

JOÃO RAPHAEL SOUZA MARTINS

**CONTROLE REPETITIVO APLICADO A COMPENSADORES SÉRIE PARA
CORREÇÃO DE AFUNDAMENTOS E DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO
DA REDE ELÉTRICA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Darlan Alexandria Fernandes

JOÃO PESSOA

2016

JOÃO RAPHAEL SOUZA MARTINS

**CONTROLE REPETITIVO APLICADO A COMPENSADORES SÉRIE PARA
CORREÇÃO DE AFUNDAMENTOS E DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO
DA REDE ELÉTRICA.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Darlan Alexandria Fernandes

JOÃO PESSOA

2016

M386c Martins, João Raphael Souza.
 Controle repetitivo aplicado a compensadores série para
 correção de afundamentos e distorções harmônicas de tensão
 da rede elétrica / João Raphael Souza Martins.- João Pessoa,
 2016.
 88f. : il.
 Orientador: Darlan Alexandria Fernandes
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR
 1. Engenharia elétrica. 2. Controle repetitivo.
 3. Afundamentos de tensão. 4. Harmônicos. 5. Compensador
 Série. 6. Qualidade de energia.

UFPB/BC

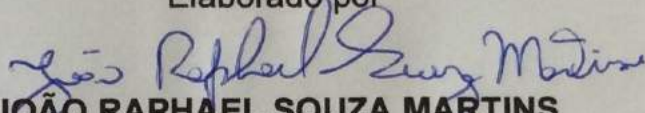
CDU: 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

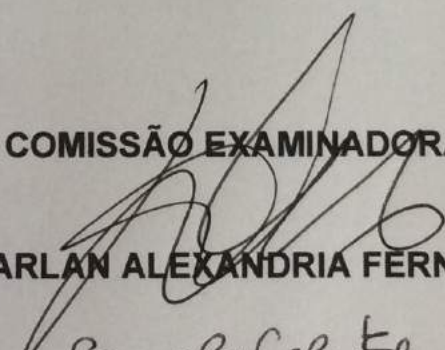
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Exame de Dissertação

**CONTROLE REPETITIVO APLICADO A COMPENSADORES SÉRIE PARA
CORREÇÃO DE AFUNDAMENTOS E DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO
DA REDE ELÉTRICA.**

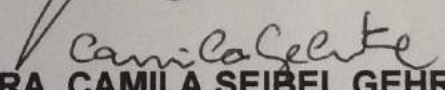
Elaborado por

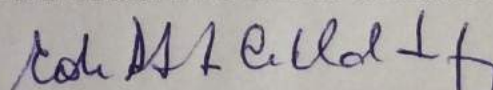

JOÃO RAPHAEL SOUZA MARTINS

Como requisito para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.


COMISSÃO EXAMINADORA

DR. DARLAN ALEXANDRIA FERNANDES


DRA. CAMILA SEIBEL GEHRKE


DR. EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA

DR. FABIANO FRAGOSO COSTA

João Pessoa/PB, 18 de Fevereiro de 2016.

Aos meus pais...

O que é bonito?
É o que persegue o infinito;
Mas eu não sou
Eu não sou, não...
Eu gosto é do inacabado,
O imperfeito, o estragado, o que dançou
O que dançou...
Eu quero mais erosão
Menos granito.
Namorar o zero e o não,
Escrever tudo o que desprezo
E desprezar tudo o que acredito.
Eu não quero a gravação, não,
Eu quero o grito.
Que a gente vai, a gente vai
E fica a obra,
Mas eu persigo o que falta
Não o que sobra.
Eu quero tudo que dá e passa.
Quero tudo que se despe,
Se despede, e despedaça.
O que é bonito...

Lenine e Bráulio Tavares

Agradecimentos

- Ao professor Darlan Alexandria Fernandes pela orientação, apoio e amizade.
- Aos meus colaboradores, aos técnicos e à seção administrativa.
- À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.
- Ao CNPq, que por intermédio do Projeto com processo 482736/2011-9, forneceu os meios para construção do protótipo laboratorial.
- Aos meus amigos que me incentivaram a realizar este trabalho.
- Aos meus pais, Maria José e Jonatas, pelo apoio e confiança.
- À minha irmã, Rayssa, pela confiança e suporte.
- À minha amada esposa, Thayana Nara.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivos do Trabalho	17
2	Problemas de Qualidade de Energia	19
2.1	Transitórios	19
2.1.1	Transitórios Impulsivos	20
2.1.2	Transitórios Oscilatórios	21
2.2	Variações momentâneas de tensão	21
2.2.1	Afundamento momentâneo de tensão	22
2.2.2	Elevação momentânea de tensão	23
2.2.3	Interrupção momentânea de tensão	23
2.3	Variações temporárias de tensão	24
2.3.1	Interrupção temporária de tensão	24
2.3.2	Afundamento temporário de tensão	25
2.3.3	Elevação temporário de tensão	25
2.4	Distorção Harmônica	26
2.5	Pico de Tensão	26
2.6	Flutuação da tensão	27
2.7	Tensão Desbalanceada	28

2.8	Conclusão	29
3	Compensador Série	30
3.1	Estrutura de um compensador série	32
3.2	Modos de Operação	32
3.3	Limitações do Compensador	35
3.4	Principais Controladores	36
3.5	Controle Repetitivo	37
3.6	Conclusão	42
4	Modelagem do Sistema de Compensação em Série e Projeto do Con- trolador Repetitivo	44
4.1	Estratégias de Injeção de Tensão na Rede	52
4.2	Estimação por Mínimos Quadrados Recursivo	58
4.3	Conclusão	60
5	Plataformas de Simulação e Experimental	61
5.1	Transformador	63
5.2	Retificador	64
5.3	Filtro LC	64
5.4	Fontes de alimentação	65
5.5	Sensor de tensão	66
5.6	Controlador Digital de Sinais	66
5.7	Inversor de Tensão	69
5.8	Conclusão	70
6	Resultados	71
6.1	Simulação	71
6.1.1	Afundamentos	71

6.1.2	Afundamentos e distorções harmônicas	72
6.1.3	Otimização	73
6.2	Resultados Experimentais	76
6.2.1	Afundamentos	76
6.2.2	Afundamentos e distorções harmônicas	76
6.2.3	Otimização	79
7	Conclusões	83
	Referências Bibliográficas	85

Lista de Figuras

2.1	Corrente transitória impulsiva. Fonte: MCGRANAGHAN et al. (2006)	20
2.2	Tensão transitória oscilatória.	21
2.3	Afundamento momentânea de tensão.	22
2.4	Elevação momentânea de tensão.	23
2.5	Interrupção momentânea de tensão.	24
2.6	Interrupção temporária de tensão.	25
2.7	Distorção harmônica.	26
2.8	Pico de tensão.	27
2.9	Flutuação da tensão.	27
2.10	Tensão desbalanceada.	28
3.1	Elementos básicos de um compensador série em uma representação monofásica.	33
3.2	Modo de proteção: outro caminho é criado para a corrente chegar à carga.	34
3.3	Modo de espera.	34
3.4	Gerador de sinais periódicos.	38
3.5	Curva de resposta em frequência do controlador repetitivo.	39
3.6	Diagrama de blocos do controle projetado por KARIMIAN e JALILIAN (2012)	41
3.7	Diagrama de blocos do controle repetitivo projetado por GUO (2010)	41

4.1	Rede elétrica com compensação de carga sensível.	45
4.2	Circuito monofásico equivalente para a alimentação da carga sensível. .	45
4.3	Sistema de controle para produzir tensões de referência para o conversor de potência CC-CA.	46
4.4	Tensão na carga em função de F_r , F_g e F_i	46
4.5	Diagrama de Bode do controlador.	51
4.6	Diagrama de Nyquist do sistema.	51
4.7	Diferentes tipos de compensação para afundamentos de tensão com salto de fase.	52
5.1	Simulação do sistema de controle e compensador no ambiente Simulink.	61
5.2	Diagrama esquemático utilizado na plataforma experimental do compen- sador série.	62
5.3	Plataforma experimental.	63
5.4	Transformadores utilizados no compensador série.	64
5.5	Varivolt utilizado na plataforma experimental.	66
5.6	Circuito de condicionamento de tensão.	67
5.7	DSC da <i>Texas Instruments TMS320F28335</i>	68
5.8	Inversor de tensão de quatro braços.	69
6.1	Tensão da rede afundada e tensão de saída controlada pelo sistema proposto.	72
6.2	Tensão da rede com distorção harmônica e tensão de saída controlada pelo sistema proposto.	72
6.3	Resultado da correção com otimização pela amplitude: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,5.	73
6.4	Resultado da correção com otimização pela amplitude: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,7.	74

6.5	Resultado da correção com otimização pela potência: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,5.	74
6.6	Resultado da correção com otimização pela potência: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,7.	75
6.7	Resultado do primeiro experimento: Tensões na carga e na rede elétrica.	76
6.8	Resultado do segundo experimento: Tensão distorcida na rede elétrica e corrigida na carga.	77
6.9	Espectro da tensão distorcida na rede elétrica.	78
6.10	Espectro da tensão corrigida na carga.	78
6.11	Resultado da correção com otimização pela amplitude: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,5.	80
6.12	Resultado da correção com otimização pela amplitude: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,7.	80
6.13	Resultado da correção com otimização pela potência: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,5.	81
6.14	Resultado da correção com otimização pela potência: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,7.	82

Lista de Tabelas

2.1	Tabela do PRODIST de classificação das variações de tensão de curta duração.	29
4.1	Parâmetros do sistema de controle projetado.	50
5.1	Parâmetros do filtro LC.	65
6.1	Comparativo das estratégias de otimização nas simulações.	75
6.2	Comparativo das estratégias de otimização dos experimentos.	82

Resumo

Este trabalho propõe um controle repetitivo para compensadores série com o objetivo de restaurar dinamicamente a tensão aplicada a cargas sensíveis e críticas de sistemas de energia. O controle pode mitigar afundamentos de tensão ao mesmo tempo que compensa distorções harmônicas. Sua função de transferência é simples de ser implementada e não requer qualquer filtro seletivo de harmônicos. O sistema de controle atua sobre as referências senoidais e deve ser implementado em cada fase independentemente. Um outro aspecto importante do trabalho são as estratégias de otimização para minimizar a tensão de compensação ou a potência ativa fornecida pelo compensador. Um destas estratégias é a otimização pela amplitude, em que a compensação do afundamento de tensão ocorre com a menor injeção de amplitude de tensão por parte do compensador série. Para isso, a tensão injetada pelo compensador deve estar em fase com a tensão da rede afundada. Pode-se, também, controlar a injeção da tensão de compensação para minimizar a potência ativa a ser injetada pelo compensador série para compensar um afundamento de tensão. Para realizar a correção com a mínima injeção de potência ativa utilizou-se expressões analíticas para obter a magnitude e o ângulo da tensão a ser injetada. Na implementação destas estratégias foi utilizado um algoritmo recursivo de mínimos quadrados para estimar a amplitude e fase da tensão da rede. Um sistema compensador série foi montado em laboratório para validar o método. As simulações e resultados experimentais são apresentados e constata-se a eficácia do método proposto.

Palavras-chave: Controle repetitivo, Afundamentos de tensão, Harmônicos, Compensador Série, Qualidade de energia

Abstract

This work proposes a repetitive-based control for series compensator with the objective of dynamically restore the voltage applied to sensitive and critical loads of power system. The control mitigates voltage sags while also minimize harmonic distortions. Its transfer function is simple to be realized and does not require any harmonic selective filters. The control system acts on sinusoid references and it is implemented in each phase independently. Another important aspect of the proposed system are the optimization strategies to minimize either the voltage injection or the active power injection. One of these strategies is to optimize the magnitude of the compensation voltage sag with the smallest voltage magnitude injection by the series compensator. For this purpose, the compensating voltage injected must be in phase with the voltage supply. Is possible to control the injection of the voltage compensation to minimize active power injection by the series compensator to compensate a voltage sag. To perform the voltage correction with minimum active power injection were developed analytical expressions for the magnitude and angle of the injected voltage. To implement theses strategies, an recursive least-squares algorithm is used to estimate the grid voltage. A laboratory-scale series compensator was developed to validate the method. Simulations and experimental results are presented and show the efficacy of the proposed method.

Keywords: Repetitive control, Voltage sag, Harmonics, Series compensator, Power Quality

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica atingiram um nível elevado de confiabilidade, porém os distúrbios elétricos não podem ser totalmente evitados. Conforme (BOLLEN, 2000), o *Electric Power Research Institute* (EPRI) estimava que o custo das perdas associadas a problemas na qualidade da energia nos Estados Unidos custavam para as companhias cerca de 26 bilhões de dólares por ano. Por isso, quando se trata de cargas que não podem suportar distúrbios na sua alimentação de tensão, devido a restrições econômicas ou de segurança, a qualidade dessa energia elétrica é de suma importância. Para esse tipo de carga, investimentos em tecnologias que garantam tensões senoidais são essenciais. Entre algumas alternativas, os compensadores série têm se mostrado eficientes e rentáveis. Esses equipamentos protegem cargas críticas contra distúrbios de tensão da rede, impondo, através de transformadores em série com a carga, tensões de compensação de tal forma que a carga é protegida e mantém as tensões senoidais com frequência constante.

1.1 Motivação

Os distúrbios mais comuns na rede elétrica são elevações e afundamentos de tensão, geralmente causados por curto-circuitos ou alguma falta no sistema (JOTHIBASU e MISHRA, 2015). Em alguns casos, estes distúrbios podem levar ao desligamento completo de uma linha de produção, em especial na indústria de alta tecnologia, como fábricas de semicondutores, com consequências econômicas graves para a empresa afetada (CHAUDHARY e GANGIL, 2013).

O afundamento de tensão é o distúrbio que possui maior incidência em instalações industriais, chegando a 68% do total dos distúrbios registrados e é o principal causador de perda de produção (SARMIENTO e ESTRADA, 1996). Assim, as indústrias sempre demandam da distribuidora por energia de alta qualidade. Mas a causa da degradação da qualidade da energia não pode ser associada apenas as distribuidoras. Verificou-se que grande parte das condições que podem perturbar a energia elétrica são geradas dentro da própria indústria (PERERA, 2007). Por exemplo, uma perturbação frequente é a presença de harmônicos devido à crescente presença de cargas não-lineares ligadas à rede. No entanto, a maioria das soluções para proteger cargas sensíveis são projetadas exclusivamente para lidar com elevações ou afundamentos e operam para restaurar apenas as tensões fundamentais. O desempenho de tais soluções geralmente deterioram na presença de harmônicos.

Para compensar afundamentos com a presença de harmônicos é necessário um controlador que realize a rejeição completa de sinais periódicos senoidais, ou seja, atue de forma a rejeitar componentes harmônicas múltiplas da frequência fundamental. Para tratar este quesito pode-se empregar o controlador ressonante múltiplo ou o repetitivo. Porém, o controlador ressonante múltiplo não garante, de forma genérica, o seguimento e/ou rejeição de sinais periódicos, visto que seriam necessários infinitos picos ressonantes para compor todo o espectro dos sinais de interesse, o que leva a uma impossibilidade

de implementação. Por sua vez, o controlador repetitivo implementa infinitos polos no eixo imaginário do plano complexo em frequências múltiplas da frequência fundamental, o que garante, do ponto de vista teórico, o perfeito seguimento e rejeição de qualquer sinal periódico mesmo na presença de componentes harmônicas. Com isso, o controlador repetitivo foi o escolhido para ser implementado neste trabalho.

1.2 Objetivos do Trabalho

Esta dissertação objetiva o projeto de um controlador repetitivo, para um compensador série, que atue para corrigir afundamentos e distorções harmônicas de tensão advindas da rede. A implementação de estratégias de otimização no compensador série também é objetivado. Para isso, serão obtidas expressões analíticas para calcular a magnitude e o ângulo da tensão a ser injetada. Como resultado, espera-se obter simulações na plataforma *Simulink*[®] do *Matlab*[®] e resultados experimentais na plataforma que será descrita posteriormente neste trabalho.

Para a obtenção dos objetivos propostos acima, organizou-se este trabalho de acordo com os seguintes capítulos:

- No capítulo 2 são definidos os problemas mais relevantes e frequentemente observados nos sistemas de distribuição atuais, bem como suas origens.
- No capítulo 3, os compensadores série de tensão e as principais estratégias de controle são apresentados.
- No capítulo 4 é apresentada a modelagem e o projeto do sistema de compensação em série utilizado neste trabalho. Estratégias de otimização com a utilização do compensador série também são apresentadas. Nestas estratégias, um algoritmo de estimação é utilizado para encontrar a fase da rede que será utilizada para a realização do sincronismo entre a tensão gerada pelo compensador série e outro parâmetro desejado. O algoritmo de estimação é descrito neste capítulo.

- No capítulo 5 são mostradas as plataformas de simulação e experimental, bem como a descrição das partes que as constituem.
- No capítulo 6, as técnicas utilizadas neste trabalho serão testadas em simulações realizadas no *Matlab*[®] e nos experimentos realizados na plataforma experimental.
- No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Problemas de Qualidade de Energia

Este capítulo tem como finalidade apresentar as definições e origens dos problemas mais relevantes e frequentemente observados nos sistemas de distribuição atuais. Dentre os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica, aqueles associados às variações temporárias de curta duração são os mais frequentes nos sistemas de energia, devido, principalmente, da susceptibilidade das linhas de transmissão às descargas atmosféricas. Os diferentes tipos de distúrbios na qualidade da energia elétrica são subdivididos em transitórios, variações momentâneas de tensão, variações temporárias de tensão, desequilíbrios de tensão, distorções na forma de onda, flutuações de tensão e variações da frequência do sistema. Os distúrbios anteriormente citados serão descritos a seguir.

2.1 Transitórios

O termo transitório eletromagnético é muito utilizado e pode ser definido como a manifestação ou resposta elétrica, local ou nas adjacências, que se origina em alterações repentinas nas condições de funcionamento de um sistema de energia elétrica. O tran-

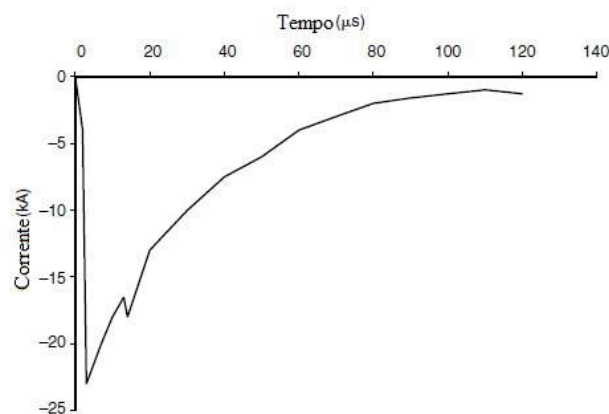
sitório é um evento momentâneo, de curta duração e muitas vezes indesejado, pois é nesse intervalo que os equipamentos elétricos são submetidos a condições muito severas que podem exceder as suas capacidades nominais (MCGRANAGHAN et al., 2006). De modo geral, os fenômenos transitórios podem ser classificados, de acordo com a forma de onda do transitório, em duas categorias: impulsivos e oscilatórios.

2.1.1 Transitórios Impulsivos

As variações bruscas de corrente e/ou tensão são normalmente causadas por descargas atmosféricas. Os impulsos causados tem característica unidirecional, ou seja, polaridade positiva ou negativa. O gráfico da Figura 2.1 ilustra uma corrente típica de um transitório impulsivo, resultante de uma descarga atmosférica.

O que normalmente caracteriza o transitório impulsivo é a variação e o tempo de queda e subida da tensão ou corrente que podem ser analisados pelo conteúdo espectral. Por exemplo, um transitório impulsivo que tem como parâmetros $1,2 \times 50\mu s$ e $2000V$, atinge o valor máximo de $2000V$ na subida que ocorre no tempo $1,2\mu s$, e cai para a metade do valor máximo em $50\mu s$ (MCGRANAGHAN et al., 2006).

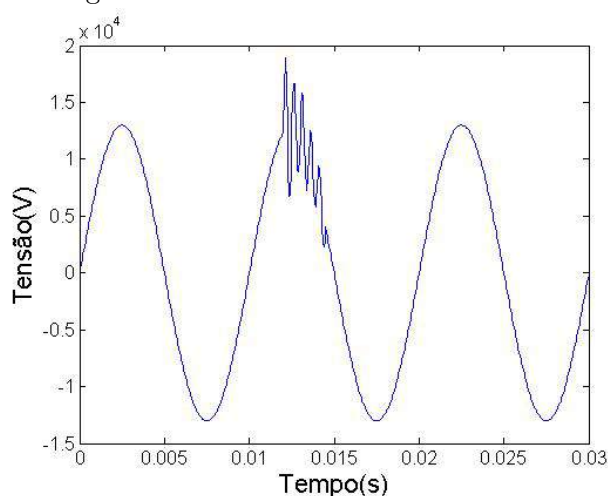
Figura 2.1: Corrente transitória impulsiva. Fonte: MCGRANAGHAN et al. (2006)



2.1.2 Transitórios Oscilatórios

As variações bruscas nas condições de regime permanente da corrente e/ou tensão acontecem nos dois sentidos, tanto positivo quanto negativo, como é ilustrado na Figura 2.2. Este tipo de transitório possui um grande número de possíveis causas, como por exemplo, a energização do sistema, corte de cargas indutivas, eliminação de faltas ou pelo chaveamento de banco de capacitores.

Figura 2.2: Tensão transitória oscilatória.



2.2 Variações momentâneas de tensão

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através do documento - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – determinou o padrão brasileiro para caracterização dos fenômenos da qualidade da energia elétrica. Este documento define as variações momentâneas de tensão como alterações que possuem duração inferior a 3 segundos e magnitude de valor eficaz da tensão superior ou inferior à faixa de tolerância de 10% do valor eficaz da tensão de referência. São normalmente classificadas em função da magnitude do evento como

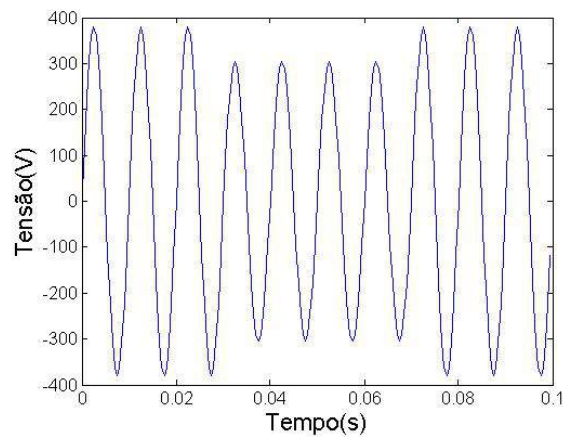
sendo: elevações, afundamentos ou interrupções.

2.2.1 Afundamento momentâneo de tensão

A redução do nível de tensão normal, entre 10% e 90% da tensão RMS nominal por períodos de até 3 segundos (ANEEL, 2010). A Figura 2.3 mostra um afundamento de tensão.

Pode ser causado por falhas na rede de transmissão ou de distribuição, conexão de cargas pesadas, partida de grandes motores, curto-circuitos nas redes, descargas atmosféricas, entre outros. Em geral, seu efeito desaparece após a remoção da causa direta. A intensidade desse distúrbio está associada com a impedância do sistema, e ainda, com a impedância entre o ponto de curto-circuito e o de monitoração do afundamento. Em geral, a duração do afundamento é determinada pelas proteções existentes no sistema e seus ajustes (SARMIENTO e ESTRADA, 1996).

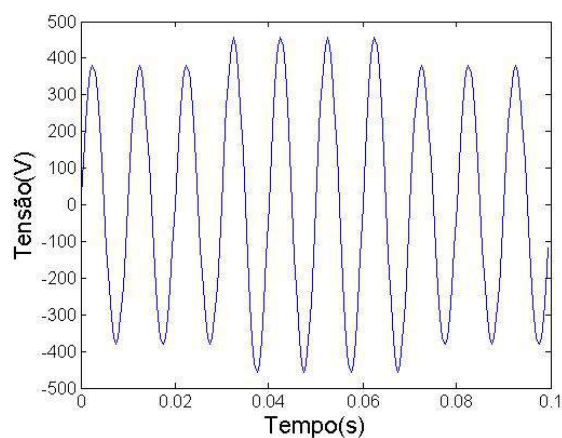
Figura 2.3: Afundamento momentânea de tensão.



2.2.2 Elevação momentânea de tensão

A elevação do nível de tensão normal maior que 110% da tensão RMS nominal por períodos de até 3 segundos (ANEEL, 2010). A Figura 2.4 mostra uma elevação de tensão. Pode ser causado pela abertura de chaves para cargas ou energização de banco de capacitores. Em geral, seu efeito desaparece após a remoção da causa direta.

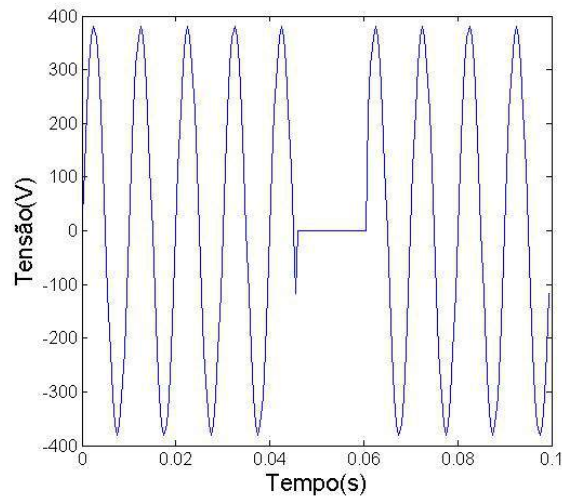
Figura 2.4: Elevação momentânea de tensão.



2.2.3 Interrupção momentânea de tensão

A interrupção total do fornecimento elétrico na duração de alguns milissegundos até três segundos. A Figura 2.5 mostra esse distúrbio que pode ser causado pela abertura e religamento automático de dispositivos de proteção para encerrar uma seção defeituosa da rede. É esperado que ao final do defeito o sistema possa retornar à condição de operação normal.

Figura 2.5: Interrupção momentânea de tensão.



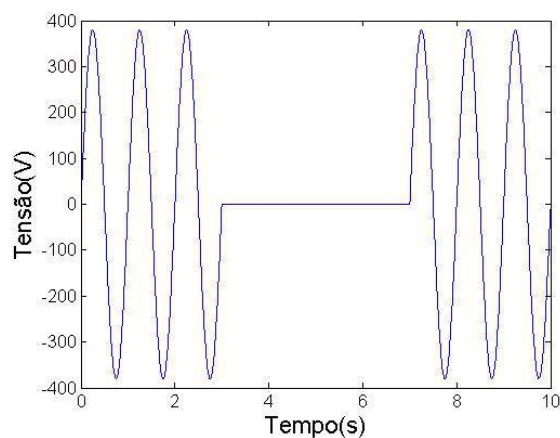
2.3 Variações temporárias de tensão

As variações temporárias de tensão podem ser caracterizadas como desvios que ultrapassam os limites estabelecidos para o valor eficaz da tensão por um período de tempo entre três segundos e três minutos. Variações temporárias podem ser classificadas como elevação, afundamento e interrupção de tensão. Geralmente não são o resultado de falhas no sistema, mas são causadas por variações de carga no sistema e no sistema de manobras (MCGRANAGHAN et al., 2006).

2.3.1 Interrupção temporária de tensão

A interrupção temporária de tensão é a interrupção total do fornecimento elétrico com duração entre três segundos e três minutos, como pode ser observado na Figura 2.6. Normalmente causado pela falha de equipamentos na rede sistema de energia, tempestades e colisão de objetos (árvores, carros, etc) em postes e linhas de transmissão, incêndio, erro humano, má coordenação ou o fracasso de dispositivos de proteção. Tem como consequência a interrupção de todos os equipamentos.

Figura 2.6: Interrupção temporária de tensão.



2.3.2 Afundamento temporário de tensão

A redução do nível de tensão normal, entre 10% e 90% da tensão RMS nominal por períodos maiores que três segundos e menores que três minutos (ANEEL, 2010). Pode ser causado por falhas na rede de transmissão ou de distribuição, falhas na instalação do consumidor, conexão de cargas pesadas e partida de grandes motores. Em geral, seu efeito desaparece após a remoção da causa direta.

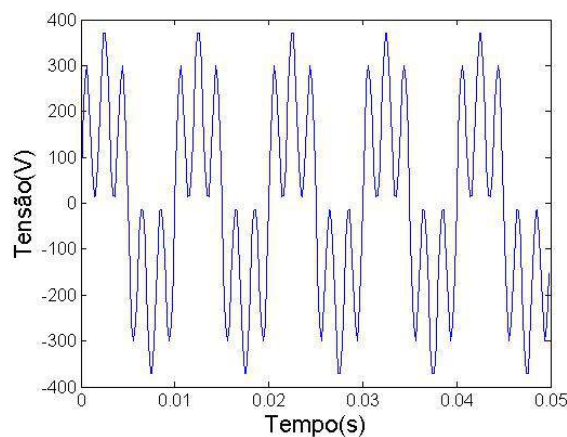
2.3.3 Elevação temporário de tensão

A elevação do nível de tensão normal maior que 110% da tensão RMS nominal por períodos entre três segundos e três minutos (ANEEL, 2010). Pode ser causado pela abertura de chaves para cargas ou energização de banco de capacitores. Em geral, seu efeito desaparece após a remoção da causa direta.

2.4 Distorção Harmônica

A tensão ou corrente assumem formas de ondas não senoidais. A Figura 2.7 mostra um sinal distorcido. A forma de onda corresponde à soma da tensão (ou corrente) fundamental com componentes de frequência múltipla inteira, causado principalmente por cargas não-lineares, tais como equipamentos de eletrônica de potência, fontes de alimentação chaveadas, equipamentos de processamento de dados e iluminação de alta eficiência.

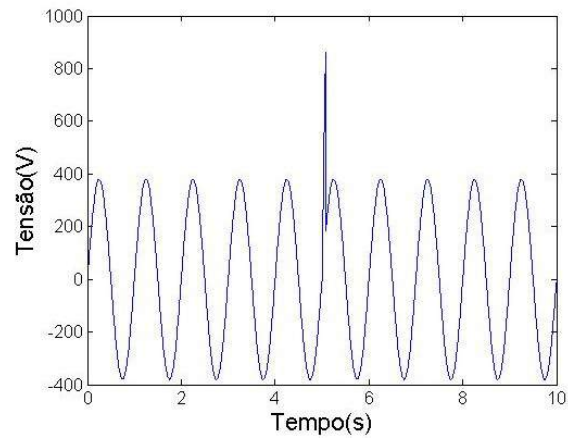
Figura 2.7: Distorção harmônica.



2.5 Pico de Tensão

A variação muito rápida do valor de tensão por períodos de alguns microsegundos até alguns milisegundos. Essas variações podem chegar a milhares de volts, mesmo em baixa tensão. Os pico de tensão podem ser causados por relâmpagos, comutação de linhas ou de capacitores para correção do fator de potência ou a desconexão de cargas pesadas. Na Figura 2.8 pode ser observado um pico de tensão.

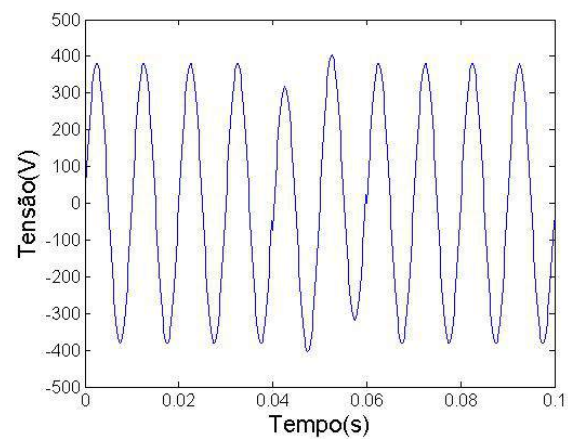
Figura 2.8: Pico de tensão.



2.6 Flutuação da tensão

Oscilação do valor de tensão, modulada em amplitude por um sinal com uma frequência de 0 a 30 Hz. A Figura 2.9 mostra uma tensão com flutuação. A flutuação é principalmente causada por cargas oscilantes como elevadores e motores. As consequências mais comuns são a subtensão, perceptível na cintilação de iluminação e telas, por exemplo.

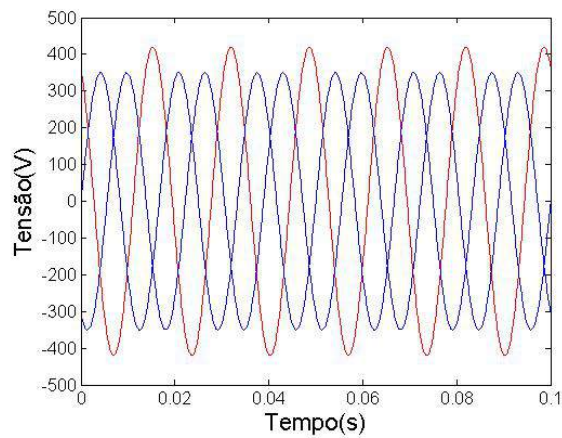
Figura 2.9: Flutuação da tensão.



2.7 Tensão Desbalanceada

A tensão desbalanceada é a variação da tensão num sistema de três fases, no qual as três amplitudes de tensão ou as diferenças de ângulo de fase entre eles não são iguais. Este distúrbio pode ser ocasionado por grandes cargas monofásicas (fornos de indução, carga de tração), distribuição incorreta de todas as cargas monofásicas pelas três fases do sistema. Pode ser observado que uma das curvas da Figura 2.10 está desbalanceada das demais.

Figura 2.10: Tensão desbalanceada.



2.8 Conclusão

Neste capítulo, foram descritos os principais distúrbios de qualidade de energia que ocorrem no sistema elétrico. As perturbações na forma de onda da tensão que este trabalho propõe compensar, os afundamentos de tensão e as distorções harmônicas, foram apresentadas e os parâmetros para sua caracterização foram definidos. A tabela 2.1 do PRODIST da (ANEEL, 2010) classifica as variações de tensão de curta duração.

Tabela 2.1: Tabela do PRODIST de classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da variação	Amplitude de tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação momentânea de tensão	Interrupção momentânea de tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento momentâneo de tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação momentânea de tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u.
Variação temporária de tensão	Interrupção temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u.

Capítulo 3

Compensador Série

Este capítulo objetiva apresentar o compensador série e as várias estratégias de controle utilizadas para melhorar a qualidade da energia elétrica. Os dispositivos de potência mais utilizados para compensar as quedas e elevações de tensão são as fontes de alimentação ininterrupta (UPS), compensadores série de tensão e filtros ativos de potência (FAP). Compensadores série e FAP são normalmente usados para eliminar diferentes tipos de distúrbios que afetam a qualidade de energia. Estes distúrbios podem ocorrer em duas situações: em carga lineares ou não-lineares.

No caso de cargas lineares ligadas ao sistema, o dispositivo de potência em conjunto com o fornecimento defeituoso deve ser capaz de fornecer a componente de tensão necessária para alcançar a referência pré-estabelecida. Um dispositivo de confiança que pode ser usado para o caso acima, para distúrbios de tensão, é o compensador série.

Quando as cargas não-lineares são ligadas ao sistema, a corrente de alimentação também torna-se distorcida e isto pode gerar componentes harmônicos na forma de onda da tensão de alimentação. Neste caso, o FAP pode ser utilizado para injetar ou absorver uma corrente para fazê-la senoidal. O compensador série também pode ser utilizado para injetar ou absorver uma tensão de forma a compensar o efeito dos harmônicos para gerar a referência.

Entre os dispositivos de potência, a UPS e o compensador série podem ser considerados como os dispositivos que injetam uma tensão para suprir cargas. A diferença entre os dispositivos está no fato de que a UPS fornece a tensão total da carga, independente se a forma de onda é distorcida ou não. Enquanto o compensador série injeta apenas a diferença entre a referência e a tensão da falha apenas na duração da distorção. Assim, ao utilizarmos o compensador série, as perdas e a potência necessária são muito baixas em comparação com a UPS (PERERA, 2007). Por isso, o compensador série foi o dispositivo escolhido para ser utilizado neste trabalho.

O compensador dinâmico de tensão é um dispositivo de qualidade de energia, que protege cargas elétricas sensíveis da maior parte dos distúrbios relacionados a energia elétrica, isto é, afundamentos, elevações de tensão relacionadas a faltas, desequilíbrios e distorções. São construídos através de inversores PWM capazes de gerar formas de ondas precisas e de alta qualidade. Uma vez que o desempenho do sistema de controle global depende em grande parte da qualidade da estratégia de controle aplicada, um controlador de alto desempenho, rápida resposta e boas características no regime permanente são necessários. As principais considerações para o sistema de controle de um compensador série incluem: detecção de afundamentos, geração de referência de tensão, controle transitório e no regime permanente da tensão injetada (TORABI et al., 2012).

O primeiro compensador série foi instalado nos Estados Unidos em agosto de 1996 - um sistema de 12,47 kV localizado em Anderson, Carolina do Sul (M.SHARANYA et al., 2012). Desde então, compensadores série foram aplicadas para proteger as cargas críticas em serviços públicos, de semicondutores, de processamento de alimentos, entre outros. No Brasil, um compensador série foi instalado em um sistema de 13,8kV em São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba (BIANCHIN et al., 2008). Hoje, o compensador série de tensão é um dos mais eficazes dispositivos de qualidade de energia para resolução de problemas de distúrbios na tensão.

3.1 Estrutura de um compensador série

Um compensador de tensão normalmente está situado entre uma fonte de energia principal, a concessionária ou geração própria e a carga que se deseja manter com funcionamento em tensão nominal. Na figura 3.1, pode ser observada a configuração de um compensador série monofásico. Os principais blocos destacados nesta figura podem ser descritos como:

Rede: Fonte de energia principal que alimenta a carga;

Transformador série: Os transformadores são os elementos passivos do compensador série;

Filtro LC: Filtragem de harmônicas de ordem elevada e reconstrução do sinal de tensão de saída. Geralmente constituída por um filtro passa-baixas;

Inversor PWM: Conversão CC-CA, composto por um inversor com chaves semicondutoras de potência do tipo IGBT;

Barramento CC: A sua tensão é utilizada para alimentar cargas no lado CA ou conectar a rede;

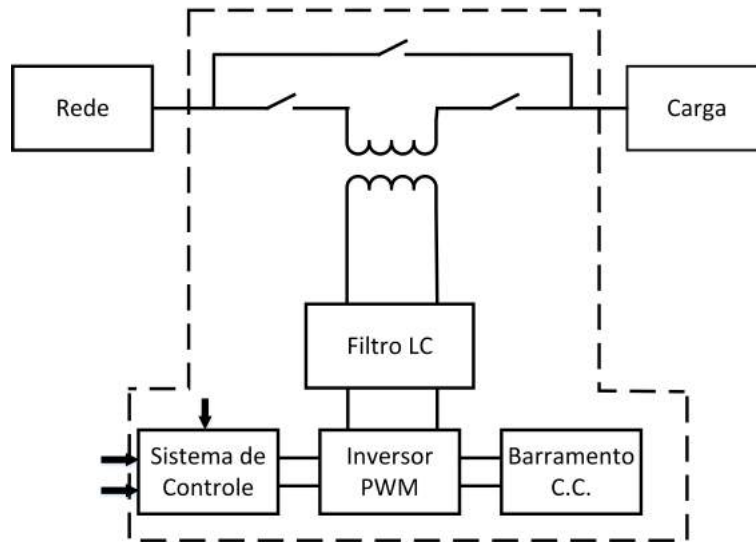
Sistema de controle: Os sinais são processados por um microprocessador, onde são realizados os cálculos necessários para a geração da ação de controle sobre o inversor.

Carga: O elemento ou dispositivo que será alimentado pelo sistema.

3.2 Modos de Operação

Geralmente, o compensador série é categorizado em três modos de operação que são (FERNANDES, 2008):

Figura 3.1: Elementos básicos de um compensador série em uma representação mono-fásica.



Modo de proteção: O compensador série deve ser isolado do sistema, se os parâmetros do sistema excederem os limites pré-determinados de correntes no lado de carga, de forma a proteger de um curto-circuito na carga ou grande corrente de partida. Os comutadores de derivação removem o compensador série do sistema através do fornecimento de um outro caminho para a corrente, como mostrado na Figura 3.2.

Modo de espera: O compensador série pode tanto entrar em operação de curto-circuito ou injetar pequenas tensões para compensar a queda de tensão na reatância ou perdas do transformador (MOHAMMED et al., 2013), como mostrado na Figura 3.3. A operação em curto-circuito do compensador série é geralmente a solução preferida em operações no regime permanente para que as pequenas quedas de tensão não perturbem a carga.

Modo ativo: O compensador série injeta uma tensão de compensação quando há de-

tecção de uma falha na tensão de alimentação. A configuração, quanto a abertura ou fechamento dos comutadores, é a mesma do Modo de espera e é mostrada na Figura 3.3.

Figura 3.2: Modo de proteção: outro caminho é criado para a corrente chegar à carga.

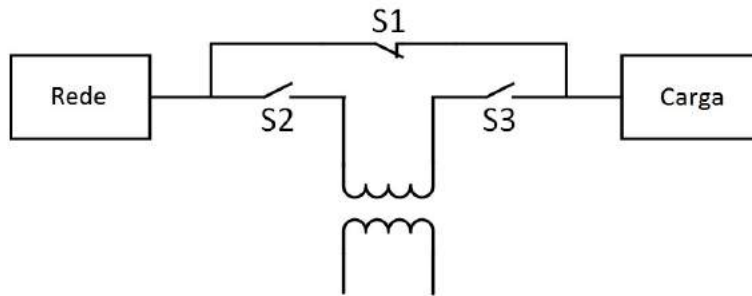
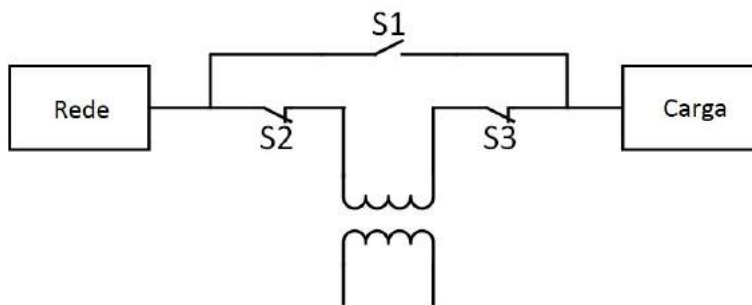


Figura 3.3: Modo de espera.



3.3 Limitações do Compensador

As limitações dos compensadores série são determinantes para escolhas vinculadas aos aspectos técnicos de desempenho e qualidade da compensação a ser realizada. Por exemplo, a tensão demandada pode ser maior que a capacidade do dispositivo para restaurar completamente a tensão afundada. Todos os limites devem ser tomados em consideração na estratégia de controle. Algumas das mais importantes limitações para um compensador são (NIELSEN e BLAABJERG, 2005):

- Limite de tensão: A capacidade de injeção de tensão e consequente queda de tensão sobre o dispositivo.
- Limite de corrente: Uma menor demanda do nível de corrente pode baixar o custo do equipamento.
- Limite de potência: A potência demandada é convertida da própria rede ou de uma fonte CC. Um conversor adicional pode ser utilizado para manter a tensão do barramento CC constante e o suprimento deste conversor pode introduzir um limite de potência ao compensador.
- Limite de energia: A energia é utilizada para manter a tensão de carga constante e a injeção normalmente é dimensionada tão baixa quanto possível com o objetivo de reduzir custos. Um controle adequado pode reduzir o consumo de energia para compensar o afundamento e, conseqüentemente, os riscos de colapso causado pela insuficiência da energia.

3.4 Principais Controladores

O desempenho do compensador série é diretamente afetado pela técnica de controle utilizada para a condução do inversor de tensão, porque o inversor é a parte mais importante do compensador série. Na estratégia de controle do inversor, os três principais controladores de tensão que têm sido propostos são:

- Controlador de tensão em malha aberta;
- Controlador de tensão em malha fechada;
- Controlador multivariável.

No controlador de tensão em malha aberta, a tensão de alimentação é continuamente monitorada e comparada com um valor de tensão de referência desejada na carga. Se a diferença for superior a um limite tolerável, o compensador série injeta a quantidade de tensão necessária para a compensação. A queda de tensão provocada pelo filtro pode ser determinada a partir da corrente do conversor. O controlador em malha aberta é simples de ser implementado e tem uma resposta rápida. O inconveniente deste controlador é a possibilidade de um elevado erro em regime permanente.

No controle em malha fechada, as tensões de carga ou as tensões de compensador série são medidas e comparadas com o valor de referência. A tensão complementar para alcançar a de referência é fornecida pelo compensador série. Este controlador tem a vantagem de uma resposta rápida e precisa. Porém, as sintonias dos controladores de tensão são complexas e dependem da carga, além do fato que o controlador introduz um atraso no sistema. O controle em malha fechada é menos sensível a erros de modelagem. O sistema de controle deve possuir boas propriedades de rastreamento e deve também rejeitar as variáveis de perturbação (FERNANDES, 2008).

O controle multi-variável é utilizado com um laço interno de corrente para controlar a corrente nos capacitores do filtro e um laço externo de tensão para controlar a

tensão de compensador série. Ele é classificado como um método de controle robusto e rápido (NIELSEN e BLAABJERG, 2005).

Neste trabalho, o compensador deve compensar afundamentos de tensão com a presença de harmônicos. Para isso, é necessária a utilização de um controlador que realize a rejeição de sinais periódicos senoidais. Os controladores ressonante múltiplo e repetitivo satisfazem esse requisito. Porém, o controlador ressonante múltiplo não garante o seguimento e/ou rejeição de sinais periódicos, visto que seriam necessários infinitos picos ressonantes para compor todo o espectro dos sinais de interesse, o que leva a uma impossibilidade de implementação. Por sua vez, o controlador repetitivo implementa infinitos polos no eixo imaginário do plano complexo em frequências múltiplas da frequência fundamental, o que garante, do ponto de vista teórico, o perfeito seguimento e rejeição de qualquer sinal periódico mesmo na presença de componentes harmônicas. Com isso, o controlador repetitivo em malha fechada foi o escolhido para ser implementado neste trabalho.

3.5 Controle Repetitivo

Nesta seção, o controlador repetitivo será apresentado, bem como os diversos sistemas de controles repetitivos encontrados na literatura. O controlador repetitivo, utilizado primeiramente por INOUE et al. (1981), surgiu a partir da necessidade de obter rastreamento de referências periódicas e rejeição de distúrbios de carga em sistemas de controle. As aplicações do controle repetitivo são diversas. Qualquer sistema que possua entradas ou distúrbios de carga periódicos pode se beneficiar dessa estratégia de controle. Algumas aplicações típicas são: filtros ativos, retificadores PWM, regulação da tensão de saída para UPS e manipuladores robóticos.

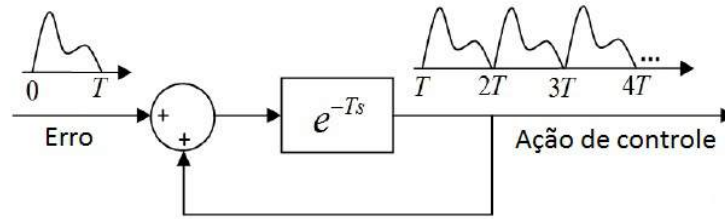
Controladores repetitivos podem ser classificados como baseados no princípio do modelo interno ou do modelo externo. Controladores baseados no princípio do modelo

interno são lineares e tem geradores de sinais periódicos, enquanto que os controladores baseados no princípio do modelo externo são não-lineares e observam os sinais de cancelamento sendo injetados externamente na planta e na malha de realimentação (CARATI, 2003).

O controlador repetitivo baseado no princípio do modelo interno tem como vantagem o fato de ser linear, o que torna a análise mais simples, a convergência é rápida, o tempo de execução é pequeno e as perturbações periódicas são rapidamente atenuadas (CHANG et al., 1997). Por isso, este será o controlador utilizado neste trabalho.

O controlador repetitivo, baseado no princípio do modelo interno pode ser representado pelo diagrama da Figura 3.4. Este diagrama implementa um gerador periódico que produz um padrão repetitivo num período T .

Figura 3.4: Gerador de sinais periódicos.



A função de transferência do controlador repetitivo da Figura 3.4 é descrita na Equação 3.1.

$$\frac{Ação\ de\ controle}{Erro} = \frac{1}{1 - e^{-sT}}. \quad (3.1)$$

Os seus polos podem ser obtidos igualando-se o denominador da função de transferência a zero. Com isso, os polos são:

$$e^{-sT} = 1, \quad (3.2)$$

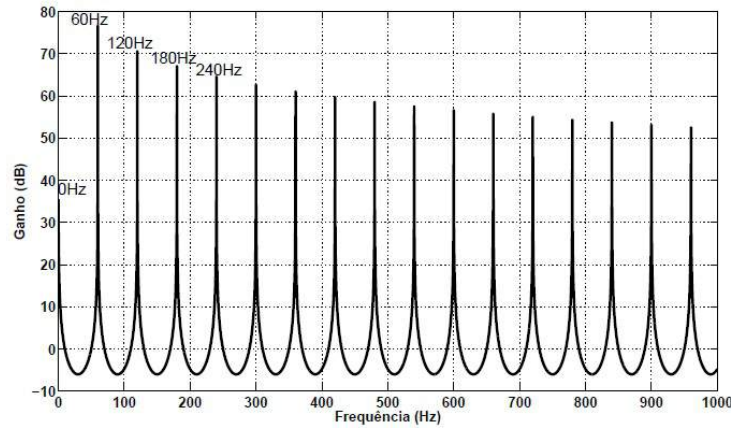
$$e^{-sT} = e^{\pm j2\pi k}, k = 0, 1, \dots, \infty, \quad (3.3)$$

$$sT = \pm j2\pi k, \quad (3.4)$$

$$s = \pm j\omega_0 k. \quad (3.5)$$

A Equação 3.5 mostra que o controlador repetitivo possui os polos em $\pm j\omega_0 k$, sendo $k = 1, 2, \dots, \infty$. Quando $k = 0$, um polo na origem faz com que esse controlador também possa ser aplicado na regulação de sinais de entrada com frequência zero (OLIVEIRA et al., 2013). A Figura 3.5 mostra a curva de ganho em dB, em função da frequência em Hz, do controlador repetitivo no qual foi utilizado um atraso de $(1/60)s$.

Figura 3.5: Curva de resposta em frequência do controlador repetitivo.



Podem ser observados, na Figura 3.5, os picos, teoricamente infinitos, que ocorrem na frequência zero, 60Hz e nas frequências múltiplas (120Hz, 180Hz, ..., ∞). Essa curva fornece indicativo sobre o funcionamento desse tipo de controlador. Na presença das frequências para as quais o controlador foi sintonizado, ele fornece significativa ação de controle com o objetivo de eliminar essas componentes do erro do sistema, garantindo

assim, erro nulo em regime permanente.

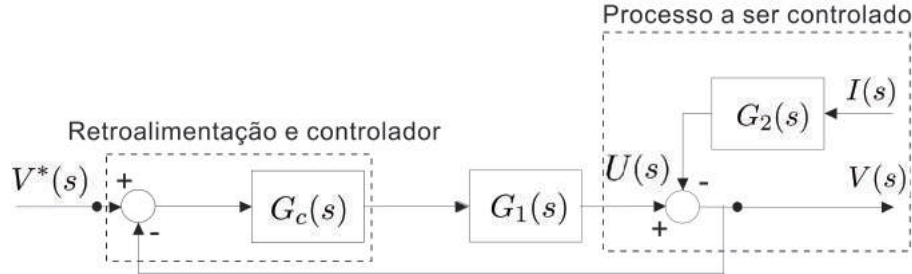
É comum na literatura a inserção de um filtro passa-baixas em série com o elemento de atraso do controlador repetitivo. O objetivo desta adaptação é deslocar os polos de alta-frequência do controlador repetitivo para dentro do semi-plano complexo esquerdo, facilitando assim a estabilização em malha-fechada do sistema, além de reduzir a sensibilidade do controlador para o ruído dos sensores (FLORES et al., 2010).

Na literatura são encontrados alguns trabalhos relativos ao controle repetitivo utilizados em compensadores séries. Alguns trabalhos tiveram aspectos a serem destacados e serão comentados a seguir.

O esquema de controle proposto por KARIMIAN e JALILIAN (2012) apresentou um controlador repetitivo e proporcional $G_c(s)$ em malha fechada, a fim de obter uma resposta rápida e dinâmica com erro zero em regime permanente. A introdução do controlador proporcional melhora o desempenho do sistema dinâmico e a velocidade de rastreamento, mas não pode atingir o erro zero em regime permanente do sinal de rastreamento que é um sinal senoidal sobreposto de diferentes frequências. O controle repetitivo tradicional pode eficazmente reduzir o erro estacionário e fazer a saída seguir o sinal de referência. O diagrama de blocos do controle proposto é mostrado na Figura 3.6. A entrada $V^*(s)$ é a tensão de referência para a carga, $G_1(s)$ é o compensador modelado como um amplificador linear, $U(s)$ é a tensão gerada pelo compensador, $G_2(s)$ são os parâmetros de dispersão do transformador do compensador, $I(s)$ é a corrente do sistema e $V(s)$ é a tensão na carga.

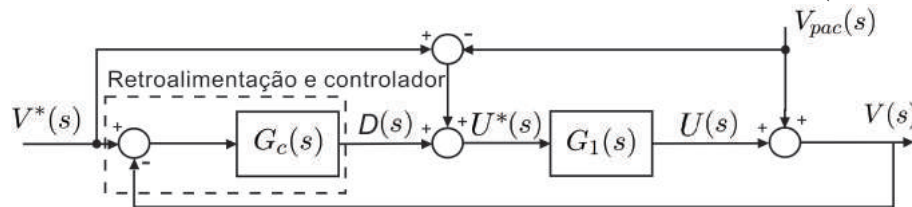
Como estratégia de controle para o compensador série, GUO (2010) propõe um controlador repetitivo rápido baseado no controle de malha fechada. O controlador repetitivo rápido difere do tradicional pois escolhe o atraso de tempo do gerador de sinais periódicos do controle repetitivo como metade de T (período fundamental). Com isso, esse controlador tem ganho infinito nas frequências de todos harmônicos ímpares. Este método de controle foi escolhido por GUO (2010) pois em sistemas práticos de

Figura 3.6: Diagrama de blocos do controle projetado por KARIMIAN e JALILIAN (2012)



energia, apenas harmônicos ímpares precisam de compensação no regime permanente, pois em forma de onda simétricas as harmônicas pares desaparecem. O filtro utilizado por GUO (2010) para melhorar a estabilidade do sistema de controle foi o passa-baixas de segunda ordem. O diagrama de blocos do controle proposto é mostrado na Figura 3.7. A descrição de cada bloco da figura é a mesma da Figura 3.6.

Figura 3.7: Diagrama de blocos do controle repetitivo projetado por (GUO, 2010)



No controle proposto por PEREZ et al. (2011), um esquema de controle eficiente foi apresentado para compensar as quedas de tensão e harmônicos com o mesmo dispositivo. Primeiramente, um laço da tensão principal é projetado para uma resposta rápida quando ocorre um afundamento. Em seguida, é adicionado um controlador repetitivo para suprimir harmônicos de tensão e desequilíbrios. Foi também implementado um método de adaptação de frequência que torna possível controlar sinais periódicos quando se desvia da frequência fundamental para qual o sistema foi projetado.

O controlador repetitivo apresentado por SANCHEZ et al. (2009) é utilizado em

um sistema compensador série para corrigir afundamentos e distorções harmônicas. Ao contrário de outros sistemas, que também têm uma gama comparável de aplicabilidade, apenas um controlador é necessário para cancelar todos os distúrbios simultaneamente. A estrutura de controle proposto baseia-se no uso de um controle por antecipação de tensão no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) para obter uma rápida resposta a transitórios e um termo de retroalimentação da tensão da carga para garantir erro estacionário zero. Diferente de outros sistemas, para corrigir afundamentos e distorções, esse controlador só utiliza tensões para realimentação. Os resultados das simulações desse sistema mostram que o controlador tem um excelente rendimento na regulação de tensão. Porém, o trabalho não possui resultados experimentais, apenas simulações no PSCAD/EMTDC.

3.6 Conclusão

O compensador série foi o dispositivo escolhido para ser utilizado neste trabalho por injetar a diferença entre a referência e a tensão da falha apenas na duração da anomalia e por ser possível controlar esta injeção de tensão, de forma a possibilitar a implementação de estratégias de otimização. Neste capítulo, a estrutura básica de um compensador série é apresentada, bem como seus diversos modos de operação. O trabalho proposto trata do compensador operando no modo ativo.

Dentre as possibilidades de correção da tensão apresentadas, para corrigir apenas afundamentos de tensão, o controlador de tensão em malha aberta é rápido e simples de ser implementado em um controlador digital de sinais. Todavia, este controle é pouco sensível em relação aos tipos de cargas e não consegue eliminar influências de perturbações. Por outro lado, o controlador de tensão em malha fechada se destaca pela precisão, mas as sintonias dos controladores de tensão são complexas e dependem da carga. O controlador repetitivo foi o escolhido para ser utilizado no compensador

série projetado neste trabalho por garantir o perfeito seguimento e rejeição de qualquer sinal periódico mesmo na presença de componentes harmônicas.

Dos controles repetitivos aplicados a compensadores série, destaca-se o projetado por SANCHEZ et al. (2009), pois a estrutura de controle é simples, robusta e só utiliza retroalimentação de tensões. A estrutura de controle proposta por SANCHEZ et al. (2009), baseia-se no uso de um controle por antecipação de tensão no ponto de acoplamento comum para obter uma rápida resposta a transitórios e um termo de retroalimentação da tensão da carga para garantir erro estacionário zero. Com isso, o sistema de controle a ser estudado e implementado neste trabalho será baseado na estrutura proposta por SANCHEZ et al. (2009).

Capítulo 4

Modelagem do Sistema de Compensação em Série e Projeto do Controlador Repetitivo

A visão geral do compensador série proposto neste trabalho é mostrada na Figura 4.1. O sistema monofásico equivalente está descrito na Figura 4.2. Nesta figura, a tensão v_{pac} é a aplicada sobre o ponto de acoplamento comum (PAC). A corrente i_s é fornecida pela rede. Esta corrente é dividida na corrente i , fornecida para a carga crítica, e na corrente i_r , fornecida para todas as outras cargas conectadas ao mesmo barramento. A tensão u é a tensão de compensação e v é a tensão na carga. As variáveis R e L são a resistência e a indutância associadas com o acoplamento série do transformador do compensador.

Pode-se expressar a tensão da carga como:

$$v(t) = v_{pac}(t) - Ri(t) - L \frac{d}{dt} i(t) + u(t), \quad (4.1)$$

Com base nesta formulação, o diagrama de blocos da Figura 4.3 mostra o controle

Figura 4.1: Rede elétrica com compensação de carga sensível.

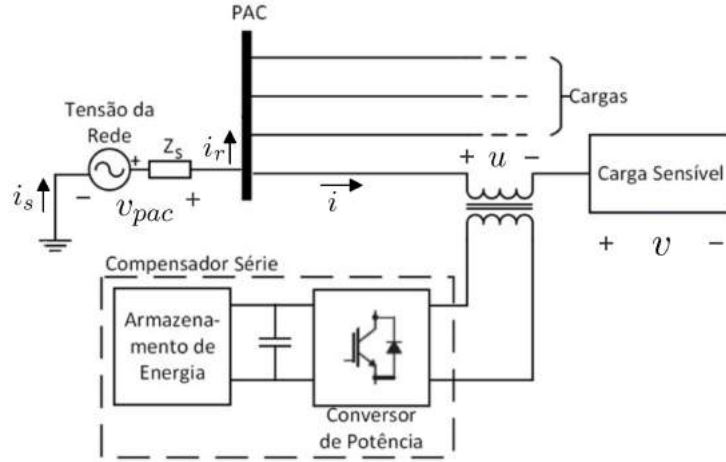
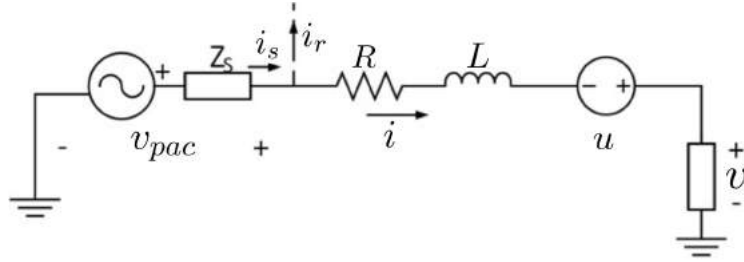
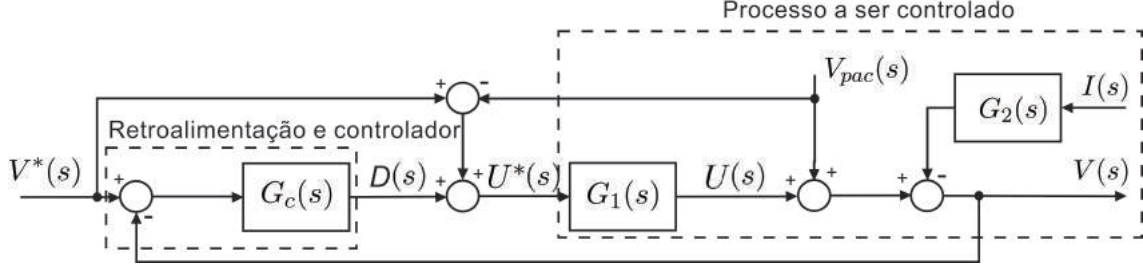


Figura 4.2: Circuito monofásico equivalente para a alimentação da carga sensível.



proposto neste trabalho. O processo a ser controlado é representado por duas funções de transferência, G_1 e G_2 . A primeira corresponde ao compensador série e, se a frequência de comutação for suficientemente elevada, pode ser modelada por um simples atraso $G_1 = e^{-t_0 s}$. Este atraso é a soma do tempo de amostragem com o período de comutação. A função G_2 representa a impedância RL da dispersão do transformador de acoplamento. Matematicamente, $G_2 = Ls + R$. O sistema de controle, representado na mesma figura, contém três entradas, das quais a corrente I e a tensão de acoplamento comum V_{pac} são variáveis da rede, enquanto V^* representa a tensão de referência a ser reproduzida para a carga crítica. A tensão U^* é fornecida pelo sistema de controle para o compensador série. Observando os diagramas de blocos, pode-se escrever:

Figura 4.3: Sistema de controle para produzir tensões de referência para o conversor de potência DC-AC.



$$V(s) = F_r(s)V^*(s) + F_g(s)V_{pac}(s) + F_i(s)I(s), \quad (4.2)$$

sendo:

$$F_r(s) = \frac{[1 + G_c(s)]G_1(s)}{1 + G_c(s)G_1(s)}, \quad (4.3)$$

$$F_g(s) = \frac{1 - G_1(s)}{1 + G_c(s)G_1(s)}, \quad (4.4)$$

$$F_i(s) = -\frac{G_2(s)}{1 + G_c(s)G_1(s)}. \quad (4.5)$$

A Figura 4.4 representa o sistema da equação 4.2, na qual a tensão na carga é descrito em função de F_r , F_g e F_i .

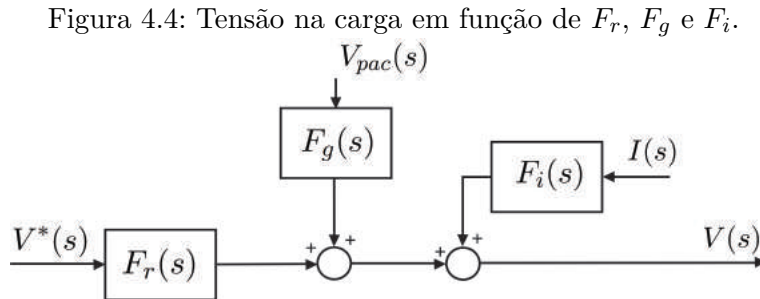


Figura 4.4: Tensão na carga em função de F_r , F_g e F_i .

Na teoria do controle repetitivo (HARA et al., 1988), o controlador, na forma mais geral é escrito como:

$$G_c(s) = \frac{Q(s)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s}}, \quad (4.6)$$

sendo $Q(s)$ uma função de transferência que assegura a estabilidade do sistema de retroalimentação e ω_1 é a frequência fundamental, no caso, a frequência da rede. Substituindo (4.6) em (4.3)-(4.5) tem-se:

$$F_r(s) = \frac{[1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} + Q(s)]G_1(s)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} + Q(s)G_1(s)}, \quad (4.7)$$

$$F_g(s) = \frac{[1 - G_1(s)][1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s}]}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} + Q(s)G_1(s)}, \quad (4.8)$$

$$F_i(s) = -\frac{[1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s}]G_2}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} + Q(s)G_1(s)}. \quad (4.9)$$

Observando a resposta em frequência, $s = j\omega$, de (4.7)-(4.9), constata-se que os termos $1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}j\omega}$ são nulos quando ω é um múltiplo de ω_1 . Assim, $F_r(j\omega_h) = 1$, $F_g(j\omega_h) = 0$ e $F_i(j\omega_h) = 0$, para $\omega_h = h\omega_1$, sendo $h = 0, 1, 2, \dots, \infty$. Ao substituir estes valores de $F_r(j\omega_h)$, $F_g(j\omega_h)$ e $F_i(j\omega_h)$ em (4.2), tem-se que as tensões de referência são produzidas para a carga. Ou seja, para frequências múltiplas da fundamental, a tensão aplicada à carga é a tensão de referência independente da tensão V_{pac} e da corrente I .

Desde que o atraso, t_0 , seja menor que o período da tensão da rede, $\frac{2\pi}{\omega_1}$, então a função de transferência $Q(s)$ pode ser escolhida como:

$$Q(s) = e^{-(\frac{2\pi}{\omega_1} - t_0)s}. \quad (4.10)$$

Ao substituir (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10) na equação (4.2) tem-se:

$$V(s) = e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s} V^*(s) + [1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s}] e^{-t_0 s} V^*(s) + [1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega_1}s}] [(1 - e^{-t_0 s}) V_{pcc}(s) - G_2(s) I(s)]. \quad (4.11)$$

Como o atraso t_0 não é conhecido, o sistema em malha fechada não é estável para um tempo $\hat{t}_0 \neq t_0$.

Para garantir a estabilidade do sistema, um filtro passa-baixas será adicionado em série com o elemento de atraso do controlador repetitivo. Então, $G_c(s)$ será modificado para:

$$G_c(s) = \frac{F(s)e^{-(T-\hat{t}_0)s}}{1 - F(s)e^{-Ts}}, \quad (4.12)$$

sendo $F(s)$ um filtro passa-baixas, T o período fundamental menos β , que é um parâmetro de projeto para compensar o atraso gerado pelo filtro. O período T é concebido com a restrição de ser menor do que um período fundamental da rede, isto é, $(\beta < (2\pi/\omega_1))$, e $\hat{t}_0$ o tempo de atraso estimado para o compensador série que pode ser escolhido para ser $\hat{t}_0 = 1/2f_s$ (SANCHEZ et al., 2009).

Ao substituir a função de transferência (4.12) em (4.3), (4.4) e (4.5), tem-se:

$$F_r(s) = \frac{e^{-t_0 s} + F(s)e^{-Ts}[e^{-\delta s} - e^{-t_0 s}]}{1 + F(s)e^{-Ts}(e^{-\delta s} - 1)}, \quad (4.13)$$

$$F_g(s) = \frac{[1 - e^{-t_0 s}][1 - F(s)e^{-Ts}]}{1 + F(s)e^{-Ts}(e^{-\delta s} - 1)}, \quad (4.14)$$

$$F_i(s) = -\frac{[1 - F(s)e^{-Ts}]G_2(s)}{1 + F(s)e^{-Ts}(e^{-\delta s} - 1)}, \quad (4.15)$$

com $\delta = t_0 - \hat{t}_0$.

A equação característica do sistema em malha fechada é

$$G(s) = F(s)e^{-Ts}(e^{-\delta s} - 1), \quad (4.16)$$

$$1 + G(s) = 0, \quad (4.17)$$

$$1 + F(s)e^{-Ts}(e^{-\delta s} - 1) = 0. \quad (4.18)$$

Para garantir estabilidade, a equação (4.16) em (4.17) deve atender ao critério de Nyquist: Se o número de polos instáveis do sistema $G(s)$ em malha aberta é igual a zero ($P = 0$), então o número de voltas, no sentido anti-horário, de $G(j\omega)$ no ponto $(-1,0)$ deve ser zero ($N = 0$) com $-\infty < \omega < \infty$ (Nise, 2002). Uma condição suficiente para garantir a estabilidade de F pode ser obtida ao fazer

$$|G(j\omega)| = |F(j\omega)(e^{-j\omega\delta} - 1)| < 1 \quad \forall \omega. \quad (4.19)$$

que é satisfeito se

$$|e^{-j\omega\delta} - 1||F(j\omega)| < 1 \quad \forall \omega. \quad (4.20)$$

A condição (4.20) é independente do atraso T do controlador $G_c(s)$ em (4.12).

Os parâmetros para G_c estão resumidos na Tabela 4.1. A frequência f_s é a frequência de comutação do inversor de tensão. A frequência de corte f_c do filtro Bessel passa-baixas $F(s)$ foi escolhida de forma a atenuar os picos acima de uma frequência de ressonância fundamental. O filtro de Bessel foi escolhido por poder ser aproximado como um atraso constante e a sua função de transferência está descrita na equação (4.21). Para compensar o atraso gerado pelo filtro passa-baixas, utiliza-se um parâmetro β .

Tabela 4.1: Parâmetros do sistema de controle projetado.

Parâmetro	Valor
f_s	6,45kHz
β	555 μ s
$\hat{t}_0$	1/(2 f_s)
T	16,11ms
f_c	5kHz

$$F(s) = \frac{6.4 \times 10^7}{s^2 + 14400s + 6.4 \times 10^7}. \quad (4.21)$$

As exponenciais da função de transferência da Equação (4.12) são expandidas em série de Taylor para construir um polinômio. Como resultado, obteve-se as seguintes aproximações:

$$e^{-(T-\hat{t}_0)s} = 2.7538 \times 10^{-9}s^4 - 6.87 \times 10^{-7}s^3 + 1.2854 \times 10^{-4}s^2 - 1.6034 \times 10^{-2}s + 1, \quad (4.22)$$

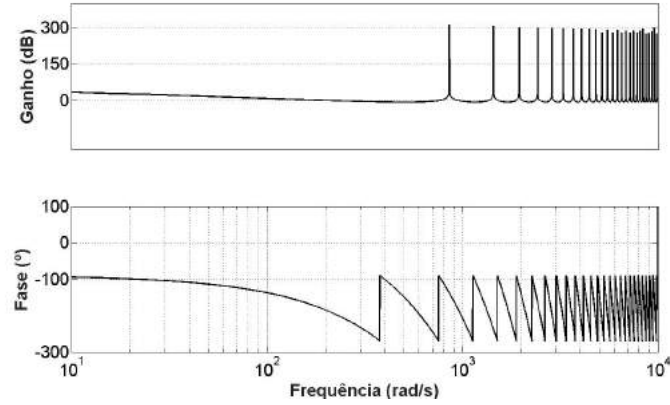
$$e^{-Ts} = 2.8074 \times 10^{-9}s^4 - 6.9701 \times 10^{-7}s^3 + 1.2979 \times 10^{-4}s^2 - 1.6111 \times 10^{-2}s + 1. \quad (4.23)$$

Ao substituir as equações (4.21), (4.22) e (4.23) em (4.12), a função de transferência do controlador repetitivo é obtida e descrita em (4.24):

$$G_c(s) = \frac{0.1762s^4 - 43.97s^3 + 8227s^2 - 1.026 \times 10^6s + 6.4 \times 10^7}{-1.15 \times 10^7s^4 + 2.855 \times 10^9s^3 - 5.316 \times 10^{11}s^2 + 6.599 \times 10^{13}s - 4.096 \times 10^{15}} \quad (4.24)$$

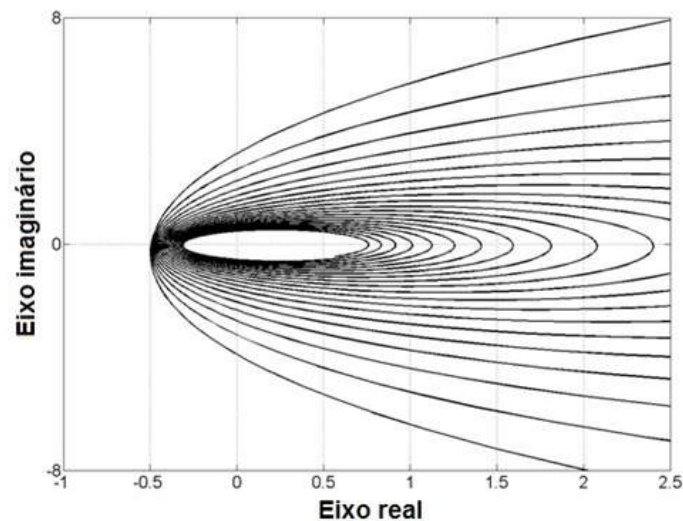
O diagrama de bode para o controlador proposto é mostrado na Figura 4.5. Os picos de ressonância aparecem nas frequências harmônicas, ou seja, o controlador fornece significativa ação de controle com o objetivo de eliminar essas componentes do erro do sistema, garantindo assim, erro nulo em regime permanente.

Figura 4.5: Diagrama de Bode do controlador.



A estabilidade do sistema da Figura 4.3 pode ser verificada a partir do diagrama de Nyquist, mostrado na Figura 4.6. Considerando os polinômios das funções (4.7) e (4.9) menos um, isto é, o critério de Nyquist é aplicado para a função de transferência de malha aberta $G_c(s)G_1(s)$, comum às três funções de transferência de malha fechada. A partir da Figura 4.6, é possível observar que a curva não envolve o valor -1 , portanto $N = 0$ e o sistema projetado é estável.

Figura 4.6: Diagrama de Nyquist do sistema.

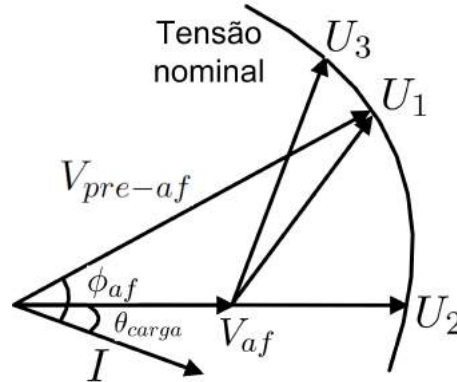


4.1 Estratégias de Injeção de Tensão na Rede

A principal tarefa do compensador série é manter a tensão nominal na carga. Na Figura 4.7 é mostrada a tensão pré-afundamento no ponto de acoplamento comum V_{pre-af} , que sofre um afundamento com salto de fase ϕ_{af} . A tensão afundada V_{af} pode ser compensada de diferentes maneiras para que a tensão na carga seja a tensão nominal. A injeção dessa tensão de compensação pode ser controlada para otimizar algum aspecto do sistema.

A seguir, serão descritas as três principais estratégias de inserção de tensão série na rede. Estas estratégias foram desenvolvidas por (NIELSEN e BLAABJERG, 2005) e estão ilustradas na Figura 4.7.

Figura 4.7: Diferentes tipos de compensação para afundamentos de tensão com salto de fase



- Compensação pré-afundamento (U_1): As tensões são compensadas para a condição pré-afundamento. Sem considerar que este pode ser um ponto de operação com elevado nível de injeção de tensão e potência ativa.
- Compensação otimizada pela amplitude (U_2): As tensões injetadas pelo compensador estão em fase as afundadas. Esta é a estratégia onde o menor nível de tensão é injetado para que a carga atinja a tensão nominal.

- Compensação otimizada pela potência (U_3): As tensões são compensadas de forma a minimizar a potência ativa fornecida pelo compensador série.

No método da compensação pré-afundamento, o V_{pre-af} é medido continuamente e a informação referente a sua amplitude e fase pré-afundamento é armazenada. Com a ocorrência do afundamento, o compensador série injeta uma tensão, U_1 , para que a carga mantenha-se com a mesma tensão da condição pré-afundamento.

$$U_1 = 1 - |V_{af}| \angle \phi_{af} \quad (4.25)$$

Na compensação otimizada pela amplitude, as tensões injetadas pelo compensador estão em fase com a do V_{pac} após o afundamento de tensão, ou seja, em fase com o V_{af} .

$$U_2 = (1 - |V_{af}|) \angle \phi_{af} \quad (4.26)$$

Na compensação otimizada pela potência, as tensões são compensadas de forma a minimizar a potência ativa fornecida pelo compensador série. O objetivo é determinar a magnitude e o ângulo da tensão injetada pelo compensador para que uma determinada queda de tensão ou afundamento possa ser corrigida com a mínima injeção de potência ativa no sistema. A formulação, desenvolvida por (HAQUE, 2001), para determinar os parâmetros desta tensão está descrita a seguir.

As potências ativas na carga e na fonte de alimentação podem ser escritas como:

$$P_{carga} = |V||I| \cos(\theta_{carga}), \quad (4.27)$$

$$P_{rede} = |V_{pac}||I| \cos(\theta_{rede}). \quad (4.28)$$

O ângulo θ_{carga} é o ângulo entre V e I e θ_{rede} é o ângulo entre V_{pac} e I . No sistema do compensador, a corrente da carga é a mesma da fonte de alimentação I . Com isso, a potência ativa injetada pelo compensador série, P_{Comp} é a diferença entre

(4.27) e (4.28) e é dada por:

$$P_{Comp} = P_{rede} - P_{carga}, \quad (4.29)$$

$$P_{Comp} = |V||I|[\cos(\theta_{carga}) - \left(\frac{|V_{pac}|}{|V|}\right)\cos(\theta_{rede})]. \quad (4.30)$$

Os valores bases utilizados foram a tensão da carga e a potência aparente da carga. A injeção de potência em p.u. pode ser escrita como:

$$P_{Comp,pu} = fp_{carga} - |V_{pac,pu}|\cos(\theta_{rede}). \quad (4.31)$$

Para um determinado valor de magnitude de tensão de alimentação e fator de potência da carga, a mínima injeção de potência ocorre quando

$$\cos(\theta_{rede}) = 1. \quad (4.32)$$

Para isso, $\theta_{rede} = 0$ ou V_{pac} e I estão em fase. O objetivo do compensador é manter a tensão da carga em 1 p.u. na ocorrência de afundamentos de tensão de magnitude $V_{af,pu}$. Neste caso, a amplitude da tensão da rede em p.u. pode ser escrita como:

$$|V_{pac,pu}| = 1 - |V_{af,pu}|. \quad (4.33)$$

Ao substituir (4.33) e (4.32) em (4.31), a equação da mínima potência ativa injetada pode ser obtida:

$$P_{Comp,pu}^{min} = |V_{af,pu}| - (1 - fp_{carga}). \quad (4.34)$$

A equação (4.34) indica que, quando $|V_{af,pu}| < (1 - fp_{carga})$, a $P_{Comp,pu}^{min}$ torna-se negativa. Assim o fluxo de potência flui na direção reversa (do sistema para o compensador série). No entanto, o compensador pode não suportar o fluxo de potência

reverso. Esta situação pode ser evitada ajustando o valor de θ_{rede} para que o fluxo de potência torne-se zero. O valor de θ_{rede} para fluxo de potência zero pode ser obtido de (4.31) e é dado por:

$$\theta_{rede} = \cos^{-1} \left(\frac{fp_{carga}}{1 - |V_{af,pu}|} \right). \quad (4.35)$$

Com isso, quando $|V_{af,pu}| < (1 - fp_{carga})$, a correção do afundamento pode ser realizada sem injeção de potência ativa mas a fase entre V_{pac} e I precisa ser definida pela equação (4.35).

Se $|V_{af,pu}| < (1 - fp_{carga})$, o compensador deve injetar uma tensão que satisfaça a equação (4.35) e que mantenha a tensão da carga em 1.0 p.u.. A tensão gerada pelo compensador pode ser escrita como:

$$U_{3,pu} = V_{pu} - V_{pac,pu}. \quad (4.36)$$

Considere V_{pac} como referência. Então V precisa ter um ângulo de $(\theta_{carga} - \theta_{rede})$ para evitar o fluxo de potência reverso. Note que o ângulo entre V e I é o fator de potência do ângulo θ_{carga} . Então, na forma polar:

$$V_{pu} = 1 \angle (\theta_{carga} - \theta_{rede}), \quad (4.37)$$

$$V_{pac,pu} = (1 - |V_{af,pu}|) \angle 0. \quad (4.38)$$

Para facilitar a operação aritmética entre os fasores, realiza-se a conversão para a forma retangular de (4.37) e (4.38).

$$V_{pu} = \cos(\theta_{carga} - \theta_{rede}) + j \sin(\theta_{carga} - \theta_{rede}), \quad (4.39)$$

$$V_{pac,pu} = (1 - |V_{af,pu}|)\cos(0). \quad (4.40)$$

Ao substituir (4.39) e (4.40) em (4.36), tem-se a equação de U_3 na forma retangular:

$$U_{3,pu} = [\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede}) - (1 - |V_{af,pu}|)] + j\sin(\theta_{carga} - \theta_{rede}). \quad (4.41)$$

Obtido o fasor $U_{3,pu}$, realiza-se a conversão para a forma polar com a finalidade de obter-se a magnitude e o ângulo da tensão a ser injetada.

$$|U_{3,pu}| = \{[\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede}) - (1 - |V_{af,pu}|)]^2 + [\sin(\theta_{carga} - \theta_{rede})]^2\}^{\frac{1}{2}}, \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} |U_{3,pu}| &= \{(\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede})^2 - 2(1 - |V_{af,pu}|)\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede}) + \\ &\quad (1 - |V_{af,pu}|)^2 + \sin(\theta_{carga} - \theta_{rede})^2)\}^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} |U_{3,pu}| &= \{\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede})^2 - 2(1 - |V_{af,pu}|)\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede}) + \\ &\quad 1 - 2|V_{af,pu}| + |V_{af,pu}|^2 + \sin(\theta_{carga} - \theta_{rede})^2\}^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} |U_{3,pu}| &= \{(\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede})^2 + \sin(\theta_{carga} - \theta_{rede})^2) - \\ &\quad 2(1 - |V_{af,pu}|)\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede}) + 1 - 2|V_{af,pu}| + |V_{af,pu}|^2\}^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$|U_{3,pu}| = \sqrt{|V_{af,pu}|^2 + 2(1 - |V_{af,pu}|)[1 - \cos(\theta_{carga} - \theta_{rede})]}. \quad (4.46)$$

A equação (4.46) representa a magnitude da tensão a ser injetada, $|U_{3,pu}|$ para que o compensador série compense o afundamento de tensão sem fornecer potência ativa. De (4.41), tem-se o ângulo α da tensão U_3 :

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\theta_{carga} - \theta_{rede})}{\cos(\theta_{carga} - \theta_{rede}) - (1 - |V_{af,pu}|)} \right]. \quad (4.47)$$

No caso de $|V_{af,pu}| > (1 - fp_{carga})$, a injeção de potência ativa é necessária para corrigir o afundamento, porém seu valor é mínimo quando V_{pac} e I estão em fase. O procedimento para obter a tensão a ser injetada para obter a mínima potência ativa injetada pelo compensador será discutido a seguir.

O compensador deve injetar uma tensão de forma que V_{pac} e I fiquem em fase enquanto a tensão da carga é mantida na referência. A tensão V_{pac} é considerada como referência, então o ângulo de V_{pac} e I deve ser zero. Com isso, o ângulo entre V e V_{pac} é θ_{carga} . Na forma polar, tem-se:

$$V_{pu} = 1 \angle \theta_{carga}, \quad (4.48)$$

$$V_{pac,pu} = (1 - |V_{af,pu}|) \angle 0. \quad (4.49)$$

Para facilitar a operação aritmética entre os fasores, realiza-se a conversão para a forma retangular de (4.48) e (4.49).

$$V_{pu} = \cos(\theta_{carga}) + j \sin(\theta_{carga}), \quad (4.50)$$

$$V_{pac,pu} = (1 - |V_{af,pu}|)\cos(0). \quad (4.51)$$

Ao substituir (4.50) e (4.51) em (4.36), tem-se a equação de $U_{3,pu}$ na forma retangular:

$$U_{3,pu} = [\cos(\theta_{carga}) - (1 - |V_{af,pu}|)] + j\sin(\theta_{carga}). \quad (4.52)$$

Após algumas manipulações matemáticas, realizadas de forma análoga a da equação (4.41), obtem-se a magnitude e o ângulo da tensão injetada, para compensar o afundamento com a mínima injeção de potência ativa, que são expressos como:

$$|U_{3,pu}| = \sqrt{|V_{af,pu}|^2 + 2(1 - |V_{af,pu}|)[1 - \cos(\theta_{carga})]}, \quad (4.53)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\theta_{carga})}{\cos(\theta_{carga}) - (1 - |V_{af,pu}|)} \right]. \quad (4.54)$$

Par utilizar os métodos de otimização descritos anteriormente é necessário ter as informações da tensão de referência escolhida. Para determinar as amplitudes e as fases dessa tensão será utilizado um algoritmo de estimação que será descrito a seguir.

4.2 Estimação por Mínimos Quadrados Recursivo

O algoritmo de estimação por mínimos quadrados recursivos é um algoritmo de estimação paramétrica para encontrar coeficientes que relacionam à produção recursiva de mínimos quadrados do sinal de erro. Os aspectos que levaram à escolha deste algoritmo dentre as outras técnicas de malhas de captura de fase são a rápida convergência e a simplicidade do algoritmo. Mesmo com estimativas iniciais não tão precisas, após algumas amostras, a estimação tem erro praticamente nulo.

Nesta seção, é descrito um algoritmo para estimação da amplitude e fase da tensão da rede. A partir da obtenção desta fase é possível realizar o sincronismo entre a tensão do compensador série e o outro parâmetro desejado, e assim poder aplicar as estratégias de otimização. Pode-se considerar a tensão da rede v_{pac} como uma onda senoidal da forma $v_{pac} = A_e \cos(\omega t + \phi)$. Esta equação pode ser decomposta em $v_{pac} = X_0 + X_1 \cos(\omega t) + X_2 \sin(\omega t)$. A determinação de $X = [X_0 \ X_1 \ X_2]$ é realizada por meio do método mínimos quadrados recursivo. Como resultado, a solução desta equação requer um cálculo de matrizes de ganho e covariância (NORTON, 1986). O algoritmo para estimar a amplitude e fase de um sinal está descrito a seguir (FERNANDES et al., 2008) :

1. Definir inicialmente $X = [0 \ 0 \ 0]$; a matriz de covariância $P = NI$, sendo I uma matriz identidade 3x3 e N um número grande o suficiente. Nas aplicações utilizadas neste trabalho, é razoável escolher $N = 5000$.
2. Fazer j variar de 1 até n :
 - (a) Escrever o vetor de regressores $H = [1 \ \cos \omega \ \sin \omega]$, sendo $\omega = (j - 1)\omega_s$;
 - (b) Calcular a matriz de ganho $K = \frac{1}{1 + HPH'} PH'$, sendo H' o transposto de H ;
 - (c) Calcular X : $X = X + (v - HX)K$;
 - (d) Calcular a partir de $X = [X_0 \ X_1 \ X_2]'$: $A_e = \sqrt{X_1^2 + X_2^2}$, $\phi = \text{atan}(-\frac{X_2}{X_1})$;
 - (e) Atualizar a matriz de covariância: $P = P - KHP$

A defasagem e a amplitude da tensão da rede podem ser determinadas no passo (d), representados pelas variáveis ϕ e A_e , respectivamente.

4.3 Conclusão

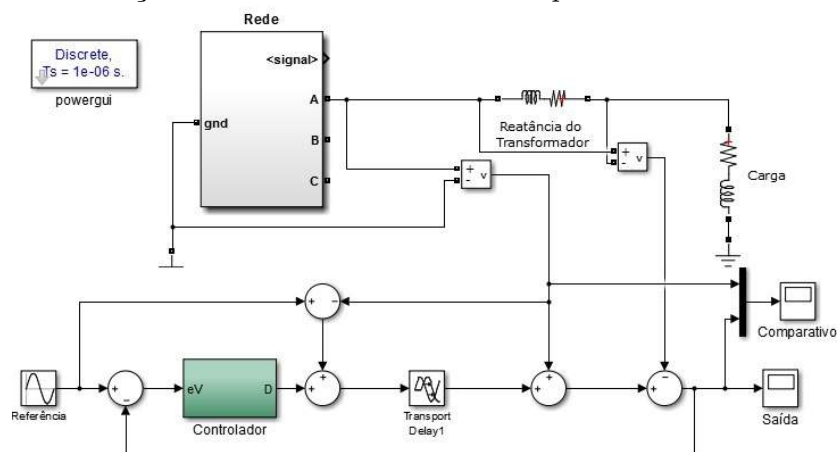
Neste capítulo foram apresentados o modelo e o controlador projetado, representado pela equação (4.24), para o compensador série que será utilizado tanto nas simulações como nos resultados experimentais. As estratégias de otimização pela amplitude e potência foram apresentadas, bem como o algoritmo utilizado para a obtenção da fase da rede que será utilizada para a realização das estratégias de otimização. Na otimização pela potência verificou-se que se a tensão afundada, V_{af} , é menor do que $1 - fp_{carga}$, então o afundamento pode ser corrigido sem que o compensador injete potência ativa. Nos casos em que o nível de tensão do afundamento é maior do que $1 - fp_{carga}$, é necessário que o compensador injete potência ativa e reativa para corrigir a tensão da carga.

Capítulo 5

Plataformas de Simulação e Experimental

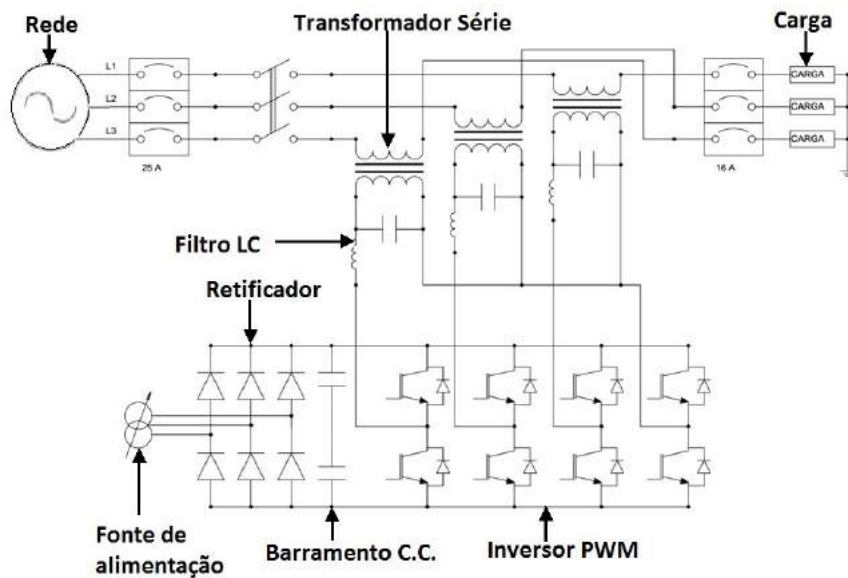
Neste capítulo, as plataformas de simulação e experimental de um sistema com compensador série é descrita. A partir deste sistema, o controle proposto para corrigir afundamentos de tensão e distorções harmônicas será avaliado. Para realizar testes, um modelo do sistema foi desenvolvido em ambiente *Simulink*[®] do *Matlab*[®] e pode ser observado na Figura 5.1.

Figura 5.1: Simulação do sistema de controle e compensador no ambiente Simulink.



Na Figura 5.1, o bloco Rede é uma fonte de tensão utilizada para simular a rede elétrica, o sinal de referência almejado está definido no bloco Referência, o bloco Controlador contém a função de transferência (4.24), o atraso do sistema está definido no bloco "Transport Delay1", a reatância do transformador e a carga também são definidas. A Figura 5.2 ilustra o diagrama esquemático da plataforma experimental. O compensador está entre a rede elétrica e a carga do sistema.

Figura 5.2: Diagrama esquemático utilizado na plataforma experimental do compensador série.



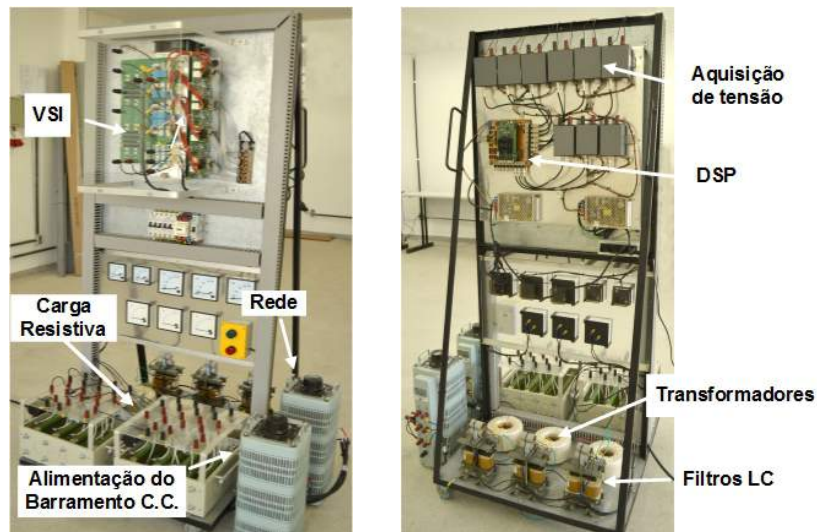
O compensador série de tensão foi construído em laboratório, como mostrado na Figura 5.3. A carga resistiva trifásica é alimentada pela rede trifásica e pelo compensador série. O compensador é constituído por transformadores, filtros LC, inversores de tensão e um controlador digital de sinais. Os transformadores são os elementos passivos do compensador que o conectam à rede. O filtro LC no compensador de tensão tem a função de eliminar as componentes harmônicas das tensões moduladas do inversor de tensão. O principal dispositivo do sistema compensador é o inversor fonte de tensão (VSI), composto por quatro braços. O sistema de aquisição é formado por sensores de

efeito *Hall* para tensões. O processamento é realizado pelo controlador digital de sinais, TMS320F28335, da Texas Instruments. Todos os testes foram realizados com cargas resistivas, dispostas em bancos de resistores de potência. Cada resistor que compõe o banco tem uma resistência de 200Ω .

A seguir, os componentes anteriormente citados serão descritos com mais detalhes.

Figura 5.3: Plataforma experimental.

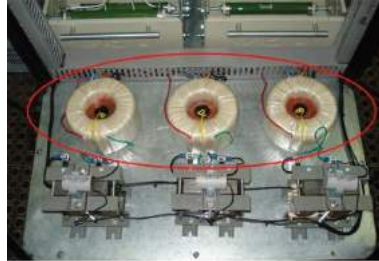
- (a) Visão frontal da plataforma experimental. (b) Visão traseira da plataforma experimental.



5.1 Transformador

Os transformadores utilizados pelo sistema compensador série são mostrados na Figura 5.4. O núcleo dos transformadores é feito de material ferromagnético de grãos orientados em forma toroidal. Estas características visam minimizar as dispersões de indução. A relação de espiras do secundário para o circuito primário do transformador é de 1:1.

Figura 5.4: Transformadores utilizados no compensador série.



5.2 Retificador

O compensador série precisa de uma fonte de energia para operar. Este fornecimento de energia pode ser realizado pelo próprio sistema, bateria ou outro sistema. Neste trabalho o compensador série é alimentado por um varivolt e a energia é retirada através de um retificador trifásico com pontes de diodo. O retificador pode ser observado na Figura 5.2.

Nos retificadores trifásicos a corrente é distribuída entre as três fases para evitar desequilíbrios que poderiam ocorrer caso a corrente circulasse em apenas uma ou duas fases. A corrente é fornecida, no intervalo de 60 graus por apenas duas das três fases. As fases que estarão em condução simultânea são aquelas que apresentarem o maior módulo de magnitude de tensão. Então, a fase que for mais positiva poderá levar o diodo conectado à mesma na semi-ponte superior à condução. Na semi-ponte inferior, o diodo conectado à fase com tensão mais negativa irá conduzir. Na fase com tensão intermediária, não haverá circulação de corrente.

5.3 Filtro LC

A função do filtro LC no compensador de tensão é eliminar as componentes harmônicas da tensão oriundas da comutação das chaves do inversor de tensão. A seleção de

parâmetros do filtro LC é um fator determinante no resultado da compensação, pois o circuito LC atuará como um filtro passa-baixas, onde a frequência de corte deve ser mais elevada do que a frequência fundamental da rede e menor do que a frequência da menor harmônica da tensão modulada. No modelo proposto por esse trabalho, foram utilizados indutores para cada fase e cada um com $2mH$. Os capacitores utilizados têm $16\mu F$. Com isso, o filtro LC está projetado para atenuar os harmônicos provenientes do chaveamento em alta frequência do inversor. A Tabela 5.1 resume os parâmetros referentes ao filtro LC.

Tabela 5.1: Parâmetros do filtro LC.

Parâmetro	Valor
L	$2mH$
C	$16\mu F$
f_c	$889.7Hz$

5.4 Fontes de alimentação

Tanto a rede elétrica que alimenta a carga, quanto a alimentação do barramento de corrente contínua do inversor fonte de tensão foram realizadas utilizando-se varivolts trifásicos. Com isso, a plataforma experimental tem a flexibilidade de poder trabalhar com diferentes níveis de tensão na rede e no barramento de corrente contínua do inversor fonte de tensão. Como o laboratório não dispunha de um gerador de distúrbios para realizar o afundamento da tensão da rede dinamicamente, a alimentação será feita pelo varivolt e será considerado que o sistema já está com afundamento de tensão. A Figura 5.5 mostra o varivolt utilizado nos experimentos deste trabalho.

Figura 5.5: Varivolt utilizado na plataforma experimental.



5.5 Sensor de tensão

Para sensoriamento de tensão é utilizado o transdutor com laço-fechado (compensado) LV 20 da *LEM components*. Para seu funcionamento, uma corrente proporcional à tensão medida deve percorrer uma resistência externa, que é selecionada pelo usuário e conectada em série com o circuito primário do transdutor. Para isso, um resistor de potência de $40k\Omega/20W$ é conectado em série com os terminais de entrada do sensor. O condicionamento de tensão é necessário porque o microcontrolador exige que a entrada de tensão Analógica/Digital esteja entre zero e 3,3V. A Figura 5.6 mostra o o circuito de condicionamento de tensão utilizado na plataforma.

5.6 Controlador Digital de Sinais

DSCs (do inglês, *Digital Signal Controllers*) são microcontroladores com características próprias que podem ser programados e operam em tempo real, com velocidades muito superiores aos microcontroladores para aplicações genéricas. O DSC é um dispositivo programável, onde os fabricantes disponibilizam seus próprios códigos de instruções, bem como o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês, *Integrated Development Environment*), tornando fácil e rápida a manipulação do microcontrolador.

Figura 5.6: Circuito de condicionamento de tensão.



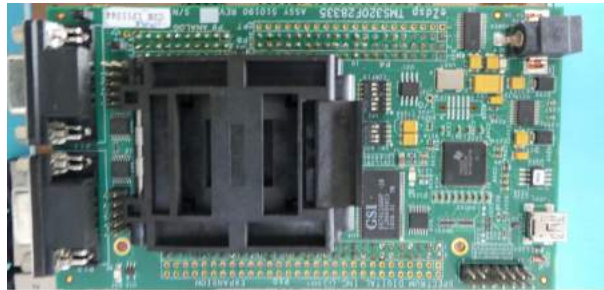
O DSC comunica-se com o computador, utilizado para a programação, por meio da interface USB. A programação do DSC é realizada no software Code Composer Studio (CCS) disponibilizado pelo fabricante, que permite escrever, compilar e carregar o código no DSC em C/C++ e em Assembler. O CCS compreende um conjunto de ferramentas para análise e depuração de códigos em tempo real, pois possui ferramentas úteis na fase de depuração do programa, editor de código fonte, depurador, ambiente de construção do projeto e muitos outros recursos. O DSC só passa a operar em modo autônomo, quando o programa desenvolvido é gravado em sua memória *flash*.

Nesta dissertação, o kit de desenvolvimento é o eZdsp F28335 da *Texas Instruments* pois para esta aplicação foi escolhido o DSC *TMS320F28335*. A Figura 5.7 mostra o DSC e das características deste controlador, pode-se destacar (Instruments, 2007):

- Velocidade de operação de até 150 Mhz;
- Unidade de ponto flutuante de 32 bits;
- Memória interna ao chip
 - 68K bytes de RAM;

- 512K bytes de Flash;
 - 256K bytes de SRAM.
- Conversor Analógico/Digital (A/D) com 16 canais de entrada de 12 bits cada;
- Oscilador de 30 MHz *onboard*;
- Conector RS-232;
- Interface com memória externa;
- Conector para múltiplas expansões de entradas e saídas;
- Tensões de entrada e saída que variam entre 0 e 3,3 V;
- Operação em 5V fornecido por um adaptador AC.

Figura 5.7: DSC da *Texas Instruments TMS320F28335*.



Com o eZdsp *F28335* são fornecidos os seguintes arquivos e programas:

- TI F28xx Code Composer Studio (CCS) v.5.5;
- TI Flash APIs para suporte do F28335;
- TI F28335 arquivos de cabeçalho e exemplos de programas.

5.7 Inversor de Tensão

Inversores de tensão são circuitos usados para converter uma tensão contínua em alternada. A tensão deve ser alternada pois ela está inserida no sistema ligado à rede, que tem tensão alternada, e deve complementar os possíveis afundamentos de tensão. A sua entrada é composta por um barramento de corrente contínua e sua saída fornece uma tensão alternada produzida através do chaveamento dos IGBTs que compõem o inversor. O controle do chaveamento é realizado pelo controlador digital de sinais. O inversor de tensão utilizado na plataforma contém 4 braços. Este inversor é apropriado para a sintetização das tensões simétricas ou assimétricas. A Figura 5.8 mostra o inversor de tensão utilizado neste trabalho.

Figura 5.8: Inversor de tensão de quatro braços.



5.8 Conclusão

O sistema com o compensador série proposto foi implementado no *Simulink*[®] do *Matlab*[®] e construído em laboratório. As principais partes da plataforma experimental foram descritas. Então, a técnica de controle descrita no capítulo anterior foi implementada no controlador digital de sinais para corrigir afundamentos de tensão e as distorções harmônicas. O laboratório não dispunha de um gerador de distúrbios para realizar o afundamento dinamicamente, então nos experimentos a tensão já estará afundada.

Capítulo 6

Resultados

Experimentos foram realizados com o objetivo de validar o modelo, o controlador e as estratégias de injeção de tensão propostas no capítulo 4. Os problemas de qualidade de energia reproduzidos nos experimentos foram os afundamentos de tensão e distorções harmônicas. O processo de correção destes distúrbios é realizado *online*. O resultado das simulações e experimentos estão dispostos a seguir.

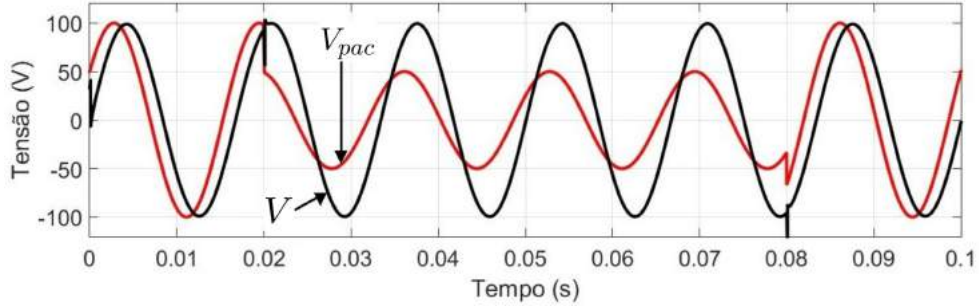
6.1 Simulação

As simulações foram desenvolvidas em ambiente *Simulink*[®] do *Matlab*[®], apresentado no capítulo 5. Os cenários testados para verificar o desempenho do sistema foram os de tensão afundada, distorções harmônicas e a utilização de estratégias de otimização.

6.1.1 Afundamentos

No primeiro experimento, a Figura 6.1 mostra um afundamento de tensão de 50% iniciado em 20ms e termina em 80ms. A tensão de referência da carga foi definida para $100V_{pico}$. Como pode ser observado, a tensão na carga é restaurada e alcança o valor nominal que era disponibilizado pela rede antes do afundamento.

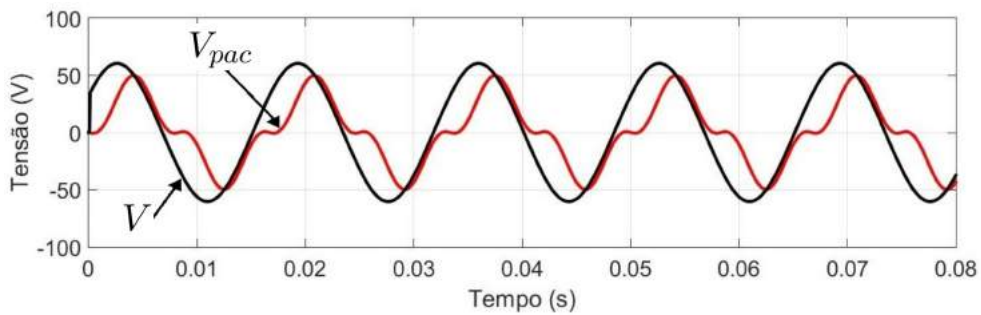
Figura 6.1: Tensão da rede afundada e tensão de saída controlada pelo sistema proposto.



6.1.2 Afundamentos e distorções harmônicas

No segundo cenário, o compensador série corrige o afundamento e os harmônicos que surgiram a partir da rede. A tensão de referência é definida para $60V_{pico}$. As tensões distorcidas e corrigidas na fase A são mostradas na Figura 6.2. O sistema de controle elimina as componentes harmônicas sem a necessidade da utilização de qualquer filtro de seleção de harmônicos, como é usualmente proposto por LI e HE. (2014). O resultado é satisfatório, pois a distorção é eliminada e a tensão fundamental é restaurada para seu valor nominal.

Figura 6.2: Tensão da rede com distorção harmônica e tensão de saída controlada pelo sistema proposto.



6.1.3 Otimização

Além de corrigir os afundamentos de tensão, algumas estratégias foram utilizadas para otimizar a inserção da tensão de compensação. As estratégias utilizadas foram a de otimização pela amplitude da tensão injetada pelo compensador e a otimização pela potência, em que o compensador injeta a menor potência ativa para corrigir a tensão da carga para o valor de referência. Nas simulações foram utilizadas duas cargas com fatores de potência diferentes, 0,5 e 0,7. Em ambas as simulações, os parâmetros utilizados foram os mesmos, a tensão de referência é $40V_{pico}$ e o afundamento é de 40%.

As Figuras 6.3 e 6.4 mostram a correção da tensão na carga durante o afundamento da tensão com a utilização da estratégia de otimização pela amplitude para cargas com fatores de potência 0,5 e 0,7, respectivamente. Nestas figuras estão a tensão afundada, a restaurada na carga, a injetada pelo compensador série e a corrente da carga. Nesta estratégia, o compensador série injeta uma tensão em fase com a tensão da rede. Das Figuras 6.3 e 6.4 tem-se que a menor amplitude da tensão de compensação U para que a tensão da carga V seja a tensão de referência V^* é obtida quando as tensões U e V_{pac} estão sincronizadas.

Figura 6.3: Resultado da correção com otimização pela amplitude: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,5.

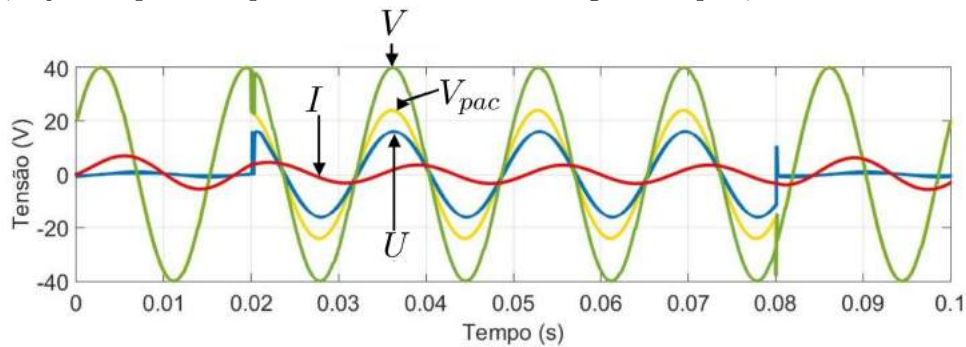
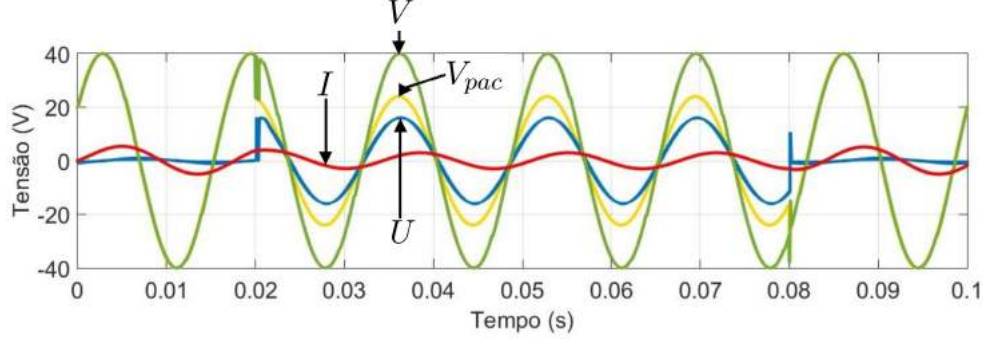
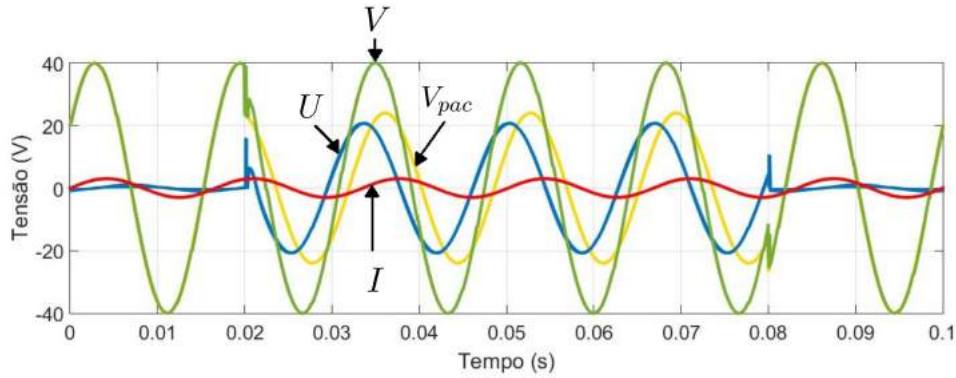


Figura 6.4: Resultado da correção com otimização pela amplitude: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,7.



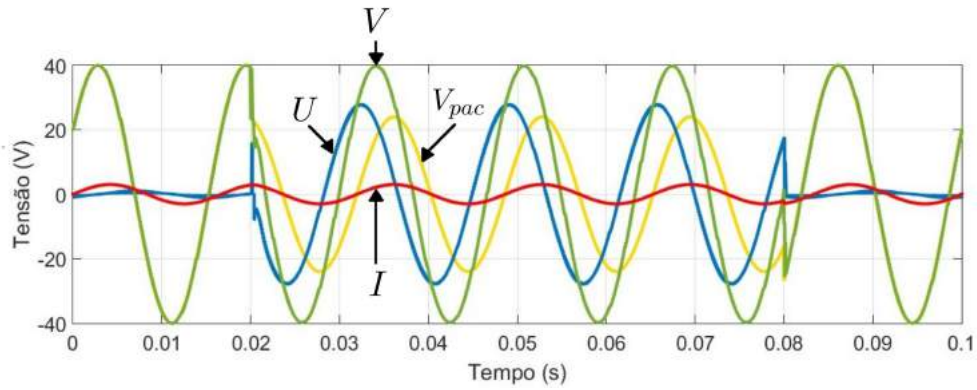
Nas figuras 6.5 e 6.6, a estratégia de otimização utilizada foi a de otimização pela potência para cargas com fatores de potência 0,5 e 0,7, respectivamente. Para a carga com fator de potência igual a 0,5, a condição $|V_{af}| < (1 - f_{p_{carga}})$ é verdadeira. Com isso, a compensação do afundamento pode ser realizada sem injeção de potência ativa mas a fase entre V_{pac} e I precisa ser definida pela equação (4.35). Nesta condição, a magnitude e ângulo da tensão injetada pelo compensador devem ser definidos pelas equações (4.46) e (4.47), respectivamente. Então, ao substituir os parâmetros do experimento nas equações (4.46) e (4.47), tem-se que a tensão a ser injetada pelo compensador para compensar o afundamento sem injeção de potência ativa é $U = 21,37 \angle 56,4^\circ V$.

Figura 6.5: Resultado da correção com otimização pela potência: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,5.



Ao realizar a simulação com a carga com fator de potência igual a 0,7, a condição $|V_{af}| > (1 - f_{p_{carga}})$ é verdadeira. Então, para compensar o afundamento de tensão é necessária a injeção de potência ativa mas ela é minimizada quando V_{pac} e I estão em fase. Nesta condição, a magnitude e ângulo da tensão injetada pelo compensador devem ser definidos pelas equações (4.53) e (4.54), respectivamente. Então, ao substituir os parâmetros do experimento nas equações (4.53) e (4.54), tem-se que a tensão a ser injetada pelo compensador para compensar o afundamento com a mínima injeção de potência ativa é $U = 28,84 \angle 82^\circ \text{ V}$.

Figura 6.6: Resultado da correção com otimização pela potência: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,7.



Ao utilizar as estratégias de otimização pela amplitude e potência para compensar o afundamento de tensão, o compensador série injetou as tensões e correntes descritas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Comparativo das estratégias de otimização nas simulações.

Fp. da Carga	Estratégia	U (V)	I (mA)	Potência Ativa (W)
0,5	Otimi. Ampl.	16	397	3,176
	Otimi. Energia	21,37	395	0
0,7	Otimi. Ampl.	16	375	4,2
	Otimi. Energia	28,84	365	1,46

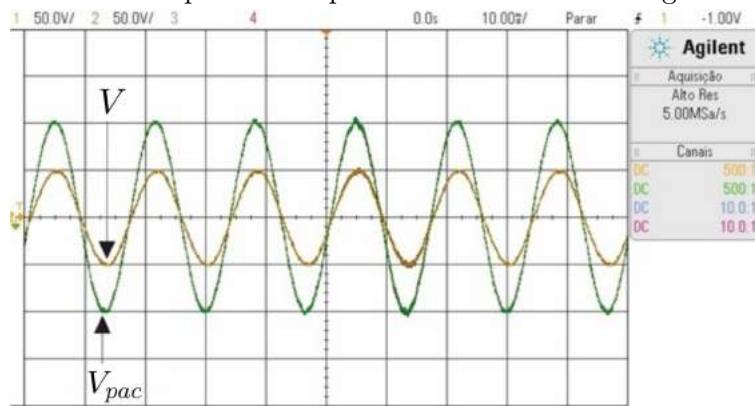
6.2 Resultados Experimentais

Experimentos foram realizados com objetivo de testar o desempenho do compensador montado como plataforma experimental e validar a implementação do controle e as estratégias propostas. O experimento é realizado já no momento do afundamento, pois o laboratório não dispunha de um gerador de distúrbios para realizá-lo dinamicamente. O processo de correção dos distúrbios na alimentação de tensão acontece *online*.

6.2.1 Afundamentos

A Figura 6.7 exhibe o resultado do primeiro experimento, onde as tensões de referência para a carga são $100V_{pico}$ e o afundamento forçado é de 50%. O compensador atua de forma a corrigir a tensão da carga para o seu valor nominal de referência.

Figura 6.7: Resultado do primeiro experimento: Tensões na carga e na rede elétrica.

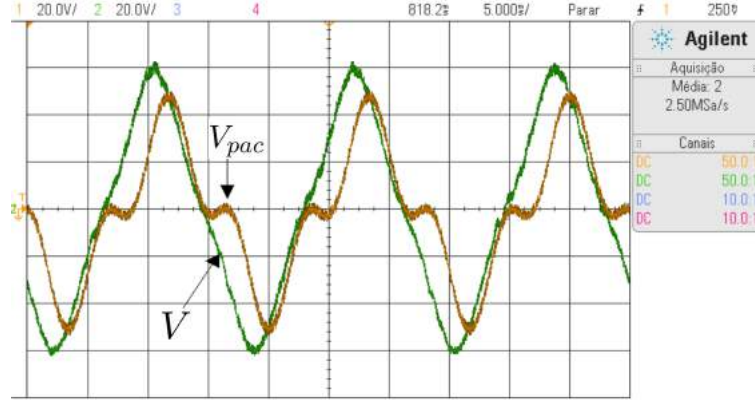


6.2.2 Afundamentos e distorções harmônicas

O segundo experimento, que pode ser observado na Figura 6.8, mostra a tensão da rede afundada e distorcida em relação a referência da carga que é de $60V_{pico}$. O compensador série injeta a tensão necessária para mitigar o efeito das distorções harmônicas na carga. Com isso, a tensão da carga se aproxima de uma senóide com a amplitude

da referência pré-estabelecida.

Figura 6.8: Resultado do segundo experimento: Tensão distorcida na rede elétrica e corrigida na carga.



Para realizar a análise da qualidade da energia, será utilizado o indicador THD (total de distorção harmônica) que traduz através de uma só grandeza a deformação da onda em tensão. A norma da (ANEEL, 2010) estabelece que para sistemas com tensão nominal menores que $1kV$ a distorção harmônica total de tensão deve ser menor que 10% e este valor será tomado como referência. Para a leitura de tensão realizada em um determinado período, um conjunto de componentes harmônico da 2^a até a 25^a ordem é armazenado. Este conjunto com as componentes harmônicas é utilizado para calcular o THD de tensão. Para realizar o cálculo do THD de cada leitura é utilizada a fórmula:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100. \quad (6.1)$$

sendo:

V_h = harmônica de tensão de ordem h;

V_1 = harmônica de tensão fundamental.

Para determinar as amplitudes das componentes harmônicas do sinal, foi utilizado a função FFT do osciloscópio. Nesta função, um algoritmo utiliza a Transformada de

Fourier Compacta (em inglês *Fast Fourier Transform*, FFT) para um grande número de janelas temporais de observação. As figuras 6.9 e 6.10 ilustram o espectro da tensão distorcida e a controlada pelo compensador, com THD de 39,66% e 6,86% respectivamente. A tensão do sistema controlado obteve uma redução do THD em comparação com a tensão da rede.

Figura 6.9: Espectro da tensão distorcida na rede elétrica.

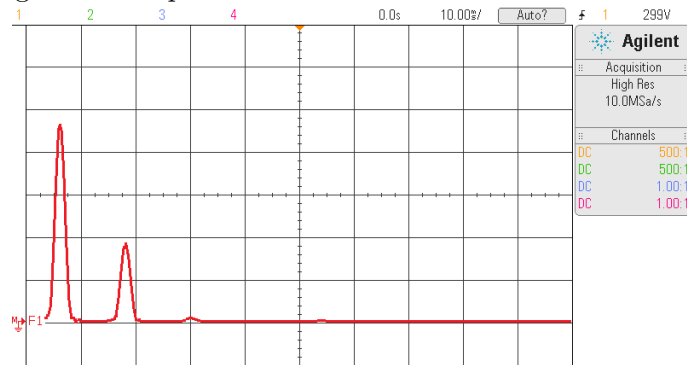
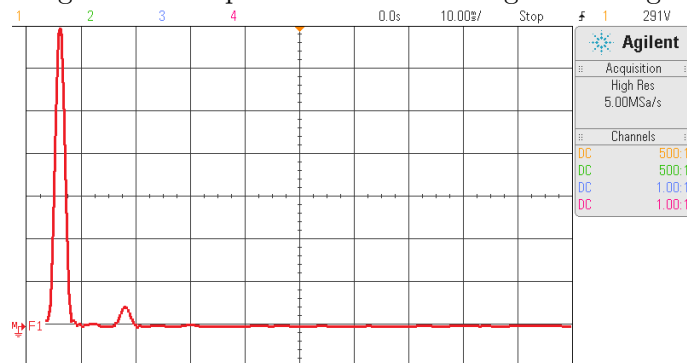


Figura 6.10: Espectro da tensão corrigida na carga.



6.2.3 Otimização

Para realizar os experimentos com a utilização de estratégias de otimização, a carga do sistema, anteriormente resistiva, foi substituída por cargas com fator de potência de 0,5 e 0,7 para uma melhor análise das diferenças entre as estratégias. Para as duas estratégias, foram definidos os mesmos parâmetros de tensão de referência e do afundamento. As tensões de referência para a carga são $40V_{pico}$ e o afundamento é de 40%.

Na estratégia de otimização pela amplitude, as tensões da rede, carga e injetadas pelo compensador devem estar em fase. Para realizar o sincronismo entre os sinais, o ângulo da tensão da rede foi estimado em tempo real utilizando-se o algoritmo dos mínimos quadrados descrito no capítulo 4. O sinal de referência do controlador foi definido para ter a amplitude da tensão nominal e a mesma fase da tensão da rede. O compensador injeta uma tensão em fase com a da rede. Com isso, a tensão injetada pelo compensador série é a mesma independente do fator de potência da carga. Os valores da tensão de correção estabelecida pelo compensador e da corrente da carga estão na Tabela 6.2.

As Figuras 6.11 e 6.12 mostram a correção da tensão nas carga com fator de potência 0,5 e 0,7 durante o afundamento da tensão com a utilização da estratégia de otimização pela amplitude. Nestas figuras estão as tensões afundadas, as restauradas na carga, as injetadas pelo compensador série e as correntes da carga.

Figura 6.11: Resultado da correção com otimização pela amplitude: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com $\text{fp. } 0,5$.

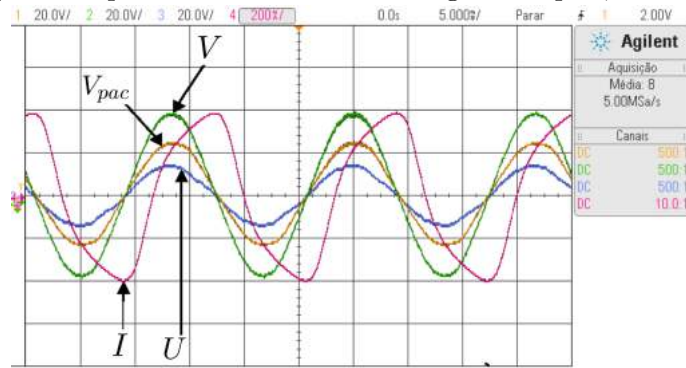
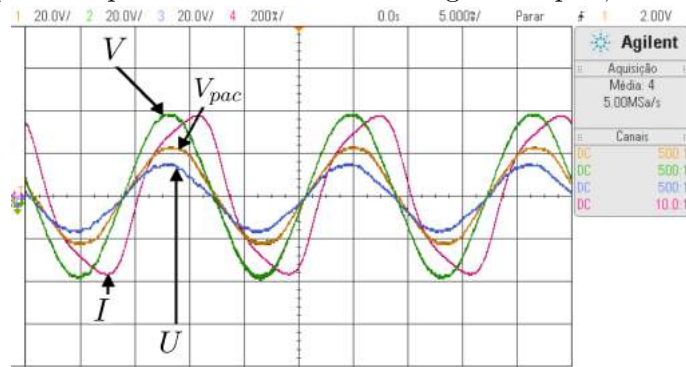


Figura 6.12: Resultado da correção com otimização pela amplitude: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com $\text{fp. } 0,7$.



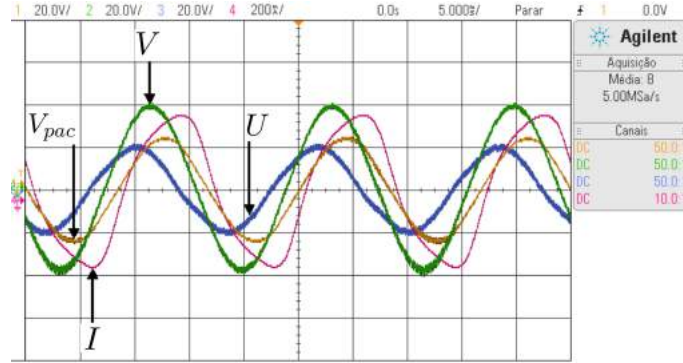
Na estratégia de otimização pela potência, a tensão gerada pelo compensador deve ser calculada *online* para garantir que o compensador série injete a menor potência ativa para compensar o afundamento de tensão. Para realizar o sincronismo entre os sinais, o ângulo das tensões da rede e da carga foram estimados em tempo real utilizando-se o algoritmo dos mínimos quadrados. Em seguida, são calculados uma magnitude e um ângulo da tensão que deve ser injetada pelo compensador série.

As Figuras 6.13 e 6.14 mostram a correção da tensão nas cargas com fator de potência de 0,5 e 0,7 durante o afundamento da tensão com a utilização da estratégia de otimização pela potência. Nas figuras estão a tensão afundada, a restaurada na carga,

a injetada pelo compensador série e a corrente da carga.

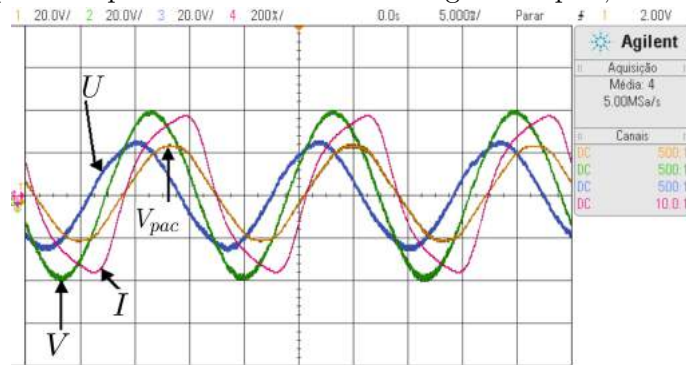
No experimento da Figura 6.13, o afundamento de 40% é forçado e a carga tem fator de potência 0,5, então a tensão afundada, V_{af} é menor que $(1 - fp_{carga})$. Neste caso, nenhuma injeção de potência ativa é necessária para corrigir a tensão desde que a magnitude e o ângulo da tensão injetada pelo compensador sejam definidos pelas equações (4.36) e (4.47), respectivamente. Então, ao substituir os parâmetros do experimento nas equações (4.36) e (4.47), tem-se que a tensão a ser injetada pelo compensador para compensar o afundamento sem injeção de potência ativa é $U = 21,37\angle 56,4^\circ V$.

Figura 6.13: Resultado da correção com otimização pela potência: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,5.



Na Figura 6.14, o fator de potência da carga é 0,7 e o afundamento é 40%. Neste caso, V_{af} é maior que $(1 - fp_{carga})$, então a injeção de potência ativa é necessária, porém o valor pode ser minimizado ao fazer com que a potência ativa drenada da fonte de alimentação seja máxima. Para isso, a magnitude e ângulo da tensão injetada pelo compensador devem ser definidos pelas equações (4.53) e (4.54), respectivamente. Então, ao substituir os parâmetros do experimento nas equações (4.53) e (4.54), tem-se que a tensão a ser injetada pelo compensador para compensar o afundamento com a mínima injeção de potência ativa é $U = 28,84\angle 82^\circ V$.

Figura 6.14: Resultado da correção com otimização pela potência: Tensões na carga, rede, injetada pelo compensador e corrente na carga com fp. 0,7.



Ao aplicar as estratégias de otimização pela amplitude e potência no mesmo cenário de afundamento, pode-se comparar os dois métodos. As tensões, correntes e potências ativas aplicadas pelos dois métodos para compensar o mesmo afundamento podem ser observadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Comparativo das estratégias de otimização dos experimentos.

Fp. da Carga	Estratégia	U (V)	I (mA)	Potência Ativa (W)
0,5	Otimi. Ampl.	14,6	395	2,88
	Otimi. Energia	21,3	400	0
0,7	Otimi. Ampl.	16,3	374	4,26
	Otimi. Energia	28,8	367	1,47

A estratégia de otimização pela amplitude injeta a menor amplitude para que a tensão da carga seja igual a de referência, ou seja, injeta uma tensão em fase com a afundada. A otimização pela potência minimiza a potência injetada pelo compensador para compensar um afundamento de tensão, como pode ser comprovado com os dados da Tabela 6.2. A otimização pela potência é recomendada para diminuir a geração de potência ativa do compensador e aumentar a duração da carga do componente de armazenamento de energia do compensador.

Capítulo 7

Conclusões

O objetivo deste trabalho foi encontrar um controlador para mitigar os efeitos de distorções harmônicas e afundamentos de tensão advindos da rede, pois a maioria dos controladores têm seus desempenhos deteriorados quando aplicados a este cenário com os dois distúrbios combinados. Para isso, foi proposto um sistema de controle para um compensador série baseado em um controle repetitivo. A estabilidade do controle repetitivo foi assegurada por um filtro passa-baixas que atenua os picos acima de uma frequência de ressonância fundamental.

Diferentes cenários foram testados com afundamentos de tensão e distorções para verificar a validade do sistema de controle proposto. Em todos, os parâmetros de controle são os mesmos. Nos cenários de afundamentos de tensão, a tensão de referência foi estabelecida na carga. Quando há distorções harmônicas, o compensador atua de forma a injetar uma tensão para corrigir as distorções e garantir uma tensão que se aproxime de uma senóide. Os resultados das simulações e dos experimentos mostram a sua eficácia do controle repetitivo para corrigir distorções harmônicas e afundamentos.

Duas estratégias de otimização foram testadas neste trabalho, a otimização pela amplitude e a de potência. Em ambas, os parâmetros de controle foram os mesmos e foi forçado um afundamento. O algoritmo de mínimos quadrados foi implementado para

estimar o sinal desejado e tornar possível manipular a referência, de forma a sincronizá-la com o parâmetro desejado dependendo da estratégia. As duas estratégias atingiram o objetivo almejado de otimizar o parâmetro escolhido.

Na estratégia de otimização pela amplitude, a amplitude da tensão injetada pelo compensador é mínima quando a tensão fornecida pelo compensador é injetada em fase com a tensão de alimentação. Mas essa operação pode necessitar de uma quantidade considerável de injeção de potência ativa para o sistema. Na estratégia de otimização pela potência, o compensador série atua para minimizar a injeção de potência ativa do compensador, dessa forma, a mesma capacidade de armazenamento de energia pode ser utilizada por um período mais longo. Porém, para alcançar o ponto de operação onde a potência ativa injetada é mínima e o afundamento é corrigido, é necessário injetar um nível de tensão que pode não ser suportado pela fonte de alimentação do compensador.

Na estratégia de otimização pela potência, verificou-se que se a tensão afundada, $|V_{af}|$, é menor do que $1 - fp_{carga}$, então o afundamento pode ser corrigido sem que o compensador injete potência ativa. Já para casos em que o nível de tensão do afundamento é maior do que $1 - fp_{carga}$, é necessário que o compensador injete potência ativa e reativa para corrigir a tensão da carga. Então, conclui-se que é necessário realizar um projeto para a utilização de compensadores série de acordo com as necessidades de cada aplicação e estratégia utilizada.

Para a continuação dos estudos realizados nesta dissertação, propõe-se os seguintes trabalhos futuros:

- A utilização de um gerador de distúrbios para verificar a dinâmica do controlador.
- O desenvolvimento e implementação do algoritmo de estimação por mínimos quadrados recursivo para sinais com distorções harmônicas.
- A implementação das estratégias de otimização para sistemas com afundamentos e distorções harmônicas.

Referências Bibliográficas

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)**, Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica. Brasília, Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.anel.gov.br>>. Acesso em: Julho de 2015.

BIANCHIN, C. G.; CERRADA, A. G.; HASANIN, B. **Pesquisa e aplicação de restauradores dinâmicos de tensão (dvr) em linhas de distribuição**. VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. Poços de Caldas, Agosto, 2008.

BOLLEN, M.H.J.; ZHANG, L.D. **Analysis of voltage tolerance of AC adjustable-speed drives for three-phase balanced and unbalanced sags**. *IEEE Transactions* v. 36, n. 3, p. 904-910, June, 2000.

CARATI, E. G. **Controle Adaptativo Robusto por Modelo de Referência e Controle Repetitivo em Tempo Discreto: Uma Abordagem Entrada/Saída**. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

CHANG, M. Y.; JUNG, S. L.; OU, R. S.; TZOU, Y. Y. **High-performance programmable AC power source with low harmonic distortion using DSP-based repetitive control technique**. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, v. 12, n. 4, p. 715-725, 1997.

CHAUDHARY, S. H.; GANGIL, G. **Mitigation of voltage sag or swell using dynamic voltage restorer (dvr)**. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*. v. 8, n. 4, p. 21-38, December, 2013.

DESHMUKH, S. M.; DEWANI, B. **Overview of dynamic voltage restorer (dvr) for power quality improvement**. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. v. 2, n. 6, p. 1372-1377, December, 2012.

FERNANDES, D. A. **Um Restaurador Dinâmico de Tensão para Correções de Variações de Tensão de Curta Duração em Redes Elétricas Trifásicas**. Tese de doutorado - Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

FERNANDES, D. A.; NAIDU, S. R.; COURAJR, C. A. E. **Instantaneous sequence components resolution of 3-phase variables and its application to dynamic voltage restorer**. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, p. 1-4, May, 2007.

FLORES, J. V.; SILVA, J. M. G.; PEREIRA, L. F. A.; SBARBARO D. **Robust repetitive control with saturating actuators: a LMI approach**. *American Control Conference (ACC)*, p.4259-4264, 2010.

GUO, S. **Fast repetitive controller based low-voltage dynamic voltage restorer for voltage-quality issues in distribution system**. *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, n. 8, p. 988-992, June, 2010.

HAQUE, M. H.; **Voltage sag correction by dynamic voltage restorer with minimum power injection**. *IEEE Power Engineering Review*, v. 1, n.1, p. 56-58, May, 2001.

HARA, S.; YAMAMOTO, Y.; OMATA, T.; NAKANO, M. **Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals**. *Automatic Control, IEEE Transactions*, v. 33, n. 7, p. 659-668, July, 1988.

INOUE, T.; NAKANO, M.; IWAI, S. **High accuracy control of servomechanism for repeated contouring**. *10th anual Symposium on Incremental Motion, Control System and Devices*, p. 285-292, 1981.

JOTHIBASU, S.; MISHRA, M.; **An improved direct ac-ac converter for voltage sag mitigation**. *IEEE Trans. Ind. Electron*, v. 62, n. 1, p. 21-29, January, 2015.

KARIMIAN, M.; JALILIAN, A. **Proportional-repetitive control of a dynamic voltage restorer (dvr) for power quality improvement.** *Electrical Power Distribution Networks (EPDC)*, p. 1-6, May, 2012.

LI, Y. W.; HE., J. **Distribution system harmonic compensation methods,** *IEEE Ind. Electron. Mag.*, v. 8, n. 4, p. 18-31, December, 2014.

MCGRANAGHAN, M.F.; DUGAN, R.C.; SANTOSO, S.; BEATY, H.W. **Electrical Power Systems Quality.** *Mcgraw-hill*, p. 528, 2002.

MOHAMMED, S. A.; CERRADA, A. G.; HASANIN, B. **Conventional dynamic voltage restorer (dvr) for mitigation of voltage sag in power distribution systems.** *International Journal of Advances in Engineering and Technology (IJAET)*, v. 6, n. 1, p. 415-425, March, 2013.

NIELSEN, J.G.; BLAABJERG, F. **A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers.** *IEEE Trans. Ind. Appl.*, v. 41, n. 5, p. 1272-1280, 2005.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle.** *LTC*, p. 447, 2002.

NORTON, J. P. **An introduction to identification.** *New York, Dover Publications*, 2009.

OLIVEIRA, A. F. B.; SILVA, S. M.; SANTOS, C. H. G.; FILHO, B. J. C. **Aplicação do controle repetitivo a inversor PWM monofásico com filtro LC de saída utilizado em fonte programável C.A.** *Eletrônico de potência, Campo Grande*, v. 18, n. 4, p. 1161-1169, Novembro, 2013.

PERERA, M. V. K. **Control of a Dynamic Voltage Restorer to compensate single phase voltage sags.** *Dissertação de mestrado - KTH Electrical Engineering*, 2007.

PEREZ, J.; CERRADA, A.; MACHO, J.; SANCHEZ, P.; ACHA, E. **Adaptive repetitive controller for a three-phase dynamic voltage restorer.** *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, p. 1-6, May, 2011.

SANCHEZ, P.; ACHA, E.; CALDERON, J.; FELIU, V.; CERRADA, A. **A versatile control scheme for a dynamic voltage restorer for power quality improvement.** *IEEE Trans. Power Del*, v. 24, n. 1, p. 277-284, January, 2009.

SARMIENTO, H.; ESTRADA, E. A. **Voltage Sag Study in an Industry With Adjustable Speed Drives.** *IEEE Industry Applications Magazine*, p.16-19, January, 1996

SHARANYA M.; BASAVARAJA, B.; SASIKALA M. **An overview of dynamic voltage restorer for voltage profile improvement.** *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, v. 2, n. 2, December, 2012.

TORABI, S.; NAZARPOUR, D.; SHAYESTEHFARD, Y. **Compensation of sags and swells voltage using dynamic voltage restorer (dvr) during single line to ground and three-phase faults.** *Technical and Physical Problems of Engineering (IPTPE)*, v.4, n.3, p.126-132, September, 2012.