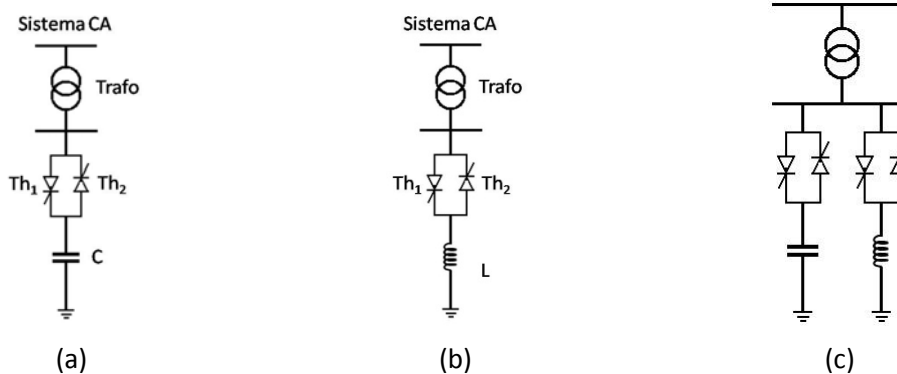


Figura 2.4 – (a) TSC - Thyristor Switched Capacitor, (b) - Thyristor Controlled Reactance, (c) SVC - Static Var Compensator.

Devido à possibilidade de operação com característica indutiva ou capacitiva, este compensador é utilizado como controlador estático de tensão. Uma de suas desvantagens está na descontinuidade do suprimento de potências reativas capacitivas, assim como o surgimento de harmônicos devido ao chaveamento dos reatores para o suprimento de potências reativas indutivas. Outra desvantagem está na possibilidade da ocorrência de ressonâncias entre o sistema de potência e os capacitores e indutores do compensador estático, provocando a amplificação de harmônicos.

2.7 Compensador Estático (STATCOM)

O STATCOM (Compensador Síncrono Estático) tem aplicações tanto dentro do conceito FACTS como em *Custom Power*. Em aplicações FACTS, o controle de potência reativa é feito para aumentar, seja em regime permanente ou em transitórios, a capacidade de transmissão de energia em uma linha de transmissão. Já em aplicações *Custom Power*, o controle da potência reativa é realizado com o intuito de correção do fator de potência ou regulação dos níveis de tensão do sistema.

Como vantagem sobre os outros dispositivos mostrados anteriormente, tem-se: atuação em tempo real, resposta rápida, e ampla área de atuação, podendo suprir tanto potência reativa indutiva quanto capacitiva.

2.7.1 Histórico do STATCOM

O desenvolvimento do STATCOM iniciou-se em 1976, através do trabalho de um grupo de pesquisadores japonês da *Kansay Electric Co. Ltda.* e da *Mitsubishi Electric Corporation* [14].

Em 1980, o primeiro protótipo de STATCOM foi construído para uma potência de 20MVA [14] e tinha como objetivo melhorar a dinâmica do sistema elétrico, aumentando a sua estabilidade através da compensação de reativos.

Em 1988, nos Estados Unidos, um grupo de pesquisadores da EPRI (*Electric Power Research Institute*) e a ESERCO (*Empire State Energy Research Corporation*) apresentaram um modelo de STATCOM de 1MVA testado em campo [15].

O primeiro STATCOM entrou em operação em 1992, na subestação de Inuyama, no Japão, com potência de 80MVA e tensão de 154kV, pertencente à *Kansay Electric Co, Ltda.* [16].

Em 1995, um STATCOM de 100MVA, [17-19], foi comissionado nos Estados Unidos na subestação de Sullivan, pertencente à TVA (*Tennessee Valley Authority*). Este STATCOM foi conectado a um sistema de 161kV.

Este equipamento foi inicialmente proposto para aplicação em sistemas de transmissão [9]. Porém, em 1995, a aplicação deste equipamento em sistemas de distribuição foi proposta, introduzindo o conceito de *Custom Power* [10]. Suas principais características são: a capacidade de aumentar a potência em uma linha de transmissão, melhorar a estabilidade para o sistema elétrico e o controle do fator de potência e da tensão em sistemas de distribuição [9].

Existem algumas variações do nome do STATCOM, entre eles o DSTATCOM [20], *Distribution-Statcom*, voltado para sistemas de distribuição.

A primeira instalação do DSTATCOM utilizado para solucionar problemas de qualidade de energia, através da compensação de potência reativa, foi um equipamento de aproximadamente 2Mvar, em British Columbia, Canadá [21].

2.7.2 Princípio de Funcionamento

O funcionamento do DSTATCOM como compensador de potência reativa pode ser observado no diagrama unifilar da Figura 2.5, onde o compensador é representado por uma fonte de tensão. O sistema CA é representado pela fonte de tensão V_S com reatância de linha representada por X_{LS} e a tensão do DSTATCOM é representada por V_{ST} com uma reatância X_{LST} . A reatância equivalente entre a fonte e o ponto de conexão do DSTATCOM é representada por $X_L = X_{LS} + X_{LST}$.

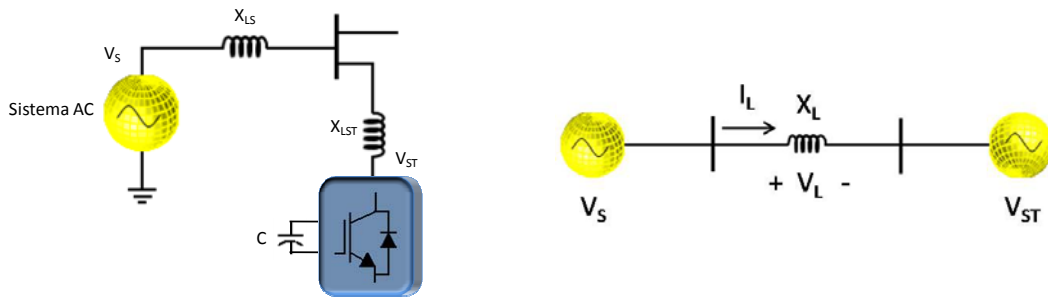


Figura 2.5 – Diagrama simplificado de compensação paralela.

Desenvolvendo as equações de potência ativa e reativa entre duas fontes para a situação mostrada na Figura 2.5, tem-se que:

$$P_s = \frac{V_s \cdot V_{ST}}{X_L} \sin(\delta), \quad (2.5)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_s \cdot V_{ST}}{X_L} \cos(\delta). \quad (2.6)$$

Sendo δ a defasagem angular entre as tensões do sistema e do DSTATCOM, analisando as equações (2.5) e (2.6) pode-se descrever cinco situações distintas apresentadas na Figura 2.6:

- Se a tensão V_{ST} estiver atrasada em relação a tensão V_S , Figura 2.6 (a), $-90^\circ < \delta < 0^\circ$, existe fluxo de potência ativa na direção do DSTATCOM;
- Se a tensão V_{ST} estiver adiantada em relação a tensão V_S , Figura 2.6 (b), $0^\circ < \delta < 90^\circ$, existe um fluxo de potência ativa na direção da fonte;
- Se a tensão V_{ST} estiver em fase com a tensão V_S , Figura 2.6 (c), $\delta = 0^\circ$, e se $|V_S| > |V_{ST}|$, não há fluxo de potência ativa entre a fonte e o DSTATCOM, porém como I_L está atrasada em relação à V_S , há potência reativa indutiva nos terminais do DSTATCOM;
- Se a tensão V_{ST} estiver em fase com a tensão V_S , Figura 2.6 (d), $\delta = 0^\circ$, e se $|V_S| = |V_{ST}|$, não há fluxo de potência ativa nem reativa entre o PCC e o DSTATCOM;

- Se a tensão V_{ST} estiver em fase com V_S , Figura 2.6 (e), $\delta = 0^\circ$, e se $|V_S| < |V_{ST}|$, não há fluxo de potência ativa entre a fonte e o DSTATCOM, porém como I_L está adiantada em relação à V_S , há potência reativa capacitiva nos terminais do DSTATCOM.

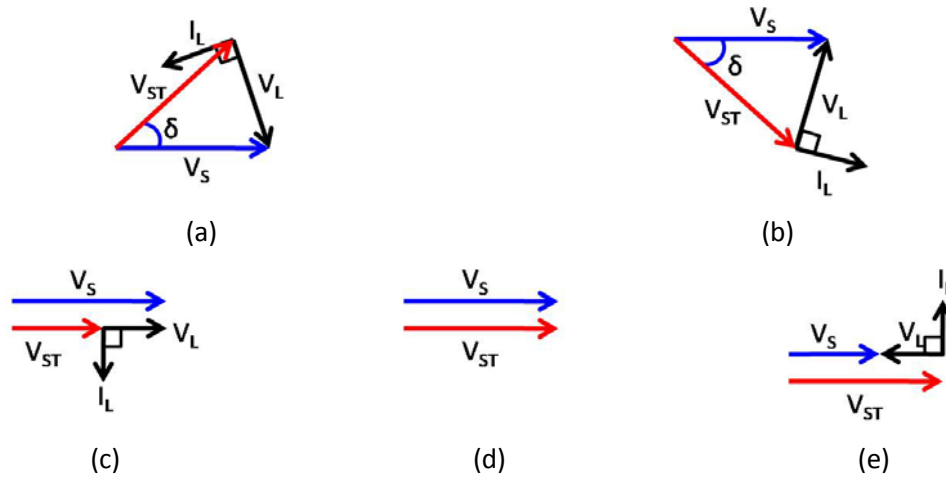


Figura 2.6 – Diagramas fasoriais de tensões e correntes.

Dessa forma, pode ser notado que a utilização de compensadores com controle de fase e amplitude permite o controle do fluxo de potência ativa e reativa da rede.

2.7.3 Principais Componentes

Conforme ilustrado na Figura 2.7, o circuito de potência do DSTATCOM é composto por três partes: o inversor, utilizado para sintetizar uma tensão alternada de compensação a partir da tensão contínua do elo cc; o capacitor do elo cc, utilizado como fonte de tensão contínua possibilitando a atuação do inversor e como acumulador de energia; e, por fim, o filtro de chaveamento, para limitar as variações de corrente e atenuar os harmônicos de alta frequência causados pelo chaveamento do conversor.

A seguir, são apresentados os componentes do circuito de potência do DSTATCOM, descrevendo suas utilidades e funcionalidades.

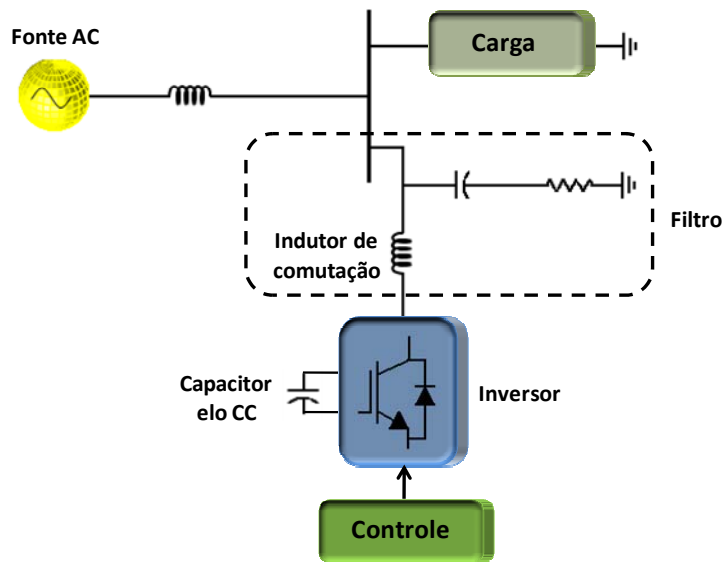


Figura 2.7 – Circuito de Potência do DSTATCOM.

2.7.3.1 Inversores

Os inversores são compostos por um conjunto de chaves semicondutoras, em diversas topologias, com capacidade de corte e condução com a função de gerar uma tensão alternada a partir de uma tensão contínua.

As principais chaves semicondutoras utilizadas na composição de inversores são:

- GTO's (*Gate Turn Off Thyristors*), que são: chaves de alta potência, porém com utilização limitada a chaveamentos em baixas frequências, próximas a frequência da rede;
- IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistors*), que são: chaves de menor potência quando comparados aos GTO's, porém podem operar em maiores frequências de chaveamento, na ordem de alguns kHz;
- IGCT's (*Integrated Gate Commutated Thyristors*), que são: chaves com capacidade de potência próxima a dos GTO's e podem operar em frequências próximas às dos IGBT's.

Conforme mencionado anteriormente, existem diversas topologias de inversores trifásicos a três fios, como: inversor trifásico em ponte, inversores monofásicos conectados formando uma topologia trifásica, inversores trifásicos de três níveis, entre outros. Neste trabalho será utilizado um inversor trifásico em ponte, conforme ilustrado na Figura 2.8.

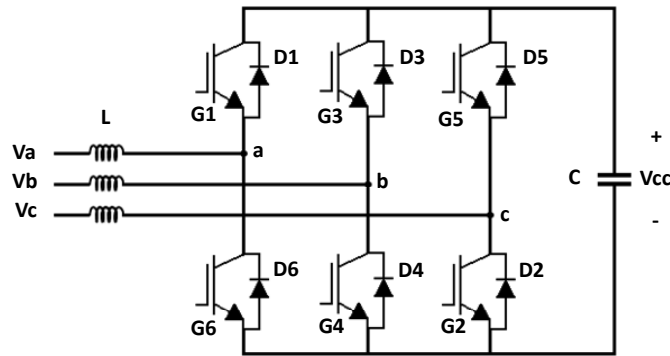


Figura 2.8 – Inversor trifásico em ponte.

Esta topologia tem como vantagem utilizar um número reduzido de chaves semicondutoras, idealmente são utilizadas duas chaves por fase totalizando seis chaves.

2.7.3.2 Capacitores do lado de corrente contínua

Como dito anteriormente, a função do capacitor do elo cc é servir de fonte de tensão contínua possibilitando a atuação do inversor e também como acumulador de energia.

O capacitor deve ser calculado para suprir a energia para a compensação para o qual o DSTATCOM foi projetado e suprir as perdas internas. O cálculo da capacitância pode ser feito através da equação 2.7 [35], onde τ_c é o tempo de carga do capacitor na tensão nominal com potência nominal, S_{ST} é a potência nominal do DSTATCOM e V_{cc} é a tensão mínima do elo CC, que pode ser calculada através da equação 2.8, onde V_{ff} é a tensão fase-fase do sistema.

$$C = \frac{2 \cdot S_{ST} \cdot \tau_c}{V_{cc}^2} \quad (2.7)$$

$$V_{cc} = V_{ff} \sqrt{2} \quad (2.8)$$

2.7.3.3 Filtro de chaveamento

Conforme descrito anteriormente, a função do filtro de chaveamento é limitar as variações de corrente entre o conversor e o sistema e atenuar os harmônicos de alta frequência presentes, devido ao chaveamento do conversor.

O filtro adotado neste trabalho foi um filtro RLC, onde o ramo RC impõe baixa impedância para altas frequências evitando que elas sejam injetadas no sistema, tendo o resistor R a função de amortecer ressonâncias no filtro. A função de transferência para este filtro é dada pela equação 2.9

$$H(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.9)$$

onde,

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ e } \xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.10)$$

O filtro utilizado neste trabalho foi projetado para uma frequência de corte uma década abaixo da frequência de chaveamento. Logo, como o conversor foi chaveado a $10kHz$ o filtro permite a passagem de frequências até $1kHz$. Além disso, este filtro foi projetado com um coeficiente de amortecimento de 0,15.

Destaca-se que o filtro foi dimensionado sem considerar as características da rede. Desta forma, quando conectado ao sistema, este filtro poderá ter suas características de frequência de corte e coeficiente de amortecimento modificados.

2.7.4 Controladores do DSTATCOM

Os controles aplicados ao DSTATCOM são decorrentes das necessidades do sistema, seja para controle da potência reativa, controlando o fator de potência ou na regulação dos níveis de tensão.

Neste trabalho, serão apresentadas duas formas de operação do DSTATCOM e seus respectivos controles. O primeiro modo de operação é como uma fonte de corrente controlada e o segundo modo de operação é como uma fonte de tensão controlada.

A Figura 2.9 apresenta o algoritmo de controle do DSTATCOM para as duas formas de operação. Inicialmente, os sinais adquiridos das medições de tensão e corrente são transformados por meio da transformada de Clarke do referencial ABC para o referencial $\alpha\beta$.

Em seguida, através de um circuito de sincronismo (PLL) detecta-se a fase e a frequência de sequência positiva da tensão de entrada. Além disso, este circuito fornece duas referências fictícias de corrente no referencial $\alpha\beta$ necessárias para o circuito detector de sequência positiva $V+1$. Este circuito por sua vez, extrai o componente fundamental do sinal de entrada, uma vez que esta tensão pode conter componentes harmônicos e desequilíbrios.

Por fim são obtidas as correntes de referência para o modo de operação como fonte de corrente controlada, ou as tensões de referência para o modo de operação como fonte de tensão controlada. E desta forma, a partir da técnica de chaveamento utilizada, são gerados os sinais de acionamento das chaves.

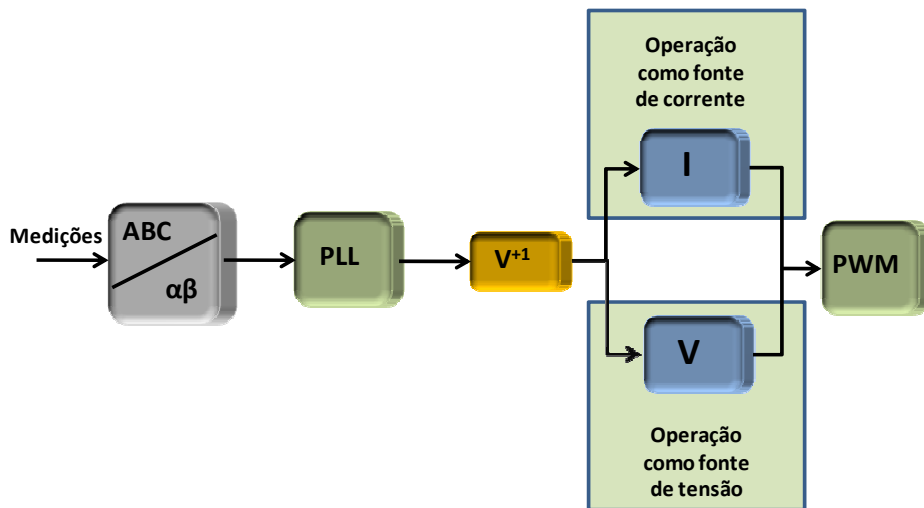


Figura 2.9 – Arquitetura do controle de um DSTATCOM.

Nos capítulos seguintes, são apresentados, detalhadamente cada componente do controle, para os modos de operação empregados no desenvolvimento deste trabalho.

2.8 Conclusões Parciais

Neste capítulo, foram apresentados os aspectos gerais dos compensadores em derivação, bem como o princípio de funcionamento de um compensador ideal para aumento da capacidade de transmissão e regulação de tensão.

Foram apresentados, também, os principais dispositivos para compensação em derivação como SVC, bancos de capacitores e compensadores síncronos, abordando suas funcionalidades e suas vantagens e desvantagens.

Por fim, foi exposto o DSTATCOM, descrevendo seu princípio de funcionamento, seus principais componentes e a arquitetura de controle para operação como fonte de corrente ou fonte de tensão controlada.

Capítulo 3

DSTATCOM OPERANDO COMO UMA FONTE DE CORRENTE CONTROLADA

Neste modo de operação, o controle do DSTATCOM age diretamente na corrente a ser injetada pelo conversor, necessária para a compensação de potência reativa.

Este modo de operação é o mais utilizado na implementação do DSTATCOM, pois garante maior robustez ao funcionamento do equipamento. Quando comparado ao controle por referência de tensão este controle apresenta as seguintes vantagens:

- Controle instantâneo e preciso sobre as correntes de compensação, visto que quando operado por referência de tensão, estas correntes são providas indiretamente pelo controle.
- Resposta dinâmica mais rápida, visto que o controle por referência de tensão apresenta um comportamento oscilatório na ocorrência de distúrbios, exigindo que sua resposta dinâmica seja mais lenta, para que a estabilidade do sistema seja mantida.

Este controle é baseado na teoria das potências ativas e reativas instantâneas (Teoria p-q). O cálculo das potências real e imaginária instantâneas gera as correntes de compensação, necessárias à manutenção da regulação da tensão do capacitor do elo cc do DSTATCOM e a regulação da tensão do barramento controlado pelo DSTATCOM, ou a correção do fator de potência.

O esquema da Figura 3.1 ilustra a estrutura deste modo de operação, bem como os pontos de medições de tensões e correntes necessárias para o correto controle do DSTATCOM.

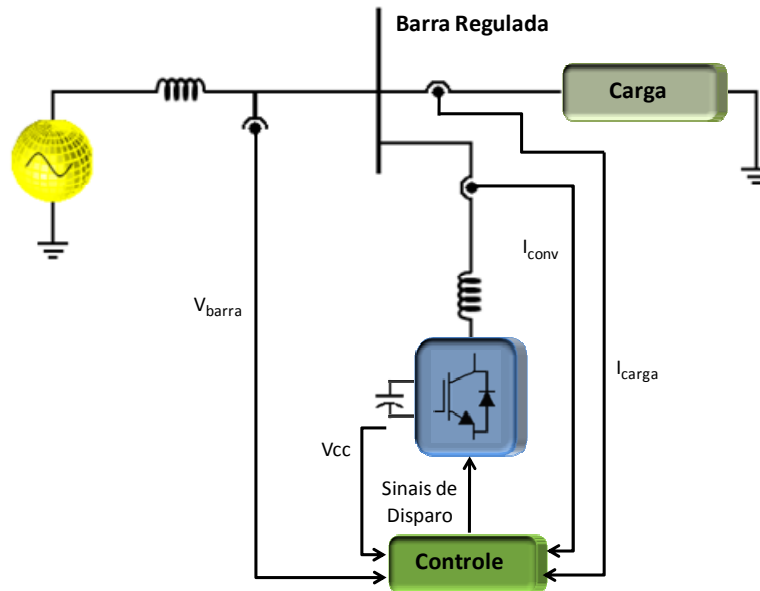


Figura 3.1 – DSTATCOM controlado por referência de corrente.

Quando o DSTATCOM está operando como compensador do fator de potência da carga são necessárias ao controle, as medições das correntes da carga e do conversor, além das tensões do barramento ao qual o DSTATCOM está conectado e da tensão do capacitor do elo cc. Desta forma, o controle do DSTATCOM tem como objetivo fazer com que as correntes geradas pelo conversor sigam as referências estabelecidas, realizando a compensação. Quando o controlador do DSTATCOM estiver selecionado para regulação da tensão da barra controlada, a medição da corrente da carga é desnecessária.

São apresentados na Figura 3.2 os componentes do sistema de controle do DSTATCOM. Conforme descrito no capítulo 2, esta malha de controle se inicia com as transformações das tensões e correntes medidas para o referencial $\alpha\beta$. Em seguida com base na teoria p-q são implementados os circuitos de sincronismo e detector de sequência positiva. Desta forma são calculadas as potências ativa e reativa necessárias

para o cálculo das correntes de referência, para regulação da tensão na barra, ou correção do fator de potência, utilizadas na modulação SPWM.

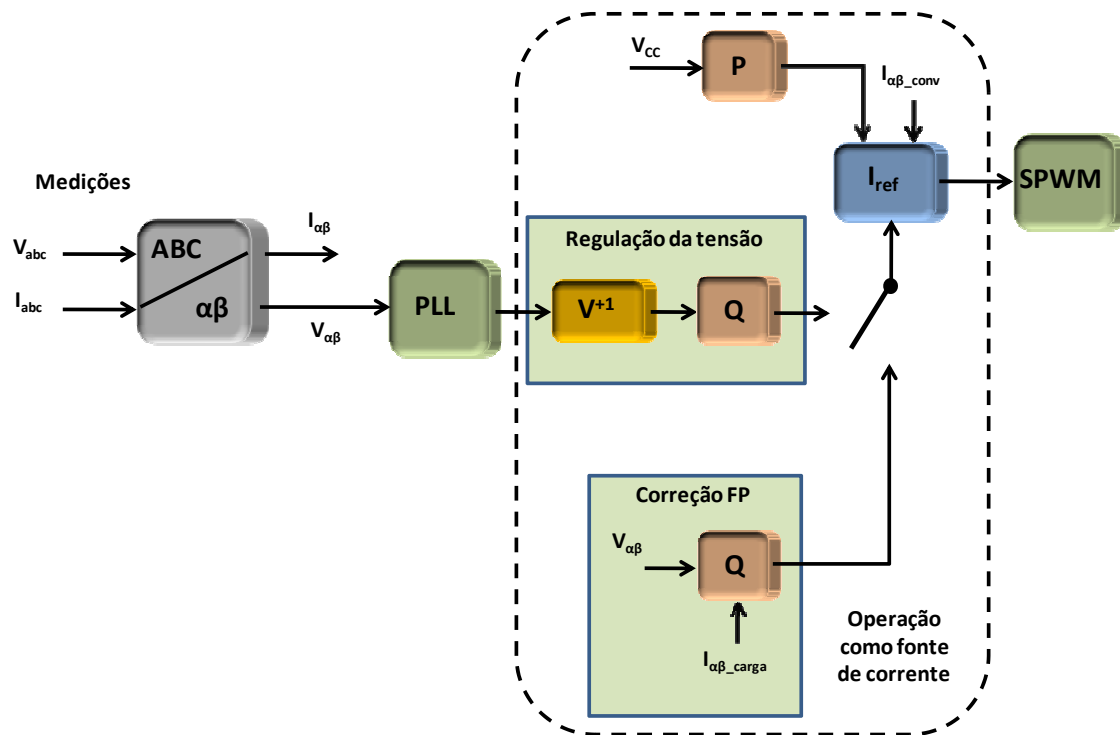


Figura 3.2 – Algoritmo de controle do DSTATCOM operando por referência de corrente.

A seguir serão apresentados cada componente desta malha de controle. Inicialmente, serão apresentados os componentes comuns aos dois modos de operação do DSTATCOM: PLL (*Phase Locked Loop*) e detector de sequência positiva. Em seguida, serão expostos os algoritmos de controle da potência ativa, da potência reativa e do cálculo das correntes de compensação, para o DSTATCOM operando como uma fonte de corrente controlada.

3.1 PLL (*Phase Locked Loop*)

O PLL (*Phase Locked loop*) é um circuito detector de fase e frequência utilizado para gerar um sinal sincronizado ao sinal de entrada.

A arquitetura básica de um PLL consiste em três blocos: Um detector de fase, um filtro passa-baixas e um oscilador controlado por tensão (VCO - *Voltage Controlled Oscillator*), conforme ilustrado na Figura 3.3.

No detector de fase, o sinal realimentado (*feedback*) na saída do VCO é comparado com um sinal de referência de entrada. Se há uma diferença de fase ou frequência entre os dois, um sinal de erro é gerado.

Esse sinal de erro pode conter componentes contínuas e oscilantes. As parcelas oscilantes de alta frequência são filtradas pelo filtro passa-baixas, fornecendo uma parcela contínua como referência para o VCO.

O sinal de saída do filtro passa-baixas atua no VCO, fazendo com que a frequência do VCO seja exatamente igual à de entrada. Se a frequência do sinal de entrada se altera, o detector de fase sentirá a variação e produzirá uma mudança no sinal de saída do filtro passa-baixas. Assim, naturalmente, muda a frequência do sinal de saída do VCO. Em regime, a saída do VCO tende a uma senóide com a mesma frequência do sinal de entrada.

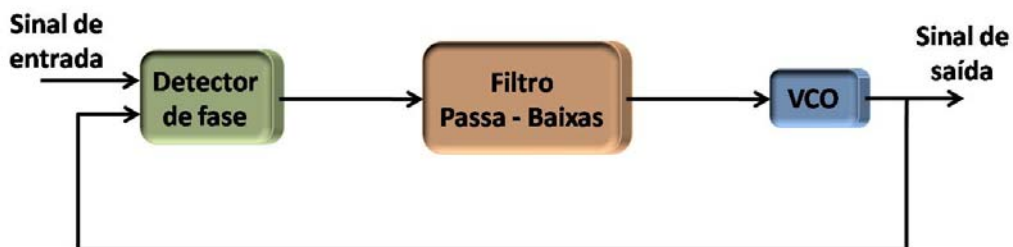


Figura 3.3 – Arquitetura básica de um PLL.

Vários são os estudos sobre o emprego do PLL em sistemas elétricos trifásicos [28 - 30]. Nesta área, a principal funcionalidade é sincronizar os sinais de controle com a tensão ou corrente da rede.

Na Figura 3.4, está representado o algoritmo de um PLL baseado na teoria p-q, conforme ilustrado em [23, 31]. Nesta modelagem, o PLL produz um sinal em quadratura com a componente fundamental de sequência positiva do sinal de entrada, mesmo na presença de distúrbios elétricos como harmônicos e desequilíbrios.

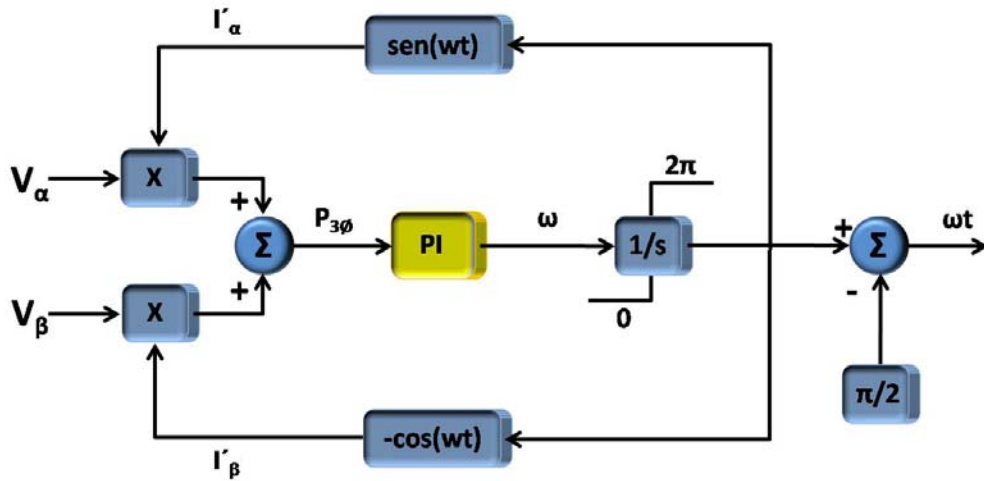


Figura 3.4 – Algoritmo de um PLL baseado na Teoria p-q.

Nesse algoritmo, as variáveis de entrada do PLL estão num referencial estacionário $\alpha\beta$ ortogonais entre si. As realimentações I'_α e I'_β são chamadas de correntes fictícias. O cálculo da transformação dos componentes trifásicos abc para componentes $\alpha\beta$ está descrito na equação 3.1 e a transformação inversa de $\alpha\beta$ para abc está descrita na equação 3.2. Esta transformação é conhecida como transformada de Clarke, em homenagem à sua propositora, Engenheira Edith Clarke [32].

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_0 \\ X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Dessa forma, de posse das tensões e correntes no referencial $\alpha\beta$, podem-se calcular as potências instantâneas ativa e reativa baseadas na teoria p-q [22 - 27], conforme pode ser visto na equação 3.3:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_\alpha & V_\beta \\ 0 & V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

onde a soma dos produtos entre as tensões de entrada V_α e V_β e as correntes fictícias I'_α e I'_β tem como resultado uma potência instantânea trifásica $P_{3\phi}$, também chamada de fictícia.

$$p_{3\phi} = p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (3.4)$$

Essa potência trifásica fictícia $P_{3\phi}$ é introduzida em um controlador PI que tem por finalidade anular o erro de entrada em regime. Quando isso ocorrer, o PLL estará estabilizado, capturando frequência e fase de sequência positiva da tensão de entrada [23, 24].

Pode-se observar na equação 3.4 que existem dois pontos de operação em que a potência fictícia trifásica $P_{3\phi}$ tem valor médio nulo: quando as correntes fictícias de realimentação I'_α e I'_β estiverem adiantadas ou atrasadas de 90° com relação à componente fundamental de sequência positiva da tensão de entrada V_α e V_β .

Entretanto, quando as correntes fictícias estiverem atrasadas de 90° , a operação do PLL se torna instável e qualquer distúrbio no sistema tira o PLL de sincronismo. Dessa forma, a variável de saída ωt do PLL está adiantada de 90° da componente de sequência positiva do sinal de entrada e para que este sinal esteja em fase com o sinal de entrada, atrasa-se este sinal de 90° .

A Figura 3.5 ilustra a forma de onda obtida com o PLL em questão, mesmo na presença de distúrbios elétricos.

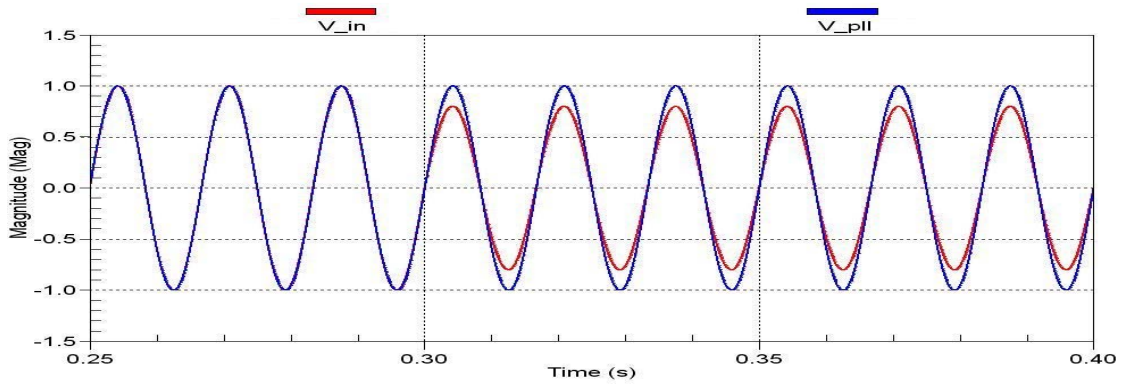


Figura 3.5 – Sinais de entrada e saída do PLL.

Como pode ser observado, mesmo com esse distúrbio, exemplificado anteriormente por um afundamento da tensão de entrada, o PLL mantém a saída sincronizada com a componente fundamental de sequência positiva da entrada com amplitude unitária.

3.2 Detector de Sequência Positiva

Para obter correntes e/ou tensões puramente senoidais e equilibradas, faz-se necessário o uso de um circuito que extraia a componente fundamental do sinal de entrada. O circuito detector de sequência positiva, ilustrado na Figura 3.6, desempenha um papel fundamental na estratégia utilizada para a determinação dos sinais de compensação.

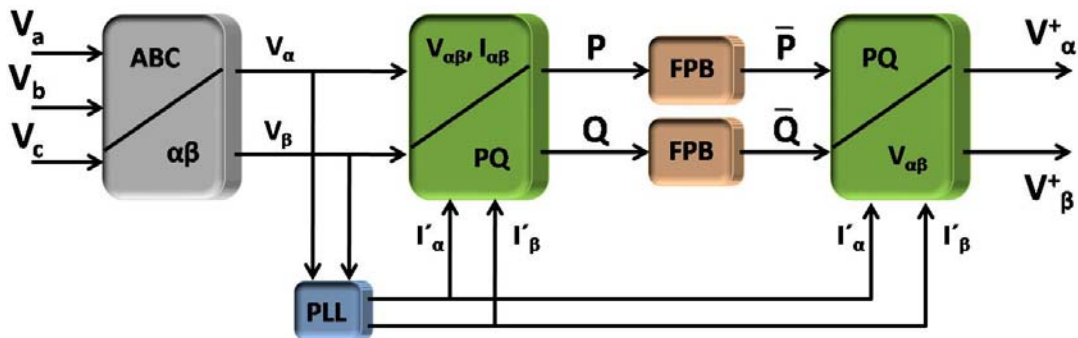


Figura 3.6 – Algoritmo do Detector de Sequência Positiva.

Como visto anteriormente, as tensões V_a, V_b e V_c , medidas da rede, são transformadas para o referencial estacionário $\alpha\beta$ através da transformada de Clarke, originando as tensões V_α e V_β .

Através do PLL apresentado, determina-se, em tempo real, a frequência fundamental e a fase da sequência positiva das tensões lidas. Obtém-se também a partir do PLL os sinais fictícios I'_α e I'_β , que juntamente com as componentes V_α e V_β possibilitam o cálculo das potências fictícias real p e imaginária q , conforme apresentado na equação 3.3.

Essas potências, por sua vez, são compostas de componentes constantes e oscilantes, onde as parcelas constantes de p e q são unicamente atribuídas à componente fundamental da sequência positiva da tensão. Conseqüentemente, as componentes oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} presentes em p e q devem ser extraídas, pois representam a presença de sequência negativa e harmônicos.

As parcelas constantes, valores médios \bar{p} e \bar{q} presentes em p e q , são obtidas por meio de filtros passa-baixas, com frequência de corte igual à frequência fundamental de operação do sistema. Ao fim, utilizando as parcelas médias \bar{p} e \bar{q} com as correntes fictícias I'_α e I'_β , são obtidas as tensões referentes à componente fundamental de sequência positiva V_α^+ e V_β^+ das tensões lidas através da equação 3.5 [23, 24].

$$\begin{bmatrix} V_\alpha^+ \\ V_\beta^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} & -\bar{q} \\ \bar{q} & \bar{p} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I'_\alpha \\ I'_\beta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

A Figura 3.7, demonstra o funcionamento do detector de sequência positiva, sendo a tensão de entrada distorcida.

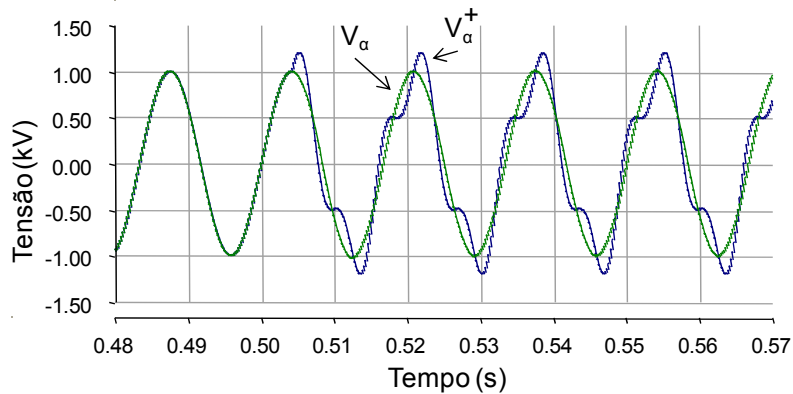


Figura 3.7 – Sinais de Entrada e Saída do Detector de Sequência Positiva.

Observa-se nesta figura, que o sinal de saída é composto apenas da componente fundamental de sequência positiva do sinal de entrada.

3.3 Controle da Potência Ativa

O controle da potência ativa é realizado com o intuito de regular a tensão contínua dos capacitores do elo cc, suprimindo as perdas por chaveamento.

3.3.1 Controle para Regulação do elo CC

A função do capacitor é servir como fonte de tensão contínua possibilitando trocas de potência ativa entre o sistema elétrico e o DSTATCOM.

Se a troca dinâmica de energia com o sistema não for necessária, o DSTATCOM torna-se uma fonte auto-suficiente de potência reativa, de forma semelhante a um compensador síncrono ideal, e o dispositivo externo armazenador de energia pode ser desconectado [33].

Nos dois modos de operação estudados neste trabalho, a regulação da tensão dos capacitores do elo cc é feita através do fluxo de potência ativa entre a rede e o DSTATCOM. Quando este é operado como uma fonte de corrente controlada, a

potência ativa necessária à regulação é resultado direto do algoritmo de controle do elo, como pode ser visualizado no diagrama da Figura 3.8.

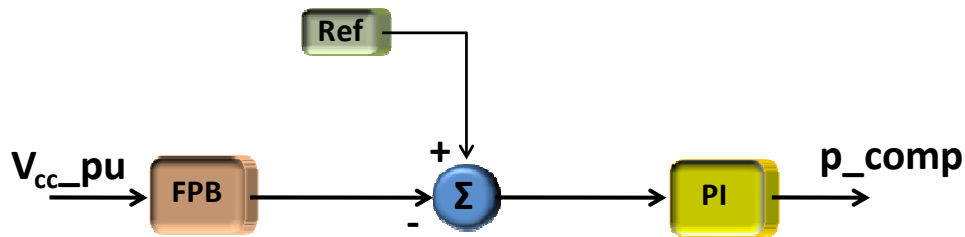


Figura 3.8 – Algoritmo de Controle para Regulação de Tensão do Capacitor.

Dessa forma, para que se mantenha a tensão do capacitor do elo cc em um nível adequado, faz-se uso de um controlador PI (proporcional - integral), que a partir do sinal de erro gerado da comparação entre um sinal de referência e o sinal de tensão V_{cc_pu} , medido no capacitor do elo, gera um valor de potência ativa p_comp necessária para suprir tal regulação.

Cabe ressaltar, que a este sinal de referência foi introduzido um sinal crescente em rampa, para minimizar o sobre-sinal (*overshoot*) [42] das correntes de compensação no momento de conexão do DSTATCOM à rede.

Como no momento de conexão o capacitor do elo cc está descarregado, o erro entre a referência e o valor medido da tensão cc com uma referência fixa, seria muito elevado e, o controlador PI geraria um sinal de p_comp muito alto, e conseqüentemente um valor de corrente elevado. Isto pode ser verificado pela equação 3.6, pois quanto maior o valor de p_comp , maior os valores das correntes.

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^{+2} + V_{\beta}^{+2}} \begin{bmatrix} p & q \\ -q & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha}^{+} \\ V_{\beta}^{+} \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Desta forma, com um valor inicial de referência mais baixo, o erro entre esta referência e o valor medido da tensão seria reduzido, reduzindo assim o valor de p_comp gerado pelo controlador PI e conseqüentemente o valor das correntes.

Quando a tensão do capacitor do elo cc for menor do que o sinal de referência, isto produzirá um erro positivo, e o controlador PI fornecerá um sinal de potência ativa

positiva, representando que existe um fluxo de energia na direção do DSTATCOM, carregando o capacitor do elo cc. No entanto, se a tensão do capacitor for maior do que o sinal de referência, isto produzirá um erro negativo, e o controlador PI fornecerá um sinal de potência ativa negativo, representando que existe um fluxo de energia na direção do sistema, descarregando o capacitor.

3.4 Controle da Potência Reativa

Conforme descrito no capítulo 2 o DSTATCOM pode ser utilizado para controle de fator de potência ou para regulação dos níveis de tensão, fornecendo potência reativa no sistema.

A seguir, são expostos os algoritmos dos controles para os dois casos.

3.4.1 Compensação do Fator de Potência

Quando se quer controlar o fator de potência, o que se deseja é fornecer uma potência reativa indutiva ou capacitiva à rede, dependendo das características do sistema onde o DSTATCOM está conectado, de modo que o fator de potência visto pela fonte seja unitário. Para tanto, calcula-se a potência reativa das cargas na barra à qual o DSTATCOM está conectado.

Através da teoria p-q, tem-se que, quando o sistema está equilibrado e não existem perturbações causadas por harmônicos, a potência reativa é igual à potência imaginária instantânea. E, quando existem perturbações, a potência reativa corresponde ao valor médio da potência imaginária instantânea. Desta forma, este algoritmo de controle é baseado na potência imaginária instantânea conforme ilustra a Figura 3.9.

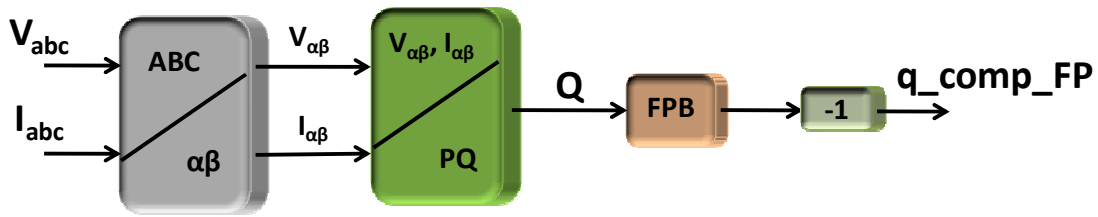


Figura 3.9 – Algoritmo de Controle para Correção do Fator de Potência.

Através das medições das tensões no barramento ao qual o DSTATCOM está conectado e das correntes provenientes das cargas, utilizando a equação 3.1 para transformação dessas medições para o referencial $\alpha\beta$, calcula-se a potência imaginária q , utilizando a equação 3.3. Como esta potência pode conter parcelas constantes e oscilantes, ou seja, $q = \bar{q} + \tilde{q}$, se torna necessária a utilização de um filtro passa-baixas para remover a parcela oscilante \tilde{q} restando apenas o valor médio \bar{q} .

Percebe-se que ao final deste algoritmo o valor da potência reativa calculado é introduzido em um ganho unitário negativo apenas para inversão do valor da potência. Esta inversão é facilmente explicada. Quando se tem uma carga indutiva, o valor da potência reativa é positivo ($Q > 0$) e como o objetivo é fazer com que a potência reativa seja nula, para que o fator de potência seja unitário, o que se deseja é que o compensador forneça uma carga reativa capacitiva, ou seja, potência reativa negativa ($Q < 0$) para anular a potência reativa da carga. Desta forma, sem esta inversão, o compensador além de não contribuir para a redução da potência reativa, estaria aumentando este valor. Esta mesma análise vale para uma carga capacitiva.

Esta parcela denominada q_{comp} é a componente responsável pela compensação do fator de potência, que será utilizada para o cálculo da corrente de compensação.

3.4.2 Regulação das Tensões do Sistema

Como dito anteriormente, outra possibilidade de compensação é a regulação das tensões do barramento ao qual o DSTATCOM está conectado.

Esse controle é baseado no valor eficaz coletivo da tensão de entrada, apresentado na equação 3.7 em coordenadas $\alpha\beta$ [23, 24].

$$V_{col} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (3.7)$$

Esse controle tem por base o fato de que, como o valor coletivo da tensão é proporcional às tensões do sistema, se estas tensões estiverem equilibradas, o valor coletivo será constante.

Como exemplo, pode-se observar no gráfico da Figura 3.10 o comportamento do cálculo da amplitude coletiva frente a afundamentos e elevações da tensão de entrada, quando estas estão equilibradas.

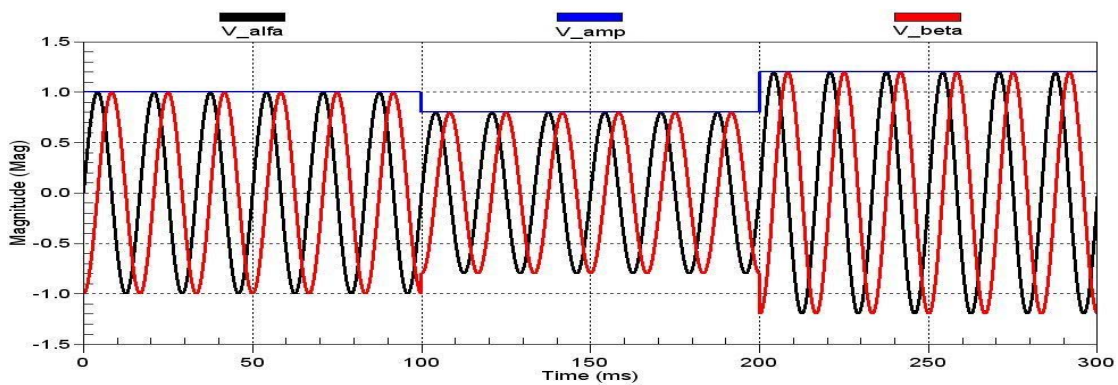


Figura 3.10 – Amplitude Coletiva da Tensão.

Uma vez calculado o valor coletivo da tensão, pode-se implementar um controle que seja capaz de atuar na potência reativa, controlando a tensão do barramento na existência de algum distúrbio na rede, conforme pode ser visto na Figura 3.11.

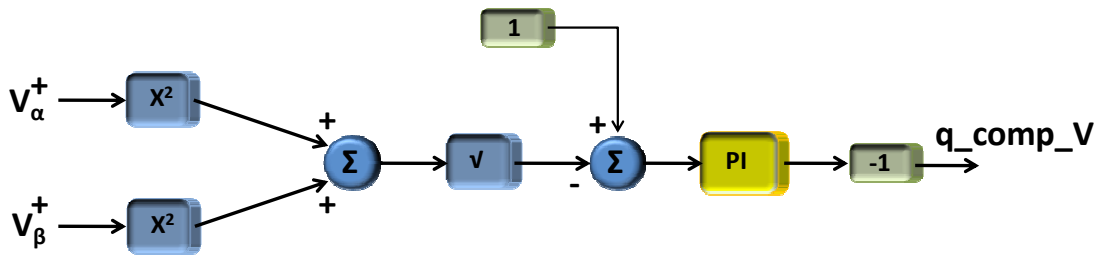


Figura 3.11 – Algoritmo de Controle para Regulação dos Níveis de Tensão.

Esse controle é realizado por um controlador PI, que através do erro gerado entre a comparação de um valor de referência e o valor coletivo da tensão, gera um sinal de compensação de potência reativa.

Mais uma vez, ao final da malha de controle, percebe-se a existência de um ganho unitário negativo para inversão do valor da potência reativa calculada.

Observa-se que quando o valor coletivo da tensão de sequência positiva da entrada é menor que o valor de referência, o erro gerado é positivo e consequentemente o controlador PI fornece um valor de referência de potência reativa positivo ($Q > 0$), caracterizando uma potência indutiva. Desta forma, se esta potência fosse utilizada para o cálculo das correntes de referência, ao invés de compensar o afundamento, elevando o nível de tensão da barra, esta corrente iria provocar um afundamento cada vez maior.

Da mesma forma, se o valor coletivo for maior que o valor de referência, o erro gerado é negativo, e consequentemente o controlador PI fornece um valor de referência de potência reativa negativo ($Q < 0$), caracterizando uma carga capacitiva. Desta forma, se esta potência fosse utilizada para o cálculo das correntes de referência, ao invés de compensar a elevação das tensões, está corrente iria provocar uma elevação cada vez maior nas tensões.

Portanto, faz-se necessário o uso deste ganho ao final da malha de controle, para que ao invés de fornecer uma referência de potência reativa indutiva quando se tem uma carga indutiva, forneça-se uma referência capacitiva ao cálculo das correntes de compensação elevando os níveis de tensão. Da mesma forma que para uma carga

capacitiva, ao invés de fornecer uma referência capacitiva, forneça-se uma referência indutiva ao cálculo das correntes de compensação reduzindo os níveis de tensão.

3.5 Cálculo das correntes de compensação e dos sinais de acionamento das chaves

Esta é a etapa final do controle do DSTATCOM. A partir dos sinais de potências ativa p_{comp} , obtido no controle de tensão dos capacitores do elo cc, e reativa, calculada através da carga ou do valor coletivo da tensão q_{comp} , obtêm-se os sinais de acionamento das chaves, satisfazendo os objetivos de compensação.

Pode-se observar na Figura 3.12 que esta malha de controle é baseada no cálculo de uma corrente de referência baseada na teoria p-q e na comparação desta corrente de referência com as correntes medidas no conversor em coordenadas $\alpha\beta$. Os resultados destas comparações são introduzidos em controladores PI's e às saídas destes controladores são acrescidas tensões fictícias V'_α e V'_β de amplitude unitária, obtidas através do sinal de saída ωt do PLL. Por fim, esta resultante é transformada para o referencial ABC e comparada com uma portadora triangular, gerando os sinais de acionamento das chaves.

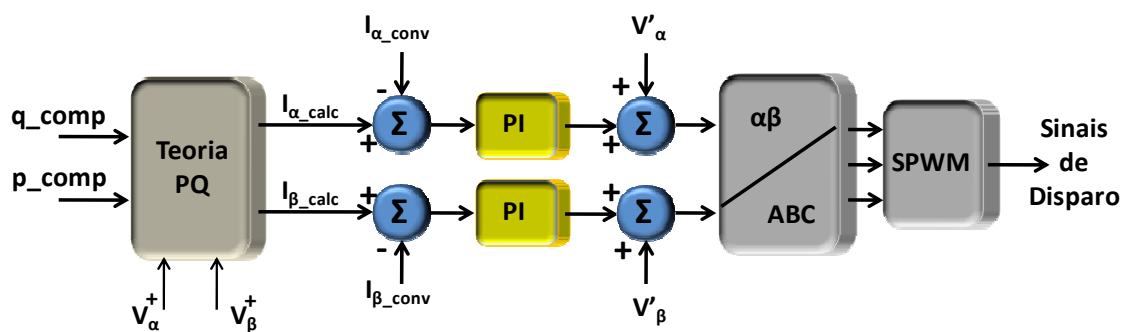


Figura 3.12 – Algoritmo de Controle para Cálculo da Corrente de Compensação.

Como descrito, as correntes de referência são obtidas através dos sinais p_{comp} e q_{comp} e das tensões de sequência positiva das tensões de entrada V_α^+ e

V_{β}^+ . Este cálculo é baseado na teoria das potências ativa e reativa instantâneas e expresso pela equação 3.8.

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha_calc} \\ I_{\beta_calc} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^{+2} + V_{\beta}^{+2}} \begin{bmatrix} p_comp & q_comp \\ -q_comp & p_comp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha}^+ \\ V_{\beta}^+ \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Cabe ressaltar, que como p_comp e q_comp possuem apenas parcelas constantes, as correntes de referências calculadas I_{α_calc} e I_{β_calc} , devido ao cálculo exposto, possuem apenas componentes de sequência positiva na frequência fundamental.

Em seguida, essas correntes de referência calculadas, são comparadas com as correntes medidas no conversor, em coordenadas $\alpha\beta$ e os erros obtidos destas comparações são introduzidos em controladores PI, que fornecem como resposta valores de incremento de tensão. A estes valores de incremento de tensão são somados as tensões fictícias V'_{α} e V'_{β} obtidas através do PLL, gerando os sinais de tensão de compensação em coordenadas $\alpha\beta$. Desta forma, como se deseja compensar apenas a componente fundamental de sequência positiva, a inclusão dessas tensões fictícias a malha de controle, proporciona um menor esforço aos controladores PI's reduzindo os erros em regime permanente, visto que esses controladores não garantem erro nulo para sinais de entrada alternados.

Por fim, os sinais de referência são convertidos para o referencial ABC por meio da equação 3.2 e através da modulação SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*), estas tensões de compensação são comparadas com uma portadora triangular, gerando os sinais de acionamento das chaves.

3.6 Conclusões Parciais

Neste capítulo, foi apresentado o controle do DSTATCOM quando este é operado como uma fonte de corrente controlada e os componentes do controle como algoritmo de sincronismo e detector de sequência positiva.

Foi apresentado o controle de potência ativa, necessário para regulação da tensão do capacitor do elo cc. Foram apresentados, também, os controles de potência reativa, para correção do fator de potência, com base na teoria de potência instantânea, e para regulação da tensão do barramento, através do valor de amplitude coletivo de tensão.

Por fim, foi exposto o controle para obtenção das tensões de compensação e geração dos sinais de acionamento das chaves por meio da modulação SPWM.

Capítulo 4

DSTATCOM OPERANDO COMO UMA FONTE DE TENSÃO CONTROLADA

Diferente do modo de operação apresentado anteriormente, que atua na injeção da corrente de compensação, a operação do DSTATCOM como uma fonte de tensão controlada age sobre a tensão de saída do inversor V_{ST} . Desta forma, a corrente necessária para a compensação de potência reativa, seja para regulação da tensão do barramento no PCC ou para controle do fator de potência, é fornecida pelo DSTATCOM de forma indireta.

Como neste modo de operação o DSTATCOM é visto pelo sistema como uma fonte de tensão na frequência fundamental, isto representa uma grande vantagem frente ao modo de operação apresentado no capítulo 3, pois permite que correntes harmônicas presentes na carga, fluam para o conversor. Deste modo, quanto menor for a indutância de comutação do conversor, menor será sua reatância, propiciando que este atue como um filtro para essas correntes.

Como desvantagem, este controle se apresentou mais oscilante nos transitórios de entrada e saída de cargas e afundamentos. Desta forma, a dinâmica deste modo de operação, é mais lenta que o modo de operação estudado anteriormente, para garantir a estabilidade do sistema.

Este controle que também é baseado na teoria p-q atua no cálculo de uma referência de amplitude e no cálculo de uma defasagem angular.

Dessa forma, de posse dos valores de amplitude e defasagem calculados e da frequência angular ωt obtida através do PLL, são gerados os sinais de referência de tensão utilizados para geração dos sinais de acionamento das chaves utilizadas, ou seja, o controle do DSTATCOM tem como objetivo fazer com que suas tensões tenham amplitude e fase controladas.

O esquema da Figura 4.1 ilustra a estrutura deste modo de operação, bem como os pontos de medições de tensões e correntes necessários para o correto controle do DSTATCOM.

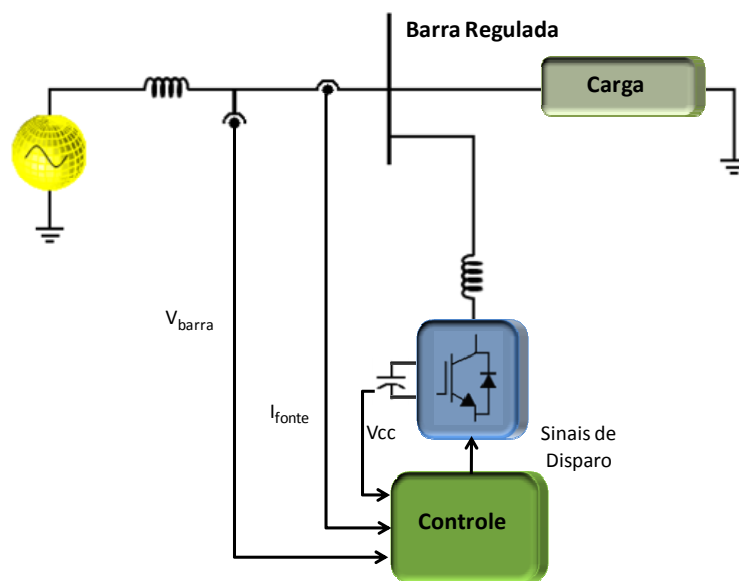


Figura 4.1 - DSTATCOM controlado por referência de tensão.

Para este modo de operação o número de medições necessárias para o controle do DSTATCOM é inferior ao modo de operação apresentado no capítulo 3. Quando se deseja regular as tensões do barramento, apenas são utilizadas as medições de tensão, enquanto no modo de operação como fonte de corrente, além de utilizar as medições de tensão, utilizam-se também as medições de corrente do conversor para cálculo das tensões de compensação. E quando se deseja corrigir o fator de potência, além das tensões da barra são utilizadas as correntes da fonte. Enquanto por referência de corrente utilizam-se as tensões da barra, as correntes da carga e as correntes do conversor.

São apresentados na Figura 4.2 os componentes do sistema de controle do DSTATCOM. Assim como na operação por referência de corrente, esta malha de controle é também baseada nas transformações das tensões e correntes medidas para as coordenadas $\alpha\beta$ seguida do circuito de sincronismo e do detector de sequência positiva. A diferença deste controle está no controle das potências ativa e reativa e na obtenção dos sinais de acionamento das chaves.

O controle da potência ativa é realizado através do controle do valor da tensão do capacitor do elo cc, que gera uma defasagem angular entre as tensões do sistema e as tensões sintetizadas pelo DSTATCOM. Já o controle da potência reativa é realizado pelo cálculo da potência reativa drenada da rede, para correção do fator de potência, ou através do valor coletivo da tensão, para regulação da tensão do barramento.

Por fim, são geradas as tensões de compensação e os sinais de acionamento através da modulação SPWM.

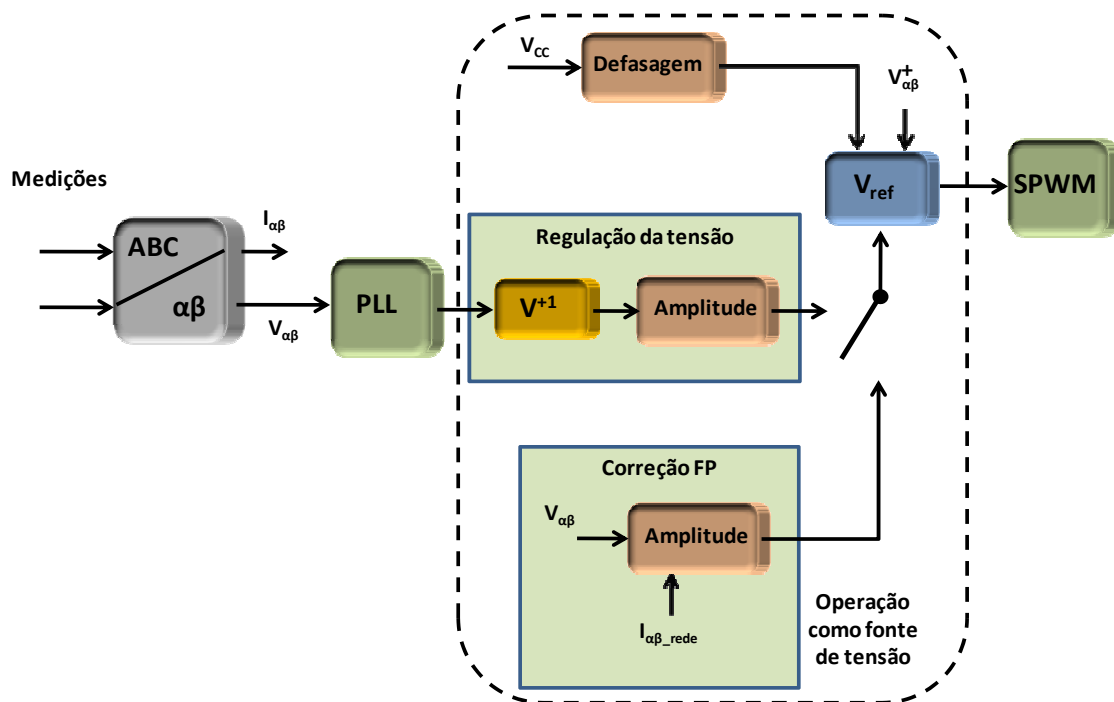


Figura 4.2 - Algoritmo de controle do DSTATCOM operando por referência de tensão.

A seguir são apresentados os algoritmos que compõem esta malha de controle. Entretanto, como o circuito de sincronismo e o circuito detector de sequência positiva

são idênticos em ambos os modos de operação, torna-se desnecessária mostrar suas descrições neste capítulo.

4.1 Controle da Potência Ativa

Uma característica presente em qualquer sistema de potência é uma dependência entre o fluxo de potência ativa e os ângulos de tensões nas barras.

Considerando o sistema linear Jacobiano do método Newton-Raphson [44], pode-se escrever que:

$$B' \Delta\delta = \frac{\Delta P}{V} \quad (4.1)$$

onde,

$\Delta P \rightarrow$ Desbalanço de potência ativa

$\Delta\delta \rightarrow$ Correção angular

$B' \rightarrow$ Matriz de admitância

De forma geral, pode-se observar que uma variação de potência ativa implica em uma variação no ângulo de defasagem e tem pequeno efeito sobre a magnitude da tensão.

A seguir, será apresentado o controle desenvolvido para regulação do elo CC.

4.1.1 Controle para Regulação do elo CC

Como descrito, a defasagem angular δ é o principal responsável pelo fluxo de potência ativa que controla a tensão no capacitor do DSTATCOM [40]. Isto pode ser verificado observando-se as equações 4.2 e 4.3 e supondo que o defasamento é muito pequeno, ou seja, $\sin \delta \cong \delta$ e $\cos \delta \cong 1$. Dessa forma, as equações para as potências ativa e reativa podem ser escritas por:

$$P_S = \frac{V_S \cdot V_{ST}}{X_L} \cdot \delta \quad (4.2)$$

$$Q_S = \frac{V_S^2}{X_L} - \frac{V_S V_{ST}}{X_L} \quad (4.3)$$

A Figura 4.3 representa o algoritmo de controle para regulação do elo. Este controle é similar ao controle utilizado no modo de operação como fonte de corrente, entretanto, ao invés de gerar uma potência ativa de compensação como saída do controlador PI, gera um sinal de defasagem δ para regulação do elo.

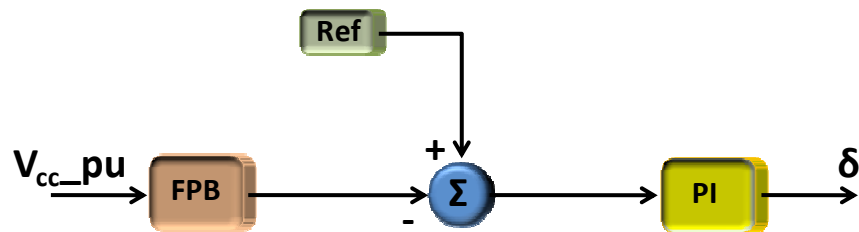


Figura 4.3 - Algoritmo de Controle para Regulação de Tensão do Capacitor.

Assim como no controle por referência de corrente, foi implementado ao sinal de referência, um sinal crescente em rampa para minimizar o sobre-sinal nas correntes de compensação para carregamento do capacitor do elo cc no momento de conexão do DSTATCOM ao sistema.

Como a defasagem angular é a principal responsável pelo fluxo de potência ativa que carrega o capacitor do elo cc, se a comparação entre o valor medido da tensão cc e do valor de referência for muito elevada, o controlador PI fornecerá como resposta um sinal de defasagem também elevado e conseqüentemente de acordo com a equação 4.2 um valor de potência ativa alto. Desta forma, de acordo com a equação 3.6, produziria uma corrente de compensação elevada.

Pode-se observar pela equação 4.2 que, se a defasagem angular δ for diferente de zero, entre as tensões da rede e as tensões do DSTATCOM existirá fluxo de potência ativa. Neste caso duas situações podem ser observadas:

- se as tensões da rede estiverem adiantadas das tensões do DSTATCOM, ou seja, $\delta > 0$, existirá fluxo de potência ativa para dentro do DSTATCOM carregando o capacitor do elo cc;
- se as tensões da rede estiverem atrasadas das tensões do DSTATCOM, ou seja, $\delta < 0$, existirá fluxo de potência ativa para fora do DSTATCOM descarregando o capacitor do elo cc.

Ou seja, introduzindo pequenas defasagens entre as tensões da rede e as tensões do DSTATCOM, altera-se a tensão do capacitor cc.

4.2 Controle da Potência Reativa

De forma análoga ao fluxo de potência ativa, onde existe uma relação entre a potência ativa e o ângulo de defasagem entre as tensões das barras, existe também uma dependência entre o fluxo de potência reativa e a amplitude das tensões nas barras. Desta forma, uma variação na potência reativa implica em uma variação no módulo da tensão e tem pequeno efeito sobre o defasamento.

A expressão que relaciona estas grandezas, considerando o sistema linear Jacobiano do método Newton-Raphson, é:

$$B'' \Delta V = \frac{\Delta Q}{V} \quad (4.4)$$

onde,

$\Delta Q \rightarrow$ Desbalanço de potência reativa

$\Delta V \rightarrow$ Correção do módulo da tensão

$B'' \rightarrow$ Matriz de admitância

Dessa forma, pode-se observar pela equação 4.4, que, se houver diferença entre as amplitudes das tensões da fonte e do DSTATCOM, existirá fluxo de potência reativa. Onde duas situações podem ser observadas:

- se a amplitude da tensão da rede V_S for maior que a da tensão do DSTATCOM V_{ST} , o DSTATCOM funcionará como um banco de indutores, gerando potência reativa indutiva;
- se a amplitude da tensão da rede V_S for menor que a da tensão do DSTATCOM V_{ST} , o DSTATCOM funcionará como um banco de capacitores, gerando potência reativa capacitiva.

Assim como descrito no capítulo 2, e apresentado no capítulo 3, existem duas formas de atuação do DSTATCOM para compensação reativa: correção do fator de potência e regulação das tensões do barramento.

A seguir, são apresentados os controles desenvolvidos para cada forma de atuação.

4.2.1 Compensação do Fator de Potência

De forma similar ao DSTATCOM quando está sendo operado como uma fonte de corrente controlada, a compensação do fator de potência é realizada com base na teoria p-q. Entretanto, não mais é calculada a potência reativa nas cargas, e sim a potência reativa na fonte.

Apesar de, em ambos os modos de operação, o objetivo a ser alcançado seja o cálculo da potência reativa, a forma como essa potência é controlada difere. No modo de operação anterior, o sinal gerado pelo algoritmo de controle é o valor da potência reativa a ser suprida; já neste modo de operação, controla-se a amplitude da tensão do DSTATCOM e por consequência a potência reativa suprida.

Conforme pode ser observado, a Figura 4.4 ilustra o esquema do controle desenvolvido.

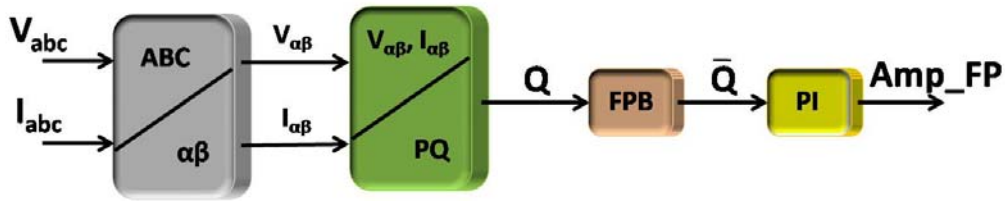


Figura 4.4 - Algoritmo de Controle para Correção do Fator de Potência.

Através das tensões no barramento ao qual o DSTATCOM está conectado e das correntes provenientes da fonte em coordenadas $\alpha\beta$ a través da equação 3.1, calcula-se a potência imaginária q através da equação 3.3 e extrai-se desse valor por meio de um filtro passa-baixa, o valor médio da potência reativa \bar{q} . Em seguida, com o auxílio de um controlador PI obtem-se o valor da amplitude referente à tensão do DSTATCOM V_{ST} para a compensação do fator de potência. E, conforme pode ser observado na equação 4.3, se existir diferença de amplitude entre as tensões da rede e as tensões do DSTATCOM, existirá fluxo de potência reativa.

4.2.2 Regulação das Tensões do Sistema

Assim como no modo de operação como uma fonte de corrente controlada, a regulação dos níveis de tensão do barramento, quando o DSTATCOM é operado como uma fonte de tensão controlada, é realizada através do valor eficaz coletivo da tensão de entrada, conforme apresentado no diagrama da Figura 4.5.

Entretanto, neste modo de operação o controle da potência reativa é realizado através da diferença de amplitude. Uma vez calculado o valor coletivo da tensão, e da comparação entre este valor e um sinal de referência, através de um controlador PI gera-se o valor de amplitude referente à tensão do DSTATCOM V_{ST} para a regulação dos níveis de tensão.

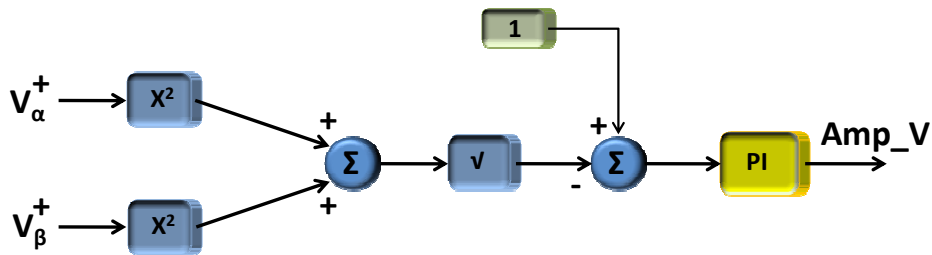


Figura 4.5 - Algoritmo de Controle para Regulação dos Níveis de Tensão.

E como descrito anteriormente, se a amplitude da tensão do DSTATCOM for maior que a tensão da rede, o conversor fornecerá potencia reativa capacitiva. Se a amplitude da tensão do DSTATCOM for menor que a tensão da rede, o conversor fornecerá potência reativa indutiva.

4.3 Cálculo das tensões de compensação e dos sinais de acionamento das chaves

Mais uma vez, esta é a etapa final do controle do DSTATCOM. Neste modo de operação, através da defasagem angular e da amplitude calculadas são obtidos os sinais de acionamento das chaves.

Pode-se observar na Figura 4.6 que as tensões de compensação são baseadas em uma malha de controle *feedforward* apenas com um controlador proporcional, através da comparação entre as tensões medidas na barra de conexão do DSTATCOM e dos sinais de tensão calculados através de um bloco gerador de senos.

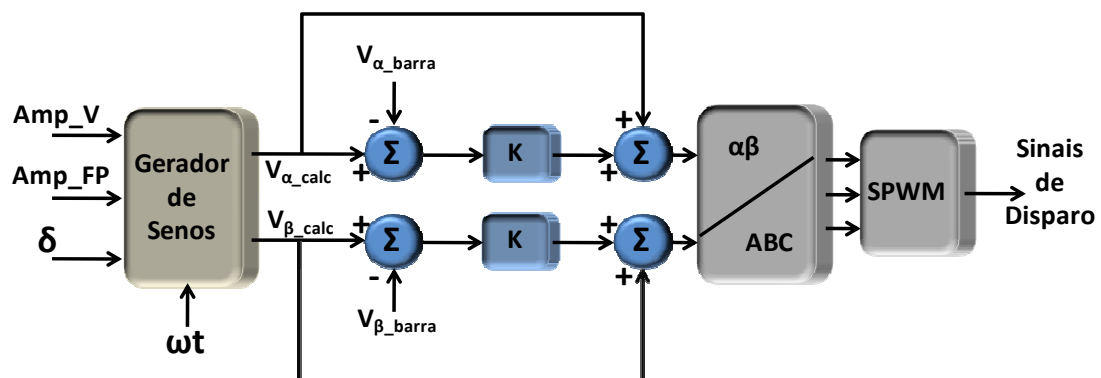


Figura 4.6 - Algoritmo de Controle para Cálculo da Tensão de Compensação.

Este bloco gerador de senos relaciona a defasagem angular calculada no controle da tensão do capacitor do elo cc, às amplitudes calculadas no controle da potência reativa da fonte ou do valor coletivo das tensões e a frequência angular ωt obtida como sinal de saída do PLL, conforme a equação 4.5.

$$\begin{aligned} V_{\alpha_calc} &= Amplitude \times \sin(\omega t - \delta) \\ V_{\beta_calc} &= Amplitude \times \cos(\omega t - \delta) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Como característica desta malha de controle *feedforward*, tem-se que com a introdução deste controlador proporcional, o erro gerado entre a comparação das tensões do ponto de conexão e das tensões calculadas nunca será nulo, visto que este controlador apenas amplifica o sinal de erro. Outra característica presente é se o ganho do controlador proporcional for zero, o sinal de compensação será a própria tensão de referência calculada.

Quando comparada com a malha de controle para obtenção das tensões de compensação para o DSTATCOM operado por referência de corrente, esta malha representa um menor esforço computacional, principalmente para aplicações em DSP de ponto fixo.

Por fim, os sinais de disparo das chaves são mais uma vez, gerados através da modulação SPWM, através da comparação das tensões de compensação com uma portadora triangular.

4.4 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi apresentado o controle do DSTATCOM quando este é operado como uma fonte de tensão.

Foram apresentadas as relações entre os ângulos de defasagem entre duas fontes de tensões e o fluxo de potência ativa e, as relações entre as amplitudes destas tensões e o fluxo de potência reativa. Desta forma, foram propostos algoritmos de controle para regulação da tensão do capacitor do elo cc, através do ângulo de

defasagem, e, algoritmos para controle da potência reativa, para regulação das tensões no barramento ou correção do fator de potência, através do valor de amplitude destas tensões.

Por fim, foi exposto o algoritmo de controle das tensões de referência para que novamente através da modulação SPWM tenha-se os sinais de acionamento das chaves. Neste ponto encontra-se mais uma vantagem do DSTATCOM quando operado por tensão. Esta malha de controle é mais simples, do que quando operado por corrente, o que reduz o esforço computacional quando implementado em DSP de ponto fixo.

Capítulo 5

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados das simulações obtidos através do programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC, para os dois modos de operação do DSTATCOM, estudados nos capítulos 3 e 4. Nesta simulação, foram dimensionadas cargas indutivas e capacitivas, além de um afundamento provocado através de uma indutância em série com a rede, de modo a obter a resposta do DSTATCOM frente a subtensões e sobretensões, avaliando sua capacidade de regulação de tensão e correção do fator de potência para os dois métodos estudados.

Além disso, foram inseridas componentes harmônicas de quinta e sétima ordem, nas correntes da carga, para avaliar o comportamento dos dois modos de operação do DSTATCOM. As Tabela 5.1, Tabela 5.2, Tabela 5.3 e Tabela 5.4 abaixo, apresentam os parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetros do Sistema Elétrico		
Tensão Nominal de Linha	V_{fonte}	220V
Tensão base do Sistema	V_{base}	311V
Frequência do Sistema	f	60Hz
Indutância da Linha	L_{fonte}	2,5mH

Tabela 5.1 – Dados do sistema elétrico.

Parâmetros do Conversor		
Capacitor do elo CC	C_{elo}	2350 μ F
Capacitor do Filtro	C_{filtro}	16 μ F
Indutor de Comutação	L_{com}	1,5mH
Resistor do Filtro	R_{filtro}	3 Ω
Frequência de Chaveamento	f_{chav}	10kHz

Tabela 5.2 – Dados do conversor.

Parâmetros das Cargas		
Carga indutiva		
Indutor da Carga	L_{carga}	12mH
Resistor da Carga	R_{carga}	7,5 Ω
Carga Capacitiva		
Capacitor da Carga	C_{carga}	600 μ F
Resistor da Carga	R_{carga}	7,5 Ω

Tabela 5.3 – Parâmetros das cargas.

Parâmetros das Correntes Harmônicas		
Componente de Quinto Harmônico	I_{5H}	1,636A _{pico}
Componente de Sétimo Harmônico	I_{7H}	0,818A _{pico}

Tabela 5.4 – Dados dos componentes harmônicos.

As simulações têm uma duração de tempo de $t = 2,5s$. Inicialmente, o DSTATCOM foi inserido ao sistema sem a presença de cargas, no instante $t = 0,2s$, apenas para regulação da tensão do capacitor do elo cc. Em seguida, foi inserida a carga indutiva no instante $t = 0,6s$. No instante $t = 1,1s$ foi conectado o indutor de afundamento em série com o sistema até o instante $t = 1,5s$. Por fim, no instante $t = 2,0s$, a carga indutiva foi substituída por uma carga capacitiva.

Posteriormente, foram realizadas novas simulações, onde foram introduzidos componentes harmônicos de quinta e sétima ordem, nas correntes da carga indutiva, para avaliação do comportamento dos dois modos de operação do DSTATCOM.

O circuito apresentado na Figura 5.1 resume as informações utilizadas nas simulações. Cabe ressaltar que os dados utilizados nas simulações são correspondentes aos valores utilizados no protótipo laboratorial para validação dos controles desenvolvidos.

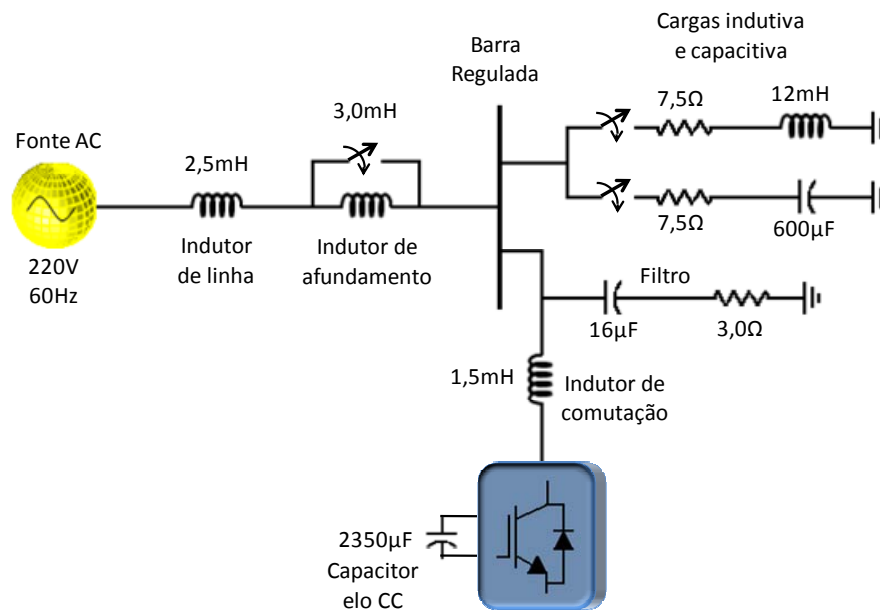


Figura 5.1 – Diagrama do sistema implementado no simulador PSCAD/EMTDC.

A seguir são expostos os resultados obtidos nas simulações.

Inicialmente são apresentados os resultados para o sistema sem compensação, mostrando os efeitos dos eventos descritos nas tensões e correntes. Em seguida são apresentados os resultados dos transitórios de partida do DSTATCOM, avaliando o comportamento das correntes frente aos algoritmos de controle propostos

Além disso, são apresentados os resultados para regulação das tensões no barramento e para correção do fator de potência. E por fim, são expostos os resultados obtidos com a inserção de harmônicos nas correntes da carga.

5.1 Circuito sem compensação

O objetivo esta etapa é apresentar o comportamento das tensões e correntes sem a presença do DSTATCOM.

A Figura 5.2 ilustra o comportamento das tensões no ponto de conexão comum, frente aos eventos descritos anteriormente. Percebe-se que antes da inserção da carga indutiva as tensões do sistema apresentavam o valor de $127V_{rms}$. No instante em que a carga foi conectada ao sistema, as tensões da barra sofreram um afundamento de 5,8% passando as tensões da barra a apresentarem o valor de $120V_{rms}$ até o instante em que o indutor de afundamento foi conectado, provocando um afundamento de 14% e tensões com valor de $111V_{rms}$. Por fim com a substituição da carga indutiva pela carga capacitiva as tensões sofreram uma elevação de 5,8% com tensões de $134V_{rms}$.

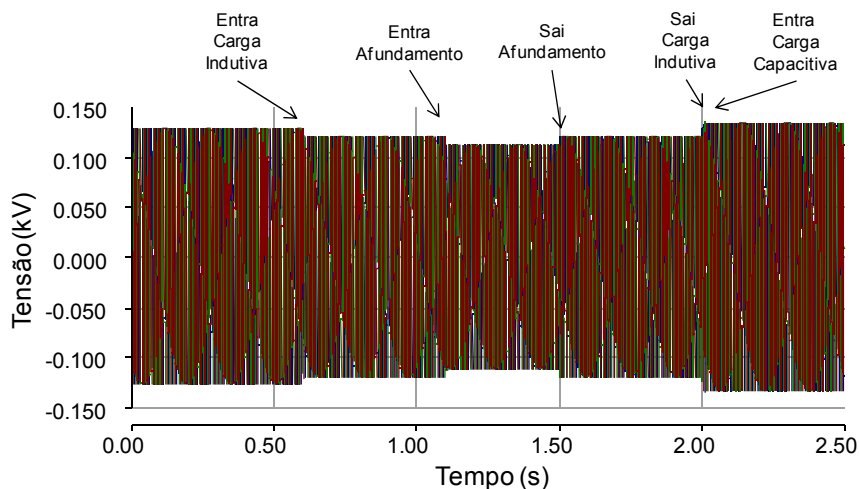
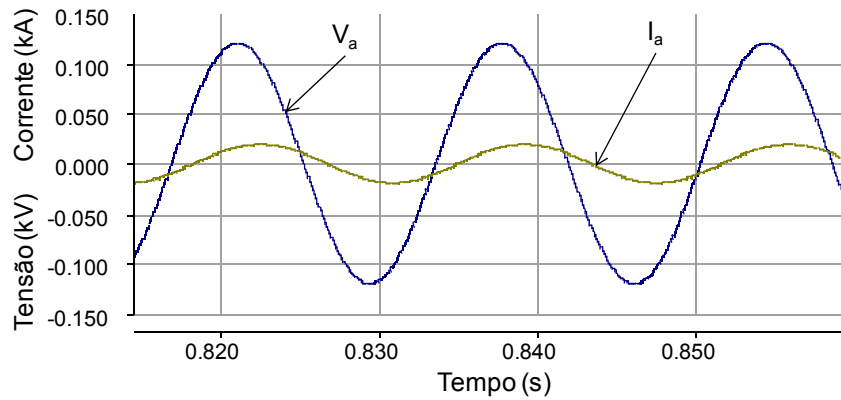
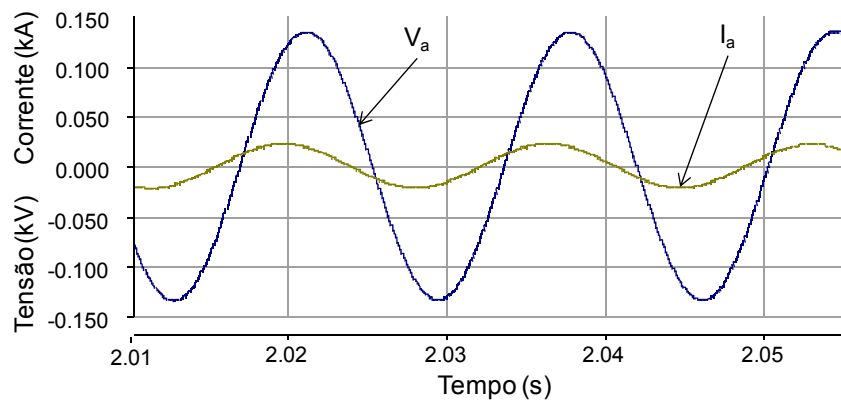


Figura 5.2- Tensões do PCC sem DSTATCOM.

Além do comportamento das tensões no PCC, pode-se verificar, sem a presença do DSTATCOM, o surgimento de uma defasagem angular entre a tensão V_a e a corrente I_a da fonte, nas Figura 5.3 (a) e (b), caracterizando o surgimento de um fator de potência de 0,86 indutivo e capacitivo, respectivamente.



(a) Carga indutiva



(b) Carga capacitiva

Figura 5.3 – (a) Tensão e corrente – carga indutiva, (b) Tensão e corrente – carga capacitiva.

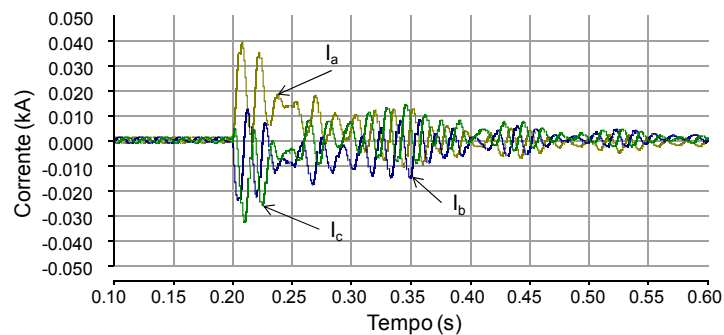
5.2 Transitórios de partida do DSTATCOM

Como descrito anteriormente, o DSTATCOM foi conectado ao sistema sem carga, apenas para regulação do capacitor do elo cc. Para tanto foram implementados aos algoritmos de controle do elo cc, sinais de referência crescente em rampa para minimizar o sobre-sinal nas correntes de compensação, uma vez que o controle da potência ativa é o responsável por esta regulação. Desta forma, o objetivo deste item é apresentar as correntes do compensador para os dois modos de operação estudados.

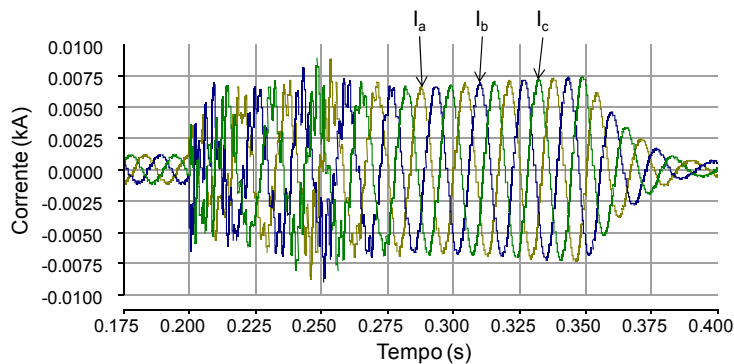
A Figura 5.4 mostra as correntes de compensação do DSTATCOM no instante inicial do chaveamento. No instante de partida, o capacitor cc do DSTATCOM está pré-carregado e com uma tensão de 311V. Quando o chaveamento é acionado, os

inversores permitem a passagem de energia do sistema para o capacitor cc, carregando-o até sua tensão nominal de 400V, estabelecida no código de controle.

Percebe-se na Figura 5.4(a) que o transitório de partida, quando o DSTATCOM está sendo operado como uma fonte de tensão controlada, possui um sobre-sinal elevado, chegando a corrente a atingir 40A de pico e quando controlado como uma fonte de corrente (Figura 5.4(b)), não passa de 10A de pico. Destaca-se que sem a implementação do referencial em rampa no controle do elo cc, as correntes apresentaram um valor de corrente superior a 115A e 45A para os controles por tensão e corrente, respectivamente.



(a) Controle por referência de tensão



(b) Controle por referência de corrente

Figura 5.4 – Correntes de compensação no início do chaveamento.

Cabe ressaltar que a rampa introduzida no controle do elo cc tem uma dinâmica até seu valor máximo de 1p.u. de 150ms. Entretanto o comportamento transitório no controle por referência de tensão tem uma duração superior a 300ms e no controle por referência de corrente tem uma duração de 175ms. Esta dinâmica

elevada no controle por referência por tensão é consequência do comportamento oscilatório deste controle.

Destaca-se, também, que além de interferir nas correntes de compensação, o transitório de partida do DSTATCOM interfere nas tensões da barra.

A seguir, serão apresentados os resultados da operação do DSTATCOM nos dois modos de operação, para a regulação das tensões no PCC e para correção do fator de potência.

5.3 Regulação das tensões no barramento

O perfil da tensão V_{rms} é mostrado, na Figura 5.6(a), para o DSTATCOM operando como fonte de tensão e, na Figura 5.7(a), para o DSTATCOM operando como uma fonte de corrente. Observa-se que a tensão é regulada em $127V_{rms}$ em ambos os casos. Na operação como fonte de tensão, o controle se mostrou mais oscilante.

Pode-se observar que, em regime estacionário, as respostas de ambos os modos de operação são similares, satisfazendo o controle proposto. No entanto, analisando os estados transitórios, existe uma evidente diferença no comportamento da tensão V_{rms} . Isso se deve à presença de um zero de fase não mínima no controle de tensão [42].

Um sistema é dito de fase não mínima quando há presença de zeros no semiplano complexo direito. A caracterização de um sistema de fase não mínima é uma resposta temporal que começa por decrescer antes de atingir o valor final, exemplificado na Figura 5.5.

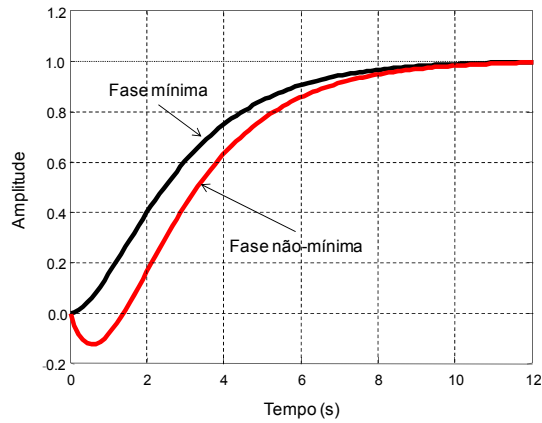


Figura 5.5 - Características de sistemas de fase mínima e não-mínima.

Como consequência dessa característica, os ganhos dos controladores, implementados no controle por tensão, necessitam ser mais moderados para manter a estabilidade do sistema, tornando sua dinâmica um pouco mais lenta que no controle por corrente.

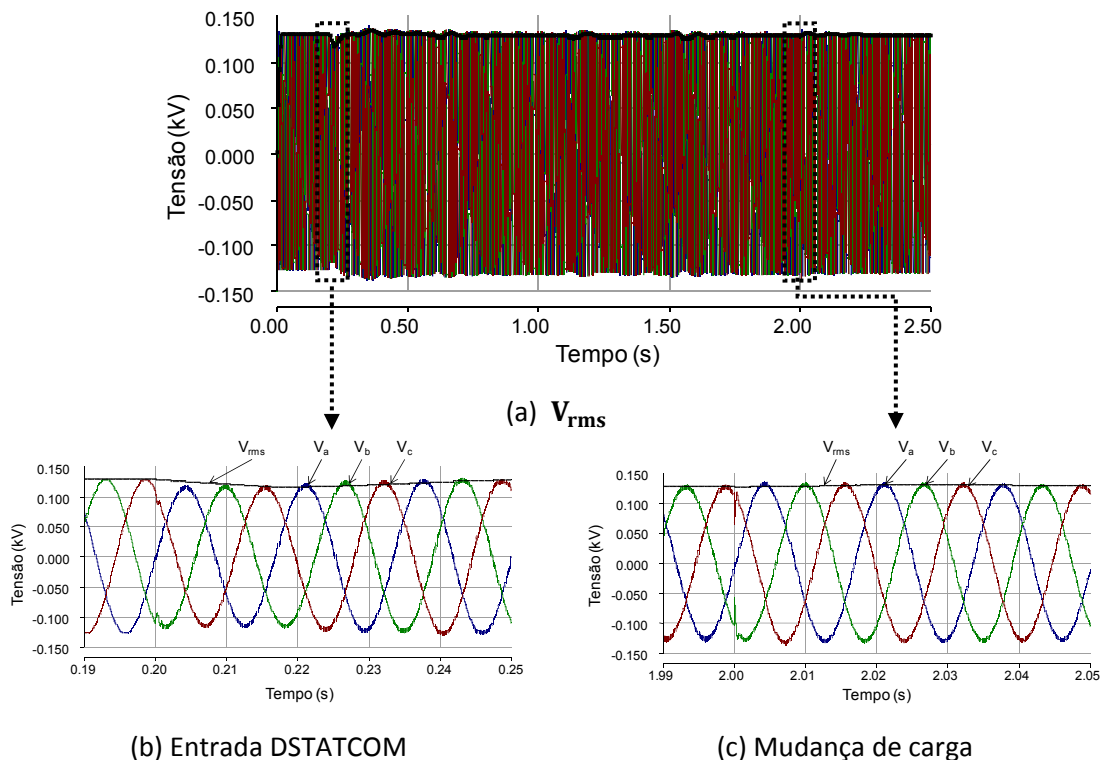


Figura 5.6 – Tensão do PCC para operação como fonte de tensão: (a) V_{rms} ; (b) Transiente entrada DSTATCOM; (c) Transiente mudança de carga.

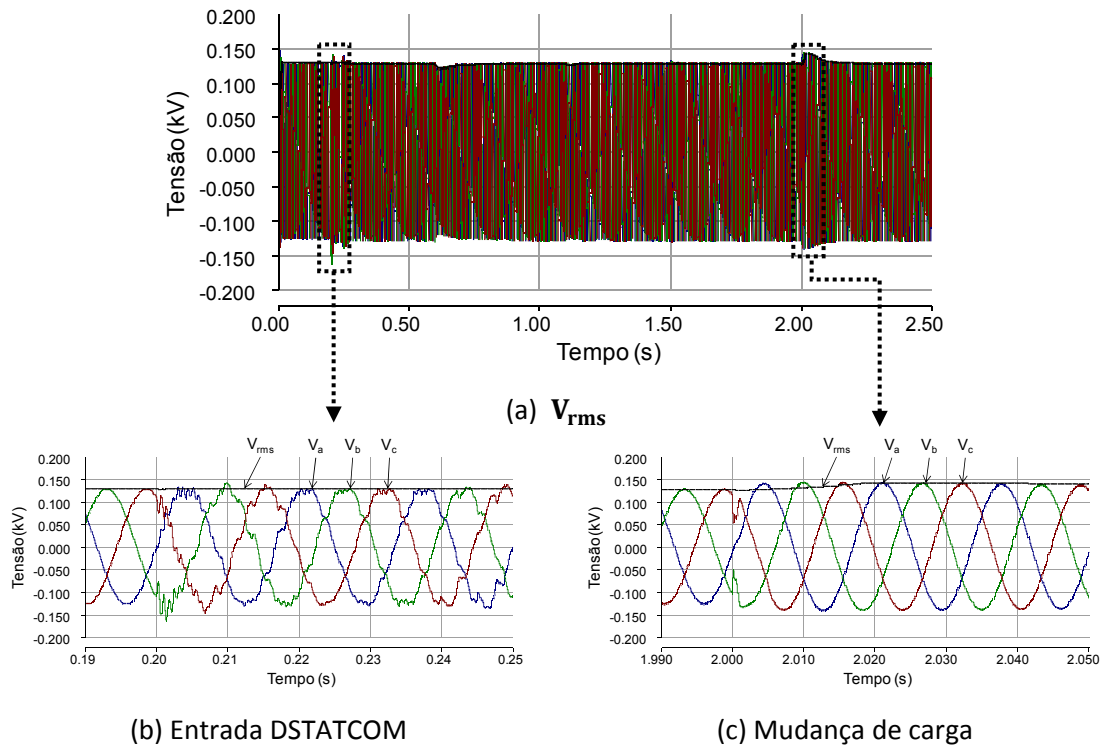
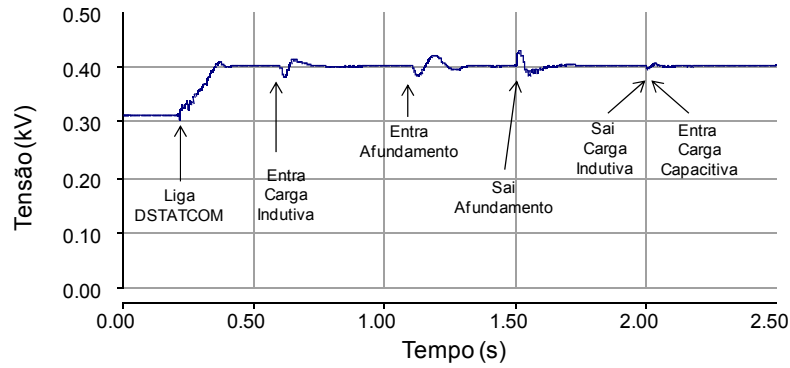


Figura 5.7 - Tensão do PCC para operação como fonte de corrente: (a) V_{rms} ; (b) Transitório entrada DSTATCOM; (c) Transitório mudança de carga.

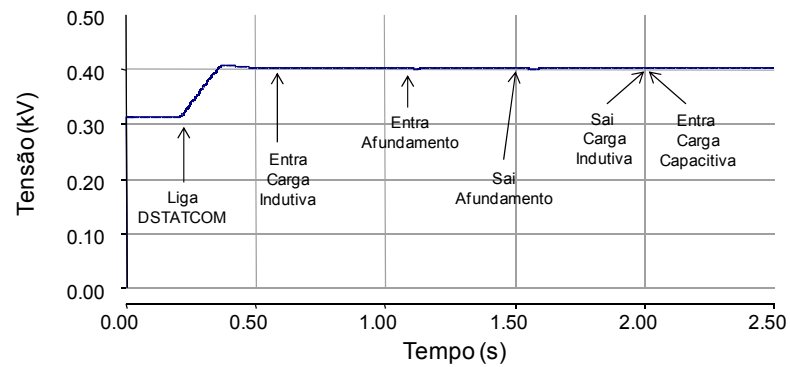
Outra característica importante e que pode ser observada nas Figura 5.6 (b) e Figura 5.7 (b) é a influência dos transitórios de partida do DSTATCOM sobre as tensões do barramento, para o modo de operação como fonte de tensão e como fonte de corrente, respectivamente. No primeiro caso, tem-se um afundamento momentâneo na ordem de 10% da tensão V_{rms} do sistema, devido a presença de um zero de fase não mínima, com duração de 40ms e THD de 2%. Já no segundo caso, tem-se o transitório com duração superior a 3 ciclos e com as formas de onda das tensões distorcidas com um THD de 9,5%.

As Figura 5.6 (c) e Figura 5.7 (c) mostram as tensões no instante de substituição entre a carga indutiva e a carga capacitiva. Observa-se no controle por corrente, uma elevação nas tensões. Como na compensação da carga indutiva o conversor fornece uma corrente capacitiva para compensar o afundamento das tensões, no instante da substituição das cargas, além da carga capacitiva provocar uma elevação na tensão, o conversor ainda está fornecendo corrente capacitiva, o que provoca uma elevação ainda maior nas tensões da barra.

A Figura 5.8 mostra a tensão do capacitor cc para os dois modos de operação. Nesta tensão V_{dc} , observa-se o comportamento oscilatório do controle por referência de tensão.



(a) Controle por referência de tensão



(b) Controle por referência de corrente

Figura 5.8 – Tensão V_{dc} : (a) referência por tensão, (b) referência por corrente.

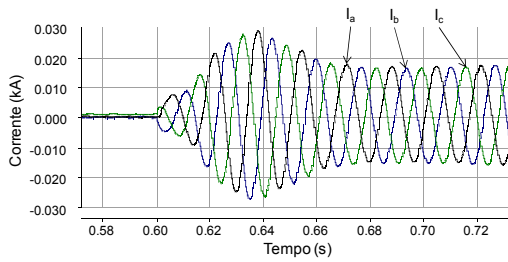
Desta forma, como as tensões do DSTATCOM estão relacionadas à tensão do capacitor cc, os transitórios da tensão do capacitor cc afetam a tensão do DSTATCOM.

5.4 Correção do fator de potência

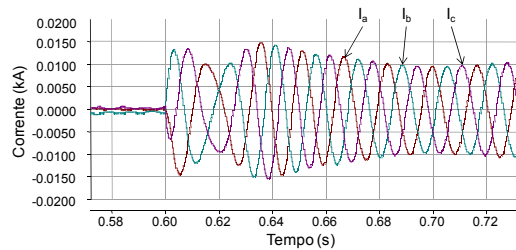
O controle para correção do fator de potência é outra possibilidade de compensação para o DSTATCOM.

Neste item, serão apresentados os resultados obtidos através das simulações para os dois modos de operação estudados.

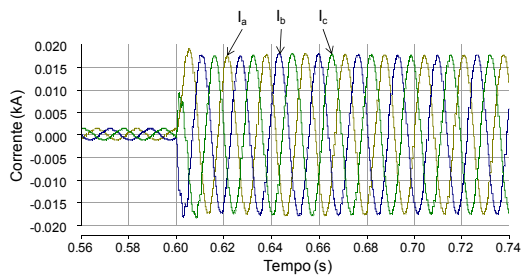
A Figura 5.9 mostra os transitórios das correntes da fonte e do conversor, no momento da inserção da carga indutiva, para ambos os modos de operação. Observa-se, nessa figura, a dinâmica dos controles desenvolvidos. Na operação como uma fonte de tensão, por se controlar a tensão de compensação, as correntes do conversor são obtidas de forma indireta, o que ocasiona uma instabilidade sobre estas.



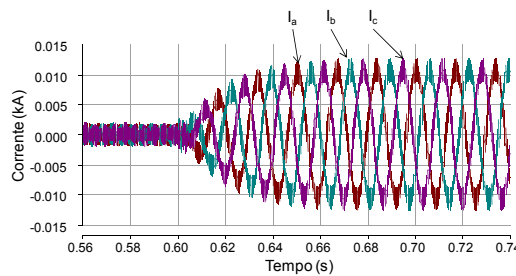
(a) Correntes da fonte, controle por referência de tensão



(b) Correntes do conversor, controle por referência de tensão



(c) Correntes da fonte, controle por referência de corrente

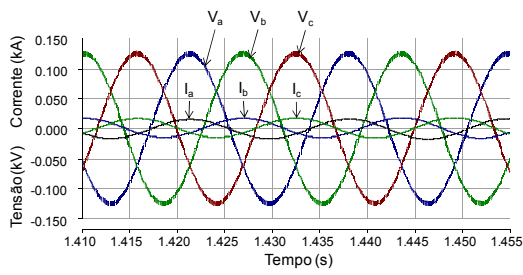


(d) Correntes do conversor, controle por referência de corrente

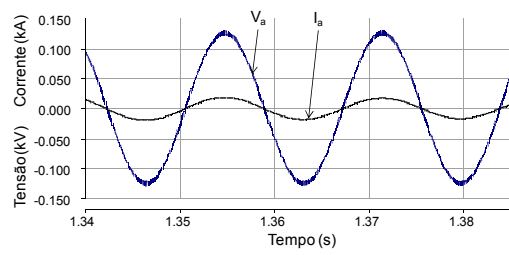
Figura 5.9 – Correntes de entrada da carga indutiva.

As Figura 5.10(a) e (c) mostram as tensões V_a , V_b e V_c no ponto de conexão do DSTATCOM e as correntes I_a , I_b e I_c da fonte em regime, com a presença da carga indutiva e afundamento, comprovando que ambos os modos de operação mostraram-se eficazes na correção do fator de potência.

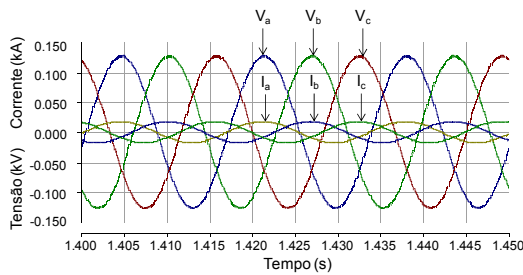
Comparando com a Figura 5.3(a), que apresenta as tensões e correntes da fase “a” com um fator de potência indutivo de 0,86, percebe-se, através das Figura 5.10(b) e (d), que ambos os modos de operação estudados realizaram a compensação da potência reativa, propiciando um fator de potência unitário na fonte. Nesta situação, o conversor fornece ao sistema uma corrente capacitiva.



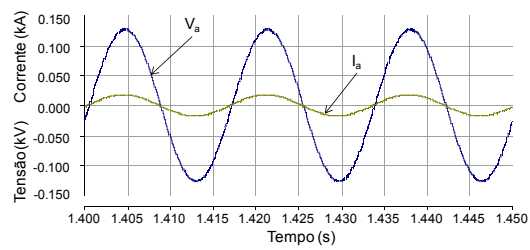
(a) Controle por referência de tensão



(b) Controle por referência de tensão



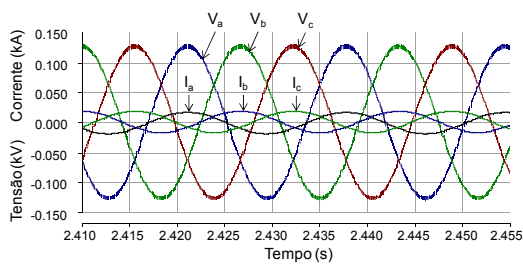
(c) Controle por referência de corrente



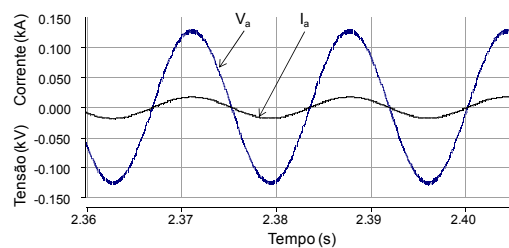
(d) Controle por referência de corrente

Figura 5.10 – Correção do fator de potência carga indutiva com afundamento.

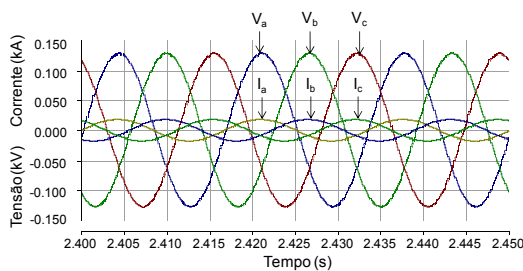
O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 5.11 para cargas capacitivas. Mais uma vez, os dois modos de operação realizaram a compensação reativa necessária para a correção do fator de potência. Destaca-se, neste caso, que o conversor fornece uma corrente indutiva.



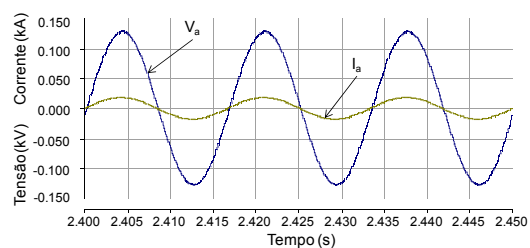
(a) Controle por referência de tensão



(b) Controle por referência de tensão



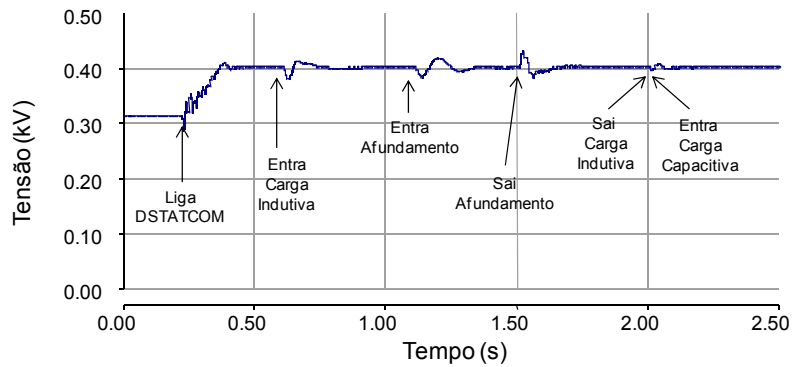
(c) Controle por referência de corrente



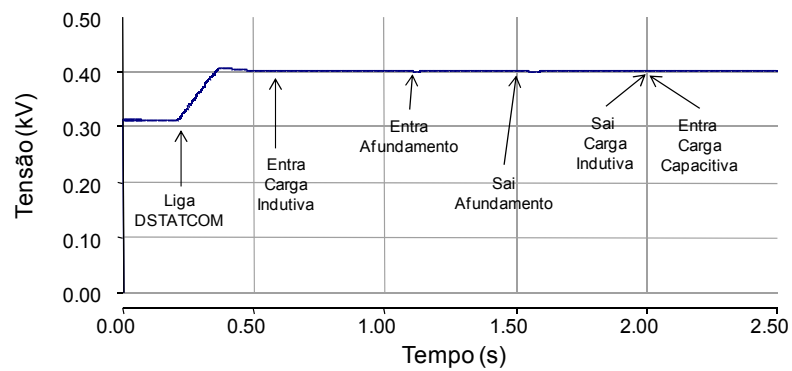
(d) Controle por referência de corrente

Figura 5.11 – Correção do fator de potência carga capacitiva.

Novamente, observa-se o comportamento oscilatório da tensão V_{dc} , quando o DSTATCOM é operado como fonte de tensão controlada, Figura 5.12. Consequentemente provocando oscilações nas tensões da barra.



(a) Controle por referência de tensão



(b) Controle por referência de corrente

Figura 5.12 – Tensão V_{dc} : (a) controle por tensão, (b) controle por corrente.

5.5 Eliminação de harmônicos

Neste item, foram realizadas novas simulações para avaliar o comportamento do DSTATCOM quando operado como fonte de tensão controlada e como fonte de corrente controlada, com a injeção de componentes harmônicos de quinta e sétima ordens nas correntes da carga.

Inicialmente, são apresentadas as formas de onda das correntes na fonte e das tensões do PCC, sem a atuação do DSTATCOM. Pode-se observar na Figura 5.13 as distorções causadas nas correntes devido à inserção destes harmônicos, as quais

apresentam um THD de 11,2%. Além disso, pode-se observar que as distorções harmônicas nas correntes ocasionam distorções nas formas de onda das tensões do PCC com um THD de 6,6%, ilustrado na Figura 5.14.

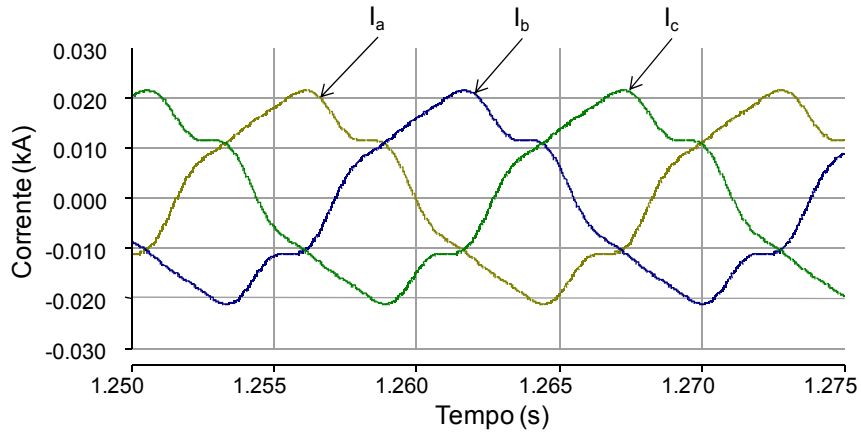


Figura 5.13 – Correntes da fonte sem o DSTATCOM.

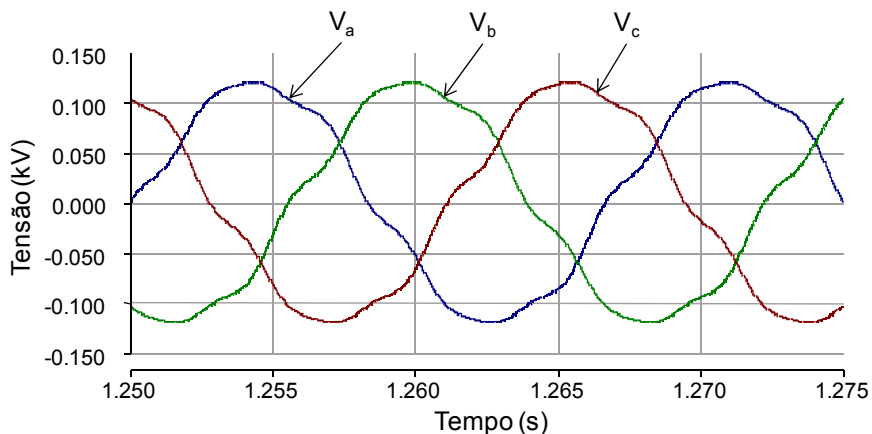


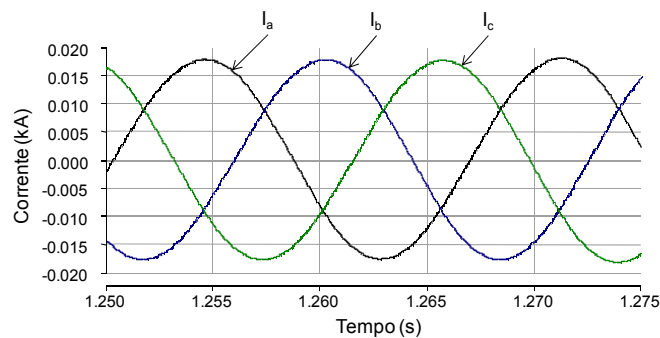
Figura 5.14 – Tensões do barramento sem o DSTATCOM.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos, para os dois modos, comprovando que quando controlado por tensão o DSTATCOM tem a capacidade de operar como um filtro para correntes harmônicas.

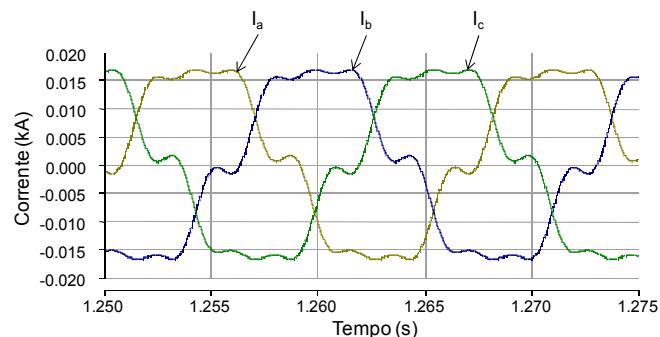
As Figura 5.15(a) e (b) e Figura 5.16(a) e (b) mostram as correntes na fonte, para o controle por tensão e para o controle por corrente, e as correntes do conversor para o controle por tensão e para o controle por corrente, respectivamente. As

correntes na fonte apresentam um THD de 1,67% e 17% quando o DSTATCOM é operado por referência de tensão e por referência de corrente, respectivamente. E as correntes do conversor apresentam um THD de 22,64% e 5,06% quando controladas por referência de tensão e por referência de corrente, respectivamente. Observa-se nestas figuras, que os componentes harmônicos, presentes nas correntes da carga, fluíram para o conversor quando o DSTATCOM é controlado por referência de tensão, enquanto que para o DSTATCOM controlado por referência de corrente os componentes harmônicos fluíram em parte para a fonte.

Isso se deve ao fato de que, quando o DSTATCOM é operado como uma fonte de tensão controlada, este sempre será o caminho de menor impedância, funcionando como um filtro para as componentes harmônicas. Desta forma, quanto menor a indutância de comutação, maior será a capacidade de drenar componentes harmônicos de corrente.

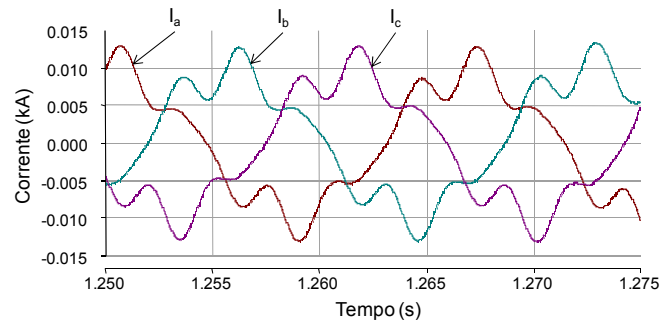


(a) Controle por referência de tensão

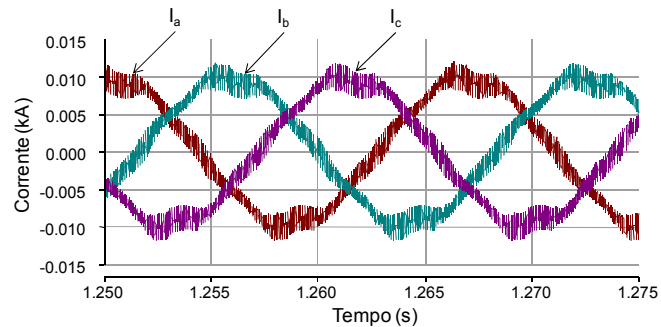


(b) Controle por referência de corrente

Figura 5.15 – Correntes da fonte com o DSTATCOM: (a) controle por tensão, (b) controle por corrente.



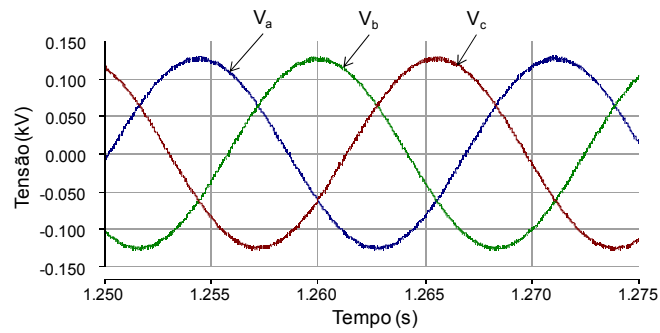
(a) Controle por referência de tensão



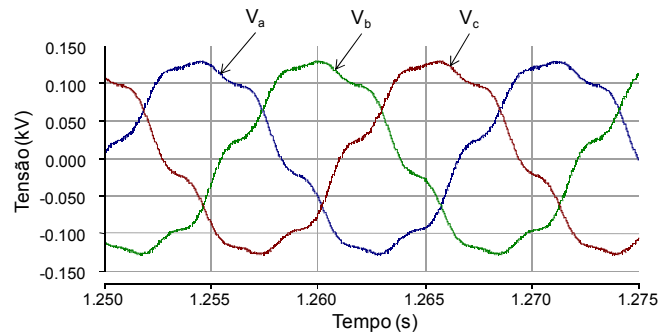
(b) Controle por referência de corrente

Figura 5.16 – Correntes do conversor: (a) controle por tensão, (b) controle por corrente.

As Figura 5.17(a) e (b) mostram as tensões do barramento para os dois modos de operação do DSTATCOM. Nestes resultados, tem-se um THD de 1,52% e 9% quando controlado por referência de tensão e por referência de corrente, respectivamente. Mais uma vez, observa-se que quando controlado por corrente, o DSTATCOM não tem capacidade de drenar os harmônicos de corrente, o que resulta em distorção harmônica nas tensões.



(a) Controle por referência de tensão

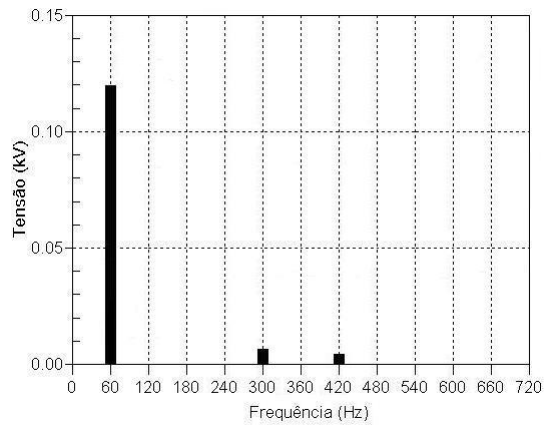


(b) Controle por referência de corrente

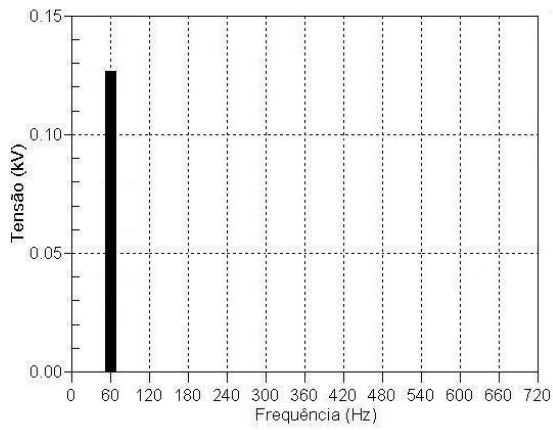
Figura 5.17 – Tensões do barramento com DSTATCOM: (a) controle por tensão, (b) controle por corrente.

A Figura 5.18 mostra o espectro harmônico das tensões do barramento sem a presença do DSTATCOM em (a) e com a presença do DSTATCOM operando como fonte de tensão em (b) e como fonte de corrente em (c). Comprovando os resultados anteriores, observa-se que, apenas quando operado por referência de corrente, há presença de harmônicos nas tensões.

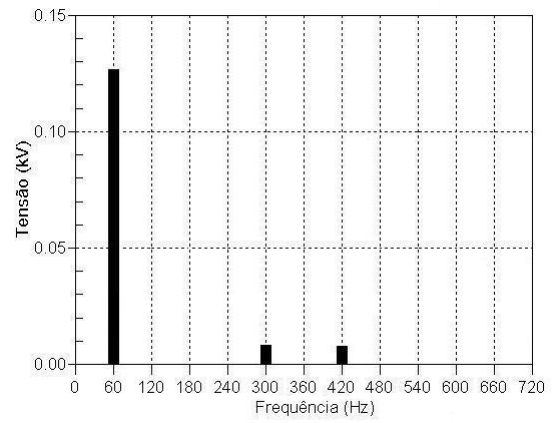
Na Figura 5.19, são apresentados os espectros harmônicos das correntes na fonte e no conversor. Como descrito anteriormente, os componentes harmônicos da carga fluem para o conversor, quando o DSTATCOM é operado por referência de tensão e, quando operado por referência de corrente, parte flui para o conversor e parte para a fonte. Este fato se deve a alta impedância imposta pelo conversor quando operado por referência de corrente.



(a) Sem controle

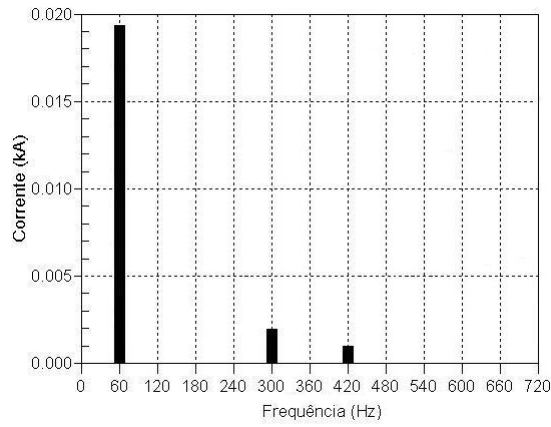


(b) Controle por referência de tensão

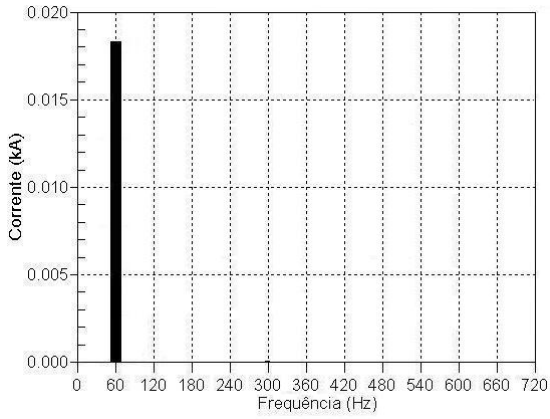


(c) Controle por referência de corrente

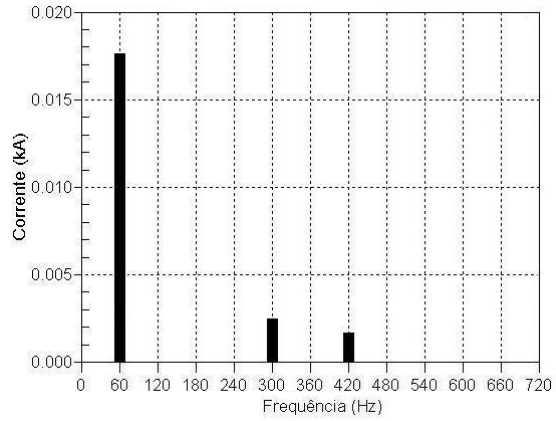
Figura 5.18 – Espectro harmônico de tensão.



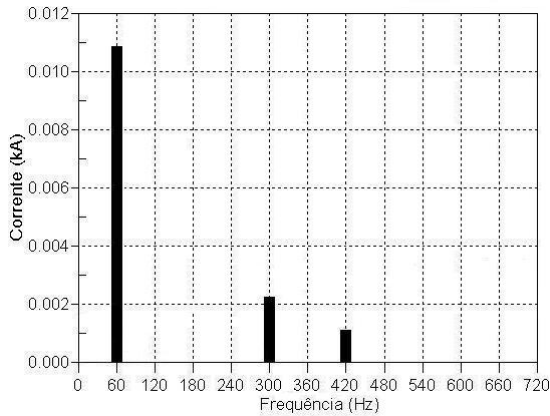
(a) Sem controle



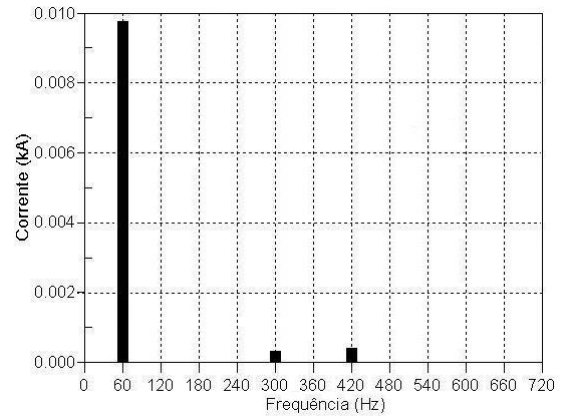
(b) Correntes da fonte com controle por referência de tensão



(c) Correntes da fonte com controle por referência de corrente



(d) Correntes do conversor com controle por referência de tensão



(e) Correntes do conversor com controle por referência de corrente

Figura 5.19 – Espectro harmônico das correntes da fonte e do conversor.

5.6 Conclusões Parciais

Foram apresentados neste capítulo os resultados das simulações realizadas no programa de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC para o DSTATCOM operando como uma fonte de tensão controlada e como uma fonte de corrente controlada.

Os resultados das simulações mostraram o ótimo comportamento dinâmico do DSTATCOM, em ambos os modos de operação, para regulação dos níveis de tensão e correção do fator de potência. Entretanto, quando operado por referência de tensão, o controle se mostrou mais oscilatório, fazendo com que a dinâmica do DSTATCOM fosse mais lenta para garantir a estabilidade do sistema.

Foram apresentados, também, os resultados de simulações para avaliar o comportamento do DSTATCOM frente à injeção de correntes harmônicas na carga.

Neste ponto, encontra-se a grande vantagem do DSTATCOM quando operado por referência de tensão. Neste modo de operação, o DSTATCOM funcionou como um filtro, drenando os componentes harmônicos presentes nas correntes da carga. Mais uma vez, este comportamento foi possível, pois quando operado por referência de tensão, o DSTATCOM funcionou como uma fonte de tensão. Desta forma, quanto menor a impedância deste, quando comparada com a impedância da rede, maior sua capacidade de drenar correntes harmônicas.

Capítulo 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos em bancada das topologias implementadas do DSTATCOM operado como uma fonte de tensão controlada e do DSTATCOM operado como uma fonte de corrente controlada.

Esta etapa tem o objetivo de comprovar os fundamentos teóricos pesquisados na etapa de concepção dos algoritmos, desenvolvidos através de simulações no programa PSCAD/EMTDC.

Ambas as topologias foram montadas no mesmo protótipo, onde a seleção de qual modo de operação irá atuar é feita através do posicionamento dos pontos de medições de corrente necessários a cada modo de operação. A ilustração do protótipo está na Figura 6.1.

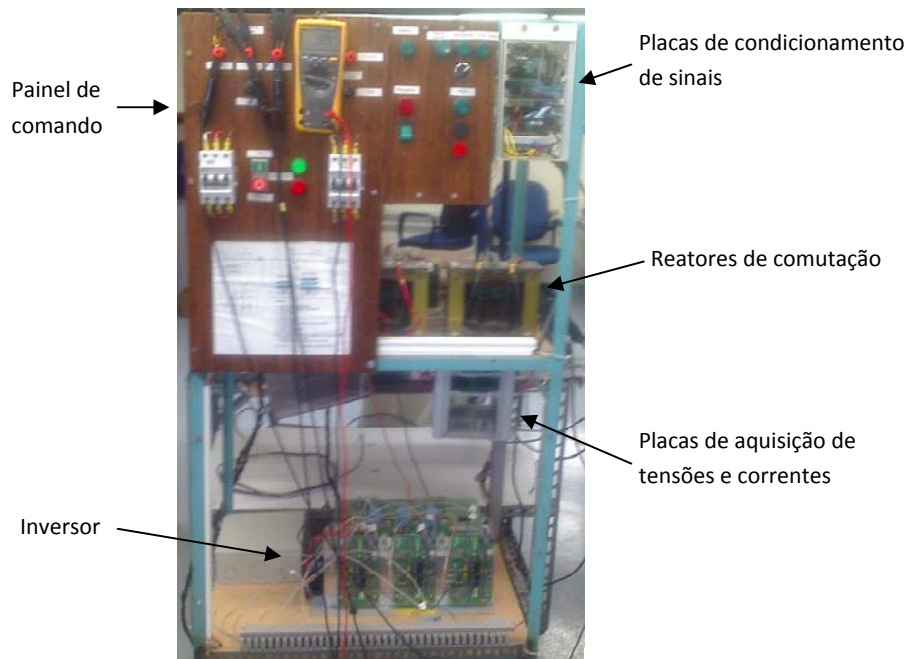


Figura 6.1 – Protótipo do DSTATCOM.

6.1 Descrição do circuito de potência

O protótipo foi montado simulando uma rede de distribuição com reatância de linha, ocorrência de perturbações, como entrada e saídas de cargas, entre outros. As características técnicas do protótipo são mostradas nas Tabela 6.1, Tabela 6.2 e Tabela 6.3.

Parâmetros do Sistema Elétrico		
Tensão Nominal de Linha	V_{fonte}	220V
Tensão base do Sistema	V_{base}	311V
Freqüência do Sistema	f	60Hz
Indutância da Linha	L_{fonte}	2,5mH

Tabela 6.1 – Dados do sistema elétrico.

Parâmetros do Conversor		
Capacitor do elo CC	C_{elo}	2350 μ F
Capacitor do Filtro	C_{filtro}	16 μ F
Indutor de Comutação	L_{com}	1,5mH
Resistor do Filtro	R_{filtro}	3 Ω
Frequência de Chaveamento	f_{chav}	10kHz

Tabela 6.2 – Dados do Conversor.

Parâmetros da Carga		
Indutor da Carga	L_{carga}	12mH
Resistor da Carga	R_{carga}	7,5 Ω

Tabela 6.3 – Dados da carga indutiva.

O sistema foi projetado para uma tensão de operação de 220V em 60Hz. A carga indutiva é composta de um indutor e de uma resistência, gerando um afundamento de tensão de 10% com fator de potência de 0,86 indutivo. O diagrama unifilar da montagem do equipamento pode ser visto na Figura 6.2.

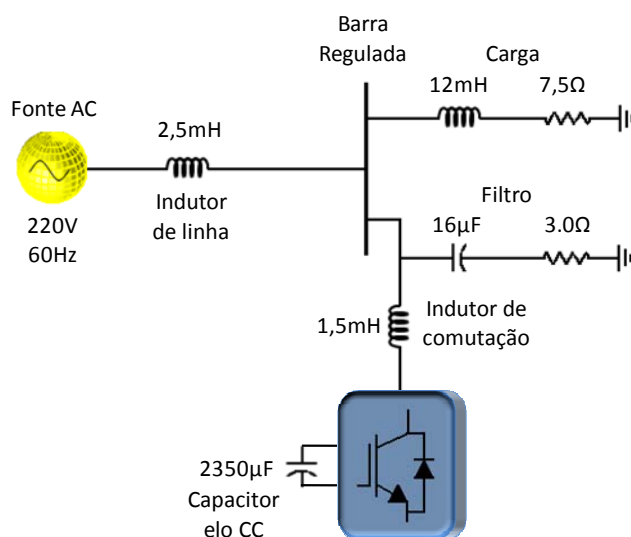


Figura 6.2 – Diagrama do protótipo desenvolvido.

O protótipo implementado de 5kVA foi controlado por um DSP (*Digital Signal Processing*) de ponto fixo da *Freescale*, modelo MC56F8323 e as formas de onda foram obtidas utilizando um osciloscópio da Tektronix, modelo TPS 2014, com o programa de interface com o computador *Open Choice*.

O controle proposto, inicialmente testado no simulador PSCAD/EMTDC para o controle por referência de tensão, foi implementado no DSP e validado em um HIL (*Hardware in the loop*) antes de ser levado para a bancada. Destaca-se que, para o controle por referência de corrente, a validação utilizando o HIL não se fez necessária, uma vez que este controle já havia sido testado e validado em bancada.

O HIL consiste em uma ferramenta, onde todo o software de controle do equipamento é embarcado no DSP utilizado, e o circuito de potência é simulado através de um programa, neste caso o programa PSCAD/EMTDC. Dessa forma, o código desenvolvido é testado, garantindo o correto funcionamento do equipamento, eliminando possíveis falhas quando submetido ao teste de bancada. O HIL, aqui utilizado, foi desenvolvido no LEMT como projeto de graduação [36].

Nos itens a seguir, serão apresentados os resultados obtidos para regulação da tensão do barramento para ambos os modos de operação do DTSTACOM, bem como os resultados obtidos para correção do fator de potência e eliminação de harmônicos.

6.2 Regulação das tensões no barramento

Esta etapa dos experimentos foi realizada em duas fases. Inicialmente, utilizou-se a carga indutiva descrita a uma tensão de linha de $220V_{\text{rms}}$, para simular um afundamento das tensões no PCC. Posteriormente, foram realizados experimentos com tensões de linha reduzidas, $110V_{\text{rms}}$, para validar o código desenvolvido, onde através da utilização de um variac, foram aplicadas subtensões e sobretensões.

6.2.1 Tensão de linha 220V

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos para os dois modos de operação estudados.

Primeiramente, são apresentadas as tensões do barramento sem o DSTATCOM. Na Figura 6.3(a), observa-se a tensão fase-neutro do barramento, onde em regime e sem a presença da carga indutiva, a tensão da barra tem seu valor igual a $127V_{rms}$ ($179V_{pico}$). No instante em que a carga é conectada, observa-se que as tensões do barramento são reduzidas para $115V_{rms}$ ($162V_{pico}$), caracterizando um afundamento na ordem de 10%. As Figura 6.3 (b) e (c) apenas apresentam as tensões da fase “a” sem a presença da carga e com a presença da carga, respectivamente.

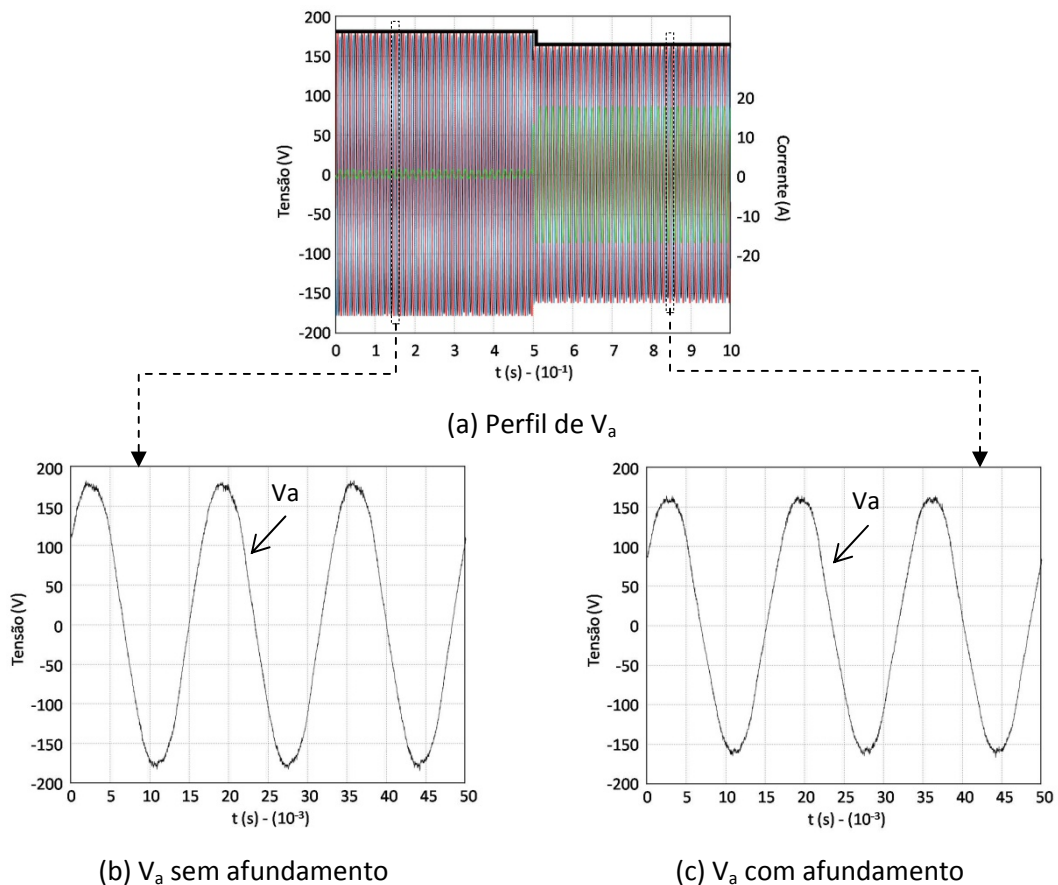
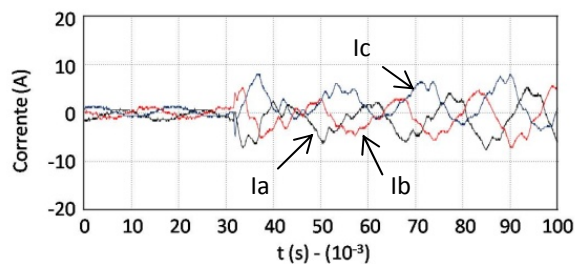


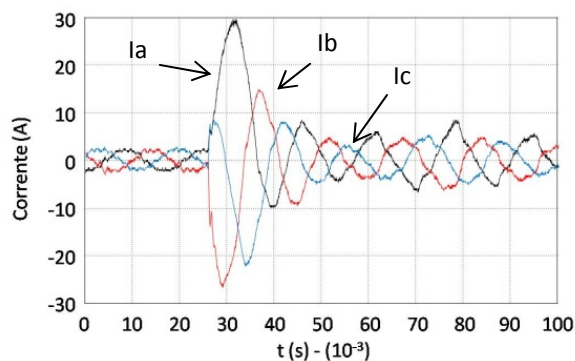
Figura 6.3 – Tensões do barramento sem o DSTATCOM.

Em seguida, são apresentados os transitórios de partida do DSTATCOM. Mais uma vez, o DSTATCOM foi conectado ao sistema, sem carga, apenas para regulação da tensão do capacitor do elo cc.

Assim como nas simulações, foi introduzido, no controle da tensão do capacitor cc, um referencial crescente em rampa para diminuir o sobre-sinal na corrente de carregamento do capacitor. Observa-se, na Figura 6.4, que quando o DSTATCOM é controlado por referência de tensão, as correntes apresentam um pico de quase 30A, ao passo, que quando controlado por referência de corrente, não passam de 10A. Ou seja, mesmo com a introdução deste referencial em rampa, as correntes apresentaram valores elevados quando controlado por tensão. Isto se deve ao fato de que, neste modo de operação, não se tem controle direto sobre a corrente.



(a) Controle por referência de corrente

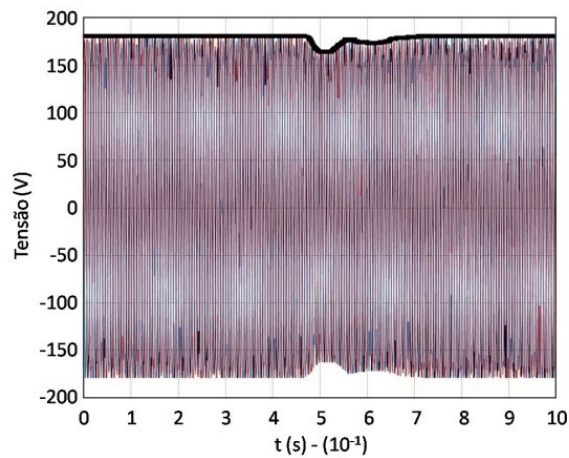


(b) Controle por referência de tensão

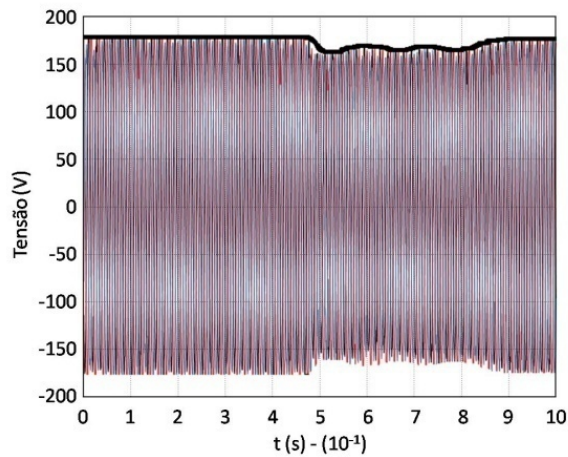
Figura 6.4 – Transitório de partida do DSTATCOM.

Com a tensão do capacitor cc regulada, a carga indutiva foi inserida ao sistema, provocando o afundamento das tensões. As Figura 6.5(a) e (b) mostram as tensões do

sistema, reguladas em $179,6V_{pico}$, com o DSTATCOM operando como fonte de corrente controlada e como fonte de tensão controlada, respectivamente.



(a) Controle por referência de corrente



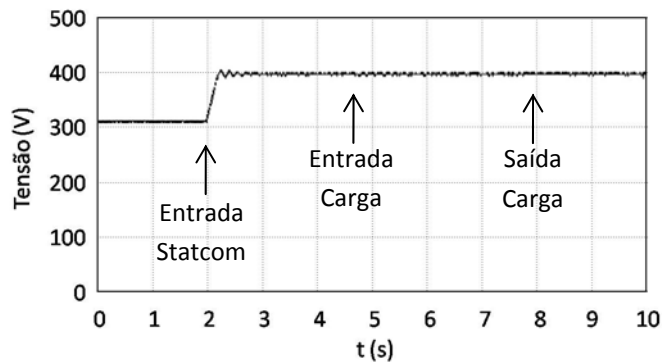
(d) Controle por referência de tensão

Figura 6.5 – Tensões do barramento com compensação para os dois modos de operação do DSTATCOM.

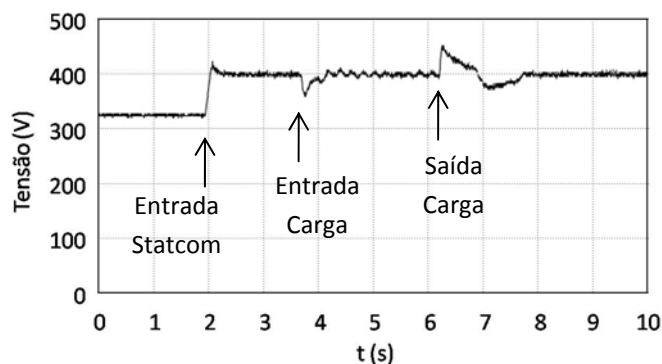
Assim como na etapa de simulações, observa-se, nessas figuras, que a dinâmica do DSTATCOM, quando operado por fonte de tensão, é mais lenta. Visto que o controle é mais oscilante, esta característica é, mais uma vez, decorrente da malha de controle desenvolvida, onde, para manter a estabilidade do sistema, os controladores implementados tiveram seus ganhos moderados, reduzindo sua resposta dinâmica. A regulação das tensões da barra ocorreu em $170ms$ e $370ms$ para o controle por corrente e para o controle por tensão, respectivamente.

Em ambos os modos de operação, para realizar a compensação de subtensão provocada pela carga indutiva, o conversor injeta uma corrente capacitiva adiantada da tensão.

A Figura 6.6 mostra a tensão do capacitor cc, regulada em 400V, para os dois modos de operação. Observa-se que, assim como nas simulações, a tensão V_{dc} tem um comportamento oscilatório, quando o DSTATCOM é operado por referência de tensão, chegando a tensão do capacitor a atingir 355V no instante de entrada da carga e 460V no instante de saída da carga.



(a) Controle por referência de corrente



(b) Controle por referência de tensão

Figura 6.6 - Tensão V_{dc}

Desta forma, os controladores PI, implementados para regulação da tensão do capacitor do elo cc, apresentam uma resposta lenta frente a perturbações, para

manter a estabilidade do sistema. E como consequência, por estarem as tensões do DSTATCOM relacionadas à tensão V_{dc} do capacitor, os transitórios, aqui presentes, afetam a tensão do DSTATCOM.

6.2.2 Tensão de linha 110V

Como descrito anteriormente, esta é a segunda etapa dos experimentos realizados para regulação das tensões no PCC. O objetivo desta fase é comprovar a eficácia dos controles desenvolvidos quando submetidos a uma sobretensão.

Através da utilização de um variac, a tensão de linha de atuação do DSTATCOM foi reduzida para $110V_{rms}$, ou seja, $89,8V_{pico}$ de tensão de fase e a tensão do capacitor do elo cc reduzida para 200V.

A Figura 6.7 apresenta as tensões do sistema sem compensação. O sistema foi submetido a uma sobretensão na ordem de 10%, elevando as tensões para $99V_{pico}$.

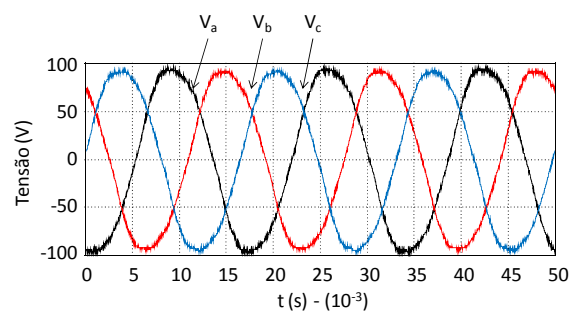
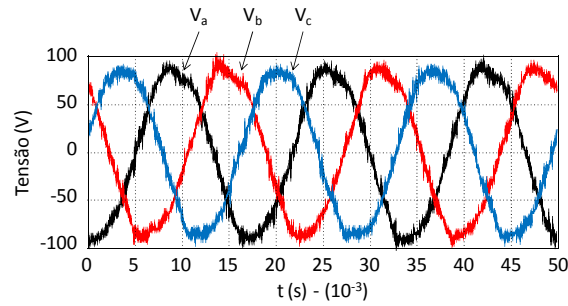
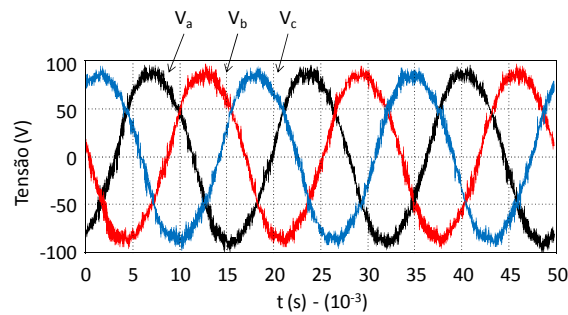


Figura 6.7 – Tensões do sistema sem compensação.

As Figura 6.8(a) e (b) mostram as tensões do sistema, em regime, com compensação por referência de corrente e tensão, respectivamente. Assim como para afundamentos de tensão, o DSTATCOM apresenta resultados satisfatórios para os dois modos de operação, regulando as tensões do barramento em $89,8V_{pico}$, fornecendo ao sistema uma corrente indutiva.



(b) Com compensação por referência de corrente



(c) Com compensação por referência de tensão

Figura 6.8 – Tensões do barramento para sobretensão de 10%.

6.3 Correção do fator de potência

Neste item, serão apresentados os resultados obtidos através dos experimentos realizados com o DSTATCOM para compensação reativa, efetuando correção do fator de potência em ambos os modos estudados, operação como fonte de corrente controlada e como fonte de tensão controlada.

Inicialmente são mostradas na Figura 6.9 a tensão V_a e a corrente I_a da fonte. Pode-se observar, a existência de uma defasagem angular $\delta = 30,36^\circ$ entre as tensões do barramento e as correntes da fonte, caracterizando um fator de potência de 0,86 indutivo.

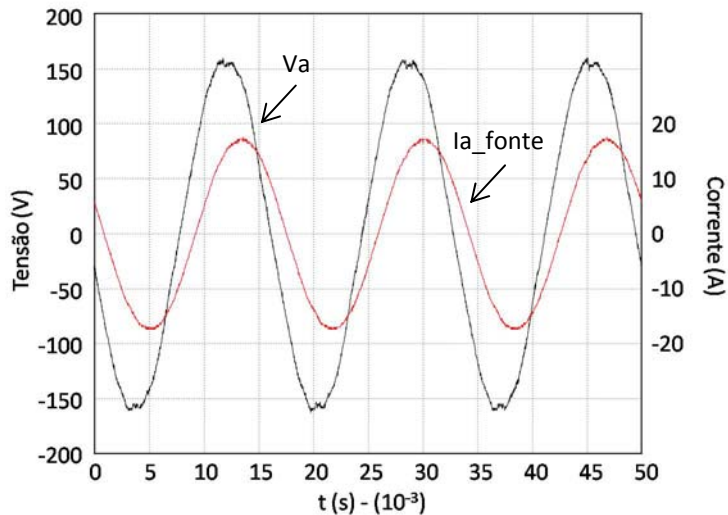
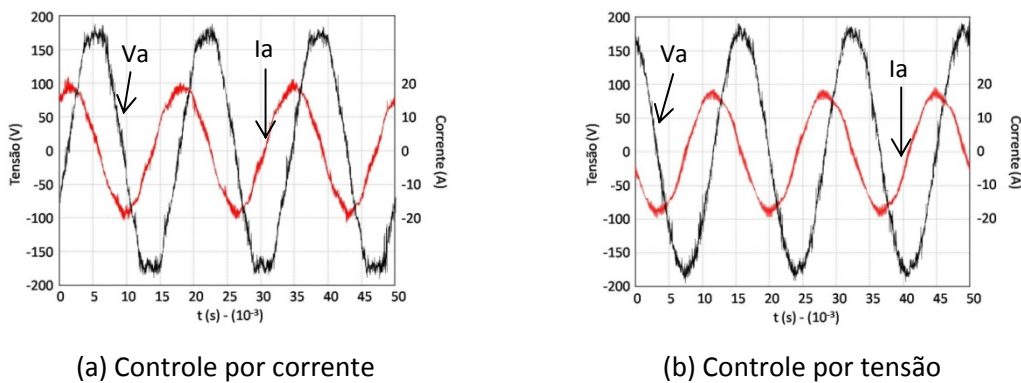


Figura 6.9 – Tensão e corrente da fase “a”.

Desta forma, o conversor, injeta uma corrente capacitiva para anular a corrente indutiva da carga. A Figura 6.10 apresenta este comportamento, mostrando a tensão V_a e a corrente I_a do conversor.

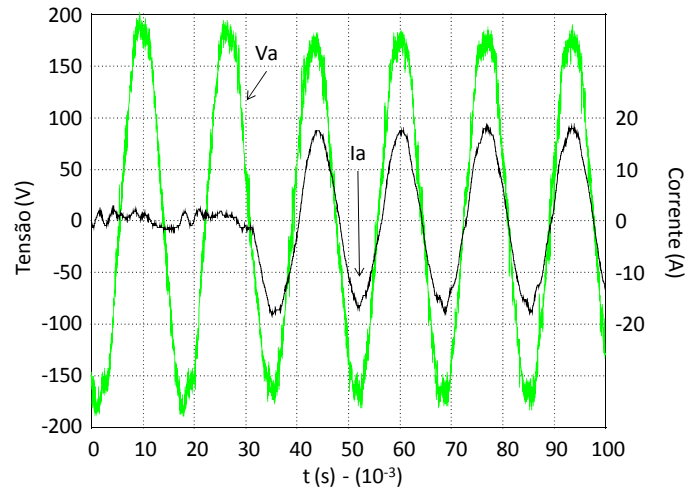


(a) Controle por corrente

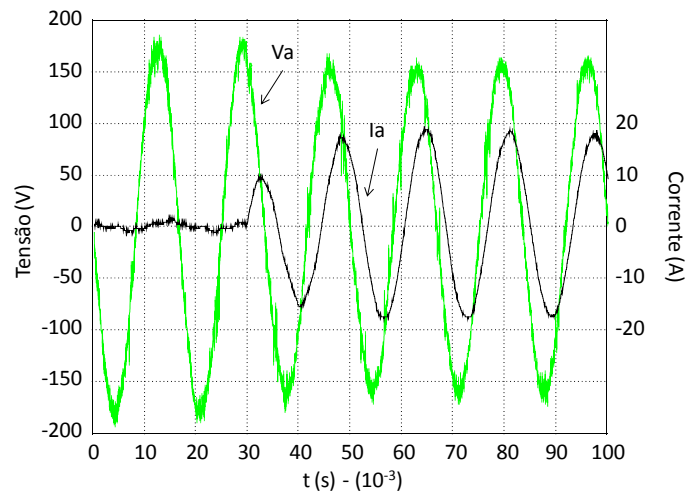
(b) Controle por tensão

Figura 6.10 – Tensão V_a regulada e corrente I_a do conversor, (a) controle por corrente, (b) controle por tensão.

Observa-se, na Figura 6.11, que, quando controlado por referência de corrente, o DSTATCOM apresenta uma resposta dinâmica, mais rápida, eliminando a defasagem entre tensões e correntes em 2 ciclos. E quando controlado por referência de tensão, esta eliminação ocorre em mais de 5 ciclos. Mais uma vez, a dinâmica do controle de tensão é comprometida por ser o controle mais oscilante. Logo, os controladores são mais lentos para manter a estabilidade do sistema.



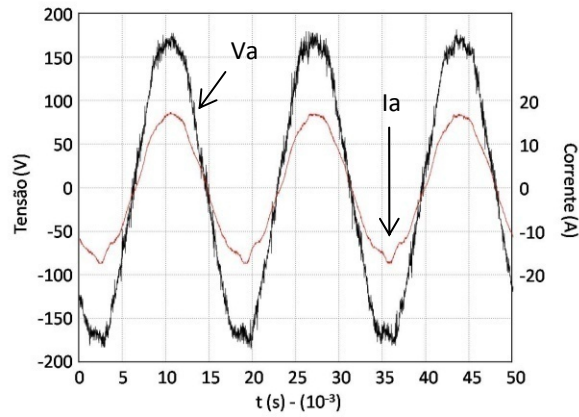
(a) Controle por referência de corrente



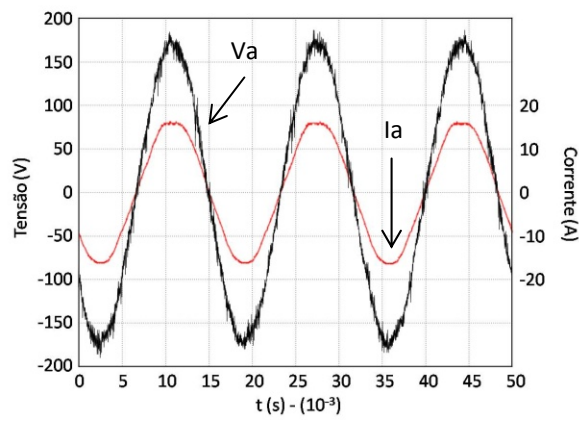
(b) Controle por referência de tensão

Figura 6.11 – Transitório de entrada da carga.

Já em regime, como visto na Figura 6.12, o desempenho dinâmico dos dois controles é satisfatório, alcançando o objetivo de eliminação da defasagem, apresentando, desta forma, um fator de potência unitário.



(a) Controle por referência de corrente



(b) Controle por referência de tensão

Figura 6.12 – Tensão e corrente da fase “a”.

6.4 Eliminação de harmônicos

Nesta etapa, o objetivo é testar o comportamento dos dois modos de operação do DSTATCOM, frente à inserção de uma carga não linear. Para tanto, foi conectado ao sistema, como fonte de harmônicos, uma ponte a diodos, conforme pode ser observado no diagrama da Figura 6.13. O protótipo foi testado a uma tensão de linha de $155V_{pico}$.

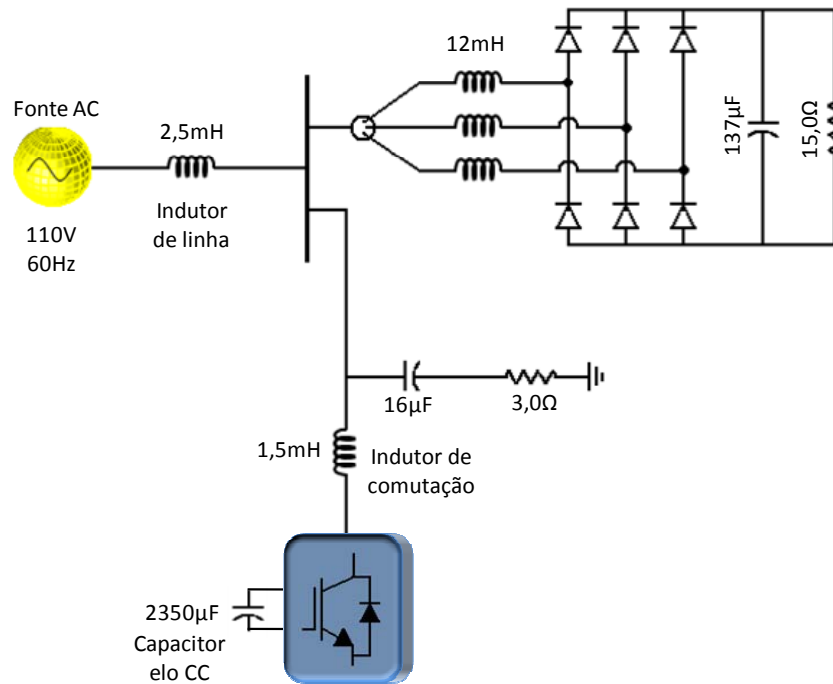


Figura 6.13 – Diagrama do protótipo com carga harmônica.

Inicialmente são mostradas nas Figura 6.14 e Figura 6.15, as correntes da fonte e as tensões de linha da barra sem atuação do DSTATCOM, respectivamente. As correntes da fonte apresentam um THD de 7,97% e um valor de pico de 3,6A. E as tensões da barra apresentam um THD de 7,58% e um valor de pico de $138V_{pico}$.

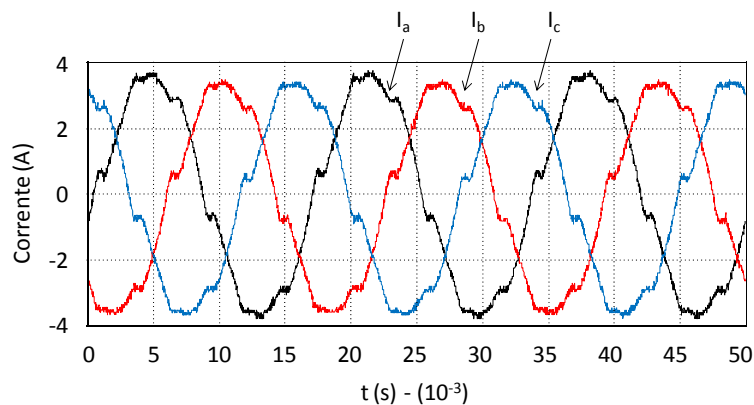


Figura 6.14 – Correntes da fonte sem DSTATCOM.

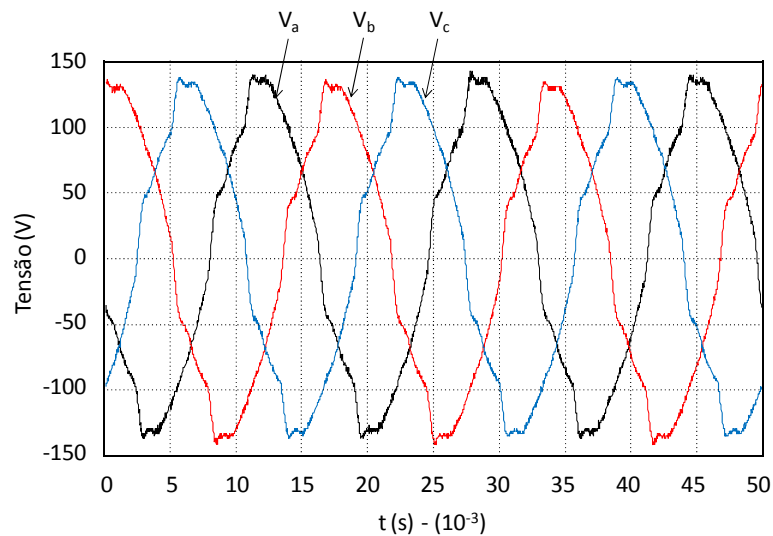
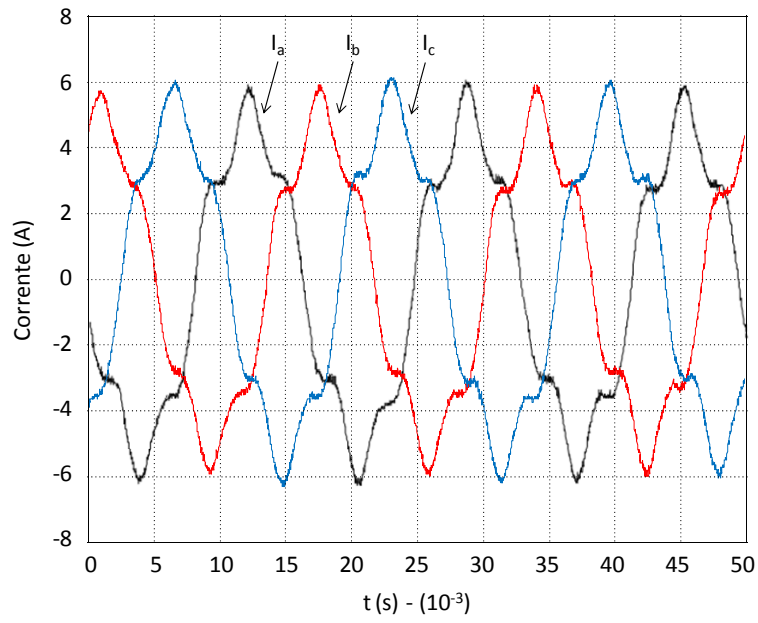


Figura 6.15 – Tensões de linha do barramento sem DSTATCOM.

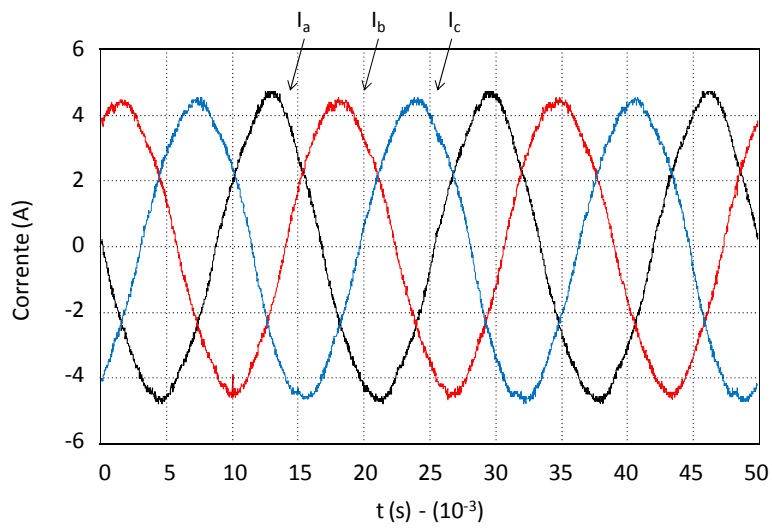
Com a atuação do DSTATCOM, assim como nas simulações, o controle por referência de tensão drenou as componentes harmônicas provenientes da carga. As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos nos dois modos de operação.

As Figura 6.16 (a) e (b) mostram as correntes da fonte para o DSTATCOM operando como fonte de corrente controlada e como fonte de tensão controlada, respectivamente. As correntes apresentam um THD de 10,5% e uma amplitude de pico de 6A quando controlada por corrente e um THD de 2,1% e amplitude de pico de 4,5A quando controlada por tensão.

Já as Figura 6.17 (a) e (b) mostram as correntes do conversor também para o DSTATCOM operando como fonte de corrente controlada e como fonte de tensão controlada, respectivamente. As correntes apresentam um THD de 9,2% e uma amplitude de pico de 15A quando controlada por corrente e um THD de 8,7% e amplitude de pico de 10A quando controlada por tensão.

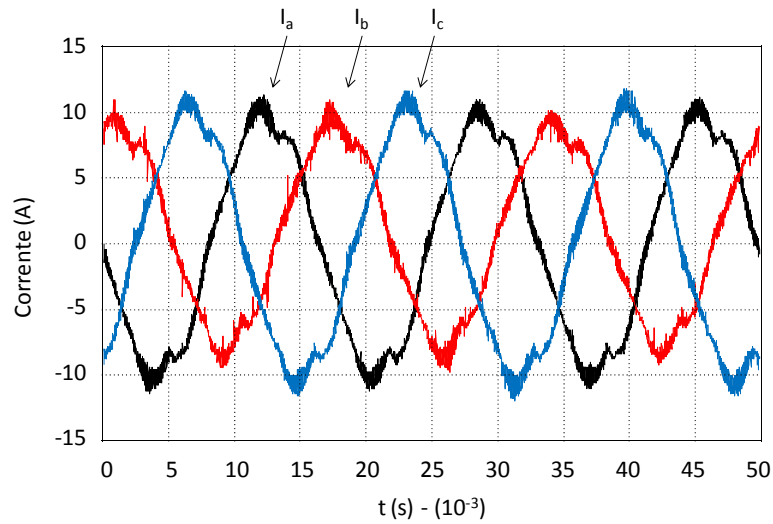


(a) Controle por referência de corrente

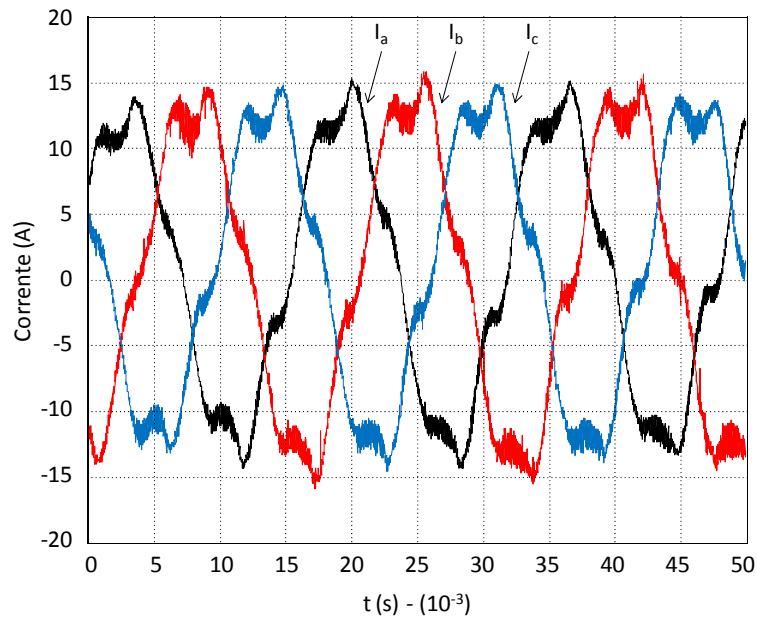


(b) Controle por referência de tensão

Figura 6.16 – Correntes da fonte com DSTATCOM.



(a) Controle por referência de corrente

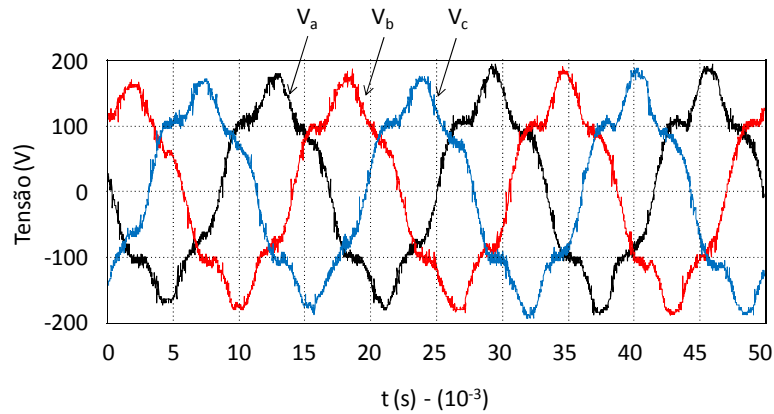


(b) Controle por referência de tensão

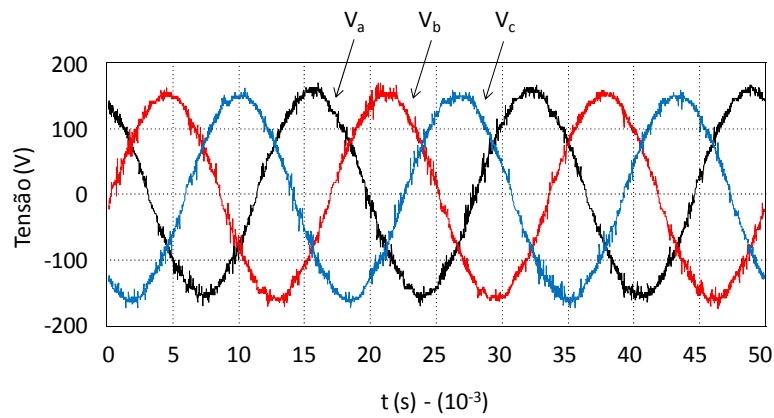
Figura 6.17 – Correntes do conversor.

Desta forma, comprovando os resultados obtidos nas simulações, quando controlado por tensão, o DSTATCOM drena as correntes harmônicas. Enquanto controlado por corrente, os harmônicos foram amplificados, devido a efeitos ressonantes.

Destaca-se que esta etapa foi realizada com o DSTATCOM no modo de compensação para regulação das tensões na barra e, em ambos os modos de operação, as tensões de linha foram reguladas em $155V_{\text{pico}}$. Entretanto, observa-se, na Figura 6.18, que quando as tensões são reguladas por referência de corrente apresentam um THD de 9,31%, e quando estas são reguladas por referência de tensão apresentam um THD de 2,5%.



(a) Controle por referência de corrente



(b) Controle por referência de tensão

Figura 6.18 – Tensões do barramento com DSTATCOM.

Ambos os modos se mostraram eficazes na regulação das tensões da barra se visto apenas o valor de pico da tensão. Entretanto, quanto à eliminação de harmônicos, o controle por corrente se mostrou ineficiente, enquanto o controle por tensão se mostrou eficaz.

Isto se deve ao fato de que, quando controlado por tensão, o DSTATCOM é visto pelo sistema como uma fonte de tensão, impondo baixa impedância para as correntes harmônicas fluírem por ele. Deste modo, quanto menor for a indutância de comutação do conversor, menor será sua reatância, propiciando que este atue como um filtro para essas correntes harmônicas.

6.5 Conclusões Parciais

Foram apresentados neste capítulo os resultados experimentais realizados no protótipo laboratorial montado para o DSTATCOM operando como uma fonte de corrente controlada e como uma fonte de tensão controlada.

Observou-se, nos resultados experimentais obtidos, que assim como nas simulações, os dois modos de operação se mostraram eficazes na regulação das tensões do barramento e na correção do fator de potência. Novamente, o controle por referência de tensão mostrou um comportamento oscilatório, quando da ocorrência de distúrbios.

Com a inserção de uma carga não linear, gerando componentes harmônicos na corrente e na tensão, observou-se que, com o controle por referência de tensão, os componentes harmônicos foram absorvidos pelo conversor, e com o controle por referência de corrente, além de fluírem para a fonte, os componentes harmônicos foram amplificados por efeitos ressonantes.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os sistemas elétricos de distribuição estão sujeitos a uma ampla variedade de distúrbios, entre eles: afundamentos de tensão, provocado pela entrada de grandes cargas industriais, ou uma grande concentração de cargas em uma barra; e elevação de tensão, ocasionada nos períodos de carga leve. Estes problemas podem gerar onerosas perdas aos consumidores, como queima de equipamentos e perda de produção. Outro problema também encontrado em sistemas de distribuição e que pode gerar onerosos prejuízos aos consumidores pela cobrança de multas por parte das concessionárias é a ocorrência de fator de potência inferior a 0,92.

Existem, vários dispositivos que podem atuar nos sistemas elétricos, para solucionar estes problemas, ou pelo menos minimizar seus efeitos. Este documento teve seu foco voltado para o estudo do DSTATCOM. Este equipamento tem a funcionalidade de regular os níveis de tensão no ponto de conexão ou corrigir o fator de potência, através do suporte de potência reativa. Este equipamento apresenta como vantagens, resposta rápida, sintonia contínua e em tempo real, confiabilidade e ampla área de atuação, podendo suprir tanto potência reativa indutiva quanto capacitiva.

Este trabalho apresentou a análise do DSTATCOM, frente a dois modos de operação. Operação como fonte de corrente controlada e como fonte de tensão controlada.

A grande contribuição deste trabalho está sobre a operação do DSTATCOM como fonte de corrente controlada, realizada inicialmente em simulações computacionais e validadas por meio de testes laboratoriais, onde através do controle sobre a defasagem e a amplitude da tensão do conversor, controla-se o fluxo de potência ativa e reativa respectivamente.

Em ambos os modos, o controle de potência reativa é realizado por meio de um conversor fonte de tensão (VSC). Entretanto, na operação como fonte de corrente controlada, o DSTATCOM é visto pelo sistema como uma fonte de corrente, onde, através do cálculo das potências ativa e reativa instantâneas, calcula-se diretamente a corrente de compensação. Já na operação como fonte de tensão controlada, o DSTATCOM é visto pelo sistema como uma fonte de tensão, onde através do controle de amplitude e fase das tensões do conversor, controla-se indiretamente a corrente de compensação.

A partir dos resultados de simulação obtidos para os dois modos de operação estudados, verificou-se que ambos os modos, atingiram seus objetivos, regulando as tensões da barra ou corrigindo o fator de potência.

O modo de operação como fonte de corrente, apresentou a vantagem de ser mais robusto nos períodos transitórios. Desta forma, a dinâmica de seu controle é mais rápida que no modo de operação como fonte de tensão, onde os ganhos dos controladores precisaram ser reduzidos para manter a estabilidade do sistema.

Por sua vez, quando o sistema foi submetido à presença de harmônicos nas correntes da carga, o controle por referência de tensão, se apresentou muito superior. Verificou-se que as componentes harmônicas das correntes da carga, fluíram para o conversor, ao invés de fluir para a rede de distribuição, como ocorreu no controle por referência de corrente. Isto se deve ao fato de na operação por referência de tensão, o DSTATCOM ser visto pelo sistema como uma fonte de tensão, representando um caminho de menor impedância para as correntes. Desta forma, quanto menor o valor da indutância de comutação do conversor, maior será sua capacidade de filtragem harmônica.

Outra vantagem, porém sem muita expressão, é a utilização de um número menor de medições e circuitos analógicos de condicionamento de sinais, visto que no controle por tensão, não são necessárias as medições de corrente do conversor. Esta pequena vantagem desapareceria, caso fosse necessária a implementação de uma rotina de proteção “instantânea” do inversor contra sobrecorrentes.

Com relação aos resultados experimentais obtidos com o DSTATCOM, implementado em bancada laboratorial, no Laboratório de Eletrônica de Potência – LEMT, os dois modos de operação alcançaram os objetivos. Foram comprovadas suas eficiências na regulação dos níveis de tensão do ponto de conexão comum (barra controlada), tanto para ocorrência de subtensões e sobretensões, e correção do fator de potência na presença de uma carga indutiva. Além disso, foi comprovada a eficácia da operação como fonte de tensão, na filtragem de correntes harmônicas. Desta forma, os resultados apresentados pelos protótipos validam as estratégias de controle implementadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, os seguintes itens são indicados:

- Implementação dos controles no referencial síncrono dq0;
- Otimização dos algoritmos de controle, com ajuste ótimo dos controladores;
- Implementação de controladores PR (Proporcional-Ressonantes) no referencial estático $\alpha\beta 0$;

Referências Bibliográficas

- [1] L. Gyugyi, "Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real Time Control AC Transmission Lines" Emerging Practices in Technology, IEEE-Transmission Lines, IEEE Standards Press, Piscatway, USA, 1993.
- [2] L. Gyugyi, "Solid-State Control of Electric Power in AC Transmission Systems", E.E.C.P.S., Invited Paper, No. T-IP.4, Capri, Italy, May 1989.
- [3] X. Fu, J. Wang, Y. Ji, "A Novel Control Method for D-STATCOM under Unbalanced Conditions", IEEE International Conference on Power System Technology, 2006.
- [4] Zhengping Xi, Babak Parkhideh, Subhashish Bhattacharya, "Improving D-STATCOM System Performance with Integrated STATCOM and Supercapacitor Energy Storage System", IEEE 2008.
- [5] B. Blazic, I. Papic, "Imrpoved D-STATCOM Control for OperationWith Unbalanced Currents and Voltages", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, No. 1, January 2006.
- [6] A. Jain, K. Joshi, A Behal, "Voltage Regulation with STATCOMS-Modeling, Control and Results", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, No. 2, April 2006.
- [7] Hingorani, N.(1993); "Flexible AC Transmission". IEEE Spectrum, April, pp. 40-45.
- [8] Hingorani, N. G. (1988), "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power lectronics in Future Power Systems", Proceedings of IEEE, Special Issue on Power Electronics, April.
- [9] Hingorani, N. G., Gyugyi, L., F Understanding FACTS: Concepts and Technology of lexible AC Transmission Systems, New York, IEEE Press, 2000.

- [10] Hingorani, N. G., "Introducing Custom Power", IEEE Spectrum, pp. 41-48, June 1995.
- [11] STEVENSON, W. D. Jr., Elementos de Análise de Sistemas de Potência, McGraw-Hill, 2a Ed.em Português (4a Ed. Americana), São Paulo–SP, 1986.
- [12] Phraba Kundur. Power System Stability and Control. First Edition. McGraw Hill Professional. 1993.
- [13] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press - Jon Wiley & Sons, 2000.
- [14] Y. Sumi, Y. Harumoto, T. Hasegawa, M. Yano, K. Ikeda, T. Matura, "New Static var Control Using Force-Commutated Inverters", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No. 9, pp. 4216-4224, September, 1981.
- [15] C.W. Edwards et al., "Advanced Static Var Generator Employing GTO Thyristors", IEEE PES Winter Power Meeting, Paper No. 38WM109-1, 1988.
- [16] S. Mori, K. Matsuno, M. Takeda, M. Seto, "Development of a large var generator using self-commutated inverters for improving power system stability" IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, No. 1, Feb. 1993, pp. 371- 377.
- [17] C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemark, L. Gyugyi, T.W. Cease and A. Edris, "Development of a ± 100 Mvar Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July, 1995.
- [18] C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T.W. Case, A. Edris, "Operation of ± 100 MVAR TVA STATCON", PE-509-PWRD-0-01-1997.
- [19] L. Gyugyi, B. Mehraban, "Development and Application of Self-Commutated Converters for Power Transmission Control", IEEE PES Winter Meeting, Singapore, January 2000.
- [20] G.F. Reed, M. Takeda, F. Ojima, "Application of a 5 MVA, 4.16 kV D-STATCOM system for voltage flicker compensation at Seattle Iron & Metals" ", IEEE PES Summer Meeting, Seattle, July 2000.

- [21] J. Hill, "A practical example of the use of distribution static compensator (D-STATCOM) to reduce voltage fluctuations," Power Electronics for Renewable Energy (Digest No: 1997/170), IEE Colloquium on, p. 7, 1997.
- [22] E.H. Watanabe, M. Aredes, "Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações — Filtros Ativos e FACTS".
- [23] M. Aredes, "Active Power Line Conditioners", Ph.D. Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, 1996.
- [24] H. Akagi ; WATANABE, E. H. ; AREDES, M. . Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. 1. ed. Nova Iorque: IEEE Press / Wiley Interscience, 2007. v. 1. 400 p.
- [25] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", IEEE Trans. Industry Applications, vol. IA-20, May-Jun. 1984.
- [26] E. H. Watanabe, R. M. Stephan, M. Aredes, "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, No. 2, Apr. 1993, pp. 697-703.
- [27] M. Aredes, E. H. Watanabe, "New Control Algorithms for Series and Shunt Three- Phase Four-Wire Active Power Filters," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, No. 3, July. 1995, pp. 1649-1656.
- [28] Sasso, E. M.; Sotelo, G. G.; Ferreira, A. A.; Watanabe, E. H.; Aredes M.; Barbosa, P. G.; "Investigação dos Modelos de Circuitos de Sincronismo Trifásicos Baseados na Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas (p-PLL e q-PLL)"; CBA 2002, 2002, Natal (RN). Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática.
- [29] D. C. Junior., L. Rolim, and M. Aredes, "Analysis and software implementation of a robust synchronizing circuit PLL circuit," ISIE 2003 - International Symposium on Industrial Electronics, vol. 1, pp. 292–297, 2003.

- [30] M. Akamatsu, M. Tsukada, D. Itoh, "A Novel PLL and Frequency Detecting Method Suited for the Abnormal Voltages under Fault Conditions in the Power System", *Trans. IEE, Japan*, Vol. 118-B, No. 9, 1998.
- [31] O. G. S. Castellões, M. Aredes, "A Series Compensator for Voltage Sags", *Proceedings of the 6th Brazilian Power Electronics Conference*, pp.372-377, November 2001.
- [32] Edith Clarke, *Circuit Analysis of A-C Power Systems*, 2 vols. General Electric Co., Schenectady, N.Y., 1950.
- [33] Gyugyi, L. (1994). "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources," *IEEE Trans. Power Delivery*, 9(2): 904-911.
- [34] Ortiz, A. J.; "Contribuições ao controle do STATCOM", *Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ*, 2007.
- [35] Cavaliere, C.A.C.; "Análise do STATCOM operando em sistemas desbalanceados", *Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ*, 2001.
- [36] França, B. V.; "Hardware-in-the-loop para desenvolvimento de software embarcado em DSPs utilizando ambiente PSCAD/EMTDC.". *Projeto de fim de curso, UFRJ*, 2009.
- [37] V. Blasko and V. Kaura, "A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 33, No. 2, March/April 1997.
- [38] N. Mohan, T. Undeland, and W. R. P., *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. John Wiley & Sons, Inc., 2 ed, 1995.
- [39] Lopes, F. C., "Análise de desempenho de STATCOM quasi 24 pulsos," *Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ*, 2006.
- [40] X.-P. Zhang, E.Handschin,. M. Yao, "Multi-control Functional Static Synchronous Compensator (STATCOM) in Power System Steady-state Operations", *Electric Power Systems Research*, vol. 72, no. 3, pp. 269-278, December 2004.
- [41] P. Anderson, *Analysis of faulted power systems*. Iowa State University Press Ames, 1973.

- [42] A. J. Ortiz, E. L. Emmerik, M. Aredes, L. G. B. Rolim, "An Adaptive Resonant Controller Applied to the Statcom", IX COBEP, 2007, Blumenau/SC. Anais do IX Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2007. v. 9. p. 954-959.
- [43] K. Ogata, "Engenharia de Controle Moderno", Ed. Prentice Hall do Brasil, 1982.
- [44] A. Monticelli, "Fluxo de carga em redes de energia elétrica", Ed. Edgard Blücher LTDA, 1983.