

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Modelagem, Controle e Avaliação de Desempenho de
Restaurador Dinâmico de Tensão**

Roberto Carlos de Souza Junior

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Modelagem, Controle e Avaliação de
Desempenho de Restaurador Dinâmico de
Tensão

por

ROBERTO CARLOS DE SOUZA JUNIOR

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Francisco de Assis dos Santos Neves, D.Sc.
CO-ORIENTADOR: Leonardo Rodrigues Limongi, Dott.Ric.

Recife, Fevereiro de 2011.

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S729m Souza Junior, Roberto Carlos de.
Modelagem, controle e avaliação de desempenho de restaurador dinâmico de tensão / Roberto Carlos de Souza Junior. - Recife: O Autor, 2011.
xiii, 112 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: D.Sc. Francisco de Assis dos Santos Neves.
Co-Orientador: Dott.Ric. Leonardo Rodrigues Limongi.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.
Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica. 2. Restaurador Dinâmico de Tensão. 3. Afundamento de Tensão. 4. Qualidade de Energia Elétrica. I. Neves, Francisco de Assis dos Santos. II. Limongi, Leonardo Rodrigues. III. Título.

UFPE

~~621.3 CDD~~ (22. ed.)

BCTG/2011-114



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

ROBERTO CARLOS DE SOUZA JUNIOR

TÍTULO

**“MODELAGEM, CONTROLE E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO”**

A comissão examinadora composta pelos professores: FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES, DEE/UFPE, MARCELO CABRAL CAVALCANTI, DEE/UFPE, LEONARDO RODRIGUES LIMONGI, DEE/UFPE e MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, DEE/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **ROBERTO CARLOS DE SOUZA JUNIOR APROVADO.**

Recife, 24 de fevereiro de 2011

RAFAEL DUEIRE LINS
Coordenador do PPGE

FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES
Orientador e Membro Titular Interno

MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR
Membro Titular Externo

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Membro Titular Interno

LEONARDO RODRIGUES LIMONGI
Co-Orientador Membro Titular Externo

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**MODELAGEM, CONTROLE E AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO DE RESTAURADOR DINÂMICO DE
TENSÃO**

Roberto Carlos de Souza Junior

Fevereiro/2011

Orientador: Francisco de Assis dos Santos Neves, D.Sc.

Co-Orientador: Leonardo Rodrigues Limongi, Dott.Ric.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Palavras-chaves: Restaurador Dinâmico de Tensão, afundamento de tensão, qualidade de energia elétrica

Número de páginas: 112

Neste trabalho são abordadas as topologias básicas do Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR), um compensador série empregado para a mitigação de afundamentos momentâneos de tensão equilibrados ou desequilibrados, podendo também compensar harmônicos de tensão da rede. É descrito cada um de seus componentes e seu funcionamento, assim como as características deste compensador série. Também é desenvolvida a modelagem e estudos de sua topologia utilizando um inversor de quatro braços, com o intuito de possibilitar a compensação de componentes de sequência zero. Propõe-se um algoritmo simplificado de modulação por largura de pulso (PWM), que apresentou excelentes resultados. Um algoritmo de simulação digital detalhado, representando todos os principais componentes DVR, é desenvolvido em MATLAB/Simulink. Dessa forma, avalia-se o desempenho das topologias estudadas, assim como algumas vantagens e desvantagens das mesmas.

Abstract of Mastersthesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

**MODELING, CONTROL AND PERFORMANCE
EVALUATION OF DYNAMIC VOLTAGE RESTORER**

Roberto Carlos de Souza Junior

February/2011

Supervisor: Francisco de Assis dos Santos Neves, D.Sc.

Co-Supervisor: Leonardo Rodrigues Limongi, Dott.Ric.

Area of Concentration: Power Processing

Keywords: Dynamic voltage restorer, voltage sags, power quality

Number of pages: 112

This thesis discusses the basic topologies of Dynamic Voltage Restorer (DVR), a series compensator used to mitigate the momentary voltage sags balanced or unbalanced, and can compensate for harmonic voltage. We describe each of its components and its operation, as well as the characteristics of this series compensator. It is also developed modeling and studies of its topology using a inverter of four arms, with the aim of providing compensation for zero sequence components. We propose a simplified algorithm of pulse width modulation (PWM), which showed excellent results. A detailed digital simulation algorithm, representing all major components DVR, is developed in MATLAB / Simulink. Thus, we evaluate the performance of the topologies studied, as well as some advantages and disadvantages of them.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Problemas relacionados a qualidade de energia elétrica	2
1.1.1 Afundamento de tensão	4
1.1.2 Harmônicos	5
1.1.3 Desequilíbrio	5
1.1.4 Salto do ângulo de fase	6
1.2 Estado da arte de compensadores de tensão	7
1.3 Classificação das faltas	11
1.3.1 Curto-circuito trifásico: tipo A	13
1.3.2 Curto-circuito monofásico: tipo B	14
1.3.3 Curto-circuito bifásico: tipo C	14
1.3.4 Curto-circuito bifásico para terra: tipo E	14
1.4 Injeção de sequência zero	15
1.5 Esboço da Dissertação	16
2 TOPOLOGIA E DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO	18
2.1 Princípio de operação do DVR	18
2.2 Topologias do DVR	19
2.2.1 Suprimento de energia sem fonte adicional	20

2.2.2	Suprimento de energia através de fonte adicional	21
2.2.3	Suprimento de energia através de sistema elétrico independente	22
2.2.4	Suprimento de energia através da própria rede	24
2.2.5	Suprimento de energia através da própria rede com utilização de um retificador controlado	27
2.3	Controle	28
2.3.1	Sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$	29
2.3.2	Sistema de coordenadas $dq0$	30
2.3.3	PLL	33
2.3.4	Geração de referência	35
2.4	Conclusão	36
3	MODELAGEM E CONTROLE	37
3.1	Retificador	38
3.2	Barramento CC	39
3.3	Inversor de frequência e modulação por largura de pulso	41
3.3.1	Inversor	41
3.3.2	PWM para o inversor trifásico com o quarto braço	42
3.4	Filtro de saída	45
3.5	Controle	48
3.6	Controle preditivo de corrente	49
3.7	Conclusão	51
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	52
4.1	Resultados de simulação do PLL	52
4.2	Curto-circuitos de curta duração	57
4.2.1	Curto-circuito bifásico para a terra - tipo E	58
4.2.2	Curto-circuito monofásico - tipo B	60
4.2.3	Curto-circuito trifásico - tipo A	65
4.3	Curto-circuitos de longa duração	70
4.3.1	Curto-circuito bifásico para a terra - tipo E	71

4.3.2	Curto-circuito monofásico - tipo B	73
4.3.3	Curto-circuito trifásico - tipo A	78
4.4	Conclusão	83
5	CONCLUSÃO	84
Apêndice A	DIAGRAMA DE BLOCOS DO DVR NO SIMULINK/MATLAB	86
A.1	Blocos periféricos da simulação	87
A.2	Blocos principais da simulação	88
A.2.1	A planta da simulação	88
A.2.2	O controle da simulação	91
Apêndice B	DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE	93
Referências Bibliográficas		110

LISTA DE FIGURAS

1.1	Reguladores de tensão: (a) com comutadores mecânicos de taps e (b) com comutadores eletrônicos de taps a tiristor.	9
1.2	Regulação de tensão através de bancos de capacitores	10
1.3	Topologia de um UPS	10
1.4	Topologia de um STATCOM	11
1.5	Sistema elétrico	13
1.6	Diagramas fasoriais para os afundamentos de tensão	14
2.1	Configuração básica do DVR	19
2.2	Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através de uma fonte adicional	22
2.3	Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através de uma fonte independente	23
2.4	Configuração básica do DVR com suprimento de energia proveniente da própria rede	25
2.5	Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC no lado da carga	26
2.6	Configuração do DVR com retificador controlado	27
2.7	DVR e seu controle.	29
2.8	Diagrama de blocos do controle do DVR	29
2.9	Transformação de referencial abc para $\alpha\beta 0$	30
2.10	Transformação de referencial $\alpha\beta 0$ para dq0	31
2.11	Transformação direta e inversa de Park	33
2.12	Diagrama em blocos do PLL	34
2.13	Atuação do PLL na anulação do erro.	35
2.14	Geração de referência	36

3.1	Principais blocos componentes de um DVR	38
3.2	Retificador trifásico não controlado	39
3.3	Inversor a quatro braços e filtro de saída do inversor	42
3.4	Região de operação da tensão de offset	44
3.5	Diagrama de blocos do controle de tensão	48
3.6	Diagrama de bloco do controle preditivo de corrente	50
4.1	Sistema simulado para o DVR	54
4.2	Diagrama do PLL.	54
4.3	Esquema de detecção do ângulo utilizado por [19].	54
4.4	Traços: (1)-Tensões no PCC [V]; (2)-Tensões na carga [V].	56
4.5	Traços: (1)-Ângulo θ do PLL [rad]; (2)-Ângulo da rede [rad].	56
4.6	Traços: (1)-Ângulo θ do PLL [rad]; (2)-Ângulo da rede [rad].	57
4.7	Afundamento bifásico de curta duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões no PCC [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].	58
4.8	Tensão no barramento CC de um afundamento bifásico de curta duração com 30% da tensão remanescente [V].	59
4.9	Afundamento bifásico de curta duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)-Tensões no PCC [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V];	60
4.10	Tensão no barramento CC de um afundamento bifásico de curta duração com 70% da tensão remanescente [V].	60
4.11	Afundamento monofásico de curta duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões no PCC [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].	61
4.12	Controle de corrente (eixo α). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	61
4.13	Controle de corrente (eixo β). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	62
4.14	Controle de corrente (eixo 0). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	62
4.15	Controle de tensão (eixo α). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. .	63

4.16	Controle de tensão (eixo β). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. . .	63
4.17	Controle de tensão (eixo 0). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. . .	64
4.18	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento monofásico de curta duração com 30% da tensão remanescente.	64
4.19	Afundamento monofásico de curta duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V];	65
4.20	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento monofásico de curta duração com 70% da tensão remanescente.	65
4.21	Afundamento trifásico de curta duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].	66
4.22	Controle de corrente (eixo α). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	66
4.23	Controle de corrente (eixo β). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	67
4.24	Controle de corrente (eixo 0). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	67
4.25	Controle de tensão (eixo α). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. . .	68
4.26	Controle de tensão (eixo β). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. . .	68
4.27	Controle de tensão (eixo 0). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. . .	69
4.28	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento trifásico de curta duração com 30% da tensão remanescente.	69
4.29	Afundamento trifásico de curta duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR.	70
4.30	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento trifásico de curta duração com 70% da tensão remanescente.	70
4.31	Afundamento bifásico de longa duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR.	71

4.32	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento bifásico de longa duração com 30% da tensão remanescente.	72
4.33	Afundamento bifásico de longa duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].	72
4.34	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento bifásico de longa duração com 70% da tensão remanescente.	73
4.35	Afundamento monofásico de longa duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)-Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V];	73
4.36	Controle de corrente (eixo α). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	74
4.37	Controle de corrente (eixo β). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	74
4.38	Controle de corrente (eixo 0). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	75
4.39	Controle de tensão (eixo α). Traços: (1)-Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. .	75
4.40	Controle de tensão (eixo β). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. .	76
4.41	Controle de tensão (eixo 0). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]; .	76
4.42	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento monofásico de longa duração com 30% da tensão remanescente.	77
4.43	Afundamento monofásico de longa duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V];	77
4.44	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento monofásico de longa duração com 70% da tensão remanescente.	78
4.45	Afundamento trifásico de longa duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].	78
4.46	Controle de corrente (eixo α). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	79
4.47	Controle de corrente (eixo β). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida; (3)-Erro entre a corrente de referência e a medida [A]. . .	79

4.48	Controle de corrente (eixo 0). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].	80
4.49	Controle de tensão (eixo α). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. . .	80
4.50	Controle de tensão (eixo β). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]; .	81
4.51	Controle de tensão (eixo 0). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V]. .	81
4.52	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento trifásico de longa duração com 30% da tensão remanescente.	82
4.53	Afundamento trifásico de longa duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensão da rede [V] sob distúrbio. (2) Tensão na carga [V] compensada pelo DVR.	82
4.54	Tensão no barramento CC [V] de um afundamento trifásico de longa duração com 70% da tensão remanescente.	83
A.1	Janela principal do programa	87
A.2	Bloco utilizado para ativar o controle e controlar os tempos de falta	88
A.3	Bloco utilizado para o PWM	88
A.4	Bloco da planta do sistema elétrico	89
A.5	Bloco dos conversores do DVR	90
A.6	Bloco utilizado para simular o tempo morto das chaves	90
A.7	Bloco do inversor a 4 braços	91
A.8	Tela de plotagem das grandezas de controle e o bloco do controle do DVR .	92

LISTA DE TABELAS

1.1	Tipos de falta com ligação em estrela aterrada	15
4.1	Parâmetros utilizados na simulação do sistema elétrico	53
4.2	Parâmetros utilizados na simulação do controle	53

Nomenclatura

DVR Dinamic Voltage Restorer

EPRI Electric Power Research Institute

PWM Pulse width Modulation

QEE Qualidade de Energia Elétrica

SVC Compensador Estático de Reativo

UPS Uninterruptible Power Supply

VSI Voltage Source Inversor

VTCD Variações de Tensão de Curta Duração

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos com o constante desenvolvimento de cargas e processos cada vez mais eficientes e sensíveis, necessita-se de uma tensão de alimentação sem defeitos ou dentro de determinados padrões para que seu funcionamento esteja de acordo com suas condições nominais ou limites aceitáveis de operação. Pode-se dizer que, devido ao crescente aumento da utilização da eletrônica de potência, juntamente com as tecnologias de acionamento e controle, o ambiente industrial tornou-se hoje muito susceptível a problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) sejam estes provenientes da rede externa ou da própria instalação. Portanto, a preocupação com a qualidade da energia em sistemas de distribuição tem aumentado devido a estudos que relatam perdas financeiras expressivas devido a interrupções, afundamentos momentâneos e presença de harmônicos de tensão no fornecimento de energia para as indústrias.

É comum associar problemas de regulação de tensão como soluções clássicas, como o emprego de capacitores em primeiro plano, e compensadores estáticos de reativos (*Static Var Compensator - SVC*) num segundo plano. Contudo, eles somente controlam a tensão indiretamente, através de mudança da impedância efetiva do sistema. No caso de afundamentos momentâneos na tensão causados por faltas no sistema de transmissão ou distribuição, a injeção de tensão combinada com o suprimento de potência ativa é necessária para que haja uma compensação desse afundamento. Esta é uma característica distintiva de operação de um DVR (*Dynamic Voltage Restorer*).

Como soluções existentes para a proteção contra afundamentos de tensão têm-se banco de capacitores, STATCOM, UPS (Uninterruptible Power Supply), restauradores dinâmicos, reator saturado dentre outros.

Os afundamentos de tensão são considerados o pior problema de QEE para consumidores industriais [1][2]. Devido a isso, este problema vem recebendo ultimamente muita atenção por parte de pesquisadores. Um afundamento de tensão é definido como sendo uma redução no valor eficaz da tensão de alimentação, em uma ou mais fases do sistema, para um valor entre 10% e 90% da tensão nominal com duração compreendida entre 0,5 ciclo e 60 ciclos [1],[3]. Os afundamentos de tensão são geralmente causados por faltas. Dentre os diversos fatores que causam os afundamentos de tensão, pode-se destacar: a localização da falta, o tipo de falta, a tensão pré-falta, o sistema de proteção, o sistema de religamento, as características dos sistemas de transmissão e distribuição, o nível de geração do sistema e a impedância de falta. Subtende-se que quanto mais fatores de influência são levados em consideração no estudo de afundamentos de tensão, mais complexo e preciso este estudo será.

A solução proposta nesse trabalho para esse problema é inserir, entre o barramento de entrada e a carga sensível, um compensador série que tenha capacidade de injetar tensões de amplitudes e ângulos de fase determinados que possibilita uma rápida compensação de afundamentos, compensação de harmônicos e desequilíbrio nas tensões trifásicas, sendo denominado de Restaurador Dinâmico de Tensão ou simplesmente DVR.

1.1 Problemas relacionados a qualidade de energia elétrica

Os problemas relacionados à qualidade de energia são evidentes em muitos sistemas, tais como: comerciais, industriais e residenciais. Algumas manobras como o chaveamento de capacitores resultam em transitórios oscilatórios na rede elétrica, de forma semelhante a partida de grandes motores que contribuem para um aumento substancial nos distúrbios da qualidade de energia. Os mais significantes e críticos problemas na qualidade de energia, como já foi dito antes, são os afundamentos momentâneos de tensão e a completa interrupção

no fornecimento de energia.

A baixa qualidade de energia pode causar um desligamento não programado do processo industrial ou falha em equipamentos, resultando em substanciais aumentos de custos no processo. As indústrias afetadas por estes fenômenos são muitas e dos mais variados ramos.

Estudos demonstram que Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são aproximadamente 90% dos distúrbios que acometem as cargas sensíveis. Os afundamentos causados devido a curtos-circuitos são mais críticos e imprevisíveis. O afundamento de tensão existe somente enquanto estiver fluindo corrente através do curto-circuito. A tensão volta ao valor nominal ou a um valor próximo dele tão logo a falta é extinta. Estas faltas podem ser a quilômetros de distância do consumidor, contudo podem causar grandes impactos.

Estudos apresentados em [4] [5] demonstram que:

- Cerca de 65% das faltas ocorridas em um sistema de distribuição aéreo são do tipo monofásico,
- Cerca de 10% são do tipo bifásica, 20% do tipo bifásica-terra e 5% são trifásicas;
- 35% das faltas ocorridas em um sistema de distribuição subterrâneo são para a terra e 65% são faltas multifásicas;
- Os afundamentos momentâneos de tensão, as sobre-elevações momentâneas, as sobretensões e subtensões, apresentam valores próximos a 90% de todos os distúrbios que afetam as cargas sensíveis em um sistema de distribuição;
- A maioria das VTCD's é menor do que 40% da tensão nominal e duram menos que 10 ciclos.

Atualmente, com a modernização dos parques industriais, uma grande parte das cargas e seus sistemas de controle são baseados em dispositivos eletrônicos sensíveis contendo diodos, transistores, circuitos integrados, microprocessadores, etc. Todos estes elementos vieram permitir o uso da eletricidade de uma forma mais eficiente, viabilizando um controle

mais preciso sobre os processos. Entretanto, trouxeram perturbações muito significativas à qualidade da energia. Devido à sua não linearidade, os novos dispositivos são um dos principais causadores de problemas na qualidade da energia e, simultaneamente, as maiores vítimas dessa falta de qualidade, pois são altamente sensíveis às variações dos parâmetros elétricos. Perturbações mesmo muito rápidas, da ordem de alguns milissegundos, podem provocar a falha global dos sistemas onde tais dispositivos se encontrem inseridos.

A presença e proliferação deste tipo de carga vêm agravar-se continuamente, pois cada vez mais a energia é consumida por cargas não lineares. Segundo a Electric Power Research Institute (EPRI) cerca de 60% de toda a energia elétrica produzida é consumida por cargas não lineares. Em alguns setores, como o de serviços, este valor é muito próximo dos 100%.

Com relação a problemas causados por desbalanços de tensão, estes são de menor intensidade. O constante desenvolvimento da economia permite a expansão dos grandes centros urbanos atendidos pelas concessionárias de distribuição de energia. Considerando que os ramais de distribuição são provenientes de projetos antigos e atualmente interligados, existem pontos fracos de tensão. Além disso, consumidores monofásicos distantes, juntamente com a má distribuição dessas cargas entre as fases, causam diferentes valores de tensão para cada fase disponibilizada.

1.1.1 Afundamento de tensão

Afundamentos momentâneos de tensão são reduções de curta duração no valor eficaz da tensão, causados por curto-circuito, sobrecargas, ou partida de grandes motores. Este tipo de distúrbio pode causar avarias em diversos tipos de equipamentos [1] e prejuízos em diversos processos industriais. Na norma IEEE 1346-1998 é definido que afundamento de tensão é a redução para 10 a 90% do valor eficaz da tensão, na frequência fundamental. Este fenômeno pode ocorrer nas três fases simultaneamente, assim como em uma ou em duas fases, causando desequilíbrio no sistema trifásico.

É possível dividir os afundamentos de tensões de acordo com as suas durações:

- Instantâneos: duração de 0,5 a 30 ciclos da rede elétrica;

- Momentâneos: duração de 30 ciclos a 3s;
- Temporários: duração superior a 3s e inferior a 1 minuto.

1.1.2 Harmônicos

As formas de onda de tensão e de corrente na realidade, contêm sempre algum conteúdo harmônico. Os harmônicos correspondem à soma das ondas senoidais com frequências múltiplas da frequência fundamental da rede. As cargas não-lineares, tais como inversores, retificadores, lâmpadas eletrônicas, acionamento de motores com conversores estáticos, etc, são as principais responsáveis pela existência de harmônicos, uma vez que necessitam de correntes não senoidais.

As correntes distorcidas por sua vez fazem com que a tensão do sistema elétrico se torne também não-senoidal devido às quedas de tensão nas impedâncias do sistema.

Os efeitos dos harmônicos são variados e, dependendo do grau de severidade poderão ter consequências graves para a instalação ou processo produtivo [6]:

- Aumento das perdas e um maior aquecimento dos condutores e transformadores no sistema elétrico, assim como motores;
- Mau funcionamento dos sistema de proteção (fusíveis, relés de proteção e disjuntores);
- Possíveis ressonâncias com bancos de capacitores e filtros passivos, levando à redução de sua vida útil;
- Redução da vida útil dos equipamentos em geral, levando a aumento de custos de manutenção e um maior período de parada do equipamento para manutenção;
- Aumento do ruído eletromagnético nos sistemas de comunicação.

1.1.3 Desequilíbrio

Os desequilíbrios podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas em percentual.

As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tais fatores fazem com que a qualidade no fornecimento de energia seja prejudicada, e alguns consumidores tenham em suas alimentações um desequilíbrio de tensão. Estes desequilíbrios de tensão podem ter:

- Amplitudes diferentes;
- Assimetria nas fases;
- Assimetria conjunta de amplitudes e fases.

Destas, apenas a primeira é frequentemente evidenciada no sistema elétrico. A instalação elétrica de um consumidor, sujeito a desequilíbrios de tensão, pode apresentar problemas indesejáveis na operação de equipamentos, dentre os quais destacam-se:

- Motores de indução;
- Máquinas síncronas;
- Retificadores.

1.1.4 Salto do ângulo de fase

Um curto-circuito no sistema de potência pode causar não apenas um afundamento de tensão, mas também uma mudança no ângulo de fase da tensão. Variações bruscas no ângulo de fase ocorrem porque as correntes nos alimentadores sob curto têm ângulo de fase definidos pelas impedâncias da rede e não pela carga que estava sendo alimentada. Os saltos de fase se comportam como uma mudança no cruzamento pelo zero da tensão instantânea. Saltos de fase não são uma preocupação para a maioria dos equipamentos. Mas conversores de eletrônica de potência utilizando a informação do ângulo de fase para definir os instantes de disparo das suas chaves.

Dependendo do tipo de carga, o dispositivo de compensação de VTCD deve ser capaz de evitar que a carga esteja sujeita a saltos de fase. O DVR a ser abordado nesta dissertação tem esta capacidade.

1.2 Estado da arte de compensadores de tensão

Com o progresso tecnológico, têm-se hoje chaves eletrônicas a base de semicondutores, com alta capacidade de condução de correntes e elevada tensão de bloqueio. Tal fato contribui para o desenvolvimento de compensadores mais robustos e eficientes. Há a necessidade de se dispor de dispositivos que sejam simples e funcionais, aprimorando os existentes, desenvolvendo novas tecnologias e tornando esses dispositivos financeiramente mais acessíveis. Com isso, as aplicações de eletrônica de potência já vêm há algum tempo sendo implantadas em vários segmentos do setor elétrico.

Uma das aplicações de eletrônica de potência visa garantir a qualidade e confiabilidade da energia entregue ao consumidor, que é o foco do conceito de *Custom Power*. Existem alguns projetos pilotos de DVR's (*Dynamic Voltage Restorer*) instalados pelo mundo, os quais proveem uma melhor qualidade de energia aos consumidores e permitem assim a geração de produtos com maiores índices de qualidade e menores custos de produção.

As soluções clássicas para a regulação de tensão, como o emprego de bancos de capacitores e SVC, controlam a tensão de uma forma indireta, com a mudança da impedância efetiva do sistema. Uma outra forma de proteger as instalações contra as perturbações da rede elétrica é a instalação de sistemas UPS, de resposta rápida e grande confiabilidade e versatilidade. Porém, a utilização de UPS não é recomendável para alguns casos, já que estes se destinam a compensar a perda total da energia elétrica, levando a um alto custo pela necessidade de armazenamento de grande quantidade de energia.

A maioria dos problemas se deve a perturbações muito breves, de curta duração, que normalmente afetam só uma fase. Na ocorrência de faltas no sistema elétrico, a VTCD pode ser solucionada com a injeção de tensão controlada a partir do suprimento de energia ativa. Esse é o exemplo do DVR. Ele opera dinamicamente no sistema elétrico, proporcionando

assim uma proteção de quase 90% dos distúrbios presentes na rede.

Com o intuito de esclarecer a escolha do DVR como foco principal desta dissertação, é de grande valia a apresentação do estado da arte dos compensadores de tensão. Na seção seguinte, serão abordados alguns equipamentos que proveem soluções contra os distúrbios elétricos presentes na rede de distribuição, desde soluções clássicas até o uso de tecnologias inovadoras.

Há dois enfoques gerais para a atenuação de problemas de qualidade energia, seja com relação à carga ou ao sistema elétrico. Primeiramente, o denominado condicionamento de carga é responsável por assegurar que os equipamentos de um processo industrial sejam menos sensíveis aos distúrbios elétricos. O outro é o condicionamento de linha que visa à instalação de equipamentos que suprimam ou neutralizem as perturbações presentes no sistema de distribuição.

Algumas soluções inovadoras empregando eletrônica de potência são frequentemente aplicadas quando uma resposta rápida é essencial para suprimir ou neutralizar as perturbações. Em contrapartida, os dispositivos convencionais, como os capacitores para correção de fator de potência, são bem aplicados para regulações de tensão em regime permanente.

Quando se trata de cargas simples, a escolha correta do dispositivo de atenuação é bastante fácil. Contudo, para sistemas com cargas diversas, devem ser analisados cuidadosamente todos os aspectos do sistema de potência, como o tempo de resposta, a perda de energia do equipamento, os níveis suportáveis, entre outros.

Conforme apresentado, existem diversas soluções para proteger tanto a carga quanto o sistema elétrico contra diferentes grupos de distúrbios de tensão. Em especial, percebe-se que o DVR atua contra VTCD's podendo também, dependendo do seu projeto, atenuar harmônicos e desbalanços de tensão, como solução no lado do consumidor e do fornecedor.

Existem na literatura diversos reguladores de tensão, com topologias distintas. As compensações podem ser em série ou paralelo com o sistema, de forma passiva ou controlada dinamicamente. Alguns exemplos destes reguladores como comutadores mecânicos e

eletrônicos de taps, banco de capacitores, UPS, compensadores série com fonte alternativa de energia, STATCOM e o DVR, estão brevemente descritos aqui.

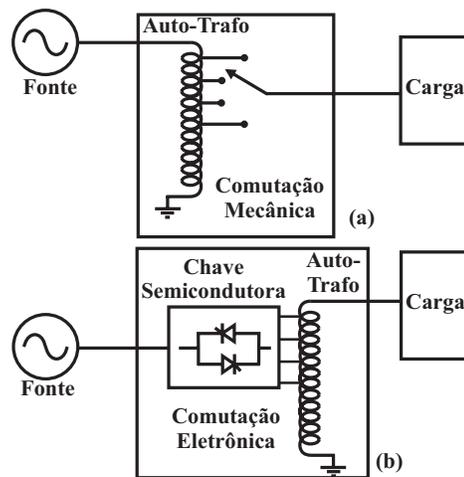


Figura 1.1: Reguladores de tensão: (a) com comutadores mecânicos de taps e (b) com comutadores eletrônicos de taps a tiristor.

O regulador de tensão com comutador de taps pode ser mecânico ou eletrônico, como exemplificados em [7][8]. Seu princípio de funcionamento é baseado em um autotransformador com diversos taps, disponibilizando vários níveis de tensão para a compensação. Geralmente são equipamentos monofásicos.

O modelo ilustrado na Figura 1.1 (a) varia a tensão na saída através da comutação mecânica de taps, realizada por um motor acoplado que altera os contatos. Estes apresentam uma resposta lenta oriunda da atuação de um motor que controla a mudança dos taps. Já com os comutadores eletrônicos através de chaves estáticas, Figura 1.1 (b), como tiristores, a comutação é dada pelo chaveamento dos tiristores, usualmente na ordem de milissegundo. A mudança da relação de transformação oriunda da comutação dos taps mantém a tensão regulada na barra.

Entretanto, os reguladores de tensão através de bancos de capacitores são largamente utilizados, inseridos em paralelo com o sistema elétrico nas três fases. O circuito de controle calcula a compensação necessária e através de chaves comutadoras é realizada uma combinação de capacitores em série e paralelo para atingir a capacitância necessária de compensação. Através do fluxo de reativos, o banco regula a tensão na barra de interesse,

como mostrado em [9][10]. A Figura 1.2 ilustra um banco de capacitores.

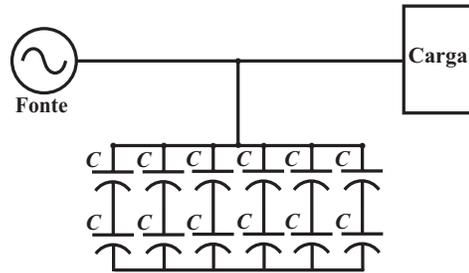


Figura 1.2: Regulação de tensão através de bancos de capacitores

Com relação ao regulador de tensão UPS, este é um equipamento indicado para operar em casos de interrupção do fornecimento de energia. Normalmente sua topologia é trifásica, devido ao seu uso ser aplicado nas áreas comerciais e industriais. Seu funcionamento é baseado na retificação da tensão da rede, carregando um banco de baterias. Com a queda da tensão, o banco de baterias é conectado a um inversor que converte tensão CC em CA, mantendo a carga regulada na presença de afundamentos na entrada. Maiores aprofundamentos teóricos sobre UPS podem ser obtidos em [11][12]. Na Figura 1.3 é mostrado o diagrama de um UPS.

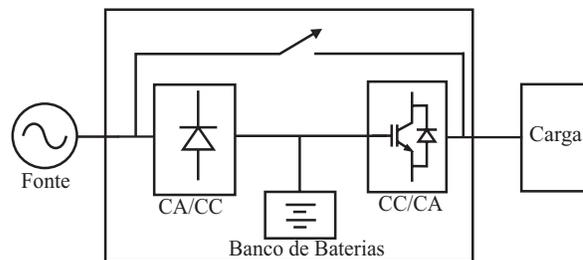


Figura 1.3: Topologia de um UPS

O STATCOM é um regulador dinâmico de tensão conectado em paralelo com a barra de distribuição. Ele controla a tensão na barra através da injeção de potência reativa no sistema. A partir da energia armazenada no capacitor CC, o conversor sintetiza uma tensão alternada, que na presença de impedâncias impõe a injeção de correntes no sistema, capacitiva ou indutiva, com o objetivo de aumentar e diminuir a tensão da rede, respectivamente. Maiores detalhes do STATCOM podem ser analisados em [13][14]. A ilustração de uma topologia de um STATCOM é mostrada na Figura 1.4.

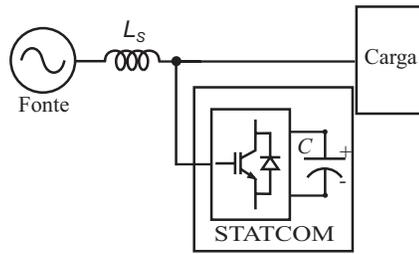


Figura 1.4: Topologia de um STATCOM

O uso de fontes alternativas de energia vem cada vez mais ganhando importância no cenário energético. Desta forma, existem reguladores série de tensão que utilizam fontes alternativas como energia solar, eólica, célula combustível, entre outras, para captar energia do meio e armazená-la em elementos como flywheel, supercapacitor, banco de baterias, capacitores, etc. A partir da energia CC armazenada realiza-se uma primeira conversão CC/CC para manter o capacitor do elo com uma tensão regulada. A tensão do elo CC é convertida em tensão alternada CA através dos conversores eletrônicos, injetando tensões dinamicamente controladas na rede, regulando assim a tensão na carga. A sua conexão ao sistema pode ser realizada por transformadores monofásicos ou mesmo trifásico, em série com a rede.

O DVR é um equipamento conectado em série na rede de distribuição através de transformadores monofásicos, funcionando como um regulador de tensão. Este é composto por um conversor trifásico, filtros passa-baixas, capacitor no elo CC e uma fonte de energia ativa. Seu princípio de funcionamento é baseado na injeção controlada de tensão na rede de distribuição, com o objetivo de minimizar os distúrbios elétricos presentes no sistema. Tais distúrbios podem ser harmônicos de tensão, desbalanços de tensão, VTCD, entre outros. Detalhes mais aprofundados sobre o DVR serão abordados nos capítulos seguintes.

1.3 Classificação das faltas

A NBR 5460 define falta como uma "ocorrência acidental e súbita, ou defeito, em um elemento de um sistema elétrico, que pode resultar em falha do próprio elemento e/ou de outros elementos associados".

Os tipos de falta são geralmente classificadas de acordo com uma normatização feita por [1], onde a classificação distingue os tipos de afundamentos de tensão que ocorrem no sistema. Esta classificação é usada para testes de equipamentos contra afundamentos de tensão. Ao utilizar essa classificação é possível gerar os afundamentos que podem ser esperados nos terminais de equipamentos trifásicos. O ponto fraco deste método é que ele é apenas para simulação. A extração do tipo de oscilação do afundamento de tensão medido não é imediatamente possível. Trabalhos recentes, entretanto, tem mostrado que o tipo de afundamento pode ser estimado.

São denominados basicamente afundamentos de tensão associados aos quatro tipos elementares de curto-circuito que ocorrem nos sistemas elétricos trifásicos: curto-circuitos trifásicos, curto-circuitos monofásicos, curto-circuitos bifásicos e curto-circuitos bifásicos à terra. As cargas são representadas por equipamentos considerados sensíveis, trifásicos e ligados em estrela aterrada. O restante do sistema elétrico é substituído por um equivalente trifásico. Considera-se a contribuição das componentes de sequência zero para as faltas que envolvem a terra.

Os principais tipos de falta em sistemas de distribuição são: curto-circuito monofásicos (cerca de 65%); curto-circuito bifásico (cerca de 10%); curto-circuito bifásico à terra (cerca de 20%); curto-circuito trifásico (menos que 5%); abertura incorreta de circuitos por manobras inadequadas (muito poucos). As porcentagens indicadas podem variar de sistema pra sistema.

As faltas trifásicas são simétricas e geram, portanto, afundamentos de tensão também simétricos. Elas produzem afundamentos de tensão mais severos, contudo, elas são mais raras.

As faltas bifásicas, bifásicas à terra, e sobretudo, as monofásicas apresentam as maiores taxas de ocorrência, gerando afundamentos de tensão menos severos, porém, desequilibrados e assimétricos.

Considere uma falta trifásica em algum barramento na rede elétrica. Se a impedância de falta é zero, a tensão remanescente é zero no local da falta e é diferente de zero, porém

menor do que a tensão pré-falta, para todos os outros locais na rede. Pode-se determinar a tensão em um determinado local na rede, o ponto de conexão da carga (PCC), desprezando-se as correntes de carga, já que estas são geralmente muito menores do que as correntes de curto-circuito 1.5. Assim, obtém-se:

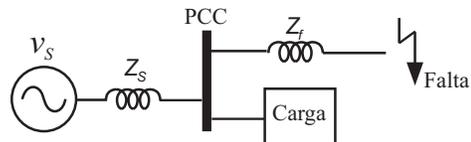


Figura 1.5: Sistema elétrico

$$V_{pcc} = V_s \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \quad (1.1)$$

- V_s indica a tensão da rede;
- V_{pcc} indica a tensão no PCC;
- Z_f é a impedância entre o PCC e a posição da falta;
- Z_s é a impedância da fonte ao PCC.

A expressão (1.1) dá uma relação direta entre a tensão remanescente e a localização das faltas. Essa expressão é a base para a caracterização dos afundamentos de tensão devido a faltas não simétricas. A impedância de falta é normalmente assumida zero nos cálculos de afundamento de tensão.

1.3.1 Curto-circuito trifásico: tipo A

O caso mais simples de ser analisado é quando ocorre uma falta trifásica na barra da transmissão do sistema. Esse afundamento foi classificado por [1] como tipo A. Nesse tipo de afundamento as três fases serão afetadas pelo defeito.

1.3.2 Curto-circuito monofásico: tipo B

Esse tipo de falta é classificado como afundamento de tensão tipo B. Na classificação proposta por [1], a presença do afundamento de tensão afeta apenas a fase defeituosa, e as outras duas fases não sofrem alterações.

1.3.3 Curto-circuito bifásico: tipo C

Para este tipo de falta as impedâncias de sequência positiva e negativa são ligadas em paralelo, enquanto a componente de sequência zero não faz parte por não estar ligada a terra. Esse tipo de evento é classificado por [1] como afundamento de tensão do tipo C. Pode ser visto que a fase sã não é modificada, enquanto as outras duas fases que fazem parte do curto-circuito sofrem afundamentos na sua magnitude.

1.3.4 Curto-circuito bifásico para terra: tipo E

Neste caso, as três impedâncias de seqüências positiva, negativa e zero da rede são ligadas em paralelo. Este tipo de queda de tensão tem sido classificado como tipo E. Neste caso, a fase sã não é afetada e a diminuição da magnitude das duas fases restantes é verificada, mas a mudança de fase pode ser desconsiderada. Um resumo de tipos de afundamentos de tensão, de acordo com as faltas que originaram elas é apresentado na Figura 1.6 e Tabela 1.1.

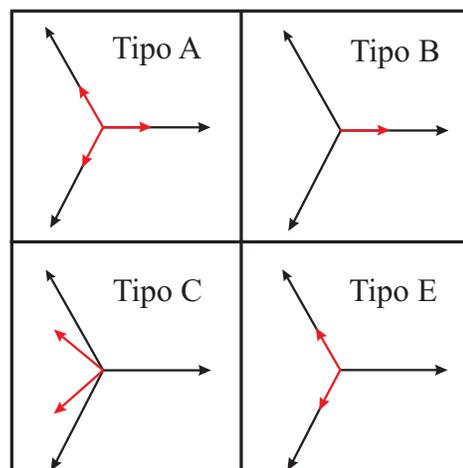


Figura 1.6: Diagramas fasoriais para os afundamentos de tensão

Tabela 1.1: Tipos de falta com ligação em estrela aterrada

Curtos	Classificação
Trifásico	<i>TipoA</i>
Monofásico	<i>TipoB</i>
Bifásico	<i>TipoC</i>
Bifásico à terra	<i>TipoE</i>

1.4 Injeção de sequência zero

A presença de sequência zero nas cargas pode ser bastante prejudicial às mesmas. As tensões de sequência zero são causadoras de desequilíbrios no módulo e no ângulo das fases de um sistema elétrico, causando um deslocamento do neutro ou um ponto equivalente (para ligação em delta), em uma dada direção. Dependendo da magnitude desse deslocamento, a elevação do potencial de neutro em relação à terra pode acarretar um estresse excessivo no isolamento, podendo levar à redução da vida útil das cargas do sistemas [15].

Uma carga alimentada diretamente da rede de distribuição está sujeita a tensões de sequência zero durante distúrbios, uma vez que, em sua grande maioria, os sistemas de distribuição possuem referência para a terra. Por esta razão, caso uma concessionária de energia necessite melhorar a qualidade da energia fornecida a seus consumidores conectados a uma certa barra da rede de distribuição pelo uso de um DVR, é importante que o mesmo seja capaz de injetar componentes de sequência zero de tensão. Entretanto, os consumidores alimentados em nível de distribuição têm geralmente, na entrada, um transformador conectado em delta-estrela aterrado. Sendo assim, curtos monofásicos, ou bifásicos para a terra provocariam o surgimento de tensões de sequência zero na rede de distribuição, mas não no lado de baixa tensão do consumidor. Nesses casos, a capacidade do DVR injetar tensão de sequência zero torna-se mandatória apenas caso se deseje compensar componentes de sequência zero causados por afundamentos ou desequilíbrios no lado de baixa tensão [16].

A adoção de um DVR cuja filosofia de compensação inclua injeção de tensões de sequência zero, além de necessitar de um sistema de controle específico que considere a

inserção de tais tensões no processo de compensação, carece ainda de alterações na topologia do restaurador. Para isso, a referência [15] cita duas simples possibilidades de mudanças nas configurações do DVR que permitem a aplicação desse tipo de compensação, relacionadas a seguir:

- Divisão do barramento CC e conexão do neutro do filtro de saída do DVR ao ponto central do barramento CC;
- Adição de um quarto braço ao inversor, conectado ao neutro do filtro de saída do DVR.

Apesar da primeira configuração representar uma das formas mais simples de habilitar um conversor a produzir tensões de sequência zero, apresenta os inconvenientes de redução das amplitudes máximas de tensões geradas pelo conversor e a possibilidade de desbalanço das tensões dos capacitores no barramento CC. A segunda desvantagem pode ser amenizada pela inclusão de uma estratégia PWM que incorpore o controle independente das tensões dos capacitores. A primeira, através da adoção de um nível de tensão mais elevado do barramento CC [15], implicando o aumento do custo dos capacitores e das chaves do inversor.

Na segunda alternativa, por estar conectado ao neutro, geralmente a potência requerida para esse quarto braço é consideravelmente menor do que para os demais. Adicionalmente, a inserção de um quarto braço com igual capacidade de potência, associado a uma chave de transferência, pode ser uma opção interessante, pois permite a substituição rápida de um dos braços que por ventura se danifique [15].

Nesta dissertação, considerou-se o caso em que há necessidade de compensação de tensão de sequência zero. Para tanto, optou-se pelo emprego de DVR com quatro braços.

1.5 Esboço da Dissertação

O trabalho é organizado nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 - São abordadas as possíveis topologias do restaurador dinâmico de tensão, apresentando suas vantagens e desvantagens. É introduzida a topologia a ser

utilizada para a realização dos estudos propostos na dissertação. Além das topologias, descreve-se o princípio de funcionamento do equipamento em estudo, e introduzido o funcionamento do DVR usado por esta dissertação.

- Capítulo 3 - Nesse capítulo é realizada a modelagem completa do DVR, cada bloco do equipamento é analisado e também é abordado o controle do equipamento.
- Capítulo 4 - Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos das simulações realizadas no Matlab. O equipamento em questão é submetido a alguns testes para avaliar o seu funcionamento diante de distúrbios equilibrados e desequilibrados. E será realizada uma conclusão a respeito de seu funcionamento para observar se o mesmo é satisfatório para os distúrbios a que foi submetido.
- Capítulo 5 - Nesse capítulo apresentam-se as conclusões obtidas, bem como propostas de trabalhos futuros.

2 | TOPOLOGIA E DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO

2.1 Princípio de operação do DVR

O DVR é um equipamento composto basicamente por um inversor tipo fonte de tensão [17] que é conectado em série com a rede elétrica através de um transformador [18], como mostra a Figura 2.1. Sua principal função é eliminar ou reduzir afundamentos momentâneos de tensão, sobre-elevações momentâneas, desequilíbrios e harmônicos nas tensões presentes na rede elétrica [18].

A ideia básica do DVR é injetar um conjunto de tensões de compensação que podem ser dinamicamente controladas de tal forma que as amplitudes e ângulos de fase das mesmas atenuem qualquer efeito prejudicial na tensão na carga devido a faltas no sistema. Na Figura 2.1, pode-se observar que a tensão na carga v_L é a soma da tensão afundada da rede v_S adicionada da tensão injetada pelo DVR v_T .

O DVR é um equipamento que é utilizado em sistemas onde as cargas são sensíveis a qualquer tipo de oscilação. A sua instalação pode ser feita em duas situações: tanto pode ser utilizado em média tensão como também pode ser utilizado na baixa tensão, a depender de onde for melhor a sua instalação. A diferença entre essas conexões de baixa e média tensão, para a mesma potência, está na intensidade maior das correntes e na geração de tensões de sequência zero que podem ocorrer na baixa tensão, onde a ligação é realizada a quatro fios.

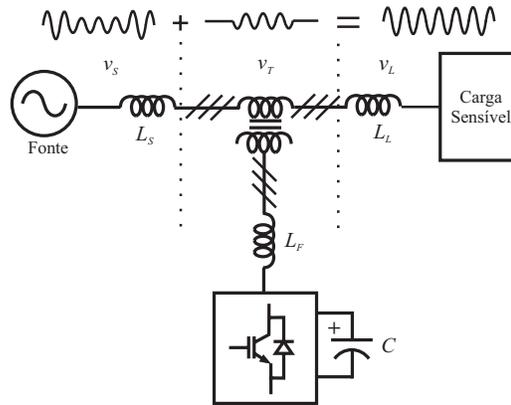


Figura 2.1: Configuração básica do DVR

O DVR deve ser usado como uma solução para a proteção de equipamentos sensíveis aos distúrbios citados, com ótima aplicação para consumidores que utilizam equipamentos com potência total na faixa de 100kW a 10MW [1].

2.2 Topologias do DVR

O esquema básico para a supressão de distúrbios de tensão na rede elétrica é mostrado na Figura 2.1. Apesar disso, as topologias básicas de DVR podem variar um pouco de acordo com o esquema utilizado para manter o capacitor do barramento CC do inversor carregado durante a falta.

Durante a mitigação de distúrbios elétricos, existem trocas de energia ativa e/ou reativa entre o DVR e o sistema. Entretanto, para que haja fluxo de potência ativa do DVR para o sistema, é necessário que o compensador tenha um suprimento de energia conectado ao capacitor CC. Esse suprimento de energia pode ser feito de diversas formas, como por exemplo através de armazenadores de energia, da própria rede sob distúrbio, ou até mesmo de sistemas elétricos independentes.

Quando o suprimento de energia é feito através de outro sistema elétrico, é preferível que o mesmo seja independente da rede onde se encontra o DVR. Caso contrário, dependendo da origem do distúrbio, o suprimento de energia poderá sofrer os mesmos efeitos do sistema com DVR.

O suprimento de energia para o capacitor CC, através da própria rede onde o DVR está conectado, resulta da conexão de um conversor CA/CC, que pode ser ligado no lado da fonte, na direção fonte-carga antes do transformador série, ou no lado da carga, na direção fonte-carga depois do transformador série. Assim, essas topologias variam em desempenho, complexidade, custo de aquisição e custo operacional.

2.2.1 Suprimento de energia sem fonte adicional

Essa topologia pode ser considerada a mais simples entre as várias topologias de DVR, uma vez que não possui sistema auxiliar para fornecimento de energia ao barramento CC. Essa topologia tem um princípio de funcionamento de mais fácil compreensão e também tem um número menor de componentes. No entanto, existe a desvantagem de requisitar de um barramento CC com uma capacitância significativamente maior que a requerida por outras topologias [19].

De acordo com a Figura 2.1, toda a energia necessária à compensação dos defeitos fica armazenada no capacitor, pois não há fonte de energia ligada ao barramento CC. Logo após o término do distúrbio, o restabelecimento do nível de tensão nominal CC pode ser promovido pelo próprio inversor, através de trocas de energia com o sistema ou através de outras fontes auxiliares de energia.

Sabe-se que a energia E armazenada no capacitor é proporcional ao quadrado da sua tensão V_{dc}

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{dc}^2 \quad (2.1)$$

Durante a mitigação de um afundamento de tensão, a tensão CC diminui exponencialmente e, à medida que isso acontece, a capacidade de compensação de afundamentos vai se deteriorando, caracterizando uma topologia com tensão no barramento CC não-controlável durante o distúrbio. Por isso pode-se dizer que a mitigação de afundamentos de tensão feita por esse tipo de topologia só terá êxito caso se atinja um nível mínimo de tensão CC que garanta a operação do DVR durante a falta.

Durante afundamentos de tensão severos, uma fração significativa da energia armazenada no barramento CC pode não ser usada se o inversor entrar rapidamente em sobremodulação, na tentativa de injetar o máximo de amplitude de tensão possível [20]. Essas dificuldades operacionais podem ser amenizadas, levando a um aprimoramento geral do desempenho do DVR. Uma forma de se proceder a essas melhorias pode-se dar através do aumento do nível de tensão e/ou do incremento de capacitância no elo CC. Porém, tais medidas representam custos adicionais, uma vez que a elevação da tensão CC traz um impacto no custo do dispositivos de potência do DVR.

Pode-se ainda, utilizar essa topologia para compensar afundamentos injetando apenas potência reativa na rede elétrica [19]. Nesse caso, o desempenho dessa topologia na mitigação de afundamentos ou elevações de tensão possui a limitação de restaurar a amplitude da tensão sem garantir a manutenção do valor do ângulo de fase da tensão pré-distúrbio. Esse fator limitante pode inviabilizar a aplicação dessa topologia de DVR na proteção de cargas sensíveis aos defasamentos súbitos de ângulo de fase, ocorrendo sempre na presença de afundamentos ou elevações. Contudo, para mitigação de afundamentos de tensão com menor intensidade e duração, a injeção exclusiva de potência reativa pelo DVR é suficiente para restauração da tensão.

Portanto, pode-se dizer que essa topologia pode ser a mais indicada para sistemas cujos os afundamentos são menos severos e duradouros e cujas cargas são menos sensíveis a defasamentos súbitos do ângulo de fase.

2.2.2 Suprimento de energia através de fonte adicional

Sistemas de armazenamento de energia, tais como baterias, supercapacitores, volantes de inércia (flywheel) e os sistemas supercondutores, podem ser utilizados no suprimento de energia ao barramento CC de um DVR, empregando-se um conversor entre eles [20], como ilustrado na Figura 2.2.

A utilização de conversor é fundamental para tornar esta topologia viável tecnologicamente. Durante a ocorrência do distúrbio, esse conversor promove a transferência

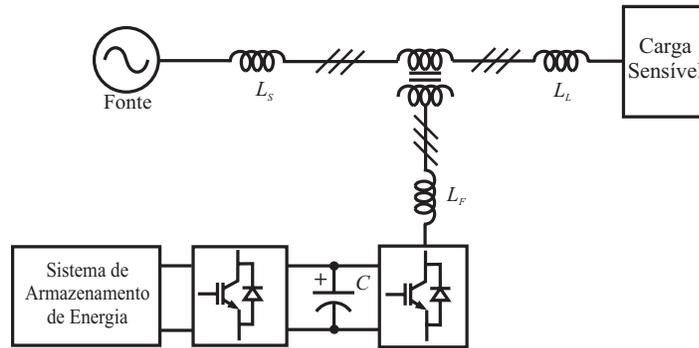


Figura 2.2: Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através de uma fonte adicional

da energia necessária para a mitigação, de um grande armazenador de energia, que é a fonte adicional, para um armazenador de menor porte em termos relativos, que é o capacitor do barramento CC. Essa transferência de energia é feita de forma que a tensão no capacitor fique praticamente constante, o que significa dizer que essa topologia tem como característica o controle da tensão CC durante a ocorrência do distúrbio.

Essa topologia se apresenta bastante eficiente na mitigação de afundamentos de tensão severos, com a vantagem de não demandar grandes correntes da rede durante a compensação e também de não produzir efeitos indesejáveis significativos nas cargas protegidas durante a sua operação contínua, tais como distorções de corrente e tensão. Contudo, essa configuração de DVR não possui um bom desempenho na compensação de afundamentos de tensão com duração relativamente longa, se comparada com as outras topologias. Esse arranjo apresenta ainda, como desvantagem, elevados custos associados à aquisição e à manutenção do sistema de armazenamento de energia, além do conjunto apresentar uma maior complexidade operacional [20].

2.2.3 Suprimento de energia através de sistema elétrico independente

O fornecimento de energia ao barramento CC do DVR pode ser feito através de um sistema CA independente. Isso permite a compensação de afundamentos e elevações de tensão severos e com duração mais longa, desde que esse sistema de suprimento disponha de capacidade suficiente [15]. O suprimento de energia é feito através de um conversor CA-

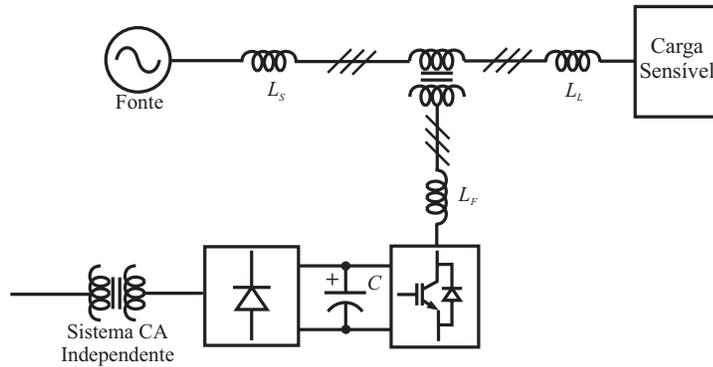


Figura 2.3: Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através de uma fonte independente

CC, que liga o barramento CC a uma rede de alimentação independente e isolada do sistema principal, como mostra de forma simplificada, a Figura 2.3.

Quando há diferença entre as tensões nominais dos dois sistemas, ou quando existe a necessidade de um maior nível de tensão no barramento CC, um transformador pode ser utilizado entre o retificador e o sistema independente, como mostra a Figura 2.3.

Essa topologia apresenta o inconveniente de requisitar uma rede de energia independente. Tal condição, por si só, é um fator que inviabiliza a aplicação dessa filosofia na maioria dos casos [15], uma vez que não é comum a existência de duas redes elétricas vizinhas completamente independentes entre si, ou seja, sem nenhum ponto de conexão entre elas. Se os dois sistemas elétricos fossem supridos por uma mesma linha de transmissão, por exemplo, a ocorrência de uma VTCD originada na transmissão afetaria ambas as redes elétricas. Essa situação torna desnecessária a utilização da topologia com suprimento de energia através de sistema independente, uma vez que pelo menos uma das topologias que consideram o suprimento ao barramento CC através do próprio sistema, descrito anteriormente, teria uma capacidade de mitigação no mínimo equivalente a essa topologia.

Além da completa independência, o sistema CA de suprimento do barramento CC precisa ter uma tensão praticamente constante em condições normais de operação e, ainda, deve ser robusto o suficiente para suportar as correntes demandadas pelo retificador durante a mitigação dos distúrbios. Dessa maneira, o barramento CC terá uma tensão praticamente

constante durante a ocorrência do distúrbio, representando uma topologia com controle do nível de tensão CC.

Assim sendo, pode-se dizer que esse arranjo apresenta todas as vantagens comuns à topologia que considera um suprimento ao barramento CC através da própria rede do DVR, com o diferencial de não possuir suas desvantagens. Ambas as topologias possuem basicamente as mesmas quantidades e tipos de componentes, e ainda apresentam ótimo desempenho na compensação de afundamentos de tensão severos e de maior duração, além de poderem estar aptas para a compensação de outros distúrbios elétricos, tais como sobretensões, subtensões e desequilíbrios de tensão.

2.2.4 Suprimento de energia através da própria rede

Talvez a característica mais marcante de um DVR seja sua capacidade de aproveitamento das tensões sob distúrbio para a composição de tensões de boa qualidade à carga. Essa característica é melhor explorada em topologias nas quais a energia fornecida pelo barramento CC é retirada da própria rede através de um conversor [19].

A topologia com suprimento de energia através da própria rede, mostrada na Figura 2.4, é independente de sistemas adicionais de armazenamento de energia e de redes elétricas auxiliares isoladas. Seu funcionamento considera que toda a energia necessária para o restabelecimento da tensão deve ser retirada do próprio sistema sob distúrbio.

Essa topologia é realizada através da ligação do barramento CC com a rede elétrica através de um conversor CA-CC trifásico não-controlado, que pode ser conectado de duas formas: do lado da fonte (Figura 2.4), ou do lado da carga (Figura 2.5). Estas topologias possuem a desvantagem de demandarem elevadas correntes que decorrem da mitigação de afundamentos de tensão, podendo contribuir para a intensificação desses afundamentos nos terminais das cargas ligados a montante do DVR, em paralelo às cargas sensíveis protegidas. Por outro lado, verifica-se uma maior capacidade de compensação de afundamentos de maior severidade e duração, em comparação com a topologia sem fonte adicional de armazenamento de energia, e ainda a possibilidade de compensação de outros distúrbios

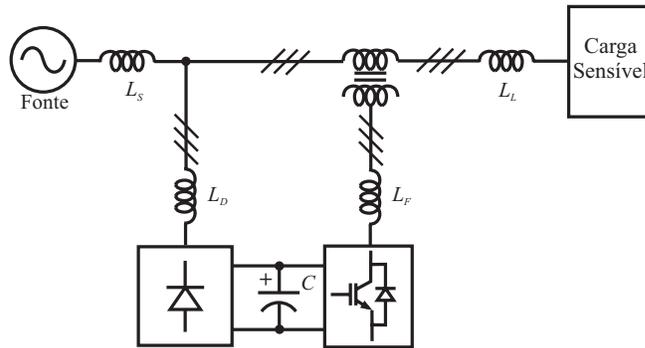


Figura 2.4: Configuração básica do DVR com suprimento de energia proveniente da própria rede

elétricos, tais como sobretensões, subtensões e desequilíbrios de tensões. O fato de estar o barramento CC conectado à própria rede sob distúrbio, possibilita que o DVR compense distúrbios através da injeção não só de potência reativa, como também de potência ativa.

As duas possibilidades de suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede são descritas a seguir. O princípio de funcionamento de tais topologias e seu desempenho são apresentados considerando-se a utilização de um retificador de 6 pulsos não-controlado como conversor CA-CC.

Conversor CA-CC ligado no lado da fonte

A topologia que considera um conversor CA-CC ligado no lado da fonte, é ilustrada de forma simplificada na Figura 2.4. Pode-se dizer que essa topologia também possui uma tensão CC não-controlável durante o distúrbio, uma vez que, na ocorrência de um afundamento ou elevação de tensão, a tensão do barramento CC varia de acordo com a tensão da rede. Por isso, a aplicação de tal topologia deve vir precedida de um estudo minucioso que garanta a existência de condições suficientes para a completa restauração da tensão sob distúrbio, uma vez que durante a ocorrência de um afundamento de tensão, ou seja, no momento em que o retificador retirar energia da rede, as amplitudes das tensões poderão estar bastante reduzidas. Em situações mais críticas, em que se faz necessário um aumento da capacidade de armazenamento do barramento CC, pode-se recorrer à utilização de um transformador elevador conectando o conversor CA-CC ao sistema elétrico, aumentando assim o aproveitamento das tensões sob distúrbios. Porém, tal aplicação representa custos

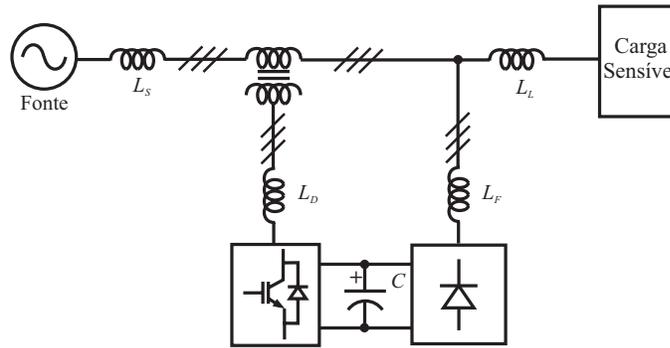


Figura 2.5: Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC no lado da carga

adicionais referentes à aquisição do referido transformador e às perdas elétricas inerentes a este, além de elevar os custos dos dispositivos de potência [15].

Analisando a Figura 2.5, pode-se dizer que em condições normais de operação, a tensão CC é aproximadamente igual ao valor de pico da tensão fase-fase do sistema. Assim, considerando a adoção de um retificador de 6 pulsos não-controlado, durante a ocorrência de um afundamento ou elevação de tensão, a tensão do barramento CC tenderá ao valor da tensão remanescente no sistema v_r [20].

Conversor CA-CC ligado no lado da carga

A topologia que utiliza um conversor CA-CC ligado no lado da carga, é ilustrada de forma simplificada na Figura 2.5.

Como o barramento CC está conectado entre o transformador série e a carga sensível, a tensão de entrada do retificador é praticamente a mesma daquela dos terminais da carga sensível, o que equivale dizer que se trata de uma tensão constante ou com pequenas variações, uma vez que esta é prontamente restaurada na ocorrência de distúrbios. Como consequência, a tensão no barramento CC também será praticamente constante ou terá uma pequena redução do seu valor, podendo representar uma topologia com tensão CC controlável durante o distúrbio. Com isso, considerando que a tensão nos terminais da carga protegida praticamente não varia, para qualquer situação dessa topologia, o nível de tensão CC é igual a tensão remanescente.

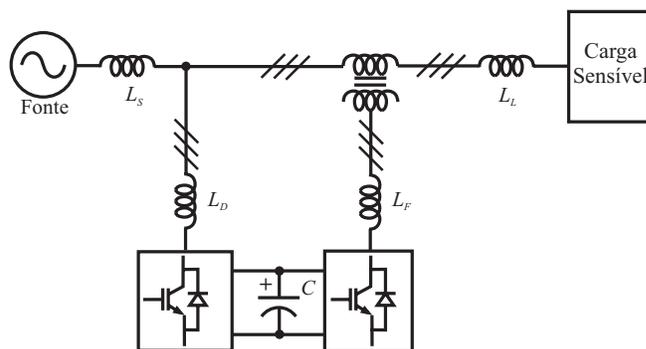


Figura 2.6: Configuração do DVR com retificador controlado

Um DVR que adota esses tipos de topologias pode representar uma solução eficiente na mitigação de afundamentos e elevações de tensão pelo fato de a própria injeção de tensão série poder promover um controle da tensão no barramento CC. Essa configuração de DVR apresenta bastante eficiência na mitigação de afundamentos de tensão severos e de maiores duração [20]. Porém essa topologia apresenta a desvantagem de ter correntes maiores a serem manipulados pelo conversor série já que a corrente de alimentação do retificador a diodos passa pelo transformador em série com a carga. Além disso, a instalação junto a carga do retificador a diodos, cujas correntes são distorcidas, pode provocar surgimento de harmônicos de tensão não suportáveis pela carga sensível. Devido a esses fatos essa não foi a topologia escolhida.

2.2.5 Suprimento de energia através da própria rede com utilização de um retificador controlado

A utilização de um retificador totalmente controlado, mostrado na Figura 2.6, faz com que o dispositivo possa operar como DVR, como filtro ativo série, filtro ativo paralelo ou filtro ativo série-paralelo [21] e [22]. A operação como DVR possibilita o controle da tensão do barramento CC a partir de tensões residuais da rede, com um valor baixo de capacitância no barramento CC. Entretanto, a aplicação desta topologia leva a um retificador significativamente mais complexo e mais caro.

Uma simplificação é obtida através de uma ponte retificadora como já foi visto nas topologias anteriores. A ponte retificadora aproveita a tensão da rede sob distúrbio, sem

elevar significativamente a complexidade e o custo do retificador.

O estudo dos tipos e funcionamento de cada topologia não é o objetivo do presente texto, mas sim procurar realizar melhorias na capacidade de compensação do DVR estudando as suas estruturas de controle. Como exemplo, pode-se citar a inserção da compensação de sequência zero e obtenção de referências de controle que tenham a fidelidade necessária a tensão pré-falta do sistema. Portanto, a topologia abordada neste texto daqui por diante será baseada no esquema mostrado na Figura 2.4 que é a mais comumente usada e apresenta uma boa capacidade de correção de distúrbios.

2.3 Controle

O esquema de controle do DVR é mostrado na Figura 2.7. As grandezas medidas do sistema são: as correntes do filtro $i_{f,abc}$, as tensões do capacitor de saída do filtro $v_{f,abc}$, as tensões de linha v_{abc} e a tensão do barramento CC v_{dc} . O diagrama em blocos do esquema de controle do DVR é mostrado na Figura 2.8. É composto fundamentalmente por duas malhas de controle (representadas na Figura 2.8):

- *Malha de controle de tensão do capacitor:* É uma malha mais lenta que usa controladores tipo proporcional-integral (PI) cuja as correntes de saída $i_{f,\alpha\beta}^*$ são as correntes de referência necessárias para manter os capacitores de saída do inversor carregados;
- *Malha de controle de corrente:* Essa malha regula as correntes $i_{f,\alpha\beta}$ do DVR usando um controle preditivo de corrente. As correntes de referência $i_{f,\alpha\beta}^*$ são as saídas dos reguladores da malha de tensão.

Além das malhas de tensão e corrente, o controle do DVR necessita de alguns blocos auxiliares:

- Transformação de abc para $\alpha\beta 0$;
- Transformação de $\alpha\beta 0$ para $dq0$ (não mostrada na Figura 2.8);

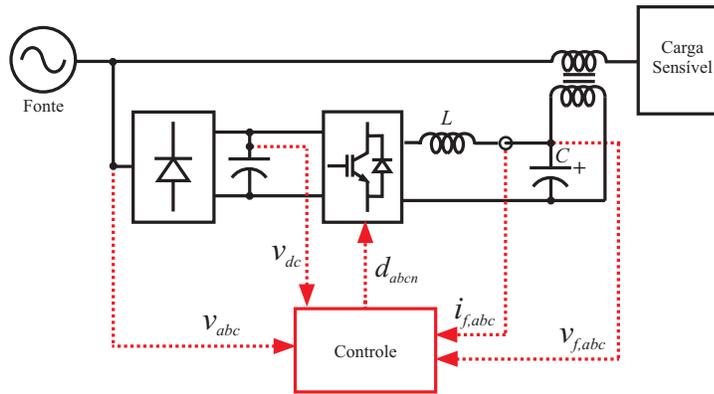


Figura 2.7: DVR e seu controle.

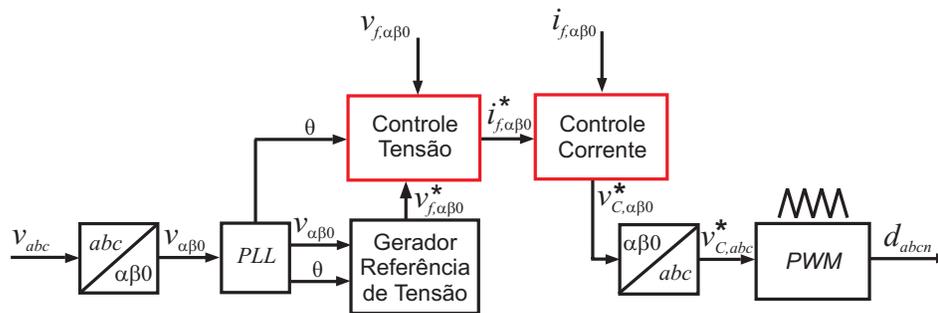


Figura 2.8: Diagrama de blocos do controle do DVR

- PLL (*Phase Locked Loop*);
- Gerador de referência.

2.3.1 Sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$

Esse sistema de coordenadas, proposto por Clarke, representa as variáveis trifásicas do sistema abc em um sistema de coordenadas ortogonais $\alpha\beta 0$ [23]. A Figura 2.9 mostra esse sistema de coordenadas onde o eixo 0 é ortogonal ao plano $\alpha\beta$ e não é representado no mesmo.

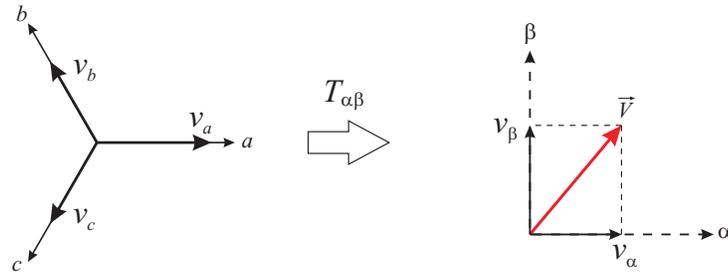


Figura 2.9: Transformação de referencial abc para α/β

A matriz transformação de Clarke é:

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & +\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A constante de $2/3$ significa que a transformação é invariante em amplitude. A aplicação da transformação $T_{\alpha\beta 0}$ ao conjunto de tensões ou correntes trifásicas resulta nos vetores:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = [T_{\alpha\beta 0}] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = [T_{\alpha\beta 0}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.3.2 Sistema de coordenadas $dq0$

A transformação das variáveis trifásicas em um sistema de coordenadas $dq0$ síncrono foi proposto por Park e inicialmente aplicada na análise de máquinas elétricas. Posteriormente ela foi aplicada no controle de máquinas elétricas, inversores de frequência, retificadores controlados e filtros ativos, entre outros. A matriz transformação de Park é:

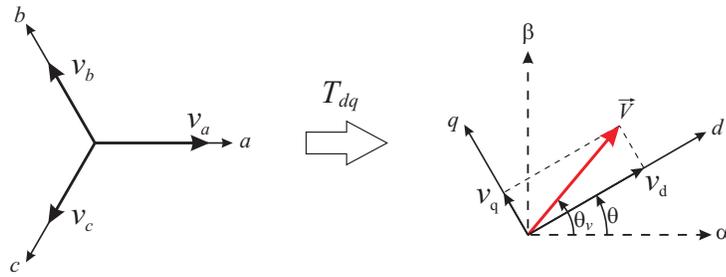


Figura 2.10: Transformação de referencial $\alpha\beta 0$ para dq0

$$[T_{dq0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

onde θ é a posição do eixo d , do novo sistema de coordenadas, em relação ao eixo da fase a . A aplicação da transformação $[T_{dq0}]$ ao conjunto de tensões ou correntes trifásicas resulta nos vetores:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = [T_{dq0}] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = [T_{dq0}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A Figura 2.10 ilustra essa transformação aplicada a um conjunto de tensões trifásicas resultando no vetor tensão $V = v_d + jv_q$. As componentes v_0 e i_0 em (2.6) e (2.7) estão relacionadas às componentes homopolares da tensão e corrente, respectivamente e são mapeadas em um eixo ortogonal aos eixos dq . Em Aplicações a três fios, as componentes v_0

e i_0 são nulas. Sejam as tensões da rede dadas por:

$$\vec{V}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \hat{V} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Aplicando a transformação $[T_{dq}]$ como $\theta = \theta_v = \omega t$ obtém-se um sistema de coordenadas dq síncrono girando na velocidade ω cujo eixo d está sempre alinhado com o vetor tensão. Dessa forma, a tensão v_d é constante e igual a \hat{V} enquanto que a componente v_q é nula. Para achar as coordenadas em $dq0$ de um conjunto de tensões ou correntes trifásicas pode-se ainda calcular suas componentes em $\alpha\beta0$ e a partir daí calcular suas componentes $dq0$. Pela Figura 2.10, vê-se que os eixos d e q são rotacionados de forma síncrona ao vetor V . Uma rotação é representada matematicamente por uma exponencial com argumento complexo (Figura 2.11). Então para fazer uma transformação de referencial $\alpha\beta0$ para o $dq0$ faz-se:

$$\vec{x}_{dq} = e^{-j\theta} \cdot \vec{x}_{\alpha\beta} \quad (2.9)$$

onde

$$\begin{aligned} \vec{x}_{dq} &= x_d + j \cdot x_q \\ \vec{x}_{\alpha\beta} &= x_\alpha + j \cdot x_\beta \end{aligned} \quad (2.10)$$

Aplicando (2.10) em (2.9) e utilizando a equação de Euler chega-se a:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Então nesse caso, a transformação do referencial abc para o dq é feito através de (2.2) e (2.11). No entanto, é preciso observar que para computar (2.11) é necessário encontrar o ângulo θ . Para esse fim se usa o PLL.

Em muitas aplicações de sistemas trifásicos se faz necessário a mudança de referencial ou coordenadas do sistema estacionário abc para um sistema de coordenadas mais apropriado.

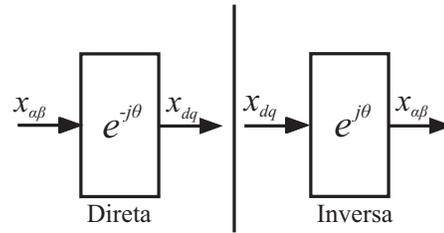


Figura 2.11: Transformação direta e inversa de Park

Essa mudança permite a simplificação dos modelos matemáticos e a possibilidade de executar estratégias de controle que não seriam factíveis no referencial abc . Um caso que ilustra esse fato é a representação do modelo do motor de indução trifásico, que é extremamente simplificado quando transformado do referencial estacionário abc para o referencial $dq0$ síncrono com o vetor tensão da rede elétrica. Em geral, os sistemas de referência mais usados são o estacionário $\alpha\beta0$ e o síncrono $dq0$.

2.3.3 PLL

O objetivo do DVR é compensar vários tipos de distúrbios como afundamentos ou elevações de tensão. Além disso, é possível ainda compensar tensões desequilibradas e harmônicos de tensão. Existem cargas que são extremamente sensíveis a estes tipos de defeitos, então as mesmas devem ser alimentadas por um conjunto de tensões trifásicas equilibradas e sem harmônicos, ou seja, a carga deve ser alimentada apenas com componente de frequência fundamental de sequência positiva. Para isso, faz-se necessário detectar essa componente de forma apropriada. Além disso, para realizar a transformação $dq0$ é preciso determinar o ângulo θ . Esse ângulo θ determina a posição dos eixos d e q do referencial dq . Normalmente esse referencial é síncrono com o vetor tensão da rede elétrica. Portanto, para se determinar θ , usa-se um dispositivo que caracteriza completamente o vetor tensão, ou seja, calcula módulo e ângulo. Esse dispositivo se chama PLL [24]. Seu esquema é apresentado na Figura 2.12. Os PLL's mais relevantes foram propostos na literatura em [24]-[29]. A maioria deles é baseada em uma resposta de controle bastante rápida. No entanto, tendo em vista que a velocidade de detecção não é um pré-requisito para o DVR, como será visto adiante, optou-se por empregar um SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame*) com uma banda de passagem

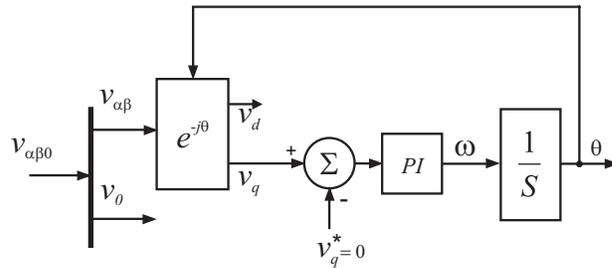


Figura 2.12: Diagrama em blocos do PLL

estreita.

A Figura 2.12 mostra o diagrama de blocos do SRF-PLL. Sua entrada é formada pelo conjunto de tensões no referencial $\alpha\beta 0$ v_α , v_β e v_0 que são transformadas para o referencial $dq0$. A partir daí um controlador do tipo PI é usado para controlar v_q e fazê-lo convergir para o seu valor de referência (que é convenientemente escolhido como zero). Na saída do PI temos a velocidade angular ω que deve ser integrada com o objetivo de se determinar θ . O ângulo é então realimentado para o bloco de transformação de $\alpha\beta 0$ para $dq0$. No diagrama da Figura 2.12, um detalhe merece atenção especial: a necessidade de inclusão do bloco de integração na malha direta. A inserção desse integrador decorre do fato do caminho de realimentação ser desprovido de estágio de armazenamento de energia. Isso faz com que a malha formada através do ganho proporcional não apresente nenhum elemento armazenador de energia, o que torna o sistema fisicamente irrealizável [19].

Para entender o princípio de funcionamento do PLL considere a Figura 2.13. Se existir um erro na determinação de θ , haverá um defasamento entre \vec{V} e o sistema de eixos dado por θ_e . Nesse caso, v_q é positivo e o erro ε na entrada do PI será positivo. A consequência disso é que o PI irá incrementar ω até que θ_e seja zero. Da mesma forma, se tivermos um θ_e negativo, o erro será negativo e o PI irá decrementar ω , ou seja, desacelerar, corrigindo o erro.

O tempo de resposta do PLL pode ser ajustado através da sintonia dos parâmetros k_p e k_i do controlador. Se a faixa de passagem do PI for muito alta, as componentes harmônicas presentes nas tensões da rede elétrica também estarão presentes na saída do PLL sob forma de distúrbios. Entretanto, reduzindo a faixa de passagem, essas componentes harmônicas

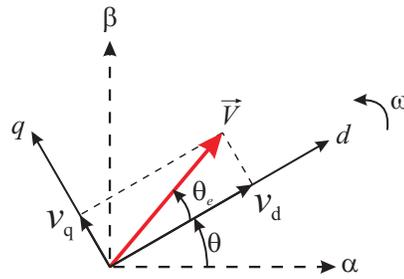


Figura 2.13: Atuação do PLL na anulação do erro.

serão atenuadas. A consequência desta ação é o aumento da resposta transitória do PLL.

2.3.4 Geração de referência

O bloco de geração de referência requer atenção e estudo, porque é a partir do mesmo que se determina as tensões a serem injetadas no sistema através do transformador série.

Uma vez que o DVR deve compensar apenas eventos com durações relativamente reduzidas, as tensões de referência v_d^* , v_q^* e v_0^* para as tensões na carga, podem ser obtidas através da utilização de filtros passa-baixas (Figura 2.14), nos quais as entradas são as tensões instantâneas da rede v_d , v_q e v_0 . Esses filtros devem ser projetados para ter uma dinâmica lenta de tal forma que os valores de referência acompanhem as variações lentas das tensões trifásicas, evitando a entrada em operação nessas situações. Com esse procedimento é possível então, calcular as tensões de referência que o DVR deve injetar na rede. No entanto, é preciso ainda se conhecer o valor do ângulo θ calculado pelo PLL e este não deve ser afetado por uma perturbação da rede. Por essa razão a dinâmica do mesmo deve ser lenta, de forma a fornecer, durante a falta, um ângulo que ainda não está sentindo a perturbação da rede elétrica.

Como os valores de referência possuem dinâmicas lentas, os erros $\Delta v_q = v_q^* - v_q$, $\Delta v_d = v_d^* - v_d$ e $\Delta v_0 = v_0^* - v_0$ representam as tensões a serem injetadas pelo DVR, no caso de compensação total. O esquema do gerador de referência do DVR é então mostrado na Figura 2.14.

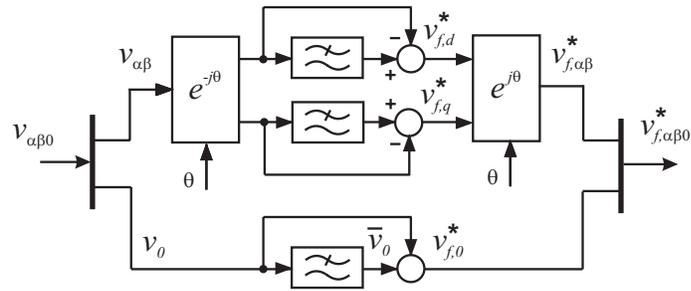


Figura 2.14: Geração de referência

2.4 Conclusão

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica com os vários tipos de topologia que se pode utilizar o DVR, ressaltando as vantagens e desvantagens de cada uma. Também foi dito que o DVR necessita de alguns blocos auxiliares para a realização do controle e foi demonstrado cada bloco desse, que são: os blocos de transformação do sistema de coordenadas abc para $\alpha\beta 0$ e $\alpha\beta 0$ para $dq0$, o PLL que é utilizado para detectar a tensão da rede em tempo real e o bloco de geração de referência para obter os dados da tensão de referência que o DVR deveria injetar. Todos esses blocos foram explicitados e realizados os seus respectivos diagramas de blocos.

3 | MODELAGEM E CONTROLE

Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição e a modelagem matemática de cada elemento componente do DVR. Além disso os esquemas de medição e o sistema de controle de corrente e de tensão são descritos.

O DVR tem como função principal compensar afundamentos ou elevações momentâneas de tensão. No entanto, dependendo da estratégia de controle empregada, ele pode também ser capaz de compensar distorções nas formas de onda de tensão.

Pode-se verificar que em instalações elétricas trifásicas alimentadas através de um transformador conectado em delta-estrela aterrado ou em estrela-delta, a ocorrência de um afundamento ou elevação de tensão na tensão primária não é capaz de produzir, no secundário, componentes de tensão de sequência zero [1]. Porém, em uma indústria alimentada por um transformador com conexão delta-estrela aterrado, um defeito à terra no lado de baixa tensão pode produzir componentes de sequência zero em pontos onde cargas sensíveis estejam instaladas. A fim de permitir a compensação de componentes de sequência zero, optou-se, neste trabalho, pelo uso de um DVR contendo um inversor a quatro braços. Os principais componentes do DVR estudado neste trabalho estão mostrados no diagrama simplificado da Figura 3.1.

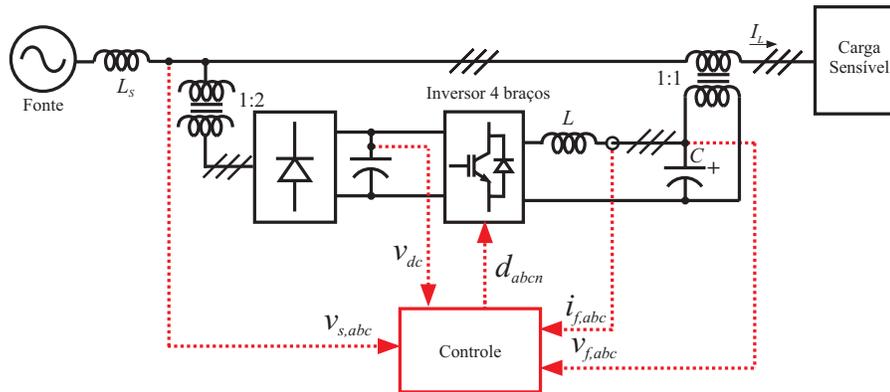


Figura 3.1: Principais blocos componentes de um DVR

3.1 Retificador

Para a sua operação, o DVR precisa de um fornecimento de energia ativa. Esta fonte de energia pode ser uma bateria, células fotovoltaicas ou o próprio sistema. Neste projeto, foi escolhido o próprio sistema, e esta energia é retirada através de um retificador trifásico com ponte de diodos (não controlado), que é altamente confiável e de baixo custo 3.2. Como visto no Capítulo 1, existem topologias de DVR que contemplam a utilização de retificador de entrada controlado. Nesses casos, emprega-se geralmente retificador tipo boost (elevador de tensão), de modo a manter elevada a tensão do barramento CC mesmo durante afundamento na tensão da rede. Porém, na maioria dos casos, essa topologia é evitada por razões de custo.

Devido ao uso de retificador a diodos, logo após um afundamento de tensão da rede, os diodos do retificador cortam (param de conduzir), impedindo a alimentação do barramento CC. Então, durante o afundamento, parte da energia fornecida à carga é proveniente do barramento CC. Por esta razão, a tensão do barramento CC tende a cair até que os diodos do retificador de entrada voltem a conduzir.

O retificador de entrada, assim como a rede elétrica, é modelado empregando os blocos do Simpower Systems do Matlab/Simulink.

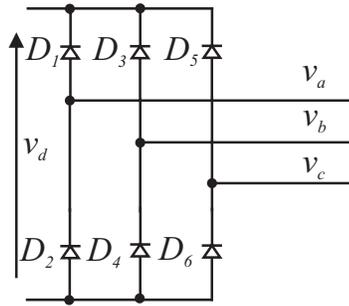


Figura 3.2: Retificador trifásico não controlado

3.2 Barramento CC

Os capacitores do barramento CC devem ser dimensionados de modo que a energia neles armazenada seja suficiente para manter a tensão na carga em níveis adequados durante um afundamento. Para tanto, deve-se considerar os afundamentos mais severos que o DVR deve ser capaz de compensar, em termos de duração e amplitude da tensão remanescente.

Independentemente do valor da capacitância do barramento CC, a topologia do DVR em estudo tem a capacidade de compensar afundamentos com tensão remanescente de aproximadamente 50% e qualquer duração. Com isso, mais de 90% das ocorrências em um sistema elétrico de distribuição típico seriam compensados. Caso se deseje possibilitar a compensação de afundamentos com tensão remanescente inferior a 50%, o capacitor do barramento CC deve ser adequadamente dimensionado.

Como exemplo, considera-se um caso em que se requeira compensar afundamentos com tensão remanescente de 30% com um curto-circuito trifásico com uma duração de 1 segundo (60 ciclos). Os capacitores são dimensionados de modo que a tensão na carga seja mantida no valor de pré-falta, ou seja, não sofra oscilações.

Obviamente, o custo dos capacitores aumenta. Nesses casos, seria importante avaliar o uso do retificador boost para alimentar o barramento CC, considerando não só os aspectos econômicos, como também o aumento na complexidade do controle.

Para dar início ao dimensionamento deve-se obter os dados do sistema de acordo com o

especificado. Considere, por exemplo, que em regime permanente:

$$\begin{aligned}
 V_L &= 380 \text{ V} \\
 S_L &= 11515 \text{ VA} \\
 P_L &= 9172 \text{ W} \\
 Q_L &= 6962 \text{ VA} \\
 I_L &= \frac{S_L}{\sqrt{3}V_L} = 17,49 \text{ A}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

onde V_L é o valor RMS da tensão entre fases nominal; S_L, P_L e Q_L são as potências aparente, ativa e reativa nominais da carga, respectivamente; I_L é a corrente de linha nominal.

$$V_{DVR} = 0,7 \cdot 380 \text{ V} = 266 \text{ V} \tag{3.2}$$

A fim de produzir tal tensão entre fases, a tensão do barramento CC no final do afundamento deve ser superior a:

$$V_{dc,final} = \sqrt{2} \cdot 266 \text{ V} = 376,2 \text{ V} \tag{3.3}$$

Tendo em vista que a corrente de carga permanece igual à de pré-falta (já que se está supondo que a carga permanece com tensão nominal), a potência ativa total fornecida pelo DVR durante o afundamento é constante e igual a:

$$P_{DVR-Carga} = \sqrt{3} \cdot 266 \cdot 17,49 \cdot \cos(\theta) = 6420 \text{ W} \tag{3.4}$$

Portanto, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 V_{dc, inicial} = 806,1 \text{ V} \\
 V_{dc, final} = 376,2 \text{ V} \\
 P_{DVR-carga} = 6420 \text{ W} \\
 t = 1 \text{ s}
 \end{array} \right. \tag{3.5}$$

A energia total a ser fornecida pelo capacitor do barramento CC é:

$$\Delta E = \int P_L \cdot dt = 6420 J \quad (3.6)$$

A capacitância do barramento CC pode, então, ser determinada:

$$\Delta E = E_{inicial} - E_{final} = \frac{1}{2}C(V_{dc,inicial}^2 - V_{dc,final}^2). \quad (3.7)$$

Fazendo os cálculos e acrescentando aproximadamente 15% no valor da capacitância, já que não foram consideradas as perdas no sistema, quedas de tensão nas chaves, etc, chega-se a:

$$C = 42 mF \quad (3.8)$$

Seguindo este mesmo exemplo o valor da capacitância do barramento CC do DVR aqui presente será de 42mF, ou seja, suficiente para suportar o pior caso de afundamento que o mesmo pode sofrer.

3.3 Inversor de frequência e modulação por largura de pulso

3.3.1 Inversor

O conversor estático considerado é constituído por chaves com capacidade de condução e corte controlados. Quando estes conversores têm a função de gerar uma tensão alternada a partir de uma tensão contínua, são chamados de inversores. No DVR do presente trabalho é utilizado um inversor com um quarto braço, para possibilitar a compensação de componentes de sequência zero, além de gerar as tensões de compensação de sequência positiva e negativa a serem injetadas na rede elétrica.

Um dos principais motivos para não se utilizar da topologia do inversor trifásico com três braços, utilizando o neutro interligado ao ponto "O" entre os capacitores é o fato de que ao utilizar essa topologia os capacitores podem se descarregar de forma diferente, ou seja, considerando I_{dc} positiva quando a chave de cima estiver fechada o capacitor de cima irá

descarregar e quando a de baixo estiver fechada o de baixo irá descarregar. Isso pode gerar um desbalanceamento dos capacitores e esse fenômeno é indesejável, pois o inversor pode não ser capaz de sintetizar fielmente as tensões de referência.

Existem técnicas de PWM para garantir a produção das tensões de referência e, ao mesmo tempo, controlar as tensões dos capacitores do barramento CC, evitando o desequilíbrio. Porém, mesmo considerando o uso dessas técnicas, a conexão do neutro ao ponto "O" faz com que a máxima tensão que pode ser produzida pelo inversor seja limitada a $V_{dc}/2$ (valor de pico da tensão de fase).

O uso de um inversor trifásico com quatro braços, além de não causar desequilíbrio entre as tensões dos capacitores do barramento, permite um melhor aproveitamento da tensão do barramento CC, podendo a tensão de saída atingir $V_{dc}/\sqrt{3}$ (valor de pico da tensão de fase).

Isso explica o motivo pelo qual optou-se utilizar uma topologia com um inversor trifásico com quatro braços.

Na figura 3.3 pode-se observar a topologia do inversor trifásico com o quarto braço.

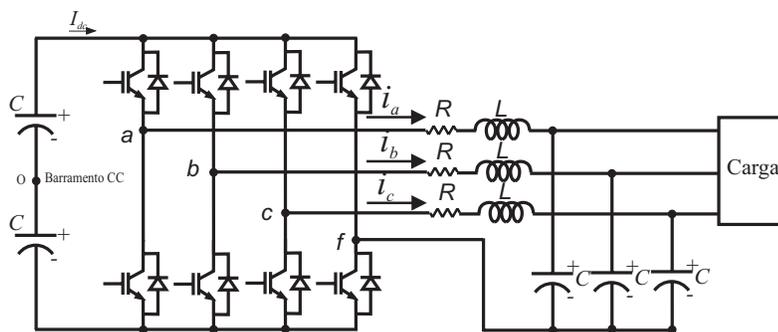


Figura 3.3: Inversor a quatro braços e filtro de saída do inversor

3.3.2 PWM para o inversor trifásico com o quarto braço

É bastante comum aparecer tensão e corrente de sequência zero durante um desbalanceamento da carga ou da fonte em um sistema a quatro fios. Então para fazer a compensação de sequência zero durante esses desbalanços utiliza-se um inversor com quatro braços como já foi mostrado. E para fazer o controle do chaveamento desse inversor é

necessário um modulador compatível com esse número de chaves. Então, utilizou-se um PWM para um inversor de quatro braços baseado no método trifásico.

Esse método consiste na utilização de uma tensão de offset V_{fo} , além é claro das tensões do inversor V_{ao} , V_{bo} , V_{co} , onde "f" é o ponto de neutro do filtro que será interligado ao quarto braço do inversor [30].

A respectiva tensão fase-neutro pode ser reescrita utilizando a tensão de polo V_{ao} , V_{bo} , V_{co} e a respectiva tensão comum de offset V_{fo} [30].

$$\left\{ \begin{array}{l} -V_{dc} \leq V_{af}, V_{bf}, V_{cf} \leq V_{dc} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{af} = V_{ao} - V_{fo} \\ V_{bf} = V_{bo} - V_{fo} \\ V_{cf} = V_{co} - V_{fo} \end{array} \right. \quad (3.10)$$

A tensão de offset V_{fo} pode ser manipulada ativamente pelo controle da propagação do sinal do braço adicional do inversor trifásico de quatro braços, que é bem diferente do trifásico com três braços. Se a tensão de offset é fixada em um determinado valor, as tensões respectivas de pólo podem ser calculadas como:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ao} = V_{af} + V_{fo} \\ V_{bo} = V_{bf} + V_{fo} \\ V_{co} = V_{cf} + V_{fo} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

As combinações disponíveis da tensões de pólo e tensão de offset podem ser representadas como três pares ordenados (V_{fo}, V_{ao}) , (V_{fo}, V_{bo}) e (V_{fo}, V_{co}) , em coordenadas retangulares, e essas tensões devem existir limitadas dentro de um quadrado, que é centrado na origem e tem lados de comprimento V_{dc} , como mostrado na Figura 3.4. Todas as tensões de pólo e tensão de offset têm restrições que são causadas pela tensão do barramento CC [30].

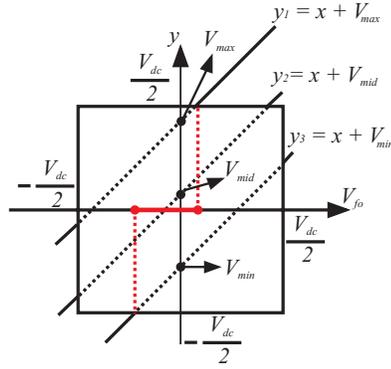


Figura 3.4: Região de operação da tensão de offset

$$\left\{ -\frac{V_{dc}}{2} \leq V_{ao}, V_{bo}, V_{co} \leq \frac{V_{dc}}{2} \right. \quad (3.12)$$

$$\left\{ -\frac{V_{dc}}{2} \leq V_{fo} \leq \frac{V_{dc}}{2} \right. \quad (3.13)$$

A respectiva tensão de pólo pode ser substituída por y_1, y_2 e y_3 , assim como a tensão de offset por x . Além disso, as equações das tensões de pólo em (3.11) podem ser reescritas, onde elas correspondem a equações de retas com inclinação unitária em coordenadas x - y .

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = x + V_{af} \\ y_2 = x + V_{bf} \\ y_3 = x + V_{cf} \end{array} \right. \quad (3.14)$$

As tensões fase-neutro que são representados pelas linhas inclinadas se interceptam no eixo y , e os pares ordenados devem ser escolhidos na linha pontilhada interna do quadrado, como mostrado na Figura 3.4. No entanto, a região onde a tensão de offset é disponível, é limitada, de modo que esta região pode ser indicada como uma linha sólida no eixo- x , como mostrado Figura 3.4.

$$\left\{ -\frac{V_{dc}}{2} - V_{min} \leq V_{fo} \leq \frac{V_{dc}}{2} - V_{max} \right. \quad (3.15)$$

onde $V_{min} = \min(V_{af}, V_{bf}, V_{cf})$, $V_{mid} = \text{mid}(V_{af}, V_{bf}, V_{cf})$, $V_{max} = \max(V_{af}, V_{bf}, V_{cf})$.

$\min(V_{af}, V_{bf}, V_{cf})$, representa uma função que seleciona o valor mínimo entre V_{af}, V_{bf}, V_{cf} , $\text{mid}(V_{af}, V_{bf}, V_{cf})$ seleciona o valor médio entre V_{af}, V_{bf}, V_{cf} , e $\max(V_{af}, V_{bf}, V_{cf})$ seleciona o valor máximo entre V_{af}, V_{bf}, V_{cf} . Se a diferença entre um valor máximo e um valor mínimo da tensão fase-neutro tornar maior e igual a tensão do barramento CC, então a tensão disponível de offset é fixada em um ponto. Assim a tensão de saída fase-neutro do inversor de quatro braços é limitada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{max} - V_{min} \leq V_{dc} \end{array} \right. \quad (3.16)$$

A melhor sequência de acionamento pode ser obtida pela seleção da tensão de offset, tal como consta em:

$$v_{fo} \left\{ \begin{array}{l} V_{min} > 0, \quad V_{fo} = -\frac{V_{max}}{2} \\ V_{max} < 0, \quad V_{fo} = -\frac{V_{min}}{2} \\ V_{fo} = -\frac{(V_{max} + V_{min})}{2} \end{array} \right. \quad (3.17)$$

e as tensões de polo são naturalmente determinadas pela equação (3.11). Portanto, os tempos em que as chaves superiores das respectivas pernas serão acionadas podem ser obtidos e implementados com uma portadora triangular para o cálculo da tensão de offset [30].

$$\left\{ \begin{array}{l} T_a = \frac{T_s}{2} + \frac{V_{ao}}{V_{dc}} T_s \\ T_b = \frac{T_s}{2} + \frac{V_{bo}}{V_{dc}} T_s \\ T_c = \frac{T_s}{2} + \frac{V_{co}}{V_{dc}} T_s \\ T_f = \frac{T_s}{2} + \frac{V_{fo}}{V_{dc}} T_s \end{array} \right. \quad (3.18)$$

E assim será utilizado esse método para controlar as chaves do inversor a quatro braços com o objetivo de compensar componentes de sequência zero.

3.4 Filtro de saída

A tensão de saída do inversor necessita ser filtrada para poder ser injetada em série com a carga. A função do filtro de saída do inversor é atenuar fortemente as componentes

harmônicas com frequência de chaveamento e seus múltiplos. No entanto, o filtro deve deixar passar as componentes de tensão a serem injetadas em série com a carga durante um afundamento ou elevação de tensão. No presente trabalho como o objetivo é compensar apenas afundamento ou elevação de tensão, o filtro deve deixar passar componentes de frequência fundamental. Nos casos em que se deseja compensar harmônicas de tensão da rede, essas componentes precisam passar por esse filtro, a fim de serem injetadas em série com a carga. O filtro aqui considerado é um filtro de segunda ordem, como mostrado na Figura 3.3.

As equações que representam a planta no domínio do tempo são:

$$\begin{aligned}v_a &= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + v_{fa} \\v_b &= Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + v_{fb} \\v_c &= Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + v_{fc}\end{aligned}\tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}C \frac{dv_{fa}}{dt} &= i_a - i_{fa} \\C \frac{dv_{fb}}{dt} &= i_b - i_{fb} \\C \frac{dv_{fc}}{dt} &= i_c - i_{fc}\end{aligned}\tag{3.20}$$

Transformando as equações (3.19) e (3.20) para referencial $\alpha\beta 0$ obtém-se:

$$\begin{aligned}v_\alpha &= Ri_\alpha + L \frac{di_\alpha}{dt} + v_{f\alpha} \\v_\beta &= Ri_\beta + L \frac{di_\beta}{dt} + v_{f\beta} \\v_0 &= Ri_0 + L \frac{di_0}{dt} + v_{f0}\end{aligned}\tag{3.21}$$

$$\begin{aligned}C \frac{dv_{f\alpha}}{dt} &= i_\alpha - i_{f\alpha} \\C \frac{dv_{f\beta}}{dt} &= i_\beta - i_{f\beta} \\C \frac{dv_{f0}}{dt} &= i_0 - i_{f0}\end{aligned}\tag{3.22}$$

E, transformando as equações (3.21) e (3.22) de $\alpha\beta 0$ para $dq0$ resulta em:

$$\begin{aligned}v_d &= Ri_d - \omega Li_q + L \frac{di_d}{dt} + v_{fd} \\v_q &= Ri_q + \omega Li_d + L \frac{di_q}{dt} + v_{fq} \\v_0 &= Ri_0 + L \frac{di_0}{dt} + v_{f0}\end{aligned}\tag{3.23}$$

$$\begin{aligned}C \frac{dv_{fd}}{dt} &= i_d - i_{fd} - \omega C v_{fq} \\C \frac{dv_{fq}}{dt} &= i_q - i_{fq} + \omega C v_{fd} \\C \frac{dv_{f0}}{dt} &= i_0 - i_{f0}\end{aligned}\tag{3.24}$$

As equações do modelo do filtro de saída do inversor em referencial $dq0$ podem ser reescritas no domínio da frequência como segue:

$$\begin{aligned}v_d &= Ri_d - \omega Li_q + sLi_d + v_{fd} \\v_q &= Ri_q + \omega Li_d + sLi_q + v_{fq} \\v_0 &= Ri_0 + sLi_0 + v_{f0}\end{aligned}\tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}sCv_{fd} &= i_d - i_{fd} + \omega C v_{fq} \\sCv_{fq} &= i_q - i_{fq} - \omega C v_{fd} \\sCv_{f0} &= i_0 - i_{f0}\end{aligned}\tag{3.26}$$

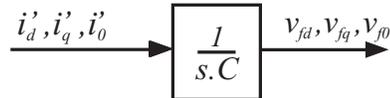
ou seja:

$$\begin{aligned}i_d &= \frac{1}{sL}(v_d - Ri_d + \omega Li_q - v_{fd}) \\i_q &= \frac{1}{sL}(v_q - Ri_q - \omega Li_d - v_{fq}) \\i_0 &= \frac{1}{sL}(v_0 - Ri_0 - v_{f0})\end{aligned}\tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}v_{fd} &= \frac{1}{sC}(i_d - i_{fd} + \omega C v_{fq}) \\v_{fq} &= \frac{1}{sC}(i_q - i_{fq} - \omega C v_{fd}) \\v_{f0} &= \frac{1}{sC}(i_0 - i_{f0})\end{aligned}\tag{3.28}$$

3.5 Controle

O objetivo do bloco de controle é impor, na saída do filtro, as tensões do bloco de geração de referência. Pode-se simplesmente aplicar, na saída do inversor, as tensões do bloco de geração de referência. No entanto, o filtro de saída causaria atenuação e atraso na tensão injetada em série com a carga. Por esta razão, prefere-se realizar o controle em malha fechada das tensões de saída do filtro. De acordo com as equações (3.28), essas tensões podem ser controladas pela imposição das correntes fictícias i'_d , i'_q e i'_0 :



onde,

$$\begin{aligned} i'_d &= i_d + (-i_{fd} + \omega C v_{fq}) \\ i'_q &= i_q + (-i_{fq} - \omega C v_{fd}) \\ i'_0 &= i_0 + (-i_{f0}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Portanto, o controle das componentes de tensão v_{fj} , ($j = d, q$ ou 0) pode ser projetado tomando como entrada a respectiva corrente fictícia i'_j ($j = d, q$ ou 0). Considerando controlador proporcional-integral, obtém-se o diagrama de blocos da Figura 3.5.

Observa-se que o controle das tensões de saída do filtro apresentado depende da imposição das componentes fictícias de corrente i'_j ($j = d, q$ ou 0). Tendo em vista que o inversor opera como fonte de tensão faz-se necessária a implementação de controle para essas correntes.

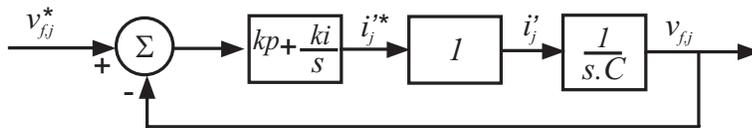


Figura 3.5: Diagrama de blocos do controle de tensão

É considerada a existência de malhas de controle de correntes fictícias i'_j com respostas muito mais rápidas do que as malhas de controle das tensões v_{fj} . Essas malhas de controle

de corrente foram representadas com uma função de transferência unitária. Assim, para que esta aproximação seja válida, as constantes k_p e k_i da Figura 3.5 devem ser escolhidas de modo que as constantes de tempo da função de transferência de malha fechada sejam muito maiores do que as constantes de tempo correspondentes às respostas do controle de corrente. Com o objetivo de permitir respostas rápidas nas malhas de controle das tensões de saída do filtro, optou-se pelo controle preditivo das correntes fictícias i'_j .

3.6 Controle preditivo de corrente

A estratégia de controle preditivo consiste em forçar os erros de corrente a se anular após uma amostragem, garantindo assim que a saída controlada acompanhe os valores de referência do controlador. As suas principais vantagens consistem em resposta dinâmica rápida e fácil implementação e uma das principais desvantagens é a alta sensibilidade aos parâmetros da planta, podendo provocar erro de regime permanente. Erros de regime nas correntes controladas são, no presente caso, irrelevantes, devido à presença de malhas externas de controle de tensão.

Conforme as equações (3.27) as correntes i_d , i_q e i_0 podem ser controladas pela imposição das tensões fictícias v'_d , v'_q e v'_0 , respectivamente, ou seja;

$$\begin{aligned} v'_d &= v_d + (-Ri_d + \omega Li_q - v_{fd}) = v_d + v_d^{comp} \\ v'_q &= v_q + (-Ri_q - \omega Li_d - v_{fq}) = v_q + v_q^{comp} \\ v'_0 &= v_0 + (-Ri_0 - v_{f0}) = v_0 + v_0^{comp} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Portanto, pode-se escrever:

$$v'_j = L \frac{di_j}{dt}, j = d, q \text{ ou } 0 \quad (3.31)$$

Supondo que um intervalo de amostragem h pequeno é usado, a derivada de corrente

pode ser aproximada por:

$$\frac{di_j}{dt} \simeq \frac{i_j[(k+1)h] - i_j(kh)}{h} \quad (3.32)$$

Para simplificar a notação, doravante os subscritos k e $k+1$ serão empregados para designar os instantes de tempo $[(k+1)h]$ e (kh) , respectivamente, ou seja:

$$\frac{di_j}{dt} \simeq \frac{i_{jk+1} - i_{jk}}{h} \quad (3.33)$$

A fim de forçar as correntes i_{dk+1} , i_{qk+1} e i_{0k+1} a tornarem-se iguais a seus valores de referência, basta substituir (3.33) em (3.31), porém considerando $i_{jk+1} = i_{jk}^*$ para obter a tensão de referência v_j^{f*} :

$$v_j^{f*} = L \frac{i_{jk}^* - i_{jk}}{h} \quad (3.34)$$

A estratégia pode, então, ser implementada conforme o diagrama de blocos da Figura 3.6.

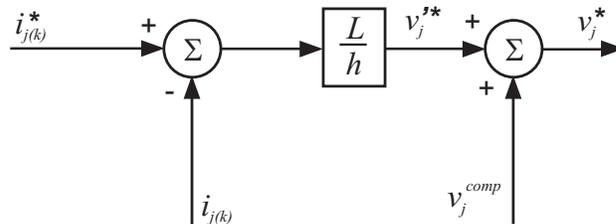


Figura 3.6: Diagrama de bloco do controle preditivo de corrente

As tensões de referência v_d^* , v_q^* e v_o^* são as tensões a serem sintetizadas pelo inversor. A partir delas, calcula-se v_a^* , v_b^* e v_c^* , as quais servem de entrada para o método de PWM descrito.

3.7 Conclusão

Neste capítulo inicialmente são apresentados alguns componentes do DVR que são o retificador, o inversor a quatro braços e o barramento CC. Na seção do barramento CC é realizado o seu dimensionamento para um caso crítico. Na seção do inversor a quatro braços é demonstrada a implementação do PWM para o referido inversor. Logo em seguida é apresentado o filtro de saída do inversor e a sua modelagem para a possível implementação do controle de corrente e de tensão.

4

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Esse capítulo será dedicado a mostrar os resultados de simulação do sistema DVR mostrado na Figura 4.1. O modelo de simulação foi construído usando Matlab/Simulink e os detalhes de implementação do mesmo são mostrados no Apêndice A. Os parâmetros do sistema e do controle utilizados nas simulações são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Para simular faltas no sistema foram inseridas à rede elétrica um conjunto de indutâncias trifásicas conectadas ao terra através de chaves controladas, como mostra a Figura 4.1. Serão ilustradas a seguir algumas formas de onda resultantes da operação do DVR frente à ocorrência de faltas na rede como curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos. O sistema em estudo alimentará uma carga sensível a afundamentos de tensão, sendo o mesmo dimensionado para suportar o pior caso que são faltas trifásicas com longa duração. Além disso, o DVR será simulado na baixa tensão, onde o sistema elétrico funciona a quatro fios e existe a possibilidade de aparecer componentes de sequência zero.

4.1 Resultados de simulação do PLL

Para comprovar o funcionamento do PLL e do gerador de referências, foram realizadas simulações que continham apenas esses blocos de controle sem a presença do DVR. Além disso, a eficiência do sistema proposto é comparada com os resultados apresentados em [19], que utiliza uma estrutura de detecção de ângulo com esquema ligeiramente diferente

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados na simulação do sistema elétrico

Parâmetros	Símbolos	Valores
Tensão do PCC	V_{abc}	311V
Frequência da rede	f_{rede}	60Hz
Indutância do PCC	L_s	150 μ H
Indutância do filtro	L_f	5mH
Capacitor do filtro	C_f	14 μ F
Capacitor do barramento CC	C_{dc}	42mF
Resistência da carga	R_L	10 Ω
Indutância da carga	L_L	20mH

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados na simulação do controle

Parâmetros	Símbolos	Valores
Frequência de chaveamento	F_{ch}	10kHz
Frequência de amostragem	F_{amost}	10kHz
Ganho proporcional do PLL	k_{ppll}	0,2 $\frac{V}{A}$
Ganho integral do PLL	k_{ipll}	80 $\frac{V.s}{A}$
Ganho proporcional do controle de tensão	k_p	0,085 $\frac{rad}{V.s}$
Ganho integral do controle de tensão	k_i	130 $\frac{rad}{V.s^2}$

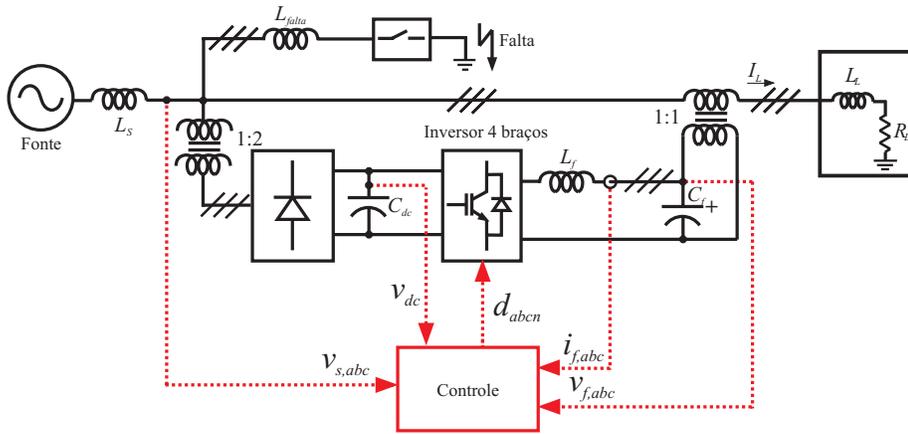


Figura 4.1: Sistema simulado para o DVR

do apresentado neste trabalho, onde neste sistema de detecção do ângulo utiliza-se um filtro passa-baixas. O esquema do PLL usado neste trabalho é redesenhado na Figura 4.2.

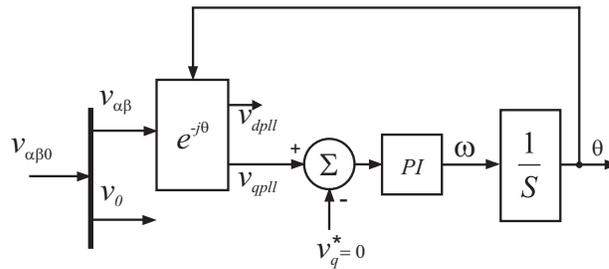


Figura 4.2: Diagrama do PLL.

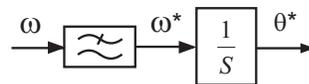


Figura 4.3: Esquema de detecção do ângulo utilizado por [19].

Em [19], o PLL tem uma atuação rápida e a detecção do ângulo é feita utilizando um filtro passa-baixas e um integrador em ω , como mostra a Fig. 4.3. Esse filtro passa-baixas é projetado com constante de tempo bastante reduzida com o objetivo de possuir uma resposta bastante lenta. No entanto, caso ocorra um salto de fase, o ângulo calculado sofrerá erros devido a ação desse integrador (Fig. 4.3) que ao longo do tempo irá acumular esses erros e não será mais possível controlar as tensões solicitadas pela rede. Já o sistema

de detecção proposto visa corrigir esse erro e possibilitar um funcionamento adequado do controle mesmo na ocorrência de saltos de fase no sistema. Para que isso seja possível o esquema da Figura 4.3 é removido e ao invés de utilizar um PLL com uma atuação rápida, reduzimos a largura de banda do mesmo para aumentar seu tempo de resposta.

As tensões que são inseridas neste sistema para se realizar o teste do PLL e do gerador de referências são dadas por:

$$\begin{aligned}v_a &= v_1^+ \cdot \cos(\omega.t) \\v_b &= v_1^+ \cdot \cos(\omega.t - 120^\circ) \\v_c &= v_1^+ \cdot \cos(\omega.t + 120^\circ)\end{aligned}\tag{4.1}$$

Inicialmente as tensões da rede são compostas apenas por sequência positiva. Após alguns ciclos é aplicada a essa sequência positiva, uma sequência negativa, quinto e sétimo harmônicos como é mostrado a seguir:

$$\begin{aligned}v_a &= \frac{v_1^+}{2} \cdot \cos(\omega.t - 20^\circ) + 0,4 \cdot v_1^+ \cdot \cos(\omega.t) \\&+ 0,1 \cdot v_1^+ \cdot \cos(5 \cdot \omega.t) + 0,05 \cdot v_1^+ \cdot \cos(7 \cdot \omega.t) \\v_b &= \frac{v_1^+}{2} \cdot \cos(\omega.t - 140^\circ) + 0,4 \cdot v_1^+ \cdot \cos(\omega.t + 120^\circ) \\&+ 0,1 \cdot v_1^+ \cdot \cos(5 \cdot \omega.t + 120^\circ) + 0,05 \cdot v_1^+ \cdot \cos(7 \cdot \omega.t - 120^\circ) \\v_c &= \frac{v_1^+}{2} \cdot \cos(\omega.t + 100^\circ) + 0,4 \cdot v_1^+ \cdot \cos(\omega.t - 120^\circ) \\&+ 0,1 \cdot v_1^+ \cdot \cos(5 \cdot \omega.t - 120^\circ) + 0,05 \cdot v_1^+ \cdot \cos(7 \cdot \omega.t + 120^\circ)\end{aligned}\tag{4.2}$$

E logo após a extinção do defeito, as amplitudes das fases retornam ao seus valores anteriores a falta, porém com um salto de fase de 60° nas três fases.

$$\begin{aligned}v_a &= v_1^+ \cdot \cos(\omega.t - 60^\circ) \\v_b &= v_1^+ \cdot \cos(\omega.t - 180^\circ) \\v_c &= v_1^+ \cdot \cos(\omega.t + 60^\circ)\end{aligned}\tag{4.3}$$

Verifica-se na Figura 4.4 a tensão no PCC que durante um certo período encontra-se sob o distúrbio, de acordo com a equação (4.2) e logo abaixo dessa tensão encontra-se a tensão na carga compensada.

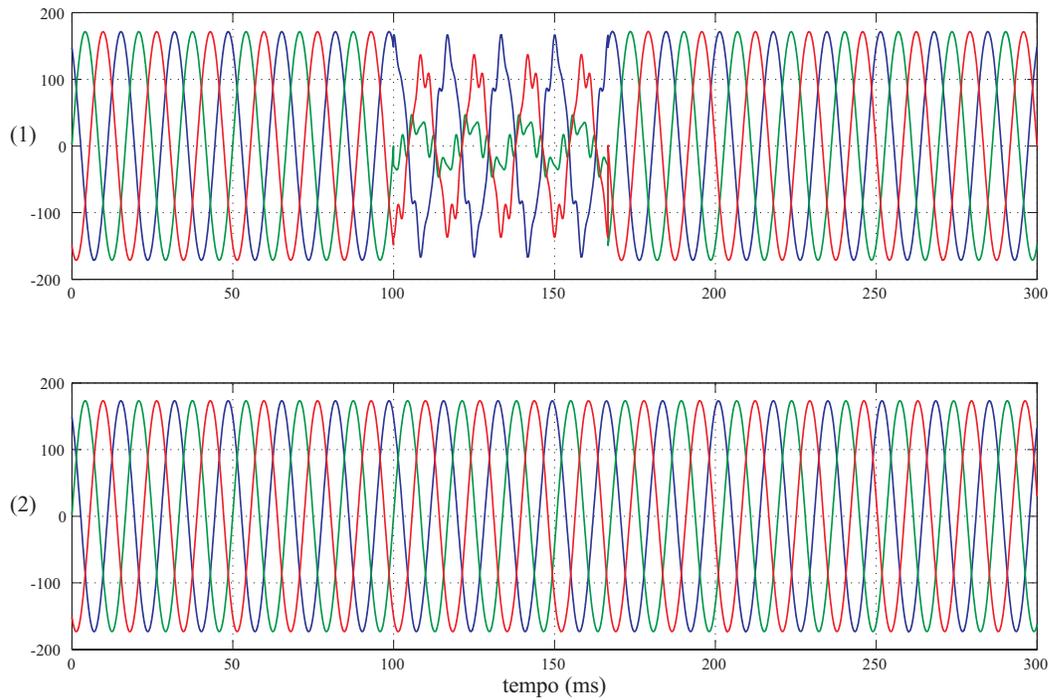


Figura 4.4: Traços: (1)-Tensões no PCC [V]; (2)-Tensões na carga [V].

Na Figura 4.5, encontra-se o ângulo θ^* obtido através da Figura 4.3 e o ângulo real da rede. Pode-se observar que inicialmente o ângulo θ^* segue o ângulo da rede; ao iniciar o distúrbio, o ângulo da rede sofre oscilações. No entanto, observa-se que ao final do distúrbio, quando as tensões da rede retomam seus valores normais, ocorre um salto de fase de 60° nas mesmas e a partir desse ponto, o ângulo θ^* não acompanha mais o ângulo da rede. Esse erro ocorre devido a inserção do filtro passa-baixas para filtragem de ω . Esse erro vai se acumulando e o PLL não consegue voltar a acompanhar o ângulo correto da rede.

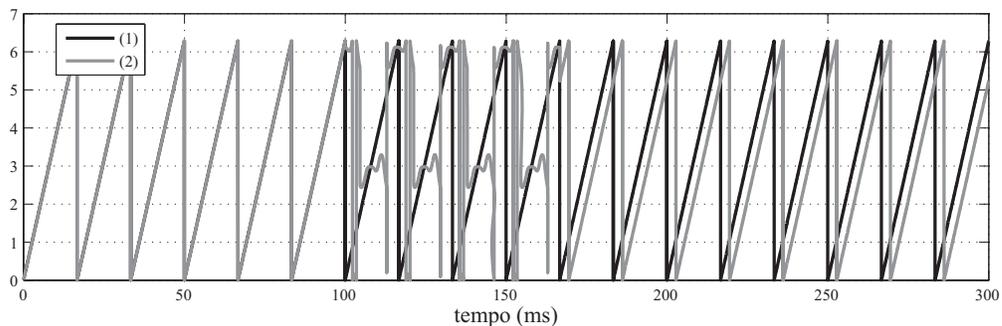


Figura 4.5: Traços: (1)-Ângulo θ do PLL [rad]; (2)-Ângulo da rede [rad].

Na segunda simulação, utiliza-se o modelo proposto nesta dissertação onde temos a atuação de um PLL lento (Figura 4.2). Verifica-se na Figura 4.4 que a tensão no PCC durante um certo período encontra-se sob distúrbio de acordo com a equação (4.2) e logo abaixo dessa tensão encontra-se a tensão na carga compensada.

Na Figura 4.6 encontra-se o ângulo θ obtido através do PLL e o ângulo θ da rede. Pode-se observar que inicialmente o ângulo θ do PLL segue o ângulo da rede; ao iniciar o distúrbio, o ângulo da rede sofre oscilações e o ângulo do PLL permanece inalterado. No entanto, ao final do distúrbio, as tensões retomam seus valores normais, porém com um salto de fase de 60° . A partir desse ponto, o ângulo de referência acompanha o ângulo da rede mesmo com um salto de fase. Portanto, podemos concluir que o erro de ângulo que ocorreu no PLL anterior não ocorre mais com a mudança proposta.

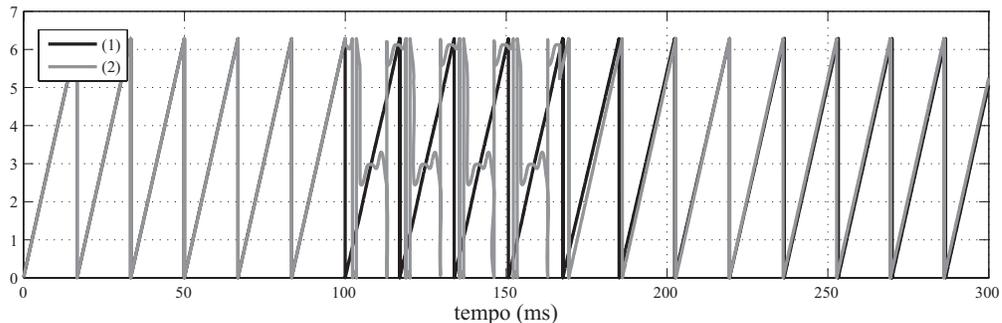


Figura 4.6: Traços: (1)-Ângulo θ do PLL [rad]; (2)-Ângulo da rede [rad].

4.2 Curtos-circuitos de curta duração

A partir deste ponto são mostrados alguns resultados de simulações para comprovar a eficiência do equipamento em estudo. Inicialmente são aplicadas faltas de curta duração (em torno de 10 ciclos). As faltas simuladas serão monofásicas (tipo B), bifásicas (tipo E) e trifásicas (tipo A), além de verificar a capacidade de compensação da tensão remanescente de 30% e 70%. As faltas são classificadas de acordo com a normatização já citada no capítulo 1.

4.2.1 Curto-circuito bifásico para a terra - tipo E

Afundamento de tensão de 70%

Durante o afundamento de tensão, a tensão remanescente simulada é de 30% para um curto-circuito bifásico tipo E [1]. A Figura 4.7 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio com o afundamento de tensão em duas fases e com duração de 10 ciclos; logo abaixo temos a tensão compensada pelo DVR durante o distúrbio. Esse tipo de falta leva a uma injeção de sequência zero no sistema.

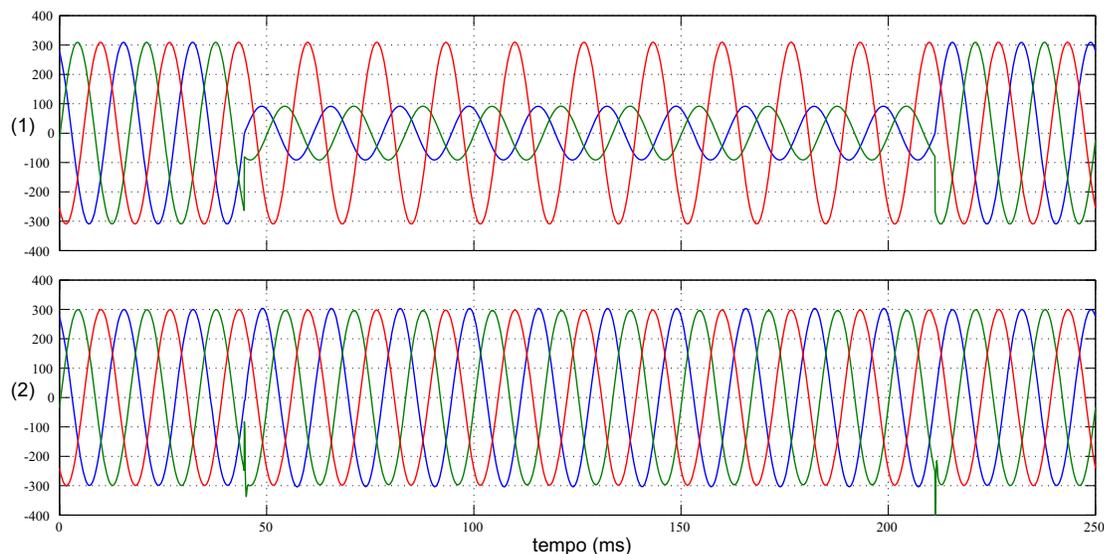


Figura 4.7: Afundamento bifásico de curta duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões no PCC [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].

Na Figura 4.8, pode-se observar a tensão no barramento CC para um afundamento de 70% da tensão para um curto bifásico com a terra com uma duração de 10 ciclos. Para tal distúrbio, o barramento CC consegue suprir a potência ativa solicitada para compensar o afundamento de tensão causado na rede.

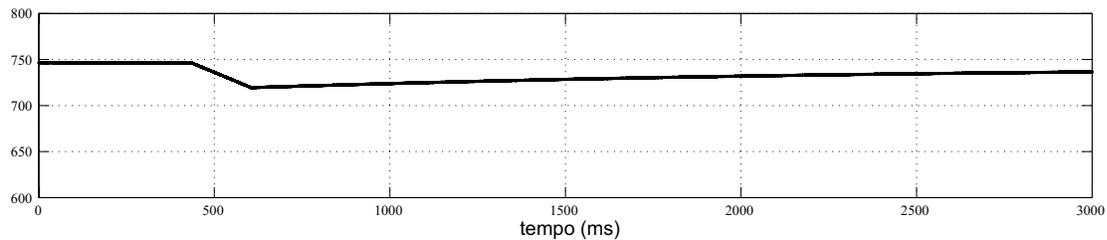


Figura 4.8: Tensão no barramento CC de um afundamento bifásico de curta duração com 30% da tensão remanescente [V].

Na Figura 4.7, as tensões da rede durante o afundamento apresentam valor nominal de aproximadamente 93,3 V em duas fases; na fase restante temos uma tensão sem distúrbio. Com a compensação do DVR, as tensões compensadas assumem 311 V de amplitude, ou seja, uma compensação em torno de 217,7 V correspondendo a 30% da tensão de fase.

Afundamento de tensão de 30%

Neste afundamento de tensão temos um curto-circuito bifásico à terra com 70% de tensão remanescente. A Figura 4.9 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio com o afundamento de tensão em duas fases e com duração de 10 ciclos e a tensão compensada pelo DVR durante o distúrbio. Esse tipo de falta, como já dito anteriormente, também leva a uma injeção de sequência zero no sistema.

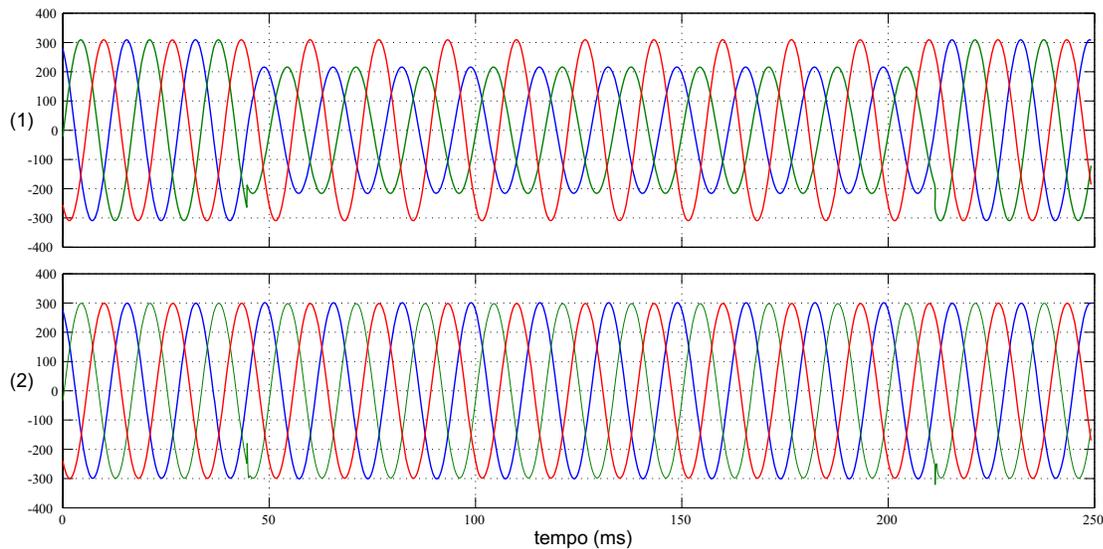


Figura 4.9: Afundamento bifásico de curta duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)-Tensões no PCC [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V];

A Figura 4.10 mostra o comportamento da tensão no barramento CC durante essa falta. Pode-se observar que o barramento CC consegue suprir a potência ativa solicitada para compensar o afundamento de tensão causado na rede.

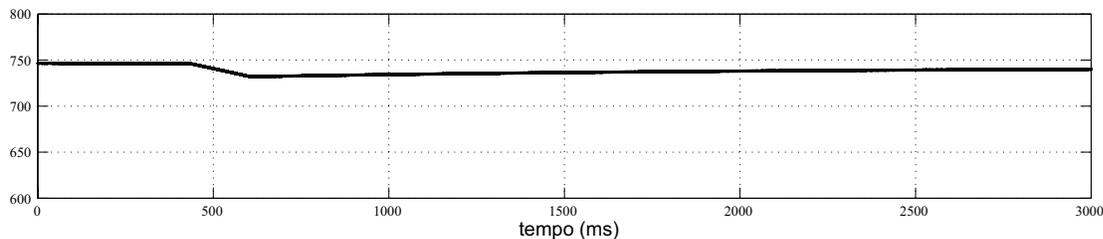


Figura 4.10: Tensão no barramento CC de um afundamento bifásico de curta duração com 70% da tensão remanescente [V].

4.2.2 Curto-circuito monofásico - tipo B

Afundamento de tensão de 70%

Nessa parte, mostra-se a simulação de um afundamento de tensão de 70% para um curto-circuito monofásico tipo B. A Figura 4.11 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio com o afundamento de tensão em uma fase e com duração de 10 ciclos e a tensão

compensada pelo DVR durante o distúrbio. Esse tipo de distúrbio também leva a uma injeção de sequência zero no sistema.

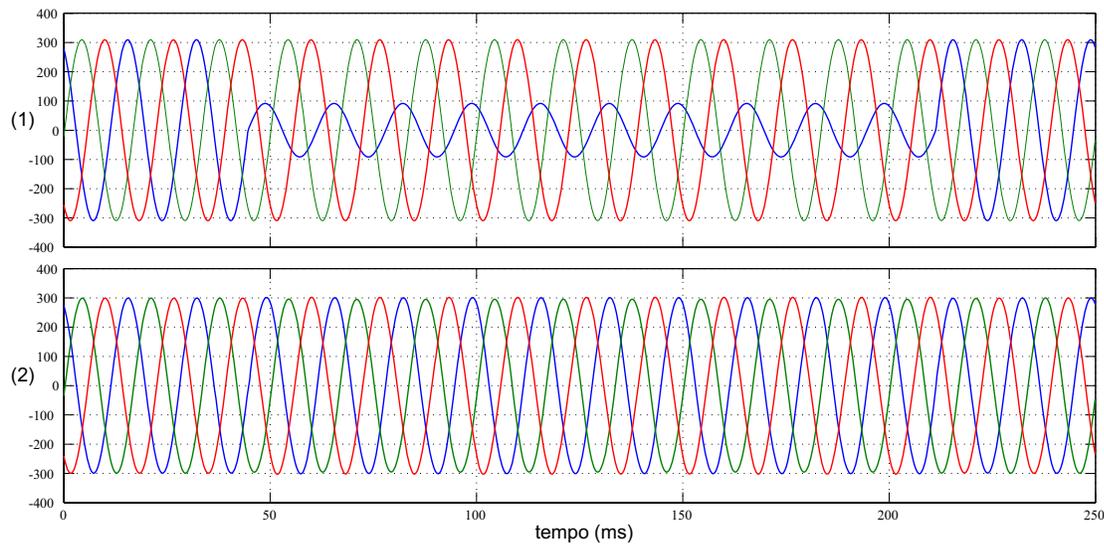


Figura 4.11: Afundamento monofásico de curta duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões no PCC [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].

Nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 estão ilustradas as formas de onda referentes ao controle de corrente em referencial estacionário $\alpha\beta 0$. A falta é iniciada aproximadamente em 100 ms.

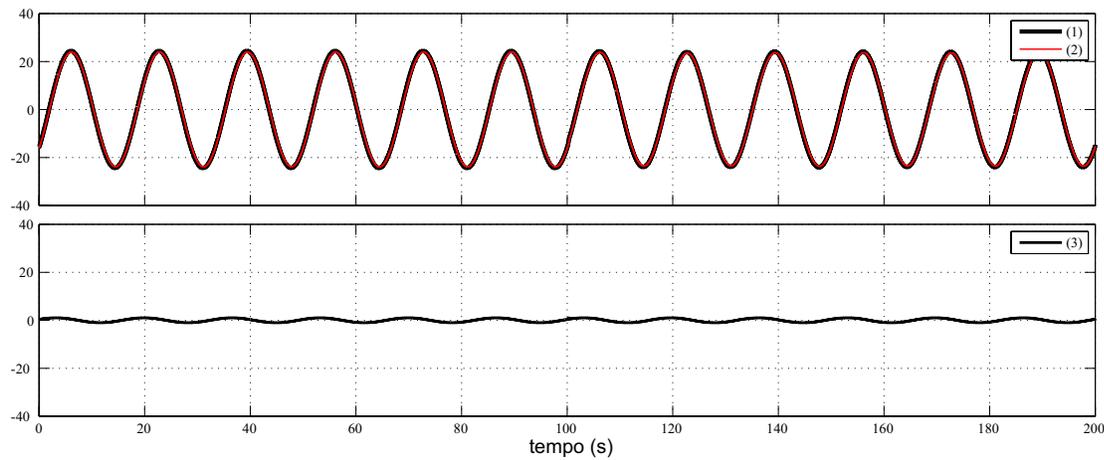


Figura 4.12: Controle de corrente (eixo α). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

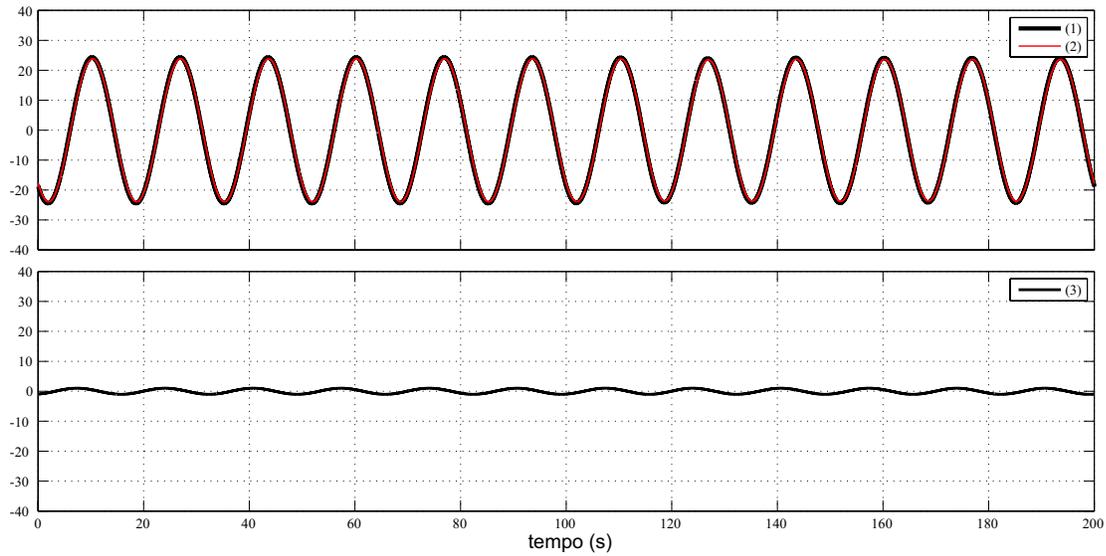


Figura 4.13: Controle de corrente (eixo β). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

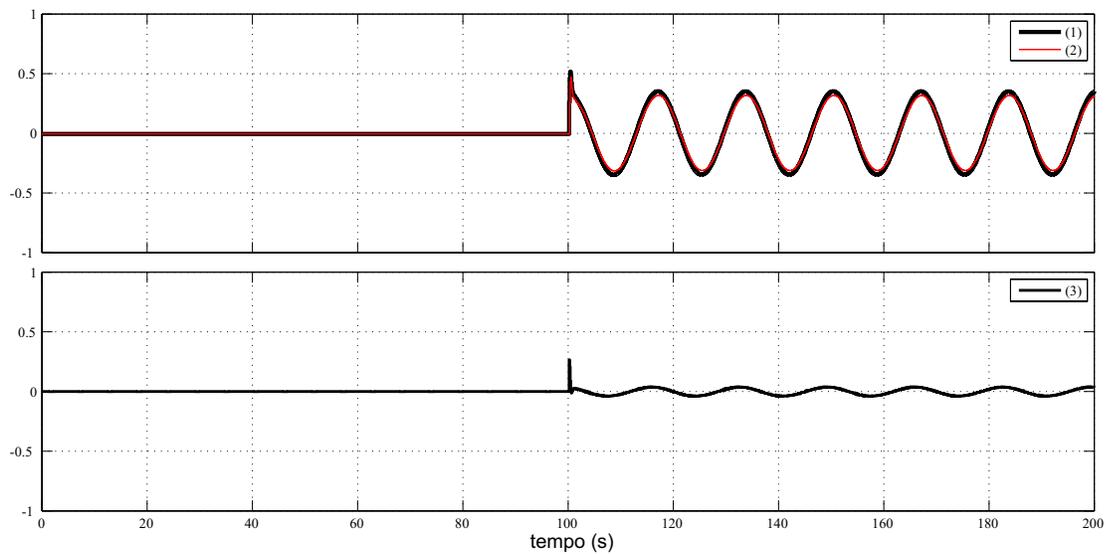


Figura 4.14: Controle de corrente (eixo 0). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

Nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 estão ilustradas as formas de onda referentes ao controle de tensão em referencial estacionário $\alpha\beta 0$. A falta é iniciada em aproximadamente 100 ms.

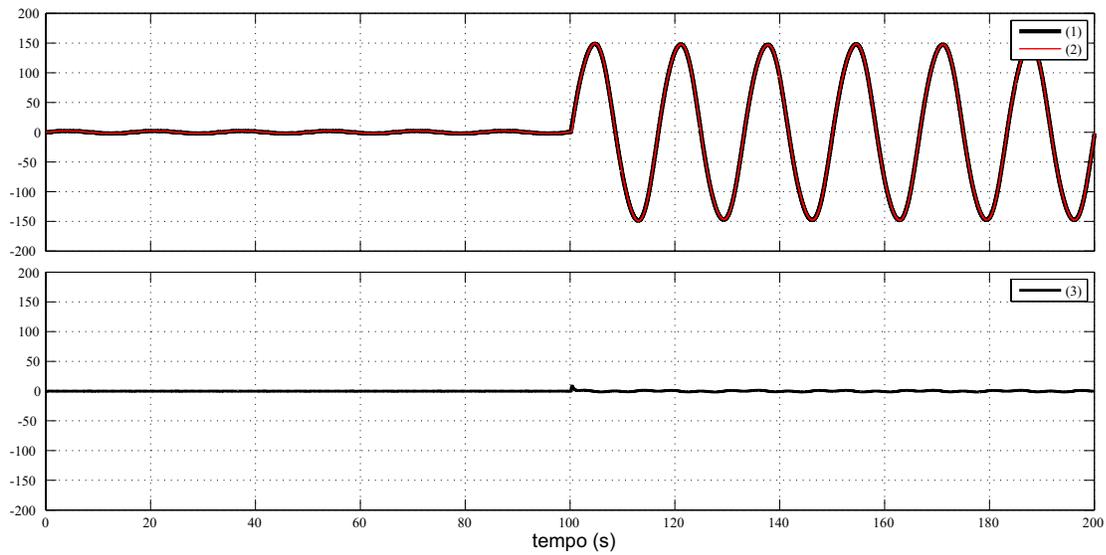


Figura 4.15: Controle de tensão (eixo α). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

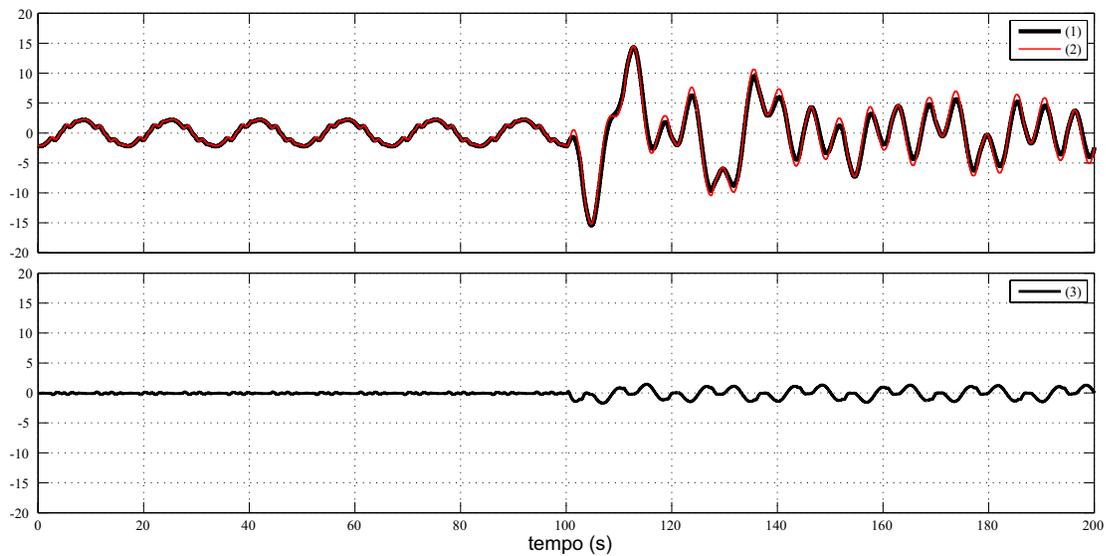


Figura 4.16: Controle de tensão (eixo β). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

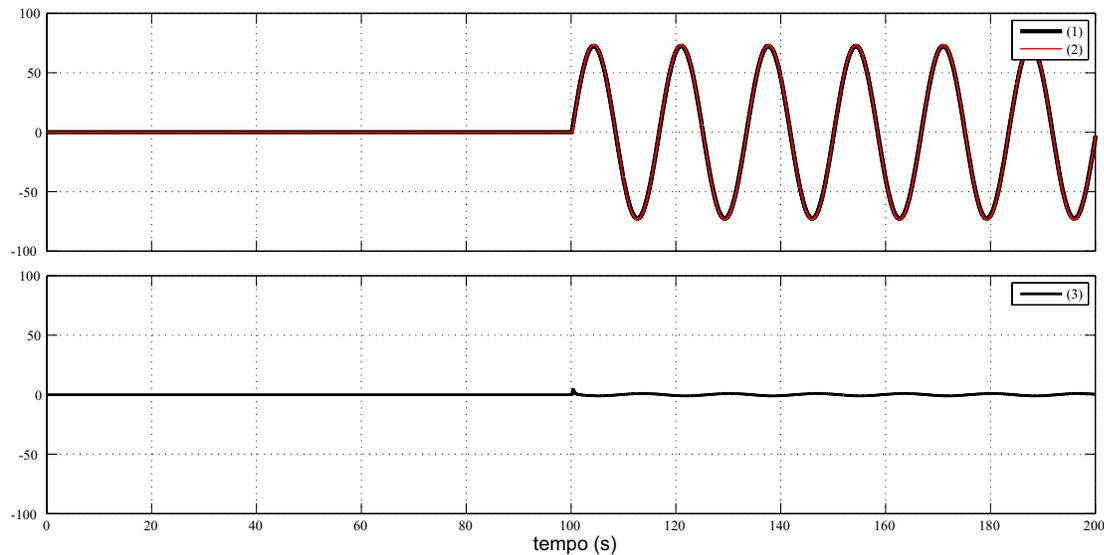


Figura 4.17: Controle de tensão (eixo 0). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

A Figura 4.18 ilustra a tensão no barramento CC nesse caso. Para tal distúrbio, o barramento CC consegue suprir a potência ativa solicitada para compensar o afundamento de tensão causado na rede.

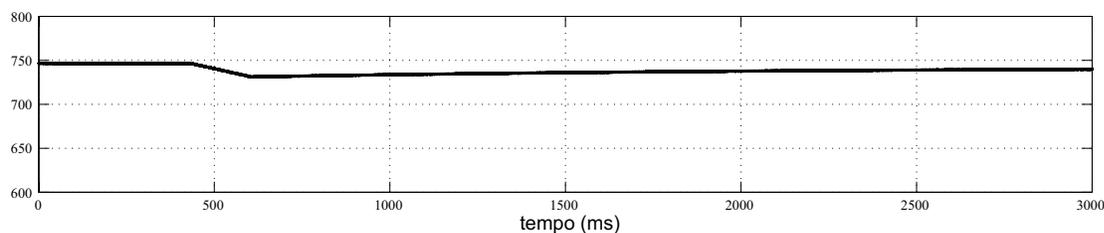


Figura 4.18: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento monofásico de curta duração com 30% da tensão remanescente.

Afundamento de tensão de 30%

Passamos agora para o caso de um afundamento tipo B com tensão de 30%. A Figura 4.19 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio com o afundamento de tensão em apenas uma fase e a tensão compensada pelo DVR durante o distúrbio. Esse tipo de falta leva a uma injeção de componente de sequência zero, pois é uma falta desequilibrada.

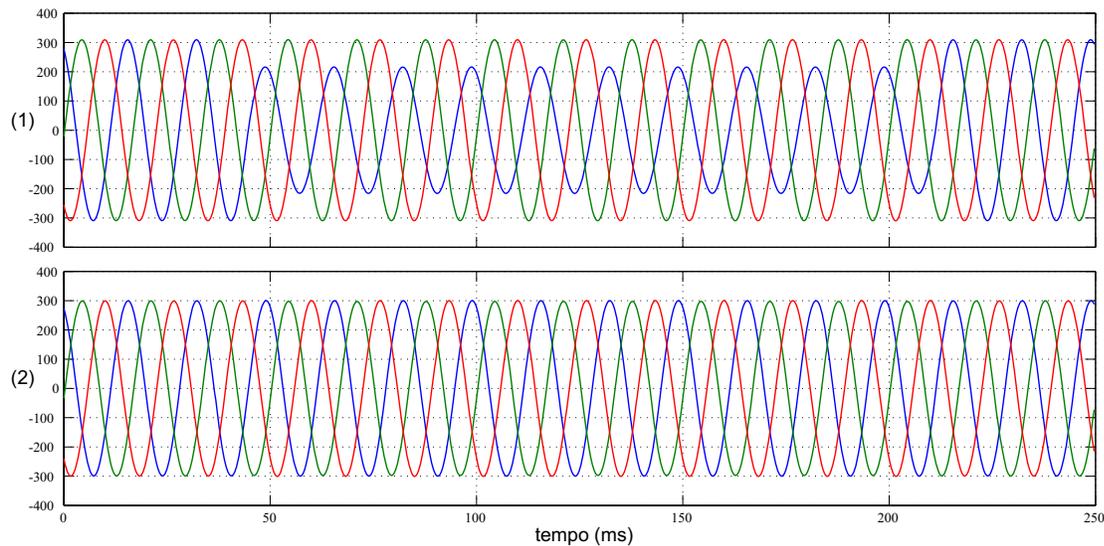


Figura 4.19: Afundamento monofásico de curta duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V];

A Figura 4.20 mostra a tensão no barramento CC para este caso. Verifica-se que a queda de tensão no barramento CC para um afundamento de 30% é menor que no caso de um afundamento de 70%, como era de se esperar, pois o afundamento de 70% é mais severo.

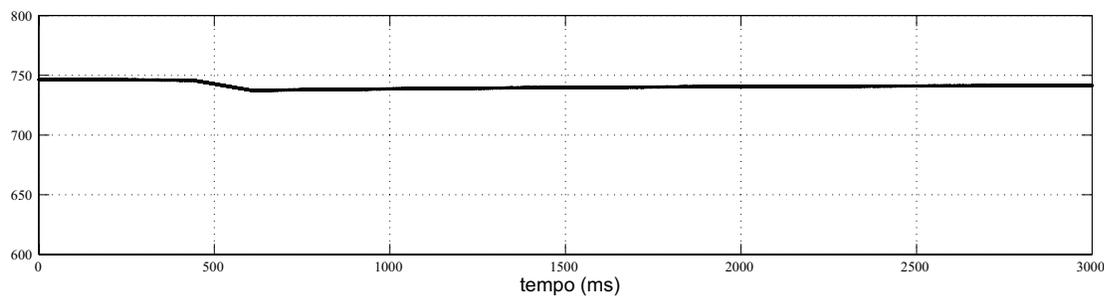


Figura 4.20: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento monofásico de curta duração com 70% da tensão remanescente.

4.2.3 Curto-circuito trifásico - tipo A

Afundamento de tensão de 70%

A Figura 4.21 ilustra o comportamento das tensões da rede e da carga sob distúrbio com o afundamento de tensão trifásico tipo A com duração de 10 ciclos. Esse tipo de distúrbio

não leva a uma injeção de componente de sequência zero, pois o curto-circuito trifásico é uma falta equilibrada.

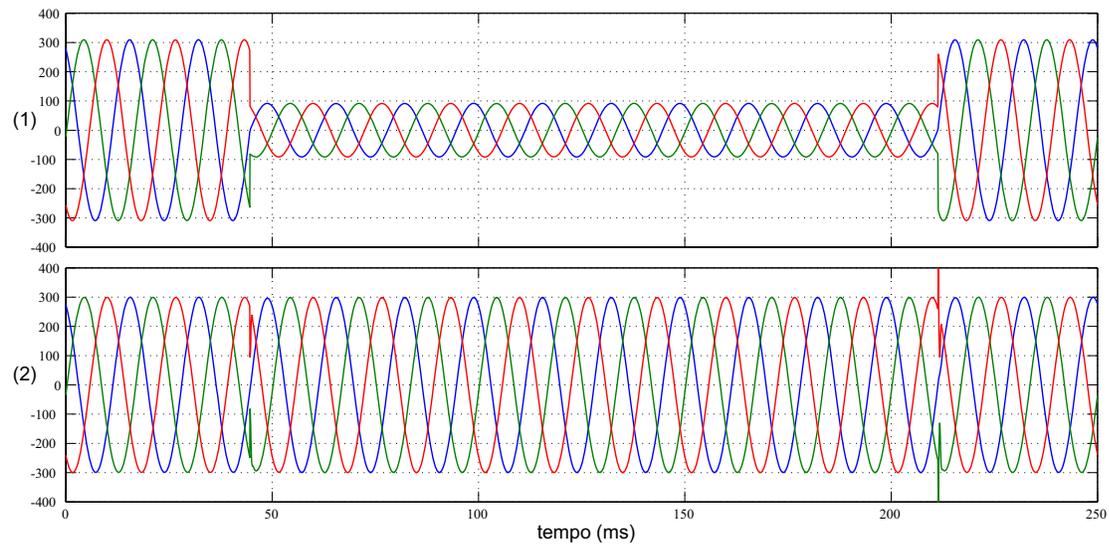


Figura 4.21: Afundamento trifásico de curta duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].

Nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 podemos observar as formas de onda do controle de corrente em referencial estacionário $\alpha\beta 0$. A falta é iniciada aproximadamente em 100 ms.

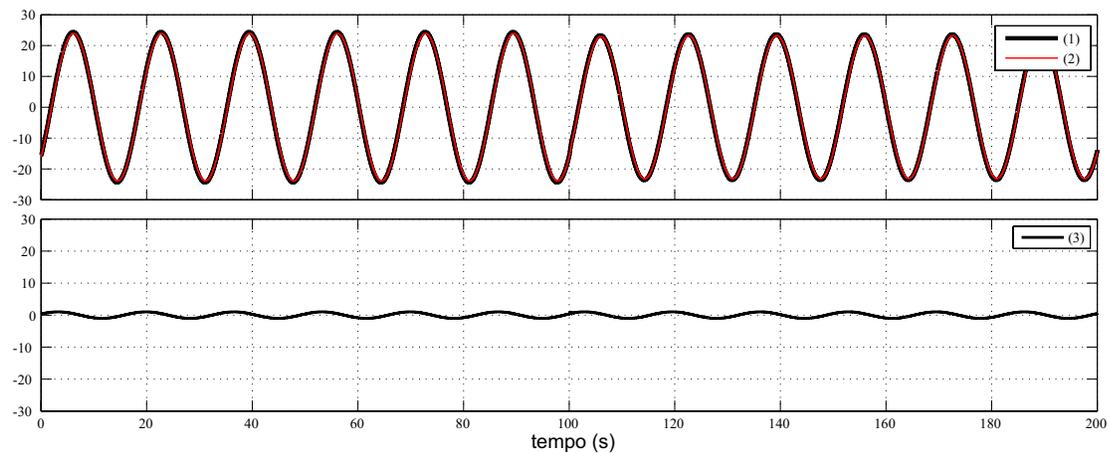


Figura 4.22: Controle de corrente (eixo α). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

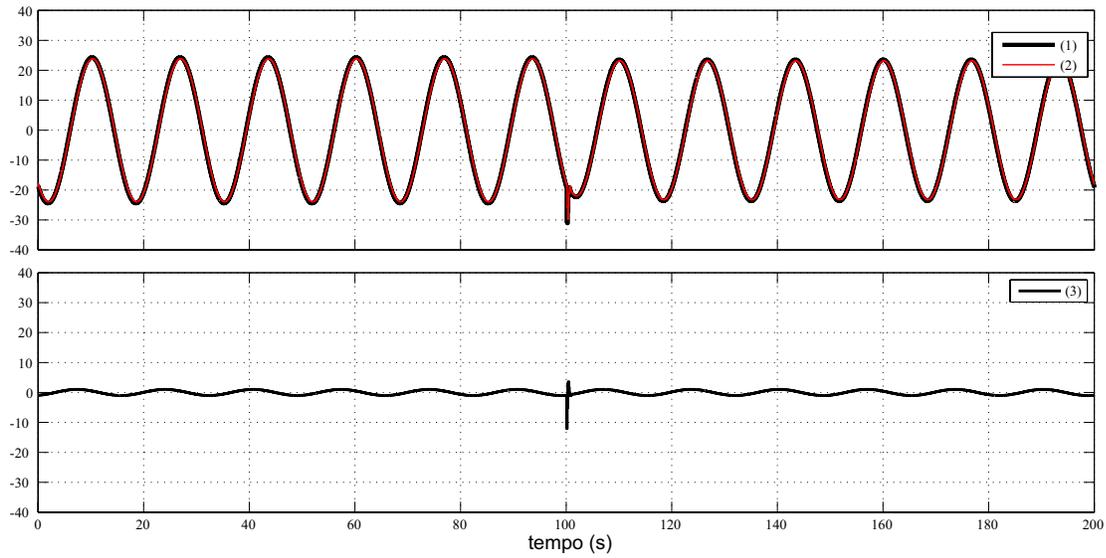


Figura 4.23: Controle de corrente (eixo β). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

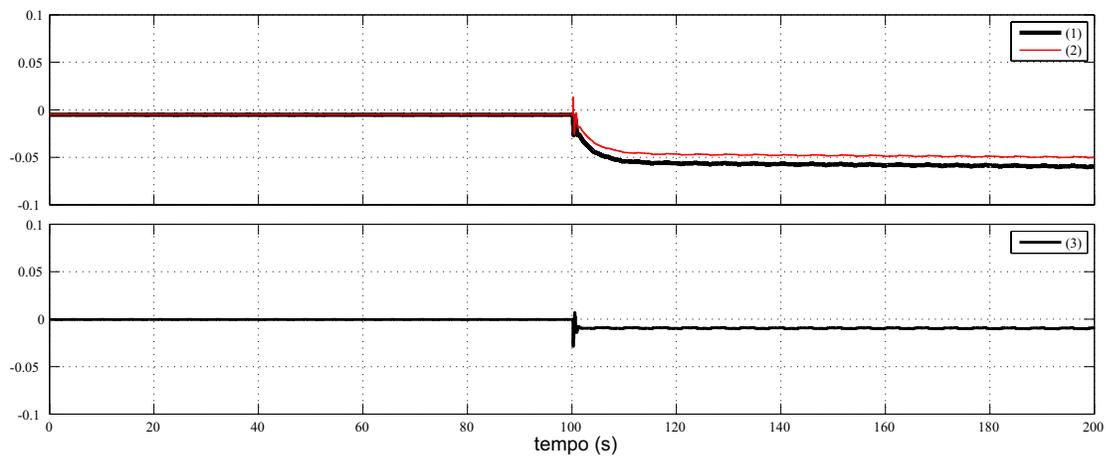


Figura 4.24: Controle de corrente (eixo 0). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

Nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27 temos as formas de onda relativas ao controle de tensão em referencial estacionário $\alpha\beta 0$.

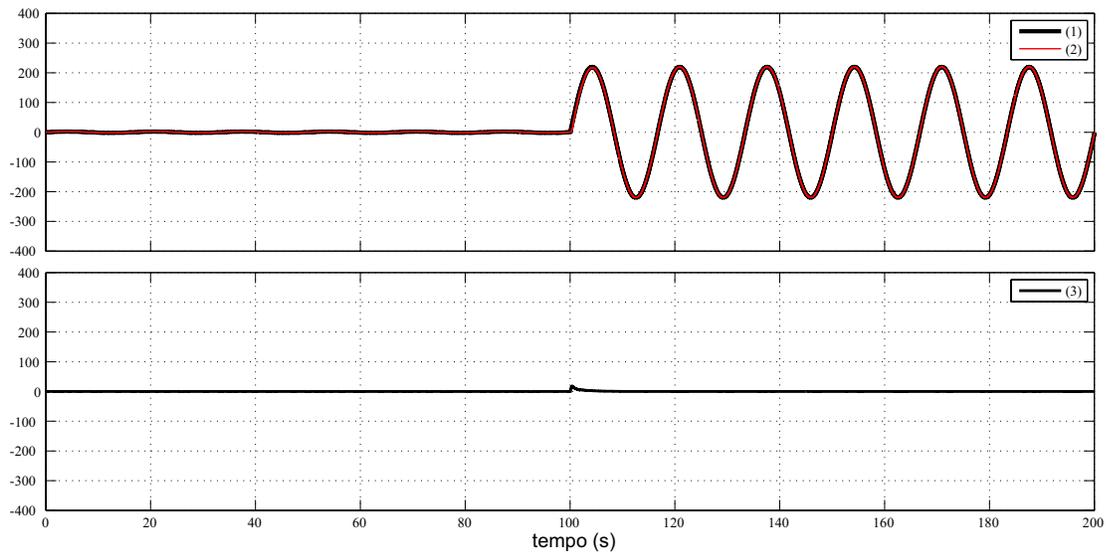


Figura 4.25: Controle de tensão (eixo α). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

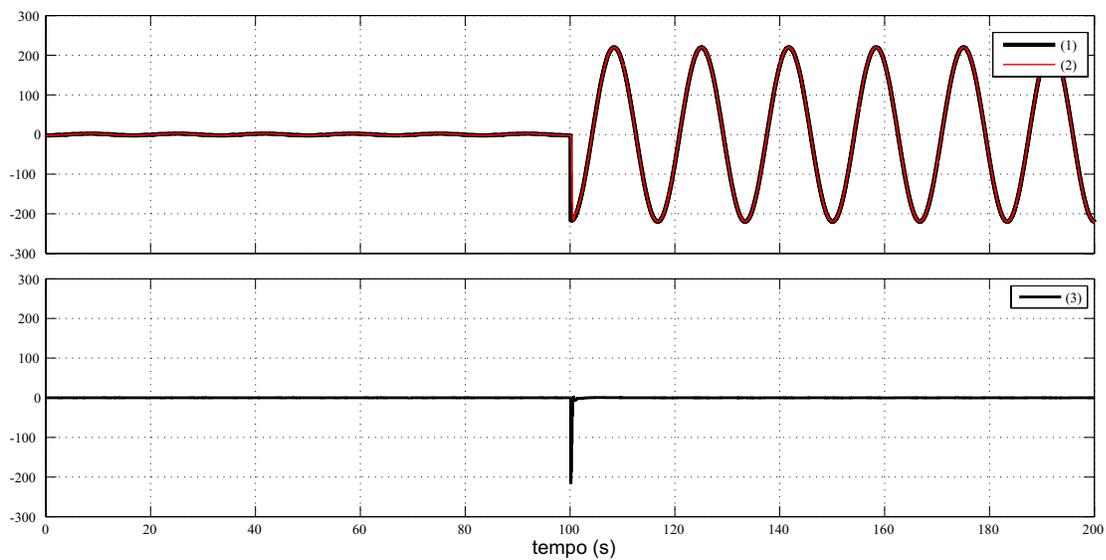


Figura 4.26: Controle de tensão (eixo β). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

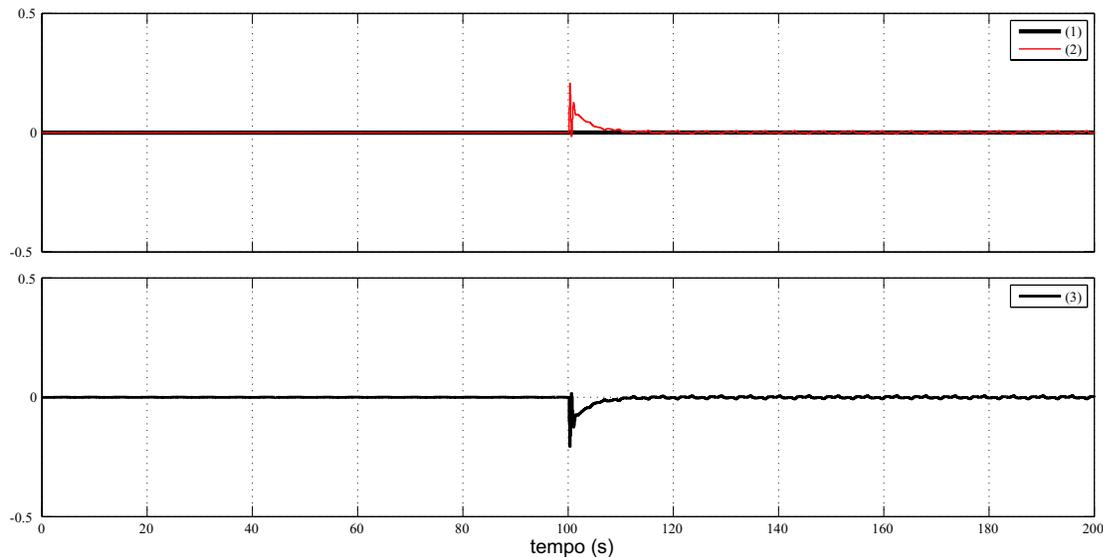


Figura 4.27: Controle de tensão (eixo 0). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)-Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

A Figura 4.28 mostra a tensão no barramento CC para o presente caso. Vê-se que o barramento CC consegue suprir a potência ativa solicitada para compensar o afundamento de tensão causado na rede.

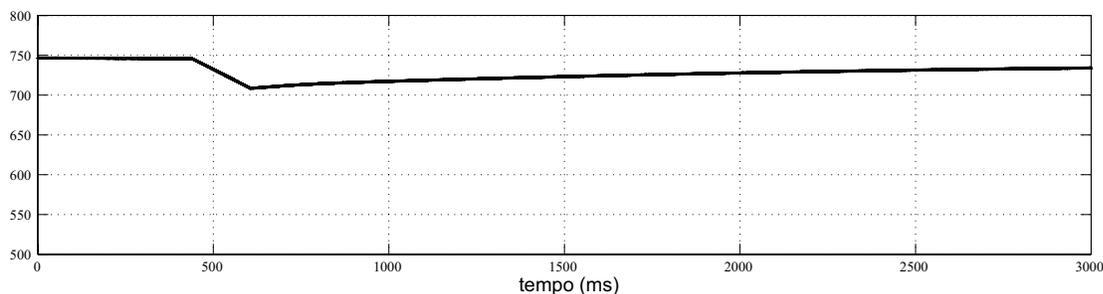


Figura 4.28: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento trifásico de curta duração com 30% da tensão remanescente.

Afundamento de tensão de 30%

A Figura 4.29 ilustra o comportamento das tensões da rede e da carga sob distúrbio com o afundamento de tensão nas três fases e com duração de 10 ciclos. Esse tipo de distúrbio não leva a uma injeção de componente de sequência zero como já dito anteriormente.

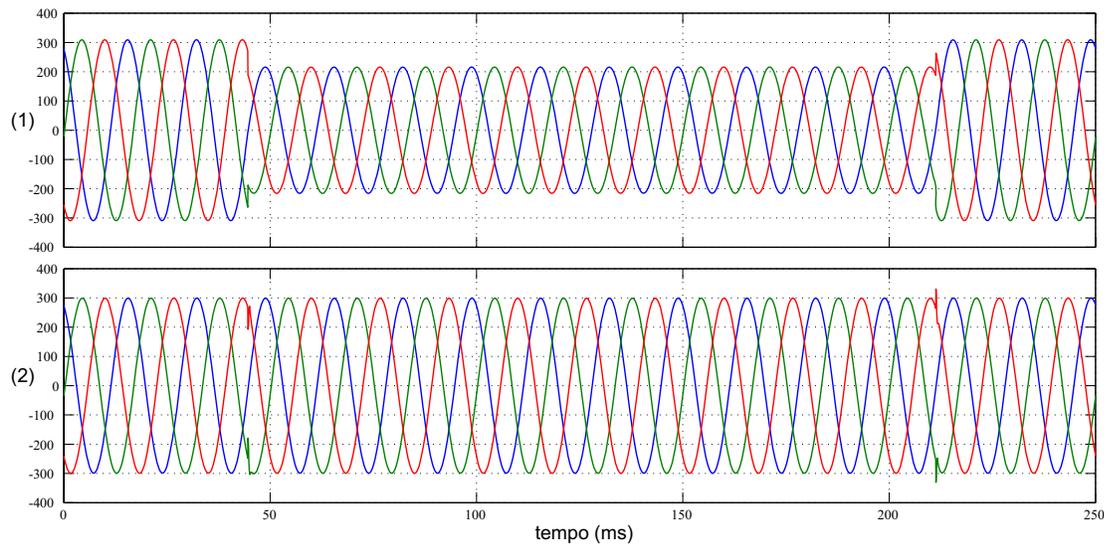


Figura 4.29: Afundamento trifásico de curta duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR.

A Figura 4.30 mostra a tensão no barramento CC. Verifica-se que a queda de tensão no barramento CC para um afundamento de 30% é menor que no caso de um afundamento de 70%.

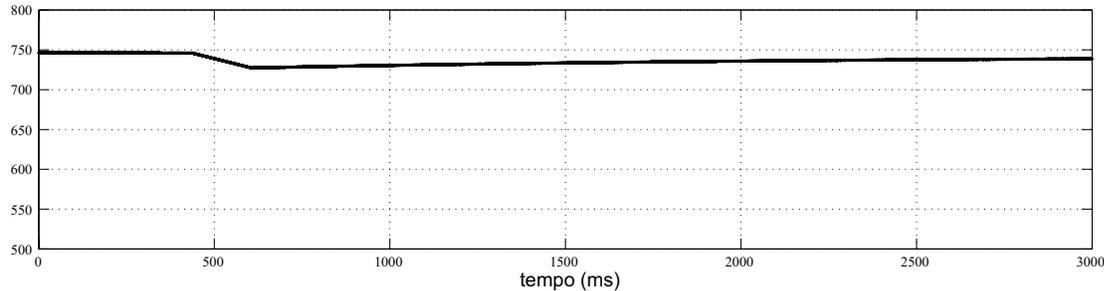


Figura 4.30: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento trifásico de curta duração com 70% da tensão remanescente.

4.3 Curtos-circuitos de longa duração

Os casos de faltas de curta duração, isto é, de 0,5 a 30 ciclos foram mostrados até aqui. Analisaremos, nesta seção, os casos de faltas de longa duração, isto é, de 30 ciclos a 3s com tensão remanescente de 30 % a 70 %.

4.3.1 Curto-circuito bifásico para a terra - tipo E

Afundamento de tensão de 70%

A Figura 4.31 ilustra os comportamentos das tensões da rede sob distúrbio e da carga com o afundamento de tensão tipo E. Esse tipo de distúrbio leva a uma injeção de componente de sequência zero.

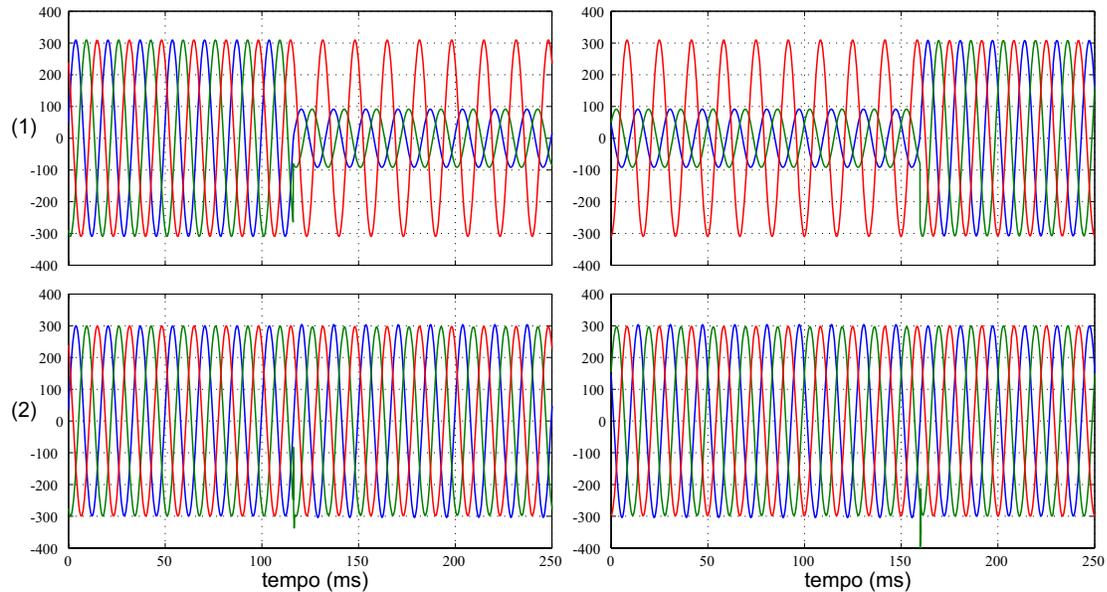


Figura 4.31: Afundamento bifásico de longa duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR.

A Figura 4.32 mostra a tensão no barramento CC. Para tal distúrbio, o barramento CC consegue suprir a potência ativa solicitada para compensar o afundamento de tensão causado na rede.

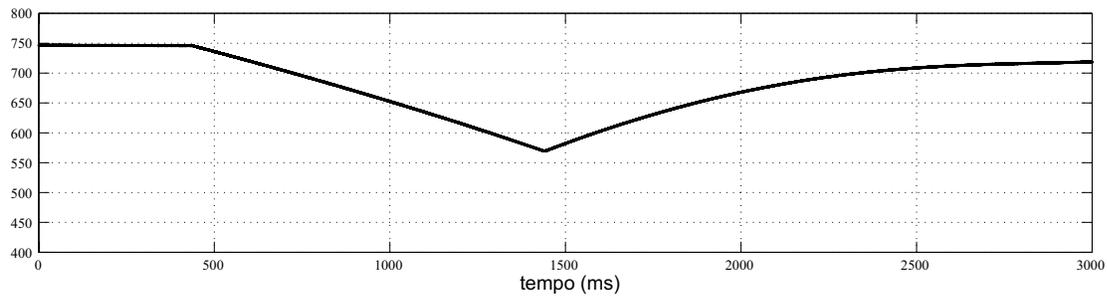


Figura 4.32: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento bifásico de longa duração com 30% da tensão remanescente.

Afundamento de tensão de 30%

A Figura 4.33 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio e da carga com um afundamento de tensão de 30%. A Figura 4.34 mostra a tensão no barramento CC durante a falta.

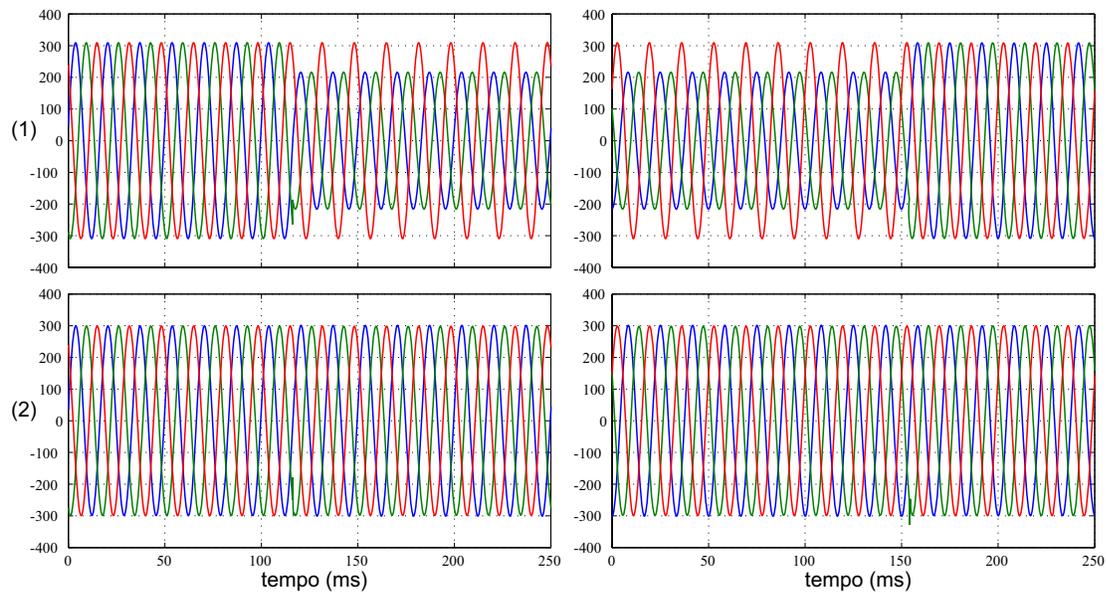


Figura 4.33: Afundamento bifásico de longa duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].

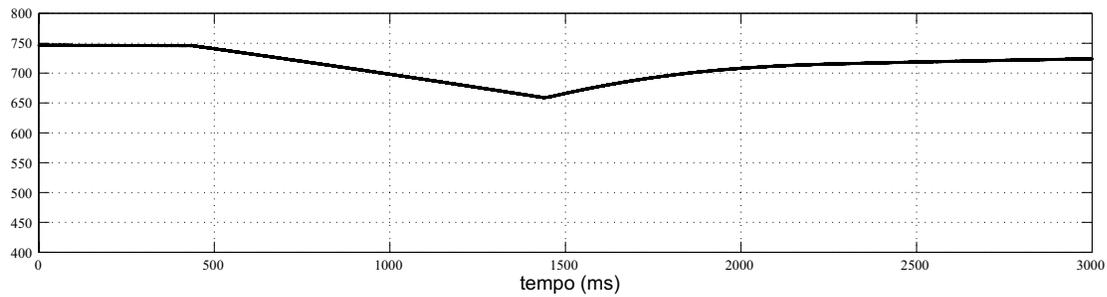


Figura 4.34: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento bifásico de longa duração com 70% da tensão remanescente.

4.3.2 Curto-circuito monofásico - tipo B

Afundamento de tensão de 70%

A Figura 4.35 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio e da carga com o afundamento de tensão tipo B. Esse tipo de distúrbio leva a uma injeção de componente de sequência zero.

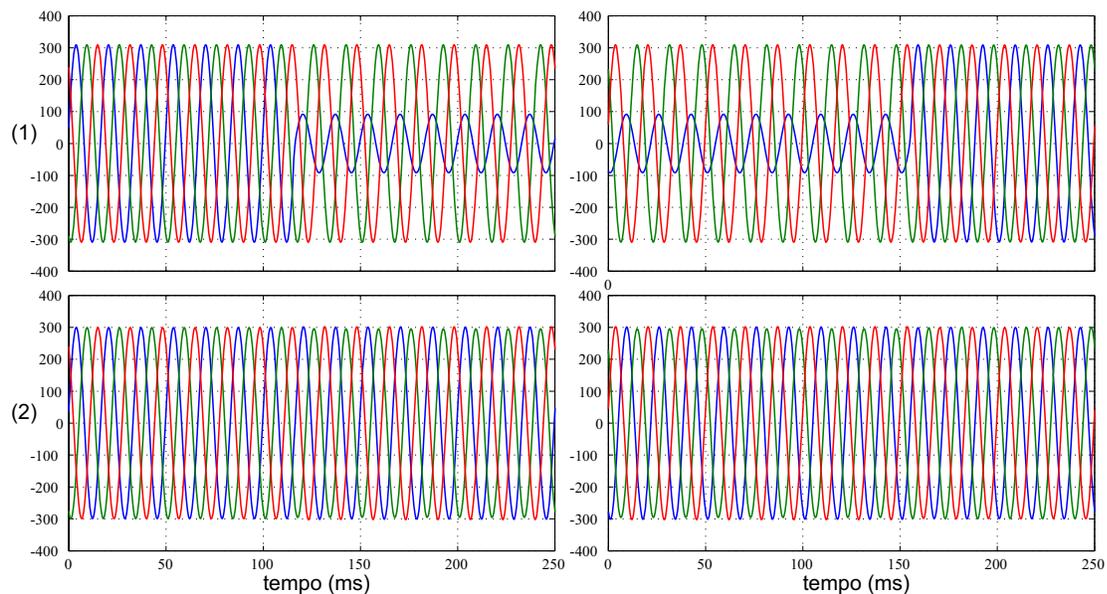


Figura 4.35: Afundamento monofásico de longa duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V];

Nas Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 podemos observar as formas de onda do controle de

corrente em referencial estacionário $\alpha\beta 0$. O curto é iniciado em 100 ms.

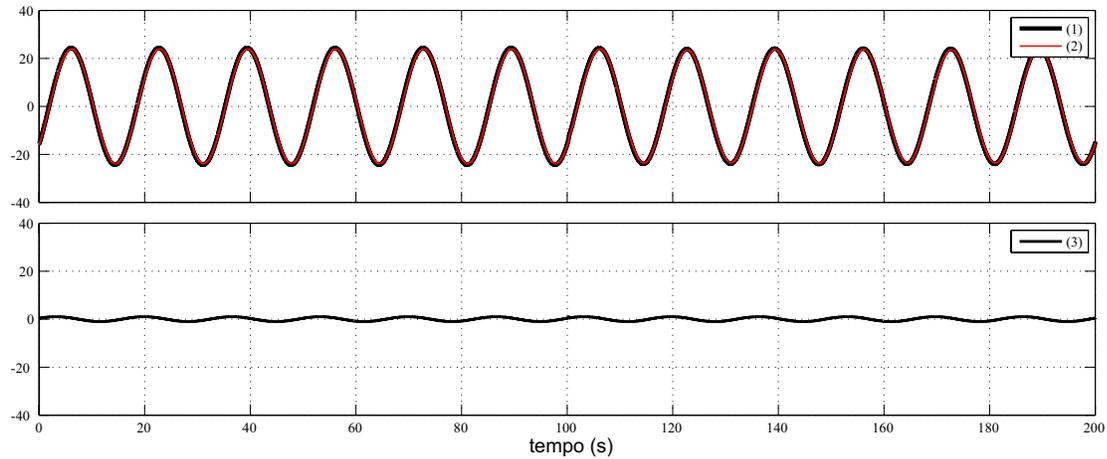


Figura 4.36: Controle de corrente (eixo α). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

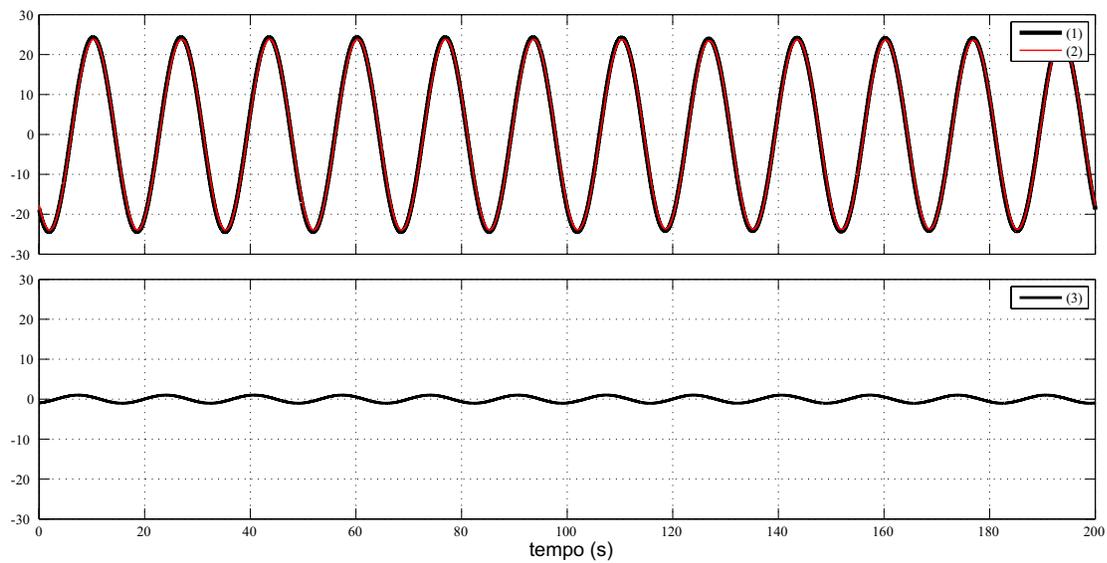


Figura 4.37: Controle de corrente (eixo β). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

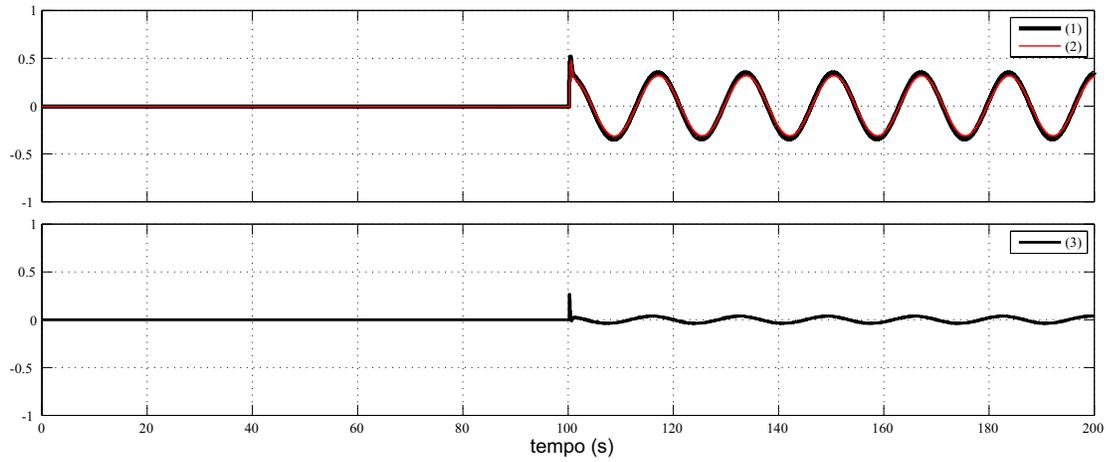


Figura 4.38: Controle de corrente (eixo 0). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

Nas Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 podemos observar as formas de onda do controle de tensão em referencial estacionário $\alpha\beta 0$.

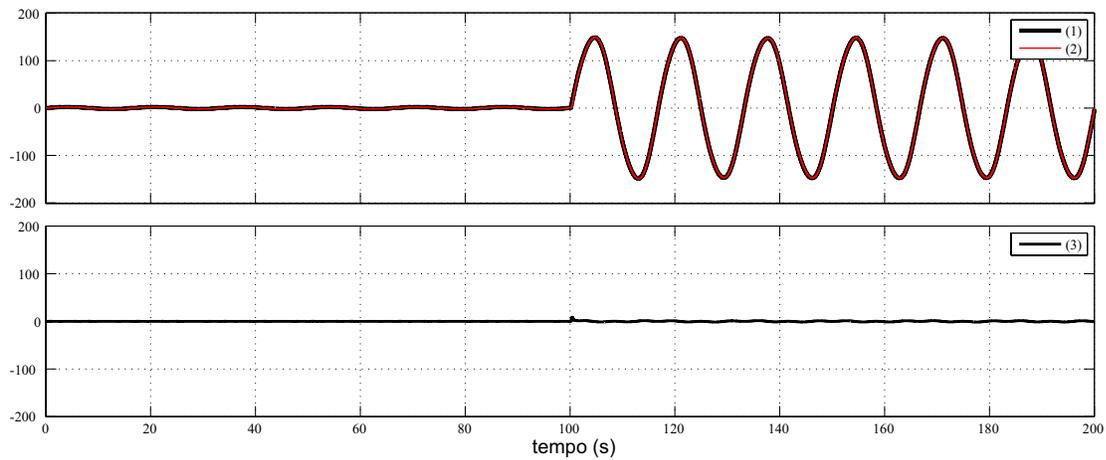


Figura 4.39: Controle de tensão (eixo α). Traços: (1)-Tensão de referência [V]; (2)-Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

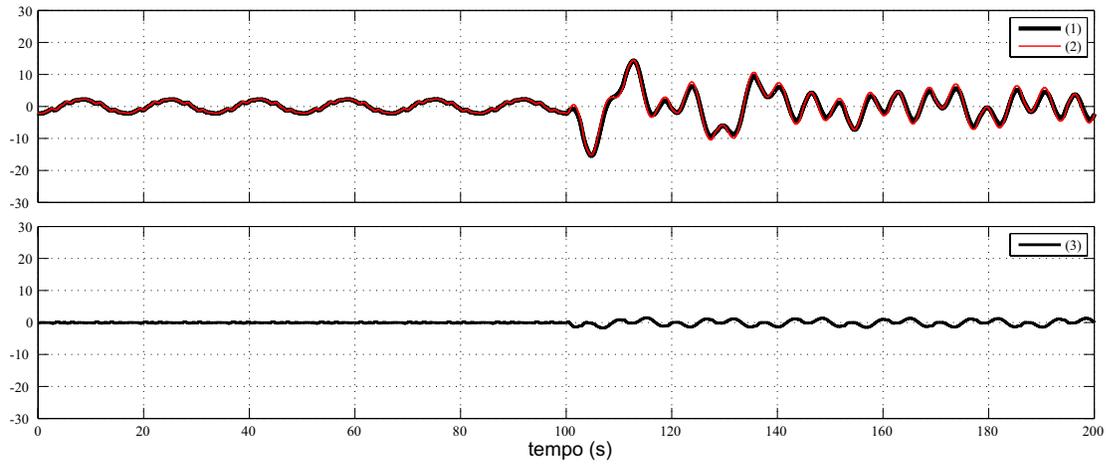


Figura 4.40: Controle de tensão (eixo β). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

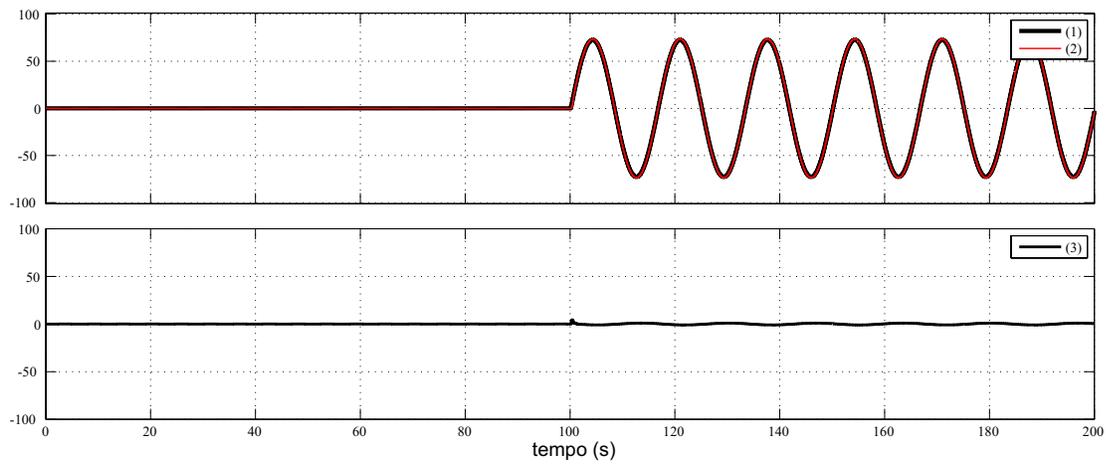


Figura 4.41: Controle de tensão (eixo 0). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

A Figura 4.42 mostra a tensão no barramento CC para um afundamento de 30% da tensão remanescente para um curto monofásico.

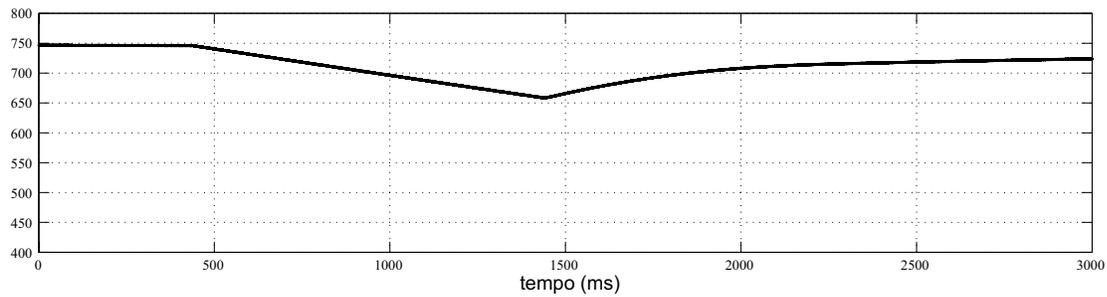


Figura 4.42: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento monofásico de longa duração com 30% da tensão remanescente.

Afundamento de tensão de 30%

A Figura 4.43 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio e da carga com um afundamento de tensão de 30%. Esse tipo de distúrbio leva a uma injeção de componente de sequência zero. A Figura 4.44 mostra a tensão no barramento CC para este caso.

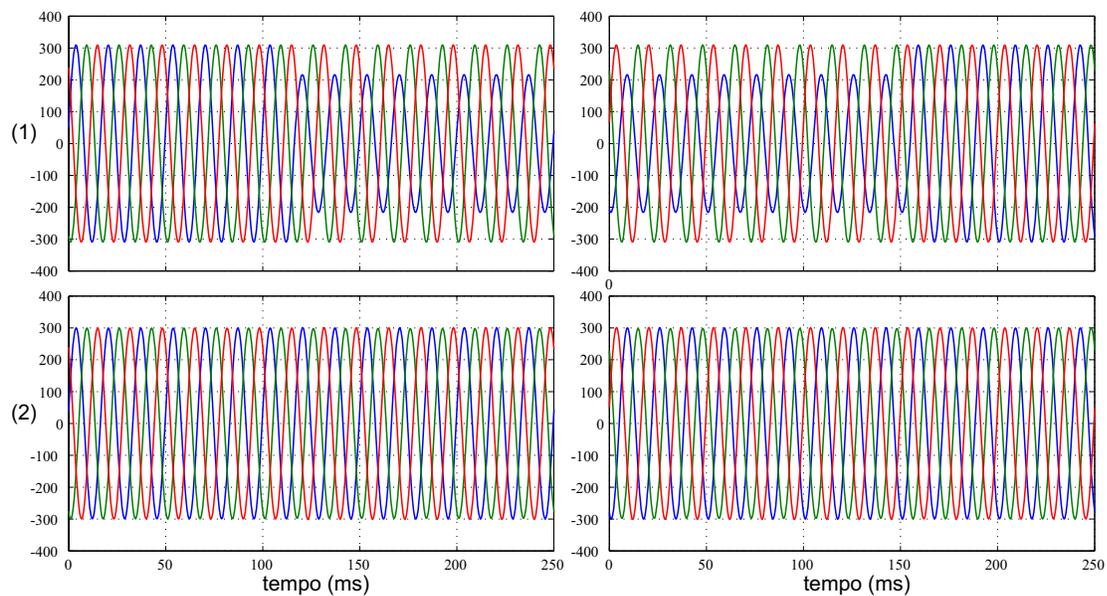


Figura 4.43: Afundamento monofásico de longa duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio [V]; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V];

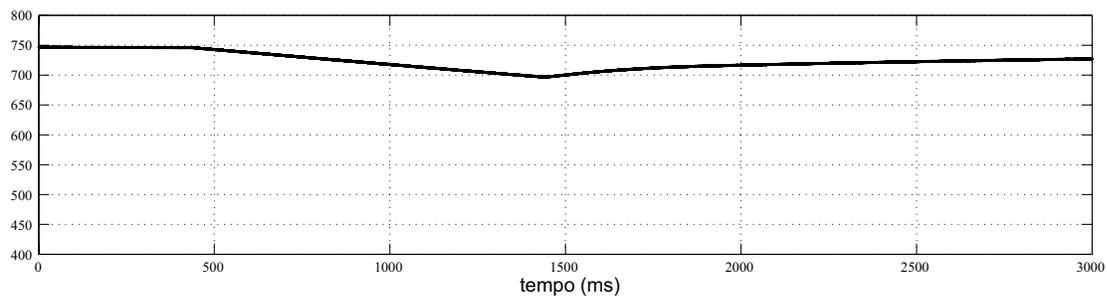


Figura 4.44: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento monofásico de longa duração com 70% da tensão remanescente.

4.3.3 Curto-circuito trifásico - tipo A

Afundamento de tensão de 70%

A Figura 4.45 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio e das tensões da carga com um afundamento tipo E. Esse tipo de distúrbio não leva a uma injeção de componente de sequência zero, ou seja é uma falta equilibrada.

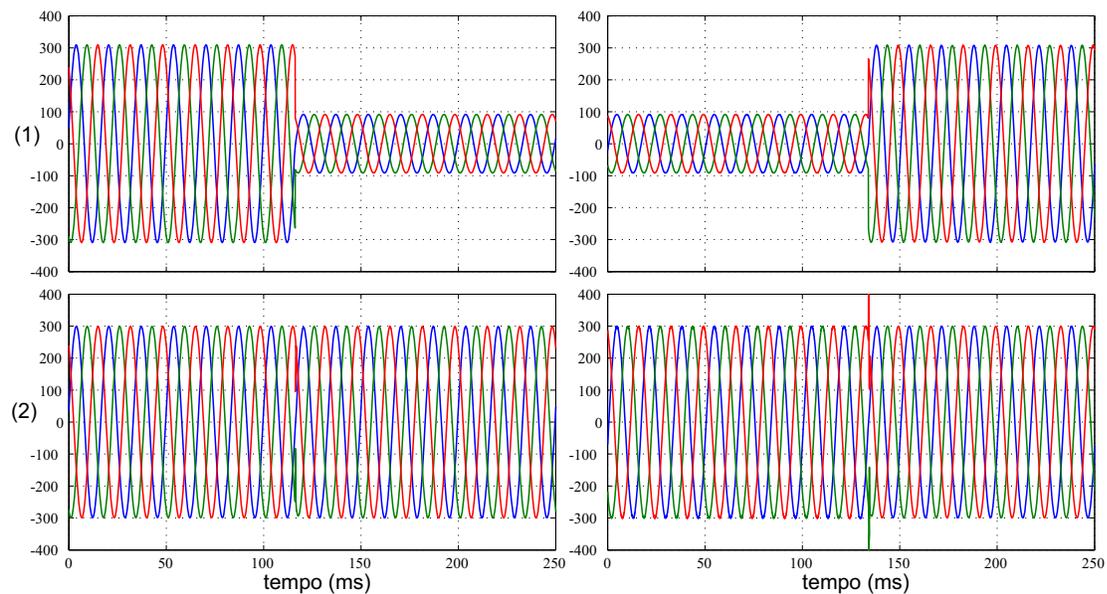


Figura 4.45: Afundamento trifásico de longa duração com 30% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensões da rede sob distúrbio; (2)- Tensões na carga compensada pelo DVR [V].

Nas Figuras 4.46, 4.47 e 4.48 podemos observar o funcionamento do controle de corrente

em referencial estacionário $\alpha\beta 0$.

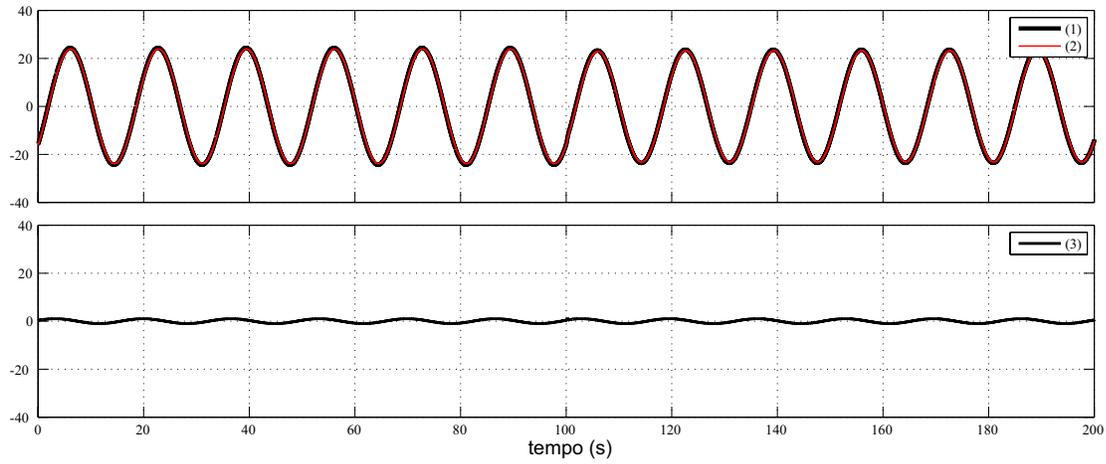


Figura 4.46: Controle de corrente (eixo α). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

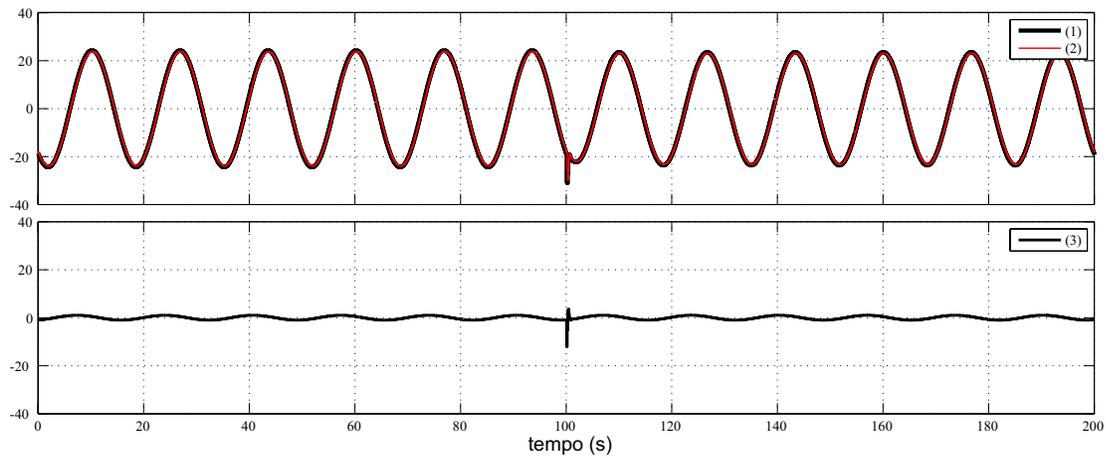


Figura 4.47: Controle de corrente (eixo β). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

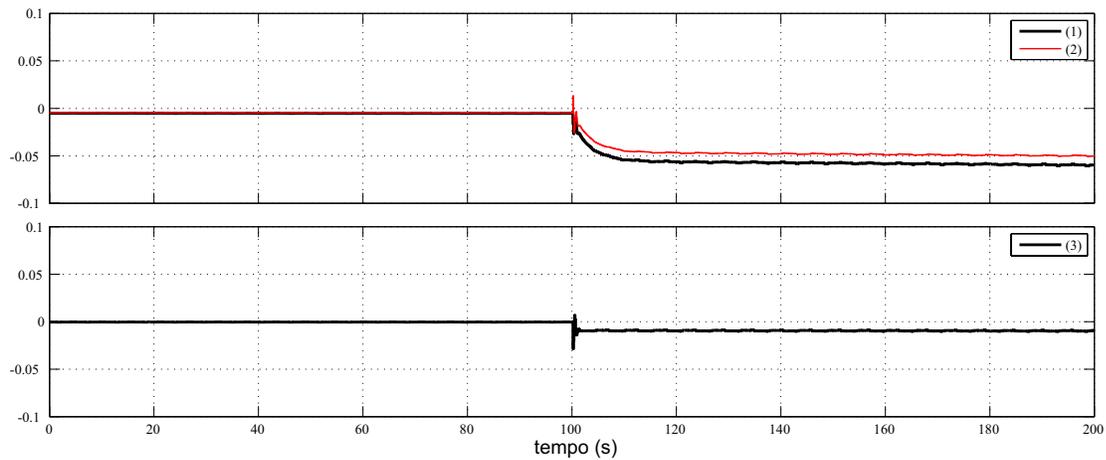


Figura 4.48: Controle de corrente (eixo 0). Traços: (1)- Corrente de referência [A]; (2)- Corrente medida [A]; (3)- Erro entre a corrente de referência e a medida [A].

Nas Figuras 4.49, 4.50 e 4.51 podemos observar o funcionamento do controle de tensão em referencial estacionário $\alpha\beta 0$. Nas figuras são representadas as tensões de referência, as tensões medidas e logo abaixo o erro entre elas. O curto é iniciado em 100 ms.

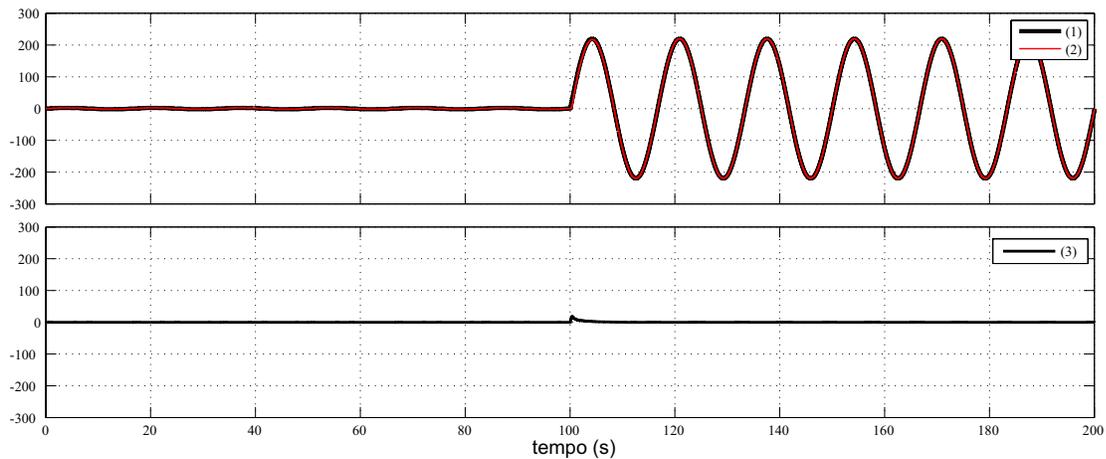


Figura 4.49: Controle de tensão (eixo α). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

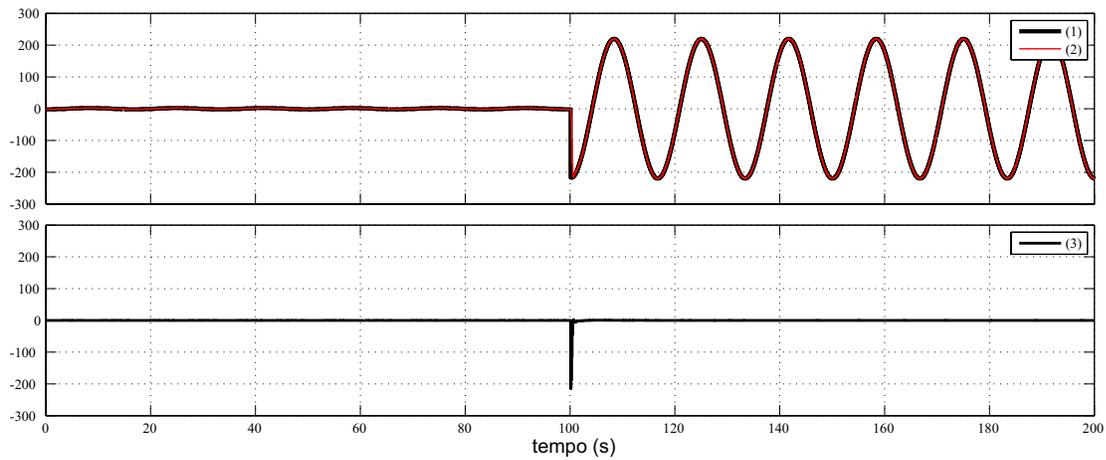


Figura 4.50: Controle de tensão (eixo β). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V];

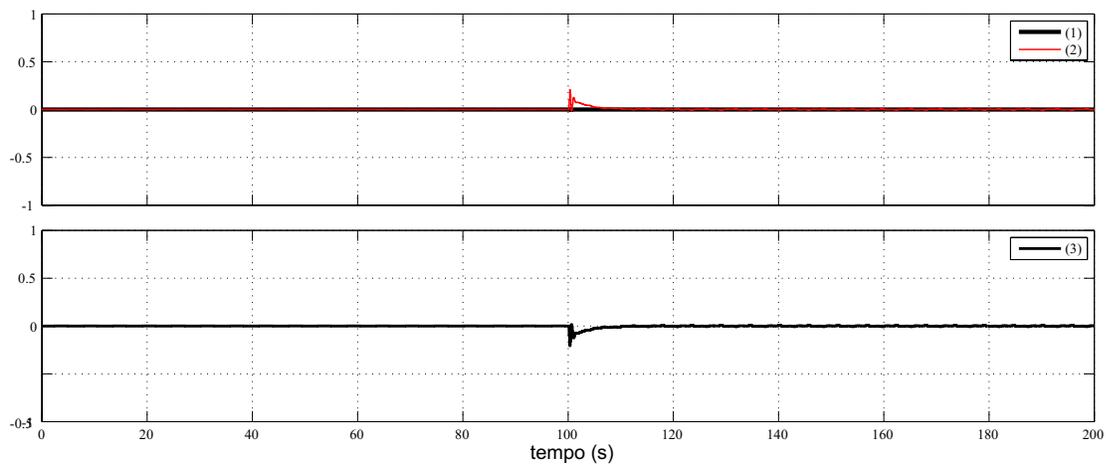


Figura 4.51: Controle de tensão (eixo 0). Traços: (1)- Tensão de referência [V]; (2)- Tensão medida [V]; (3)- Erro entre a tensão de referência e a medida [V].

A Figura 4.52 mostra a tensão no barramento CC para um afundamento de 30% da tensão remanescente para um curto monofásico. Para tal distúrbio o barramento CC consegue suprir a potência ativa solicitada para compensar o afundamento de tensão causado na rede.

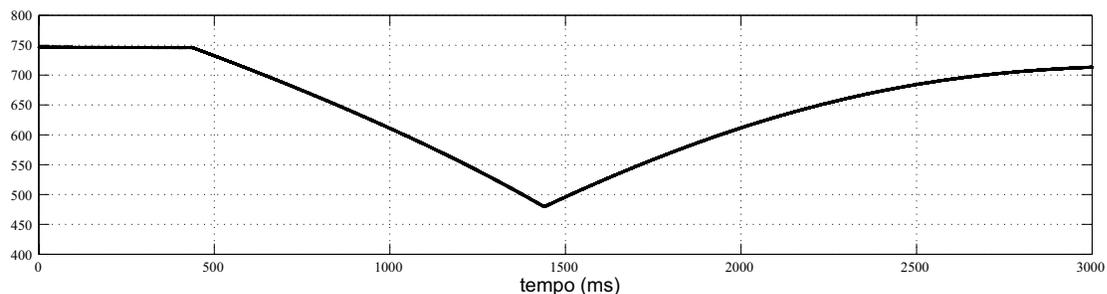


Figura 4.52: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento trifásico de longa duração com 30% da tensão remanescente.

Afundamento de tensão de 30%

A Figura 4.53 ilustra o comportamento das tensões da rede sob distúrbio e das tensões da carga com o afundamento de tensão de 30%. Esse tipo de distúrbio não leva a uma injeção de componente de sequência zero.

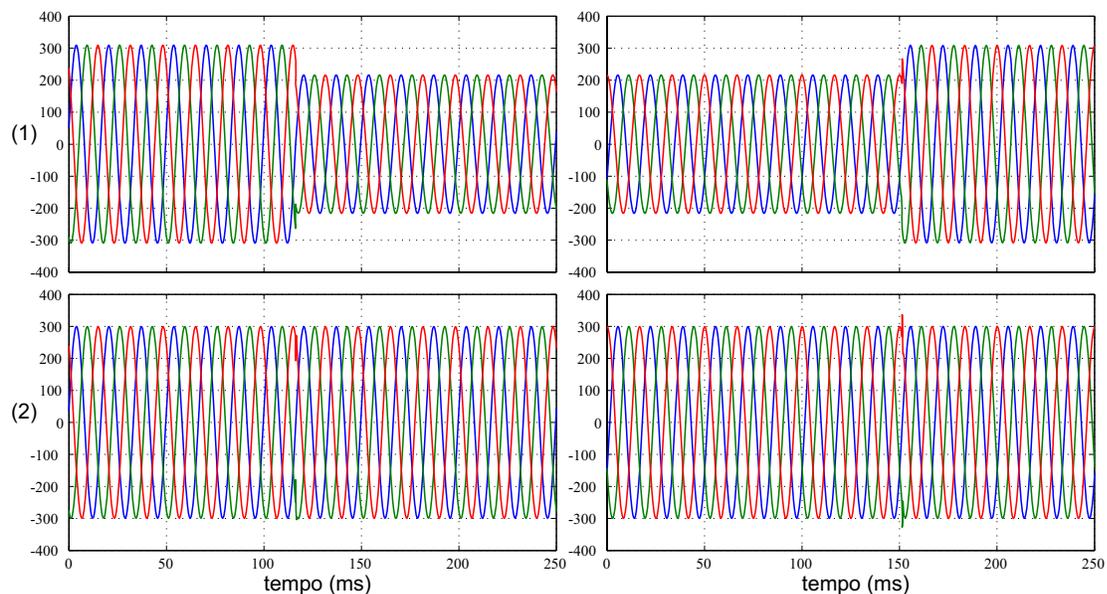


Figura 4.53: Afundamento trifásico de longa duração com 70% da tensão remanescente. Traços: (1)- Tensão da rede [V] sob distúrbio. (2) Tensão na carga [V] compensada pelo DVR.

A Figura 4.54 mostra a tensão no barramento CC para este caso. Para tal distúrbio o barramento CC consegue suprir a potência ativa solicitada para compensar o afundamento de tensão causado na rede.

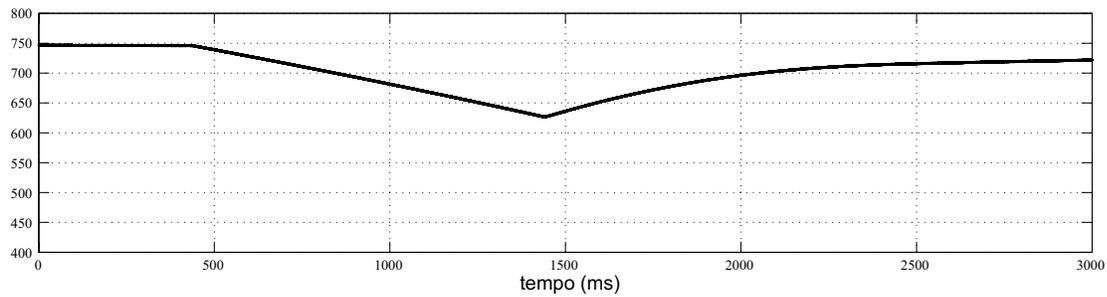


Figura 4.54: Tensão no barramento CC [V] de um afundamento trifásico de longa duração com 70% da tensão remanescente.

4.4 Conclusão

A partir dos resultados obtidos verificou-se a eficácia do algoritmo de controle estudado. Os resultados de simulação corresponderam aos resultados teóricos obtidos na modelagem, demonstrando ser este um equipamento confiável na compensação de distúrbios de tensão presentes no sistema elétrico. Pode-se afirmar que o barramento CC consegue suprir toda a potência ativa solicitada pela carga, onde esse equipamento foi dimensionado para o pior caso e devido a esse fato o DVR consegue suprir até 30% da tensão remanescente como pode ser visto nas simulações realizadas.

5 CONCLUSÃO

Como pode ser visto, as cargas sensíveis ou críticas estão sujeitas a um funcionamento deficiente na ocorrência de distúrbios na tensão de alimentação das mesmas e isto gera perdas financeiras para as empresas. A grande maioria dos distúrbios na tensão são os afundamentos momentâneos de tensão. Estes são gerados principalmente por faltas no sistema, que podem estar localizadas a quilômetros de distância da carga afetada.

Pode-se observar que, devido à característica de compensação de desequilíbrios, a estratégia permite a utilização de um retificador não controlado, retificador este que reduz o custo do equipamento. Vale lembrar que antes do retificador é utilizado um transformador com relação de transformação 1:1,5. Também é utilizado um inversor com um quarto braço para a compensação de sequência zero e apresenta uma técnica de PWM compatível com a quantidade de chaves do inversor.

Existem várias maneiras e equipamentos para proteger estas cargas contra distúrbios na tensão. Este documento tem seu foco voltado para os compensadores série de tensão dinamicamente controlados, denominados de DVR. Como pode ser visto este equipamento tem a funcionalidade de regular a tensão de carga, fornecendo uma tensão senoidal, livre de afundamentos momentâneos de tensão e desequilíbrios de tensão. Este equipamento apresenta uma resposta muito rápida, grande confiabilidade e robustez.

Também pode-se observar no capítulo 4, onde são obtidos os resultados de simulação,

a eficácia do funcionamento do PLL e do gerador de referência, através da observação do ângulo θ , em comparação com outro método de detecção e referência. O método apresentado mostrou uma resposta melhor corrigindo inclusive um erro que se encontrava no método anterior.

O algoritmo de controle proposto mostrou ser preciso e rápido, destacando-se a sua simplicidade e o baixo esforço computacional para a sua implementação em micro controladores. O controle de corrente e o controle de tensão são postos em cascata, permitindo assim a linearização das malhas de controle do DVR, o controle de tensão realizado através de um controlador PI e o controle de corrente realizado por um controle de corrente preditivo.

A partir dos resultados de simulação obtidos com a topologia em estudo, verificou-se que foi atingido o seu objetivo, protegendo a carga frente a diversos distúrbios elétricos presentes no sistema de distribuição.

Particularmente, foram apreciadas vantagens e desvantagens da topologia em estudo, contribuindo para diversificar possíveis soluções para proteção de cargas sensíveis.

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

- Desenvolver um protótipo em escala industrial de um DVR;
- Desenvolver um estudo para avaliar o funcionamento deste controle para outras topologias de DVR;
- Estender os estudos para compensação de outros tipos de distúrbios, os quais não foram realizados no presente trabalho. Por exemplo, estratégias de controle podem ser desenvolvidas para permitir a compensação de harmônicos de tensão da rede. Com a estrutura apresentada, a faixa de passagem do controlador linear de tensão dificilmente possibilitaria a compensação de harmônicos, devendo apenas atenuá-los.



DIAGRAMA DE BLOCOS DO DVR NO SIMULINK/MATLAB

Para a implementação do modelo do DVR desta dissertação foi construído um modelo híbrido de simulação onde a parte de potência da mesma foi realizada usando blocos da biblioteca *SimPower Systems* do Simulink/Matlab e a parte do controle por sua vez foi implementada em linguagem C.

Na Figura A.1 encontra-se a janela principal do programa, onde, a partir dela tem-se acesso a todos os blocos do programa. A simulação é composta por alguns blocos periféricos e dois blocos principais denominados *Plant* e *Control*.

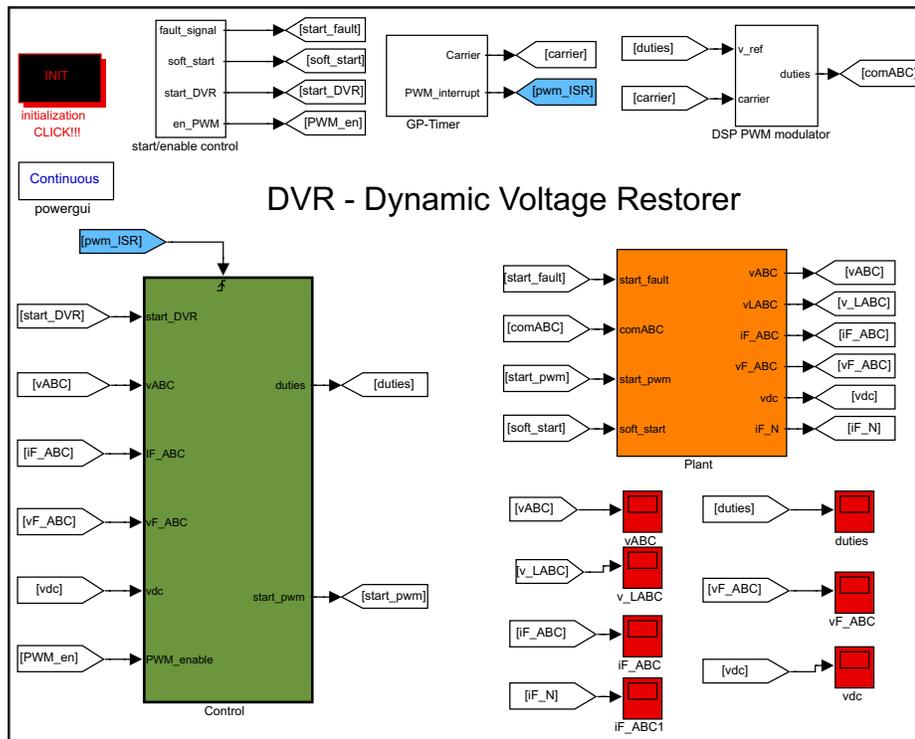


Figura A.1: Janela principal do programa

A.1 Blocos periféricos da simulação

O bloco *Initialization CLICK!* carrega todos os parâmetros do sistema mostrados na Tabela 4.1. O bloco *start/enable control* que está representado na Figura A.1 fornece os instantes de parada e partida do controle. Além disso, esse bloco é responsável por determinar o instante em que a falta entra e sai do sistema. O diagrama esquemático interno desse bloco é mostrado na Figura A.2. O bloco *GP-timer* tem duas funções: a primeira é gerar a base de tempo para a interrupção (gatilho do controle); a segunda é gerar a portadora (onda triangular) para a comparação na estratégia de PWM.

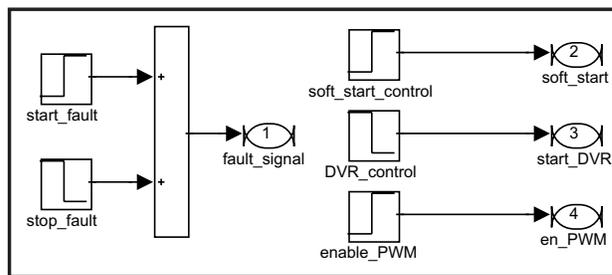


Figura A.2: Bloco utilizado para ativar o controle e controlar os tempos de falta

O bloco *DSP PWM modulator* da Figura A.1 faz uma comparação dos ciclos do PWM obtidos do controle com o valor da portadora e gera o pulso das chaves do inversor. Seu diagrama interno é mostrado na Figura A.3.

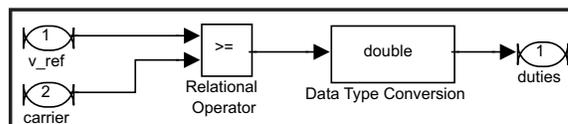


Figura A.3: Bloco utilizado para o PWM

A.2 Blocos principais da simulação

A.2.1 A planta da simulação

O bloco *Plant* da Figura A.1 representa a planta do sistema onde o DVR está instalado (Figura A.4). A falta é simulada através de três disjuntores (breakers), onde pode-se simular qualquer tipo de falta. As medições de corrente e de tensão são realizadas pelos blocos de medição (*current measurement, voltage measurement*). Também pode-se ver os conversores (retificador e inversor) o filtro de saída do inversor e o transformador série.

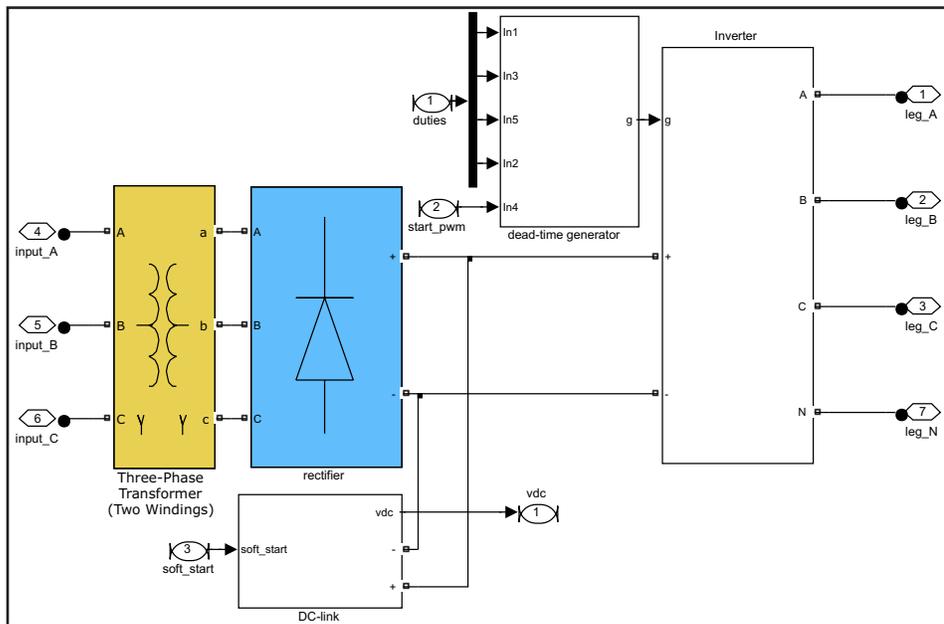


Figura A.5: Bloco dos conversores do DVR

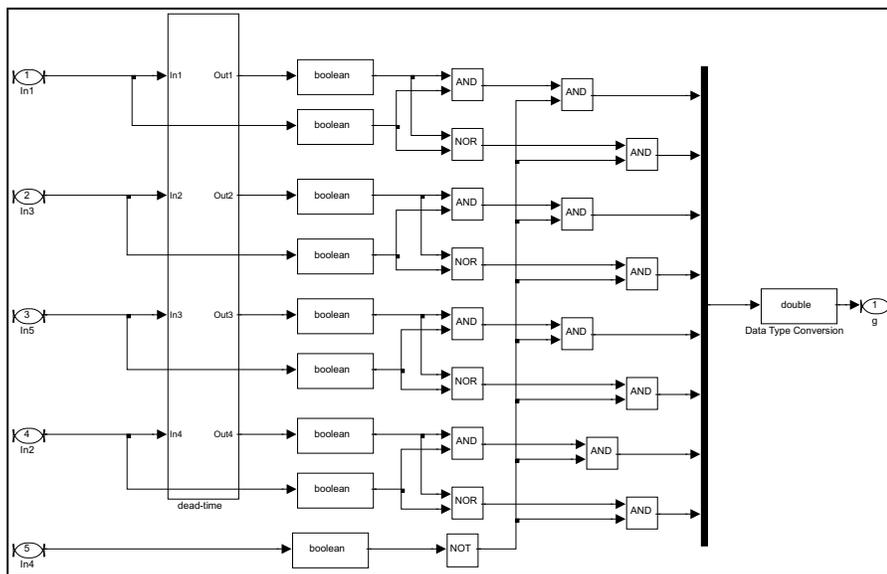


Figura A.6: Bloco utilizado para simular o tempo morto das chaves

O modelo do inversor a quatro braços (bloco *inverter*) é ilustrado na Figura A.7.

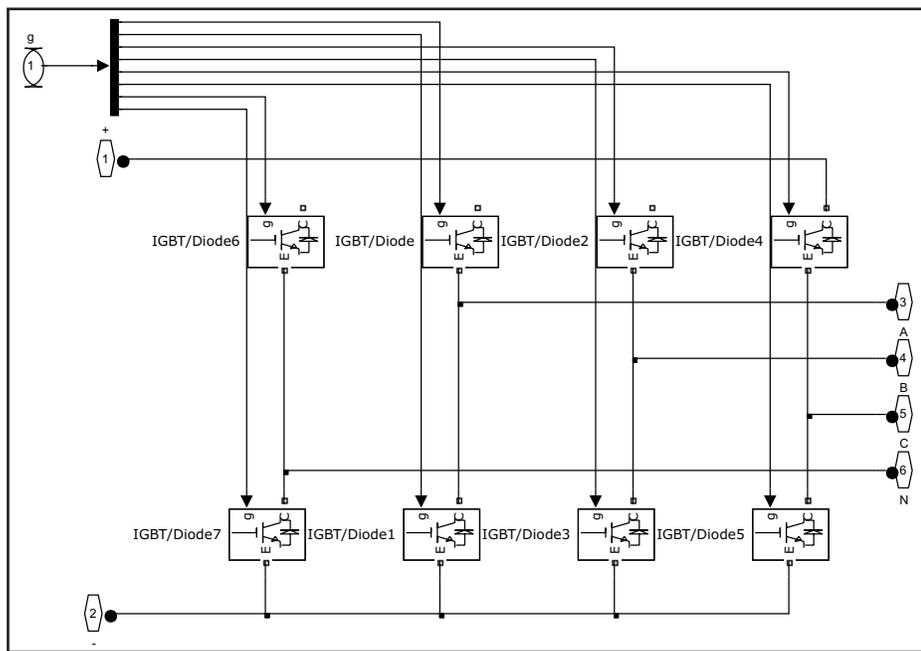


Figura A.7: Bloco do inversor a 4 braços

A.2.2 O controle da simulação

O bloco *control* mostrado na Figura A.1 é o responsável por controlar o DVR. Os sinais conectados a entrada desse bloco são amostrados de acordo com o gatilho gerado pelo bloco *GP-timer*. O diagrama esquemático desse bloco é mostrado na Figura A.8. A rotina de controle é inteiramente realizada através de linguagem C que por sua vez é chamada através do bloco *C-program*. Essa rotina está listada no apêndice B.

B | DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE

Neste apêndice está mostrado o código utilizado na realização do controle do DVR. Na ordem de implementação está: PLL, gerador de referência, proteção do barramento CC, controle de tensão, controle de corrente e por fim a implementação do PWM.

```
#define S_FUNCTION_NAME controle
#define S_FUNCTION_LEVEL 2

#include "simstruc.h"
#include "math.h"

#ifdef MATLAB_MEX_FILE
#include <brtenv.h>
#endif

#define U(element) (*uPtrs[element]) /* Pointer to Input Port0 */
/* Define input and output widths */
#define NINPUTS 12
#define NOUTPUTS 33
/* Define number of states and assign labels*/
#define DSTATES 35
/*-----*/
#define cos_theta x[0]
#define cos_theta0 x0[0]
/*-----*/
#define sin_theta x[1]
#define sin_theta0 x0[1]
/*-----*/
```

```
#define int_pll                x[2]
#define int_pll0              x0[2]
/*-----*/
#define theta                 x[3]
#define theta0                x0[3]
/*-----*/
#define vd_filt               x[4]
#define vd_filt0              x0[4]
/*-----*/
#define vq_filt               x[5]
#define vq_filt0              x0[5]
/*-----*/
#define v_beta_old            x[6]
#define v_beta_old0           x0[6]
/*-----*/
#define counter_pll           x[7]
#define counter_pll0          x0[7]
/*-----*/
#define enable_pll            x[8]
#define enable_pll0           x0[8]
/*-----*/
#define count_enable_control   x[9]
#define count_enable_control0 x0[9]
/*-----*/
#define enable_control         x[10]
#define enable_control0        x0[10]
/*-----*/
#define Int_iF_d               x[11]
#define Int_iF_d0              x0[11]
/*-----*/
#define Int_iF_q               x[12]
#define Int_iF_q0              x0[12]
/*-----*/
#define Int_vF_d               x[13]
#define Int_vF_d0              x0[13]
/*-----*/
#define Int_vF_q               x[14]
#define Int_vF_q0              x0[14]
/*-----*/
#define count_ref1             x[15]
#define count_ref10            x0[15]
/*-----*/
#define count_ref2             x[16]
#define count_ref20            x0[16]
/*-----*/
```

```
#define iF_d_ref_filt          x[17]
#define iF_d_ref_filt0        x0[17]
/*-----*/
#define iF_q_ref_filt          x[18]
#define iF_q_ref_filt0        x0[18]
/*-----*/
#define no_control_counter     x[19]
#define no_control_counter0    x0[19]
/*-----*/
#define vs_alpha_old1          x[20]
#define vs_alpha_old10        x0[20]
/*-----*/
#define vs_alpha_old2          x[21]
#define vs_alpha_old20        x0[21]
/*-----*/
#define i_alpha_ref_old1       x[22]
#define i_alpha_ref_old10     x0[22]
/*-----*/
#define iF_0_old1              x[23]
#define iF_0_old10            x0[23]
/*-----*/
#define U_alpha_old1           x[24]
#define U_alpha_old10         x0[24]
/*-----*/
#define iF_alpha_old1          x[25]
#define iF_alpha_old10        x0[25]
/*-----*/
#define vs_beta_old1           x[26]
#define vs_beta_old10         x0[26]
/*-----*/
#define vs_0_old1              x[27]
#define vs_0_old10            x0[27]
/*-----*/
#define i_beta_ref_old1        x[28]
#define i_beta_ref_old10      x0[28]
/*-----*/
#define i_0_ref_old1           x[29]
#define i_0_ref_old10         x0[29]
/*-----*/
#define U_beta_old1            x[30]
#define U_beta_old10          x0[30]
/*-----*/
#define iF_beta_old1           x[31]
#define iF_beta_old10         x0[31]
/*-----*/
```

```

#define v0_filt          x[32]
#define v0_filt0        x0[32]
/*-----*/
#define Int_vF_0        x[33]
#define Int_vF_00      x0[33]
/*-----*/
#define U_zero_old1     x[34]
#define U_zero_old10   x0[34]
/*-----*/
/* Set parameters */
#define NPARAMS 8
#define DEF_PARAM1(S)  ssGetSFcnParam(S,0)
#define DEF_PARAM2(S)  ssGetSFcnParam(S,1)
#define DEF_PARAM3(S)  ssGetSFcnParam(S,2)
#define DEF_PARAM4(S)  ssGetSFcnParam(S,3)
#define DEF_PARAM5(S)  ssGetSFcnParam(S,4)
#define DEF_PARAM6(S)  ssGetSFcnParam(S,5)
#define DEF_PARAM7(S)  ssGetSFcnParam(S,6)
#define DEF_PARAM8(S)  ssGetSFcnParam(S,7)

//Constant coefficients and parameters
#define h 1e-4 // Sample time of pwm + controller
#define w 314.159265 // Frequencia fundamental (rad/s)
#define rtst 0.5774 // Raiz de 3 sobre 3
#define dpst 2.0944 // 2*pi/3
#define dpi 6.2832 // 2*pi
#define pi 3.1416 // pi
#define rtsd 0.8660 // Raiz de 3 sobre 2
#define wcfiltro 0.0053 // Xc - Reatancia capacitiva do filtro
#define Rfiltro 1 // Resistencia do filtro
#define XLfiltro 1.8850 // Xl - Reatancia indutiva do filtro
#define DELAY_PLL 300. // Delay time used by the PLL = 200 x sampling time
#define Id_max 30.0 // Saturation of d-axis voltage controller
#define Iq_max 30.0 // Saturation of q-axis voltage controller
#define IO_max 30.0 // Saturation of q-axis voltage controller
#define Vd_max 400.0 // Saturation of d-axis voltage controller
#define Vq_max 400.0 // Saturation of q-axis voltage controller
#define K1_vd_filt 1 // Filter coefficient for the reference voltage
#define K2_vd_filt 1e-7 // Filter coefficient for the reference voltage
#define K1_vq_filt 1 // Filter coefficient for the reference voltage
#define K2_vq_filt 1e-7 // Filter coefficient for the reference voltage
/* General-purpose constants */
#define sq1over6 0.40824829 // 1/sqrt(6)
#define sq1over2 0.70710678 // 1/sqrt(2)
#define sq2over3 0.81649658 // sqrt(2/3)

```

```

#define sqlover3 0.5774    // 1/sqrt(3)
#define two_over3 0.6667 // 2/3
#define one_over3 0.3333 // 1/3
#define one_over2 0.5     // 1/2
#define sq3over3 0.5774  //sqrt(3/3)

/* Limits for phase duty-cycles */
#define DUTY_MIN 0.03
#define DUTY_MAX 0.97
/*=====
 * S-function methods *
 *=====*/
/* Function: mdlInitializeSizes ===== */
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
ssSetNumSFcnParams(S, NPARAMS);/* Number of expected parameters */
if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
return; /* Parameter mismatch will be reported by Simulink */
}
ssSetNumContStates(S, 0);
ssSetNumDiscStates(S, DSTATES);

if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
ssSetInputPortWidth(S, 0, NINPUTS);
ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);

if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
ssSetOutputPortWidth(S, 0, NOUTPUTS);

ssSetNumSampleTimes(S, 1);
ssSetNumRWork(S, 0);
ssSetNumIWork(S, 0);
ssSetNumPWork(S, 0);
ssSetNumModes(S, 0);
ssSetNumNonsampledZCs(S, 0);
/*Take care when specifying exception free code-see sfuntmpl_doc.c*/
ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE);
}
/* Function: mdlInitializeSampleTimes =====*/
static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
ssSetSampleTime(S, 0, INHERITED_SAMPLE_TIME);
ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}
#define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS

```

```

/* Function: mdlInitializeConditions =====*/
static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
{
    real_T *x0 = ssGetRealDiscStates(S);
    cos_theta0          =0.0;
    sin_theta0          =0.0;
    int_pll0            =0.0;
    theta0              =0.0;
    vd_filt0            =0.0;
    vq_filt0            =0.0;
    v_beta_old0         =0.0;
    counter_pll0        =0.0;
    enable_pll0         =0.0;
    count_enable_control0 =0.0;
    enable_control0     =0.0;
    Int_iF_d0           =0.0;
    Int_iF_q0           =0.0;
    Int_vF_d0           =0.0;
    Int_vF_q0           =0.0;
    count_ref10         =0.0;
    count_ref20         =0.0;
    iF_d_ref_filt0     =0.0;
    iF_q_ref_filt0     =0.0;
    no_control_counter0 =0.0;
    vs_alpha_old20      =0.0;
    vs_alpha_old10     =0.0;
    U_alpha_old10       =0.0;
    iF_0_old10          =0.0;
    i_alpha_ref_old10   =0.0;
    iF_alpha_old10      =0.0;
    vs_0_old10          =0.0;
    vs_beta_old10       =0.0;
    U_beta_old10        =0.0;
    i_0_ref_old10       =0.0;
    i_beta_ref_old10    =0.0;
    iF_beta_old10       =0.0;
    v0_filt0            =0.0;
    Int_vF_00           =0.0;
    U_zero_old10        =0.0;
}
#define MDL_START
static void mdlStart(SimStruct *S)
{
    #ifndef MATLAB_MEX_FILE
    /* define IO group pins (0..7) as output */

```

```

    ds1103_bit_io_config(DS1103_DIO1_OUT);
/* write HIGH to pin IO1 */
    ds1103_bit_io_set(DS1103_DIO1_SET);
#endif
}
/* Function: mdlOutputs =====*/
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
    real_T kp_pll          = *mxGetPr(DEF_PARAM1(S));
    real_T ki_pll          = *mxGetPr(DEF_PARAM2(S));
    real_T kp_v            = *mxGetPr(DEF_PARAM3(S));
    real_T ki_v            = *mxGetPr(DEF_PARAM4(S));
    real_T kp_i            = *mxGetPr(DEF_PARAM5(S));
    real_T ki_i            = *mxGetPr(DEF_PARAM6(S));
    real_T vdc_th          = *mxGetPr(DEF_PARAM7(S));
    real_T LF              = *mxGetPr(DEF_PARAM8(S));
    real_T *y              = ssGetOutputPortRealSignal(S,0);
    real_T *x              = ssGetRealDiscStates(S);
    InputRealPtrsType uPtrs = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);

/* Local variables */
/* Temporary variables */
    real_T tmp1, tmp2;
/* Feedback variables */
    real_T vA, vB, vC;
    real_T iFA, iFB, iFC;
    real_T vF_A, vF_B, vF_C;
    real_T start_DVR;
    real_T stop_control=1;
    real_T pwm_enable=1;
    real_T pwm_enable_new;
/* PLL variables */
    real_T prop_pll;
    real_T v_alpha,v_beta,v_0;
    real_T vd,vq,v0;
    real_T omega;
/* voltage controller variables */
    real_T vF_alpha,vF_beta;
    real_T vF_alpha_ref, vF_beta_ref,vF_zero_ref;
    real_T vF_d,vF_q,vF0,vF_0;
    real_T vF_d_ref,vF_q_ref,vF_0_ref;
    real_T Error_vF_d,Error_vF_q,Error_vF_0;
    real_T prop_vF_d, prop_vF_q,prop_vF_0;
    real_T int_sat_vF_d,int_sat_vF_q,int_sat_vF_0;
/* current controller variables */

```

```

real_T iF_alpha,iF_beta,iF_0;
real_T iF_alpha_ref_filt,iF_beta_ref_filt,iF_0_ref_filt;
real_T iF_d,iF_q,iF_z;
real_T iF_d_ref, iF_q_ref,iF_0_ref;
real_T parametro;
real_T vs_alpha,vs_beta,vs_0;
real_T U_alpha,U_beta,U_zero;
real_T i_alpha_ref,i_beta_ref,i_0_ref;
/* Pulsewidth modulation */
real_T vdc_ref=730;
real_T vdc_link;
real_T vA_ref,vB_ref,vC_ref,vfN;
real_T v_alpha_ref, v_beta_ref,v_zero_ref;
real_T van,vbn,vcn;
real_T vA_ref_norm,vB_ref_norm,vC_ref_norm,vf_ref_norm;
real_T middle,max,min
real_T dutyA,dutyB,dutyC,dutyF;
/* Assign inputs to local variables */
start_DVR =U(0); // start-stop DVR control
vA =U(1); // AB line voltage at PCC
vB =U(2); // BC line voltage at PCC
vC =U(3); // CA line voltage at PCC
iFA =U(4); // phase A filter current
iFB =U(5); // phase B filter current
iFC =U(6); // phase C filter current
vF_A =U(7); // AB line voltage filter
vF_B =U(8); // BC line voltage filter
vF_C =U(9); // CA line voltage filter
vdc_link =U(10); // DC-link voltage
pwm_enable =U(11); // DVR PWM enable control
/* -----*/
/* Direct Clarke Transformations */
/* -----*/
//Supply voltages
v_alpha=two_over3*vA - one_over3*vB - one_over3*vC;
v_beta = sq3over3*vB - sq3over3*vC;
v_0 =one_over3*vA + one_over3*vB + one_over3*vC;
// Filter currents
iF_alpha = two_over3*iFA - one_over3*iFB - one_over3*iFC;
iF_beta = sq3over3*iFB - sq3over3*iFC;
iF_0 = one_over3*iFA + one_over3*iFB + one_over3*iFC;
/*-----*/
/* Transformação de Alfa Beta para dq */
/*-----*/
//Filter output voltages

```

```

vF_alpha = two_over3*vF_A - one_over3*vF_B - one_over3*vF_C;
vF_beta  =          sq3over3*vF_B - sq3over3*vF_C;
vF_0     =          one_over3*vF_A+one_over3*vF_B+one_over3*vF_C;
/* -----*/
/*PLL to find the position of the voltage oriented reference frame */
/* -----*/
    tmp2=v_beta-v_beta_old;
tmp1=v_beta*v_beta_old;

    if (start_DVR>0.0)
        {
enable_pll=0.0;
counter_pll=0.0;
        }
    if(tmp1<=0.0)
{
    if (tmp2>0.0)
        counter_pll++;
}
    v_beta_old=v_beta;
if (counter_pll>=4.0)
    {
        counter_pll=4.0;
        enable_pll=1.0;
    }
else
{
enable_pll=0.0;
}
    if (enable_pll>0.0)
        {
            vd = v_alpha*cos_theta + v_beta*sin_theta;
            vq = v_beta*cos_theta - v_alpha*sin_theta;
            v0 = v_0;
            int_pll = int_pll + h*ki_pll*vq;
            prop_pll = kp_pll*vq;
            omega = prop_pll + int_pll;

            theta = theta + h*omega;
            cos_theta = cos(theta);
            sin_theta = sin(theta);

            if (theta > dpi)
                theta = theta - dpi;
            if (theta < 0.0)

```

```

        theta = theta + dpi;

        count_enable_control++;
    }
else
    {
        omega=0.0;
        theta=0.0;
sin_theta=0.0;
cos_theta=1.0;
        prop_pll=0.0;
        int_pll=0.0;
        vd=v_alpha;
        vq=v_beta;
        v0 = 0;
        count_enable_control=0.0;
        enable_control=0.0;
    }

    if (count_enable_control>DELAY_PLL)
        {
count_enable_control=DELAY_PLL;
enable_control=1.0;
        }

    if (enable_control==0.0)
start_DVR=1.0;
/*-----*/
/*      Reference generator using LPF filters      */
/*-----*/

    if (start_DVR>0.0)
        {
            {
                vd_filt = 311; //220*sqrt(2)----> filter initialization
                vq_filt = 0.0;
                v0_filt = 0.0;

                vF_d_ref = 0;
                vF_q_ref = 0;
                vF_0_ref = 0;
            }
        }
else
    {
        vd_filt = K1_vd_filt* vd_filt + K2_vd_filt*vd;
        vq_filt = K1_vq_filt* vq_filt + K2_vq_filt*vq;
        v0_filt = 0;
vF_d_ref = vd_filt - vd;    // reference voltages in dq frame
vF_q_ref = vq_filt - vq;

```

```

vF_0_ref = v0_filt - v0;
}
vF_alpha_ref = vF_d_ref*cos_theta - vF_q_ref*sin_theta;//
vF_beta_ref = vF_d_ref*sin_theta + vF_q_ref*cos_theta;
vF_zero_ref = vF_0_ref;
/*-----*/
/*      DC-link voltage floor protection      */
/*-----*/
    if (pwm_enable<1.0)
    {
        if (vdc_link<vdc_th)
            no_control_counter++;
        else
            no_control_counter=0;
    }
    if (no_control_counter>5.0)
        stop_control=1;
    else
        stop_control=1;
/*-----*/
/*      Voltage Loop Control      */
/*-----*/
    vF_d = vF_alpha*cos_theta + vF_beta*sin_theta; // actual voltages
    vF_q = vF_beta*cos_theta - vF_alpha*sin_theta;
    vF0 = vF_0;

    Error_vF_d = vF_d_ref - vF_d;
    Error_vF_q = vF_q_ref - vF_q;
    Error_vF_0 = vF_0_ref - vF0;

    if (pwm_enable>0.0)
    {
        Int_vF_d=0;
        Int_vF_q=0;
        Int_vF_0=0;
        Error_vF_d=0;
        Error_vF_q=0;
        Error_vF_0=0;
    }
    // PI for d axis
    prop_vF_d = kp_v*Error_vF_d;
    if (prop_vF_d>Id_max)
        prop_vF_d=Id_max;
    if (prop_vF_d<(-Id_max))
        prop_vF_d=-Id_max;

```

```

int_sat_vF_d = Id_max-fabs(prop_vF_d);
Int_vF_d = Int_vF_d + ki_v*h*Error_vF_d;

if (Int_vF_d>int_sat_vF_d)
Int_vF_d=int_sat_vF_d;
if (Int_vF_d<(-int_sat_vF_d))
Int_vF_d=-int_sat_vF_d;

// PI for q axis
prop_vF_q = kp_v*Error_vF_q;
if (prop_vF_q>Iq_max)
prop_vF_q=Iq_max;
if (prop_vF_q<(-Iq_max))
prop_vF_q=-Iq_max;

int_sat_vF_q = Iq_max-fabs(prop_vF_q);
Int_vF_q = Int_vF_q + ki_v*h*Error_vF_q;

if (Int_vF_q>int_sat_vF_q)
Int_vF_q=int_sat_vF_q;
if (Int_vF_q<(-int_sat_vF_q))
Int_vF_q=-int_sat_vF_q;

// PI for 0 axis
prop_vF_0 = kp_v*Error_vF_0;

if (prop_vF_0>Iq_max)
prop_vF_0=Iq_max;
if (prop_vF_0<(-Iq_max))
prop_vF_0=-Iq_max;

int_sat_vF_0 = I0_max-fabs(prop_vF_0);
Int_vF_0 = Int_vF_0 + ki_v*h*Error_vF_0;

if (Int_vF_0>int_sat_vF_0)
Int_vF_0=int_sat_vF_0;
if (Int_vF_0<(-int_sat_vF_0))
Int_vF_0=-int_sat_vF_0;

iF_d_ref = prop_vF_d + Int_vF_d;
iF_q_ref = prop_vF_q + Int_vF_q;
iF_0_ref = prop_vF_0 + Int_vF_0;

/*-----*/

```

```

/*          Current Loop Control          */
/*-----*/
iF_d = iF_alpha*cos_theta + iF_beta*sin_theta; // actual currents
iF_q = iF_beta*cos_theta - iF_alpha*sin_theta;
iF_z  = iF_0;

iF_alpha_ref_filt = iF_d_ref*cos_theta - iF_q_ref*sin_theta;
iF_beta_ref_filt  = iF_d_ref*sin_theta + iF_q_ref*cos_theta;
iF_0_ref_filt     = iF_0_ref;

// alpha-axis controller
parametro=LF/h;
vs_alpha = vF_alpha;
vs_beta  = vF_beta;
vs_0     = vF_0;
i_alpha_ref = iF_alpha_ref_filt;
i_beta_ref  = iF_beta_ref_filt;
i_0_ref     = iF_0_ref_filt;

pwm_enable_new = 1 - pwm_enable;

U_alpha=(vs_alpha)*pwm_enable_new+(parametro*(i_alpha_ref-iF_alpha))
*pwm_enable_new;

vs_alpha_old1 = vs_alpha;
i_alpha_ref_old1 = i_alpha_ref;
iF_alpha_old1 = iF_alpha;

U_beta=(vs_beta)*pwm_enable_new+(parametro*(i_beta_ref-iF_beta))
*pwm_enable_new;

vs_beta_old1 = vs_beta;
i_beta_ref_old1 = i_beta_ref;
iF_beta_old1 = iF_beta;

U_zero=(vs_0)*pwm_enable_new+(parametro*(i_0_ref-iF_0))
*pwm_enable_new;

vs_0_old1 = vs_0;
i_0_ref_old1 = i_0_ref;
iF_0_old1 = iF_0;

if (pwm_enable>0.0)
{
    U_alpha=vF_alpha;

```

```

    U_alpha_old1=vF_alpha;
    U_beta=vF_beta;
    U_beta_old1=vF_beta;
    U_zero=vF_0;
    U_zero_old1=vF_0;
    i_beta_ref_old1=0.0;
    i_alpha_ref_old1=0.0;
    i_0_ref_old1=0.0;
}
/* -----*/
/* Implementation of the PWM duty cycles */
/* ----- */

v_alpha_ref = U_alpha;
v_beta_ref = U_beta;
v_zero_ref = U_zero;

if (pwm_enable>0.0)
{
    v_alpha_ref = 0;
    v_beta_ref = 0;
    v_zero_ref = 0;
}

vA_ref = v_alpha_ref + v_zero_ref;
vB_ref = -one_over2*v_alpha_ref + rtsd*v_beta_ref + v_zero_ref;
vC_ref = -one_over2*v_alpha_ref - rtsd*v_beta_ref + v_zero_ref;

// Three-phase fundamental voltage commands
/* --- common mode calculation --- */
if (vA_ref>vB_ref) // (vA_ref_norm>vB_ref_norm)
{
    tmp1 = vA_ref; // tmp1=vA_ref_norm;
    tmp2 = vB_ref; // tmp2=vB_ref_norm;
}
else
{
    tmp1 = vB_ref; //tmp1=vB_ref_norm;
    tmp2 = vA_ref; //tmp2=vA_ref_norm;
}
if (tmp1<vC_ref) // (tmp1<vC_ref_norm)
{
    middle = tmp1;
    max = vC_ref; //max=vC_ref_norm;
    min = tmp2;
}
else

```

```

{
if (tmp2>vC_ref)      //(tmp2>vC_ref_norm)
    {
middle = tmp2;
    max = tmp1;
    min = vC_ref;      //min=vC_ref_norm;
    }
else
    {
middle = vC_ref; //middle=vC_ref_norm;
    max = tmp1;
    min = tmp2;
    }
}
if (min>0)
    vfN = -one_over2*max;
    else
        {
        if (max<0)
            vfN = -one_over2*min;
        else
            vfN = -one_over2*(max+min);
        }
/* ----- */
van = vA_ref + vfN;
vbn = vB_ref + vfN;
vcn = vC_ref + vfN;

vA_ref_norm = van/vdc_link;
vB_ref_norm = vbn/vdc_link;
vC_ref_norm = vcn/vdc_link;
vf_ref_norm = vfN/vdc_link;

dutyA = vA_ref_norm + one_over2; // + 0.5*middle;
dutyB = vB_ref_norm + one_over2; // + 0.5*middle;
dutyC = vC_ref_norm + one_over2; // + 0.5*middle;
dutyF = vf_ref_norm + one_over2; // + 0.5*middle;
/* Duty-cycles limitations */
if (dutyA<DUTY_MIN)
dutyA=DUTY_MIN;
if (dutyA>DUTY_MAX)
dutyA=DUTY_MAX;

if (dutyB<DUTY_MIN)
dutyB=DUTY_MIN;

```

```
if (dutyB>DUTY_MAX)
dutyB=DUTY_MAX;

if (dutyC<DUTY_MIN)
dutyC=DUTY_MIN;
if (dutyC>DUTY_MAX)
dutyC=DUTY_MAX;

    if (dutyF<DUTY_MIN)
dutyF=DUTY_MIN;
if (dutyF>DUTY_MAX)
dutyF=DUTY_MAX;
/* Relação dos sinais de saída */
y[0]=dutyA;
y[1]=dutyB;
y[2]=dutyC;
y[3]=dutyF;
y[4]=vF_d;
y[5]=vF_q;
y[6]=vF0;
y[7]=iF_alpha;
y[8]=iF_beta;
y[9]=iF_0;
y[10]=vd;
y[11]=vq;
y[12]=v0;
y[13]=iF_alpha_ref_filt;
y[14]=iF_beta_ref_filt;
y[15]=iF_0_ref_filt;
y[16]=vF_alpha;
y[17]=vF_beta;
y[18]=vF_0;
y[19]=vF_alpha_ref;
y[20]=vF_beta_ref;
y[21]=vF_zero_ref;
y[22]=vF_d_ref;
y[23]=vF_q_ref;
y[24]=vF_0_ref;
y[25]=1-stop_control;
y[26]=1-enable_control;
y[27]=iF_d_ref;
y[28]=iF_q_ref;
y[29]=iF_0_ref;
y[30]=iF_d;
y[31]=iF_q;
```

```
    y[32]=iF_z;
}
#define MDL_UPDATE
/* Function: mdlUpdate ===== */
static void mdlUpdate(SimStruct *S, int_T tid)
{
real_T          *x          = ssGetRealDiscStates(S);
InputRealPtrsType uPtrs    = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
}
/* Function: mdlTerminate ===== */
static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
    UNUSED_ARG(S); /* unused input argument */
}
#ifdef MATLAB_MEX_FILE /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
#include "simulink.c" /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h" /* Code generation registration function */
#endif
#endif
```

Referências Bibliográficas

- [1] M.H.J. Bollen. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. MCGRAW-HILL, 2000.
- [2] V.R.de Carvalho Fonseca. *Cálculo Estocástico dos Afundamentos de Tensão*. Belo Horizonte: s.n, 1999.
- [3] M.H.J. Bollen and Irene Y. H. GU. *Signal Processing of Power Quality Disturbance*. 2006.
- [4] IEEE Std 1159-1995. *IEEE recommended practice for monitoring electric power quality*. *IEEE*, 1995.
- [5] M.M. Gomez, J.C.; Marcos. Effect of distribution system protection on voltage sags. *IEEE Power Engineering Review*, 20(5):66–68, Maio 2000.
- [6] S.McQuilkin Joseph, S.Subjack; John. Harmonics - causes, effects, measurements and analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26(6):1034–1042, Novembro/Dezembro 1990.
- [7] Dawei Gao; Qingchun Lu; Jishou Luo. A new scheme for on-load tap-changer of transformers. *Power System Technology - PowerCon 2002. International Conference*, 2(13-17):1016–1020, Outubro 2002.
- [8] J.W.; Chen S. Choi, S.S.; Liu. An analysis and implementation of step-dynamic voltage regulator. *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2(27-31):713–718, Janeiro 2002.
- [9] R.R.; Reinaker R.W. Andrei, R.G.; Kaushik. Bridge capacitor bank design and operation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, pages 227–233, Janeiro 1996.
- [10] F.A.; Hollomon L.; Sendaula M. Sadanandan, N.D.; Deviney. Microprocessorbased capacitor bank control and protection system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4:241–247, Janeiro 1989.
- [11] A.; Guzman V.; Gimenez M. Fernandez, H.; Martinez. An experimental and training platform for uninterrupted power in isolated locations: wind turbine - electric generator - battery bank (tp-wt-ups). *Power Electronics and Applications*, 4(11-14):8 pp, Setembro 2005.
- [12] F. Schneider. Reliability of uninterruptible power supply systems. *Telecommunications Energy Conference*, 1989.
- [13] C.A.C. Cavaliere. Análise do statcom operando em sistemas desbalanceados. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Junho 2001.
- [14] C.A.C. Cavaliere. Aplicação do statcom na distribuição: Regulação de tensão e controle de fator de potência. *V SBQEE (Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica)*, 2003.

- [15] S. M. Silva. Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão. Dissertação de mestrado, UFMG, Junho 1999.
- [16] Zhou F. Li Y. Yang X. Wang Z. Wang, K. Tree-phase four-wire dynamic voltage restorer based on a new svpwm algorithm. *35th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference*, 2004.
- [17] João Luis Reis e Silva e Luiz Carlos de Moura. Alternativas tecnológicas para mitigação de afundamento e interrupção momentâneas de tensão em cargas sensíveis do sistema elétrico de potência.
- [18] Diogo Rodrigues da Costa Junior. Síntese e implementação de um restaurador dinâmico de tensão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, COPPE, Março 2006.
- [19] Sidélmo M. Silva. Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Agosto 1999.
- [20] J. G. Blaabjerg Nielsen. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers. *IEEE Transaction of Industry Applications*, Setembro/Outubro 2005.
- [21] K. Heumann M. Aredes and E. H. Watanabe. An universal active power line conditioner. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13:545–551, 1998.
- [22] M. R. Lund et al. C. D. Schauder, L. Gyugyi. Operation of the unified power flow controller upfc under practical constraints. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13:630–636, 1998.
- [23] Gustavo M.S. Azevedo. Sistema de conversão de energia fotovoltaica com compensação baseada em corrente e tensão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Setembro 2007.
- [24] V. Kaura and V. Blasko. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(1):58–63, 1997.
- [25] S.-K. Chung. A phase tracking system for three phase utility interface inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15(3):431–438, Maio 2000.
- [26] M. Bongiorno J. Svensson and A. Sannino. Practical implementation of delayed signal cancellation method for phase-sequence separation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1):18–26, Janeiro 2007.
- [27] J. Bergas I. Candela R. Burgos P. Rodríguez, J. Pou and D. Boroyevich. Decoupled double synchronous reference frame pll for power converters control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(2):584–592, Março 2007.
- [28] F. A. S. Neves M. C. Cavalcanti G. M. S. Azevedo H. E. P. Souza, F. Bradaschia and J. P. Arruda. A method for extracting the fundamental frequency positive-sequence voltage vector based on simple mathematical transformations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(5):1539–1547, Maio 2009.
- [29] H. E. P. de Souza F. Bradaschia E. Bueno M. Rizo F. A. S. Neves, M. C. Cavalcanti. A generalized delayed signal cancellation method for detecting fundamental-frequency positive-sequence three-phase signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3):1816 – 1825, Julho 2010.

- [30] Jang-Hwan Kim and Seung ki Sul. A carrier-based pwm method for three-phase four-leg voltage source converters. *IEEE Transactions on Power Eletronics*, 19(1), Janeiro 2004.