

CONDICIONADOR DE TENSÃO APLICADO A SISTEMA
COM PERDA DE FASE

Jaime Mourente Miguel

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D. Eng.

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Prof. José Antenor Pomilio, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2005

MIGUEL, JAIME MOURENTE

Condicionador de Tensão Aplicado a Sistema
com Perda de Fase [Rio de Janeiro] 2005

XV, 170 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Elétrica, 2005)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Modelagem de eletrônica de potência;
2. Transmissão de energia elétrica;
3. Operação com perda de fase;
4. Condicionador de tensão.

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedico este trabalho aos meus pais, Luís (in memoriam) e Pilar, à minha esposa Gilssara e aos meus filhos Luís e Nicole.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, pelo carinho, pela minha criação e pela educação que me proporcionaram, possibilitando o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À minha esposa e aos meus filhos pelo carinho, pela paciência e pela compreensão com relação ao tempo que precisei dedicar ao trabalho e à tese.

Ao Professor Dr. Edson Hirokazu Watanabe, orientador deste trabalho, pelas aulas durante e após a fase de créditos em disciplinas, pela discussão teórica da compreensão dos fenômenos físicos associados ao trabalho, pela orientação eficiente, pela colaboração, pelo incentivo e pelo apoio na realização desta tese. E com importância fundamental por sua presença tranquilizadora nos momentos de dificuldade, com sua participação calma e objetiva.

Ao Professor Dr. Maurício Aredes, orientador deste trabalho, pelas aulas durante e após a fase de créditos em disciplinas, pela contribuição no aprendizado da parte referente às simulações computacionais e pela orientação eficiente e colaboração na realização desta tese.

Agradeço ao Programa de Engenharia Elétrica e aos colegas do programa pela realização dos Seminários de Eletrônica de Potência que serviram como inestimável fonte de conhecimento e de troca de idéias. De discussões aparentemente sem relação imediata com problemas do trabalho surge a luz que atua sobre a escuridão da dificuldade.

Agradeço aos colegas da Petrobras pela colaboração direta e indireta à elaboração deste trabalho.

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

CONDICIONADOR DE TENSÃO APLICADO A SISTEMA
COM PERDA DE FASE

Jaime Mourente Miguel

Novembro/2005

Orientadores: Edson Hirokazu Watanabe

Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um condicionador de tensão cuja principal função é manter a tensão fornecida a uma carga isolada dentro de parâmetros de qualidade pré-estabelecidos, mesmo durante a perda momentânea ou contínua de uma fase qualquer do sistema. Para tal, o equipamento é capaz de fazer a transferência de potência entre as fases através do lado de tensão contínua comum a três inversores monofásicos.

O sistema estudado conta ainda com um condicionador de potência do lado da fonte que condiciona a corrente demandada da fonte de alimentação. O objetivo é que a fonte veja um sistema trifásico equilibrado como carga.

O trabalho apresenta as alternativas de arranjo do sistema de potência e o método de controle adotado para viabilizar o sistema proposto. A solução proposta é validada através de simulações computacionais no domínio do tempo de diversas situações associadas à operação típica de um sistema elétrico. Para tal, são consideradas partidas de motores de grande porte causando quedas de tensão significativas para o sistema em análise, curto-circuito e atuação da proteção e a perda de uma fase de alimentação.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

VOLTAGE CONDITIONER APPLIED TO A SYSTEM WITH LOSS OF PHASE

Jaime Mourente Miguel

November/2005

Advisors: Edson Hirokazu Watanabe

Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

This work presents the development of a voltage conditioner which main function is to supply the voltage of an isolated load within specified quality parameters, even during momentary or continuous loss of any system phase. In order to do this, the conditioner is able to transfer power between its phases through a common dc link.

Besides load voltage conditioning, the studied system has a power conditioner at the source side that makes source demanded current conditioning. The purpose is to provide a balanced three-phase current to the source.

This work presents alternatives of power circuit configuration and chosen control method to make viable the proposed system. The proposed solution is validated through computational simulations in the time domain of various situations associated to a typical operation of an electrical system. For this, large motor starting with meaningful voltage drop for the system under analysis, short circuit with protection actuation and loss of a feeding phase are considered.

ÍNDICE

CONDICIONADOR DE TENSÃO APLICADO A SISTEMA COM PERDA DE FASE

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xii
Nomenclatura	xiii
1- Introdução	1
1.1 Motivações para o trabalho.....	2
1.2 Identificação do Problema	7
1.3 Descrição do Sistema – Função e Operação.....	8
1.4 Objetivo do Trabalho.....	10
2. Alternativas de Transmissão de Energia Elétrica	11
2.1 Transmissão CA convencional	11
2.2 Transmissão CC com elo de corrente.....	15
2.3 Transmissão CC com elo de tensão.....	16
2.4 Transmissão CA empregando Condicionadores de Potência.....	20
2.5 Abertura Monopolar de Circuito Trifásico.....	25
2.6 Comparação entre as alternativas de alimentação	26
2.7 Resumo e Conclusão	32
3. O Sistema Elétrico em Estudo	34
3.1 Descrição do Sistema Elétrico.....	35
3.2 Fonte de Alimentação.....	36
3.3 Sistema de Transmissão de Energia	38
3.4 Carga Elétrica	44
3.5 Condicionador de Potência – Lado da Fonte.....	48
3.6 Condicionador de Tensão – Lado da Carga.....	54

3.7 Resumo e Conclusão	57
4. O Condicionador de Tensão – Lado da Carga.....	58
4.1 Circuito de Potência.....	60
4.2 Detectores de Fase Monofásicos e Trifásicos.....	62
4.3 Chaveamento do Condicionador de Tensão	65
4.4 Controle do Condicionador do Lado da Carga.....	66
4.5 Qualidade de Tensão - Lado da Carga.....	73
4.6 Resumo e Conclusão	74
5. Simulações Computacionais.....	76
5.1 Caso Base	77
5.2 Eventos Simulados	85
5.3 Resultados.....	90
6. Conclusões.....	122
6.1 Contribuição do Trabalho	123
6.2 Desempenho do sistema por tipo de evento	124
6.3 Trabalhos Futuros	125
Referências Bibliográficas.....	126
Apêndices	136
Apêndice 1 – Referências de Transmissão de Energia - CA e CC.....	137
Apêndice 2 – Transformadores de Potência	141
Apêndice 3 - Motores de Indução.....	144
Apêndice 4 – Operação do Condicionador de Tensão – Regime Permanente	150
Apêndice 5 – Cabos Elétricos.....	156
Apêndice 6 – Métodos de Chaveamento	161
Apêndice 7 – Qualidade de Tensão e Corrente.	165

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema unifilar da transmissão HVCA trifásica.	5
Figura 2 - Esquema de transmissão HVDC - VSC.....	6
Figura 3 - Sistema elétrico sob análise.	7
Figura 4 - Esquema unifilar do STATCOM.....	21
Figura 5 - Esquema unifilar do SSSC.....	22
Figura 6 - Esquema unifilar do UPFC.....	23
Figura 7 – Representação unifilar de sistema de transmissão por tensão contínua ou conversor em conexão <i>Back to Back</i>	24
Figura 8 – Sistema de alimentação típica HVAC para unidade <i>offshore</i> , com cargas também típicas.....	34
Figura 9 - Sistema elétrico em estudo, incluindo os condicionadores de potência.	35
Figura 10 - Fonte de Alimentação.	37
Figura 11 - Sistema elétrico do lado da fonte.....	49
Figura 12 – Circuito de Potência do Condicionador do Lado da Fonte.	49
Figura 13 - Configuração do Condicionador de Corrente – Lado da Fonte.....	51
Figura 14 - Regulador de tensão CC do condicionador de potência.	52
Figura 15 - Estratégia de controle correntes senoidais Fryze.....	53
Figura 16 - Área de operação $V \times I$ do conversor fonte de tensão.	55
Figura 17 - Condicionador de tensão do lado da carga.	56
Figura 18 - Inversor monofásico empregado no condicionador de tensão.....	57
Figura 19- PLL trifásico com média móvel.	63
Figura 20 – Operação do PLL trifásico com média móvel – entre 0 e 2,0 s.	63
Figura 21 - PLL Monofásico.	64
Figura 22 – PLL monofásico com filtro passa baixa.....	64
Figura 23 - Operação do PLL monofásico entre 0,0 e 2,0s.	65
Figura 24 - Malha de controle do condicionador de tensão do lado da carga.	67
Figura 25 – Obtenção do ângulos da fase “a”.	67
Figura 26 - Obtenção do fator de modulação da fase “a”.....	69
Figura 27 - Representação da rede e do condicionador de tensão.....	70
Figura 28 - Fasores das tensões do sistema e do condicionador.	70
Figura 29 - Controle da tensão sobre o capacitor do lado CC.....	72

Figura 30 - Controle do ângulo de fase da tensão da fase "a".....	73
Figura 31 - Esquema representativo do caso base.....	77
Figura 32 – Disjuntores - com transformadores delta-estrela.....	88
Figura 33 - Disjuntores - com transformadores estrela-estrela.....	88
Figura 34 - Operação do condicionador de tensão em regime permanente.....	91
Figura 35 - Partida do motor de 10 MW - Sem condicionador de tensão.	92
Figura 36 - Partida do motor de 10 MW - carga inicial motórica – sem condicionador.93	
Figura 37 - Condicionador de tensão durante partida do motor - Lado da Carga.	95
Figura 38 - Tensões e correntes na carga durante a partida do motor.	96
Figura 39 - Desligamento monopolar e atuação do condicionador de tensão.	97
Figura 40 - Tensões de linha na carga - $t = 0,5s$	98
Figura 41 - Tensões de linha na carga - $t = 1,5 s$	98
Figura 42 - Tensões de linha na carga – $2,8 s < t < 10 s$	99
Figura 43 - PLL trifásico - $t= 0,0s$	99
Figura 44 - Condicionador de Tensão - Lado da Carga.	101
Figura 45 - Potência ativa trifásica instantânea e potência imaginária trifásica instantânea.	102
Figura 46 – Tensões de seqüência +, - e 0 na Carga.	104
Figura 47 – Motor de Indução – 10 MW.....	105
Figura 48 – Correntes na fonte, no condicionador de corrente e no transformador elevador.	106
Figura 49 - Abertura do disjuntor na fase “a”.	107
Figura 50 - Correntes – Início de Operação do Condicionador de Corrente em $t=2,8 s$.- .Lado da Fonte.	108
Figura 51 - Partida do Motor de 10 MW em $t= 3,0 s$	109
Figura 52 - Desligamento do Motor em $t= 8,0 s$	110
Figura 53 - Correntes no lado da carga.	111
Figura 54 - Correntes no lado da carga, em $t= 1,5 s$	112
Figura 55 - Correntes no lado da carga, em $t= 3,0 s$	113
Figura 56 - Tensões na barra de carga – sem a fase “a” na transmissão – $t= 4,0s$	114
Figura 57 - Condicionador de Potência - Lado da Carga.	115
Figura 58 – Tensões de Seqüência +, - e 0 na Carga.....	116
Figura 59 - Motor de Indução – 10 MW.	117

Figura 60 – Correntes – Fonte, Condicionador e Carga.....	118
Figura 61 - Operação do condicionador de tensão associado a curto-circuito trifásico na barra de carga.	120
Figura 62 – Tensões e correntes na carga - Operação associada a curto-circuito na barra de carga.....	121
Figura 63 – Circuito equivalente básico para transformador de dois enrolamentos. ...	141
Figura 64 - Transformador defasador - Delta / Zigzag.....	142
Figura 65 - Transformador defasador - Delta / Polígono.	143
Figura 66 - Diagrama com enrolamentos no estator e o equivalente dq para máquina trifásica.	145
Figura 67 – Enlace de fluxo e indutâncias associadas ao eixo "d".....	146
Figura 68- Circuito equivalente - eixo "d".	146
Figura 69 - Condicionador do lado da carga - carga resistiva.	150
Figura 70 - Condicionador do lado da carga - carga indutiva	153
Figura 71 - Tensão com chaveamentos para eliminação seletiva de harmônicos.	162
Figura 72 - Ângulos de disparo em função do fator de modulação de amplitude - Eliminação de 5°, 7°, 11° e 13° Harmônicos.....	163

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Exemplos de aplicações <i>offshore</i> no Brasil - Petrobras.	15
Tabela 2 - Projetos de Destaque em Andamento.....	19
Tabela 3 - Comparação de alternativas de transmissão de energia elétrica.....	31
Tabela 4 – Disponibilidade no mercado em termos de lâmina d’água de operação de cabos elétricos isolados.	41
Tabela 5 - Perdas versus potência reativa de saída de um compensador estático de reativos de 48 pulsos, ± 100 Mvar.....	55
Tabela 6 - Transmissão CC – Elo de corrente - de 1954 a 1970 – Kimbark [13].....	137
Tabela 7 - Aplicações iniciais de sistemas de corrente contínua com elo de tensão e tecnologia fonte de tensão.	138
Tabela 8 - Aplicações de destaque em corrente contínua com elos de tensão - por potência e distância.....	139
Tabela 9 – Referências recentes para compensação de reativos com tecnologia fonte de tensão e chaveamento PWM.	140
Tabela 10 - Limites referentes à tensão de alimentação segundo a IEC 61892-1.....	165
Tabela 11 - Limites de <i>Notches</i> de tensão estabelecidos pela IEEE Std 519-1992.....	166
Tabela 12 - Limites de Harmônicos de Tensão segundo a IEEE Std 519-1992.....	167
Tabela 13 - Limites de Distorção de Corrente – tensão entre 120 e 69000 V.....	167
Tabela 14 – Limites de harmônicos de corrente – Tensão entre 61001 e 161000 V....	168
Tabela 15 - Limites de harmônicos de corrente – Tensão acima de 161000 V.....	168
Tabela 16 – Limites globais de tensão expressos em porcentagem da tensão fundamental.	169
Tabela 17 – Limites individuais expressos em porcentagem da tensão fundamental. .	169

Nomenclatura

AC – *Alternating Current*;
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;
API – *American Petroleum Institute*;
AT – Alta Tensão;
ATP - *Alternative Transient Program*;
BCS - Bombeio Centrífugo Submerso;
BCSS – Bombeio Centrífugo Submerso Submarino;
bpd - barril de petróleo por dia;
BT – Baixa Tensão;
BtB – *Back to Back*;
CA – Corrente Alternada;
CC – Corrente Contínua;
CSI – *Current Source Inverter*;
DC – *Direct Current*;
DHT - Distorção Harmônica Total;
DTHT - Distorção de Tensão Harmônica Total;
EAT – Extra Alta Tensão;
EMI – *Electromagnetic Interference*;
EMC – *Electromagnetic Compatibility*;
EMTDC™ - *Electromagnetic Transients including DC*;
EMTP – *Electromagnetic Transients Program*;
EPR - *Ethylene-Propylene-Rubber*;
FACTS - *Flexible Alternating Current Transmission Systems*;
FAP – Filtro Ativo de Potência;
FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*;
FSO – *Floating Storage and Offloading*;
GCSC – *GTO Controlled Series Capacitor*;
GTO – *Gate-Turn-Off thyristor*;
HPOF – *High Pressure Oil Filled*;
HVAC – *High Voltage Alternating Current*;
HVDC – *High Voltage Direct Current*;

IEC – *International Electrotechnical Commission*;
IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*;
IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistors*;
IGCT – *Integrated Gate-Commutated Thyristor*;
LCI – *Load Commutated Inverter*;
LDA – *Lâmina D'Água*;
LPOF – *Low Pressure Oil Filled*;
LV – *Low Voltage*;
MT – *Média Tensão*;
MV – *Medium Voltage*;
NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*;
OLTC – *On Load Tap Changer*;
ONS – *Operador Nacional do Sistema Elétrico*;
PCC – *Point of Common Coupling* (inglês) ou *Ponto de Conexão Comum* (português);
PI – *Controlador proporcional e integral*;
PLC – *Programmable Logic Controller*;
PLL – *Phase Locked Loop*;
PQMS - *Power Quality Monitoring System*;
PSCAD™ - *Power Systems Computer Aided Design*;
PVC - *Polyvinyl Chloride*;
PWM - *Pulse Width Modulation*;
RMS – *Root Mean Square*;
SCR – *Silicon Controlled Rectifier*;
SI – *Sistema Internacional de Unidades*;
SS - *Plataforma Semi-submersível*;
SSSC - *Static Synchronous Series Compensator*;
STATCOM – *Static Synchronous Compensator*;
SVC – *Static var Compensators*;
TCPST – *Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer*.
TCR – *Thyristor Controlled Reactor*;
TDD – *Total Demand Distortion*;
THD – *Total Harmonic Distortion*;
TLP – *Tension Leg Platform*;

TCSC - *Thyristor Controlled Series Capacitor*;
TCSR - *Thyristor Controlled Series Reactor*;
TRXLPE - *tree-retardant XLPE*;
TSC – *Thyristor Switched Capacitor*.
TSSC - *Thyristor Switched Series Capacitor*;
TSSR - *Thyristor Switched Series Reactor*;
UAT - *Ultra Alta Tensão*;
UPFC – *Unified Power Flow Controller*;
UPQC - *Unified Power Quality Conditioner*;
UPS – *Uninterruptible Power System*;
VSC – *Voltage Source Converter*;
VSD – *Variable Speed Drive*;
VSD-FC – *Variable Speed Drive – Frequency Converter*;
VSI – *Voltage Source Inverter*;
XLPE - *Cross-Linked Polyethylene*.

1- Introdução

Os objetivos de um sistema elétrico podem ser resumidos como “transportar a energia elétrica entre as unidades de geração e os terminais da carga” e “manter a tensão dentro de certos limites”. Conforme Bollen [1] durante várias décadas, a pesquisa e a educação se concentraram no primeiro objetivo, raramente confiabilidade e qualidade de suprimento eram um fim. De algumas décadas para cá, esses aspectos ganharam importância e temas como interrupção de fornecimento de energia, interrupções curtas ou breves, eventos associados a magnitude da tensão, como afundamentos de tensão e cargas sensíveis entre outros assuntos, têm merecido atenção de pesquisadores e projetistas.

Ainda de Bollen [1], podem ser relacionados vários termos e eventos que de alguma forma estão relacionados com a qualidade da energia fornecida ou consumida, tais como: variação da magnitude da tensão, variação da frequência da tensão, variação da magnitude da corrente, variação da fase da corrente, desbalanço de tensão e corrente, flutuação da tensão, distorção harmônica de tensão, distorção harmônica de corrente, componentes interharmônicos de tensão e corrente, entalhes ou recortes (*notchs*) periódicos na tensão, tensão de sinalização, ruído de alta frequência na tensão.

Condicionadores de tensão são equipamentos que empregam dispositivos semicondutores da área da eletrônica de potência. Normalmente, estes condicionadores são aplicados em sistemas de potência de corrente alternada e pertencem ao grupo dos chamados dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) que possuem a capacidade de controlar fluxo de potência, a tensão e a potência reativa e ainda aumentar a estabilidade do sistema. O termo FACTS foi apresentado por Hingorani [2], [3] e [4]. Hingorani e Gyugyi descrevem os conceitos associados e os dispositivos FACTS [5]. Os dispositivos FACTS permitem melhorar o desempenho de um sistema de corrente alternada, da forma que não seria possível com dispositivos convencionais. Isto está associado à velocidade de chaveamento e resposta desejadas e ainda ao número de chaveamentos necessários, normalmente incompatível com dispositivos eletromecânicos convencionais como chaves, contatores e disjuntores elétricos. Além disso, há ainda os problemas dos transitórios elétricos não controlados associados a esses chaveamentos. Watanabe e Barbosa [6] e [7] apresentam os

princípios de operação e um tutorial sobre a aplicação da tecnologia de eletrônica de potência no controle de sistemas de transmissão em corrente alternada.

Neste trabalho, será apresentada a modelagem de um equipamento condicionador de tensão destinado a atuar em subtensões e sobretensões de diferentes durações, atuação apenas limitada à capacidade de condução de corrente e de isolamento elétrico do equipamento utilizado. Além disso, outra finalidade do equipamento é reduzir as interrupções, permitindo a operação do sistema com perda de qualquer uma das fases do sistema elétrico. O equipamento estudado apresenta a capacidade de melhorar a qualidade da tensão fornecida sob o ponto de vista de controle de amplitude de tensão e também sob o ponto de vista de aumento de disponibilidade de energia elétrica, mesmo em caso de evento de significativa importância, que é a perda de um dos condutores de fase do sistema de transmissão. A disponibilidade de energia no ponto de consumo é aumentada sem que seja necessário criar redundância do sistema de transmissão, através da construção de novas linhas de transmissão ou lançamentos de novos cabos elétricos. É importante observar, no entanto, que a capacidade de transmissão, nesta condição de perda de uma das fases, é reduzida, sendo limitada pelo dimensionamento dos condutores da transmissão ou dos transformadores.

Como será visto mais adiante, neste trabalho, o conceito de transmissão proposto e a proposta de implementação do condicionador de potência do lado da carga que torna possível a operação durante a perda de qualquer fase do sistema de transmissão são as contribuições desta tese.

1.1 Motivações para o trabalho

A exploração do petróleo na costa brasileira tem caminhado em direção a pontos mais distantes da terra a profundidades de águas cada vez maiores chegando a valores da ordem de 2000 m. Tal fato causa o aumento do custo das instalações de produção, fazendo com que os empreendimentos sejam otimizados de forma a reduzir o custo de investimento e de operação por barril de petróleo. Isto é normalmente obtido através do aumento da capacidade da planta de processo de produção de petróleo e acarreta o crescimento da unidade de produção. Isto tem ocorrido de maneira notória nas últimas décadas e hoje temos estudos e projetos de 180.000 a 300.000 bpd (barril de petróleo

por dia). Na década de 80 a capacidade típica por plataforma era de 30.000 a 40.000 bpd.

Com relação ao sistema elétrico, podemos relacionar no Brasil, na Bacia de Campos, RJ, algumas unidades de produção com potência de geração instalada da ordem de 100 MW.

Normalmente, nos projetos de grande porte, a geração de energia elétrica é feita a partir de Turbinas a gás ou *dual-fuel* (que, além do gás, podem ser alimentadas também por diesel). Tal fato determina a existência de uma estrutura dedicada para manutenção e operação de turbinas a gás nas Unidades de Negócios associadas às plataformas de produção *offshore*.

No Pólo Nordeste da Bacia de Campos e no campo de Namorado existem unidades marítimas que são alimentadas eletricamente por outras plataformas a partir de cabos submarinos, neste caso, as distâncias são da ordem de 10 km e tensões trifásicas de 13,8 kV em 60 Hz.

Os campos de produção de petróleo, onde estão as unidades de produção, ficam distantes da costa do estado do Rio de Janeiro aproximadamente 100 km e situam-se em lâminas d'água numa faixa de 80 a 2000 m.

A utilização de cabos elétricos submarinos para a interligação elétrica de unidades marítimas de produção ou mesmo alimentação destas a partir do litoral propicia a possibilidade de otimização dos sistemas de geração de energia, uma vez que sistemas de maior porte concentrados podem ser projetados para a obtenção de maior rendimento energético global, menor número de máquinas e menor estrutura logística de apoio.

Em projetos de unidades marítimas de produção de petróleo anteriores a 1996, os compressores de gás natural eram sempre acionados por turbinas a gás, acarretando na existência de um maior número de turbinas na plataforma, as empregadas na geração de energia elétrica e as utilizadas na compressão de gás.

Nos projetos mais recentes, a compressão de gás natural tem sido projetada para ser acionada por motores elétricos, controlados ou não por conversores de frequência, assim, em geral, o número de turbinas fica restrito apenas à geração de energia elétrica e a potência de cada unidade é maior que os valores encontrados anteriormente.

A motivação básica para o trabalho é oferecer uma alternativa nova de transmissão de energia que viabilize a alimentação e operação de um sistema elétrico CA isolado mesmo com a perda de uma das fases do sistema de transmissão.

A idéia de oferecer uma alternativa nova de transmissão surgiu do cenário apresentado e da conjunção de fatores que são listados a seguir:

- A necessidade de oferecer uma alternativa mais eficiente de suprimento de energia para a alimentação de unidades de produção de petróleo marítimas, as plataformas fixas e semi-submersíveis (SS) de produção de petróleo, as unidades do tipo TLP – “*Tension Leg Platform*” , do tipo FPSO – “*Floating Production Storage and Offloading*” e FSO – “*Floating Storage and Offloading*”.

- A necessidade de reduzir a demanda de logística de operação e manutenção associada aos sistemas de geração locados nas unidades marítimas de produção;

- A necessidade de redundância na alimentação de unidades com elevado valor de lucro cessante. As alternativas naturais de redundância são: a geração local e a duplicação do sistema de transmissão.

- A capacidade limitada de fabricação, no Brasil, de cabos elétricos tripolares de potência submarinos em termos de classe de tensão e área do condutor. Isto acarretaria importação de cabos elétricos acima de determinada seção transversal com implicação direta na competitividade econômica da solução associada à transmissão de energia para as unidades de produção a partir do litoral brasileiro;

A alimentação de unidades marítimas a partir de outras unidades é um fato que tem sido aplicado em vários empreendimentos e nos últimos anos tem recebido atenção especial com o desenvolvimento de novas tecnologias na área de eletrônica de potência.

As plataformas da Petrobras no pólo nordeste na Bacia de Campos no Estado do Rio de Janeiro possuem geração centralizada na plataforma de Pargo que alimenta seis diferentes unidades de produção em corrente alternada, cada unidade com dois ramais de cabos submarinos.

Estudos e investimentos estão sendo realizados para aumentar o rendimento da geração *offshore* através da implementação de ciclo combinado com turbinas a gás e a vapor em espaço reduzido que pode ser viabilizado em unidades *offshore* através da redução das dimensões físicas da planta de geração.

Na alimentação de plataformas de petróleo através de cabos submarinos há duas soluções que se destacam: uma é a solução mais convencional, a transmissão em alta

tensão CA, com a denominação derivada do inglês HVAC e a outra é a transmissão em CC empregando conversores fonte de tensão, ou HVDC-VSC. A transmissão de energia elétrica em corrente alternada, em sistemas trifásicos, através de cabos elétricos isolados pode requerer a utilização de compensação de reativos através de indutores conectados em paralelo nas extremidades do cabo ou em alguns casos em pontos intermediários, esta configuração é apresentada na Figura 1.



Figura 1 - Esquema unifilar da transmissão HVCA trifásica.

No Mar do Norte, mais especificamente na Noruega, a Statoil, empresa norueguesa de petróleo, implementou e colocou em operação neste ano de 2005 um sistema de transmissão empregando elo de tensão contínua, utilizando conversores tipo fonte de tensão para alimentar dois motocompressores de gás natural com potência nominal de 41 MW.

Um dos elementos que tem sido apontado como forte motivador da utilização da energia gerada em instalações terrestres para suprir as plataformas de petróleo é a redução da emissão de poluentes na atmosfera. No caso da Noruega, existe a cobrança de uma taxa associada à emissão de CO_2 e NO_x e esta taxa é suficientemente importante para viabilizar, sob o ponto de vista econômico, a transmissão de energia a partir do continente, utilizando cabos elétricos submarinos. Além disso, a redução dos esforços e custos de operação e manutenção é também um motivador muito importante.

A transmissão de energia elétrica em tensão contínua é representada na Figura 2. O sistema representado possui retificador e inversor conectado a transformadores de três enrolamentos.



Figura 2 - Esquema de transmissão HVDC - VSC.

A transmissão de energia elétrica por meio de cabos submarinos tem recebido muita importância nos últimos anos. A solução de transmissão por elo de tensão contínua tem atraído muita atenção, porém a solução em corrente alternada também tem sido motivo de estudos técnicos e econômicos, seja pela transmissão direta seja pela geração centralizada em uma unidade marítima com distribuição empregando trechos mais curtos de cabos elétricos.

O condicionador de tensão pode ser aplicado em situações onde o ganho de confiabilidade devido à operação mesmo com a perda de um dos cabos de transmissão seja significativo e seja mais interessante que a utilização de uma linha ou cabo reserva. No caso de transmissão de energia elétrica através de linhas aéreas, devido ao custo elevado de novas linhas e das áreas associadas às faixas de passagem, este sistema tem uma motivação inerente. Além disso, podemos citar os casos de transmissão de energia para plataformas marítimas através de cabos submarinos com o emprego de cabos singelos e não cabos tripolares.

Além do benefício do aumento da disponibilidade da energia, temos a possibilidade de condicionar a energia elétrica entregue à carga e consumida do sistema de forma a reduzir a variação da tensão na carga e o desequilíbrio da corrente solicitada da fonte.

A alternativa apresentada neste trabalho é mais uma que se soma ao conjunto de soluções disponíveis onde podemos destacar a transmissão convencional em corrente alternada, a transmissão em corrente contínua, seja por elo de tensão ou de corrente contínua e também o caso particular de transmissão em corrente alternada com retificação e inversão no lado da carga.

1.2 Identificação do Problema

O problema estudado neste trabalho consiste da transmissão de energia, sob a forma de tensão CA, através de sistema trifásico a três fios mantendo as tensões na carga e na fonte reguladas mesmo com a perda de qualquer uma das fases de transmissão.

Durante a operação normal de um sistema elétrico, temos os seguintes eventos que se apresentam e que podem provocar situações indesejadas para a concessionária ou para o consumidor:

- Perda de uma fase do sistema devido ao desligamento monopolar da rede, normalmente causado por um curto circuito na fase em questão;
- Partida de um motor de grande porte, capaz de causar uma queda de tensão no sistema superior aos limites pré-estabelecidos como aceitáveis;
- Perda de uma fonte de alimentação ou de suporte de reativos, capaz de causar uma queda de tensão superior aos limites considerados aceitáveis;
- Presença de cargas desequilibradas fazendo com que a tensão fornecida pela rede também seja desequilibrada.

O sistema elétrico sob análise é composto por: fonte, sistema de transmissão que compreende transformador elevador, cabos elétricos singelos e transformador abaixador, cargas não lineares, cargas sensíveis, grandes motores, geração auxiliar e equipamentos FACTS para condicionar a tensão na barra de carga e a corrente vista pela fonte. O sistema é apresentado na Figura 3.

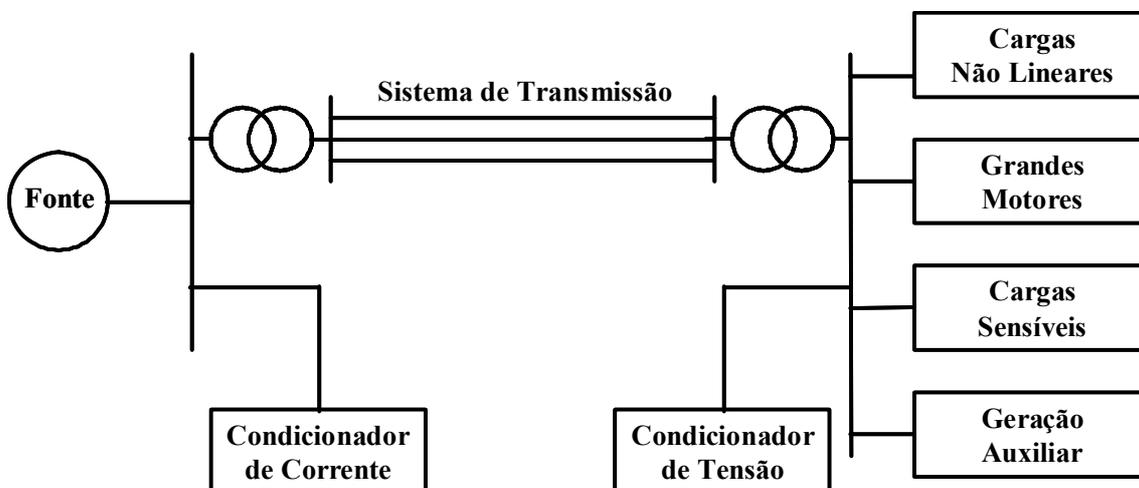


Figura 3 - Sistema elétrico sob análise.

Além de transmitir energia elétrica para as cargas de uma unidade de produção, sejam elas lineares ou não lineares, sensíveis ou não, o sistema elétrico deve garantir a qualidade de tensão e corrente nas duas extremidades do sistema de transmissão e na presença de grandes motores e cargas não lineares.

1.3 Descrição do Sistema – Função e Operação

Esta sessão trata da descrição do sistema estudado. Apresenta a função primária do sistema e quais as condições de operação normais e especiais que devem ser atendidas.

1.3.1 Função Primária do Sistema

A função primária de um sistema elétrico é transmitir a energia elétrica do local de geração até os consumidores desta energia respeitando os limites de tensão e frequência pré-estabelecidos na carga. O sistema elétrico é composto de geração, transmissão, distribuição e carga.

O sistema aqui considerado conecta uma fonte de alimentação a uma carga através de um sistema trifásico a três fios. Portanto, podemos considerar que estamos atuando entre a geração e a distribuição ou entre a distribuição e a carga.

1.3.2 Condições Normais de Operação

As condições normais de operação do sistema considerado são aquelas que fazem parte da operação convencional do sistema, e incluem os eventos de comportamento transitório, como por exemplo:

- partida de motores;
- energização de transformadores;
- energização de banco de capacitores;

- desconexão de um bloco de cargas, sejam ativas ou reativas;
- transferência de cargas de uma fonte para outra.

A influência destes eventos na operação do sistema deve respeitar limites pré-estabelecidos por normas ou critérios específicos de projetos de forma a não afetar o funcionamento da planta nem os critérios de qualidade da produção. No caso da partida de motor, por exemplo, temos de forma aproximada a aplicação de um degrau positivo de carga reativa e em seguida, ao final da partida, um degrau negativo ainda de carga reativa. A queda de tensão provocada pela partida de motores de grande porte deve ser limitada de forma que não afete a continuidade operacional, nem a qualidade do produto de uma planta alimentada pelo sistema em questão.

1.3.3 Condições Especiais de Operação

As condições especiais de operação do sistema considerado são aquelas que não fazem parte da operação convencional do sistema, como por exemplo:

- perda momentânea de uma fase qualquer do sistema de alimentação por qualquer motivo;
- perda contínua de uma fase qualquer do sistema de alimentação;
- desequilíbrios de tensão na carga, momentâneo ou contínuo;
- curto-circuito de diversos tipos com eliminação do defeito pela proteção.

Na perda momentânea ou contínua de uma fase, será considerada a abertura de um disjuntor em uma das fases do sistema de transmissão entre fonte e carga.

No caso de curto-circuito, será considerado que a falta, que pode ser trifásica ou bifásica com ou sem o envolvimento da terra e ainda fase terra, ocorre durante um determinado tempo necessário para que o sistema de proteção atue e elimine ou segregue o defeito. Em caso de curto-circuito, é desejado que a proteção atue para segregar somente a parte do sistema que está em curto-circuito no menor tempo possível, ou seja, atue com rapidez e seletividade. Além disso, o restante do sistema deve continuar em operação minimizando a interrupção ou perda de qualidade da produção.

1.4 Objetivo do Trabalho

O trabalho deverá estudar e apresentar soluções para uma situação de aplicação bastante ampla: o condicionamento de energia em um sistema com cargas não lineares alimentado por cabos elétricos. Para tal, será necessária a criação de estratégias de controle para dispositivos de eletrônica de potência que tenham desempenho satisfatório em diversas situações de operação normal ou transitória. Nestas situações, podemos incluir: a perda de uma fase qualquer da transmissão, a partida direta de grandes motores elétricos, a ocorrência de diversos tipos de faltas (internas ou externas ao sistema), o fenômeno do *flicker* e a redução dos níveis de harmônicos.

Diante disso, o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma alternativa de condicionador de tensão capaz de realizar as funções descritas anteriormente neste trabalho, que é garantir a função primária de transmissão em condições normais e em condições especiais de operação.

Outro objetivo deste trabalho é mostrar a viabilidade dos conceitos teóricos, sob o aspecto técnico, do circuito de potência e da estratégia de controle, da implementação de tal condicionador de tensão.

Adicionalmente, será mostrado que ambos os condicionadores, do lado da fonte e do lado da carga, são capazes de desempenhar suas funções em condições específicas além da perda de uma fase, tal como, partida de motores e desequilíbrio da tensão na carga.

O conceito de transmissão, a topologia de condicionador estudada e o algoritmo de controle proposto são simulados computacionalmente de forma que o condicionador de tensão seja avaliado em determinadas condições de contorno e condições operacionais.

2. Alternativas de Transmissão de Energia Elétrica

A transmissão de energia elétrica pode ser feita através de linhas aéreas de transmissão ou de cabos elétricos isolados. Pode também ser feita em corrente alternada ou em corrente contínua. No caso da alternativa de transmissão em corrente alternada é possível empregar dispositivos FACTS ou não e no caso da transmissão em corrente contínua pode ser feita através do conceito de transmissão com elo de corrente ou com elo de tensão.

A geração de energia elétrica através de geradores de grande porte, normalmente é feita entre 13,8 e 24 kV e esta tensão é elevada através de um transformador elevador para o sistema de transmissão. A tensão de transmissão é escolhida com base em motivos técnicos e econômicos de forma a reduzir perdas, custos de empreendimento, custos de operação e custos de manutenção.

Recentemente, surgiu no mercado alternativa de geração em tensões mais elevadas que elimina em alguns casos a utilização do transformador elevador [8] e [9]. Tal alternativa consiste de gerador síncrono cujos enrolamentos estatóricos são constituídos por cabos elétricos redondos de alta tensão com isolamento polimérico extrudado em lugar dos enrolamentos convencionais. A tensão de 400 kV é citada como limite superior atual de tensão de geração para a tecnologia. Essa tecnologia também é empregada em motores de conexão direta em alta tensão, conforme pode ser visto em [10].

2.1 Transmissão CA convencional

A transmissão convencional em corrente alternada utiliza transformadores elevadores, linha de transmissão ou cabos elétricos isolados de potência, singelos ou tripolares, e transformadores abaixadores. “O desenvolvimento dos sistemas de corrente alternada (CA) começou nos Estados Unidos em 1885, quando George Westinghouse comprou as patentes americanas referentes aos sistemas de transmissão em CA, desenvolvidos por L. Gaulard e J.D. Gibbs, de Paris” [11]. O primeiro sistema de

distribuição americano em corrente alternada alimentava 150 lâmpadas e a primeira linha de transmissão nos Estados Unidos foi posta em operação em 1890 e possuía comprimento de 20 km entre Willamette Falls e Portland, Oregon.

A corrente alternada permite a utilização de transformadores elevadores e abaixadores. Tais dispositivos são fundamentais pois tornam possível a adequação dos níveis de tensão aos valores desejados para geração, transmissão e consumo de energia elétrica. Esta possibilidade permite o projeto de sistemas otimizados sob o ponto de vista de perdas de energia e custos de materiais e equipamentos. Através da escolha adequada dos valores de tensão é possível empregar níveis de corrente compatíveis com equipamentos disponíveis no mercado. Uma vantagem importante dos sistemas de corrente alternada, quando comparados a sistemas de corrente contínua, é a relativa facilidade técnica e econômica de drenar energia de um ponto intermediário de um sistema de transmissão através de subestações abaixadoras. O fato da corrente alternada passar ciclicamente por zero tem efeito também nos dispositivos de chaveamento e interrupção de corrente, pois os disjuntores de corrente alternada aproveitam a passagem por zero da corrente para realizar a interrupção desta.

Os sistemas de geração possuem controle de tensão e de frequência através dos reguladores automáticos de tensão e dos reguladores de velocidade das máquinas motrizes, respectivamente. Através do sistema de geração também é possível controlar a potência injetada no sistema pela usina de geração.

Alguns equipamentos são utilizados para proporcionar algum controle à transmissão de energia tais como:

- transformadores e autotransformadores defasadores;
- comutadores de *tap* sob carga;
- bancos de capacitores em paralelo;
- capacitores para compensação série na linha de transmissão;
- reatores em paralelo;
- reatores série.

Os transformadores e auto-transformadores defasadores permitem o controle da potência transferida através do equipamento. A potência é controlada basicamente através do controle do ângulo de fase entre o primário e o secundário do equipamento.

Os transformadores que empregam comutadores de *tap* sob carga permitem a regulação de tensão em barras específicas nos terminais desses transformadores. Essa regulação de tensão é feita em estágios e de forma muito lenta e gradual. Ocorrendo a compensação de um *tap* de décimos de percentual da tensão nominal em tempo da ordem de minutos.

Os bancos de capacitores e reatores conectados em paralelo são utilizados para controle de reativos e, conseqüentemente, das tensões das barras de interesse. Capacitores para compensação série são empregados para a redução do comprimento equivalente da linha de transmissão. E os reatores conectados em série são freqüentemente empregados para reduzir o nível de curto circuito em barras específicas do sistema.

Recursos como aumento da potência natural da linha e compactação destas tem recebido atenção especial nas últimas décadas. A elevação dos custos das faixas de passagens e limitações impostas por requisitos ambientais tem sido forte motivador na direção de aumentar a potência transmitida por área ocupada pela linha de transmissão. Este tipo de motivação se aplica tanto a linhas existentes quanto a novas linhas de transmissão.

As tensões de transmissão mais comuns são:

- Alta Tensão (AT): 115, 138 e 230 kV;
- Extra Alta tensão (EAT): 345, 500 e 765 kV;
- Ultra Alta Tensão (UAT): 1000 a 1500 kV.

As linhas de transmissão da chamada Rede Básica, nível de tensão acima de 230 kV, colocadas em operação no Brasil devem atender aos Requisitos Mínimos estabelecidos pelo ONS [12].

2.1.1 Histórico de Aplicações em Unidades Marítimas de Produção

Existem várias formas de fazer a conexão de sistemas através de cabos elétricos. A seguir, são relacionadas diversas aplicações de cabos e sistemas de transmissão de energia empregados no Brasil, pela Petrobras, em pleno funcionamento.

A Petrobras possui um histórico de utilização de cabos submarinos para a alimentação de plataformas marítimas de produção de petróleo. As aplicações que podemos destacar são:

Pólo Nordeste

Possui um sistema de geração composto por três turbo geradores a gás de 12,5 MVA, 13,8 kV, 60 Hz, que alimenta através de cabos submarinos seis plataformas satélites. Para tal são utilizados dois ramais de 13,8 kV, o ramal de Carapeba (que alimenta PCP-1,2,3) e o ramal de Vermelho (que alimenta PVM-1,2,3). Cada ramal possui dois cabos, por motivo de redundância. A transmissão é feita através de cabos submarinos de 15/25 kV, 3 x 300 mm² com 12 fibras ópticas e a profundidade típica do local está em torno dos 100 metros.

Plataformas de Namorado 1 e 2

Um cabo interliga as plataformas de PNA-1, Plataforma de Namorado 1, e PNA-2, Plataforma de Namorado 2. A geração é feita em PNA-1 em 13,8 kV e 60 Hz e além das cargas da própria plataforma a geração supre através do cabo submarino de 3 km de comprimento, 12/20 kV, 3 x 95 mm², a PNA-2.

Interligação P-38 e P-40

Um cabo elétrico submarino interliga as plataformas P-38 (FSO) e P-40 (Semi-Submersível). Suas características são: 12/20 kV, cabos 3 x 240 mm², 12 Fibras Ópticas, 1080 m LDA (Lâmina D'água), dimensionado para 2000 m e 7600 m de comprimento.

Além destas, podemos citar outras aplicações que utilizam cabos submarinos. Nestas, a alimentação de cargas submarinas é feita a partir de conversores de frequência e são destinados a realizar a partida dos motores e a controlar a rotação das bombas, como por exemplo:

- Bombeio Centrífugo Submerso Submarino - BCSS do poço submarino RJS477A – Condutores de cobre, 35 mm², 12/20 kV, tripolar, LDA = 1150 m, 7500 m de comprimento;
- Sistema de Bombeio e Separação Submarina Vertical - VASPS – Condutores de cobre, 35 mm², 3,6/6 kV, tripolar, LDA = 410 m, 1550 m de comprimento.

Tabela 1 - Exemplos de aplicações *offshore* no Brasil - Petrobras.

Ano	Local de Instalação	Comprimento (km)	Nº de cabos	Tipo de cabo	Tensão (kV)	Condutor (mm²)
1988	Pólo Nordeste	56,8	6	EPR	25	3 x 300 +12 F.O.
1988	PNA-1 / PNA-2	3	1	EPR	20	3 x 95
1980	Elo <i>offshore</i>	3,4	1	EPR	5	3 x 1/0 AWG

2.2 Transmissão CC com elo de corrente

A transmissão CC com elo de corrente emprega o conceito de inversor fonte de corrente e emprega retificadores e inversores, normalmente, a tiristores. Necessita que ambos os terminais de transmissão possuam fontes de potência reativa necessárias para a comutação natural dos tiristores. Devido a essa limitação, este tipo de transmissão normalmente não é empregado para a transmissão de energia para um sistema isolado sem fonte. O desempenho deste tipo de conceito de transmissão quanto ao fator de potência é limitado quando a transmissão ocorre com ângulo de disparo dos tiristores muito elevado.

Este tipo de transmissão emprega reator de alisamento CC e necessita de filtros, normalmente passivos, para eliminação de harmônicos gerados pelo chaveamento e bancos de capacitores para compensação de potência reativa. Requer grande quantidade de potência reativa, devido ao emprego de tiristores e conseqüente existência de atraso da corrente em relação à tensão do lado da fonte e necessidade de potência reativa capacitiva para viabilizar a comutação de tiristores no lado da carga.

Iniciativas de transmissão em corrente contínua são relatadas desde 1936 pela *General Electric Company* [13] e uma relação de elos de transmissão em corrente contínua em operação desde a aplicação em Gotland de 1954 a 1970 é apresentada [13]. Parte desta relação é reproduzida, na Tabela 6, no Apêndice 1.

No Brasil temos o sistema de transmissão da energia gerada na Usina Hidrelétrica de Itaipu, um empreendimento binacional entre Brasil e Paraguai. A usina tem capacidade nominal de 12.600 MW com as 18 turbinas inicialmente instaladas (sendo nove unidades em 50 Hz e nove em 60 Hz) e em 2005 está prevista a instalação de duas novas turbinas ampliando a capacidade da usina para 14.000 MW. Metade da energia é gerada em 50 Hz, que é a frequência adotada no Paraguai. Para viabilizar a utilização da energia no Brasil em 60 Hz é utilizada a transmissão em corrente contínua com inversão para 60 Hz próximo ao ponto de consumo, em São Paulo. O sistema de transmissão em corrente contínua emprega pontes retificadoras e inversoras a tiristores (SCR - *Silicon Controlled Rectifier*) e a transmissão é feita através de bipolos de ± 600 kV. A subestação retificadora de Foz do Iguaçu recebe a energia em 550 kV CA, 50 Hz converte para ± 600 kV CC, e tem capacidade de 6.300 MW. A subestação inversora de Ibiúna recebe em ± 600 kV CC e converte para 345 kV CA, 60 Hz e sua capacidade é de 6.000 MW.

A criação de pontos intermediários de consumo na linha de transmissão com o conceito elo de corrente não é comum nem trivial e classicamente esta é considerada uma desvantagem em relação à transmissão em corrente alternada ou em corrente contínua com elo de tensão. No entanto, para potências da ordem de algumas dezenas de MW existe a alternativa do “*HVDC tap*” apresentado por Aredes, Portela e Watanabe [14] e Aredes, Portela e Machado [15]. Esta concepção permite a criação de subestações consumidoras em pontos intermediários da linha de transmissão, exigindo que seja mantida uma corrente mínima no circuito CC.

2.3 Transmissão CC com elo de tensão

A transmissão CC com elo de tensão emprega o conceito de inversor fonte de tensão e para ser bidirecional em potência utiliza retificador e inversor de topologias similares, isto é ambos com dispositivos semicondutores com capacidade de corte de condução de corrente. No inversor fonte de tensão a tensão do elo CC somente assume uma polaridade, e a corrente do elo CC pode ter os dois sentidos, positivo ou negativo.

O sistema com elo CC de tensão se caracteriza por possuir capacitância neste elo CC, e neste caso pode ser incluída a capacitância do cabo de transmissão e, além disso,

deve utilizar elementos de chaveamento com capacidade de corte, tais como, IGBT, IGCT e GTO conectados em anti-paralelo com diodos. Este sistema possui controle independente de potência ativa e reativa. Diferentemente do sistema de transmissão em CC por elo de corrente, não necessita de fonte de potência reativa do lado da carga, sendo capaz de alimentar uma localidade sem fonte de energia, podendo constituir a primeira fonte de alimentação a entregar energia para um sistema isolado. Esta concepção tem a capacidade natural de controlar a tensão na carga e também o fator de potência no lado da fonte.

Já existem vários sistemas comerciais que empregam este conceito em operação no mundo. Um dos sistemas que merece destaque e que entrou em operação em 2005 é o sistema dedicado à alimentação de motocompressores na plataforma de Troll A na Noruega, que é alimentado a partir da cidade de Kollsnes através de cabo elétrico submarino de 70 km de comprimento. A potência deste sistema de Troll A é de 41 MW, o sistema é apresentado por Nestli [16].

A transmissão em tensão ou corrente contínua tem aplicação baseada principalmente nas seguintes situações:

- Transmissão de energia através de cabos elétricos submarinos – devido ao valor elevado da capacitância desses cabos, a transmissão em corrente alternada tem comprimento limitado;

- Transmissão de energia através de linhas aéreas – para comprimentos mais longos, o custo da linha de transmissão pode ser suficientemente mais alto para justificar a instalação das estações terminais para retificação e inversão e uma linha de transmissão em CC de custo mais reduzido;

- Conexão de sistemas de frequências diferentes – tipicamente sistemas de 50 e 60 Hz são conectados através de elos CC em diferentes partes do mundo.

Um dos principais fabricantes do mundo na área dos sistemas de transmissão em alta tensão contínua apresenta uma lista de referências [17] com 14 aplicações desde 1997. Nesta lista são computadas instalações de estações conversoras para transmissão e estações para compensação de reativos, suporte de tensão e compensação de *flicker*.

A aplicação comercial inicial desta tecnologia foi realizada através de um projeto para transmitir cerca de 3 MW e 10 kV em Hällsjön. Os valores relativamente baixos de potência e tensão são justificados pelo caráter de projeto piloto elaborado para verificar a implementação prática da tecnologia, equipamentos e técnicas de controle.

A Tabela 7, no Apêndice 1, apresenta uma relação das primeiras aplicações, onde podemos destacar Hällsjön e Gotland como aplicações iniciais importantes no desenvolvimento da tecnologia. Em Hagfors a aplicação é de um compensador destinado a mitigar os efeitos de *flicker* existentes na instalação.

A tecnologia teve um desenvolvimento relativamente rápido e, hoje, é possível encontrar aplicações com potência superior a 300 MW. A maior parte das aplicações está relacionada com cabos elétricos isolados e não com linhas aéreas de transmissão, um dos motivos desta distribuição de aplicações está relacionada com a proteção das estações retificadoras e inversoras quanto às descargas atmosféricas.

A Tabela 8, no Apêndice 1, apresenta três importantes instalações de potência de até 330 MW, caso da aplicação de *Cross Sound* e 180 km de cabo elétrico, caso de Murraylink. Essas duas aplicações são nos Estados Unidos e a aplicação Directlink de 180 MW e 65 km foi implantada na Austrália.

A Tabela 2 apresenta dois casos de destaque que se encontram em andamento na área de transmissão com tecnologia de fonte de tensão. A aplicação Estlink de 350 MW, 105 km na Estônia tem início de operação previsto para 2006. Outra aplicação que tem sido aguardada com muito interesse é a aplicação de Troll A da Statoil, companhia de petróleo norueguesa. Troll A é uma plataforma *offshore* de produção de gás natural, que neste ano de 2005 receberá novos compressores de 41 MW acionados através de um sistema de transmissão de energia dedicado com tecnologia fonte de tensão e que emprega IGBTs de média tensão. A transmissão é feita através de cabo submarino de potência de 65 km de comprimento. Segundo o fabricante do sistema o cabo utilizado emprega isolamento polimérica, possui condutores de cobre e seção transversal de 300 mm². A aplicação prevê a instalação inicial de duas unidades com um terceiro compressor a ser instalado em alguns anos. A retificação é feita em Kollsnes no litoral da Noruega e a inversão ocorre na plataforma de Troll A, a saída do inversor é conectada diretamente ao motor que aciona o compressor de gás em alta tensão, cuja tensão nominal é 56 kV. Este motor possui tecnologia de fabricação e isolamento especial, podendo ser conectado à rede diretamente em alta tensão [10].

Tabela 2 - Projetos de Destaque em Andamento.

<u>INSTALAÇÃO</u>	<u>TROLL A</u>	<u>ESTLINK</u>
Comissionamento	2005	2006
Pot. Transmitida, MW	2 x 41	350
Tensão CC, kV	±60	±150
Conversores por estação	2	1
Tensão CC por conversor, kV	NA	±150
Corrente CC, A	400	1230
Faixa de potência reativa, Mvar	Troll A, NA Kollsnes, +24 / -20	±125
Localização das estações conversoras e Rede CA	Troll A, 56 kV Kollsnes, 132 kV	Espoo, 400 kV, 50 Hz Harku, 330 kV, 50 Hz
Arranjo de Cabos	Bipolar	Bipolar
Comprimento de cabo, km	65	105
Rede CA, ambos os lados	NA	Assíncrono
Controle	Motordrive e Motorformer (acionamento de motocompressores de gás natural)	Potência ativa e reativa e tensão CA
Mudança emergencial de fluxo de potência	NA	Sim
Motivação para utilização do sistema	Eletrificação de Plataforma <i>Offshore</i>, ambiental e taxa de emissão de CO₂	Redes assíncronas, cabos longos e controle de tensão
Usuário	Statoil, Noruega	Nordic Energy Link AS, Estonia

NA –Não Aplicável.

2.4 Transmissão CA empregando Condicionadores de Potência

A transmissão de energia sob a forma de corrente alternada e empregando condicionadores de potência é o tema principal deste trabalho e consiste da utilização da transmissão convencional em CA com o auxílio de dispositivos FACTS na operação do sistema. No caso específico deste trabalho, os condicionadores do lado da fonte e do lado da carga terão limitações quanto às funções desejadas.

Os equipamentos FACTS podem trazer alguns benefícios, dependendo do tipo de equipamento e tecnologia adotados, conforme exemplos a seguir:

- Controle de fluxo de potência conforme ajuste do valor de referência que atende ao interesse do operador do sistema e aos limites do equipamento;
- Fazer o carregamento da linha mais próximo ao permitido pelos limites térmicos desta;
- Aumentar a segurança do sistema através do aumento do limite de estabilidade transitória;
- Prover conexões seguras de linhas para novas fontes e consumidores;
- Prover flexibilidade na locação de novas fontes de geração;
- Recapacitação de linhas de transmissão;
- Reduzir fluxo de reativos.

Podemos relacionar diversos equipamentos FACTS empregados em conexão em paralelo, em série ou em combinação série e paralelo, primeiro são relacionados os principais equipamentos para conexão em paralelo:

- STATCOM – *Static Synchronous Compensator*;
- SVC – *Static VAR Compensators*;
- TCR – *Thyristor Controlled Reactor*;
- TSC – *Thyristor Switched Capacitor*.

O STATCOM é um tipo de equipamento que está diretamente relacionado com este trabalho, enquanto o SVC, o TCR e o TSC não são aplicados no estudo.

A Figura 4 representa um Compensador Síncrono Estático (STATCOM) que emprega tecnologia fonte de tensão e utiliza IGBTs como dispositivos semicondutores de chaveamento.

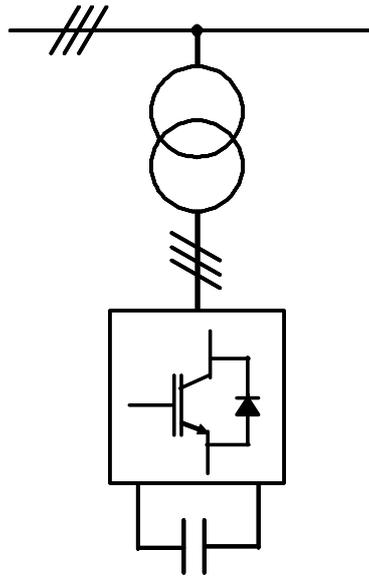


Figura 4 - Esquema unifilar do STATCOM.

Os principais equipamentos para conexão em série são:

- SSSC - *Static Synchronous Series Compensator*;
- TCSC - *Thyristor Controlled Series Capacitor*;
- TSSC - *Thyristor Switched Series Capacitor*;
- TCSR - *Thyristor Controlled Series Reactor*;
- TSSR - *Thyristor Switched Series Reactor*;
- GCSC – *GTO Controlled Series Capacitor*.

Os dispositivos de conexão em série listados aqui têm a característica de inserir em série com o circuito de potência uma tensão controlada como no caso do SSSC ou no caso dos outros dispositivos capacitores ou indutores.

A Figura 5 representa um Compensador Série Síncrono Estático (SSSC) que emprega tecnologia fonte de tensão e utiliza IGBTs como dispositivos semicondutores de chaveamento.

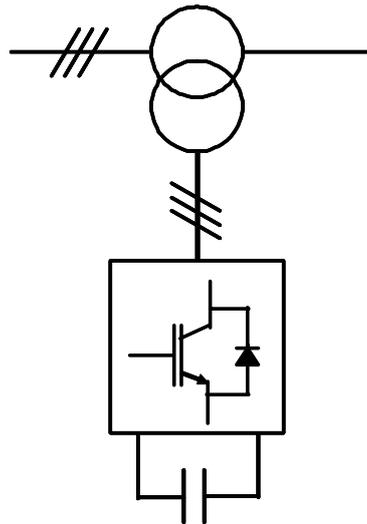


Figura 5 - Esquema unifilar do SSSC.

Equipamentos conectados em série e em paralelo:

- UPFC – *Unified Power Flow Controller*;
- TCPST – *Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer*.

Gyugyi [18] propôs uma configuração denominada de UPFC (*Unified Power Flow Controller*) que consiste de dois conversores de potência, um aplicado em paralelo e outro em série, conectados através de um elo CC comum. A ênfase neste caso é o controle do fluxo de potência no sistema. Em [19] e [20] Gyugyi também aborda a compensação e controle de sistemas de transmissão CA.

Um dispositivo que é conectado simultaneamente em série e paralelo e é empregado para controle de potência ativa e reativa, sendo também um UPFC, porém batizado pelos autores de “*Solid State PWM Phase-Shifter*” foi apresentado em 1993 por Ooi e Galiana [21].

A Figura 6 representa o Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC) que emprega tecnologia fonte de tensão e utiliza IGBTs como dispositivos semicondutores de chaveamento.

No caso do UPFC ocorre a compensação de tensão e de corrente através de dois equipamentos distintos de conexão sendo um deles em série e outro em paralelo. A troca de energia entre eles se dá através do lado CC comum a ambos.

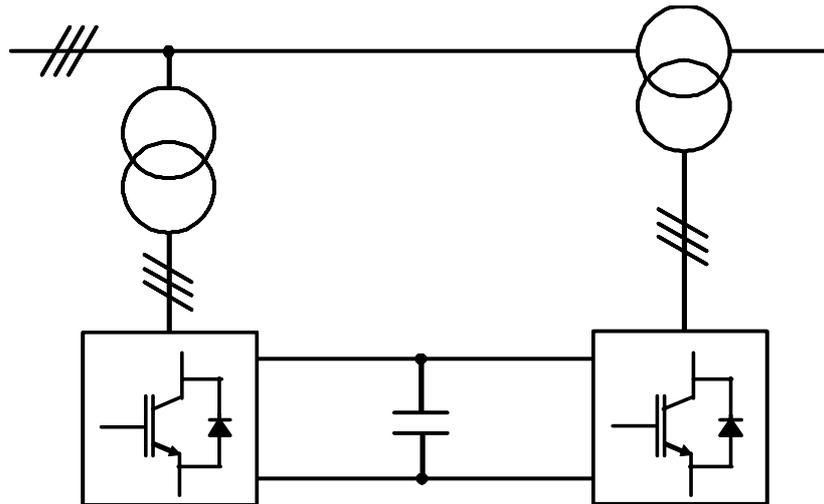


Figura 6 - Esquema unifilar do UPFC.

A Figura 7 apresenta o esquema unifilar de um sistema de conversão de frequência, quando empregada a conexão BtB (*Back to Back*), ou seja, a saída do módulo retificador é conectada diretamente à entrada do módulo inversor. A mesma figura representa o esquema unifilar de transmissão por elo de tensão contínua, neste caso os módulos de retificação e inversão são conectados através de cabos de transmissão, que podem ter até algumas centenas de quilômetros. Na figura está representada a tecnologia fonte de tensão e são mostrados IGBTs como dispositivos semicondutores de chaveamento.

O conceito da Figura 7 é o mesmo que tem sido considerado como opção para a transmissão de energia como fonte de tensão em sistemas de até aproximadamente 300 MW por módulo de retificação e inversão e foi empregado recentemente para alimentar a plataforma Troll A na Noruega. É importante observar que a transmissão HVDC com elo de tensão emprega, além do cabo elétrico isolado, dois conversores que apresentam topologia similar à topologia dos compensadores estáticos de reativos. Ooi, Galiana et al [22] apresentaram em 1991 um sistema experimental de baixa potência e resultados de simulações referentes à viabilidade técnica desse tipo de solução.

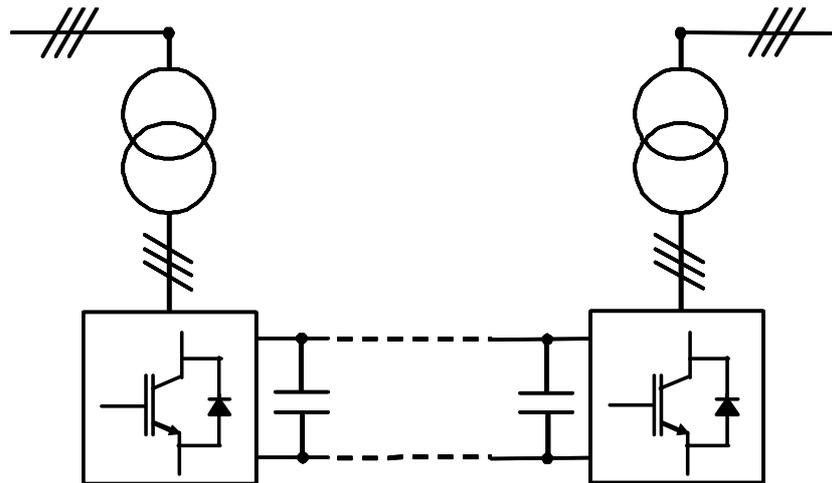


Figura 7 – Representação unifilar de sistema de transmissão por tensão contínua ou conversor em conexão *Back to Back*.

Os equipamentos do tipo STATCOM são utilizados com algumas das seguintes funções básicas: controle de tensão, compensação de reativos, amortecimento de oscilações e estabilização de tensão. Normalmente, são empregados para operação balanceada.

Os condicionadores de potência analisados neste trabalho empregam topologias similares às do STATCOM tipo fonte de tensão.

Além dos condicionadores relacionados, em [23] Aredes apresenta uma série de equipamentos condicionadores ativos de potência de conexão série, paralela ou combinação destes. A combinação série e paralelo é denominada de UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*). O foco é a filtragem do conteúdo harmônico do sistema.

Os sistemas com potencial para aplicação de equipamentos FACTS são aqueles nos quais os custos destes equipamentos FACTS são menores que os da solução com sistemas CC (HVDC) e a capacidade dos sistemas FACTS são inferiores a 100% da capacidade nominal de transmissão.

A lista de referências [17] citada no item referente à transmissão com elo de tensão contínua apresenta referências de aplicações de condicionadores com tecnologia fonte de tensão empregados com funções associadas a controle de tensão, reativos e *flicker*. A aplicação é neste caso do tipo STATCOM e chaveamento PWM.

A Tabela 9, no Apêndice 1, apresenta aplicações recentes de controle de reativos e tensão utilizando a tecnologia fonte de tensão com chaveamento tipo PWM utilizando IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

2.5 Abertura Monopolar de Circuito Trifásico

A maior parte dos defeitos em sistemas de transmissão é do tipo fase terra e muitas vezes, no caso de transmissão por linha aérea, são temporárias, com o isolamento se restabelecendo pouco tempo após a eliminação da falta.

A abertura monopolar é uma rotina na qual são realizadas as aberturas dos disjuntores nos dois lados da linha de transmissão, entrada e saída. Normalmente, os desligamentos são momentâneos e, após um tempo especificado, ambos os disjuntores são religados, caso o isolamento tenha se restabelecido e o sistema continua operando normalmente com as três fases. Caso o defeito persista após o religamento dos disjuntores, então é realizado um desligamento tripolar e a manutenção da linha deve ser realizada, de forma a eliminar a falha associada à fase com defeito. Em sistemas com transmissão de energia por cabo isolado, uma vez que estes possuem isolamento sólido extrudado ou com papel impregnado por óleo, o normal é que o isolamento elétrico não se restabeleça sem reparo, a não ser que o defeito seja em outra parte que não o cabo.

O procedimento atual em linhas aéreas de extra alta tensão é realizar o desligamento monopolar durante um intervalo de tempo denominado de “tempo morto”, fazer o religamento monopolar e, em caso de restabelecimento, continuar a operação normal do sistema. Para que esta operação seja bem sucedida, é necessário que a corrente de arco secundário seja eliminada antes do religamento da linha. A corrente de arco secundário é a corrente que circula na fase com defeito após a abertura dos disjuntores desta fase e é alimentada através do acoplamento capacitivo e indutivo da fase sob falta com as demais fases.

O desligamento monopolar tem a vantagem de manter partes distintas do sistema conectado e aumentar a estabilidade quando se compara com a situação onde se daria o desligamento tripolar.

Uma linha de ação na área de desligamento/religamento monopolar é atuar na eliminação da corrente secundária através de reatores de neutro e chaves de aterramento entre outras alternativas, de forma que o religamento seja bem sucedido.

Uma outra linha de trabalho, sugerida por Ciniglio [24] e por Ciniglio e Carrol [25], é compensar os desequilíbrios em ambos os lados da linha de transmissão usando

dispositivos que empregam a eletrônica de potência. O objetivo, neste caso, é promover o desligamento monopolar permanente.

Os conceitos descritos neste item são apresentados com detalhes por Toledo Silva [26], onde é proposta a compensação da corrente de arco e também do desequilíbrio de corrente na operação do circuito através de inversor de frequência e controle PWM.

Toledo Silva [26] conclui que, através de conversores CC-CA, é possível atuar na compensação da corrente de arco secundária, de forma a eliminar ou minimizá-la. E ainda que, também com o emprego de um inversor, é viável realizar a compensação dos desequilíbrios de corrente do sistema quando operando com um desligamento monopolar permanente.

2.6 Comparação entre as alternativas de alimentação

O problema, descrito anteriormente neste trabalho, pode ser resumido da seguinte forma: “Transmitir energia elétrica entre dois pontos, de geração e consumo ou distribuição, mesmo com a perda de qualquer uma das fases ou de um dos pólos do circuito de transmissão e ainda manter a tensão dentro de parâmetros de qualidade no que diz respeito à amplitude da tensão e desequilíbrio das tensões na carga.”

Para realizar a transmissão de energia, conforme descrito no parágrafo anterior, existem diversas alternativas que podem ser utilizadas, dentre elas podemos relacionar: a transmissão em CA convencional, a transmissão em CA com conversor *Back-To-Back* e a transmissão em CC.

Transmissão em CA convencional

A utilização da transmissão CA convencional requer a existência de um cabo reserva que seja lançado e disponibilizado para a operação simultaneamente com os três cabos de transmissão do circuito trifásico. Além disso, irá requerer um esquema de disjuntores monopolares apropriado para viabilizar a utilização deste cabo reserva no caso de perda de qualquer um dos cabos de transmissão, ou seja, permitir a combinação

de aplicar qualquer das fases da fonte ao cabo reserva. Outra opção seria abrir mão da continuidade operacional durante os momentos imediatamente posteriores à falta em um dos cabos de transmissão e aguardar que uma equipe de manutenção faça a conexão do cabo reserva. Isto deve ocorrer tanto no lado da fonte quanto no lado da carga. Adicionalmente, para manter a compensação de reativos o sistema irá requerer a utilização de um condicionador de tensão no lado da carga, ou abrir mão do desempenho proporcionado pelo compensador estático e utilizar a compensação com bancos de capacitores e de reatores chaveados através de disjuntores adicionais, tantos quantos forem os degraus de reativos desejados.

No caso da transmissão em CA da forma convencional e preservando o objetivo de permitir a perda de um dos cabos de transmissão, é necessária a existência de um quarto condutor, o cabo reserva. Isto implica em custo extra de 33,33% associado somente a condutores da parte de transmissão.

Transmissão em CA e conversor *Back-to-Back*

Uma segunda alternativa é a transmissão em CA com utilização de um conjunto retificador e inversor localizado no lado da carga. Com esta configuração é possível regular a tensão na carga e também é possível a operação durante o desligamento monopolar de uma das fases de transmissão. Neste caso, a transmissão será feita por dois condutores e a retificação feita sobre a tensão transmitida por estes dois condutores. Nesta forma de operação, com perda de uma fase, a carga vista pela fonte é uma carga desequilibrada. Para que a carga seja vista como trifásica e equilibrada pela fonte é necessário que seja instalado um condicionador de corrente do lado da carga. Nesta concepção, a filosofia de proteção deve ser revista e considerar que a corrente de curto-circuito será mais baixa e interrompida mais rapidamente pelos dispositivos semicondutores de chaveamento. O impacto na seletividade da proteção pode ser muito grande.

Transmissão em CC

A terceira alternativa citada é a transmissão em CC, neste caso, é necessário um conversor de potência do lado da fonte, o retificador, e outro do lado da carga, o

inversor. A transmissão é feita através de dois condutores e a perda de um deles acarreta a operação limitada em meia carga com retorno pela terra ou a utilização de um cabo reserva e chaves para a manobra de substituição do cabo eventualmente danificado ou o sobredimensionamento dos condutores para operação contínua com retorno pela terra. Outra hipótese é a utilização de equipes de manutenção com a incumbência de realizar a conexão do reserva na posição do cabo danificado, neste caso, seria aceita a interrupção associada aos serviços de reparo. O retorno pela terra é uma condição operacional de emergência, tal opção tem impacto na segurança das instalações, na corrosão de equipamentos e estruturas e, até mesmo, no meio ambiente. Como no caso anterior, *Back-to-Back*, a filosofia de proteção deve ser revista para a condição específica de menores valores de correntes de curto-circuito e tempos mais curtos de eliminação do defeito.

Alternativa Proposta

A alternativa proposta, neste trabalho, é a transmissão em CA com a utilização de dois condicionadores de potência, um condicionador de corrente do lado da fonte e um condicionador de tensão do lado da carga. Esta opção permite a operação do sistema sem interrupção, sequer momentânea, quando da perda de qualquer de uma das três fases do sistema de transmissão de energia e permite ainda o controle da tensão na barra de carga e do fator de potência visto pela fonte.

A Tabela 3 apresenta um resumo da comparação entre as alternativas de transmissão citadas neste item. Para o dimensionamento dos condutores na tabela foi considerado o sistema com carga resistiva, linha de comprimento curto e tensões CC e CA de fase de mesma amplitude, conforme equações (2- 1) a (2- 5), a seguir:

$$P_{CA} = 3V_f I_{CA} \cos\varphi, \quad (2- 1)$$

$$P_{CC} = 2V_{CC} I_{CC}, \quad (2- 2)$$

$$\cos\varphi = 1, \quad (2- 3)$$

$$P_{CA} = P_{CC} \text{ e} \quad (2- 4)$$

$$V_{CC} = \sqrt{2}V_f \quad (2- 5)$$

V_f – Tensão de fase, valor eficaz;

V_{CC} – Tensão CC entre cada pólo e a terra;

I_{CA} – Corrente no sistema CA;

I_{CC} – Corrente no sistema CC.

Geração local de energia elétrica

Uma alternativa de alimentação elétrica que não considera a transmissão de energia a partir de unidades terrestres é a geração local de energia. Na maior parte das unidades marítimas de produção, a energia elétrica é obtida a partir da geração local através de turbinas a gás de pequeno e médio porte, podemos citar, como faixa típica, potências de 3 a 30 MW, por turbina. O foco para comparação com a transmissão de energia é um pouco diferente, no caso da geração com turbinas a gás, a redundância do suprimento de energia deve contemplar a possibilidade de perda de pelo menos uma turbina de geração. Assim, é típico projetar e construir um sistema com “n+1” grupos turbogeradores. Ou seja, a instalação é projetada de forma que o sistema possa operar mesmo com um turbogerador fora de operação para manutenção ou como reserva disponível.

A concepção que emprega geração com turbinas a gás em ciclo simples tem como fator negativo o baixo rendimento desta alternativa, tipicamente da ordem de 30%. Este baixo rendimento está diretamente associado ao elevado consumo de gás e à elevada taxa de emissão de poluentes na atmosfera. Além disso, os elevados recursos de apoio logístico para a operação e manutenção de turbinas a gás em instalações marítimas também são fatores negativos associados à opção por geração local. O principal fator motivador da utilização de turbinas a gás em unidades de produção de petróleo é a disponibilidade do combustível no local, o gás natural associado à produção do petróleo.

Mesmo em unidades com geração local, a existência de conversores eletrônicos de potência pode ocorrer, como por exemplo em dispositivos para o controle da rotação

de grandes compressores acionados eletricamente ou na redução da queda de tensão durante a partida de grandes motores elétricos. Assim, a utilização de geração local não é necessariamente independente da aplicação de grandes conversores eletrônicos de potência.

Sob o ponto de vista econômico, um fator de inibição à geração local de baixo rendimento, em ciclo simples, tem sido a criação de impostos associados à emissão de CO₂ na atmosfera. Como resposta a essas taxas surgiram soluções de suprimento de energia associadas à transmissão submarina de energia e propostas de compactação de usinas termelétricas de ciclo combinado para locação em unidades marítimas. A possibilidade de utilização de geração em unidade marítima em ciclo combinado propicia uma alternativa que é uma solução mista: a geração em uma unidade e a distribuição dessa unidade para outras unidades próximas, 20 a 30 km de distância, neste caso, a tendência é optar pela transmissão e distribuição em CA convencional.

Tabela 3 - Comparação de alternativas de transmissão de energia elétrica.

	CA Convencional	CA com BtB	Transmissão em CC	Transmissão CA Proposta
Operação com Perda de uma fase ou pólo	Requer a existência de cabo reserva (4º condutor) – e disjuntores ou manutenção.	Possível, com o correto dimensionamento dos equipamentos.	Requer a utilização de retorno de corrente pela terra e/ou cabo reserva.	Possível, com o correto dimensionamento dos equipamentos.
Condiciona- mento de tensão na carga	Requer a utilização de um condicionador de potência	Ocorre naturalmente, considerando que há um conversor do lado da carga.	Ocorre naturalmente, considerando que há um conversor do lado da carga.	Há um conversor dedicado no lado da carga.
Condiciona- mento de corrente no lado da fonte	Requer um condicionador de corrente	Requer um condicionador de corrente	Já possui um conversor no lado da fonte.	Requer um condicionador de corrente
Condutores na transmissão	3 em operação e um reserva	3 em operação.	2 em operação e um reserva.	3 em operação.
Número de conversores	Dois, um em cada extremidade da transmissão.	Um, conversor com retificador e inversor juntos.	Dois, um retificador e um inversor.	Dois, um em cada extremidade da transmissão.
Seção dos condutores - condição normal	1,0 pu	1,0 pu	$3 \frac{\sqrt{2}}{4} \cong 1,06$ pu	1,0 pu
Seção dos condutores - perda de fase	1,0 pu	$\sqrt{3}$ pu	$3 \frac{\sqrt{2}}{2} \cong 2,12$ pu	$\sqrt{3}$ pu

2.7 Resumo e Conclusão

Neste capítulo, foi visto que existem diversas alternativas para a transmissão de energia elétrica entre dois pontos de um sistema elétrico, normalmente, os pontos de geração e de distribuição ou consumo. As alternativas apresentadas foram:

- transmissão CA convencional;
- transmissão CC com elo de corrente;
- transmissão CC com elo de tensão;
- transmissão CA com emprego de condicionadores de potência.

Foram apresentadas diversas referências de aplicação de sistemas de eletrônica de potência associadas à transmissão de energia elétrica. Foi visto, ainda, que o desenvolvimento tecnológico na área de transmissão de energia na última década pode ser facilmente percebido através da crescente aplicação de equipamentos com tecnologia fonte de tensão. Estes equipamentos podem ser empregados na transmissão CC com elo de tensão ou no desenvolvimento de condicionadores de potência para compensação de reativos e condicionamento de tensão e corrente em sistemas CA.

Os sistemas de transmissão CC têm a característica de empregarem dois condutores para a transmissão e em alguns casos o sistema pode ser dimensionado para operar com a perda de um dos condutores e com retorno da corrente pelo solo, neste caso a capacidade de transmissão de potência é reduzida à metade. Sob o ponto de vista de confiabilidade e de disponibilidade este sistema de transmissão leva vantagem em relação ao sistema convencional em corrente alternada sem operação monopolar.

Nos sistemas CA através dos condicionadores é possível controlar a qualidade da tensão, corrente e a potência transmitida. Os condicionadores de potência podem ser do tipo conexão em paralelo, em conexão série ou um misto de ambos. Neste trabalho, os condicionadores considerados, para o condicionamento de corrente do lado da fonte e de tensão do lado da carga, são do tipo conexão em paralelo.

Além disso, um sistema pode ser operado de forma mais estável e com maior disponibilidade a partir da utilização do desligamento monopolar em lugar do desligamento tripolar ou completo. A operação do sistema sob desligamento monopolar

contínuo pode reduzir os custos associados à implementação de redundância no sistema de transmissão de energia elétrica.

No que diz respeito à operação durante a perda de um dos condutores da transmissão, os condicionadores podem tornar viável a operação através da troca de potência, na barra de carga, entre as fases sãs e a fase perdida. Neste tipo de operação, a transmissão CA com auxílio de condicionadores também permite que parte da transmissão seja mantida, da mesma forma que no sistema CC.

3. O Sistema Elétrico em Estudo

Este capítulo apresenta o sistema elétrico sob análise e a modelagem matemática associada a cada componente presente no circuito. São descritos: a fonte de alimentação, a forma de transmissão de energia, a carga elétrica e os condicionadores de potência adotados dos lados da fonte e da carga.

Na Figura 8, está representado o esquema unifilar de um sistema trifásico convencional de transmissão em alta tensão em corrente alternada (HVAC) para, por exemplo, uma plataforma marítima de produção. Os indutores na entrada e na saída da transmissão têm como finalidade compensar os reativos capacitivos associados à capacitância do cabo elétrico. A energia elétrica chega em alta tensão à unidade *offshore* e é conectada a um transformador abaixador. A saída deste transformador abaixador, em configurações típicas, alimenta um painel de média tensão e, a partir de saídas com disjuntores dedicados, é feita a alimentação de motores elétricos de média tensão, de outros transformadores abaixadores para a criação de níveis de média tensão ou de baixa tensão para cargas de menor porte. Além disso, é possível que a energia seja enviada a cargas ou unidades de produção satélites através de cabos elétricos submarinos.

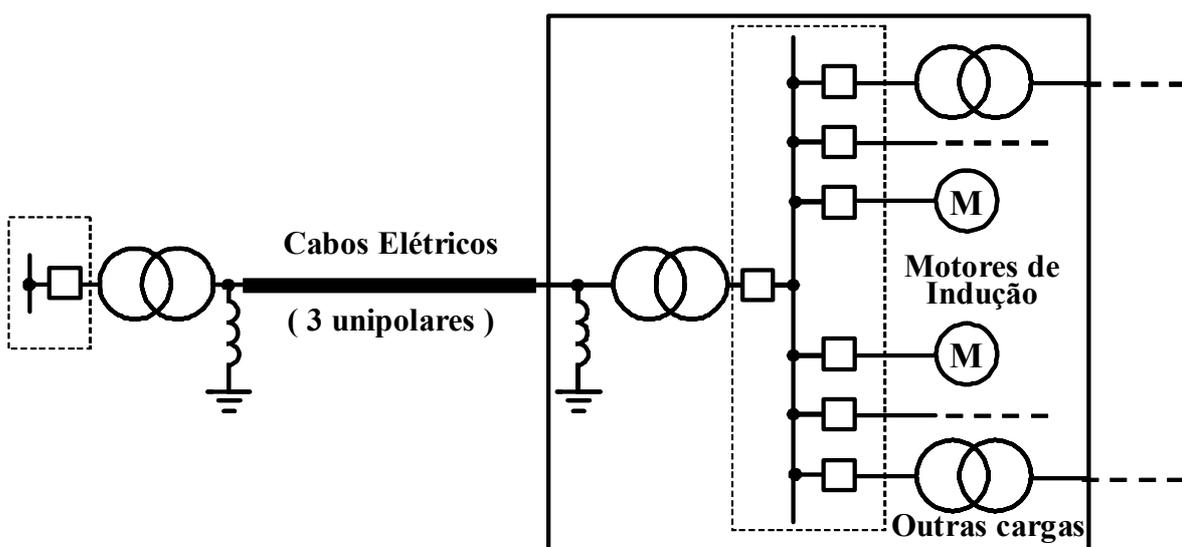


Figura 8 – Sistema de alimentação típica HVAC para unidade *offshore*, com cargas também típicas.

3.1 Descrição do Sistema Elétrico

O sistema elétrico descrito neste trabalho possui os componentes convencionais para a alimentação de uma unidade *offshore* ou um consumidor industrial de energia elétrica. São apresentados os diversos componentes desde a fonte de alimentação até as cargas industriais típicas, passando pela transmissão de energia.

O sistema elétrico em estudo apresenta a seguinte composição:

- a fonte de alimentação;
- o sistema de transmissão de energia (transformadores e cabo de potência);
- as cargas elétricas, conectadas na barra de distribuição;
- condicionador de corrente do lado da fonte;
- condicionador de tensão do lado da carga.

O sistema elétrico em estudo, com a transmissão de energia através de 3 cabos unipolares, as cargas e os condicionadores de corrente (lado da fonte) e de tensão (lado da carga) está representado através de diagrama unifilar simplificado na Figura 9.

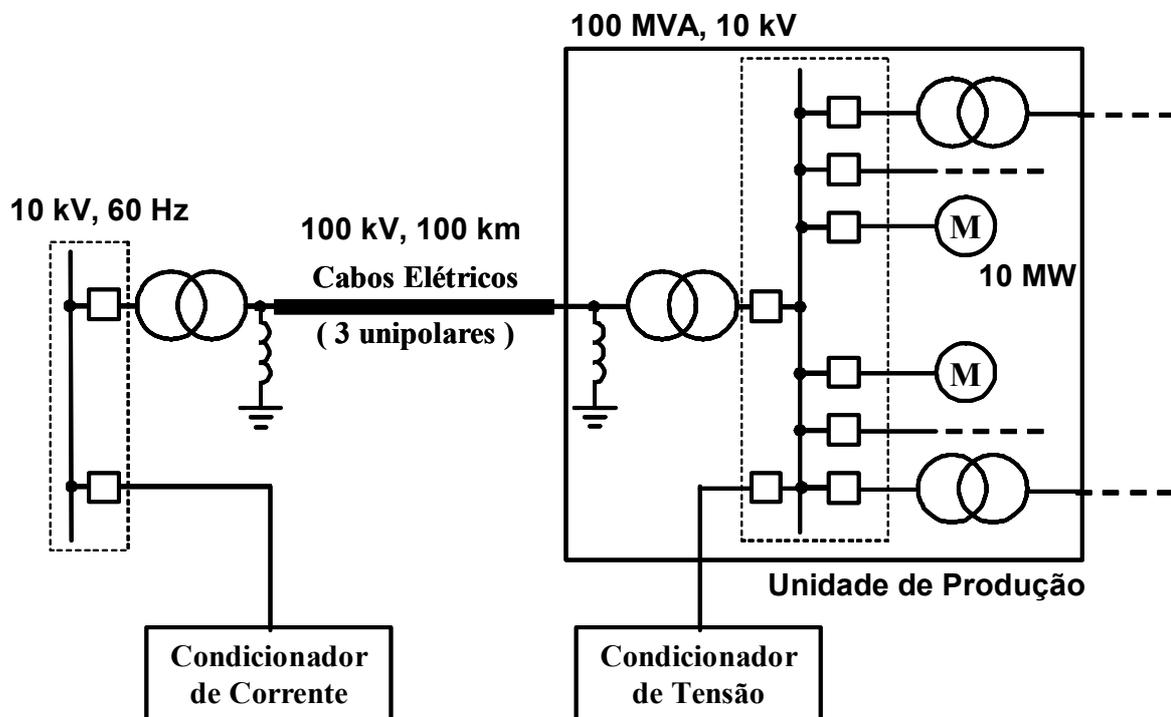


Figura 9 - Sistema elétrico em estudo, incluindo os condicionadores de potência.

A fonte de alimentação considerada neste trabalho é associada à energia elétrica adquirida de um sistema elétrico forte e com um nível de curto-circuito definido próximo a valores característicos fornecidos por concessionárias de energia elétrica. Temos então a representação de fonte ideal atrás de uma impedância, esta impedância sendo definida pelo nível de curto-circuito da barra de alimentação.

As formas de transmissão de energia consideradas estão associadas a duas possibilidades: a utilização de linhas de transmissão ou de cabos elétricos de potência.

O consumidor de energia elétrica, aqui considerado, é um consumidor de energia industrial, com presença de carga motórica de grande porte alimentada diretamente da rede.

O condicionador de corrente do lado da fonte tem a função de compensar a carga demandada da fonte de alimentação de forma que esta enxergue uma carga equilibrada e com fator de potência dentro de uma faixa especificada. A proposta é compensar as componentes de corrente de seqüência negativa [27] e carga reativa associada à freqüência fundamental.

O condicionador de tensão do lado da carga tem a função de manter a amplitude de tensão dentro de limites especificados e compor a tensão de seqüência positiva nos terminais da carga a partir da energia entregue pelo sistema de transmissão, mesmo quando da perda de uma fase.

3.2 Fonte de Alimentação

As fontes de alimentação podem ser consideradas como “próximas” ou “distantes” da carga. No caso de fonte próxima da carga, é importante modelar o comportamento da geração quanto ao controle da freqüência e da tensão através da modelagem dos reguladores automáticos de tensão e de velocidade. No caso distante da carga, uma modelagem mais simplificada é satisfatória.

Os condicionadores de potência, lado da fonte e da carga, possuem PLLs em seus algoritmos de controle e são capazes de identificar a freqüência da rede e os ângulos de fase da componente de seqüência positiva. Desta forma, os condicionadores são capazes de atuar em sistemas onde a freqüência da rede varia em função da ocorrência de eventos no sistema de geração, tais como, a entrada ou saída de um bloco

de cargas ou desconexão de sistemas de grande porte. Uma vez que o foco deste trabalho não é modelar matematicamente o sistema de geração de concessionárias de energia elétrica, apenas foi verificado o funcionamento do algoritmo de controle sob variação de frequência, mas a simulação dos casos analisados se deu em 60 Hz.

A fonte de alimentação considerada é modelada por uma fonte de tensão atrás de uma impedância. A impedância é definida pela potência de curto-circuito da barra de alimentação. O circuito elétrico que representa a fonte de alimentação é apresentada na Figura 10.

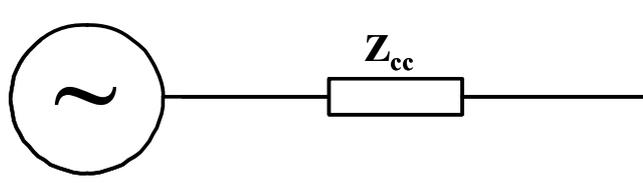


Figura 10 - Fonte de Alimentação.

$$Z_{cc} = R + jX_L, \quad (3-1)$$

$$Z_{cc} = \frac{V_F^2}{S_{cc}}. \quad (3-2)$$

onde:

Z_{cc} – é a impedância de curto-circuito na barra da fonte de alimentação, em Ω ;

R – componente resistiva da impedância de curto-circuito, em Ω ;

X_L – componente indutiva da impedância de curto-circuito, em Ω ;

S_{cc} – Potência de curto-circuito, em MVA;

V_F – Tensão nominal da barra da fonte de alimentação, em kV.

Conhecido o valor da relação X/R na barra da fonte é possível obter o valor de R. Para valores elevados da relação X/R, o valor de X_L é aproximadamente igual ao valor de Z_{cc}

3.3 Sistema de Transmissão de Energia

A transmissão da energia elétrica das unidades de geração até os consumidores é feita através de linhas de transmissão ou cabos elétricos de potência. Os cabos elétricos podem ser aplicados em instalações subterrâneas ou submarinas.

As linhas de transmissão são empregadas para longas distâncias, da ordem de centenas de quilômetros, e em campo aberto ou área rural. As instalações de cabos subterrâneos são mais comuns em áreas urbanas de alta densidade populacional e alto custo da área de passagem. Neste caso, a utilização de cabos subterrâneos reduz a área de passagem e o impacto social, podendo reduzir o custo global associado à instalação, apesar dos custos diretamente associados aos cabos isolados serem muito superiores aos custos dos cabos utilizados em linhas aéreas. Na prática, a instalação de cabos isolados ocorre quando há justificativa econômica em relação à alternativa com linhas aéreas. As instalações de cabos submarinos estão naturalmente associadas à alimentação de cargas separadas da fonte por uma grande massa de água, tais como rios, lagos e em mar aberto para a alimentação de ilhas ou plataformas de produção de petróleo, por exemplo. Para uma mesma capacidade, o custo de transmissão por cabos elétricos é significativamente superior. Esta relação pode ser da ordem de 10 a 15 vezes [28]. Tipicamente, a aplicação de cabos elétricos está associada a distâncias curtas, especialmente devido a questões de custo. No entanto, diversas aplicações de alimentação de cargas como ilhas e plataformas são encontradas no mundo, seja em sistemas de transmissão em corrente contínua ou em corrente alternada.

3.3.1 Linhas de Transmissão em CA

As linhas de transmissão em corrente alternada podem ser caracterizadas por quatro parâmetros básicos: a resistência série, a condutância em derivação, a indutância série e a capacitância em derivação.

A resistência série está associada à perda ôhmica nos condutores. Em modelos mais completos ela está relacionada também à influência do efeito pelicular.

A condutância em derivação está associada à corrente de fuga pela isolamento e ao efeito corona.

A indutância série está associada aos enlaces parciais de fluxo magnético interno e externo ao condutor da linha. Em linhas de transmissão, as indutâncias das fases são diferentes entre si a menos que seja adotado espaçamento equilateral. As indutâncias das três fases de uma linha com espaçamento não equilateral podem ser equilibradas através da transposição das fases. A transposição de fases é feita de forma que sucessivamente cada fase ocupe as três posições possíveis na linha de transmissão.

A capacitância em derivação está associada às cargas elétricas entre condutores e para a terra de uma linha de transmissão. No caso da linha de transmissão aérea, o meio dielétrico é o ar e sua permissividade deve ser considerada.

Os conceitos básicos associados às linhas de transmissão aéreas em corrente alternada, o cálculo de impedâncias série e capacitâncias de linhas de transmissão, os estudos com utilização de componentes simétricos, diagramas de seqüência para diversas conexões de transformadores e dados de linhas empregadas em casos práticos estão disponíveis na literatura tradicional [11], [29] [30] [31] [32] e [33].

3.3.2 Cabos Elétricos Isolados de Potência

Cabos elétricos submarinos de potência podem ser: *self-contained oil-filled type*, *pipe type*, papel impregnado com óleo de alta viscosidade ou ter isolamento sólido extrudado. Em distâncias curtas e potências elevadas, o primeiro tipo é o preferido, pois permite menores diâmetros de condutores e previne o ingresso de água. Para distâncias maiores, várias são as opções empregadas. Um importante exemplo, um dos mais longos cabos submarinos CA, foi instalado em 1956 em um sistema com três cabos singelos do tipo papel pré-impregnado com gás pressurizado e um comprimento de 128 km através do estreito da Geórgia entre a Ilha de Vancouver e a costa da Columbia Britânica. Embora a maioria dos cabos submarinos instalados sejam *oil-filled type* ou do tipo papel impregnado com óleo de alta viscosidade, o uso de cabos extrudados com isolamento em XLPE (*cross-linked polyethylene*) tem crescido de maneira significativa desde 1971. No Brasil, a predominância nas aplicações submarinas na indústria do petróleo é de cabos com isolamento em EPR (*ethylene-propylene-rubber*), porém este material isolante tem aplicação limitada a tensões de até 69 kV. Para minimizar os problemas associados a “*water tree growth*”, foi desenvolvido o TRXLPE (*tree-retardant XLPE*).

A utilização de cabos elétricos isolados para transmissão de energia elétrica sob a forma de corrente alternada é normalmente associada a comprimentos inferiores a 50 km, sendo considerados valores pouco maiores em situações específicas. Da mesma forma, a transmissão sob a forma de tensão contínua utilizando conversores fonte de tensão é também associada a distâncias maiores que 100 km. A discussão referente à essa faixa de 50 a 100 km tem evoluído e apresentado algumas referências, por exemplo, o limite para cabos de 500 kV é 50 km, enquanto para 275 kV é de 175 km [36], tendo como base as perdas adicionais no cabo devido à corrente capacitiva característica do cabo em análise. Segundo Ackermann [37], a transmissão CA em longas distâncias, além de requerer compensação de reativos nos dois extremos da transmissão, está limitada a 200 MW e 150 kV para cabos XLPE. Segundo Kirby et al. [38], entre os extremos de transmissão *offshore* a curta e a longa distância não há regra simples para definir o tipo de transmissão, CA ou CC, porém em casos nos quais a distância supere 100 km e a potência supere 350 MW e haja restrição de números de cabos, a transmissão em CC é a solução ótima.

As perdas por condução no cabo elétrico são tipicamente menores quando se utiliza a transmissão sob a forma CC, porém as perdas nos conversores retificadores e inversores podem ficar na faixa de 4% a 6%. Além das perdas, os equipamentos de eletrônica de potência apresentam custos mais elevados que equipamentos convencionais como reatores e bancos de capacitores de mesma potência aparente. Assim, para distâncias entre 50 e 100 km, é possível que a solução da transmissão por corrente alternada seja economicamente mais atraente que a solução por tensão contínua.

Os cabos elétricos isolados de potência também podem ser caracterizados por quatro parâmetros básicos: a resistência série, a condutância em derivação, a indutância série e a capacitância em derivação.

Os valores dos parâmetros de cabos diferem significativamente dos encontrados em linhas de transmissão devido aos motivos relacionados a seguir:

- a existência de um meio isolante com maior capacidade de isolação é possível aproximar os condutores entre si e ocupar uma menor seção transversal;
- os cabos elétricos isolados normalmente possuem envoltórias metálicas em torno da isolação e do grupo de condutores;

- a isolação dos cabos emprega materiais dedicados a essa finalidade como PVC (*polyvinyl chloride*), XLPE, EPR, papel impregnado, óleo isolante e eventualmente gás inerte. No caso das linhas de transmissão, o meio isolante é o ar, cuja permissividade relativa é 1,000536.

Em termos de características físicas dos materiais utilizados em cabos elétricos cabe destacar: a resistividade do cobre a 20 °C é de $1,7241 \times 10^{-8} \Omega.m$ e a do alumínio, também a 20 °C é $2,8264 \times 10^{-8} \Omega.m$. A permissividade relativa do XLPE está numa faixa de 2,5 a 3,0 e a permissividade relativa do isolante de cabos *oil-filled* entre 3,5 e 3,6.

A descrição detalhada dos tipos de cabos elétricos, seus componentes, detalhes construtivos, requisitos de projeto e operação são encontrados em [34]. Informações sobre cabos de energia em forma mais sucinta podem ser obtidas em [35]. De Lima [39] e [40] apresenta a modelagem de cabos elétricos de comprimento longo, para utilização em aplicações em que estes são alimentados por conversores de frequência, contemplando a variação de parâmetros do cabo com a frequência.

A Tabela 4 mostra a disponibilidade de cabos elétricos isolados em termos de profundidade, conforme o material isolante empregado. As informações foram fornecidas por fabricantes internacionais de cabos elétricos isolados para aplicação submarina.

Tabela 4 – Disponibilidade no mercado em termos de lâmina d’água de operação de cabos elétricos isolados.

MATERIAL	kV	Seção (mm²)	LDA (m)
XLPE	170	3 x 800	500
EPR	36	3 x 400	500
LPOF(<i>oil filled</i>)	525	1 x 3000	1000
HVDC <i>mass impregnated</i>	500	2500	1000

Modelos de Cabos Empregados

Foram empregados dois modelos básicos de cabos nesta simulação, Múltiplos π e modelo com parâmetros dependentes da frequência – *Phase Model*.

Na maior parte dos casos simulados foram empregados módulos π com parâmetros fixos sem representação de variação de parâmetros com a frequência. Este modelo tem aplicação válida, uma vez que a premissa do estudo é utilizar a filtragem passiva necessária para limitar o conteúdo harmônico da tensão. Assim, os parâmetros do cabo são apresentados na frequência de 60 Hz. Na simulação computacional, foram empregados 10 módulos π , ou seja, cada módulo representando um trecho de cabo de 10 km. Com os módulos empregados, foi possível verificar o perfil de tensões e correntes em diversos pontos ao longo dos condutores de transmissão.

Em um número limitado de casos, foi empregado o modelo com parâmetros dependentes da frequência (*Phase Model*). Este é um modelo de propagação de onda com parâmetros RLC, dependentes da frequência, distribuídos. Neste modelo, a montagem da matriz de propagação, e da admitância característica, é feita diretamente no domínio de fase. A teoria e implementação deste modelo é apresentada por Morched, Gustavsen e Tartibi [41], Gustavsen e Semlyen [42], Gustavsen et al [43] e [47].

Os resultados encontrados, devido às baixas frequências envolvidas, foram similares para ambos os modelos.

3.3.3 Transformadores de Potência

Transformadores facilitam a utilização de diferentes tensões no sistema elétrico. Assim é possível gerar em uma tensão, transmitir a energia elétrica em outra e consumir em diversas outras tensões.

De forma a aumentar o rendimento da transmissão, a tensão de transmissão normalmente é feita em valores mais elevados. No entanto, nem sempre a geração e o consumo são viáveis nestes valores mais elevados. Normalmente, a capacidade de potência de transformadores num sistema de geração e transmissão é muito maior que a potência gerada. Quando comparamos com a potência aparente nominal instalada, essa relação pode chegar a quatro ou cinco.

Os transformadores são também empregados para controle de tensão e conseqüentemente de reativos, para isto, os transformadores utilizados em transmissão e distribuição possuem “*taps*” (derivações) para alteração da relação de transformação. A variação de tensão obtida com “*taps*” é normalmente na faixa de $\pm 10\%$ a $\pm 15\%$. A mudança de “*taps*” pode ser feita sob carga ou com o transformador desenergizado, no caso da comutação sob carga é utilizado um dispositivo chamado de OLTC (*On-Load Tap Changer*).

Os transformadores de potência podem ser montados em unidades trifásicas ou em grupos de três unidades monofásicas. Para sistemas de transmissão em EAT (Extra Alta Tensão) os sistemas com grupos de transformadores monofásicos são preferidos devido aos custos de sobressalentes, requisitos de isolamento e facilidades de transporte.

Para relações de transformação pequenas ou próximas de um, a escolha recai sobre os autotransformadores. Nos autotransformadores, os enrolamentos primário e secundário são conectados e conseqüentemente não existe isolação entre os dois enrolamentos. Apenas uma pequena parte da potência é transformada através do acoplamento e a maior parte é conduzida diretamente através da conexão dos enrolamentos.

As vantagens do autotransformador quando comparado a um transformador de potência similar convencional são maior rendimento, menor custo e melhor regulação de tensão.

Existem ainda os transformadores e autotransformadores defasadores, que são dispositivos utilizados para forçar a transferência de potência entre sistemas específicos. Em alguns casos, é necessária a utilização de transformadores defasadores com capacidade de comutação sob carga.

Os transformadores defasadores tem aplicação específica em eletrônica de potência na montagem de conversores com maior número de pulsos, tais como dispositivos de 12, 24 ou 48 pulsos, entre outros.

Os modelos de transformadores empregados não contemplam saturação e histerese. Foram utilizados transformadores trifásicos, com exceção, daqueles dedicados ao condicionador de tensão do lado da carga.

3.4 Carga Elétrica

As cargas típicas de um sistema industrial estão fortemente relacionadas às cargas motóricas, sejam esses motores de indução ou síncrono. O predomínio é para motores do primeiro tipo. Mais recentemente, principalmente na última década, o número de acionamentos através de conversores de frequência tem crescido de forma significativa. Este crescimento tem se dado de forma mais visível nos acionamentos de baixa tensão e potência, no entanto, também em acionamentos na faixa de 1 a 15 MW a presença de conversores de frequência tem crescido de forma sensível.

Os consumidores industriais possuem cargas de diversos tipos como sistemas de iluminação, sistemas de aquecimento elétrico, fornos, refrigeradores, compressores, retificadores, sistemas de computação e assim por diante.

A carga de um sistema varia em função de vários fatores como, por exemplo, fatores horosazonais, condições climáticas, demanda de operação industrial, comercial e serviços.

As aplicações de grande porte mais comum em instalações marítimas de produção são em bombas de injeção de água em reservatórios e bombas de exportação de óleo e em compressores de gás natural, tais cargas em muitos casos demandam potência elétrica da ordem de 5 a 15 MW. Em alguns casos, esses motores são acionados diretamente a partir da rede elétrica e em outros casos através de conversores de frequência dedicados ao controle de vazão, pressão ou nível de óleo de separadores de gás e óleo.

Nas unidades marítimas podemos destacar além dos compressores e das bombas de grande porte, as bombas centrífugas submersas que são usadas para elevação do petróleo em alguns campos de produção onde os reservatórios possuem limitada quantidade de gás associado. Apesar dessas bombas submersas, em suas aplicações mais comuns em instalações terrestres ou de completação seca, serem alimentadas diretamente a partir de transformador elevador conectado à rede, em instalações submarinas, são normalmente associadas a conversores de frequência, que atuam no controle de vazão de óleo produzido e, adicionalmente, na partida suave do conjunto motor e bomba. Atualmente, é possível encontrar bombas submersas de 1200 a 1500 hp e existem projetos que contemplam de 10 a 20 unidades em uma mesma instalação *offshore*.

Mesmo quando a carga e sua operação são conhecidas em seus detalhes, não é prático representar todos os componentes. A modelagem da carga deve ser feita de forma a preservar os aspectos mais relevantes associados ao estudo em questão.

3.4.1 Modelagem Estática da Carga

Na modelagem estática, a carga elétrica é representada como sendo função da tensão e da frequência.

A modelagem estática da carga é indicada para condições de regime permanente e pode ser aplicada para pequenas variações da amplitude da tensão e da frequência. Não sendo, no entanto, apropriada para a modelagem de cargas predominantemente motóricas ou em outras situações onde a dinâmica da carga é importante, nem quando a variação de tensão é muito elevada. Pode, ainda, ser utilizada para modelagem da parte da carga de característica mais próxima de impedância constante.

A potência ativa P e a potência reativa Q são representadas através de um modelo exponencial, conforme as equações abaixo:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a, \quad (3-3)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b. \quad (3-4)$$

Onde:

P – É a potência ativa quando a tensão é V ;

Q – É a potência reativa quando a tensão é V ;

P_0 – É a potência ativa quando a tensão é V_0 ;

Q_0 – É a potência reativa quando a tensão é V_0 ;

V_0 – É a tensão na condição inicial ou de referência;

a, b – São os expoentes associados às funções P e Q , respectivamente.

Os parâmetros “ a ” e “ b ” são os expoentes que representam a alteração exponencial da potência em função da tensão. O expoente igual a 0 (zero) representa a

situação de potência constante, ou seja, não varia com a tensão. O expoente igual a 1 (um) representa a situação de corrente constante e o expoente igual a 2 (dois) é a situação de impedância constante.

Para sistemas compostos por diversos tipos de cargas, os expoentes variam usualmente nas seguintes faixas [28]: o expoente “a” entre 0,5 e 1,8 e “b” entre 1,5 e 6,0. O expoente “b” varia de forma não linear com a tensão devido à característica de saturação magnética em transformadores e motores elétricos.

Uma forma derivada da modelagem anterior é representar a carga como uma composição de cargas de comportamento de potência constante, corrente constante e impedância constante. Assim temos um modelo polinomial, para a potência ativa e também para a potência reativa.

Potência ativa:

$$P = P_0 \left[p_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \quad (3-5)$$

Potência reativa:

$$Q = Q_0 \left[q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right], \quad (3-6)$$

onde:

p_1 , p_2 , p_3 – Representam a proporção de cada componente dos modelos de impedância, corrente e potência constante, respectivamente. Parâmetros associados à potência ativa.

q_1 , q_2 , q_3 – Representam a proporção de cada componente dos modelos de impedância, corrente e potência constante, respectivamente. Parâmetros associados à potência reativa.

O comportamento da carga com a frequência é tipicamente representado como função da variação de frequência Δf . Assim, a potência ativa e a reativa são apresentadas da seguinte forma:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (3-7)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b (1 + K_{qf} \Delta f), \quad (3-8)$$

$$\Delta f = f - f_0 \quad (3-9)$$

onde:

- K_{pf} – É o fator associado à variação de potência ativa devido à variação de frequência, tipicamente, seu valor fica numa faixa entre 0 e 3,0 [28];

- K_{qf} – É o fator associado à variação de potência reativa devido à variação de frequência, tipicamente, seu valor fica numa faixa entre -2,0 e 0 [28].

A influência da frequência nas expressões anteriores foi representada sobre o modelo exponencial de tensão. Da mesma forma, pode ser utilizado o modelo polinomial para a representação dos efeitos simultâneos de variação de tensão e frequência.

Outros modelos similares baseados na variação de tensão e frequência e com parâmetros adicionais são encontrados na literatura específica do assunto.

Quando a queda de tensão na barra considerada é muito grande, cabe a utilização de um recurso: a utilização de um algoritmo que permita a mudança de modelo utilizado quando a tensão for inferior a um valor pré-definido. Por exemplo, substituindo um modelo de potência ou corrente constante para o de impedância constante.

Em determinadas situações, o comportamento da carga para variações de tensão e frequência apresenta resposta muito rápida para atingir nova condição de regime. Nestas situações a modelagem estática é bastante apropriada. No entanto, existem vários casos onde a dinâmica da carga é importante, como por exemplo, estudos de oscilações entre diferentes áreas, de estabilidade de tensão e de sistemas com vários motores. Outros eventos cuja dinâmica deve ser observada que podem ser citados são aqueles associados à operação da proteção do sistema elétrico e operação de comutadores de “*tap*” sob carga.

Com relação às informações e especificações utilizadas na prática, a referência internacional adotada é a norma IEC 60034-1 [48]. Nesta norma, as características de

desempenho, de capacidade das máquinas rotativas e tolerâncias associadas às principais características das máquinas são definidas.

Nas simulações apresentadas neste trabalho, a carga foi modelada como impedância constante, com exceção de um motor de indução de potência nominal igual a 10 MW.

3.4.2 Torque Mecânico da Carga

O torque mecânico da carga, que é aplicado ao eixo do motor, pode ser expresso em função da rotação conforme a equação (3-10).

$$T_{\text{mec}} = k_0 + k_1\omega + k_2\omega^2, \quad (3-10)$$

onde:

k_0 , k_1 e k_2 – São constantes de proporcionalidade, associadas à componente constante, ao termo proporcional à rotação e ao termo proporcional ao quadrado da rotação, respectivamente.

ω – rotação da carga.

3.5 Condicionador de Potência – Lado da Fonte

O condicionador de potência do lado da fonte é um condicionador de corrente. A função deste condicionador é atuar na carga vista pela fonte de forma a reduzir a componente de seqüência negativa e as componentes harmônicas da corrente. Para isso, o dispositivo empregado será o FAP, filtro ativo de potência, conectado em paralelo. A Figura 11 mostra de forma reduzida como pode ser visto o sistema elétrico do lado da fonte: a fonte de alimentação propriamente dita, a saída para o sistema de transmissão, que na prática é a carga vista desta barra, e o filtro ativo de potência que deve ser adicionado para condicionar a carga vista pela fonte.

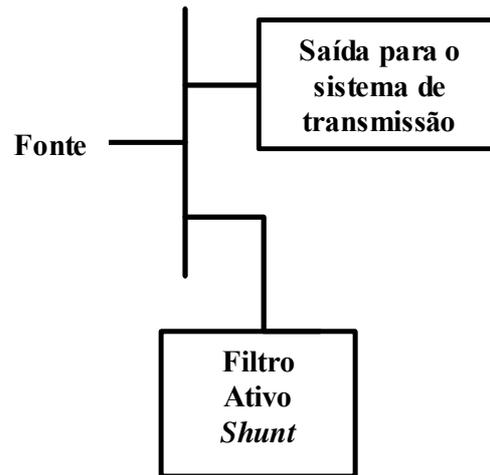


Figura 11 - Sistema elétrico do lado da fonte.

O condicionador escolhido para realizar a função de manter a carga vista pela fonte equilibrada é um conversor eletrônico de potência constituído por um transformador abaixador, seis chaves controladas, no caso IGBTs com diodos em anti-paralelo e um capacitor no lado CC.

A topologia do filtro ativo sob análise é apresentada na Figura 12.

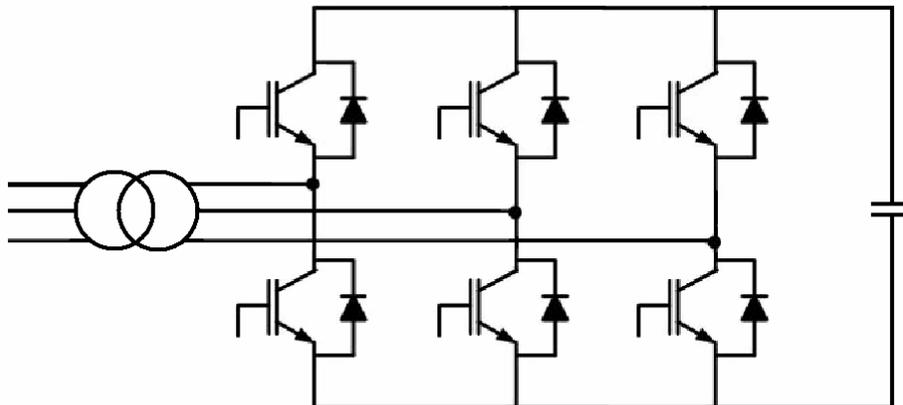


Figura 12 – Circuito de Potência do Condicionador do Lado da Fonte.

A estratégia de controle escolhida é o Controle de Correntes Senoidais Fryze, descrita por Aredes, Monteiro e Mourente [49] e por Aredes e Monteiro [50], na primeira referência são empregadas medições de tensão e corrente, na segunda citação a necessidade de medição de tensão é eliminada do algoritmo de controle. Com esta estratégia de controle a carga é vista pela fonte como sendo uma carga equilibrada e resistiva.

Fryze [51] propôs um conjunto de definições de potência ativa e reativa no domínio do tempo. A partir destes conceitos Malesani, Rosseto e Tenti [52] apresentaram uma estratégia de controle de filtros ativos *shunt* para garantir que as correntes do sistema fossem senoidais mesmo que a tensão na barra de filtragem possuísse harmônicos. Entretanto a estratégia proposta não era capaz de garantir o mesmo tipo de resultado (correntes senoidais) se a tensão fosse desbalanceada, ou seja, tivesse componente de seqüência negativa. Este problema pode ser resolvido a partir da utilização de um detector de fase, PLL, capaz de detectar a fase da componente de seqüência positiva de freqüência fundamental da tensão da barra onde está conectado o filtro ativo de potência. A combinação do detector de fase e da estratégia de controle “Correntes Generalizadas de Fryze” resultam na estratégia, utilizada neste trabalho e descrita em [49], “Correntes Senoidais de Fryze”.

A configuração do filtro ativo de potência usando controle Fryze é apresentada na Figura 13. O controle emprega medição de tensão e corrente da carga e corrente do próprio filtro. As perdas do filtro são drenadas da rede adicionalmente à compensação que o equipamento promove.

O circuito de potência do condicionador de corrente, ou filtro ativo de potência, é composto por:

- uma ponte conversora do tipo fonte de tensão trifásica composta por seis dispositivos de chaveamento com diodos em antiparalelo;
- um capacitor no lado CC do conversor;
- um transformador de potência de entrada;
- um filtro de harmônicos.

O condicionador possui as seguintes medições para realimentação de informação do sistema de controle:

- corrente da carga;
- corrente do condicionador;
- tensão do capacitor do lado CC.

O controle do filtro ativo apresentado na Figura 13 tem as seguintes partes principais:

- controle da tensão do capacitor do lado CC do condicionador;
- detector de ângulo de fase, PLL;

- cálculo da corrente de referência para o filtro ativo;
- controle do chaveamento da unidade de potência.

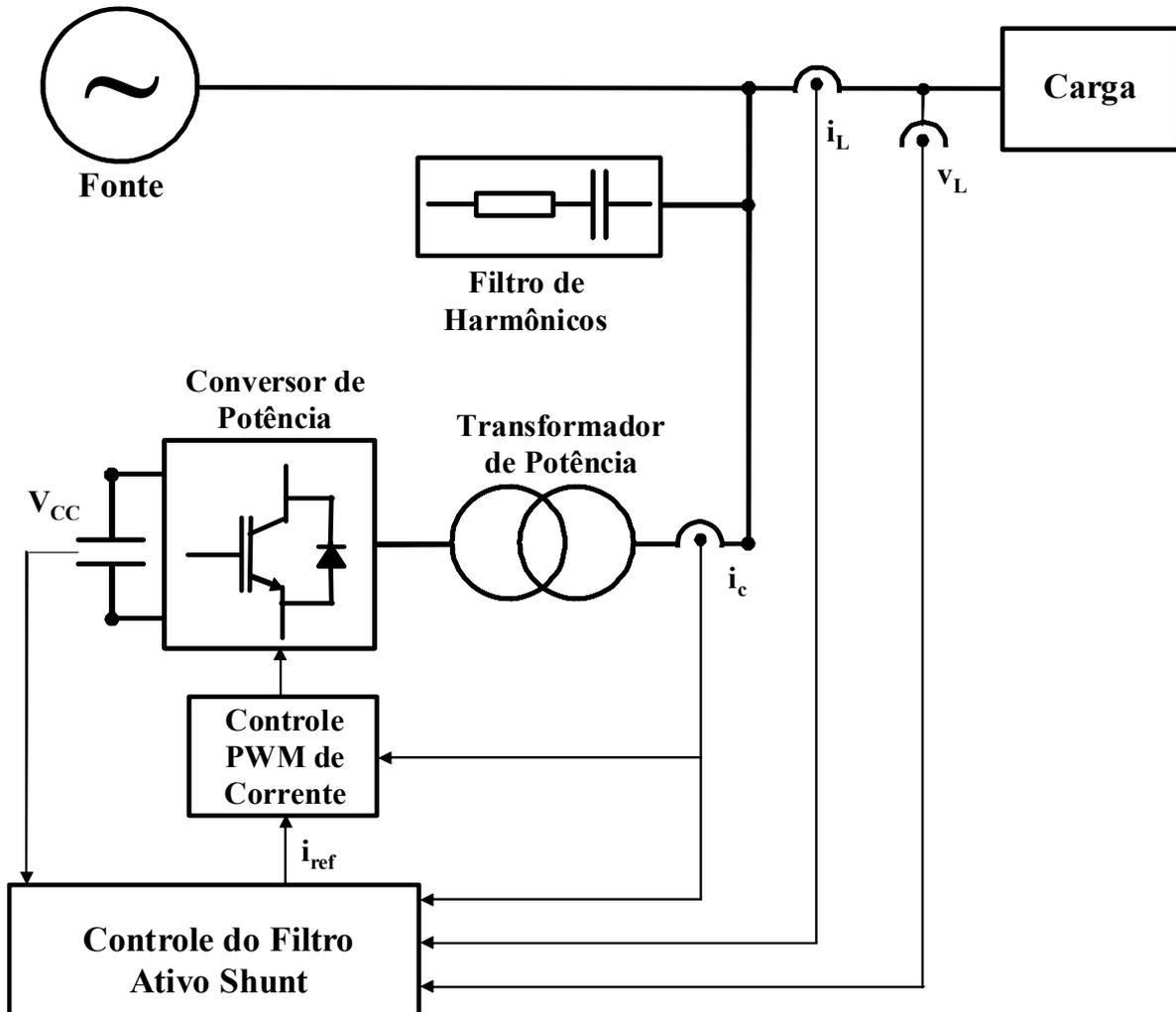


Figura 13 - Configuração do Condicionador de Corrente – Lado da Fonte.

O controle da tensão sobre o capacitor do lado CC do condicionador é realizado através de um controlador proporcional integral que atua com o objetivo de anular o sinal de erro obtido da comparação entre o valor de referência ajustado para a tensão sobre o capacitor e o valor medido desta. A Figura 14 mostra o diagrama de blocos do regulador de tensão. O filtro passa baixa empregado é do tipo Butterworth de 5ª ordem com frequência de corte de 500 Hz.

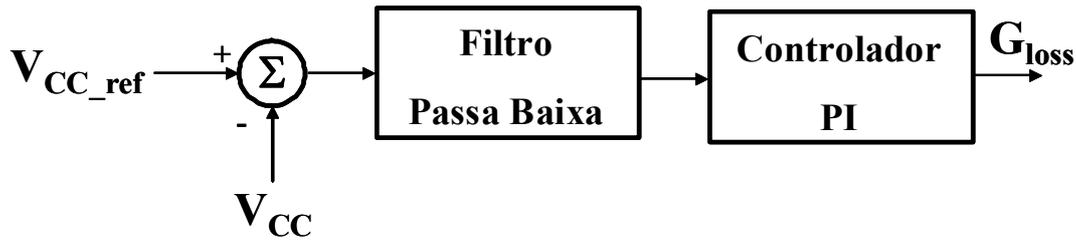


Figura 14 - Regulador de tensão CC do condicionador de potência.

O detector do ângulo de fase ou PLL é utilizado para obter o ângulo de fase da tensão de seqüência positiva da tensão de entrada do condicionador, ou seja, da tensão do lado da fonte. Este ângulo de fase obtido pelo PLL é utilizado como referência de fase no algoritmo de controle.

A tensão medida entra no PLL e deste saem os sinais de controle que representam a componente de seqüência positiva da tensão na carga, este sinal de controle é multiplicado pela corrente da carga determinando a potência trifásica da carga com respeito à componente fundamental de seqüência positiva da tensão. Dividindo esta potência pelo valor de tensão agregado instantâneo quadrático temos a condutância G . Ao passar o sinal referente à condutância G por um filtro passa baixa temos o valor médio G_{bar} . O valor de G_{bar} é adicionado ao de G_{loss} (proveniente do controle da tensão CC do condicionador) e assim é obtido $G_{control}$. Ao multiplicarmos $G_{control}$ pelo sinal da componente fundamental de seqüência positiva da tensão na carga temos a corrente ativa, sinais senoidais em fase com as componentes de seqüência positiva da tensão. Ao subtrairmos a corrente da carga dessa corrente desejada obtemos a corrente de referência que será injetada na rede pelo condicionador, de forma que a corrente total vista pela fonte seja senoidal e em fase com a componente de seqüência positiva da tensão.

A corrente de referência que será injetada na rede pelo filtro ativo é calculada a partir do algoritmo de correntes senoidais Fryze, descrito acima e apresentado na Figura 15.

O controle de chaveamento é responsável pelo envio dos sinais de disparos para os dispositivos de chaveamento semicondutores. A técnica de chaveamento escolhido no caso em referência é o controle por histerese, na qual um valor de erro aceitável, tanto positivo quanto negativo, é estabelecido para o sinal de referência calculado e sempre que a corrente medida na entrada do filtro sair da região aceitável o chaveamento é alterado.

A estratégia de controle é injetar na rede correntes que compensem a diferença entre a corrente ativa de seqüência positiva desejada e a corrente de carga que efetivamente circula.

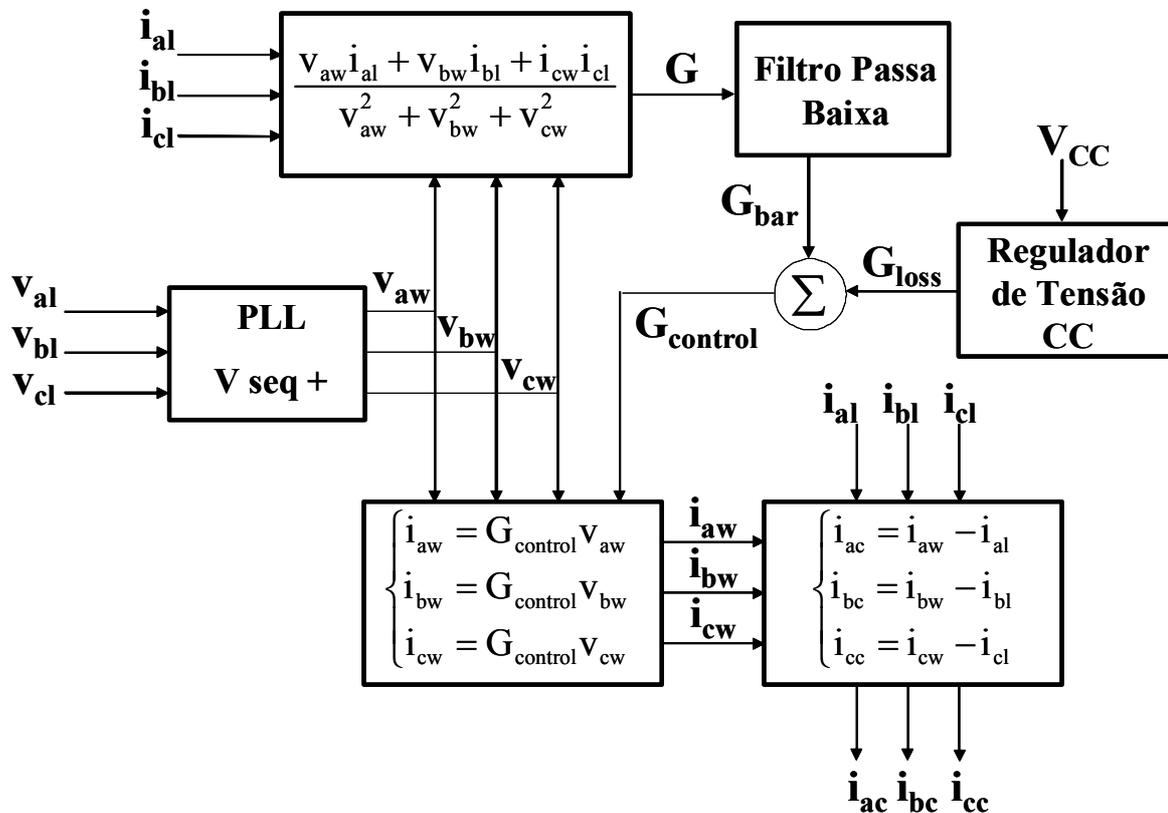


Figura 15 - Estratégia de controle correntes senoidais Fryze.

Na Figura 15 temos:

V_{al} , V_{bl} , V_{cl} – tensões medidas na carga nas fases a, b e c;

i_{al} , i_{bl} , i_{cl} – correntes medidas na carga nas fases a, b e c;

V_{aw} , V_{bw} , V_{cw} – sinais referentes às tensões de seqüência positiva na carga - fases a, b e c;

G – condutância associada à potência ativa restrita à componente de seqüência positiva da tensão da carga;

G_{bar} – valor médio da condutância G ;

G_{loss} – sinal de controle obtido do regulador de tensão CC, associado às perdas do condicionador;

$G_{control}$ – sinal de controle igual à soma de G_{bar} e G_{loss} ;

i_{aw} , i_{bw} , i_{cw} – sinais referentes às correntes ativas, isto é, correntes senoidais em fase com v_{aw} , v_{bw} , v_{cw} - fases a, b e c;

i_{ac} , i_{bc} , i_{cc} – correntes de compensação do condicionador obtidas através da diferença entre i_{aw} , i_{bw} , i_{cw} e i_{al} , i_{bl} , i_{cl} - fases a, b e c.

O filtro passa baixa apresentado na Figura 15 tem por finalidade estabelecer o valor médio G_{bar} e é do tipo Butterworth de 5ª ordem com frequência de corte em 60 Hz.

O regulador de tensão CC é constituído de um filtro passa baixa, do tipo Butterworth de 5ª ordem com frequência de corte em 500 Hz, e um controlador proporcional e integral com finalidade de anular o sinal de erro obtido entre a tensão de referência e a tensão medida sobre o capacitor do lado CC.

3.6 Condicionador de Tensão – Lado da Carga

A função do condicionador de tensão do lado da carga é condicionar a tensão na barra da carga de forma a controlar a amplitude da tensão entregue, tal condicionamento deve ser feito na tensão de cada fase. Em regime normal de operação deve realizar a função de um Statcom convencional.

O Statcom é um equipamento tipo FACTS que é empregado para a compensação de reativos e conseqüentemente o controle da tensão na barra sob controle. O Statcom do tipo fonte de tensão apresenta uma curva de tensão versus corrente onde a corrente é limitada pela capacidade dos dispositivos semicondutores de potência e a tensão pela classe de isolamento do equipamento, conforme representado na Figura 16.

Hingorani e Gyugy apresentam as curvas típicas de perdas de um compensador estático de reativos [5]. Na Tabela 5 são mostradas as perdas do compensador de 100 Mvar:

- Perdas no conversor, associadas às perdas por condução e por chaveamento dos dispositivos semicondutores de potência e nos dispositivos *snubbers*;
- Perdas no transformador, associadas às perdas nos enrolamentos e no núcleo do transformador;
- Perdas na interface magnética;
- Total de perdas – a soma das perdas listadas anteriormente.

As referidas perdas foram utilizadas no modelo do condicionador simulado, de forma que a influência destas esteja presente nas perdas do sistema, nas constantes de tempo características do sistema e no amortecimento de transitórios.

Tabela 5 - Perdas versus potência reativa de saída de um compensador estático de reativos de 48 pulsos, ± 100 Mvar.

Componente\Carga	0,0 pu	$\pm 0,5$ pu	$\pm 1,0$ pu
Conversor	0,10%	0,25%	0,45%
Transformador	0,06%	0,12%	0,40%
Interface Magnética	0,04%	0,08%	0,20%
Total	0,20%	0,45%	1,05%

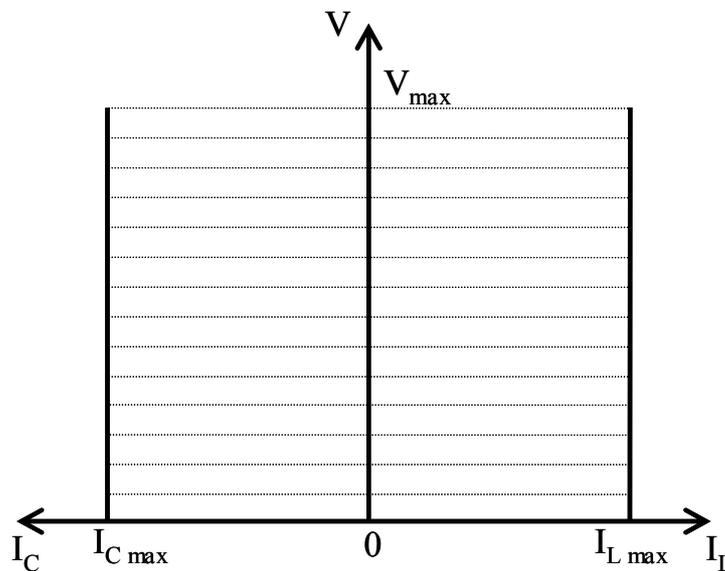


Figura 16 - Área de operação $V \times I$ do conversor fonte de tensão.

O condicionador escolhido é constituído de três inversores monofásicos com um lado CC comum, conforme pode ser visto na Figura 17. Este lado CC possui um capacitor comum de forma a armazenar energia necessária para fazer a transferência de potência entre fases e também aquela associada às perdas nas chaves do dispositivo. O algoritmo de controle trabalha com a informação de tensão obtida através de medição nos terminais da carga e também a medição de tensão CC no capacitor do lado CC comum. Outro componente importante do controle são os detectores de fase, trifásico e monofásicos, que são essenciais para a adequada atuação dos inversores monofásicos. Este capacitor é carregado através de uma pequena fonte dedicada, antes do

condicionador iniciar sua operação. Além dos dispositivos de chaveamento, da medição e dos transformadores, é utilizado um filtro de harmônicos na saída do conversor.

Os inversores monofásicos utilizados são do tipo ponte H, constituídos de quatro chaves e um transformador monofásico, conforme pode ser visto na Figura 18. A ponte H foi adotada para a realização do controle de tensão independente por fase.

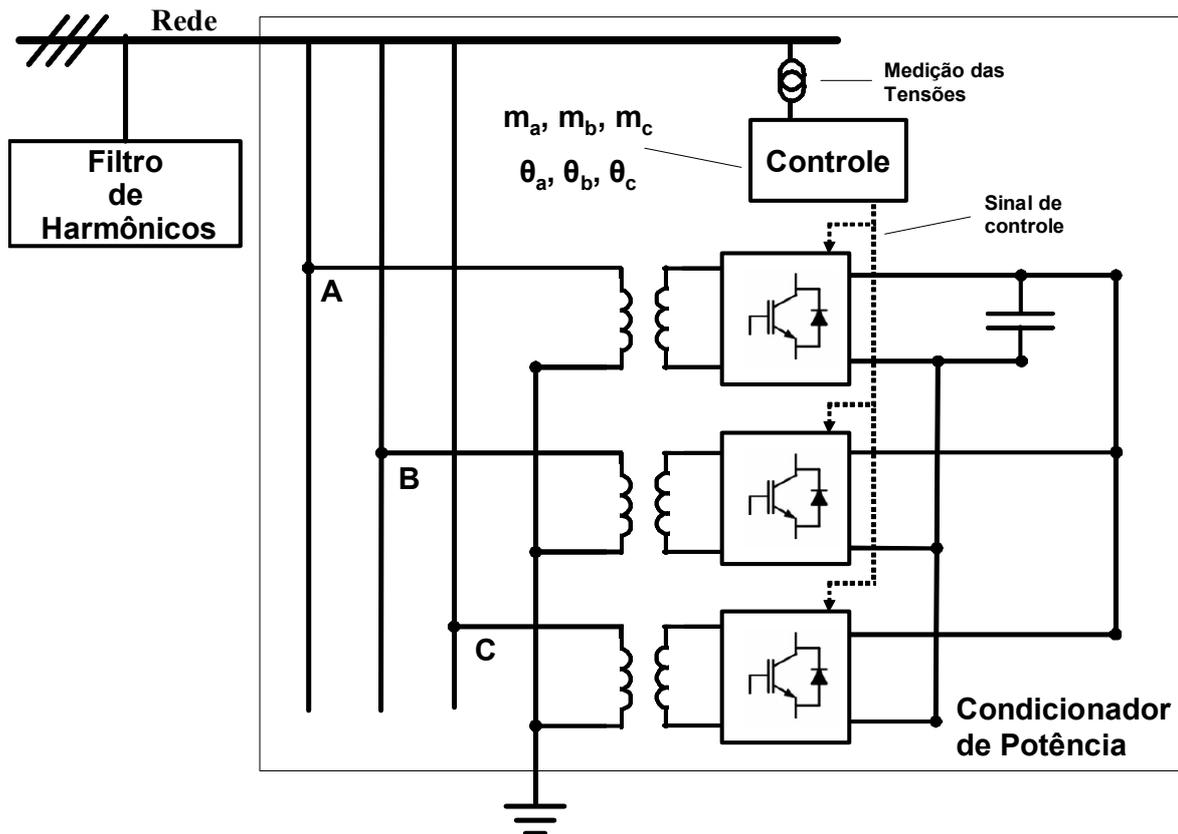


Figura 17 - Condicionador de tensão do lado da carga.

Conforme descrito por Holmes e Lipo [53] o conversor tipo ponte H possui uma tensão de saída máxima igual ao dobro de um conversor monofásico de meia ponte, para uma mesma tensão disponível no elo CC, e conseqüentemente para uma mesma potência nominal pode ter sua corrente reduzida à metade. Isto é interessante, do ponto de vista econômico, pois reduz custo de cabos e condutores para correntes menores.

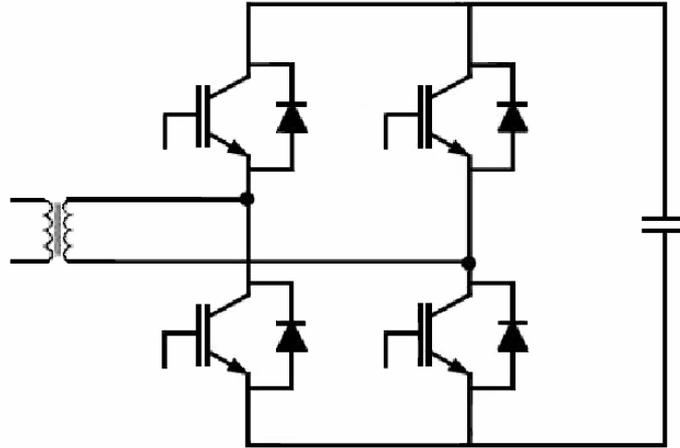


Figura 18 - Inversor monofásico empregado no condicionador de tensão.

3.7 Resumo e Conclusão

Neste capítulo foram apresentados vários tópicos relacionados ao sistema elétrico em estudo, dentre esses tópicos podemos destacar a descrição do sistema elétrico e pontos de interesse na modelagem de seus componentes:

- a fonte de alimentação;
- o sistema de transmissão de energia e
- a carga elétrica.

Além disso, foram apresentados os condicionadores de potência necessários para viabilizar a operação do sistema elétrico. A operação durante a perda de uma fase em regime permanente também foi apresentada.

É importante concluir que para a realização de estudos representativos é necessário que a modelagem dos equipamentos represente efetivamente o funcionamento, os componentes, as perdas e os algoritmos de controle.

4. O Condicionador de Tensão – Lado da Carga

O condicionador de tensão do lado da carga é constituído de três inversores monofásicos em ponte H conforme mostrado na Figura 18 e com um capacitor comum no lado CC dos inversores. Desta forma, é possível realizar o controle de cada fase de maneira individual, através do inversor dedicado à sua respectiva fase.

O condicionador de tensão deve manter a amplitude de tensão dentro de valores especificados e manter a tensão equilibrada nas três fases. Deve ainda garantir tanto a potência ativa como a potência reativa demandada pela carga em condição normal de operação ou em situações específicas pré-estabelecidas como, por exemplo, a partida de um motor elétrico que cause impacto relevante no sistema ou a perda de uma das fases do sistema.

A situação operacional na qual ocorre a perda de uma fase é essencialmente a mesma situação em que, a partir de um sistema monofásico, é necessário obter um sistema trifásico. A obtenção de um sistema trifásico a partir de um sistema monofásico a dois fios ou a um fio com retorno pela terra tem as seguintes motivações típicas:

- alimentar um motor trifásico a partir de uma rede monofásica, este tipo de aplicação é comum e normalmente disponível mediante especificação de conversores de frequência comerciais;
- alimentar regiões rurais onde a transmissão monofásica é disponível ou viável. Neste caso, para regiões onde a transmissão de energia sob a forma de tensões trifásicas é economicamente inviável a utilização da eletrônica de potência pode viabilizar a obtenção de tensão trifásica.

O caso mais comum de conversão monofásico para trifásico é aquela encontrada em conversores de frequência utilizados em variadores de velocidade de motores elétricos trifásicos. O conversor mais comum encontrado no mercado para variação de velocidade é do tipo fonte de tensão e possui uma ponte retificadora trifásica de onda completa a diodos, um elo CC com capacitores e uma ponte inversora trifásica com seis dispositivos semicondutores de chaveamento do tipo IGBT com diodos em antiparalelo com cada chave. Este tipo de conversor pode ser utilizado de forma direta e imediata

com alimentação monofásica. Neste caso, a ondulação da tensão CC será maior e a parametrização deverá ser adaptada, a capacitância do elo CC deve ser revista.

Uma alternativa similar à concepção descrita anteriormente, também empregando conversor fonte de tensão, é utilizar um retificador monofásico controlado capaz de sintetizar a corrente de entrada, controlando desta forma o fator de potência de entrada e com capacidade de minimizar o conteúdo harmônico visto pela fonte monofásica.

Outra forma possível de fazer a conversão de sistema monofásico para trifásico é a utilização de um conversor fonte de tensão trifásico que recebe a energia de uma fonte monofásica através de dois fios (ou condutores) e compõe a tensão do terceiro condutor de forma que a carga trifásica tenha disponível uma tensão trifásica equilibrada. Uma vantagem deste conversor é que a potência que passa pelo conversor é menor que a potência trifásica total, uma vez que parte da potência é entregue diretamente à carga pela alimentação monofásica. Assim, as perdas associadas à condução e chaveamento do condicionador são menores quando comparadas a um conversor que manipula a potência total.

As aplicações de conversão de sistema monofásico para trifásico em sistemas de distribuição rural tem recebido atenção e há vários anos muitos trabalhos técnicos têm sido apresentados a respeito do assunto, em 1993 Enjeti et al [54] apresentaram uma topologia econômica da aplicação e em 1998 Douglas e Malengret [55] apresentaram uma concepção para aplicação rural com chaveamento PWM. Miranda et al [56] apresentaram em 2004 uma concepção de conversor chamado de “Monotri” que emprega retificação e inversão controlada com saída a quatro fios de forma a tornar disponível o condutor neutro na saída. Em 2003, Bekiarov e Amadi [57] propuseram uma topologia de UPS com 6 chaves em contraposição às topologias convencionais de 7, 8 e 10 chaves, neste trabalho a concepção de utilizar uma fase comum à fonte monofásica e à saída trifásica é apresentada. Machado et al. [58] [59] apresentam a concepção de composição da terceira fase com um conversor trifásico.

4.1 Circuito de Potência

O circuito de potência, conforme descrito anteriormente, é composto de três conversores monofásicos em ponte completa, ou ponte H. Os dispositivos semicondutores de potência precisam de capacidade de disparo e corte de condução e para tal são indicados: o GTO, o IGBT ou o IGCT. O conversor descrito, devido à topologia adotada, apresenta saída em três níveis, tendo essa vantagem em relação ao inversor de dois níveis e seis chaves.

O condicionador de potência, descrito neste trabalho, emprega além dos dispositivos semicondutores de chaveamento, um transformador monofásico dedicado a cada inversor monofásico e um capacitor comum no lado de tensão contínua.

4.1.1 Capacitor do Lado CC

O capacitor do lado CC tem a função de manter a tensão do lado CC com baixa ondulação. Em casos em que a função do condicionador é compensar somente potência reativa, o capacitor terá uma capacitância muito reduzida, suficiente apenas para garantir baixa ondulação na tensão CC devido aos chaveamentos. No problema aqui tratado, pode ocorrer potência ativa oscilante nos casos de operação desbalanceada, em especial, quando há perda de fase. Assim o capacitor do lado CC deve ser dimensionado de tal forma que a ondulação de tensão seja suficientemente pequena para o correto funcionamento dos inversores monofásicos.

A teoria associada a essa situação é descrita por Akagi, Kanazawa e Nabae [60] e [61]. No Brasil, vários trabalhos relacionados com o tema da teoria da potência instantânea foram desenvolvidos por Aredes [62] e Watanabe, Stephan e Aredes [63].

A constante de inércia H , em segundos, de um compensador estático síncrono é definida por:

$$H = \frac{\frac{1}{2}CV^2}{S}, \quad (4-1)$$

onde:

C – capacitância empregada no lado CC, em F;

V – tensão sobre o capacitor, em kV;

S – potência aparente nominal do compensador, em MVA.

O sentido físico da constante de inércia acima descrita está associado à relação entre a energia armazenada no capacitor do lado CC e a potência aparente nominal do equipamento. Tendo dimensão de tempo.

Em STATCOMs comerciais, o valor da constante de inércia tem ordem de grandeza em torno de 1ms.

Para compensadores empregados para a compensação dos distúrbios causados por fornos a arco, o valor da constante de tempo típico está entre 50 e 100 ms.

O condicionador de tensão empregado neste trabalho apresenta constante de tempo da ordem de 250 ms.

A constante de inércia de máquinas rotativas como, por exemplo, compensadores síncronos, é definida por:

$$H_{MR} = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{0m}^2}{VA_{base}}, \quad (4-2)$$

onde:

H_{MR} – constante de inércia, em s;

J – momento de inércia, em kg.m²;

ω_{0m} – velocidade angular nominal, em rad/s;

VA_{base} – potência aparente nominal, em VA.

A constante de inércia de geradores empregados em geração termelétrica tipicamente é da ordem de alguns segundos e os valores, conforme a rotação, estão nas seguintes faixas:

- rotação nominal de 3.600 rpm: $2,5 \text{ s} \leq H_{MR} \leq 6,0 \text{ s}$;

- rotação nominal de 1.800 rpm: $4,0 \text{ s} \leq H_{MR} \leq 10,0 \text{ s}$.

4.2 Detectores de Fase Monofásicos e Trifásicos

Para controlar a tensão e a potência transferida pelo sistema CA é necessário conhecer o valor instantâneo do ângulo de fase dos componentes de seqüência positiva da tensão do sistema. Para obter essa informação referente ao ângulo de fase é necessário empregar detectores de fase PLL (do inglês *Phase Locked Loop*). Adicionalmente à necessidade da informação do ângulo de fase há condições de contorno específicas que devem ser atendidas: uma delas é a correta operação destes detectores em condição de desequilíbrio de tensão. Best [64] apresenta a base teórica para projeto e aplicação de PLLs. Kaura e Blasko [65] propõem o método simétrico ótimo para melhorar a dinâmica do PLL em condições de desbalanço. Em [66] Chung também trata do desempenho do PLL em condições de desbalanço. Costa Júnior et al. [67] apresenta um PLL trifásico baseado na teoria pq de Akagi et al [60].

Na concepção de controle adotada neste trabalho são utilizados dois tipos de detectores de fase. Um deles é do tipo monofásico e o outro é do tipo trifásico, com possibilidade de operar quando alimentado por tensões monofásicas.

O detector de fase do tipo trifásico identifica as fases da componente de seqüência positiva da tensão. Os ângulos de fase das tensões v_a , v_b e v_c são defasadas de 120° entre si. O detector deve ser estável mesmo com a presença de forte desequilíbrio de tensão, pois é necessário que continue identificando a fase da tensão de seqüência positiva mesmo durante a perda de uma fase. O detector escolhido é o PLL com média móvel conforme descrito por Jesus et al [68], no qual o valor da freqüência obtida é uma média sobre um período definido, o diagrama de blocos deste detector é apresentado na Figura 19. O detector trifásico apresentado encontra um ponto de equilíbrio estável quando a saída é igual ao ângulo da fase “a” somado a $\pi/2$. Assim, o valor obtido na saída do PLL deve ser subtraído deste valor para que se obtenha o ângulo da tensão da componente fundamental de seqüência positiva da fase “a”.

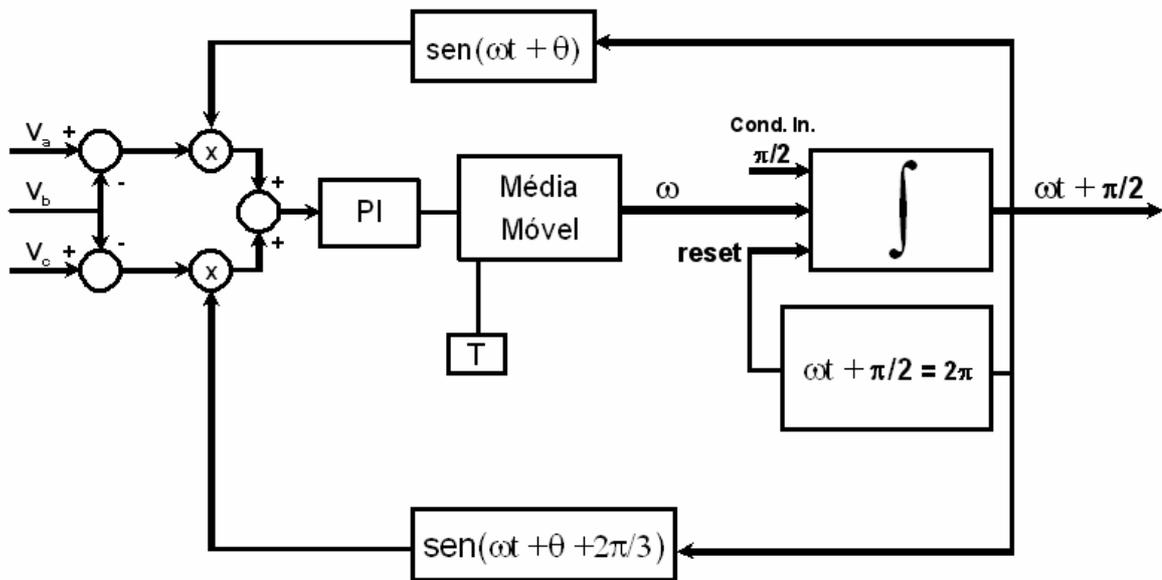


Figura 19- PLL trifásico com média móvel.

Na Figura 20 podemos observar a frequência obtida pelo PLL trifásico com média móvel. O intervalo mostrado é entre $t=0,0$ s e $t=2,0$ s. Em $t=0,5$ s ocorre a perda da fase “a” e em $t=1,50$ s ocorre a entrada do condicionador de tensão do lado da carga.

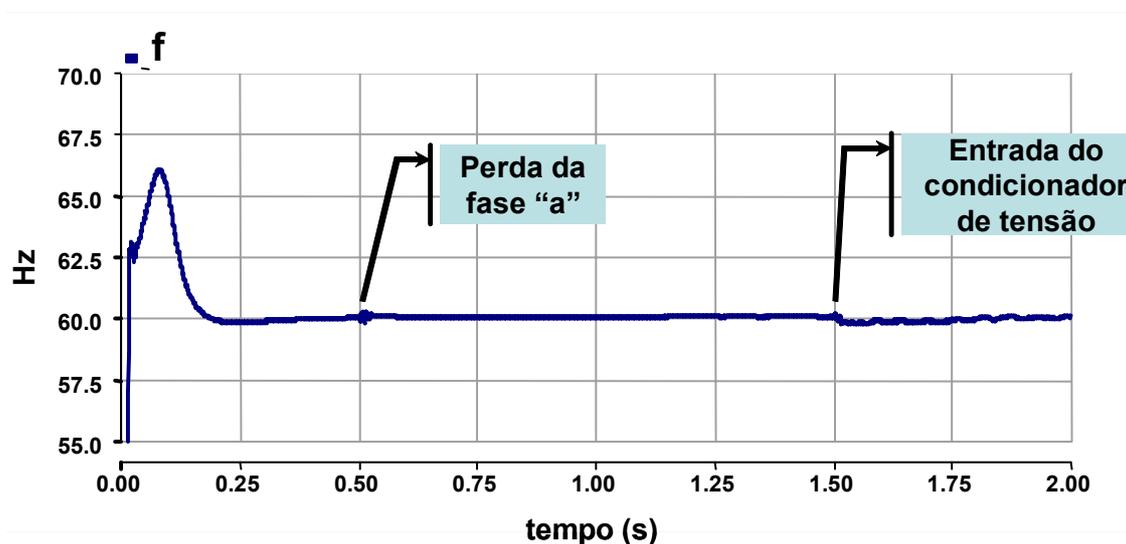


Figura 20 – Operação do PLL trifásico com média móvel – entre 0 e 2,0 s.

O detector de fase do tipo monofásico é utilizado para detectar individualmente os ângulos de fase das tensões v_a , v_b e v_c . Neste caso, os ângulos de fase podem diferir

livremente entre si. O detector escolhido é o PLL monofásico conforme descrito por Miranda et al [56], o diagrama de blocos deste detector é apresentado na Figura 21.

O controle deve fazer com que as tensões de fase v_a , v_b e v_c possuam a mesma amplitude, frequência e ângulos de fase com diferença de 120° entre si.

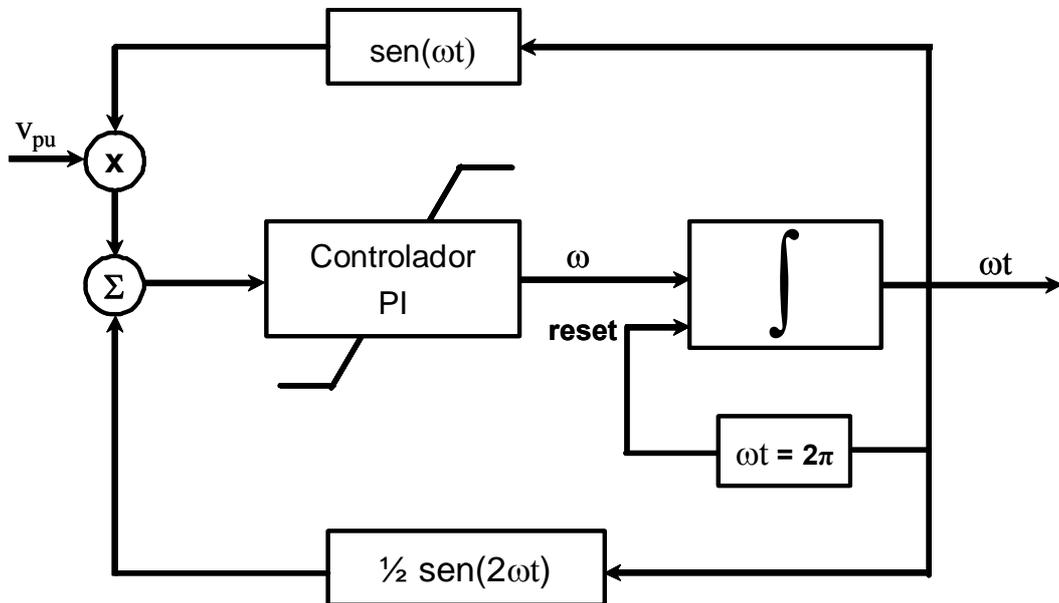


Figura 21 - PLL Monofásico.

Na Figura 22 é apresentado o mesmo PLL monofásico da Figura 21, com a adição de um filtro passa baixa, que possui a função de reduzir a oscilação de frequência do PLL. O mesmo resultado pode ser obtido, do PLL sem filtro, com um mais apurado ajuste dos parâmetros do controlador proporcional integral.

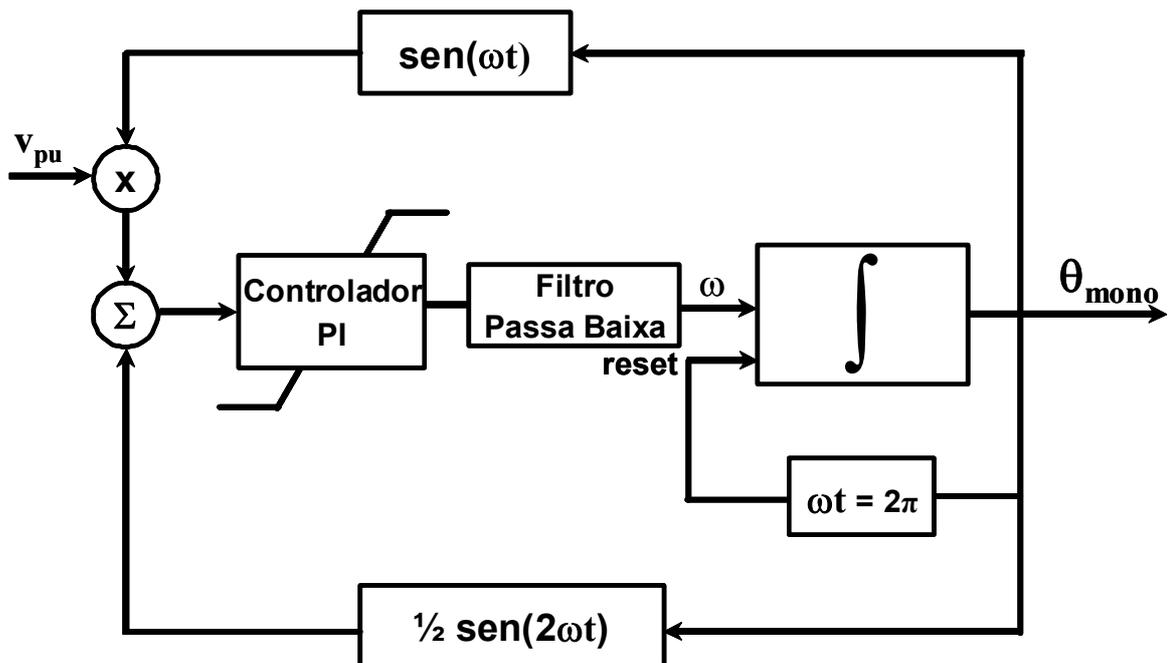


Figura 22 – PLL monofásico com filtro passa baixa.

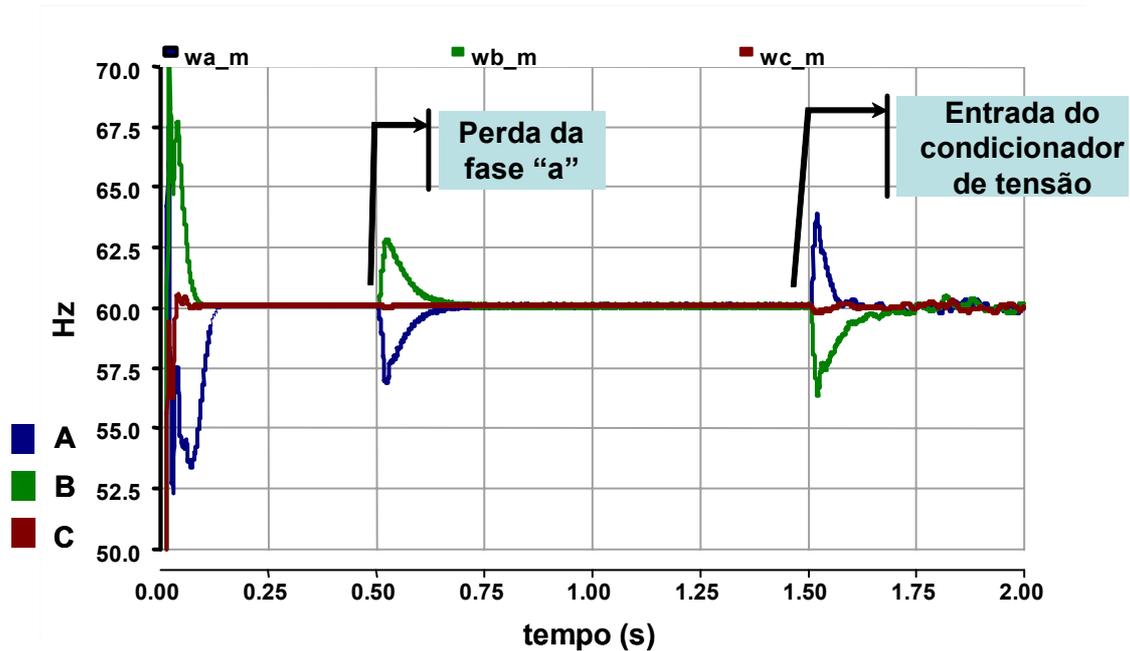


Figura 23 - Operação do PLL monofásico entre 0,0 e 2,0s.

A partir da comparação entre os ângulos de fase obtidos pelos detectores de fase trifásico e monofásico é possível obter um sinal de erro que será usado no controlador PI do ângulo de fase das tensões monofásicas sintetizadas pelo condicionador. O ângulo de fase obtido do PLL trifásico será utilizado como referência e o ângulo de fase obtido do PLL monofásico será usado como sinal de realimentação. Os ângulos de fase obtidos do PLL trifásico já possuem naturalmente a defasagem desejada de 120° . Assim, o controlador PI atuará de forma a que os ângulos de fase obtidos no PLL trifásico e nos PLL monofásicos sejam iguais.

4.3 Chaveamento do Condicionador de Tensão

O funcionamento de cada inversor monofásico pode ser baseado em diversas técnicas de chaveamento, entre estas técnicas podemos destacar duas:

- PWM seno-triângulo [70] e
- PWM com eliminação seletiva de harmônicos [70] e [71].

A técnica de chaveamento PWM seno-triângulo consiste na modulação por largura de pulsos e os pulsos de disparos das chaves dos conversores são função da comparação entre um sinal de referência senoidal e uma portadora triangular de frequência da ordem de alguns poucos kHz. Este tipo de modulação tipicamente apresenta na saída, além da fundamental, harmônicos de ordem elevada e baixo conteúdo de harmônicos de baixa ordem. No entanto, o chaveamento em frequência mais alta faz crescer as perdas de chaveamento do conversor.

A técnica PWM com eliminação seletiva de harmônicos combina o chaveamento onda quadrada e a modulação por largura de pulsos de forma a controlar a componente fundamental da tensão de saída e também eliminar alguns harmônicos selecionados da tensão de saída. A vantagem deste método em relação ao chaveamento onda quadrada é a possibilidade de eliminação de harmônicos de baixa ordem. E a vantagem em relação ao chaveamento PWM seno-triângulo é o menor número de chaveamentos por ciclo da tensão e com um conteúdo harmônico reduzido pela eliminação seletiva de harmônicos. Ambos os métodos são vistos com mais detalhes no Apêndice 6.

Neste trabalho, apesar do início do desenvolvimento ter sido com eliminação seletiva de harmônicos, foi empregado o chaveamento por modulação de largura de pulsos.

4.4 Controle do Condicionador do Lado da Carga

O controle do condicionador de tensão é composto por um regulador da tensão CC sobre o capacitor do lado CC, um bloco de cálculo dos fatores de modulação de amplitude, um módulo de identificação de ângulos de fase e cálculo dos ângulos de fase das três tensões terminais do condicionador nas três fases e um bloco para a geração dos pulsos de disparo das chaves semicondutoras do condicionador. Conforme visto anteriormente, cada inversor monofásico tem controle independente. Assim, o controle fornece um valor de fator de modulação de amplitude e um ângulo de fase para a geração de pulsos de disparo de cada inversor monofásico. O controle é apresentado na Figura 24.

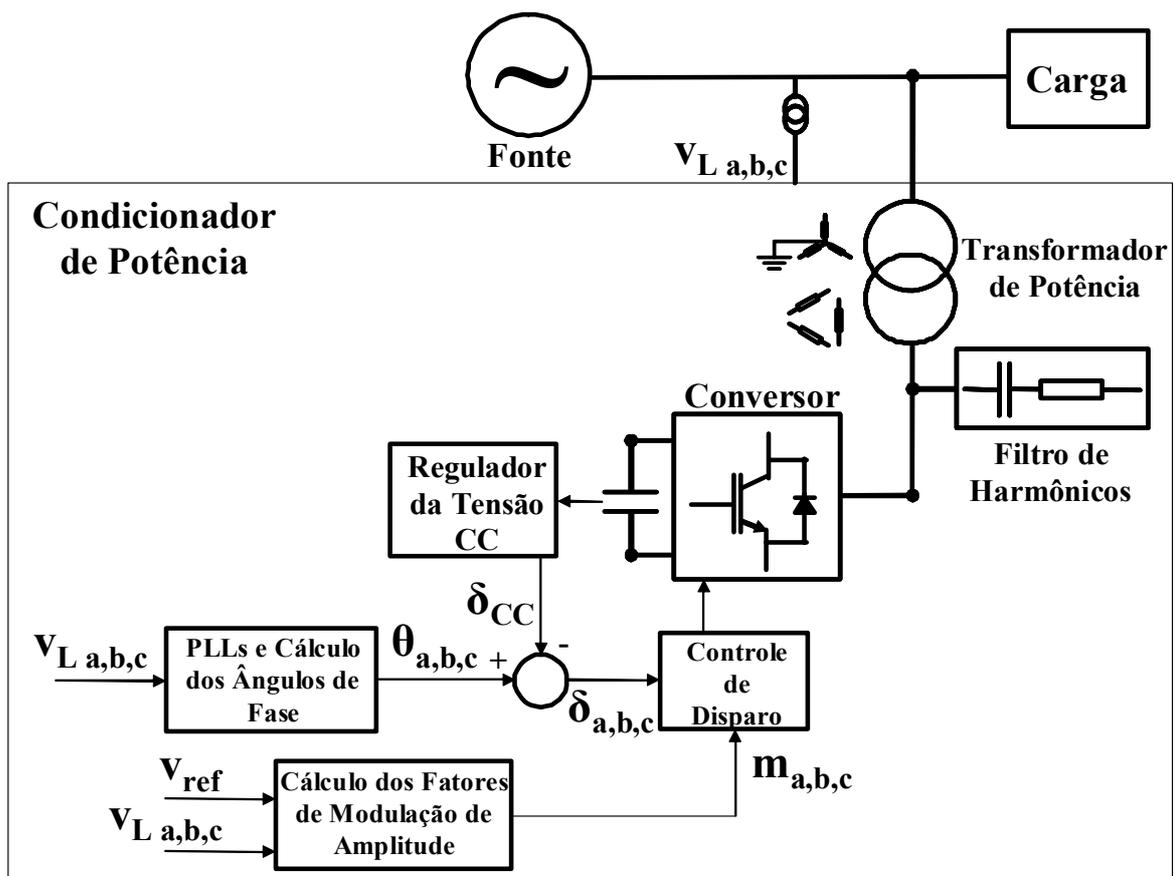


Figura 24 - Malha de controle do condicionador de tensão do lado da carga.

O bloco utilizado para a obtenção dos ângulos da fase “a” a ser sintetizada pelo inversor monofásico é apresentado na Figura 25, o mesmo algoritmo de controle é aplicado para as fases “b” e “c”. Os PLLs trifásico e monofásico representados são os mesmo que foram descritos anteriormente neste capítulo.

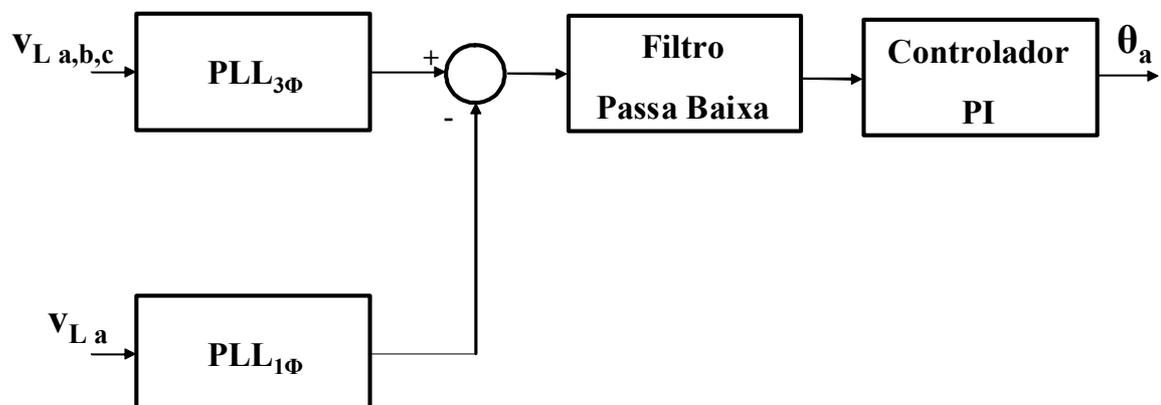


Figura 25 – Obtenção do ângulos da fase “a”.

4.4.1 Controle da Amplitude da Tensão – Fator de Modulação de Amplitude

Para o controle da tensão, neste trabalho, foi empregado o método de modulação por largura de pulsos ou mais especificamente o método PWM seno-triângulo.

A amplitude da tensão de cada fase do condicionador é controlada através do fator de modulação de amplitude do respectivo conversor. O fator de modulação de amplitude está diretamente relacionado com a amplitude da tensão de fase. No caso do controle por modulação de largura de pulsos, o fator de modulação de amplitude é definido como a relação entre o valor de pico da onda de controle e a amplitude da onda triangular de modulação e dado por:

$$m_a = \frac{V_{\text{Controle}}}{V_{\text{Modulação}}}, \quad (4-3)$$

onde:

m_a – Fator de modulação de amplitude para a modulação por largura de pulsos;

V_{Controle} – Valor de pico do sinal de controle;

$V_{\text{Modulação}}$ – Amplitude do sinal de modulação triangular.

De forma similar, temos a definição do fator de modulação de frequência no caso do controle por modulação de largura de pulsos dado por:

$$m_f = \frac{f_{\text{chaveamento}}}{f_{\text{controle}}}, \quad (4-4)$$

onde:

m_f – fator de modulação de frequência para a modulação por largura de pulsos - PWM;

$f_{\text{chaveamento}}$ – frequência de chaveamento, do sinal de modulação triangular;

f_{controle} – frequência da onda de controle.

Os fatores de modulação de amplitude das tensões monofásicas dos inversores são obtidos conforme o esquema representado, para a fase “a”, na Figura 26, o filtro utilizado é um passa baixa Butterworth de 5ª ordem, com frequência de corte de 50 Hz. O sinal de erro da tensão eficaz medida na carga em relação à referência de tensão é a entrada do controlador proporcional e integral.

A saída do controlador fornece o fator de modulação de amplitude, que controla a amplitude da tensão fornecida pelo inversor da mesma fase. Controladores similares são utilizados nas fases “a”, “b” e “c”. Desta forma, há um controle individual por fase da amplitude de cada tensão, v_a , v_b e v_c .

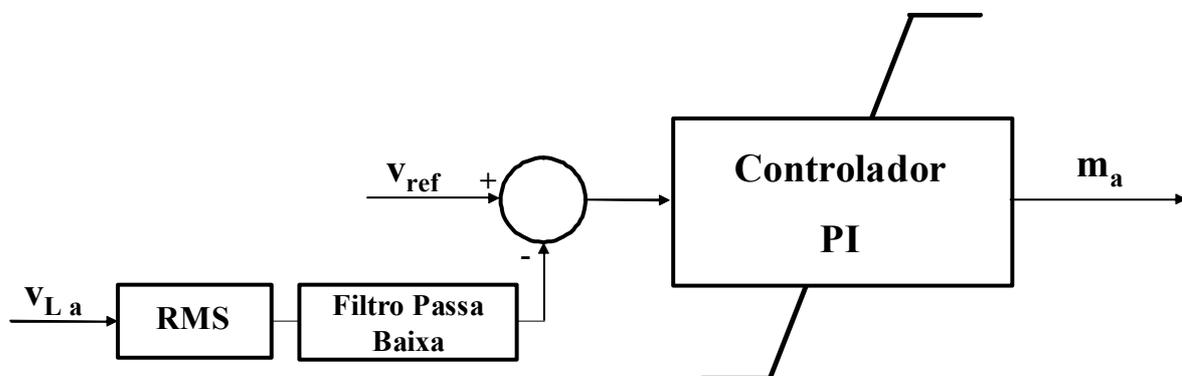


Figura 26 - Obtenção do fator de modulação da fase “a”.

Na figura temos:

V_{ref} – referência empregada para a tensão desejada na fase, normalmente 1,0 pu;

$V_{L a}$ – tensão medida na fase “a”;

m_a – fator de modulação de amplitude da tensão fornecida pelo inversor na fase “a”.

O controle de potência ativa e reativa é baseado nas equações apresentadas a seguir. O controle de potência ativa é feito através do controle do ângulo de fase entre a tensão do condicionador e a tensão do sistema. A potência reativa é controlada através do controle da amplitude da tensão do condicionador.

A ação do condicionador do lado da carga para controlar a potência ativa é atuar sobre o ângulo de fase em seus terminais. Este controle pode ser sintetizado através de um controlador proporcional integral dedicado a esta finalidade.

Para controlar a potência reativa o condicionador deve atuar sobre a amplitude da tensão em seus terminais. Este controle pode ser realizado através de um controlador proporcional integral dedicado ao controle de um fator associado à amplitude da tensão.

O sistema de potência sob controle foi apresentado de forma mais detalhada na Figura 3 e na Figura 8. Este sistema, para finalidade de controle da tensão da carga, pode ser simplificado, a Figura 27 apresenta de forma simplificada o sistema e o condicionador de tensão do lado da carga como duas fontes de tensão senoidais conectadas através de uma impedância indutiva.

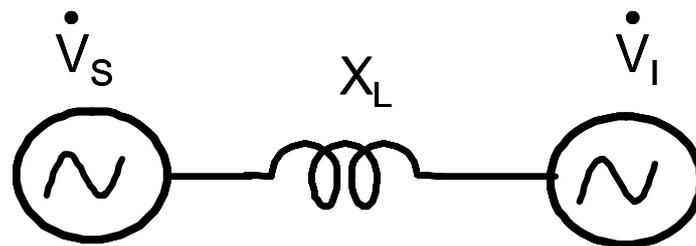


Figura 27 - Representação da rede e do condicionador de tensão.

Na Figura 27 temos:

\dot{V}_S – Tensão do sistema;

\dot{V}_C – Tensão do condicionador;

X_L – Reatância indutiva entre o sistema e o condicionador.

Na Figura 28 são mostrados os fasores das tensões da rede e nos terminais do condicionador. O ângulo δ é a defasagem entre as duas tensões. Em condições normais, em que o sistema de transmissão apresenta as três fases sãs, o ângulo deve ser controlado de forma que a potência drenada do sistema pelo condicionador seja equivalente às perdas do condicionador.

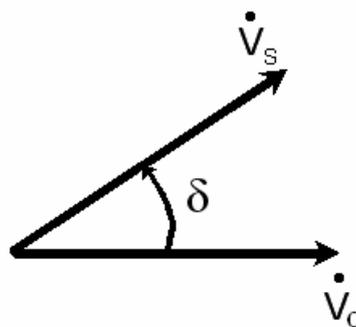


Figura 28 - Fasores das tensões do sistema e do condicionador.

A relação entre a potência ativa transferida e as variáveis apresentadas na Figura 27 é dada por:

$$P_s = \frac{V_s V_c}{X_L} \text{sen} \delta \quad (4-5)$$

Desta equação é possível perceber que o controle da potência transferida pode ser feito através do controle do ângulo de defasagem entre as tensões da rede e do condicionador. A potência ativa transferida é controlada pelo ângulo entre as tensões, uma vez que a amplitude das tensões deve ficar dentro de uma faixa especificada (em geral entre $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$) e a reatância é fixa na maioria dos casos.

A relação entre a potência reativa transferida e as variáveis apresentadas na Figura 27 é dada por:

$$Q_s = \frac{V_s}{X_L} (V_s - V_c \cdot \cos \delta). \quad (4-6)$$

Nesta equação vemos que o termo de maior importância está associado à diferença de amplitudes das tensões da rede e do condicionador. A potência reativa fornecida é mais diretamente afetada pela amplitude da tensão do compensador.

Como num STATCOM convencional, o controle de tensão da barra controlada pelo condicionador é feito através do controle da amplitude da tensão e do ângulo de fase entre a tensão da rede e do condicionador.

A tensão sobre o capacitor do lado CC é controlada através do ângulo de fase entre a tensão nos terminais do condicionador e a tensão na carga, conforme mostrado na Figura 29. Nesta figura tem-se:

V_{CC_ref} – Referência empregada para a tensão sobre o capacitor do lado CC;

V_{CC} – Tensão medida sobre o capacitor do elo CC;

δ_{CC} – Ângulo de fase obtido da saída do controlador proporcional integral associado ao controle da tensão do lado CC.

O sinal de tensão sobre o capacitor é medido e serve como realimentação de informação. A tensão sobre o capacitor é comparada com a tensão de referência estabelecida para o elo CC. O sinal de erro é utilizado como sinal de entrada de um controlador do tipo proporcional integral. A saída é um componente do ângulo de fase da tensão gerada pelo condicionador de tensão do lado da carga, representando a parte associada ao controle da tensão do elo CC. Em alguns casos o ajuste do controle pode ser mais facilmente obtido com a introdução de um filtro passa baixa antes do controlador proporcional integral. O diagrama de blocos referente ao controle da tensão do lado CC é apresentado na Figura 29.

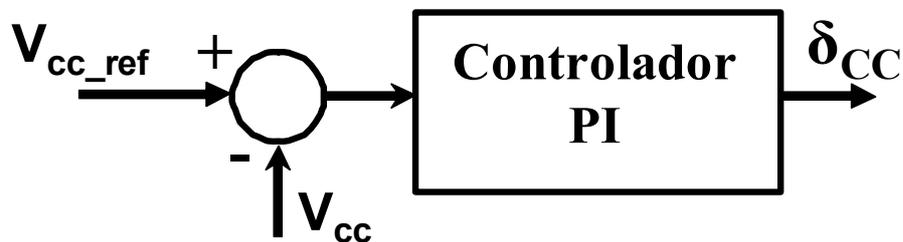


Figura 29 - Controle da tensão sobre o capacitor do lado CC.

O resultado desejado da operação do condicionador de tensão no lado da carga é manter a tensão dentro de uma dada especificação de qualidade. Tal especificação pode ser resumida como manter a amplitude de tensão dentro de uma faixa pré-estabelecida e a defasagem entre as tensões de fase, e conseqüentemente de linha, em 120° .

Para atingir o objetivo de manter a defasagem entre as tensões em 120° a estratégia de controle adotada é a seguinte:

- medir através de um detector de fase trifásico as fases de referência para as tensões v_a , v_b e v_c ;
- medir através de detectores de fase monofásicos as fases das tensões v_a , v_b e v_c ;
- obter o sinal de erro entre o valor obtido pelos detectores trifásico e monofásicos, para cada fase;
- filtrar o sinal de erro;
- utilizar o sinal de erro em um controlador proporcional integral.

O controle do ângulo de fase da tensão da fase “a” é apresentado na Figura 30, onde além do descrito anteriormente, o sinal referente ao controle da tensão no lado CC,

δ_{CC} , é adicionado ao sinal referente ao controle do ângulo de fase, δ_e . Nesta figura tem-se:

θ_{trif_a} – ângulo de fase do sistema obtido através do PLL trifásico de seqüência positiva;

θ_{mono_a} – ângulo de fase do sistema obtido através do PLL monofásico;

θ_a – ângulo obtido na malha de controle para compensar o erro entre os valores obtidos dos PLL trifásico e monofásico;

δ_{CC} – ângulo obtido na malha de controle para controlar a tensão CC;

δ_a – ângulo total da fase “a”, obtido da soma dos ângulos do controle da tensão sobre o capacitor no elo CC e do controle da compensação do erro entre os ângulos obtidos através PLLs monofásico e trifásico.

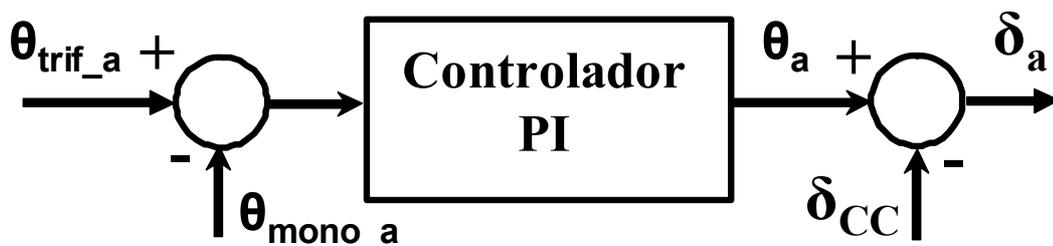


Figura 30 - Controle do ângulo de fase da tensão da fase "a".

Em alguns casos o ajuste do controle pode ser mais facilmente obtido com a introdução de um filtro passa baixa antes do controlador proporcional integral.

Os ângulos totais das demais fases, “b” e “c” são obtidos da mesma forma descrita acima.

4.5 Qualidade de Tensão - Lado da Carga

A qualidade da tensão no lado da carga deve atender aos índices especificados pelo usuário da energia, pela concessionária de energia ou em comum acordo entre ambos.

Há uma relação de parâmetros de qualidade de tensão que servem de referência e que devem ser respeitados.

Com relação à tensão no ponto de consumo, os parâmetros de qualidade são:

- tolerância da tensão em operação contínua;
- desequilíbrio de tensão;
- variação cíclica de tensão de forma contínua;
- variação transitória lenta devida à variação da carga;
- tempo máximo de recuperação da tensão em caso de variação transitória;
- limite da componente de seqüência negativa;
- limite da componente de seqüência zero.

Com relação à presença de harmônicos, os parâmetros de qualidade são:

- distorção harmônica total - THD;
- componentes harmônicos individuais;
- *notches* (recortes) na tensão.

Com relação à frequência da tensão no ponto de consumo, os parâmetros de qualidade são:

- tolerância para operação contínua;
- variação cíclica da frequência;
- tolerância da frequência sob transitórios;
- tempo de recuperação da frequência em transitórios.

Os índices que são indicados pelo ONS e em normas estrangeiras e internacionais estão relacionados de forma detalhada no Apêndice 7.

Como critérios de projeto, para unidades marítimas de produção, os limites de distorção de harmônicos de tensão estabelecidos pela IEEE Std 519-1992 [85], para sistemas dedicados, e pela IEC 61892-1 [84] devem ser destacados.

4.6 Resumo e Conclusão

Neste capítulo, o condicionador é descrito de forma detalhada e alguns tópicos podem ser destacados:

- descrição do circuito de potência;
- identificação dos ângulos de fase;

- malha de controle;
- técnicas de chaveamento;
- parâmetros de qualidade de tensão e corrente.

Com relação ao circuito de potência, cabe destacar a utilização de inversores monofásicos com um capacitor e lado CC comum aos três inversores. Na parte relativa à identificação dos ângulos de fase temos a utilização de PLLs monofásicos e um trifásico capaz de operar com desequilíbrio de tensão. A técnica de chaveamento utilizada é a modulação por largura de pulso do tipo seno triângulo.

No que diz respeito à qualidade de tensão e corrente são apresentados limites estabelecidos pelas normas técnicas IEEE Std 519-1992 [85], IEC 61892-1 [84] e Requisitos do ONS [87] e [88]. As citadas normas apresentam limites para distorção harmônica total e individual e *notches*, além disso, apresentam os limites de desequilíbrio de tensão permissível.

O controle adotado utiliza controladores do tipo proporcional e integral para controle da tensão do capacitor no lado CC dos inversores, do módulo da tensão de cada fase do sistema e ainda dos ângulos de fase de cada inversor. A intenção é, através destes controladores, obter tensões equilibradas, de mesma amplitude para as três fases e defasadas de 120° elétricos entre si., somado a isso temos a manutenção da tensão contínua do capacitor controlada.

5. Simulações Computacionais

Neste capítulo são apresentadas as simulações computacionais referentes aos estudos de operação do condicionador de tensão do lado da carga. O sistema considerado é constituído de uma fonte de energia, um sistema de transmissão de energia e um grupo de cargas do tipo industrial que é conectado à fonte através do sistema de transmissão. Existem dois condicionadores de potência, com funções diferentes, localizados nas extremidades do cabo elétrico, um situado do lado da fonte e o outro do lado da carga.

A modelagem empregada e as simulações computacionais foram realizadas no domínio do tempo. O programa computacional utilizado foi o EMTDC™ (*Electromagnetic Transients for DC*) que é empregado com sua interface gráfica PSCAD™ (*Power Systems Computer Aided Design*). O programa citado utiliza a integração trapezoidal, assim como outros programas de simulação no domínio do tempo bem conhecidos: EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), ATP (*Alternative Transient Program*) e MicroTran. A integração trapezoidal é utilizada conforme apresentada por Dommel [89] em 1969, por Dommel e Meyer em [90] e no manual do programa EMTP [91]. O programa utilizado representa e resolve as equações diferenciais associadas ao sistema elétrico de potência e módulos de controle no domínio do tempo. Outra característica importante do programa é um algoritmo de interpolação para as operações de chaveamento. Este algoritmo permite que o evento de chaveamento ocorra no momento exato, mesmo que seja entre dois passos de integração. Assim, a passagem da corrente por zero em um dispositivo de chaveamento pode ser simulada com o evento no momento exato sem a necessidade de reduzir o passo de integração. O programa utiliza um algoritmo para eliminação de oscilações numéricas chamado de “*Numerical Chatter Supression*” ou “*Chatter Removal Algorithm*”. Neste algoritmo, o ruído, ou oscilação, é removido utilizando a interpolação com metade do passo de integração original.

5.1 Caso Base

Para a avaliação do desempenho do sistema de transmissão proposto, especialmente do condicionador de tensão, é necessário realizar simulações computacionais de um sistema elétrico que representem as situações típicas de alimentação de um sistema elétrico industrial isolado. Desta forma, tais simulações foram realizadas tendo como base o caso descrito a seguir.

O caso base considerado para os estudos em questão apresenta um sistema trifásico em 60 Hz com uma tensão da fonte de 10 kV uma tensão de transmissão de 100 kV, tensão de consumo de 10 kV e carga composta de cargas do tipo resistiva e indutiva e cargas motóricas representadas por motores de indução equivalentes. A carga industrial representada é da ordem de 100 MVA e com fator de potência de aproximadamente 0,8, indutivo, isso implica em dizer que a potência ativa da carga é de aproximadamente 80 MW. Quando o motor não está em operação, a carga simulada é de 70 MW. A distância entre fonte e carga é de 100 km e a transmissão de energia é feita através de cabos singelos. A Figura 31 apresenta o esquema representativo do sistema elétrico utilizado nas simulações do caso base com todos os componentes considerados e que serão detalhados mais adiante: a rede de alimentação, o transformador elevador, o cabo de transmissão, o transformador abaixador, a carga elétrica, o filtro ativo do lado da fonte e o condicionador de tensão do lado da carga.

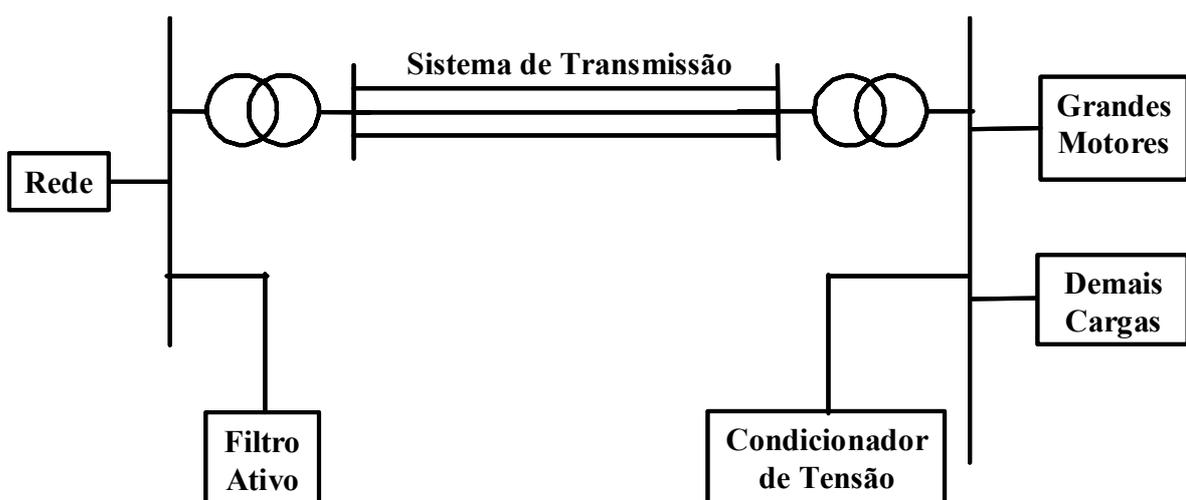


Figura 31 - Esquema representativo do caso base.

5.1.1 Rede

A fonte de alimentação considerada neste sistema em estudo é uma concessionária de energia, considerando que o sistema de geração que fornece energia elétrica para esta concessionária se encontra “distante”. Sendo assim, a dinâmica associada à regulação de frequência não está sob análise, o mesmo pode ser dito da regulação de tensão da fonte.

Os dados básicos referentes à fonte de alimentação são:

Tensão nominal: 10 kV;
Número de fases: 3;
Frequência nominal: 60 Hz;
Potência de curto-circuito: 1090 MVA
Relação X/R = 50.

A potência de curto-circuito considerada está associada a um valor de corrente de curto circuito da ordem de 63 kA.

5.1.2 Transformador Elevador

O transformador elevador é um equipamento utilizado para elevar a tensão de geração ou da fonte de alimentação para uma tensão de valor mais alto e mais adequado à transmissão de energia elétrica, com tensões mais elevadas e para uma mesma potência de transmissão, o sistema opera com um valor de corrente mais reduzido. Nesta condição é possível reduzir as perdas elétricas, a secção transversal dos condutores e fazer a transmissão de forma mais econômica.

Entre a fonte de alimentação e o cabo de transmissão existe um transformador elevador com as seguintes características:

Potência nominal: 100 MVA;
Tensão primária nominal: 10 kV;
Conexão primária: delta;

Tensão secundária nominal: 100 kV;

Conexão secundária: Estrela com neutro isolado;

Frequência nominal: 60 Hz;

Reatância de dispersão: 5%;

Perdas no cobre: 1,0%;

Perdas no ferro: 0,5%;

A saturação do núcleo do transformador não foi considerada nas simulações deste trabalho.

Além da conexão delta-estrela, em algumas simulações, onde indicado, foram empregados transformadores com conexão estrela-estrela, neste caso, a abertura do disjuntor foi feita no primário e no secundário. Nestas simulações todos os demais parâmetros do transformador elevador foram mantidos com os mesmos valores apresentados neste item.

5.1.3 Condicionador do Lado da Fonte – Filtro Ativo *Shunt*

O condicionador do lado da fonte tem por objetivo condicionar a carga vista pela fonte, o objetivo é fazer com que a corrente fornecida pela fonte seja equilibrada e sem harmônicos. Desta forma, devemos minimizar correntes de seqüência negativa e zero, além dos harmônicos. O condicionador de corrente empregado com esta finalidade é um Filtro Ativo de Potência com as seguintes características:

Tipo: Filtro Ativo de Potência *Shunt*;

Algoritmo de controle: Correntes senoidais de Fryze (conforme descrito no capítulo 3);

Transformador de entrada:

- . Conexão: Delta-Delta;
- . Tensões: 10 kV / 4,16 kV;
- . Potência nominal: 100 MVA;
- . Reatância de dispersão: 10%;
- . Perdas no cobre: 1%;
- . Perdas no ferro: 0,5%;
- . Saturação: não modelada.

Conversor: Fonte de tensão;

Dispositivos semicondutores de potência: IGBTs;

Capacitância do lado CC: 10.000 μ F;

Tensão de referência do lado CC: 2,5 pu ou $V_{CCref} = 2,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 4,16 = 14,7$ kV

Controlador Proporcional Integral do PLL do Condicionador: Ganho proporcional igual a 35 e constante de tempo integral igual a 0,12 ms, frequência angular inicial igual a 377 rad/s.

Controlador Proporcional Integral do controle da tensão do lado CC do Filtro Ativo: Ganho proporcional igual a 1,0 e constante de tempo integral igual a 0,41 s com o valor inicial da frequência angular igual a 377 rad/s.

O capacitor do lado CC do conversor é pré-carregado através de uma fonte CC de 14 kV dedicada para esta finalidade, a fonte CC é conectada ao capacitor em $t = 0,001$ s e desconectada em $t = 0,040$ s.

Nos terminais do condicionador de corrente do lado da fonte foram colocados filtros harmônicos passivos com as seguintes características: um banco capacitivo de 3,77 Mvar e um filtro de 5º harmônico (LC série de 10 μ F e 28,1 mH). Os referidos filtros foram conectados na barra de 10 kV. O dimensionamento dos filtros harmônicos é feito, de forma que, sendo um filtro passa baixa, tenha sua frequência de corte entre 600 e 900 Hz.

5.1.4 Cabo Elétrico Isolado

Para a transmissão da energia elétrica entre a fonte e a carga foram empregados três cabos elétricos singelos. As características desses cabos são apresentadas a seguir:

Comprimento: 100 km;

Seção transversal: 500 mm²;

Material do condutor: Cobre;

Resistência do condutor por unidade de comprimento: 50,3 m Ω /km;

Reatância indutiva série por unidade de comprimento: 200 a 300 m Ω /km (casos diferentes);

Reatância capacitiva relativa à unidade de comprimento: 13.100 Ω .km.

As reatâncias apresentadas são à frequência de 60 Hz. O cabo elétrico foi representado por 10 circuitos equivalentes em arranjo tipo π . Algumas simulações foram realizadas com o *Phase Model* (dependente da frequência).

O valor de resistividade do meio ambiente onde o cabo se encontra (água do mar) utilizado foi 0,25 Ω .m.

5.1.5 Transformador Abaixador

O transformador tem por finalidade reduzir a tensão de transmissão a valores mais adequados às cargas típicas de um sistema industrial, de forma coerente com as classes de isolamento de motores elétricos e painéis de média tensão.

Para adequar a tensão recebida através do cabo de transmissão à necessidade da carga elétrica existe um transformador abaixador com os seguintes dados técnicos:

Potência nominal: 100 MVA;

Tensão primária nominal: 100 kV;

Conexão primária: delta;

Tensão secundária nominal: 10 kV;

Conexão secundária: Estrela com neutro isolado;

Frequência nominal: 60 Hz;

Reatância de dispersão: 5%;

Perdas no cobre: 1,0%;

Perdas no ferro: 0,5%.

Além da conexão delta-estrela, a conexão estrela-estrela também foi utilizada em algumas simulações computacionais, conforme indicado nos casos apresentados.

A saturação do núcleo do transformador não foi modelada nas simulações apresentadas.

5.1.6 Condicionador de Tensão – Lado da Carga

O condicionador de tensão do lado da carga tem por objetivo condicionar a tensão vista pela carga, o objetivo é fazer com que a tensão recebida pela carga seja equilibrada. Desta forma, as tensões de seqüência negativa e zero devem ser

minimizadas. O condicionador empregado com esta finalidade tem as seguintes características:

Tipo: Condicionador de tensão;

Descrição: Três inversores de tensão monofásicos em ponte H;

Transformador monofásico de entrada:

. Tensões nominais: 5,77 kV / 5,77 kV;

. Potência nominal: 40 MVA;

. Reatância de dispersão: 4%;

. Perda no cobre: 1,0%;

. Perda no ferro: 0,5%.

Conexão dos transformadores: conforme apresentado na Figura 17;

Tipo: Conversor Fonte de tensão;

Dispositivos semicondutores de potência: IGBTs ou IGCTs com diodos em antiparalelo;

Capacitância do lado CC: 80.000 μ F;

Tensão de referência do lado CC: 25 kV;

Tipo de chaveamento: Modulação por largura de pulsos – PWM;

Frequência de chaveamento: 3,0 kHz;

Nos terminais do condicionador de tensão do lado da carga, na barra de 10 kV, foi conectado um filtro passivo que consiste de um banco capacitivo de 15,08 Mvar.

O capacitor do lado CC do condicionador de tensão é pré-carregado por uma fonte CC dedicada a esta finalidade. A tensão da fonte CC é de 25 kV e a fonte fica conectada em paralelo ao capacitor entre $t = 0,0s$ e $t = 0,15s$, deste tempo em diante o controle da tensão CC sobre o capacitor mantém esta regulada no valor de referência indicado. O dimensionamento dos filtros harmônicos é feito, de forma que, sendo um filtro passa baixa, tenha sua frequência de corte entre 600 e 900 Hz. A operação do sistema é em 60 Hz e a frequência de chaveamento do condicionador é igual a 3,0 kHz.

A tensão de referência do lado CC poderia ter um valor mais baixo, como é típico em conversores fonte de tensão, sendo da ordem de 1,2 a 1,3 pu em relação à tensão de pico do lado CA. Neste caso, com a redução da tensão, seria necessário aumentar a capacitância para manter a constante de inércia do condicionador.

5.1.6 Carga Elétrica Suprida pelo Sistema

A carga suprida pelo sistema possui características de carga resistiva e indutiva. Uma vez que se trata de carga industrial, ocorre ainda a presença de motores de indução de grande porte.

Tensão nominal: 10 kV;

Frequência nominal: 60 Hz;

Carga nominal total (motor e demais cargas): 100 MVA;

Fator de potência nominal: 0,8 (indutivo);

Motor elétrico de grande porte considerado:

- . Tipo: Motor de indução trifásico;
- . Potência nominal: 10 MW;
- . Tensão nominal: 10 kV;
- . Fator de potência nominal: 0,85;
- . Rendimento nominal: 98,5%;
- . Corrente de partida: 400%.

A carga elétrica, sem o motor elétrico, é representada por uma associação série RL (resistência e indutância) e com conexão em estrela. A carga elétrica quando o motor está fora de operação é 70 MW e com este em operação a totaliza 80 MW, com fator de potência 0,8 indutivo.

5.1.7 Parâmetros de Simulação

As simulações computacionais realizadas tiveram os seguintes parâmetros básicos típicos:

- Passo de integração: 10 μ s;
- Passo de armazenagem para impressão em gráficos: 200 a 500 μ s;
- Duração dos eventos simulados: 5 a 20 s.

O passo de integração foi adotado de forma que a simulação mantivesse a precisão desejada sem que o tempo total de simulação se tornasse inviável. Outros passos maiores e menores foram adotados e o passo de 10 μs foi o valor adotado.

A definição do passo de armazenagem foi feita após a verificação se a amostragem nos períodos indicados poderia omitir informação relevante nos gráficos das variáveis simuladas.

Para evitar que partes do sistema ficassem isolados do nó de referência, a terra, os trechos sem acoplamento capacitivo para a terra ou aterramento foram conectados à terra através de resistências de, no mínimo, 1,0 G Ω .

Dependendo do caso simulado, o número de nós do sistema elétrico está em torno de 285.

5.2 Eventos Simulados

Para comprovação do funcionamento do condicionador de tensão em circunstâncias similares àquelas encontradas em situações reais, é necessário simular o funcionamento do sistema e os eventos típicos de operação deste sistema elétrico.

Os seguintes eventos foram considerados durante a operação do sistema sob estudo:

- Operação normal em regime permanente;
- Operação durante a partida direta de um motor de indução de 10 MW;
- Operação durante a interrupção da condução de um dos cabos da transmissão com o sistema em operação normal em regime;
- Operação durante a interrupção da condução de um dos cabos da transmissão com a partida direta de um motor de 10 MW;
- Operação durante a ocorrência de um curto-circuito trifásico franco e sua eliminação em 100 ms.

5.2.1 Operação Normal em Regime Permanente

O objetivo desta condição operacional de simulação é observar a operação dos condicionadores em situação de transmissão de energia em regime permanente sob condições normais de operação.

É desejado que, em condições normais, o condicionador procure manter a amplitude de tensão no valor de referência especificado.

A operação normal em regime permanente deve ser possível para valores de carga abaixo do valor nominal e com qualquer fator de potência, desde que respeitado o limite de amplitude de corrente do sistema e do condicionador.

Nesta condição de operação normal, o condicionador de tensão do lado da carga deve atuar como compensador estático de reativos, provendo reativos de forma a atuar no controle da amplitude da tensão na barra de carga ou do fator de potência.

A capacidade de atuação do condicionador é limitada pela corrente que este é capaz de manipular, o que, na prática, depende dos dispositivos semicondutores de chaveamento utilizados no condicionador.

5.2.2 Partida direta de um motor de indução

Sistemas industriais com frequência apresentam cargas motóricas importantes, estas cargas podem ser de frações de kW a vários MW de potência nominal de eixo. Um dos problemas típicos é o dimensionamento e especificação de sistemas elétricos capazes de partir e operar motores elétricos de valores determinados de potência. Quanto maior a corrente de partida do motor e menor o nível de curto-circuito da barra de alimentação deste motor, maior é a queda de tensão durante a aceleração da máquina em análise. Tal queda de tensão durante a partida pode afetar a operação de outras cargas do sistema e provocar desligamentos de cargas e prejuízos financeiros associados a lucro cessante. Além disso, o motor que está partindo pode ter sua partida prolongada ou inviabilizada pela redução do torque motriz devido à redução da tensão disponível nos terminais do motor.

Sendo assim, uma outra condição de interesse é a partida de um motor de indução capaz de provocar uma queda de tensão significativa na barra de carga. Considera-se como queda significativa quando esta for superior a 10% do valor nominal.

O desempenho especificado e desejado do sistema é manter a queda de tensão em valores inferiores a 5%, neste caso.

O condicionador do lado da carga deve atuar de forma a prover reativos suficientes para reduzir a queda de tensão a valores aceitáveis.

Motores de indução de grande porte, entendendo grande porte como potências entre 5 MW e 15 MW, possuem correntes de partida típicas de 450% a 550% de sua corrente nominal. Porém, dependendo do tipo de carga, da curva torque versus rotação e da inércia é possível empregar motores com corrente de partida reduzida. Os valores de corrente destes motores de corrente de partida reduzida estão entre 250% e 400% de sua corrente nominal. Este tipo de solução auxilia na redução da queda de tensão associada à partida destes motores de grande porte. Outros recursos para promover a redução da queda de tensão na partida podem ser usados: reatores em série, dispositivos eletrônicos

de partida suave ou *soft starter*, bancos de capacitores de partida, auto-transformadores de partida e conversores de frequência são alguns exemplos de métodos de partidas de motores.

Porém o conceito aqui discutido deve atuar independentemente do método de partida empregado. Sendo assim, o condicionador de tensão deve atuar para compensar os reativos demandados pelo motor durante a partida deste sem que isso impeça a operação normal do sistema.

5.2.3 Desligamento Monopolar

Uma terceira condição de operação desejada é a possibilidade de operar o sistema sem perda de desempenho durante a perda de uma das fases do sistema de transmissão. Naturalmente, haverá redução na potência máxima fornecida à carga.

Neste caso, o compensador do lado da carga deve compor a fase perdida a partir das outras duas fases remanescentes. Além disso, deve manter a amplitude da tensão dentro da faixa especificada e minimizar a componente de seqüência negativa. O ideal é que isso ocorra em duas situações distintas: no caso de desligamento de uma fase com o sistema operando, este desligamento não deve provocar interrupção de fornecimento de energia ao sistema e em caso de energização inicial do sistema com somente duas fases disponíveis.

O compensador do lado da fonte deve atuar de forma a minimizar as componentes de seqüência negativa de corrente vistas pela fonte durante o período de operação com uma fase a menos.

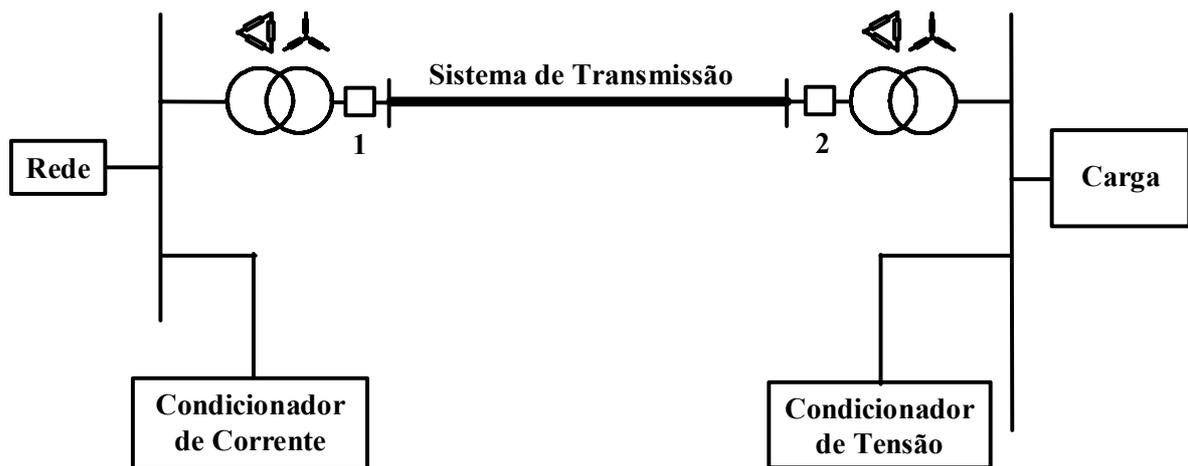


Figura 32 – Disjuntores - com transformadores delta-estrela.

Na Figura 32 são mostrados os disjuntores que são abertos quando do desligamento monopolar e com transformadores conectados em delta-estrela. São abertos os disjuntores 1 e 2, mas somente o pólo, de cada disjuntor, referente à fase A.

Na Figura 33 são mostrados os disjuntores que são abertos quando do desligamento monopolar e com transformadores conectados em estrela-estrela. São abertos os disjuntores 1, 2, 3 e 4, mas somente o pólo, de cada disjuntor, referente à fase A.

Em ambos todos os casos, o sistema de transmissão (entre os dois transformadores de potência) é composto por três cabos unipolares e a perda de uma fase ocorre com a abertura monopolar do disjuntor desta fase.

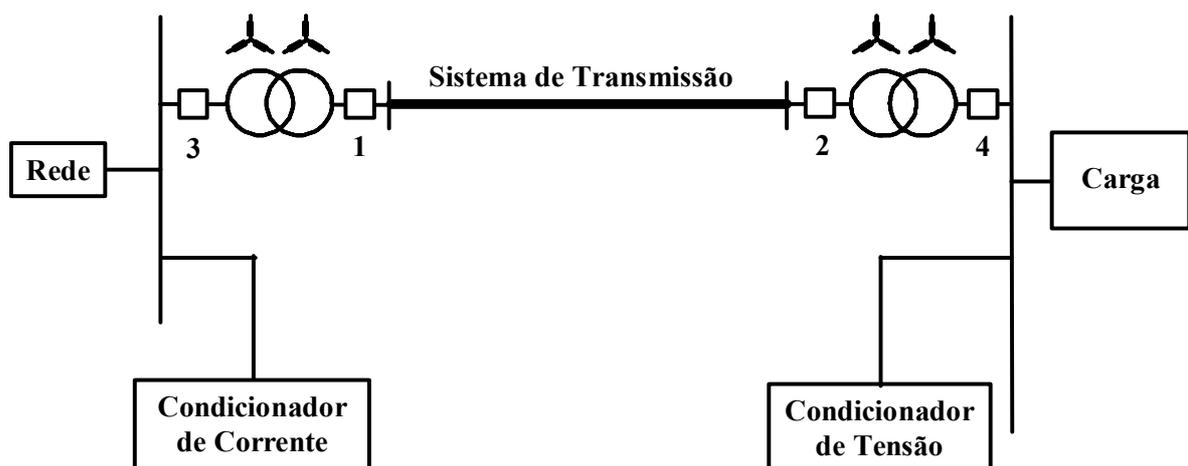


Figura 33 - Disjuntores - com transformadores estrela-estrela.

5.2.4 Partida Direta de um Motor de Indução Durante Desligamento Monopolar

Uma condição freqüente de operação é a partida direta de um motor de indução. Esta condição deve continuar sendo atendida mesmo durante a situação de desligamento de uma das fases de transmissão. É desejado que a mesma faixa de tolerância da tensão seja respeitada.

Neste caso, a simulação envolve o desligamento de uma das fases e a manutenção do sistema em operação nesta nova situação. Algum tempo depois, é simulada a partida do motor de indução diretamente sobre a rede.

Esta é uma condição mais rigorosa pois envolve simultaneamente as condições anteriormente descritas.

5.2.5 Curto-circuito trifásico

A ocorrência de defeitos no sistema é uma situação que deve ser prevista e não deve trazer conseqüências irreversíveis para o sistema. É desejável que o sistema continue em operação normal após a eliminação da falta pela proteção. Com isto, não é necessário fazer a repartida do sistema com o procedimento completo de início de operação a partir da conexão da fonte de alimentação. No entanto, é considerado aceitável que eventos como um curto-circuito trifásico na fonte de alimentação ou na carga, no nível de alta ou média tensão, provoquem a interrupção momentânea com repartida. Neste caso, é considerado que esses eventos são muito pouco freqüentes ou prováveis de ocorrer e a paralisação por um período curto é aceita. O que não pode ocorrer é que o dano seja tal que exija manutenção corretiva demasiadamente longa e impeça a repartida imediata. Para evitar esse tipo de conseqüência, a proteção do sistema deve ser sensível e rápida o suficiente para minimizar os danos aos componentes do sistema.

O caso de defeito simulado será o de curto-circuito trifásico com segregação do mesmo através da abertura de um disjuntor 100 ms após sua ocorrência. A impedância da falta considerada é de 0 (zero) ohms, ou seja, um curto franco.

5.3 Resultados

Neste item serão apresentados os resultados das simulações computacionais obtidas para os requisitos e condições de operação descritos no item anterior.

Inicialmente, cada componente do sistema foi simulado separadamente de forma a verificar seu funcionamento individual. Após as implementações dos módulos individuais, estes foram colocados no sistema completo e verificada a operação conjunta.

Nas simulações apresentadas a seguir, pode ser verificado que os valores eficazes das tensões tem um atraso em relação à tensão instantânea, isto está associado ao cálculo do valor eficaz. Além disso, utilização de filtragem no sinal eficaz de tensão é útil para tornar o controle mais estável.

A seguir são apresentadas as simulações da operação conjunta em diversas situações de interesse.

5.3.1 Operação Normal em Regime Permanente

Neste estudo, o sistema é energizado em $t = 0,0$ s, em $t = 1,5$ s entra em operação o condicionador de tensão do lado da carga e em $t = 2,8$ s o filtro ativo entra em operação.

Temos então, em função do tempo:

Instante de tempo (s)	Evento
$t = 0,0$	Início de operação do sistema e da simulação.
$t = 1,5$	Início de operação do condicionador de tensão da carga.
$t = 2,8$	Início de operação do filtro ativo do lado da fonte.

A Figura 34 mostra os principais resultados, são mostrados de cima para baixo: as respostas de valor eficaz das tensões das fases a, b e c, os fatores de modulação de amplitude relativos a cada inversor de cada fase, a tensão sobre o capacitor do lado CC e os ângulos de fase relativos às fases do condicionador.

O sistema elétrico tem a operação iniciada em $t = 0,0s$ e dentro de aproximadamente um segundo a tensão nos terminais da carga chegou ao equilíbrio em um valor próximo a 1,035 pu. O condicionador de tensão inicia a operação em $t = 1,5s$ e inicia o controle da tensão da carga. Neste momento, a tensão da carga é levada a 1,0 pu. Existe um comportamento transitório entre $t = 1,5$ e $4,0s$ e após $t = 4,0s$ a tensão eficaz tem seu valor estabilizado em 1,0 pu, conforme valor de referência ajustado. Além disso, a tensão do lado CC é controlada para se manter em 25 kV.

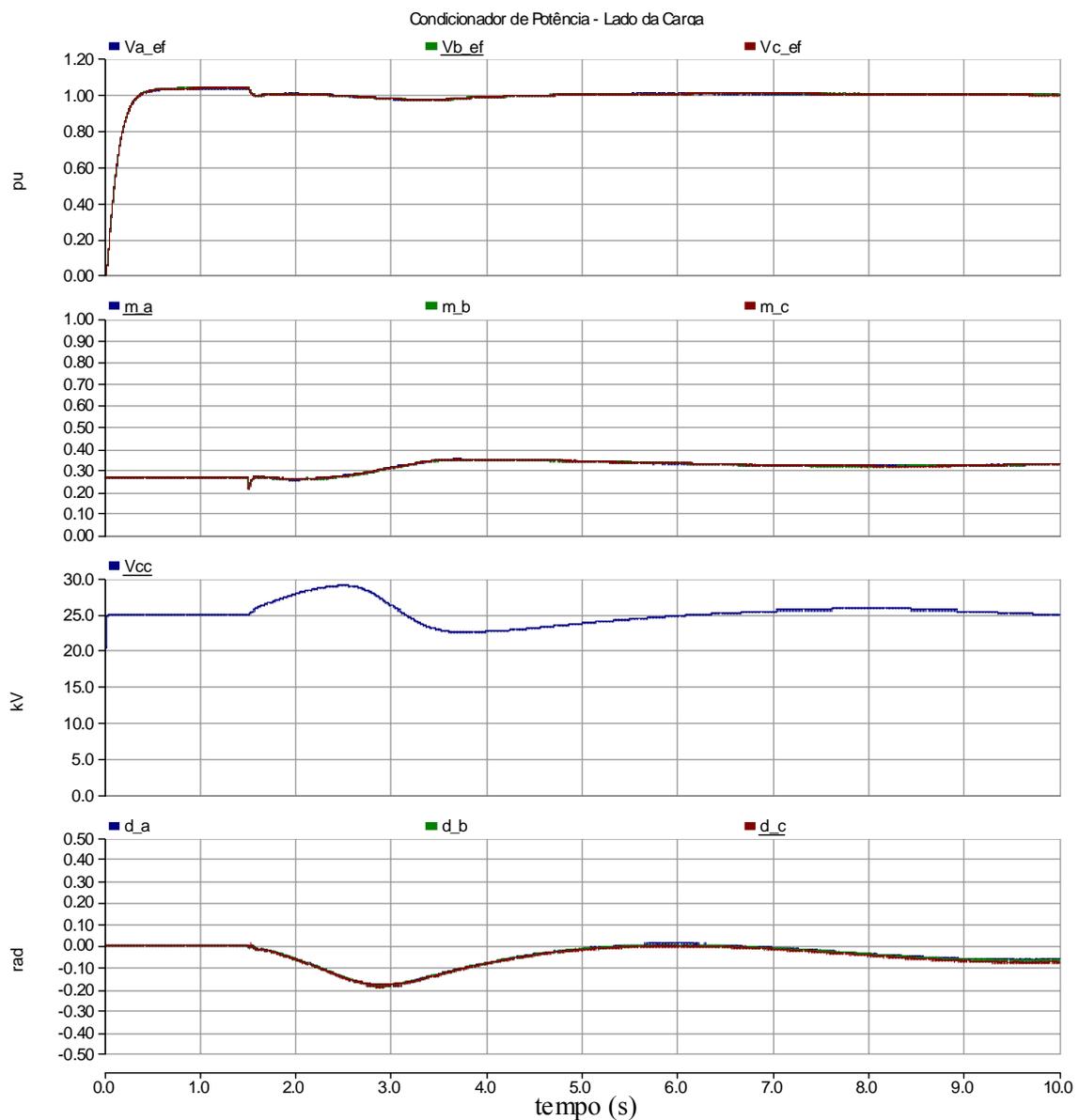


Figura 34 - Operação do condicionador de tensão em regime permanente.

5.3.2 Partida direta de um motor de indução

O evento considerado, neste item, é a partida direta de um motor de indução de 10 MW sobre o sistema proposto, a entrada ocorre em $t= 3,0$ s e este sai em $t= 8,0$ s. Na Figura 35 são apresentadas as curvas das tensões na barra de carga e as potências ativas e reativas da carga. Neste caso, o condicionador não atua e a carga inicial é 70 MW, modelada como impedância constante. A tensão na barra cai de 1,01 pu para 0,83 pu.

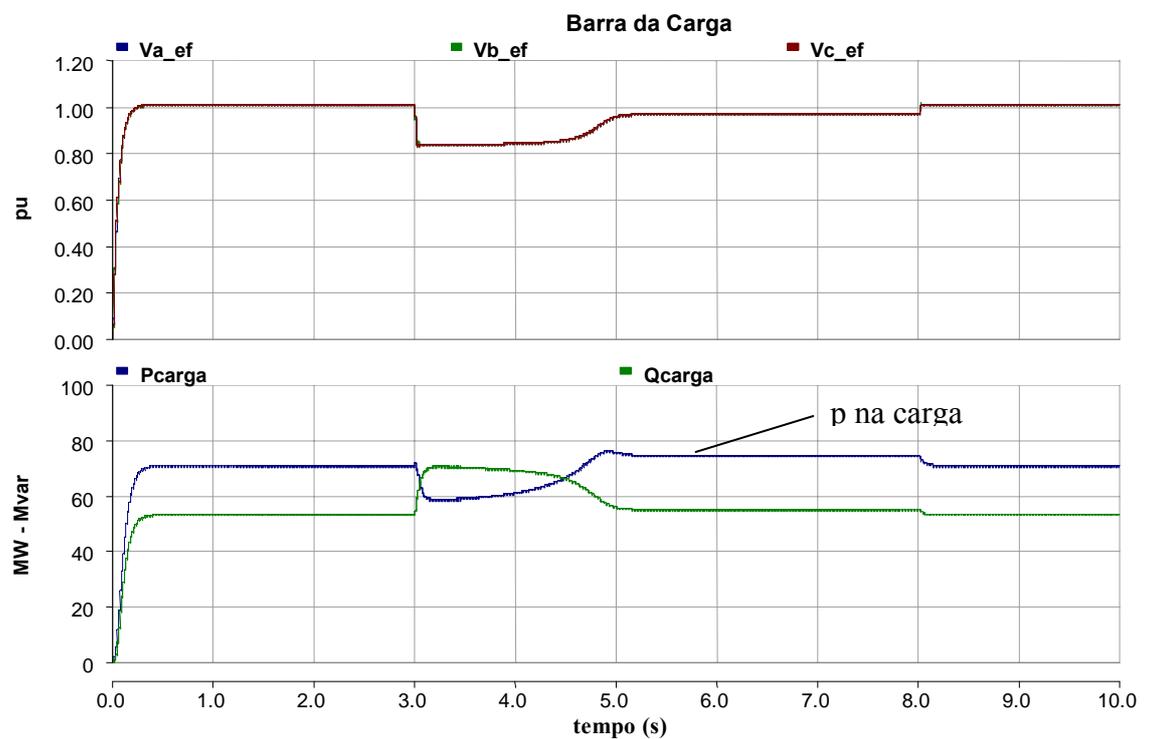


Figura 35 - Partida do motor de 10 MW - Sem condicionador de tensão.

Na Figura 36 são apresentadas as curvas das tensões na barra de carga e as potências ativas e reativas da carga. Neste caso, o condicionador não atua e a carga inicial é 70 MW, sendo modelada como impedância constante, a potência de 30 MW e com a existência de uma carga motórica inicial igual a 40 MW. A tensão na barra cai de 1,0 pu para 0,76 pu com a partida do motor em $t= 3,0$ s a tensão é recuperada com a aceleração do motor e retorna a 1,0 pu com o desligamento do motor em $t= 8,0$ s.

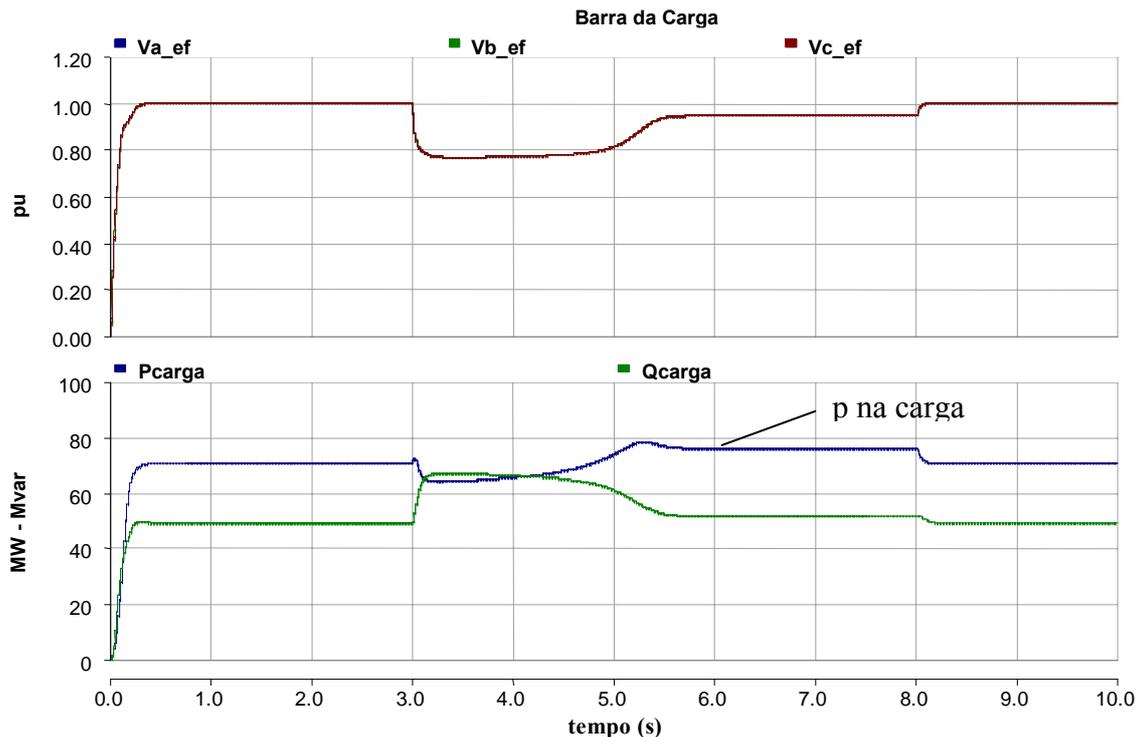


Figura 36 - Partida do motor de 10 MW - carga inicial motórica – sem condicionador.

Condição com atuação do condicionador de tensão

A próxima simulação apresenta a atuação do condicionador de tensão durante a partida do motor. No caso apresentado, ainda não é feita a perda de fase. Esta perda de fase será mostrada mais adiante.

Em $t=0$ s o sistema é energizado. Em seguida o condicionador de tensão do lado da carga é posto em operação. Pouco depois o condicionador de corrente no lado da fonte inicia a operação. Temos então a partida de um motor de indução de 10 MW na barra da carga e por fim o motor é desligado.

Segue a relação de eventos em função do tempo:

Instante de tempo (s)	Evento
$t = 0,0$	Início de operação do sistema e da simulação.
$t = 1,5$	Início de operação do condicionador de tensão na carga.
$t = 2,8$	Início de operação do filtro ativo do lado da fonte.
$t = 3,0$	Partida do motor de 10 MW.
$t = 8,0$	Desligamento do motor de 10 MW.

Entre $t= 0,0$ s e $t= 1,5$ s o sistema opera sem o funcionamento de condicionadores de potência. Entre $t= 1,5$ s e $t= 2,8$ s o sistema opera tendo o condicionador de tensão em funcionamento de forma a suprir a carga com tensões equilibradas. Entre $t= 2,8$ s e $3,0$ s temos o funcionamento do filtro ativo do lado da fonte antes da partida do motor. Entre $t= 3,0$ s e $t= 8,0$ s ocorre a partida, a aceleração e finalmente o desligamento do motor de 10 MW.

Na Figura 37 são mostrados de cima para baixo: as respostas de valor eficaz das tensões das fases a, b e c, os fatores de modulação de amplitude relativos a cada inversor de cada fase, a tensão sobre o capacitor do lado CC e os ângulos de fase relativos às fases do condicionador.

A tensão eficaz na barra da carga cai de 100% para 94% quando ocorre a partida do motor e durante o transitório a tensão é recuperada e atinge um máximo de 103%. Logo após a tensão é controlada em 100% e após a saída do motor esta tensão sofre pequena elevação indo a 101% e depois retornando ao valor de referência.

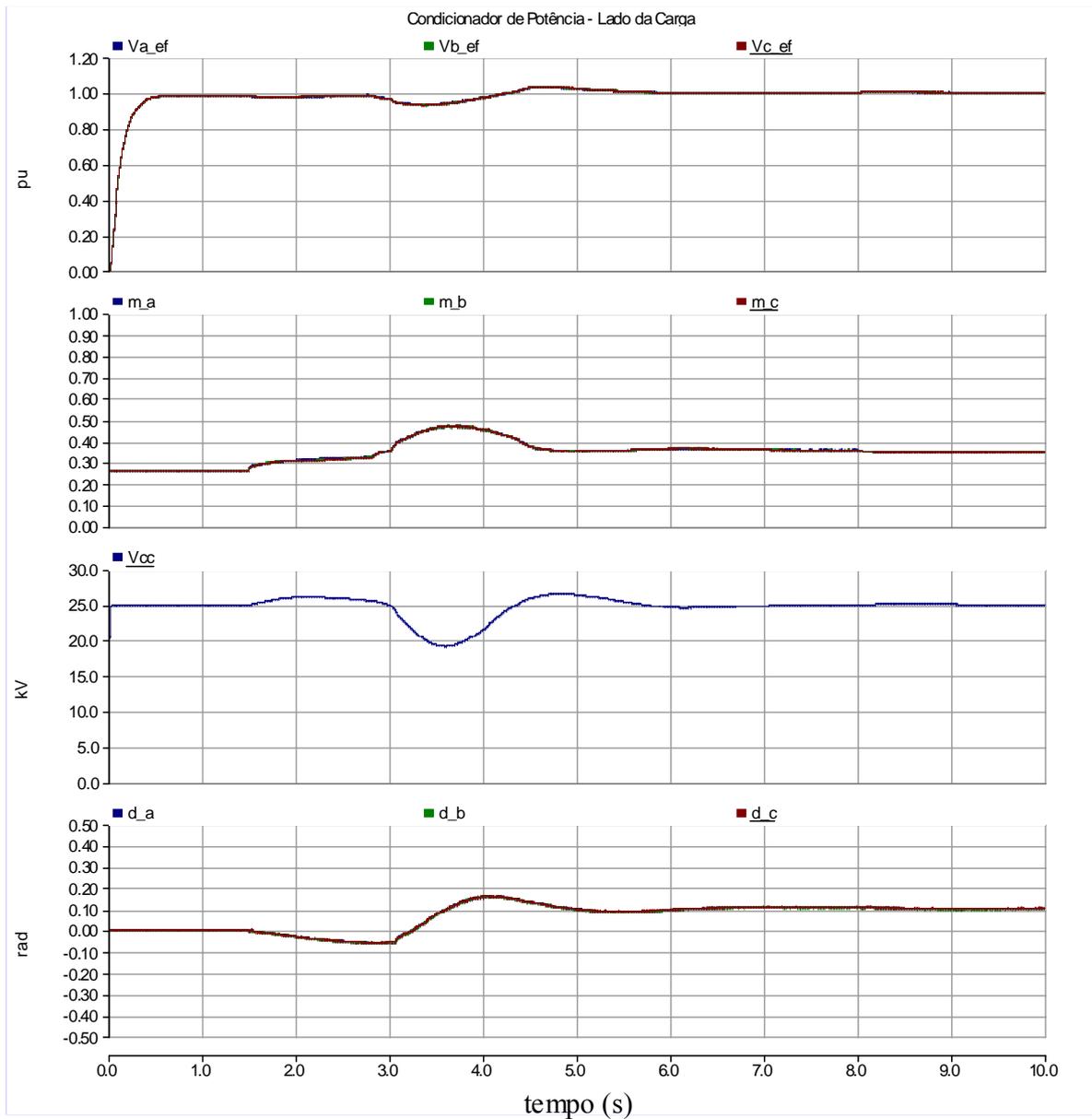


Figura 37 - Condicionador de tensão durante partida do motor - Lado da Carga.

Na Figura 38 são apresentadas de cima para baixo: as tensões de linha, as tensões de fase na barra de carga e as correntes na carga. É possível observar a elevação da corrente entre $t= 3,0$ s e $t= 4,5$ s durante a partida do motor. E em $t= 8,0$ s ocorre a redução da corrente devido à retirada do motor do circuito.

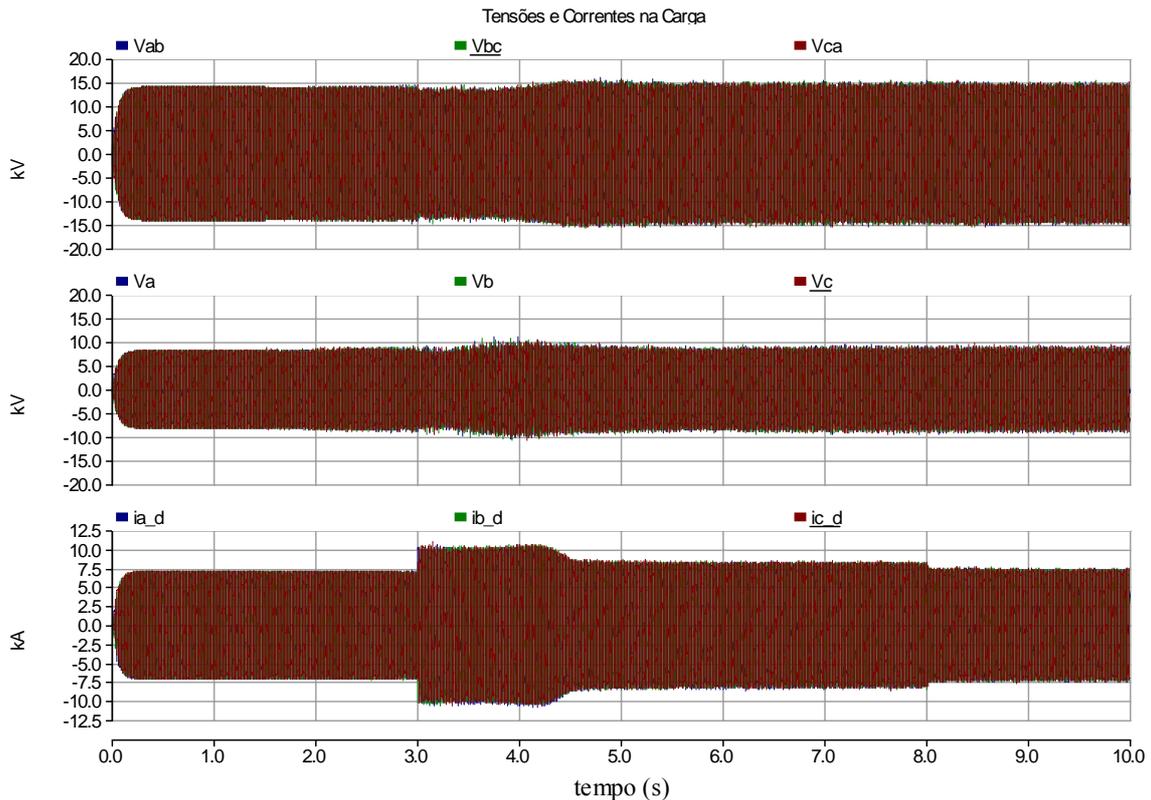


Figura 38 - Tensões e correntes na carga durante a partida do motor.

5.3.3 Desligamento Monopolar

Neste modo de operação, o sistema opera com os disjuntores da fase A abertos e com a atuação dos condicionadores do lado da fonte e do lado da carga.

Segue a relação de eventos em função do tempo:

Instante de tempo (s)	Evento
$t = 0,0$	Início de operação do sistema e da simulação.
$t = 0,5$	Abertura monopolar do disjuntor da fase A.
$t = 1,5$	Início de operação do condicionador de tensão na carga.
$t = 2,8$	Início de operação do filtro ativo do lado da fonte.

Na Figura 39 são mostrados de cima para baixo: as respostas de valor eficaz das tensões das fases a, b e c, os fatores de modulação de amplitude relativos a cada inversor de cada fase, a tensão sobre o capacitor do lado CC e os ângulos de fase relativos às fases do condicionador.

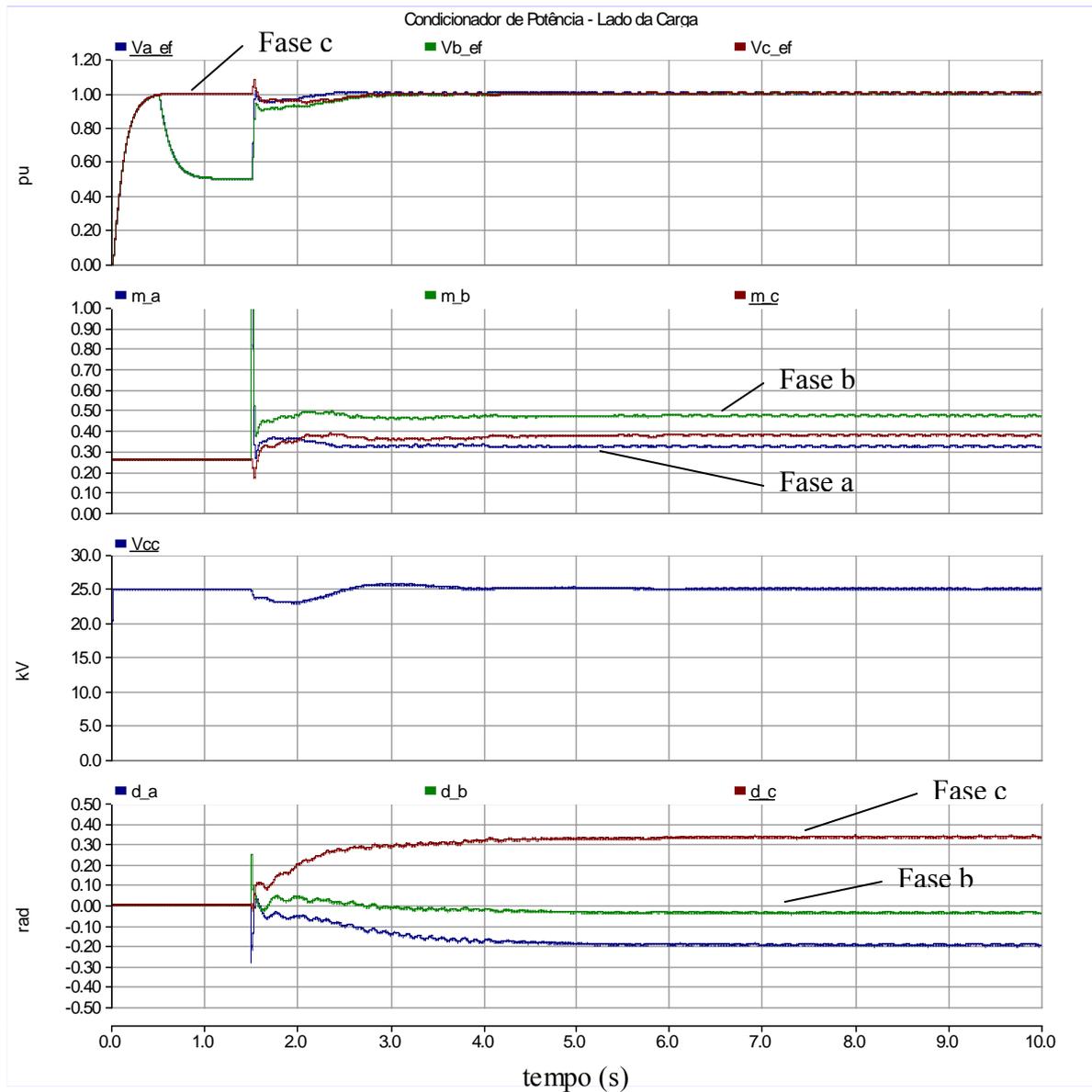


Figura 39 - Desligamento monopolar e atuação do condicionador de tensão.

Podemos verificar que uma fase sai de operação em $t = 0,5$ s e que o condicionador atua e recompõe as tensões a partir de $t = 1,5$ s.

Na Figura 40, na Figura 41 e Figura 42 são mostradas as tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} na carga em três situações distintas, na primeira a fase a (no lado de 100 kV) foi desligada e o condicionador ainda não está operando, na segunda o condicionador inicia a operação e na terceira o condicionador já está em operação.

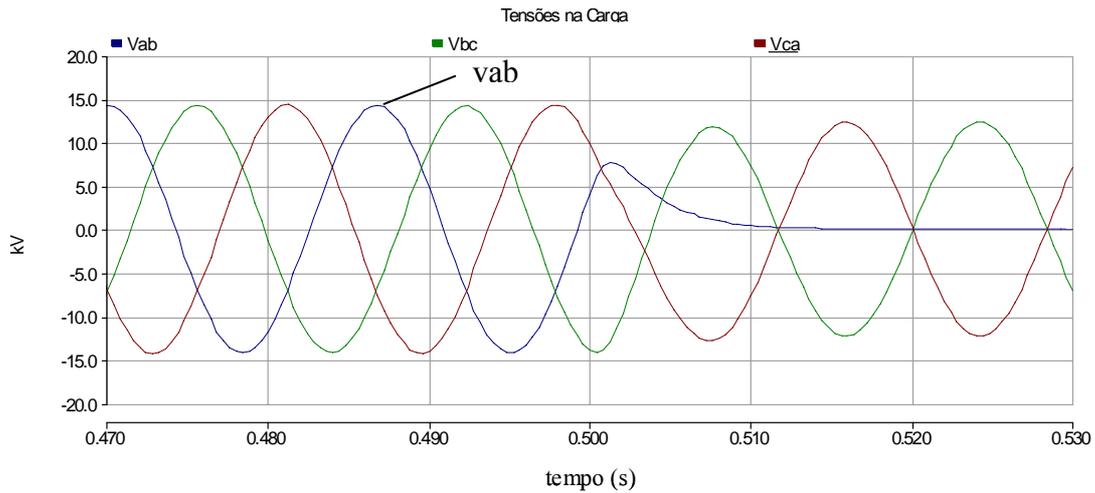


Figura 40 - Tensões de linha na carga - $t = 0,5s$.

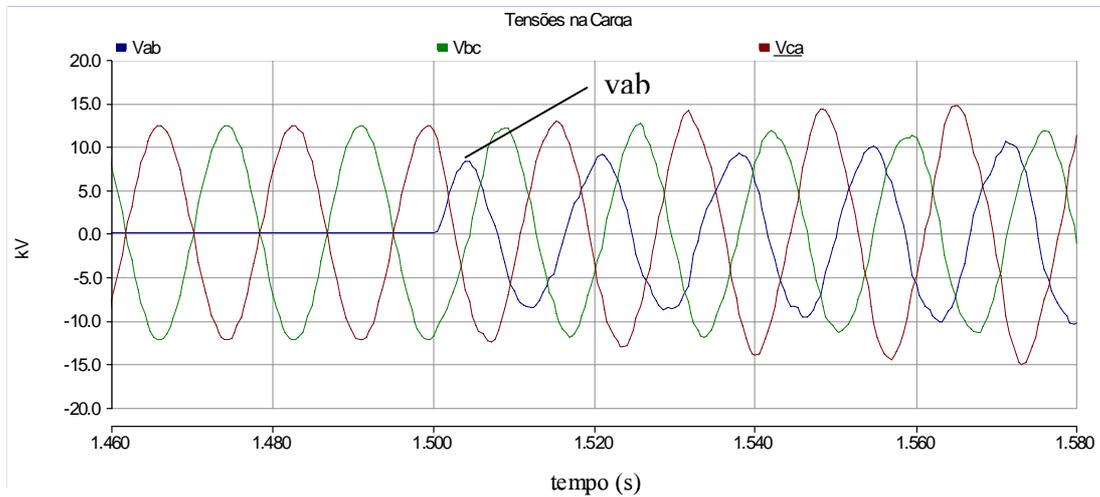


Figura 41 - Tensões de linha na carga - $t = 1,5 s$.

Na Figura 42 a distorção harmônica total (THD) verificada é de 5% e o maior componente individual é o terceiro harmônico, com o valor de 3%, outros harmônicos verificados estão próximos de 1%.

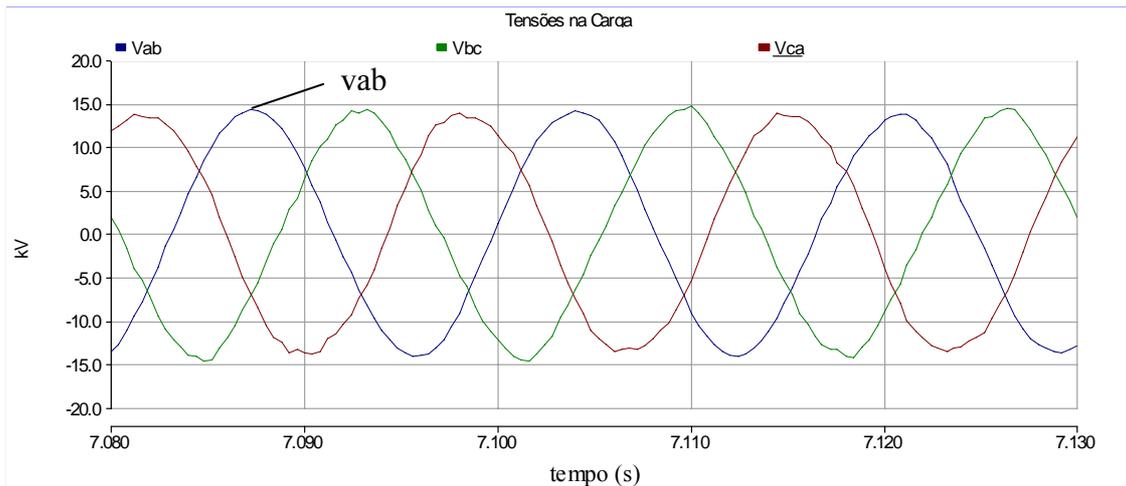


Figura 42 - Tensões de linha na carga – $2,8 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$.

Na Figura 43 a saída do PLL trifásico pode ser observada, são os ângulos das fases a, b e c, durante o início de operação do PLL.

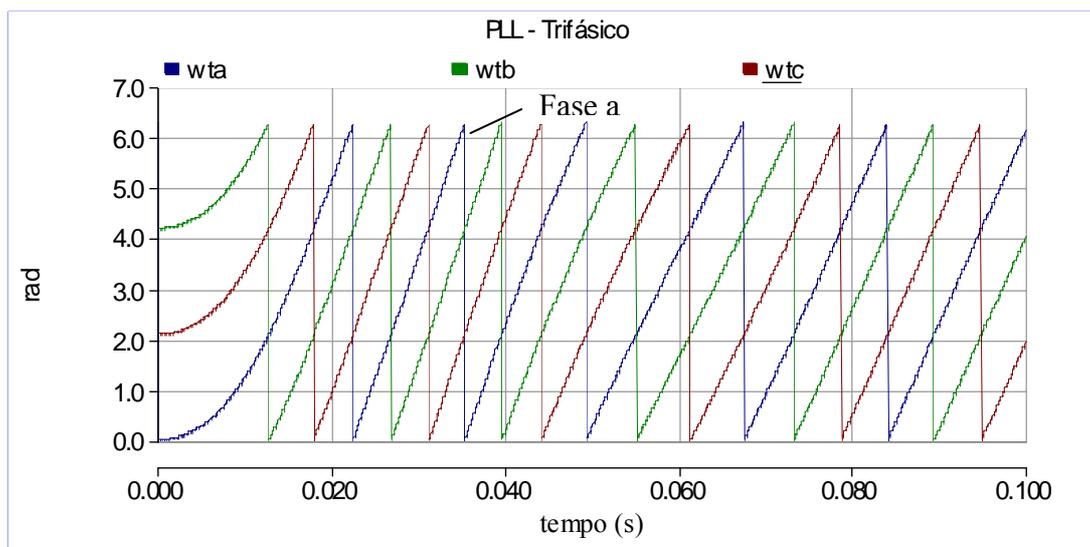


Figura 43 - PLL trifásico - $t = 0,0\text{s}$.

5.3.4 Partida Direta de um Motor de Indução Durante Desligamento Monopolar

Vários eventos são observados a partir de $t = 0 \text{ s}$, quando o sistema é energizado. Inicialmente ocorre a abertura monopolar de um disjuntor na fase A do cabo utilizado para transmitir a energia em 100 kV, ambas as extremidades do cabo são isoladas do sistema. Em seguida o condicionador de tensão do lado da carga é posto em operação.

Pouco depois o condicionador de tensão no lado da fonte inicia a operação. Temos então a partida de um motor de indução de 10 MW na barra da carga e por fim o motor é desligado.

Segue a relação de eventos em função do tempo:

Instante de tempo (s)	Evento
t = 0,0	Início de operação do sistema e da simulação.
t = 0,5	Abertura monopolar do disjuntor da fase A.
t = 1,5	Início de operação do condicionador de tensão na carga.
t = 2,8	Início de operação do filtro ativo do lado da fonte.
t = 3,0	Partida do motor de 10 MW.
t = 8,0	Desligamento do motor de 10 MW.

Entre t= 0s e t= 0,5 s o sistema é energizado e as três fases estão presentes no circuito. Entre t= 0,5 s e t= 1,5 s o sistema opera com os disjuntores associados à fase A abertos, na entrada e na saída. Entre t= 1,5 s e t= 2,8 s o sistema opera tendo o condicionador de tensão em funcionamento de forma a suprir a carga com tensões equilibradas. Entre t= 2,8 s e 3,0 s temos o funcionamento do filtro ativo do lado da fonte antes da partida do motor. Entre t= 3,0 s e t= 8,0 s ocorre a partida, a aceleração e finalmente o desligamento do motor de 10 MW.

Na Figura 44 são apresentadas as respostas de tensão eficaz em pu das tensões v_a , v_b e v_c no ponto de consumo, ou seja, na barra de alimentação da carga em 10 kV. Além disso, são apresentados os fatores de modulação de amplitude de tensão, os ângulos de fase de cada tensão gerada pelo condicionador e a tensão no elo CC do condicionador.

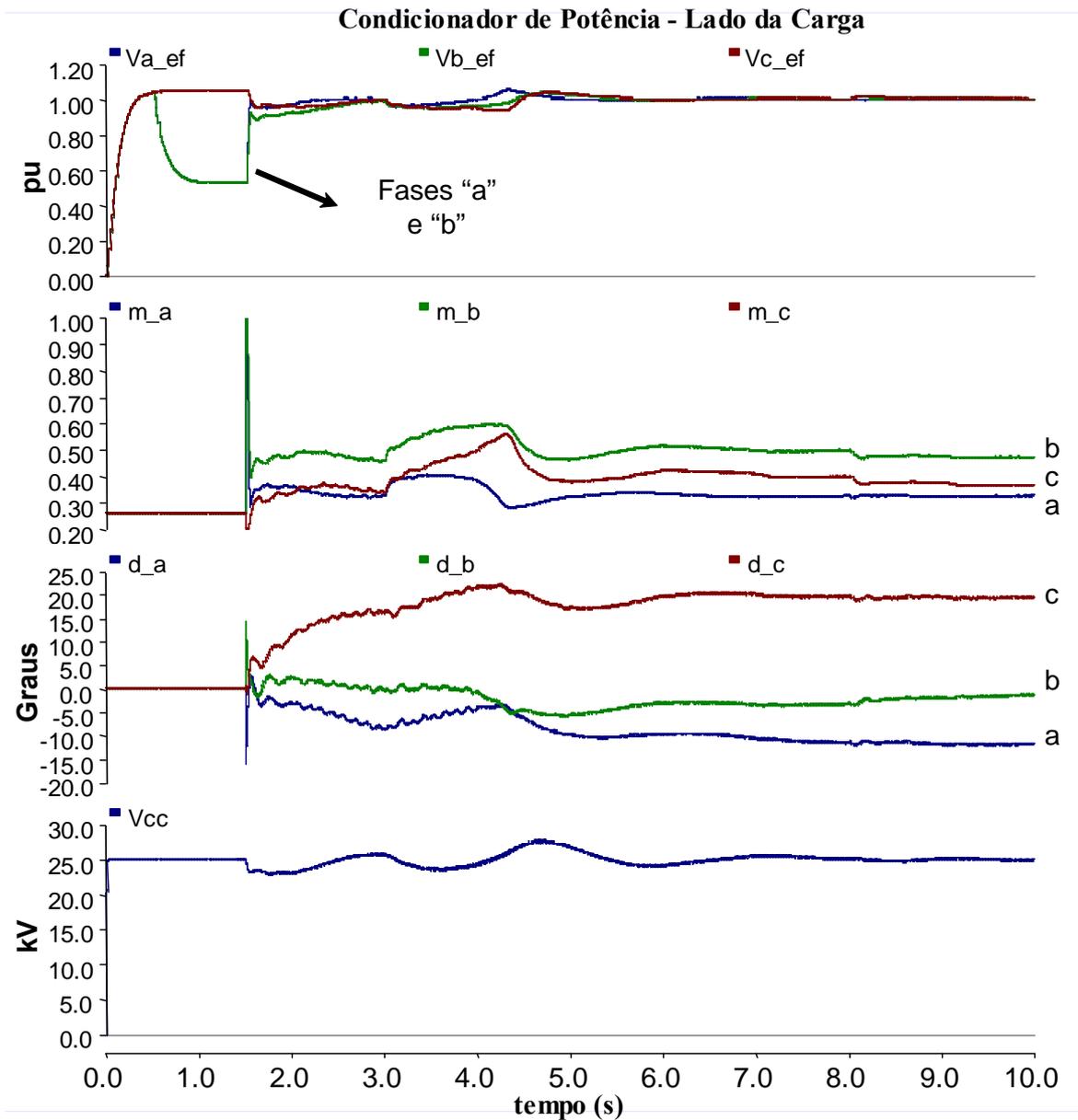


Figura 44 - Condicionador de Tensão - Lado da Carga.

Podemos observar que a partir de $t = 0,5$ s as tensões eficazes das fases A e B caem para aproximadamente 0,5 pu. A tensão da fase C permanece com valor pouco superior a 1 pu. Em $t = 1,5$ s ocorre a entrada do condicionador de tensão do lado da carga e a tensão retorna a valores próximos a 1,0 pu. Tal retorno da tensão é devido à atuação do condicionador de tensão na recomposição das tensões de fase. Nos momentos iniciais pode ser percebida a existência de diferença de módulo de tensão entre as fases, essa diferença se reduz com o tempo, devido à atuação do sistema de controle.

Em $t= 3\text{ s}$ é feita a partida de um motor de indução de 10 MW. Com a partida deste motor, sob um sistema alimentado através de apenas dois cabos na parte de transmissão em 100 kV. As tensões têm seus valores reduzidos e o condicionador atua de forma a recuperar o afundamento de tensão. Durante a atuação do condicionador pode ser observado que as tensões de fase apresentam amplitudes ligeiramente diferentes. Em $t= 8\text{ s}$ o motor é desligado e a tensão tende a subir porém é mantida em torno de 1 pu através da atuação do condicionador.

Na Figura 45 podemos observar o comportamento da potência ativa trifásica instantânea e potência imaginária trifásica instantânea. Em $t= 0,5\text{ s}$ a potência ativa cai de 70 MW a menos de 40 MW com a perda da fase “a” e retorna a 70 MW com o restabelecimento da tensão da fase a pelo condicionador de $t= 1,5\text{ s}$ até $3,0\text{ s}$, quando ocorre a partida do motor, a partir deste momento, temos a potência subindo e estabilizando em valor próximo a 80 MW. Com o desligamento do motor em $t= 8,0\text{ s}$ a potência ativa cai para os 70 MW originais.

Com relação à potência imaginária trifásica instantânea, vai a zero com a perda da fase “a” e retorna a um valor próximo a 55 Mvar com a atuação do condicionador. A partida, aceleração, operação e a parada do motor propiciam o aspecto da curva apresentada na Figura 45. Com o motor em operação temos 80 MW, 60 Mvar e 100 MVA, aproximadamente, no sistema.

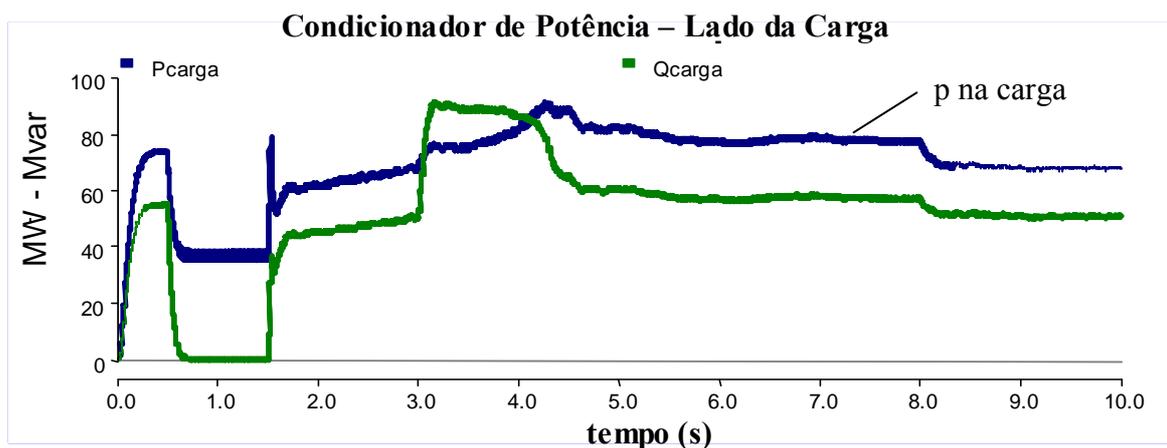


Figura 45 - Potência ativa trifásica instantânea e potência imaginária trifásica instantânea.

É possível observar que a potência imaginária trifásica instantânea a zero no intervalo de $t= 0,5\text{ s}$ até $t= 1,5\text{ s}$, durante a perda da fase e antes da entrada do condicionador de tensão.

Acompanhe a demonstração, nas equações (5-1) a (5-9), conforme a teoria da potência instantânea:

As transformações de Clarke, direta e inversa, das tensões v_a , v_b e v_c para v_0 , v_α e v_β são dadas por:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (5-1)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (5-2)$$

As mesmas transformações se aplicam às correntes i_a , i_b e i_c .

A potência ativa, ou real, p , a potência imaginária, q , e de seqüência zero, p_0 , são escritas assim:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (5-3)$$

A potência ativa trifásica instantânea é dada por:

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = p + p_0 \quad (5-4)$$

A potência ativa trifásica instantânea é a soma da potência real p e da potência de seqüência zero, p_0 .

E a potência imaginária, q , é dada por:

$$q = -v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} [i_a (v_b - v_c) + i_b (v_c - v_a) + i_c (v_a - v_b)] \quad (5-5)$$

Com a interrupção da fase “a” temos:

$$i_a = 0, \quad (5-6)$$

A corrente circula somente nas fases “b” e “c”.

$$i_b = -i_c, \quad (5-7)$$

E a tensão na fase “a” é igual à tensão do neutro da carga, em estrela:

$$v_a = \frac{v_b + v_c}{2}, \quad (5-8)$$

Assim, chegamos a:

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} i_c (2v_a - v_b - v_c) = 0. \quad (5-9)$$

A potência imaginária, q , representa a energia que é trocada entre as fases do sistema e esta potência só existe em sistemas com mais de uma fase.

Durante o tempo em que a carga não recebe a fase “a”, a potência imaginária trifásica, q , é igual a zero. Isto ocorre no intervalo entre $t = 0,5$ s, quando ocorre a abertura dos disjuntores da fase “a”, e $t = 1,5$ s, quando entra em funcionamento o condicionador de tensão do lado da carga, conforme pode ser observado na Figura 45.

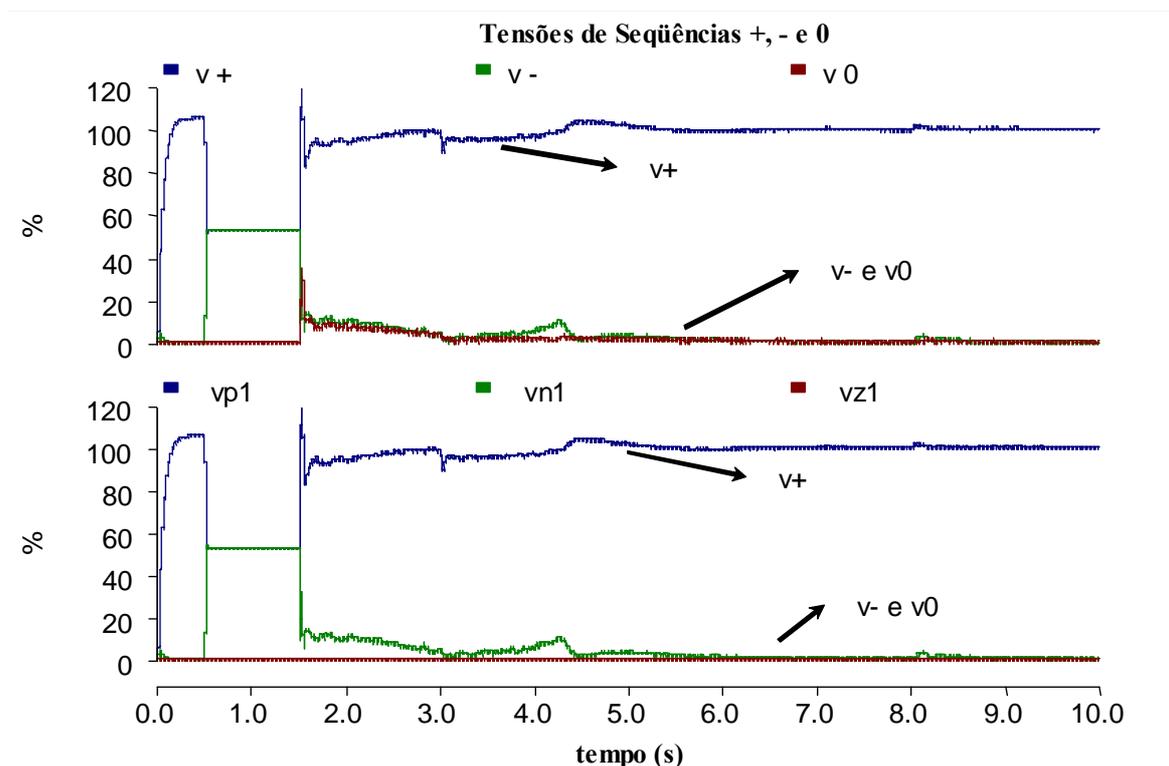


Figura 46 – Tensões de seqüência +, - e 0 na Carga.

Na Figura 46 temos as componentes de seqüências positiva, negativa e zero das tensões v_a , v_b e v_c , no gráfico de cima. É possível observar que antes de $t = 0,5$ s a componente de seqüência positiva tem valor superior a 100% e a componente de seqüência negativa igual a zero. Após $t = 0,5$ s e antes do condicionador atuar temos

tensões de seqüência positiva e negativa com valores iguais e pouco superiores a 50%. Após $t = 1,5$ s temos a atuação do condicionador no sentido de manter a tensão na carga equilibrada e a componente de seqüência positiva fica muito próxima de 100% e a componente de seqüência negativa se aproxima de 0%. Pode ser percebida uma queda da tensão de seqüência positiva em $t = 3,0$ s, quando ocorre a partida do motor. No gráfico de baixo, o segundo de cima para baixo, temos as componentes de seqüências positiva, negativa e zero das tensões v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} .

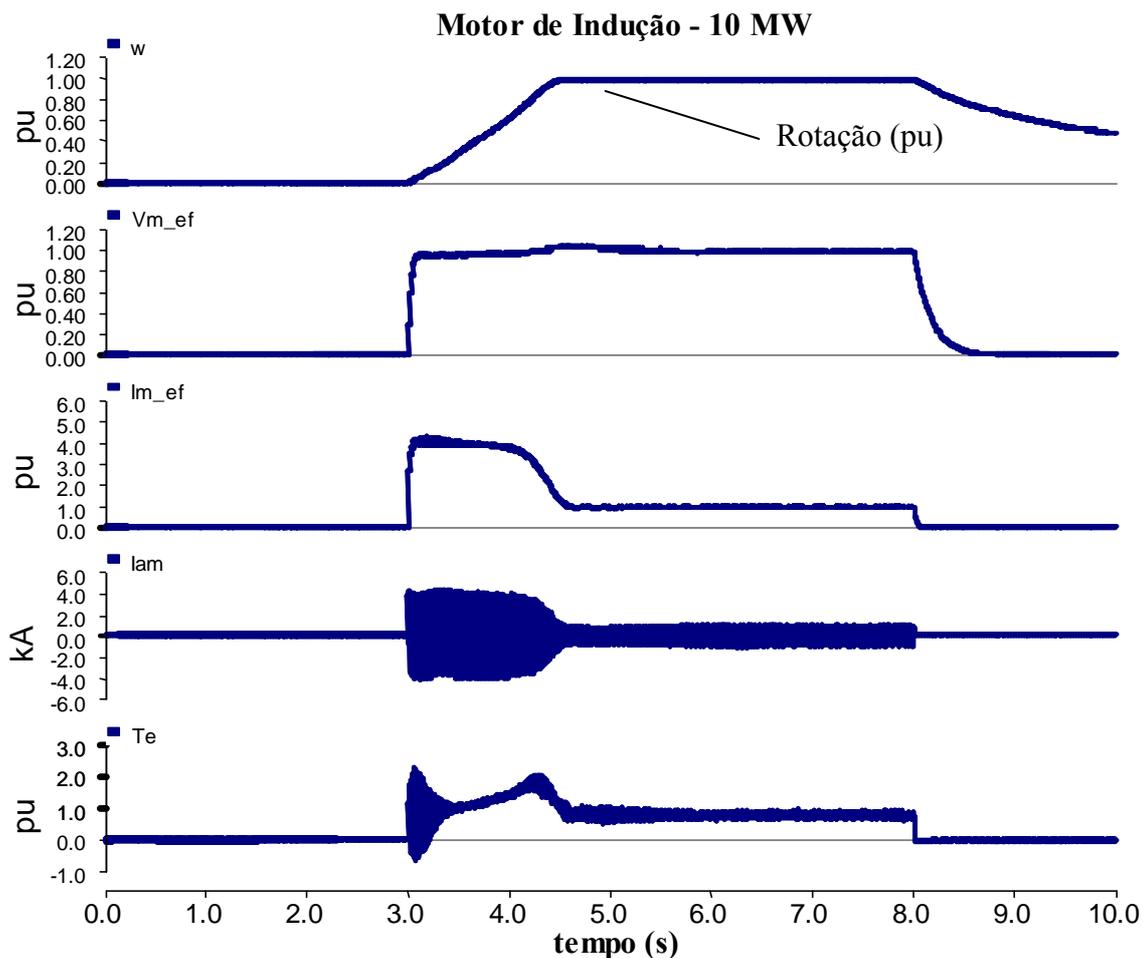


Figura 47 – Motor de Indução – 10 MW.

O motor de indução de 10 MW parte sobre o sistema já sem a fase A. A partida ocorre em $t = 3,0$ s e na Figura 47 são apresentadas de cima para baixo as curvas de rotação em pu, tensão eficaz em pu, corrente eficaz em pu, corrente instantânea na fase a em kA e o torque elétrico em pu, todos em função do tempo. O motor acelera de $\omega = 0$

pu até sua rotação nominal em cerca de 1,5 segundos. Este é o tempo que temos para a corrente reduzir do valor de rotor bloqueado até o valor de operação.

Na Figura 48 são apresentadas as correntes das fases A, B e C do sistema em kA. De cima para baixo temos correntes na fonte, correntes do condicionador de corrente e correntes no transformador elevador. Nas curvas apresentadas, é possível visualizar que ocorre um transitório em $t = 1,5\text{s}$ associado à entrada em operação do condicionador de tensão, a elevação da corrente na carga em $t = 3,0\text{ s}$ devido à partida do motor de indução, assim como, a redução da corrente devido à aceleração deste motor e outra redução em $t = 8,0\text{ s}$ devido ao desligamento do motor elétrico de 10 MW. A Figura 48 com as curvas da forma como são apresentadas, três fases simultaneamente num mesmo gráfico, não permite a visualização do evento de abertura da fase A em $t = 0,5\text{ s}$, isto será visto mais a frente.

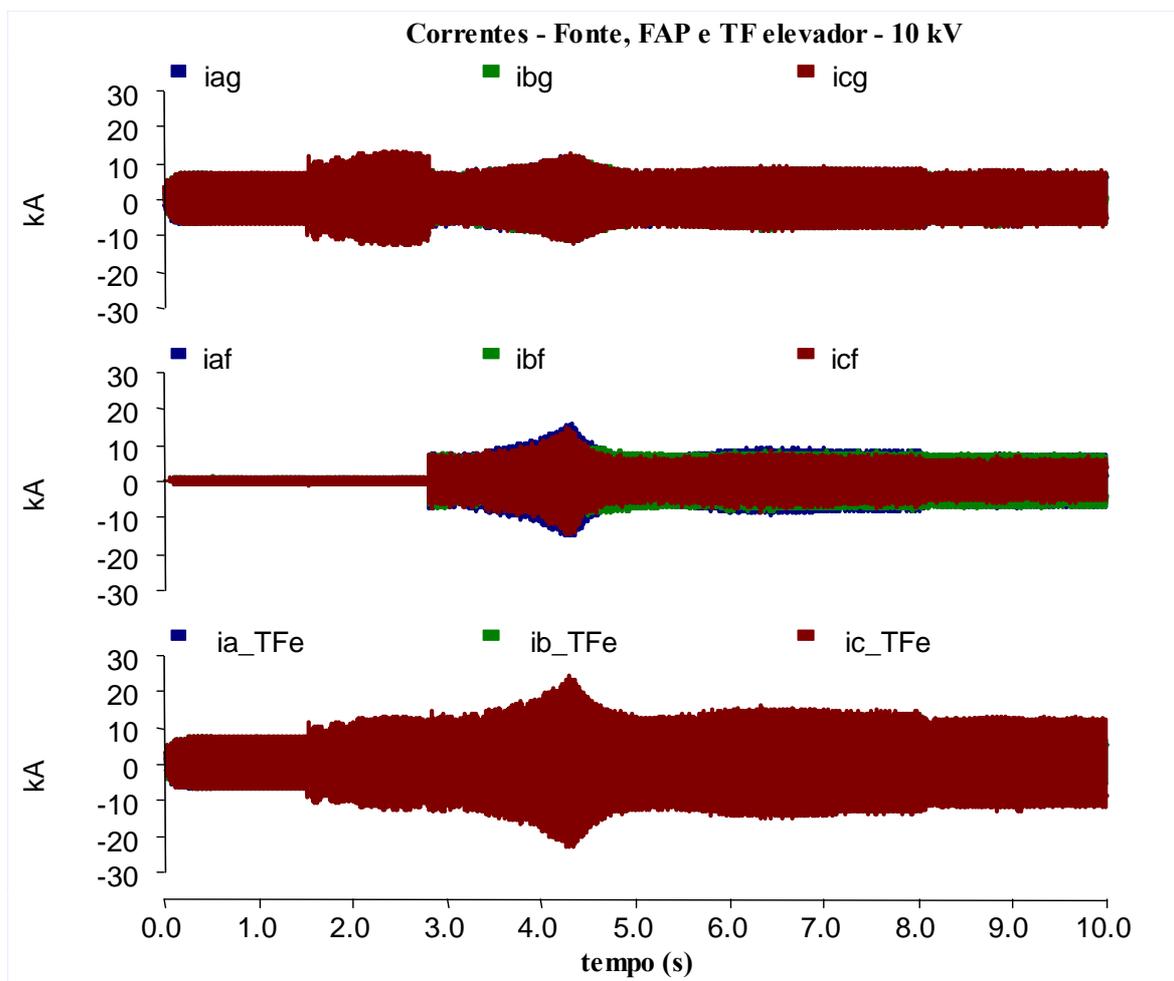


Figura 48 – Correntes na fonte, no condicionador de corrente e no transformador elevador.

Na Figura 49 são apresentadas as correntes das fases A, B e C do sistema em kA no intervalo de tempo entre $t = 0,45$ s e $0,55$ s, de forma que seja possível observar o comportamento das correntes antes e depois do desligamento do disjuntor da fase A. No intervalo de tempo apresentado não há condicionador em operação. De cima para baixo, temos as correntes na fonte, as correntes do condicionador de corrente e as correntes no transformador elevador.

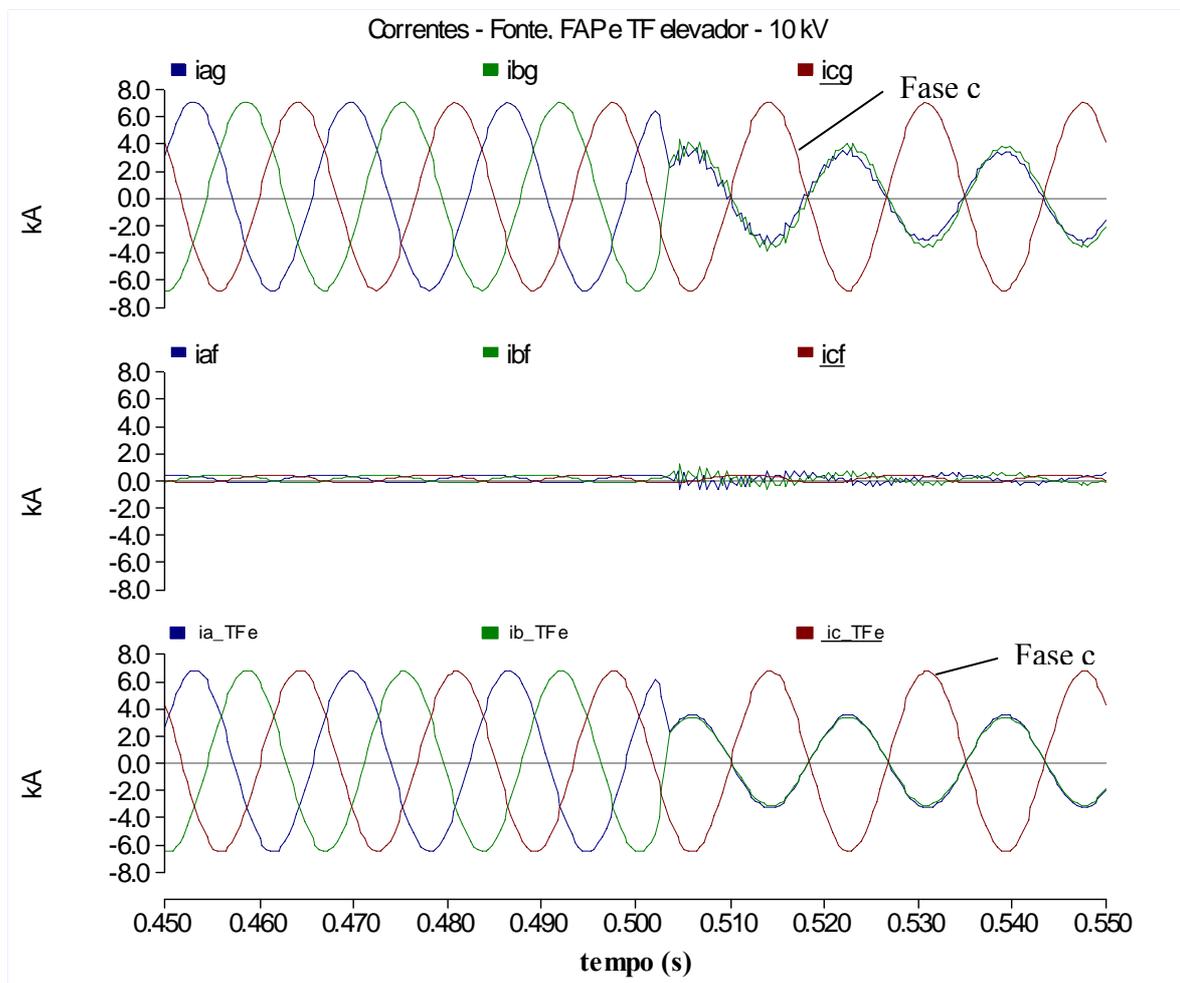


Figura 49 - Abertura do disjuntor na fase "a".

Na Figura 50 temos as mesmas correntes apresentadas nas duas figuras anteriores. Neste caso, o intervalo de tempo escolhido é de $t = 2,74$ s a $t = 2,86$ s de forma que seja possível observar as correntes no momento da entrada em operação do filtro ativo situado do lado da fonte. É possível observar que as correntes, na fonte, das três fases a partir da atuação do filtro passam a ter a mesma amplitude atingindo o

equilíbrio esperado em um sistema trifásico. No momento apresentado o condicionador de tensão já se encontrava em operação desde $t=1,5s$.

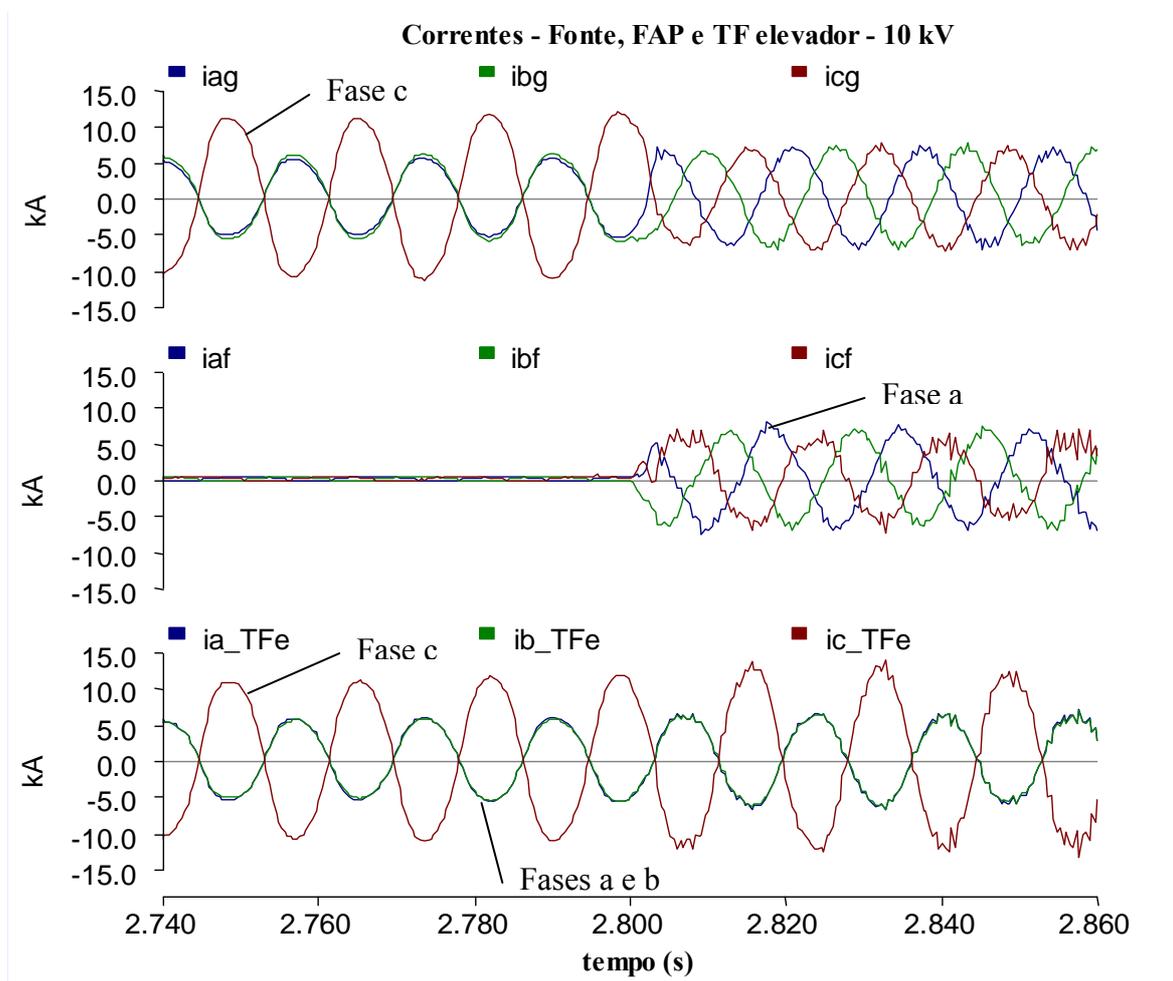


Figura 50 - Correntes – Início de Operação do Condicionador de Corrente em $t=2,8 s$.-Lado da Fonte.

Na Figura 51 temos as mesmas correntes no intervalo de tempo entre 2,9 e 3,3s. Este intervalo está associado à partida do motor de 10 MW em $t=3,0 s$. Neste momento, o sistema se encontra com o disjuntor da fase A aberto, com o filtro ativo de potência e com o condicionador de tensão em operação.

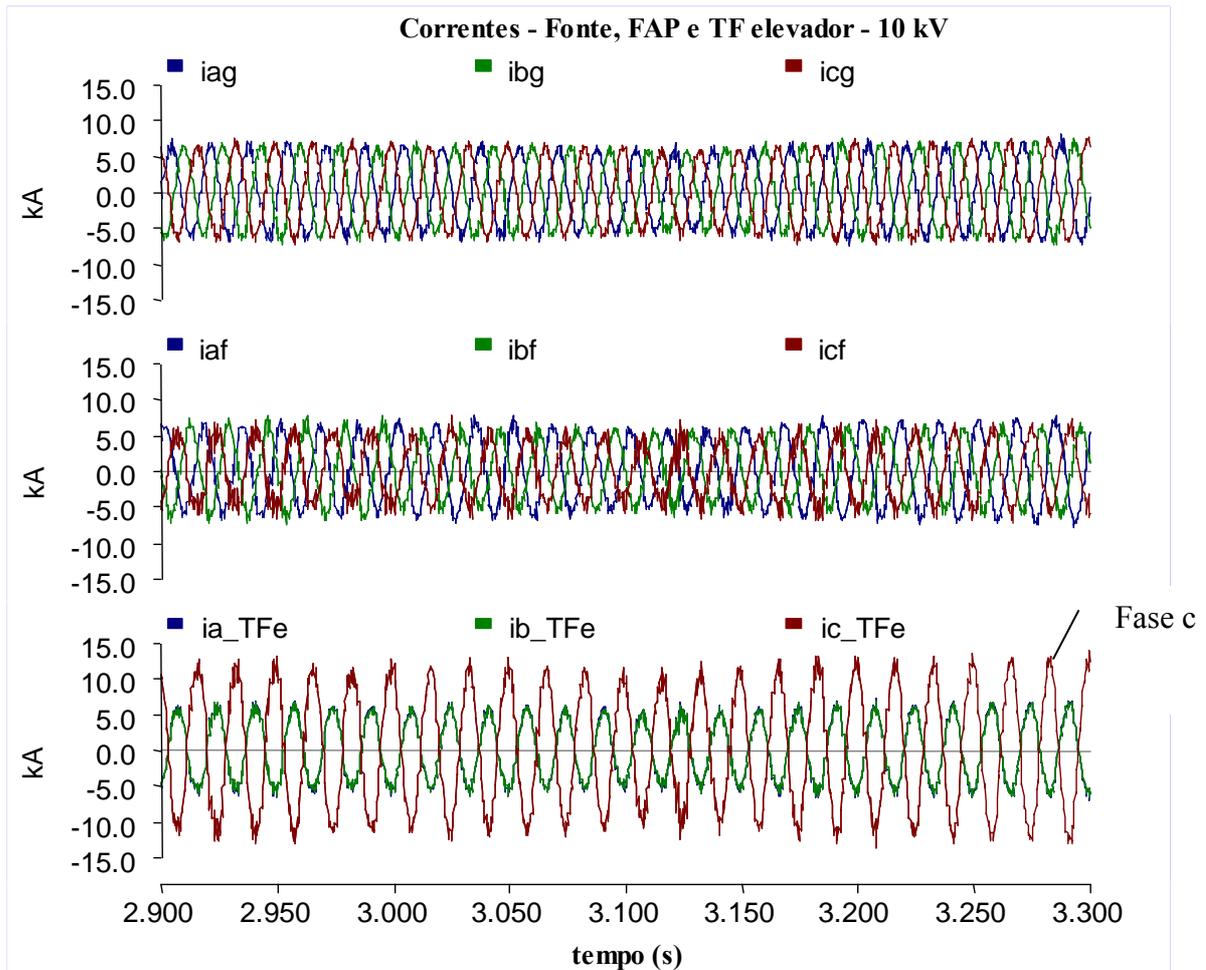


Figura 51 - Partida do Motor de 10 MW em $t=3,0$ s.

Na Figura 52 temos as mesmas correntes no intervalo de tempo entre 7,9 s e 8,3 s. Este intervalo está associado à parada do motor de 10 MW em $t=8,0$ s. Neste momento, como no caso anterior, o sistema se encontra com o disjuntor da fase A aberto, com o filtro ativo e com o condicionador de tensão em operação.

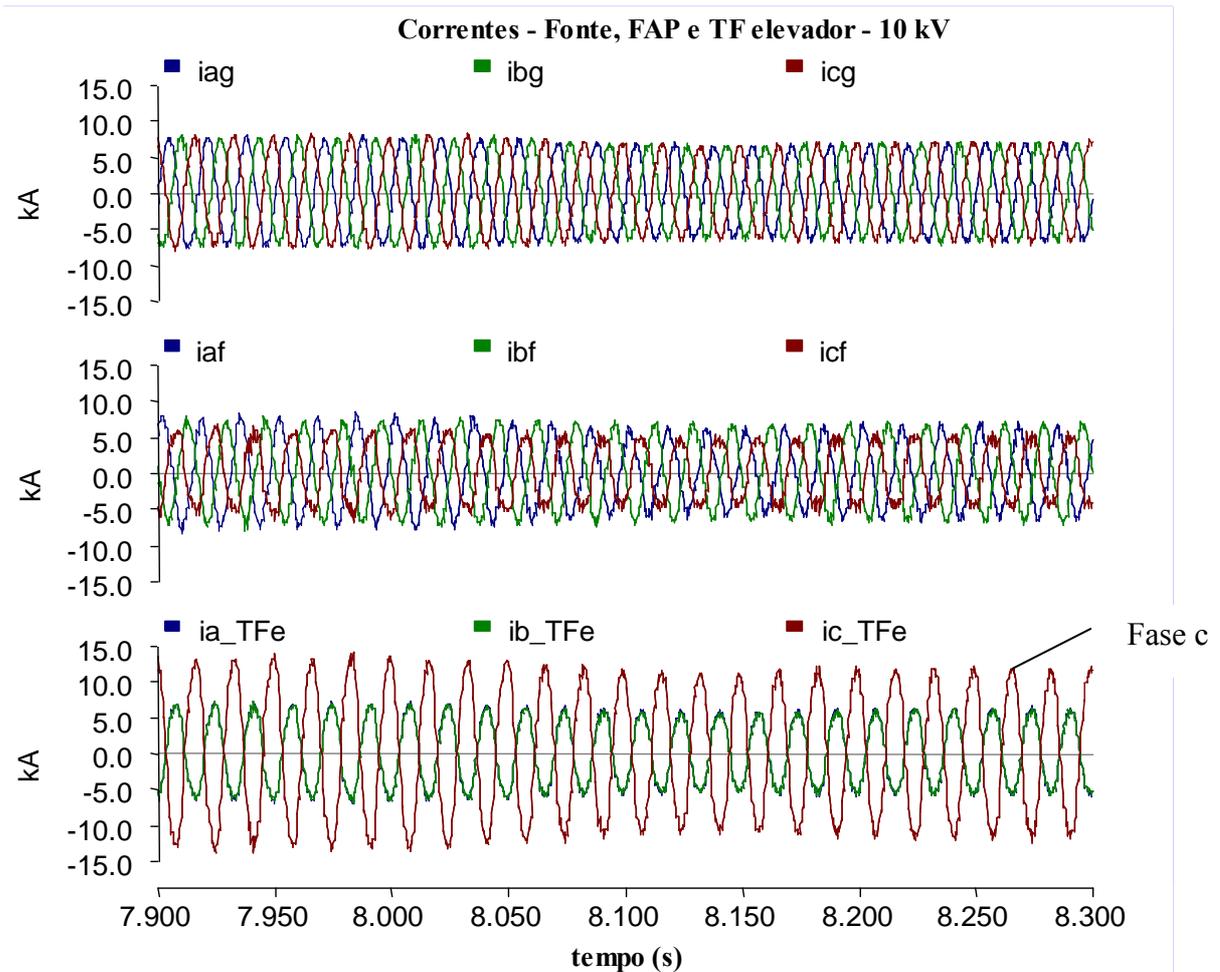


Figura 52 - Desligamento do Motor em $t=8,0$ s.

Lado da Carga

Na Figura 53 temos as correntes no lado da carga, barra de 10 kV. De cima para baixo, temos a corrente no transformador abaixador, corrente na carga e no condicionador de tensão. O intervalo apresentado é de 0 a 10,0 s, permitindo a observação de todos os eventos relacionados: perda de fase, entrada dos condicionadores de potência, partida e parada do motor.

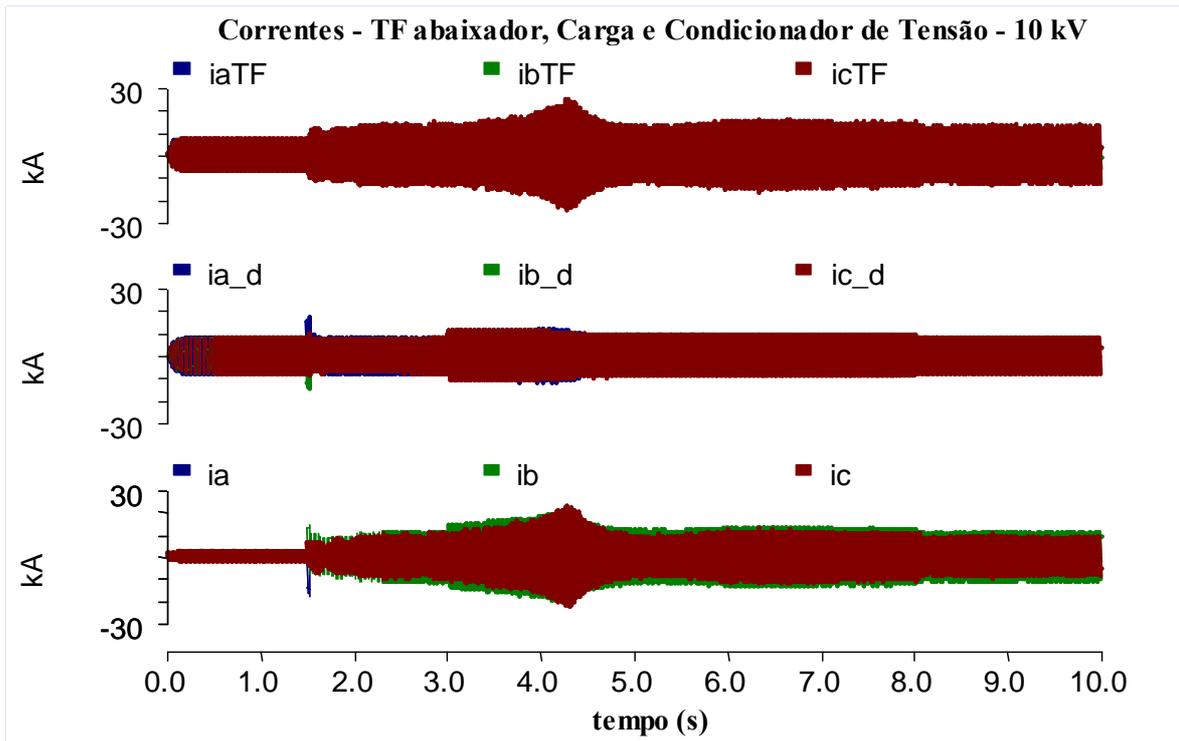


Figura 53 - Correntes no lado da carga.

Na Figura 54 temos as mesmas correntes no intervalo de 1,40 s a 1,70 s, próximo à entrada do condicionador de tensão em operação. Na Figura 55 temos o intervalo de $t=2,9$ a $t=3,2$ s, período associado à partida do motor.

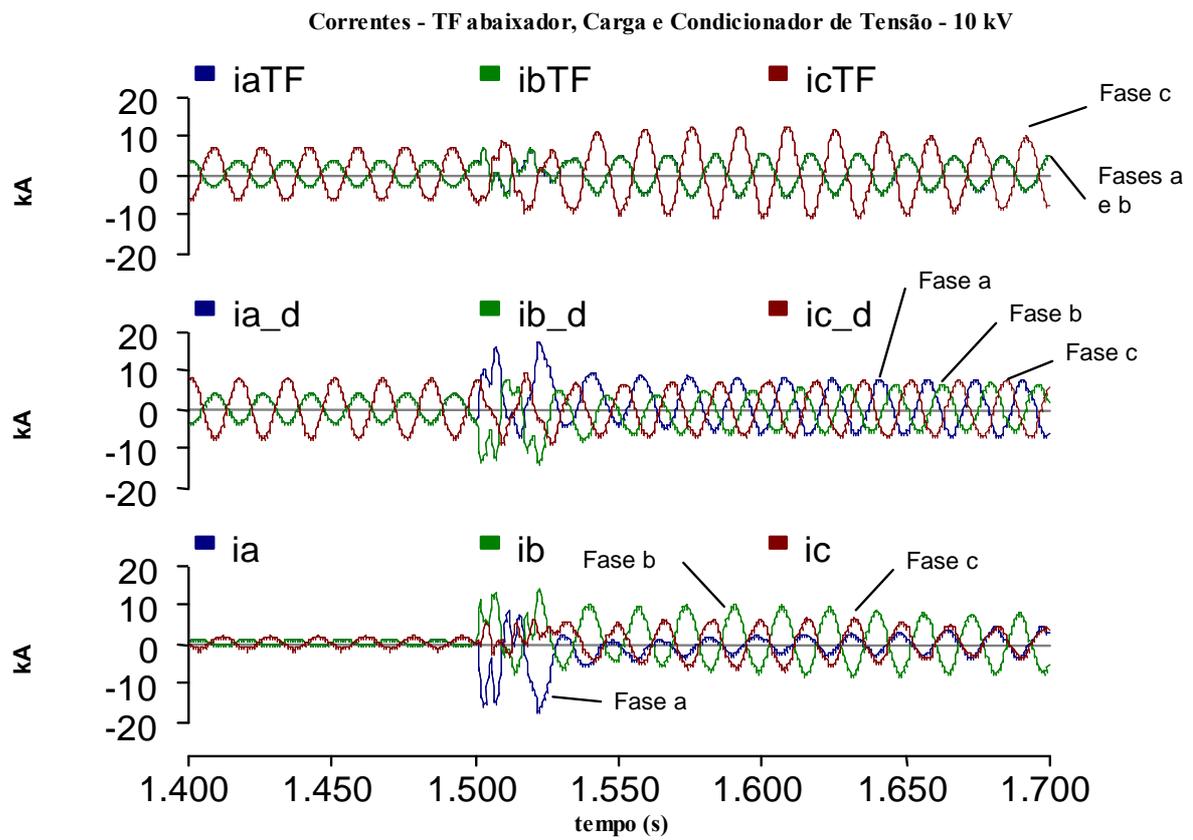


Figura 54 - Correntes no lado da carga, em $t=1,5$ s.

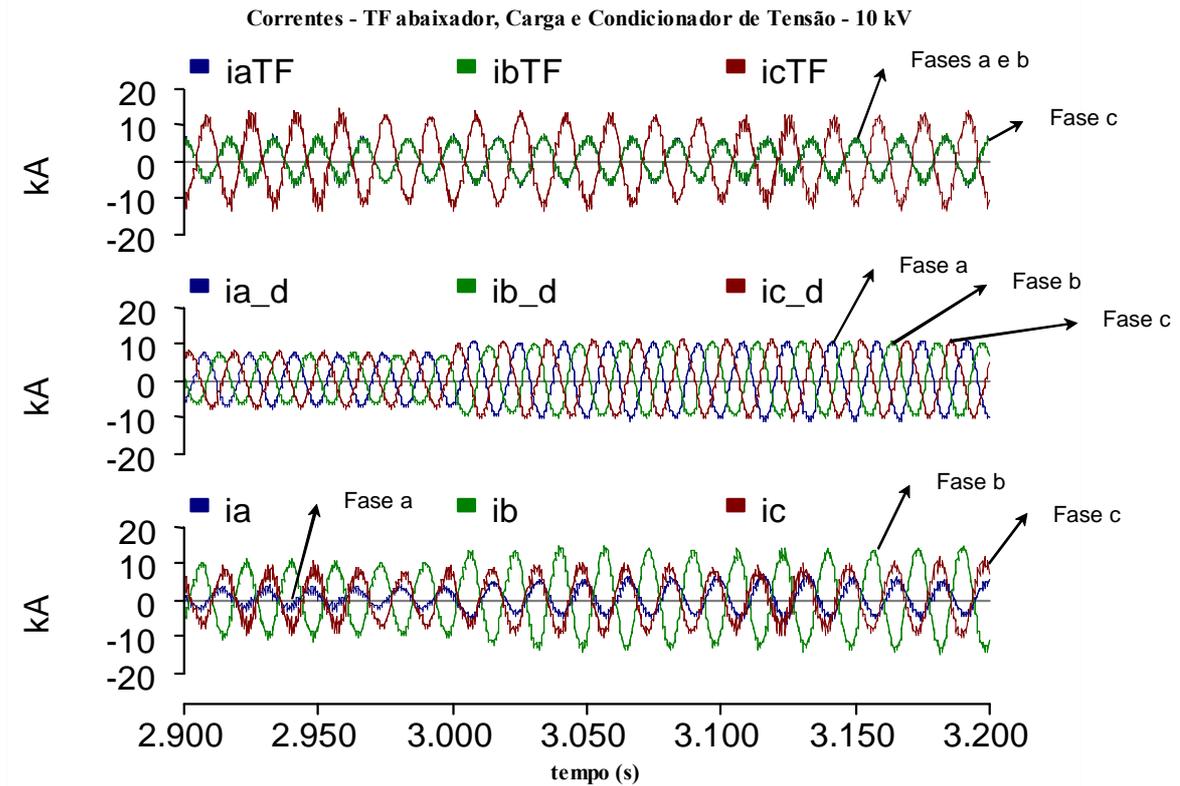


Figura 55 - Correntes no lado da carga, em $t=3,0$ s.

Na Figura 56 temos as tensões na carga, barra de 10 kV, em situação onde o cabo da fase a do sistema de transmissão está fora de operação e o condicionador de tensão deve reconstituir a tensão na carga. De cima para baixo temos: tensões de linha e de fase.

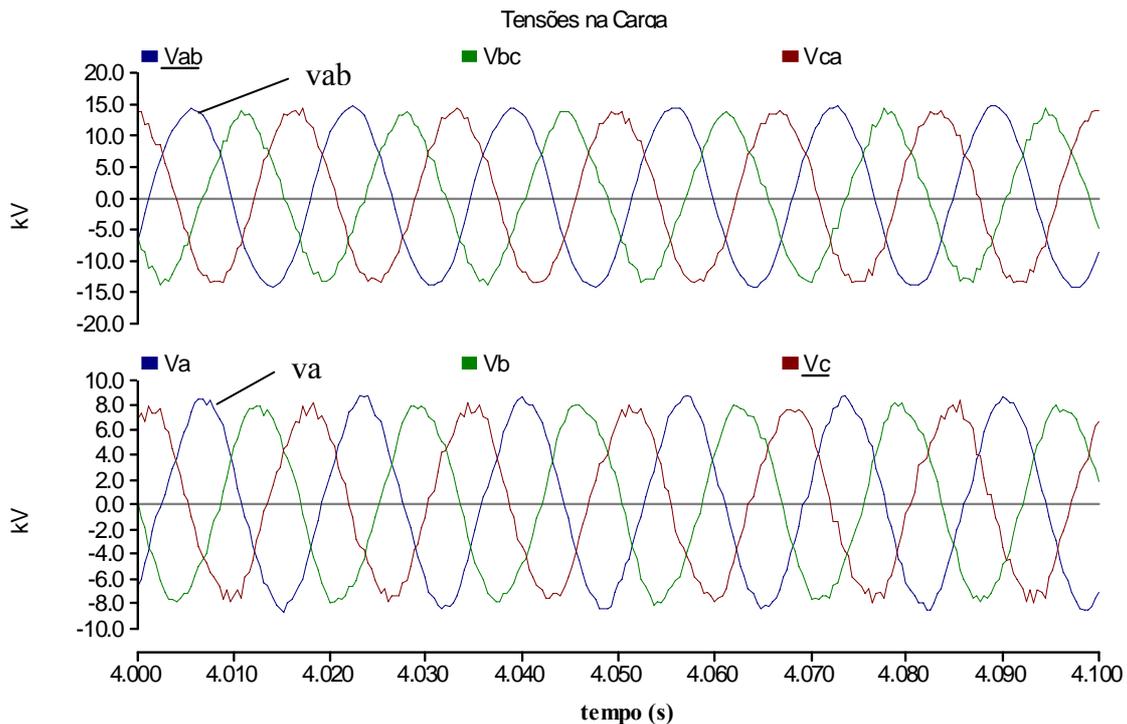


Figura 56 - Tensões na barra de carga – sem a fase “a” na transmissão – $t=4,0s$.

Transformadores estrela-estrela

A simulação referente às curvas apresentadas desde a Figura 57 até a Figura 60 são do mesmo sistema descrito anteriormente, porém os transformadores elevador e abaixador possuem conexão estrela-estrela. Assim, ao interromper a fase A no cabo de transmissão ocorre a interrupção da fase A na entrada do transformador elevador e na saída do transformador abaixador.

Na Figura 57 são apresentados os valores de tensão eficaz em pu das tensões V_a , V_b e V_c nos terminais da carga, ou seja, na barra de alimentação da carga em 10 kV. Além disso, são apresentados os fatores de modulação de amplitude de tensão, a tensão no elo CC do condicionador e os ângulos de fase de cada tensão gerada pelo condicionador.

Podemos observar que a partir de $t=0,5$ s a tensão eficaz da fase A vai a zero. As tensões das fases B e C permanecem com valor próximos a 1 pu. Em $t=1,5$ s ocorre a entrada do condicionador de tensão do lado da carga e as tensões retornam a valores próximos a 1 pu. O condicionador de tensão atua na recomposição das tensões de fase. Nos momentos iniciais pode ser percebida a existência de diferença de módulo de

tensão entre as fases, essa diferença se reduz com o tempo, devido à atuação do sistema de controle.

Em $t = 3\text{ s}$ é feita a partida de um motor de indução de 10 MW. Com a partida deste motor, sob um sistema alimentado através de apenas dois cabos na parte de transmissão em 100 kV. As tensões têm seus valores reduzidos e o condicionador atua de forma a recuperar o afundamento de tensão. Durante a atuação do condicionador pode ser observado que as tensões de fase apresentam amplitudes ligeiramente diferentes. Em $t = 8\text{ s}$ o motor é desligado e a tensão tende a subir porém é mantida em torno de 1 pu também devido à atuação do condicionador.

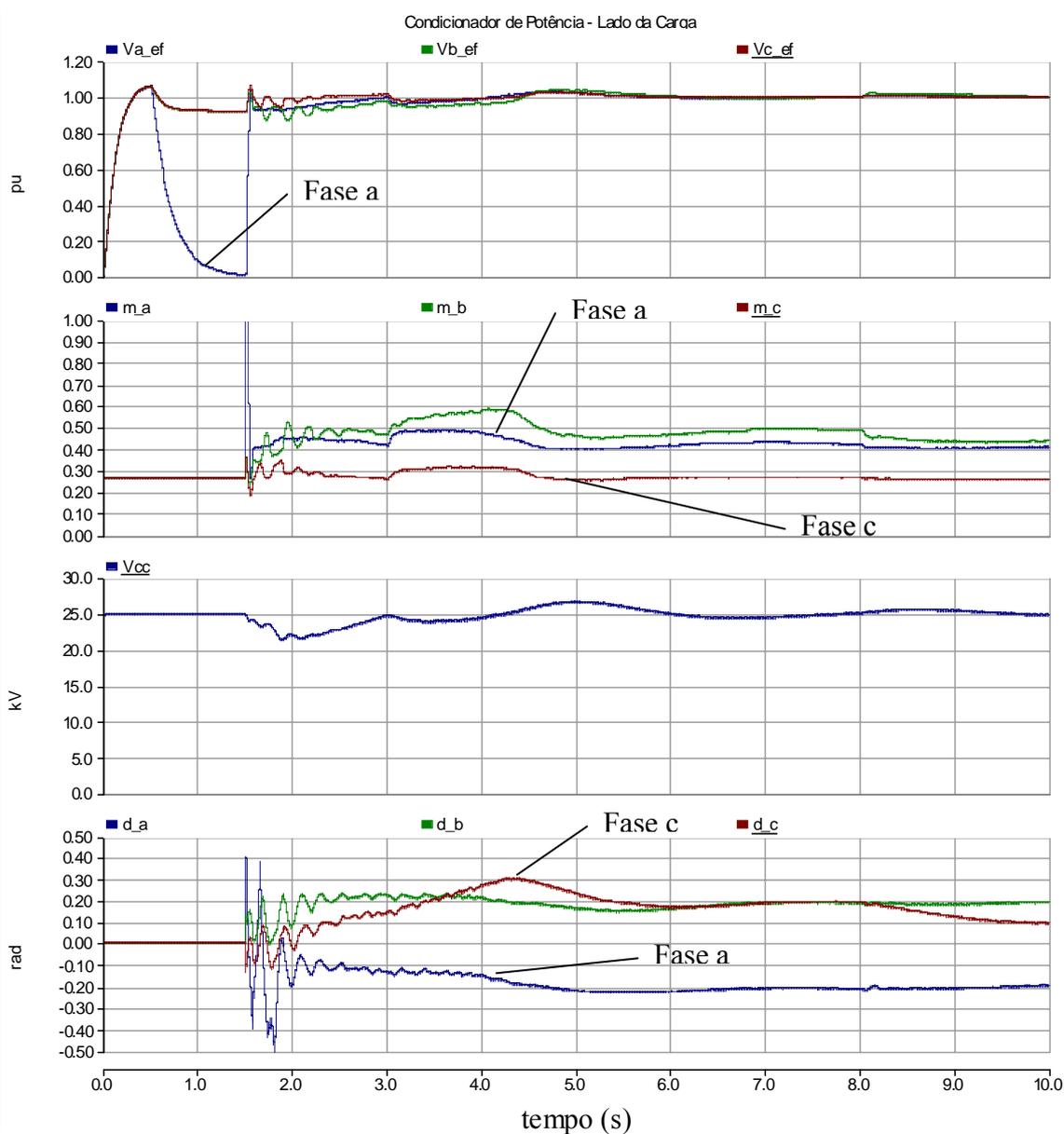


Figura 57 - Condicionador de Potência - Lado da Carga.

Na Figura 58 são apresentadas as componentes de seqüência positiva, negativa e zero relativas às tensões v_a , v_b e v_c na barra da carga.

Entre $t= 0,5$ s e $t= 1,5$ s o sistema não dispõe da fase A e neste intervalo as componentes de seqüência positiva e negativa são aproximadamente 50% da tensão nominal e a componente de seqüência zero é zero, conforme esperado.

A partir de $t= 1,5$ s o condicionador de tensão atua para restaurar a tensão de forma que a componente de seqüência positiva seja 100% da tensão nominal e as componentes de seqüência negativa e zero sejam nulas ou abaixo do limite aceito.

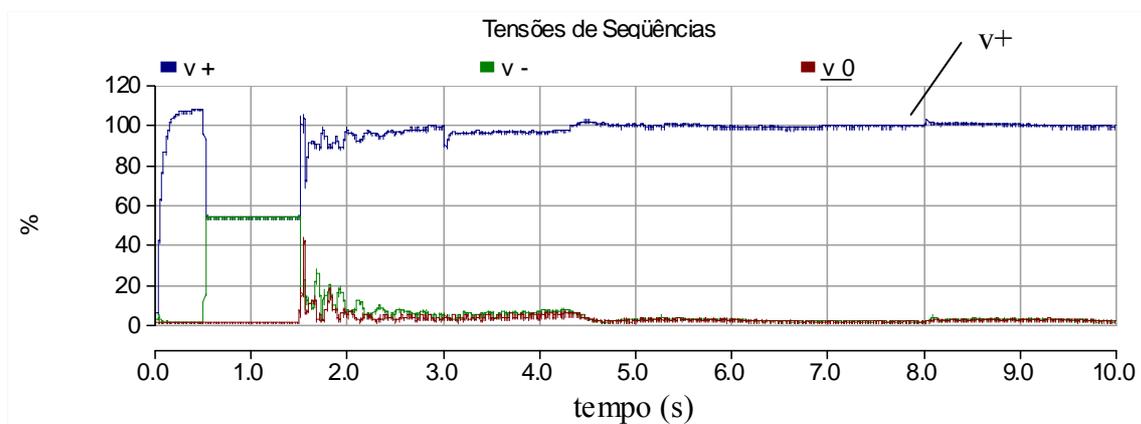


Figura 58 – Tensões de Seqüência +, - e 0 na Carga.

Na Figura 59 é apresentada a partida do motor e são apresentadas de cima para baixo as curvas de rotação em pu, tensão eficaz em pu, corrente eficaz em pu, corrente instantânea na fase a em kA e o torque elétrico em pu, todos em função do tempo.

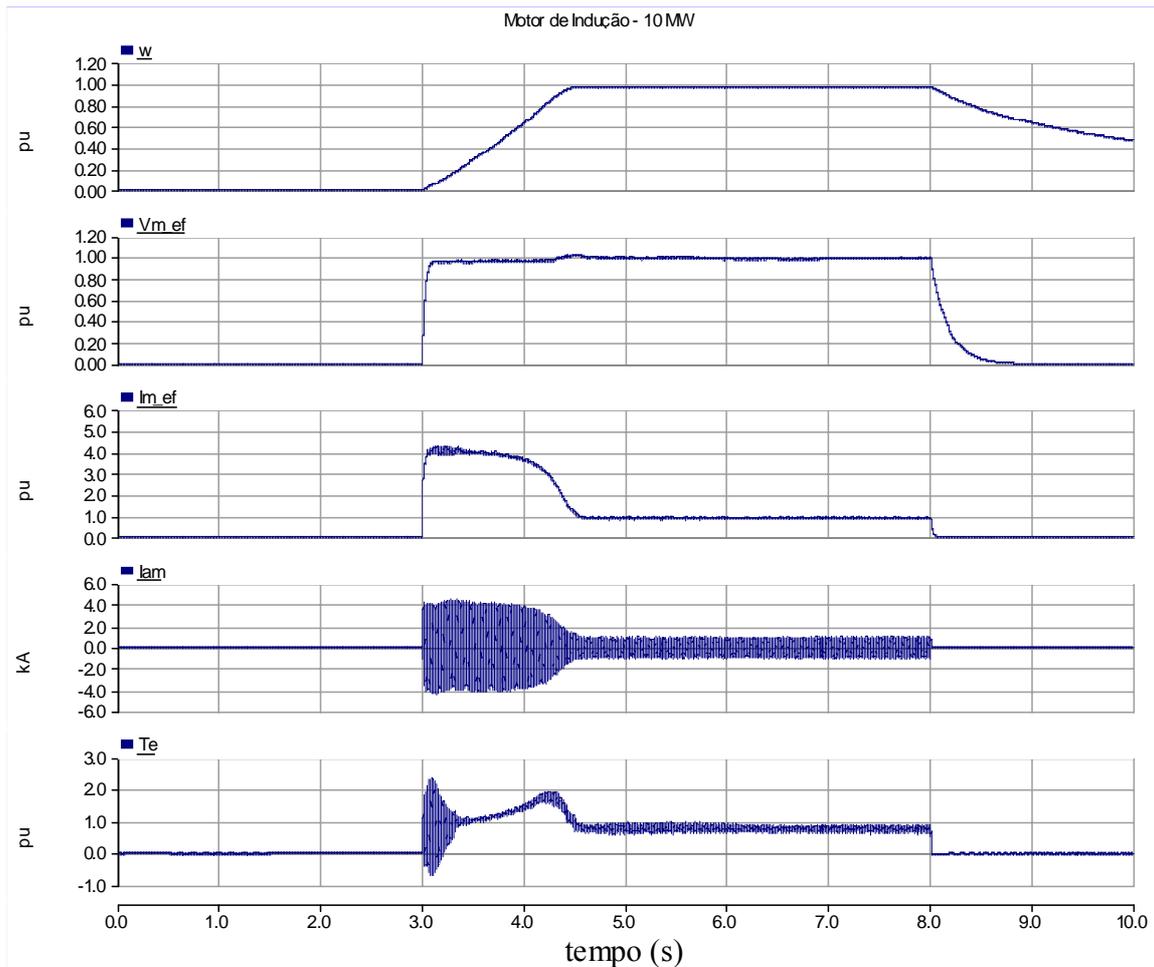


Figura 59 - Motor de Indução – 10 MW.

Na Figura 60 são apresentadas as correntes das fases A, B e C do sistema em kA. De cima para baixo temos correntes na fonte, correntes do condicionador de tensão e correntes na carga. Nas curvas apresentadas é possível visualizar que ocorre um transitório em $t = 1,5$ s associado à entrada em operação do condicionador de tensão, a elevação da corrente na carga em $t = 3,0$ s devido à partida do motor de indução, assim como, a redução da corrente devido à aceleração deste motor e outra redução em $t = 8,0$ s devido ao desligamento do motor elétrico de 10 MW.

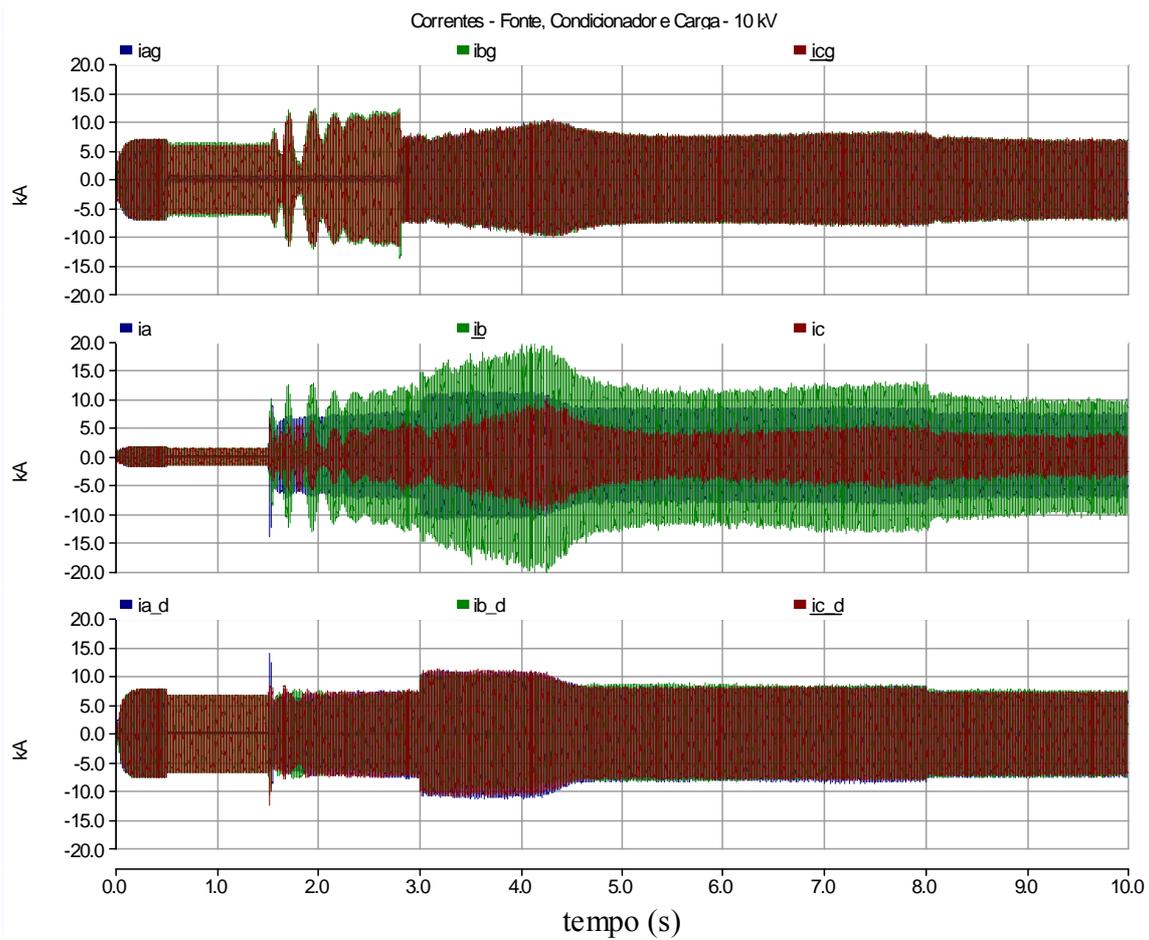


Figura 60 – Correntes – Fonte, Condicionador e Carga.

5.3.5 Curto-circuito trifásico

Neste modo de operação, o sistema opera com os disjuntores da fase A abertos e com a atuação dos condicionadores do lado da fonte e do lado da carga. Na barra de carga é realizado um curto-circuito trifásico sólido. O curto tem início em $t=3,0$ s e é eliminado em $t=3,1$ s. Em $t= 3,02$ s o condicionador é inibido através do corte dos pulsos de disparo das chaves do equipamento. O condicionador volta a operar normalmente em $t= 3,2$ s, com a liberação dos pulsos ocorrendo novamente. O condicionador na situação descrita consegue operar compondo as tensões das três fases na barra de carga. Quando a simulação foi realizada sem bloqueio dos pulsos das chaves o condicionador perdia o controle das tensões das fases e da tensão CC, saindo de operação. Neste caso, seria necessário repartir o sistema após a eliminação da falta.

Segue a relação de eventos em função do tempo:

Instante de tempo (s)	Evento
$t = 0,0$	Início de operação do sistema e da simulação.
$t = 0,5$	Abertura monopolar do disjuntor da fase A.
$t = 1,5$	Início de operação do condicionador de tensão na carga.
$t = 2,8$	Início de operação do filtro ativo do lado da fonte.
$t= 3,0$	Instante em que se inicia o curto-circuito trifásico.
$t= 3,1$	Instante em que o curto-cicuito trifásico é eliminado.

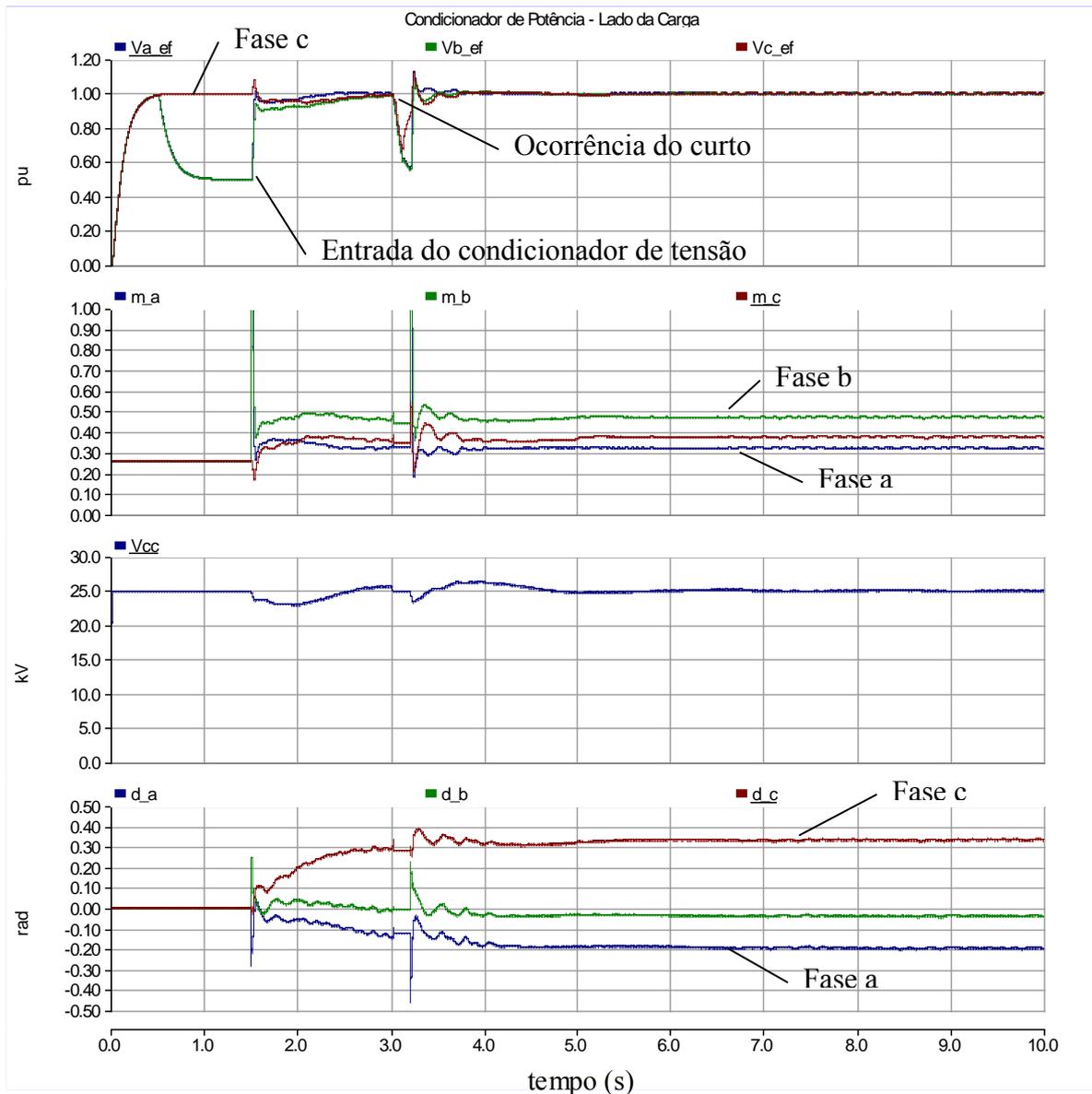


Figura 61 - Operação do condicionador de tensão associado a curto-circuito trifásico na barra de carga.

Na Figura 61 pode ser visto que em $t = 3,0\text{s}$ as tensões eficazes sofrem uma queda e que a partir de $t = 3,2\text{ s}$ o condicionador atua para recuperar essas tensões. Devido ao cálculo da tensão eficaz, não é possível observar a tensão atingido o valor zero. No entanto, na Figura 62 é possível observar isso, pois a tensão é observada no domínio do tempo e entre $t = 3,0\text{ s}$ e $t = 3,1\text{ s}$ as tensões de linha, de fase e a corrente na carga vai a zero.

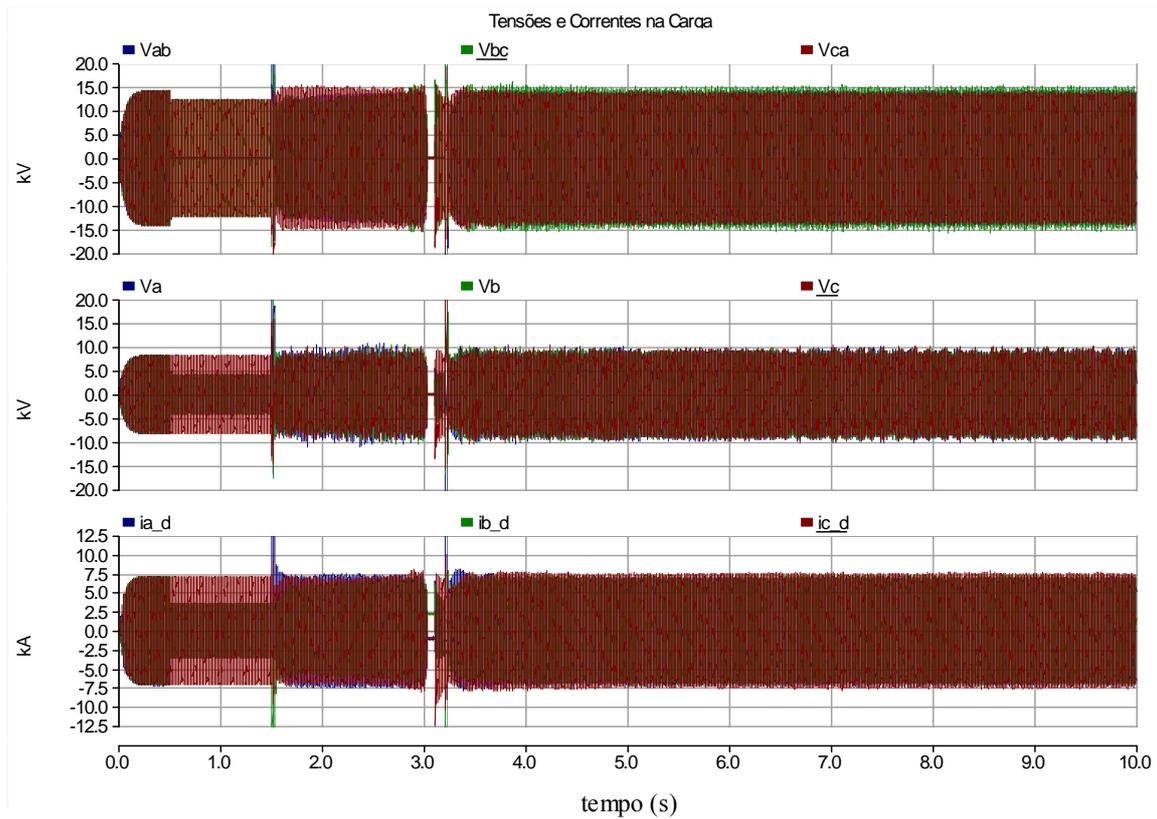


Figura 62 – Tensões e correntes na carga - Operação associada a curto-circuito na barra de carga.

Cabe observar que de fato o curto é iniciado em $t=3,0s$ porém em $t=3,1s$ ocorre o início da interrupção da corrente, que somente se concretiza na passagem por zero da corrente de cada fase. Assim o tempo de curto é pouco maior que 100 ms.

Com relação às variações abruptas dos fatores de modulação de amplitude e dos ângulos de fase, cabe um esforço adicional para melhorar o ajuste dos controladores PI associados. Um outro caminho que chegou a ser testado com sucesso, é a utilização de um módulo de limitação da taxa de variação dos referidos parâmetros. Este ajuste adicional atuará na redução dos transitórios observados na corrente e na tensão.

6. Conclusões

O sistema de transmissão proposto, constituído de um sistema de transmissão de energia elétrica em corrente alternada convencional com transformador elevador, cabo elétrico de potência isolado e transformador abaixador e ainda dois condicionadores de potência, sendo que destes um é colocado no lado da fonte e o outro é colocado no terminal da carga, mostrou-se tecnicamente viável de ser implementado.

O sistema pode ser implementado através de um condicionador do lado da fonte capaz de compensar os desequilíbrios de corrente vistos na entrada do sistema de transmissão convencional. No trabalho, o controle do filtro ativo *shunt* empregando o algoritmo de Fryze mostrou ser capaz de lidar com o problema, fazendo com que a carga se apresentasse à fonte como trifásica equilibrada.

No lado da carga, o condicionador de tensão composto por três inversores monofásicos e um lado comum de tensão contínua mostrou ser capaz de fazer a transferência de potência entre as fases na situação mais comum de compensação estática de reativos para condicionamento da tensão, onde o condicionador foi capaz de compensar a queda de tensão provocada pela partida direta na rede de um motor de indução trifásico ou pela carga normal da planta industrial alimentada pelo sistema de transmissão.

O condicionador do lado carga nas simulações onde se efetuou a interrupção da condução em uma das fases do cabo de transmissão também foi capaz de operar nas condições especificadas. As condições especificadas verificadas nas simulações foram: desligamento de uma fase com permanência do sistema em operação, operação do sistema com somente duas fases na transmissão, partida direta sobre a rede do motor elétrico de 10 MW com somente duas fases na transmissão e curto-circuito trifásico franco com eliminação do defeito em 100ms.

Os critérios de qualidade de tensão adotados, ou seja, limites de variação de tensão, limites de componente de seqüência negativa da corrente vista pela rede, limites de distorção harmônica total e componentes harmônicos individuais da tensão de linha na carga foram respeitados durante a operação do sistema.

6.1 Contribuição do Trabalho

Este trabalho apresentou, como contribuição técnica, a discussão de uma alternativa de transmissão de energia elétrica àquelas consideradas disponíveis para implementação prática como a transmissão CA convencional e as transmissões em CC por elo de corrente ou de tensão. A alternativa de transmissão em discussão requer dois condicionadores de potência, um de tensão para o lado da carga e outro de corrente para o lado da fonte.

O condicionador de tensão proposto foi concebido com uma topologia própria, utilizando três inversores monofásicos individuais com um lado CC comum, com características de fonte de tensão e com um algoritmo de controle que atua no controle da tensão na barra de carga, mesmo em situação limite que é operação durante a perda de uma fase do sistema de alimentação. O algoritmo de controle proposto emprega detectores de ângulos de fase, três monofásicos e um trifásico, utilizados para garantir o equilíbrio das tensões na barra de carga.

A solução proposta, com relação à alternativa de transmissão, topologia de condicionador do lado da carga para esta finalidade e algoritmo de controle capaz de manter a operação de um sistema trifásico mesmo durante a perda de qualquer uma das fases do sistema de transmissão é inédita. As simulações computacionais realizadas serviram como verificação do funcionamento do conceito proposto.

O trabalho foi focado em várias condições de contorno necessárias ao funcionamento rotineiro do sistema, como a partida de um motor de grande porte mesmo durante a perda de uma fase, a corrente vista pela fonte e ainda a sobrevivência do sistema após a ocorrência de um curto-circuito trifásico franco na barra de carga. Além disso, foram analisadas situações em um sistema que está perto do que é considerado limite em termos de distância entre fonte e carga para transmissão em corrente alternada.

6.2 Desempenho do sistema por tipo de evento

A seguir é apresentado, para cada tipo de evento analisado, o desempenho do sistema de transmissão com auxílio dos condicionadores de potência do lado da carga e do lado da fonte.

Operação Normal

Em operação normal o condicionador de tensão do lado da carga manteve a tensão dentro de uma faixa de $\pm 1\%$ em relação à tensão nominal, após um transitório inicial.

Partida de Motor

Em operação durante a partida do motor considerado, o condicionador de tensão do lado da carga manteve a tensão dentro de uma faixa de $\pm 10\%$ em relação à tensão nominal. O tempo de recuperação da tensão para a faixa de $\pm 5\%$ foi de 150 ms.

Partida de Motor durante a perda de uma fase

Em operação durante a partida do motor considerado, o condicionador de tensão do lado da carga manteve a tensão dentro de uma faixa de $\pm 10\%$ em relação à tensão nominal. O tempo de recuperação da tensão para a faixa de $\pm 5\%$ foi de 800 ms. Como referência, podemos dizer que este desempenho atende ao estabelecido como critério e dentro do especificado pela IEC 61892-1 [84].

Curto circuito durante a perda de uma fase

Nesta condição foi possível verificar que o sistema teve sua operação normal garantida quando da ocorrência de um curto-circuito trifásico franco com eliminação do defeito em $t = 100\text{ms}$. Para isso, é necessário que ocorra a atuação no condicionador de tensão. No caso em questão a atuação implementada foi o corte dos pulsos de disparo das chaves semicondutoras.

6.3 Trabalhos Futuros

Como temas a serem desenvolvidos em outros trabalhos podemos relacionar pelo menos dois grupos distintos, um deles relacionado à otimização técnica do sistema e outro com relação à discussão econômica da concepção de transmissão.

No grupo da otimização técnica da transmissão e do condicionador do lado da carga podemos citar:

- minimização de transitórios de tensão e corrente, com a atuação dos condicionadores;

- estudo dedicado à influência dos parâmetros do cabo elétrico em sistema com a configuração estudada, incluindo a avaliação de potencial na blindagem do cabo;

- minimização das perdas no condicionador:

- . a partir da utilização de técnicas de chaveamento específicas com essa finalidade;

- . alteração da topologia ou característica dos componentes do condicionador;

- . no projeto dos transformadores dedicados ao condicionador.

- modelagem do equipamento no domínio da frequência.

Quando considerado o grupo de temas relacionado à discussão sob o ponto de vista econômico de aplicação da concepção, podemos relacionar:

- Comparação econômica para casos representativos de transmissão de energia. Neste caso, seriam comparados os sistemas de transmissão convencional e por corrente ou tensão contínua com algum grau de redundância.

- Análise econômica do custo inicial de componentes para alternativas de condicionadores de potência.

Referências Bibliográficas

- [1] Bollen, M. H. J., *Understanding Power Quality Problems – Voltage Sag and Interruptions*, 1 ed., New Jersey, Wiley-Interscience/IEEE Press Series, 2000.
- [2] Hingorani, N. G., “Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronic in Future Power Systems”. In: *Proceedings of IEEE*, vol. 76, no. 4, April 1988.
- [3] Hingorani, N. G., “Flexible AC Transmission”, *IEEE Spectrum*, April 1988.
- [4] Hingorani, N. G., "High Power Electronics and Flexible AC Transmission System”, *IEEE Power Engineering Review*, vol. 8, issue 7, pp. 3-4, July 1988.
- [5] Hingorani, N. G., Gyugyi, L., *Understanding FACTS – Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York, IEEE Press Series, 2000.
- [6] Watanabe, E. H., Barbosa, P. G., “Principle of Operation of FACTS Devices”, *Revista Eletro Evolução – Sistemas de Potência*, no. 6, pp. 73-82, 1996.
- [7] Watanabe, E. H., Barbosa, P. G., Almeida, K. C., Taranto, G. N., “Tecnologia FACTS - Tutorial”, XI CBA, 1996.
- [8] Leijon, M., Owman, F., Sorqvist, T. et al. “Powerformer®: a giant step in power plant engineering”, *IEMD'99 International Conference Electric Machines and Drives*, pp. 830 – 832, 9-12 May 1999.
- [9] Leijon, M., “Novel concept in high voltage generation: Powerformer™”, *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, 1999. (Conf. Publ. No. 467), Volume 5, 23-27, pp. 379 - 382 vol.5, Aug. 1999.

- [10] Eriksson, G. L., “Motorformer – A new motor for direct HV connection”, *ABB Review* 1/2001, pp. 22–25, 2001.
- [11] Stevenson Jr., W. D., *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, 2ª edição em português, McGraw Hill, Brasil, 1986;
- [12] ONS, Procedimentos de Rede, Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão, Submódulo 2.4, www.ons.org.br, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Brasil, Dezembro de 2002.
- [13] Kimbark, E. W., *Direct Current Transmission, Volume 1*, 1 ed., New York, Wiley-Interscience, 1971.
- [14] Aredes, M., Portela, C., Watanabe, E. H., “HVDC tapping using soft switching techniques,” *Elect. Eng. Res. J.—Archiv für Elektrotechnik*, vol. 83, no. 1/2, pp. 33-40, Jan. 2001.
- [15] Aredes, M., Portela, C., Machado, F. C., “A 25-MW soft-switching HVDC tap for ± 500 kV transmission lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, Issue 4, , pp.1835 – 1842, Oct. 2004.
- [16] Nestli, T. F., Stendius, L., Johansson, M. J. et al., “Powering Troll with new technology”, *ABB Review* 2/2003, pp 15-19, 2003.
- [17] ABB Power Technologies, HVDC & SVC Light Reference List, www.abb.com/hvdc, June 2005.
- [18] Gyugyi, L., “Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems”. In: *IEE Proceedings*, vol. 139, no. 4, pp.323-331, July 1992.
- [19] Gyugyi, L., “Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, April 1994.

- [20] Gyugyi, L., “Solid-State Control of AC Power Transmission”, EPRI TR-100504, *Proc. FACTS Conf. I – The Future in High Voltage Transmission*, November 1990.
- [21] Ooi, B. T., Dai, S. Z., Galiana, F. D., “A Solid-State PWM Phase-Shifter”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 573-579, April 1993.
- [22] Ooi, B. T., Galiana, F. D., McGillis, D. et al. “Research in pulse width modulated HVDC transmission”, *International Conference on AC and DC Power Transmission*, 1991., 17-20 Sep 1991 pp. 188 – 193.
- [23] Aredes, M., *Active Power Line Conditioners*, D.-Ing. Dissertation, Technischen Universität Berlin, Berlin, Germany, 1996.
- [24] Ciniglio, O. A., Improved transient stability and power transfer during single pole switching, a symmetrical sequence filtering approach, Ph. D. Dissertation, University of Florida, USA.
- [25] Ciniglio, O. A., Carroll, D. P., Improved power transfer during single pole switching a symmetrical sequence filtering approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, p. 454-460, January 1993.
- [26] Toledo Silva, F. A., *Viabilidade Técnica de Abertura Monopolar Permanente em Linhas de Transmissão Extra Alta Tensão*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 1999.
- [27] Fortescue, C. L., “Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”, *AIEEE Trans.*, vol. 37, June 1918.
- [28] Kundur, P., *Power System Stability and Control*, 1 ed., The EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [29] Elgerd, O., *Electric Energy Systems Theory: an Introduction*, McGraw-Hill, 1971.

- [30] El-Hawary, M. E., *Electrical Power Systems: Design and Analysis*, Reston Publishing Company, 1983.
- [31] Anderson, P. M., *Analysis of Faulted Power Systems*, Iowa State University Press / AMES, USA, 1973.
- [32] Leforest, J., *Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above*, 2nd Edition, EPRI, 1982.
- [33] Westinghouse Electric Corporation, *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, Pa, USA, 1964.
- [34] Bartnikas, R. and Srivastava, K. D., *Power and Communication Cables – Theory and Applications*, IEEE Press and McGraw-Hill, New York, 1999.
- [35] Teixeira Júnior, M. D. R., *Cabos de Energia*, 2ª Edição, São Paulo, Artliber Editora, 2004.
- [36] Zeus Development Corporation, *Offshore Transmission: Assessing the Issues, Economics and Opportunities for the E&P Industry – Final Report*, Houston, USA, March, 2003.
- [37] Ackermann, T., “Transmission systems for offshore wind farms”; *IEEE Power Engineering Review*, volume 22, Issue 12, pp. 23 – 27, December, 2002.
- [38] Kirby, N.M., Lie Xu, Lockett, M., Siepmann, W., “HVDC transmission for large offshore wind farms”; *Power Engineering Journal*, volume 16, Issue 3, pp. 135 – 141, June 2002.
- [39] de Lima, A. C. S., *Análise do Sistema de Acionamento Eletrônico para Produção de Petróleo*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Fevereiro de 1997.

- [40] de Lima, A. C. S., *Modelagem do Acionamento à Velocidade Variável com Longos Alimentadores*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Outubro de 1999.
- [41] Morched, A., Gustavsen, B., Tartibi, M., “A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume 14, Issue 3, pp. 1032 – 1038, July 1999.
- [42] Gustavsen, B., Semlyen, A., “Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting”; *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume 14, Issue 3, pp. 1052 – 1061, July 1999.
- [43] Gustavsen, B., Martinez, J.A., Durbak, D., “Parameter determination for modeling system transients-Part II: Insulated cables”; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 20, Issue 3, pp. 2045 – 2050, July 2005.
- [44] Paice, D. A., *Power Electronic Converter Harmonics – Multipulse Methods for Clean Power*, IEEE Press, New York, 1995.
- [45] Adkins, B., Harley, R. G., *The General Theory of Alternating Current Machines*, Chapman & Hall, London, 1975.
- [46] Jones, C. V., *Unified Theory of Electrical Machines*, Butterworths, London, 1967.
- [47] Manitoba HVDC Research Centre, PSCAD On-Line Help System, EMTDC Manual, ver. 4.1.1, 2004.
- [48] IEC, IEC 60034-1, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2001.
- [49] Aredes, M., Monteiro L.F.C., Mourente Miguel, J., “Control Strategies for Series and Shunt Active Filters”, *2003 IEEE Bologna PowerTech Conference*, vol. 2, pp. 6, Bologna, Italy, 23-26, June, 2003.

- [50] Aredes, M., Monteiro, L.F.C. “A Control Strategy for Shunt Active Filter”, 2002 *IEEE, 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Volume 2, pp. 472 - 477 vol.2, Rio de Janeiro, Brazil, 2002;
- [51] Fryze, S. “Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkaisen mit nicht-sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung”, *ETZ Arch. Elektrotech.*, vol. 53, 1932, pp. 596-599, 625-627, 700-702.
- [52] L. Malesani, L. Rosseto, P. Tenti, “Active Filter for Reactive Power and Harmonics Compensation”, *IEEE-PESC 1986*, pp. 321-330.
- [53] Holmes, D. G., Lipo, T. A., *Pulse Width Modulation for Power Converters – Principles and Practice*, *IEEE Press Series on Power Engineering*, New York, 2003.
- [54] Enjeti, P. N., Rahman A., Jakkli, A., “Economic single-phase to three-phase converter topologies for fixed and variable frequency output”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, volume 8, Issue 3, pp. 329-335, July, 1993.
- [55] Douglas, H.; Malengret, M., “Symmetrical PWM with a split-capacitor single-phase to three-phase converter for rural electrification”, In: *Proceedings IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'98*, Volume 1, pp. 289 - 293 vol.1, 7-10 July 1998.
- [56] Miranda, U., Neto, J. L. S., Bellar, M. D. et al, “Implementação em DSP de um Conversor Monofásico-Trifásico (Monotri) para Eletrificação Rural”. In: *Proc. (CDROM) CBA 2004 - XV Congresso Brasileiro de Automática*, Gramado, RS, Brasil, pp.1-6, 22-24 Setembro de 2004
- [57] Bekiarov, S.B., Emadi, A., “A new on-line single-phase to three-phase UPS topology with reduced number of switches”, *Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '2003*, IEEE 34th Annual, Volume 1, pp. 451-456 vol.1, 15-19 June 2003.
- [58] Machado, R. Q., Pomilio, J. A., Buso, S., “Single-phase to Three-phase Converter Operation under Frequency Variation and Non-linear Load”, 2004.

- [59] Machado, R. Q., Buso, S., Pomilio, J. A., “A line interactive single-phase to three-phase converter system”, 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, volume 1, pp. 753-758, 20-25, Aachen, Germany, June, 2004.
- [60] Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., “Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits”, *IPEC'83 – International Power Electronics Conference*, Tokio, Japan, 1983.
- [61] Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., “Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no. 3, 1984.
- [62] Aredes, M., *Novos Conceitos de Potência e Aplicações em Filtros Ativos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Novembro de 1991.
- [63] Watanabe, E. H., Stephan, R. M. Aredes, M., “New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, no. 2, pp. 697-703, April 1993.
- [64] Best, R. E., *Phase Locked Loops – Theory, Design and Applications*, McGraw-Hill, USA, 1984.
- [65] Kaura, V., Blasko, V., “Operation of a Phase Locked Loop System under Distorted Utility Conditions”, *IEEE Transactions on Industry Applications*., vol. 33, issue 1, pp 58-63, Jan-Feb. 1997;
- [66] Chung, S. K., “A phase tracking system for three phase utility interface inverters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, issue 3, May 2000, pp. 431-438.
- [67] Costa Júnior, D. R., Rolim, L. G. B., Aredes, M., “Analysis and software Implementation of a Robust Synchronizing Circuit – PLL Circuit”, In: *IEEE*

International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'2003, pp.1-6, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 9-11 June 2003.

[68] Jesus, F. D., Soares, C. F. T., Neto J. L. S. et al, "Improvement of a Positive-Sequence Components Detector in a Unbalanced Three-Phase System". In: *Proc. (CDROM) COBEP 2003 – VII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, pp. 640-645, Fortaleza, CE, Brasil, 21-24 de Setembro de 2003.

[69] Akmatsu, M., Tsukada, M., Itoh, D., "A Novel PLL and Frequency Detecting Method Suited for the Abnormal Voltages under Fault Conditions in the Power System", *Trans. IEE, Japan*, vol.118-B, no. 9, 1998.

[70] Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P., *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, Singapore, 1989.

[71] Bose, B. K., *Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, New Jersey, 1986.

[72] Chiasson, J. N., Tolbert, L. M., McKenzie, K. J. et al, "A Complete Solution to the Harmonic Elimination Problem", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no 2, pp. 491, March 2004.

[73] Espinoza, J. R., Joós, G., Guzmán, J. I. et al, "Selective Harmonic Elimination and Current/Voltage Control in Current/Voltage-Source Topologies: A Unified Approach", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 1, pp. 71-81, February, 2001.

[74] Enjeti, P. N., Ziogas, P. D., Lindsay, J. F., "Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics: A Critical Evaluation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 26, no. 2, pp. 302, March/April, 1990.

[75] Asumadu J. A., Hoft, R. G., "New Algorithms for Generation of Notches in PWM Waveforms Using Linear Block Codes", IEEE, 1992.

- [76] Cavaliere, C. A. C., *Análise de Statcom Operando em Sistemas Desbalanceados*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Julho de 2001.
- [77] Asplund, G., Eriksson, K., Svensson, K., “HVDC Light – DC transmission based on voltage sourced converters”, *ABB Review* 1/1998, pp. 4–9.
- [78] Akagi, H., “New Trends in Active Filters”, *EPE’95 – European Conference Power Electronics Application*, Sevilla, Spain, September 1995.
- [79] Akagi, H., “Trends in Active Power Line Conditioners”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, no. 3, May 1994.
- [80] Boost, M., Ziogas, P. D., “State of the Art PWM Techniques: a Critical Evaluation”, *IEEE-PESC’86 – Power Electronics Spec. Conference*, 1986.
- [81] Lyman, W. J., “Controlling Power Flow with Phase Shifting Equipment”, *AIEE Transactions*, vol. 49, July 1930.
- [82] Pilotto, L. A. S., *Modelagem Avançada de Sistemas CA-CC*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril de 1994.
- [83] Barbosa, P. G., Misaka, I., Watanabe, E.H. “Advanced var Compensators Using PWM – Voltage Source Inverters”, *Anais do II Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP’93*, Uberlândia, Dezembro de 1993, pp. 173-178.
- [84] IEC, IEC 61892-1, *Mobile and fixed offshore units – Electrical installations – Part 1: General requirements and conditions*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2001.
- [85] IEEE, IEEE Std 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA, 1992.

[86] IEEE, IEEE Std 100-1992, *The New IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA, 1992.

[87] ONS, *Procedimentos de Rede, Padrões de Desempenho da Rede Básica Submódulo 2.2*, www.ons.org.br, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Brasil, Dezembro de 2002.

[88] ONS, *Procedimentos de Rede, Requisitos Mínimos para a Conexão à Rede Básica Submódulo 3.8*, www.ons.org.br, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Brasil, Março de 2002.

[89] Dommel, H. W. “Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, April 1969, pp. 388-399.

[90] Dommel, H. W. and Meyer, W. S. “Computation of electromagnetic transients”, In: *Proc. IEEE*, vol. 62, July 1974, pp. 983-993.

[91] Dommel, H. W., *EMTP Theory Book*, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, USA, 1987.

Apêndices

Apêndice 1 – Referências de Transmissão de Energia - CA e CC.

Tabela 6 - Transmissão CC – Elo de corrente - de 1954 a 1970 – Kimbark [13]

Instalação	Terminais	Ano	V _{CC} (kV)	P (MW)	Comprimento (km)			Comentários
					Linha Aérea	Cabo	Total	
Gotland	Västervik, Suécia Visby, Gotland	1954	100	20	0	96	96	Monopolar Retorno pelo mar
English Channel	Lydd, Inglaterra Echinghen, França	1961	±100	160	0	64	64	
Volgograd Donbass	Volgograd, URSS Donets Basin, URSS	1965	±400	720	474	0	474	
Pacific NW-SW	The Dalles, Oregon Sylmar, California	1970	±400	1440	1372	0	1372	Três pontes por polo

A instalação do elo CC para suprimento de energia elétrica da ilha de Gotland a partir da Suécia entrou em operação em 1954 e pode ser considerado como o primeiro sistema de transmissão CC comercial.

Tabela 7 - Aplicações iniciais de sistemas de corrente contínua com elo de tensão e tecnologia fonte de tensão.

<u>INSTALAÇÃO</u>	<u>HÄLLSJÖN</u>	<u>HAGFORS</u>	<u>GOTLAND</u>
Comissionamento	1997	1999	1999
Potência Transmitida (MW)	3	NA	50
Tensão CC, kV	±10	-	±80
Conversores por estação	1	1	1
Tensão CC por conversor, kV	±10	-	±80
Corrente CC, A	150	-	360
Faixa de Mvar	±3	0 - 44	+50 / -55
Locação das estações conversoras e Rede CA	Hällsjön, 10 kV, 50 Hz Grängesberg, 10 kV, 50 Hz	Hagfors, 36 kV, 50 Hz	Näs, 77 kV, 50 Hz Bäcks, 77 kV, 50 Hz
Comprimento de linhas aéreas CC, km	10	NA	-
Arranjo de Cabos	-	NA	Bipolar
Comprimento de cabo, km	0,2	NA	70
Rede CA, ambos los lados	Síncrono	NA	Síncrono
Controle	Potência ativa e reativa	Potência reativa, mitigação de flicker	Potência ativa e reativa e tensão CA
Motivação para utilização do sistema	Sistema piloto	Mitigação de flicker	Ambiental e controlabilidade
Usuário	VB Elnät, Suécia	Uddeholm, Suécia	GEAB, Suécia

Tabela 8 - Aplicações de destaque em corrente contínua com elos de tensão - por potência e distância

<u>INSTALAÇÃO</u>	<u>DIRECTLINK</u>	<u>CROSS SOUND</u>	<u>MURRAYLINK</u>
Comissionamento	2000	2002	2002
Potência Transmitida, MW	3 x 60	330	220
Tensão CC, kV	±80	±150	±150
Conversores por estação	3	1	1
Tensão CC por conversor, kV	±80	±150	±150
Corrente CC, A	375	1200	739
Faixa de Mvar	±90 / -165	±150	+140 / -150
Locação das estações conversoras e Rede CA	Terranova, 110 kV, 50 Hz Mullumbimby, 132 kV, 50 Hz	New Haven, 345 kV, 60 Hz Shoreham, 138 kV, 60 Hz	Berri, 132 kV Red Cliffs, 220 kV
Arranjo de Cabos	Bipolar	Bipolar	Bipolar
Comprimento de cabo, km	65	40	180
Rede CA, ambos os lados	Assíncrono	Síncrono	Assíncrono
Controle	Potência ativa e reativa e tensão CA	Potência ativa e reativa e tensão CA	Potência ativa e reativa e tensão CA
Mudança de fluxo de potência	-	Retorno implementado	Retorno implementado
Motivação para utilização do sistema	Comércio de energia, ambiental e controlabilidade	Cabo Submarino	Ambiental e controlabilidade
Usuário	North Power, Austrália	TransEnergie US, EUA	TransEnergie US, EUA

Tabela 9 – Referências recentes para compensação de reativos com tecnologia fonte de tensão e chaveamento PWM.

<u>INSTALAÇÃO</u>	<u>MOSELSTAHLWERKE</u>	<u>POLARIT</u>	<u>HOLLY</u>
Ano de Comissionamento	2000	2002	2004
Conversores por estação	1	1	1
Faixa de potência reativa, Mvar	0 – 38	0 – 164	+110 / -80
Localização das estações conversoras e Rede CA	Trier, 20 kV, 50 Hz	Tornio, 33 kV, 50 Hz	Austin, 138 kV, 60 Hz
Controle	Potência Reativa, mitigação de flicker	Potência Reativa, mitigação de flicker	Potência Reativa
Motivação para utilização do sistema	Mitigação de Flicker	Mitigação de Flicker	Suporte de Tensão
Usuário	RWE Energie, Alemanha	AvestaPolarit Stainless Ou, Finlândia	Austin Energy, Texas

Apêndice 2 – Transformadores de Potência

Circuito Equivalente de Transformador de Dois Enrolamentos

O circuito equivalente do transformador de dois enrolamentos é representado na Figura 63. Neste circuito equivalente são representadas as reatâncias de dispersão vistas do primário e do secundário, as resistências dos condutores do primário e do secundário e a reatância de magnetização do transformador vista do primário.

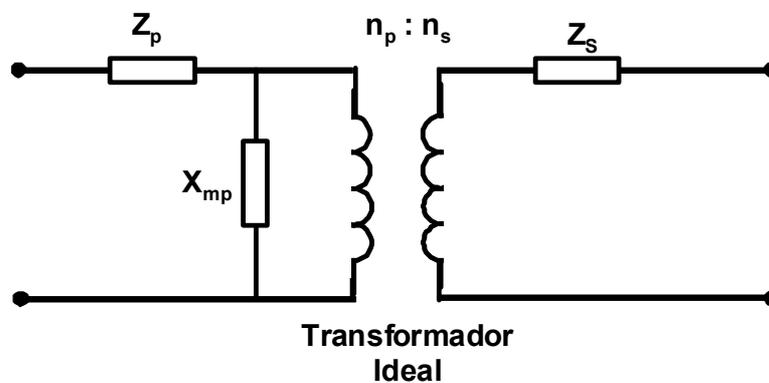


Figura 63 – Circuito equivalente básico para transformador de dois enrolamentos.

Na Figura 63 tem-se:

$$Z_p = R_p + jX_p \quad \text{e} \quad (\text{A-2-1})$$

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (\text{A-2-2})$$

R_p, R_s – São as resistências dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente;

X_p, X_s – São as reatâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente;

X_{mp} – É a reatância de magnetização referida ao lado primário;

n_p, n_s – São os números de espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente.

Os conversores eletrônicos que empregam retificadores de número de pulsos superior a seis ou doze necessitam de transformadores defasadores especiais compatíveis com os retificadores. No caso de retificadores de seis pulsos, um transformador trifásico comum é suficiente para prover a alimentação. No caso de 12 pulsos, são necessárias duas tensões trifásicas defasadas de 30 graus elétricos, obtidos através de um transformador com uma saída em conexão delta e outra em conexão estrela. Esse mesmo resultado pode ser obtido com dois transformadores independentes e saídas, uma em delta e outra em estrela. Para transformadores de 18 ou 24 pulsos, são necessários enrolamentos secundários de transformador defasados de 20 ou 15 graus, respectivamente. Ângulos de defasagem de 20 e 15 graus podem ser obtidos através da combinação de enrolamentos caminhos magnéticos internos diferentes de um mesmo transformador. Paice [44] apresenta análise bem detalhada sobre transformadores defasadores especiais.

Na Figura 64 é apresentado um transformador com primário em conexão delta e secundário em conexão em zigzag. A relação de transformação de tensão e a defasagem angular entre tensão no primário e no secundário são determinadas pelos nove enrolamentos empregados na construção do transformador.

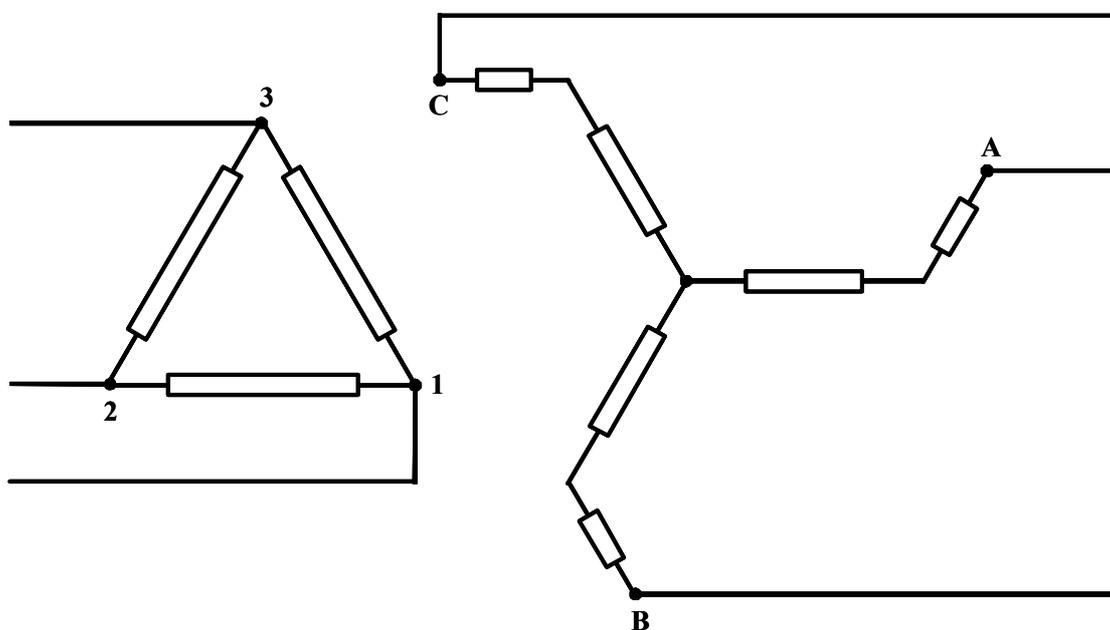


Figura 64 - Transformador defasador - Delta / Zigzag.

Na Figura 65 é apresentado um transformador com primário em conexão delta e secundário em conexão em polígono. Da mesma forma que no transformador

delta/zigzag, é possível projetar o equipamento com relação de transformação e defasagem especificadas.

Além dos transformadores defasadores é possível obter ângulos de defasagens especificados através da utilização de conceitos similares na construção de autotransformadores defasadores.

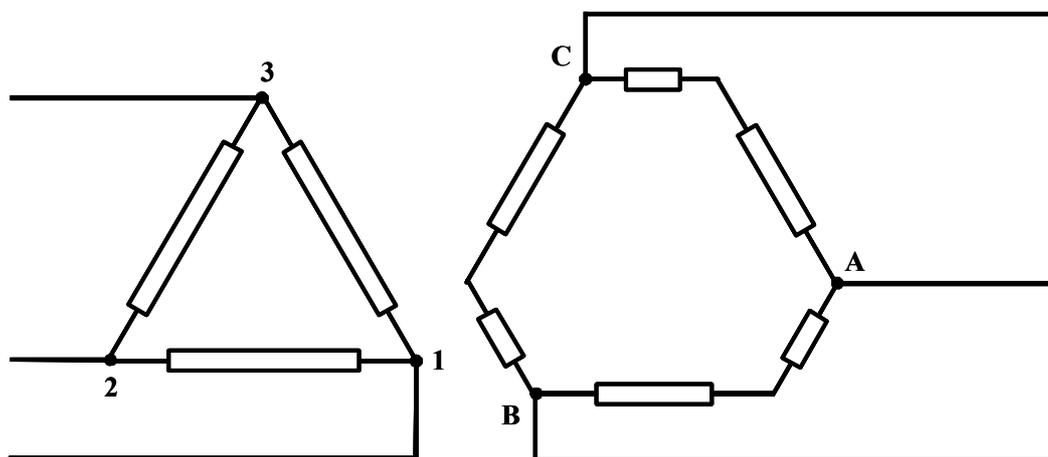


Figura 65 - Transformador defasador - Delta / Polígono.

Os transformadores defasadores descritos são empregados em equipamentos industriais como, por exemplo, um conversor LCI com retificador de 24 pulsos, onde são utilizados dois transformadores de três enrolamentos trifásicos cada, um com saídas de 0 e +30 graus e outro com saídas em -15 e +15 graus. Outro equipamento que emprega transformador defasador é o conversor do tipo multinível que utiliza um transformador bastante peculiar, refrigerado a água, e que possui um enrolamento trifásico no primário e 18 enrolamentos trifásicos secundários.

Apêndice 3 - Motores de Indução

Os modelos utilizados neste trabalho são da teoria geral de máquinas [45], [46] e [47] e escritos sob a forma de variáveis de estado.

Os conceitos teóricos aplicados nas rotinas de simulação de máquinas elétricas, do programa EMTDC/PSCAD™ e utilizadas neste trabalho, são descritos a seguir

Teoria Básica

Os parâmetros de interesse do estator podem ser transformados em equivalentes em outra coordenada, por exemplo, referida ao rotor através da transformada dq0 conforme equação abaixo:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_d \\ \mathbf{U}_q \\ \mathbf{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta - 240^\circ) \\ \text{sen}\theta & \text{sen}(\theta - 120^\circ) & \text{sen}(\theta - 240^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (\text{A-3-1})$$

Os índices utilizados nas equações (A-3-1) até (A-3-16) têm o significado relacionado abaixo:

- k – Enrolamento amortecedor;
- f – enrolamento de campo;
- a,b,c – enrolamentos do estator;
- d – enrolamentos de eixo direto;
- q – enrolamentos de eixo em quadratura.

A Figura 66 apresenta a representação com os enrolamentos da máquina e os equivalentes nos eixos d e q.

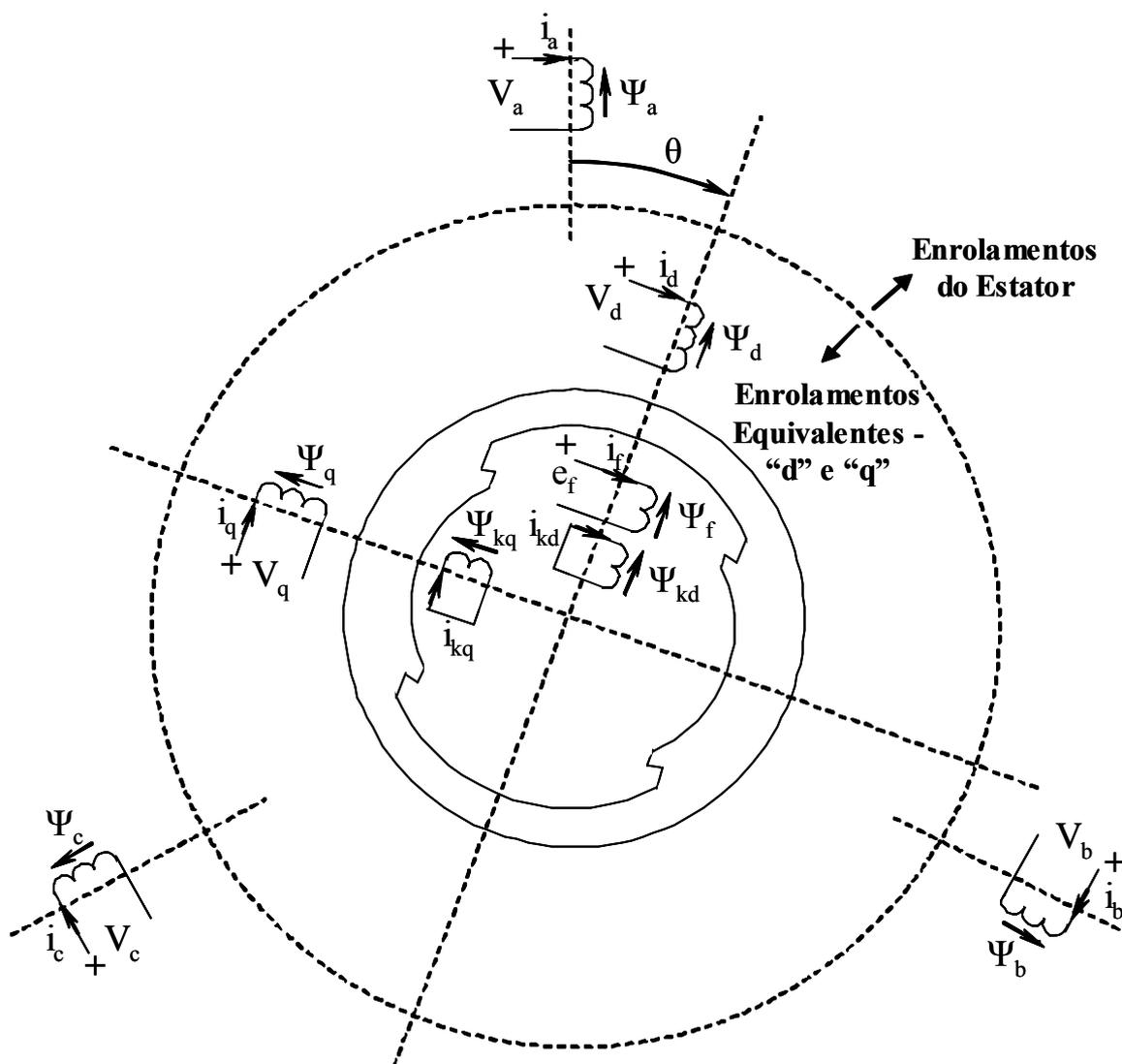


Figura 66 - Diagrama com enrolamentos no estator e o equivalente dq para máquina trifásica.

Na Figura 67 estão representadas as indutâncias e os enlaces de fluxo da máquina para o eixo "d". Os enrolamentos do estator, do campo e amortecedor estão representados, assim como o entreferro.

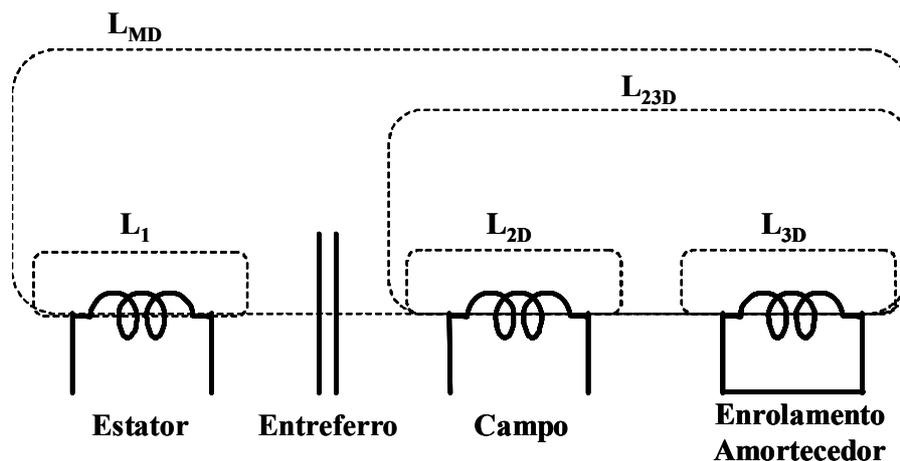


Figura 67 – Enlace de fluxo e indutâncias associadas ao eixo "d".

Na Figura 68 é apresentado o circuito equivalente da máquina trifásica, referente ao eixo "d", coerente com a construção representada na Figura 67.

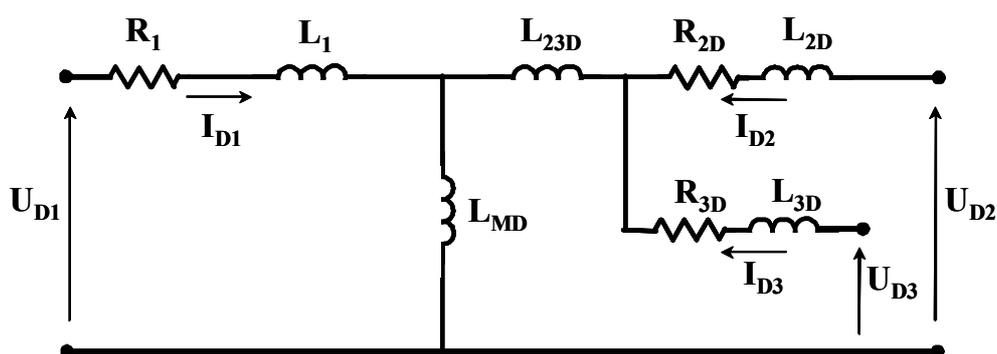


Figura 68- Circuito equivalente - eixo "d".

Com o auxílio da Figura 67 e da Figura 68, as seguintes equações podem ser escritas para o eixo "d":

$$\begin{bmatrix} U_{D1} - v \cdot \Psi_q - R_1 \cdot i_{D1} \\ U_{D2} - R_2 \cdot i_{D2} \\ U_{D3} - R_3 \cdot i_{D3} \end{bmatrix} = L_D \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{D1} \\ i_{D2} \\ i_{D3} \end{bmatrix}, \quad (\text{A-3-2})$$

onde:

$$L_D = \begin{bmatrix} L_{MD} + L_1 & L_{MD} & L_{MD} \\ L_{MD} & L_{MD} + L_{23D} + L_{2D} & L_{MD} + L_{23D} \\ L_{MD} & L_{MD} + L_{23D} & L_{MD} + L_{23D} + L_{3D} \end{bmatrix} \quad (\text{A-3-3})$$

e

$$\Psi_q = L_1 \cdot i_{Q1} + L_{MD} \cdot (i_{D1} + i_{D2} + i_{D3}) \quad (\text{A-3-4})$$

e ainda:

$$v = \frac{d\theta}{dt}. \quad (\text{A-3-5})$$

Para as variáveis relacionadas nas equações (A-3-2) até (A-3-16) temos:

- o índice “1” está associado ao enrolamento do estator;
- o índice “2” está associado ao enrolamento de campo;
- o índice “3” está associado ao enrolamento amortecedor;
- o índice “M” representa a indutância mútua entre os três enrolamentos;
- v - velocidade angular, em rad/s.

E para o eixo q:

$$\begin{bmatrix} U_{Q1} - v \cdot \Psi_d - R_1 \cdot i_{Q1} \\ U_{Q2} - R_2 \cdot i_{Q2} \\ U_{Q3} - R_3 \cdot i_{Q3} \end{bmatrix} = L_Q \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Q1} \\ i_{Q2} \\ i_{Q3} \end{bmatrix}, \quad (\text{A-3-6})$$

onde:

$$L_Q = \begin{bmatrix} L_{MQ} + L_1 & L_{MQ} & L_{MQ} \\ L_{MQ} & L_{MQ} + L_{23Q} + L_{2Q} & L_{MQ} + L_{23Q} \\ L_{MQ} & L_{MQ} + L_{23Q} & L_{MQ} + L_{23Q} + L_{3Q} \end{bmatrix} \quad (\text{A-3-7})$$

e

$$\Psi_d = L_1 i_{D1} + L_{MD} (i_{D1} + i_{D2} + i_{D3}). \quad (\text{A-3-8})$$

Invertendo as equações anteriores para o eixo direto, temos na forma de variáveis de estado $\dot{X} = AX + BU$:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{D1} \\ i_{D2} \\ i_{D3} \end{bmatrix} = L_D^{-1} \begin{bmatrix} -v \cdot \Psi_q - R_1 i_{D1} \\ -R_{2D} i_{D2} \\ -R_{3D} i_{D3} \end{bmatrix} + L_D^{-1} \begin{bmatrix} U_{D1} \\ U_{D2} \\ U_{D3} \end{bmatrix}. \quad (\text{A-3-9})$$

E para o eixo em quadratura:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Q1} \\ i_{Q2} \\ i_{Q3} \end{bmatrix} = L_Q^{-1} \begin{bmatrix} v \cdot \Psi_d - R_1 i_{Q1} \\ -R_{2Q} i_{Q2} \\ -R_{3Q} i_{Q3} \end{bmatrix} + L_Q^{-1} \begin{bmatrix} U_{Q1} \\ U_{Q2} \\ U_{Q3} \end{bmatrix}. \quad (\text{A-3-10})$$

As equações (A-3-9) e (A-3-10) podem ser integradas por métodos numéricos, como por exemplo a integração trapezoidal. Uma vez obtidas as correntes por integração numérica estas são aplicadas em (A-3-8) é possível através de (A-3-11) obter o torque eletromagnético e de (A-3-12) a aceleração angular do rotor.

A equação de torque é dada por:

$$T = \Psi_q i_{D1} - \Psi_d i_{q1}, \quad (\text{A-3-11})$$

E a aceleração angular por:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{T - T_{mec} - Dv}{J}, \quad (\text{A-3-12})$$

onde:

T – torque eletromagnético;

T_{mec} – torque mecânico ou torque resistente da carga;

J – momento de inércia total, considera carga, motor e acoplamento;

D – coeficiente de atrito viscoso.

No caso do motor de indução, com rotor tipo gaiola de esquilo, com as simplificações associadas temos que:

$$U_{D2} = U_{D3} = U_{Q2} = U_{Q3} = 0 \quad (\text{A-3-13})$$

e

$$L_{2D} = L_{2Q} = 0. \quad (\text{A-3-14})$$

As correntes da máquina trifásica são obtidas pela composição dos termos referentes aos eixos direto e de quadratura. A corrente de magnetização é obtida pela equação abaixo:

$$i_M = \sqrt{i_{MD12}^2 + i_{MQ12}^2}, \quad (\text{A-3-15})$$

e a corrente no estator por:

$$i_L = \sqrt{i_{D12}^2 + i_{Q12}^2}. \quad (\text{A-3-16})$$

Apêndice 4 – Operação do Condicionador de Tensão – Regime Permanente

A seguir, é analisada a condição de operação em regime permanente do sistema elétrico com uma carga puramente resistiva e com o cabo da fase “a” interrompido. Além disso, é considerado que a tensão nas fases sãs tem a amplitude desejada.

A condição de alimentação de uma carga resistiva através de um cabo tripolar com interrupção da fase A e com a utilização de um condicionador de tensão do lado da carga é apresentada na Figura 69.

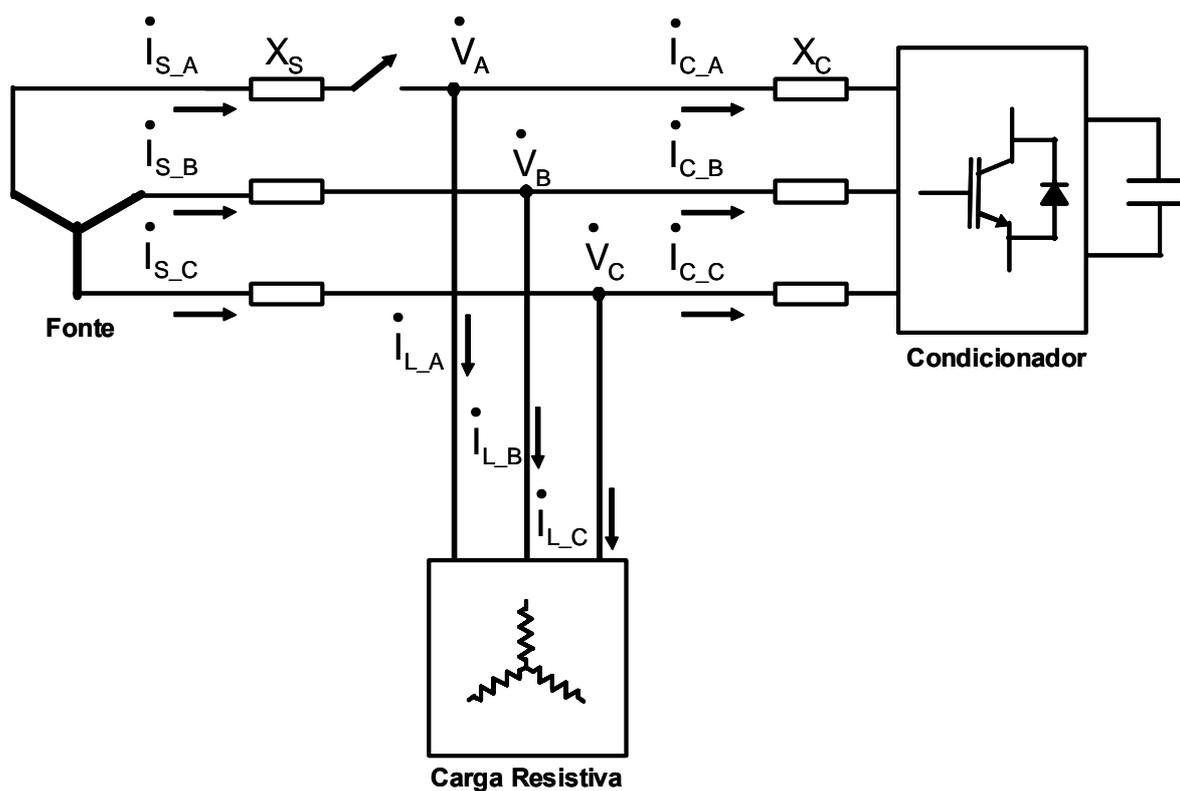


Figura 69 - Condicionador do lado da carga - carga resistiva.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{S_A} \\ \dot{I}_{S_B} \\ \dot{I}_{S_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_{L_B} + \dot{I}_{C_B} \\ \dot{I}_{L_C} + \dot{I}_{C_C} \end{bmatrix} \quad (\text{A-4-1})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{S_A} \\ \dot{\mathbf{I}}_{S_B} \\ \dot{\mathbf{I}}_{S_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\mathbf{I}}_{S_B} \\ -\dot{\mathbf{I}}_{S_B} \end{bmatrix} \quad (\text{A-4-2})$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{L_A} + \dot{\mathbf{I}}_{L_B} + \dot{\mathbf{I}}_{L_C} = 0 \quad (\text{A-4-3})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{L_A} \\ \dot{\mathbf{I}}_{L_B} \\ \dot{\mathbf{I}}_{L_C} \end{bmatrix} = I_L \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}^2 \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} \quad (\text{A-4-4})$$

onde:

$$\mathbf{a} = e^{j120^\circ} \quad (\text{A-4-5})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{S_A} \\ \dot{\mathbf{V}}_{S_B} \\ \dot{\mathbf{V}}_{S_C} \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{V}_S}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}^2 \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} \quad (\text{A-4-6})$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{C_A} + \dot{\mathbf{I}}_{C_B} + \dot{\mathbf{I}}_{C_C} = 0 \quad (\text{A-4-7})$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{C_A} = -\dot{\mathbf{I}}_{L_A} = -I_L \quad (\text{A-4-8})$$

$$\mathbf{V}_S I_S \cos \phi = \sqrt{3} \mathbf{V}_L I_L \quad (\text{A-4-9})$$

$$|I_S| = \frac{\sqrt{3} |V_L| |I_L|}{|V_S| \cos \phi}. \quad (\text{A-4-10})$$

A corrente mínima da fonte ocorre quando esta se encontra em fase com a tensão e assim para tensões de mesma amplitude, desprezada a queda de tensão na impedância desta fonte tem-se:

$$|I_S| = \sqrt{3}|I_L|, \quad (\text{A-4-11})$$

$$\dot{V}_{S_BC} = \dot{V}_{S_B} - \dot{V}_{S_C} = V_S e^{-j90^\circ}. \quad (\text{A-4-12})$$

Para a corrente na carga para a fase B podemos escrever:

$$\dot{I}_{C_B} = \sqrt{3}I_L e^{-j90^\circ} - I_L e^{-j120^\circ} = I_L e^{-j60^\circ}. \quad (\text{A-4-13})$$

Na fase C podemos escrever:

$$\dot{I}_{C_C} = \sqrt{3}I_L e^{+j90^\circ} - I_L e^{+j120^\circ} = I_L e^{+j60^\circ}, \quad (\text{A-4-14})$$

e na fase A temos:

$$\dot{I}_{L_A} = I_L e^{-j60^\circ} + I_L e^{+j60^\circ} = I_L. \quad (\text{A-4-15})$$

Observa-se que é possível manter a carga resistiva pura com alimentação trifásica equilibrada circulando apenas o valor da corrente de carga em cada fase do condicionador de tensão do lado da carga. Neste caso idealizado, a fonte entrega a tensão na amplitude desejada e não é necessária a atuação do condicionador no sentido de compensar quedas de tensão da fonte.

Carga Indutiva Pura

A seguir é analisada a condição de operação em regime permanente do sistema elétrico com uma carga puramente indutiva e com o cabo da fase “a” interrompido. Adicionalmente, é considerado que a tensão nas fases sãs tem a amplitude especificada.

A condição de alimentação de uma carga indutiva através de três cabos com interrupção da fase A e com a utilização de um condicionador de tensão do lado da carga é apresentada na Figura 70.

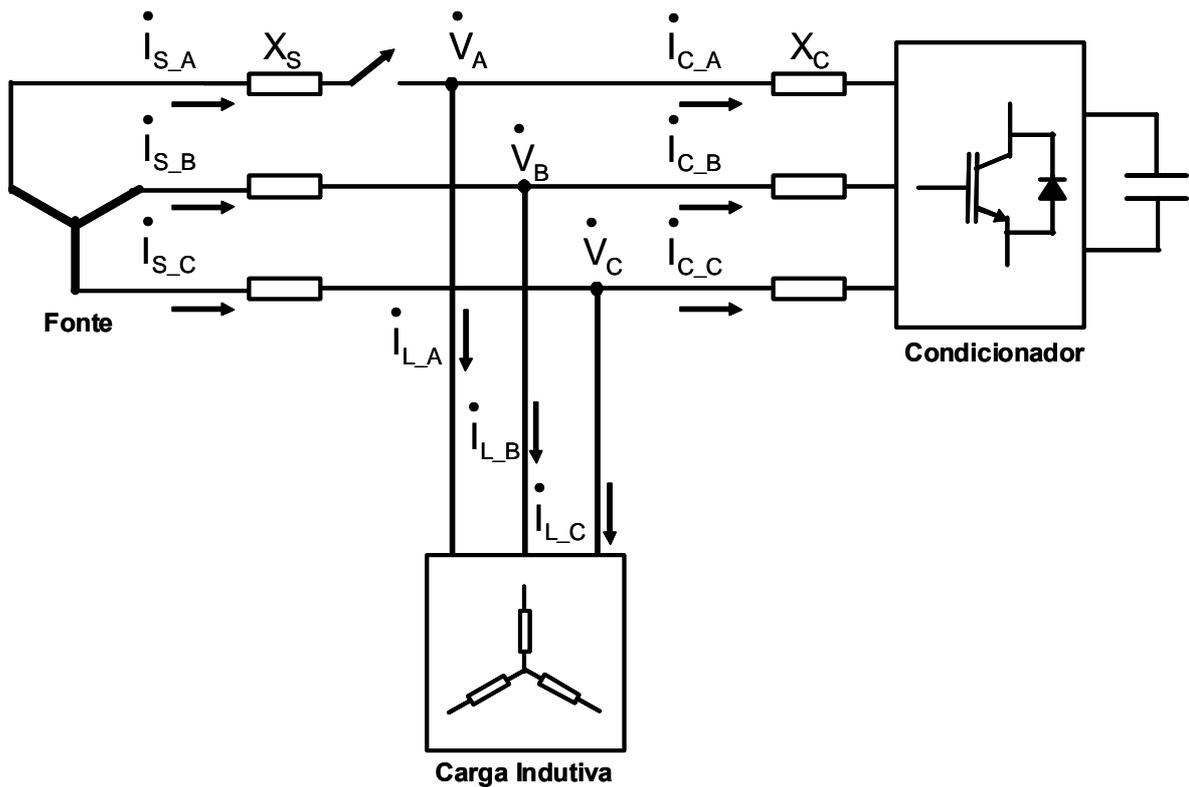


Figura 70 - Condicionador do lado da carga - carga indutiva

$$\dot{V}_{S_{BC}} = \dot{V}_{S_B} - \dot{V}_{S_C} = V_S \cdot e^{-j90^\circ} \quad (\text{A-4-16})$$

Na fase B podemos escrever:

$$\dot{I}_{C_B} = \sqrt{3}I_L e^{-j180^\circ} - I_L e^{-j210^\circ} = I_L e^{-j150^\circ} \quad (\text{A-4-17})$$

E na fase C temos:

$$\dot{I}_{C_C} = \sqrt{3}I_L e^{+j0^\circ} - I_L e^{+j30^\circ} = I_L e^{-j30^\circ} \quad (\text{A-4-18})$$

E na fase A temos:

$$\dot{I}_{L_A} = I_L e^{-j150^\circ} + I_L e^{-j30^\circ} = I_L e^{-j90^\circ} \quad (\text{A-4-19})$$

Observa-se que é possível manter a carga indutiva pura com alimentação trifásica equilibrada circulando apenas o valor da corrente de carga em cada fase do condicionador de tensão do lado da carga. Como no caso anterior, a fonte entrega a tensão na amplitude desejada e não é necessária a atuação do condicionador no sentido de compensar quedas de tensão da fonte.

Carga Ativa e Reativa Trifásica Equilibrada

Para o caso de uma carga trifásica equilibrada caracterizada por uma impedância de fase dada por:

$$Z_L = R_L + jX_L, \quad (\text{A-4-20})$$

onde:

Z_L – é a impedância da carga;

R_L – é a componente resistiva da carga;

X_L – É a componente reativa da carga.

Sob a forma polar temos:

$$Z_L = Z_L e^{+j\phi} \quad (\text{A-4-21})$$

$$\dot{V}_{S_BC} = \dot{V}_{S_B} - \dot{V}_{S_C} = V_S e^{-j90^\circ} \quad (\text{A-4-22})$$

Na fase B podemos escrever:

$$\dot{I}_{C_B} = \sqrt{3}I_L e^{-j(90^\circ + \phi)} - I_L e^{-j(120^\circ + \phi)} = I_L e^{-j(60^\circ + \phi)} \quad (\text{A-4-23})$$

Na fase C temos:

$$\dot{I}_{C_C} = \sqrt{3}I_L e^{+j(90^\circ - \phi)} - I_L e^{+j(120^\circ - \phi)} = I_L e^{+j(60^\circ - \phi)} \quad (\text{A-4-24})$$

Na fase A temos:

$$\dot{I}_{L_A} = I_L e^{-j(60^\circ + \phi)} + I_L e^{+j(60^\circ - \phi)} = I_L e^{-j\phi} \quad (\text{A-4-25})$$

Observa-se que é possível manter a carga trifásica equilibrada composta por parte ativa e reativa com alimentação trifásica equilibrada circulando apenas o valor da corrente de carga em cada fase do condicionador de tensão do lado da carga. A fonte entrega a tensão na amplitude desejada e não é necessária a atuação do condicionador no sentido de compensar quedas de tensão da fonte.

Carga Ativa e Reativa Trifásica Equilibrada e Compensação de Reativos Durante Perda de Fase

A seguir é analisada a situação de operação em regime permanente de um circuito trifásico com interrupção da fase A da fonte. Além disso, é considerado que a tensão nas fases sãs tem a amplitude desejada.

Para o caso de uma carga trifásica equilibrada e compensação de potência reativa durante a perda da fase A temos:

Na fase B, o fasor corrente é dado por:

$$\dot{I}_{C_B} = I_L e^{-j(60^\circ + \phi)} + I_{CR} e^{-j(90^\circ - 90^\circ)} = I_L e^{-j(60^\circ + \phi)} + I_{CR} \quad (\text{A-4-26})$$

Na fase C temos,

$$\dot{I}_{C_C} = I_L e^{+j(60^\circ - \phi)} + I_{CR} e^{-j(90^\circ - 90^\circ + 180^\circ)} = I_L e^{+j(60^\circ - \phi)} - I_{CR}, \quad (\text{A-4-27})$$

e na fase A temos:

$$\dot{I}_{L_A} = I_L e^{-j(60^\circ + \phi)} + I_L e^{+j(60^\circ - \phi)} = I_L e^{-j\phi}. \quad (\text{A-4-28})$$

Então, para manter a carga trifásica equilibrada composta por parte ativa e reativa com alimentação trifásica equilibrada e fornecer reativos para manter a tensão na carga com a amplitude desejada as correntes nas fases B e C do condicionador de tensão do lado da carga devem possuir amplitude maior que a corrente de carga.

Apêndice 5 – Cabos Elétricos

Cálculo de Parâmetros de Cabos Elétricos

Resistência elétrica

Devido à característica de profundidade de penetração dos materiais metálicos, a corrente elétrica não se distribui uniformemente em um condutor. A densidade de corrente é maior próximo à superfície que no interior do condutor e próximo ao centro deste.

O efeito *skin* pode ser estimado em termos da relação entre os valores medidos da resistência ca e da resistência cc.

Considere um parâmetro x definido como na equação (A-5-1).

$$x = \pi d \sqrt{\left[\frac{2 \cdot 10^{-9} f \mu}{\rho_c} \right]} \quad (\text{A-5-1})$$

onde:

- d – é diâmetro do condutor, em cm;
- f – frequência, em Hz;
- μ – é a permeabilidade magnética do material condutor;
- ρ_c – é a resistividade elétrica do material condutor, em $\Omega \cdot \text{cm}$.

As relações empíricas para a razão entre R_{ca} e R_{cc} são para $x < 3$:

$$\frac{R_{ca}}{R_{cc}} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{x^4}{48}}}{2} \quad (\text{A-5-2})$$

onde:

- R_{ca} – é a resistência medida em corrente alternada; em Ω ;
- R_{cc} – é a resistência medida em corrente contínua, em Ω .

e para $x > 3$:

$$\frac{R_{ca}}{R_{cc}} = \left(\frac{x}{2\sqrt{2}} + 0,26 \right) \quad (\text{A-5-3})$$

O cálculo da resistência de um condutor levando em conta, simultaneamente, a temperatura do condutor, o efeito *skin* e o efeito de proximidade é mostrado a seguir:

$$R = R' (1 + y_s + y_p) \quad (\text{A-5-4})$$

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] \quad (\text{A-5-5})$$

onde:

R – é a resistência ca do condutor por unidade de comprimento na temperatura θ , em Ω/m ;

R' – é a resistência cc do condutor por unidade de comprimento na temperatura θ , em Ω/m ;

R_0 – é a resistência cc do condutor por unidade de comprimento a 20 °C, em Ω/m ;

α_{20} – é o coeficiente de temperatura da resistência a 20 °C, em K^{-1} ;

θ – é a temperatura do condutor em, em °C.

O valor de R_0 é calculado por:

$$R_0 = \frac{10^6 \rho}{A_c} \quad (\text{A-5-6})$$

onde:

- A_c – a seção transversal nominal do condutor, em mm^2 ;

- ρ – é a resistividade elétrica do condutor a 20 °C, em $\Omega \cdot \text{m}$.

A resistividade elétrica do cobre a 20 °C é $1,7241 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ e o coeficiente de temperatura do cobre a 20 °C é $3,93 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

O cálculo do fator referente ao efeito *skin*, baseado na IEC 60287-1-1 é apresentado a seguir:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (\text{A-5-7})$$

onde:

$$x_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} (10^{-7})} k_s \quad (\text{A-5-8})$$

e f é dado em Hz e os valores de k_s são experimentais e podem ser obtidos na IEC60287-1-1.

Para condutores ocios a expressão abaixo é utilizada:

$$k_s = \frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2 \quad (\text{A-5-9})$$

onde:

d_i – é o diâmetro interno do condutor, em mm;

d'_c – é o diâmetro externo equivalente do condutor, em mm.

O cálculo do fator de proximidade utiliza a expressão:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\left[\frac{x_p^4}{(192 + 0,8x_p^4)} \right] + 0,27} \right] \quad (\text{A-5-10})$$

onde:

$$x_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'} (10^{-7})} k_p \quad (\text{A-5-11})$$

e

d_c – é o diâmetro externo do condutor, em mm;

s – é a distancia entre os eixos dos condutores, em mm;

e os valores de k_s são experimentais e podem ser obtidos na IEC60287-1-1.

Capacitância do cabo:

A capacitância por unidade de comprimento de um cabo elétrico composto por condutor redondo e isolamento também circular é dada por:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \quad (\text{A-5-12})$$

e

$$C = \frac{55,61\epsilon_r}{\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \quad (\text{A-5-13})$$

onde:

C – é a capacitância por unidade de comprimento do cabo, em pF/m;

ϵ_0 – é a permissividade do vácuo, igual a 8,85 pF/m;

ϵ_r – é a permissividade relativa do material isolante, adimensional;

D_i – é o diâmetro externo da isolação, em mm;

d_c – é o diâmetro externo do condutor, em mm.

Os valores típicos da permissividade relativa do XLPE variam de 2,5 a 3,0.

Indutância própria do cabo - simplificação

Assumindo que a distribuição de corrente no condutor é uniforme, que os condutores tem raio pequeno e são suficientemente espaçados, os materiais envolvidos são não-magnéticos. Além disso, há transposição de fases para cabos não uniformemente espaçados. Assim, as indutâncias próprias para circuitos monofásicos e circuito trifásico são calculadas como segue:

Para o circuito monofásico:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{S}{\sqrt{RMG}}\right) \quad (\text{A-5-14})$$

$$RMG = Re^{-1/4} \quad (\text{A-5-15})$$

A indutância total é o dobro, pois o valor acima se refere apenas a um condutor.

onde:

L – indutância por unidade de comprimento, em H/m;

μ_0 – é a permeabilidade do vácuo, igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;

R – é o raio do condutor, em m;

S – é a distância entre os dois condutores, em m;

RMG – é o raio médio geométrico, em m.

Para o circuito trifásico:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{\text{DMG}}{\text{RMG}}\right) \quad (\text{A-5-16})$$

onde:

$$\text{DMG} = \sqrt[3]{S_{12}S_{23}S_{31}} \quad (\text{A-5-17})$$

e:

S_{12} , S_{23} e S_{31} – são as distâncias entre os condutores, em m;

DMG – é a distância média geométrica.

Apêndice 6 – Métodos de Chaveamento

PWM seno-triângulo

O chaveamento do tipo PWM seno-triângulo pode ser unipolar ou bipolar. Mohan [70] descreve ambos os esquemas.

No chaveamento PWM unipolar o controle das chaves semicondutoras é feito a partir da comparação entre um sinal de controle e uma portadora triangular. O controle de uma das pernas da ponte H é feito pela comparação do sinal de controle e o sinal da portadora triangular enquanto o controle da outra perna é feito pela comparação do sinal de controle multiplicado por “-1” e o mesmo sinal triangular. Este esquema tem a vantagem de dobrar a frequência “equivalente” de chaveamento quando comparado ao esquema bipolar de chaveamento. Além disso, a tensão na saída do inversor possui três níveis, um nível a mais que no esquema bipolar.

Eliminação Seletiva de Harmônicos

Cada recorte sobre um sinal do tipo onda quadrada existente em meio ciclo da tensão de saída representa um grau de liberdade de controle, por exemplo, três transições (ou chaveamentos) em um quarto de ciclo propiciam controle da amplitude da tensão em frequência fundamental e possibilidade de eliminação de dois harmônicos selecionados. Sob outra ótica, podemos dizer que em um quarto de ciclo o número de disparos ou cortes na tensão representa o número de graus de liberdade. Assim para o mesmo exemplo anterior temos três diferentes ângulos inferiores a 90° .

A forma de onda representada na Figura 71 possui três transições em um quarto de ciclo, que ocorrem nos ângulos θ_1 , θ_2 e θ_3 . Com estas transições, ou graus de liberdade, é possível controlar a amplitude da frequência fundamental e eliminar dois harmônicos selecionados.

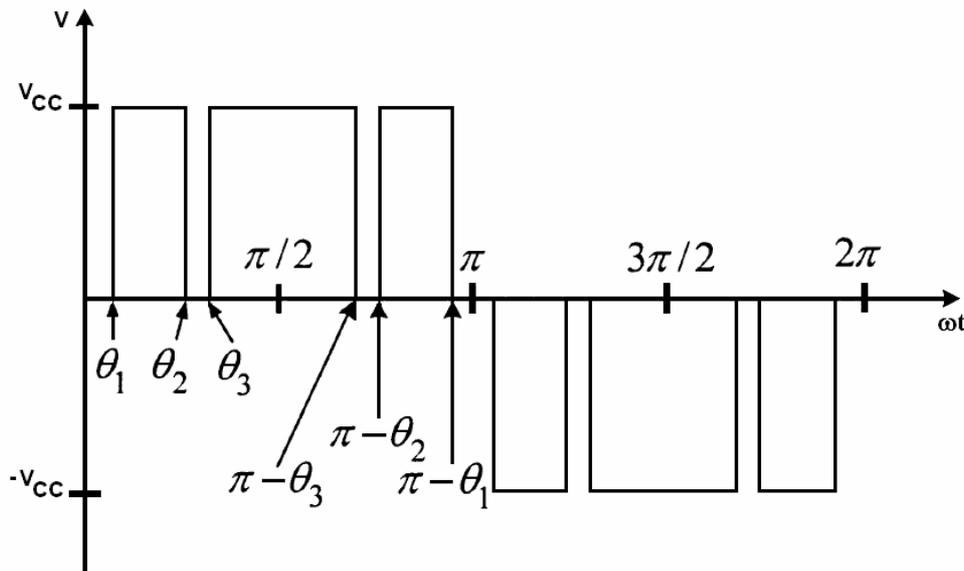


Figura 71 - Tensão com chaveamentos para eliminação seletiva de harmônicos.

A frequência de chaveamento neste caso é maior que a frequência de chaveamento para obtenção da onda quadrada e a relação entre ambas pode ser expressa pela relação abaixo:

$$f_s = (2.n_{\text{ang}} + 1)f_{\text{oq}} \quad (\text{A-6-1})$$

onde:

f_s – Frequência de chaveamento associada à técnica PWM com eliminação de harmônicos;

n_{ang} – Número de ângulos de disparo ou corte em um quarto de ciclo ou número de recortes em meio ciclo;

f_{oq} - Frequência de chaveamento associada à técnica de chaveamento onda quadrada.

Com a técnica de eliminação de harmônicos é possível controlar a amplitude da tensão de frequência fundamental e fazer a eliminação de harmônicos selecionados, normalmente de baixa ordem. Os harmônicos de ordem elevada podem ser facilmente eliminados através da utilização de filtros de harmônicos de pequenas dimensões e custos mais reduzidos.

Uma descrição detalhada do método de eliminação seletiva de harmônicos é apresentada por Holmes e Lipo [53]. Mohan et al [70] apresentam de forma resumida o conceito.

Chiasson [72], Espinosa [73], Enjeti [74] e Asumadu [75] apresentam algoritmos para obtenção dos ângulos de disparo e corte e para chaveamento de conversores com eliminação seletiva de harmônicos.

Os ângulos de disparo e corte para a eliminação dos 5°, 7°, 11° e 13° harmônicos e controle da tensão fundamental em função do fator de modulação “m” são apresentados na Figura 72. As curvas apresentadas foram obtidas através de programação computacional específica para a obtenção dos cinco ângulos (θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 e θ_5) de disparo necessários para o controle da tensão fundamental e eliminação dos quatro harmônicos relacionados. Na Figura 72 os ângulos θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 e θ_5 estão apresentadas de baixo para cima, ou seja, para um mesmo valor de “m” o menor valor de θ é θ_1 e o maior é θ_5 .

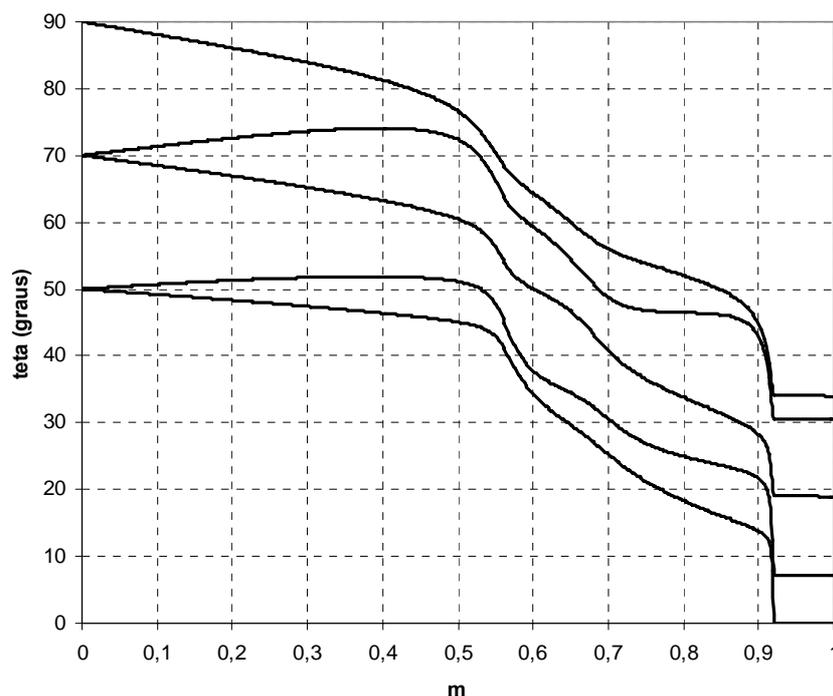


Figura 72 - Ângulos de disparo em função do fator de modulação de amplitude - Eliminação de 5°, 7°, 11° e 13° Harmônicos.

Como pode ser visto na Figura 72 para valores de “m” superiores a 0,92 os ângulos θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 e θ_5 assumem valores constantes, representando que ocorre a perda de controle sobre a amplitude da componente fundamental para valores de “m” maiores.

Apêndice 7 – Qualidade de Tensão e Corrente.

No caso de unidades *offshore* fixas e flutuantes a norma IEC 61892-1 [84] estabelece os limites que devem ser respeitados para garantir a qualidade da tensão. A Tabela 10 apresenta os valores estabelecidos pela referida norma.

Tabela 10 - Limites referentes à tensão de alimentação segundo a IEC 61892-1.

Índice	Limite *
Tolerância de tensão em operação contínua	-10% / +6%
Desbalanço de tensão	7%
Variação cíclica de tensão de forma contínua	2%
Variação transitória lenta devida a variação da carga	-20% / +20%
Soma de variação contínua e transitória	-20% / +20%
Tempo máximo de recuperação da tensão em caso de variação transitória	1,5 s
Limite da componente de seqüência negativa (existindo motores trifásicos)	1% 1,5% (minutos)
Limite da componente de seqüência zero (existindo motores trifásicos)	1%
Distorção harmônica total (máximo)	8%
Componentes harmônicos individuais	5%
Tolerância para operação contínua	-5% / +5%
Variação cíclica da freqüência	0,5%
Tolerância da freqüência sob transitórios	-5% / +5%
Tempo de recuperação da freqüência em transitórios (máximo)	5 s

* Os valores percentuais são expressos em relação aos valores nominais.

A norma IEEE Std 519-1992 [85] estabelece limites referentes ao conteúdo harmônico de tensão e corrente que devem ser respeitados pela concessionária e pelo consumidor em um ponto do circuito estabelecido de comum acordo. Este ponto é

chamado de PCC (*Point of Common Coupling* ou em português Ponto de Conexão Comum) e, normalmente, é o ponto de recebimento de energia pelo consumidor, sendo a interface entre concessionária e consumidor.

Os principais índices de verificação de qualidade de energia elétrica no que se refere a harmônicos recomendados pela IEEE Std 519-1992 são:

- *Notches* na tensão;
- Harmônicos individuais e distorção total de corrente e
- Harmônicos individuais e distorção total de tensão.

A referida norma procura estabelecer limites na tensão para a concessionária e limites na corrente para o consumidor. De forma que se todos os consumidores respeitarem seus limites será possível que a concessionária forneça a tensão com a qualidade desejada.

A IEEE Std 519-1992 estabelece no seu capítulo 10 os limites referentes a *notches* apresentados Tabela 11:

Tabela 11 - Limites de *Notches* de tensão estabelecidos pela IEEE Std 519-1992.

	Aplicações Especiais	Sistemas em Geral	Sistemas Dedicados
Profundidade de <i>Notch</i> (%)	10	20	50
THD (Tensão) (%)	3	5	10
Área de <i>Notch</i> (V.µs) *	16400	22800	36500

* O limite da área de *Notch* deve ser corrigido para tensões diferentes de 480 V pela multiplicação de um fator $V/480$.

A IEEE Std 519-1992 apresenta em seu capítulo 11 os limites de harmônicos de tensão, segundo o nível de tensão da barra considerada, conforme mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 - Limites de Harmônicos de Tensão segundo a IEEE Std 519-1992.

Tensão de Barra no PCC	Distorção Individual de Tensão (%)	Distorção Total de Tensão (%)
69 kV e abaixo	3,0	5,0
69,001 kV até 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV e acima	1,0	1,5

Nota: Sistemas de Alta Tensão podem ter o valor de THD de até 2% quando a causa for um terminal HVDC que irá atenuar quando for acessado por um usuário.

Os limites de harmônicos de corrente são apresentados nas Tabela 13, a Tabela 14 e Tabela 15:

Tabela 13 - Limites de Distorção de Corrente – tensão entre 120 e 69000 V.

Máxima distorção harmônica de corrente, em percentagem de I_L.						
Ordem do Harmônico Individual - (120 V - 69000 V)						
(Harmônicos Ímpares)						
I_{SC} / I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Para a Tabela 13, a Tabela 14 e para a Tabela 15 temos o seguinte:

- harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares.
- distorção de corrente que resultam em componente CC, como conversores de meia onda, não são permitidas.
- o TDD se refere à Distorção Harmônica Total e é baseada na corrente de demanda máxima média na frequência fundamental, medida no PCC (do inglês *Point of Common Coupling*).

* Todo equipamento de geração de energia está limitado a estes valores de distorção de corrente, não importando o valor de I_{SC} / I_L

- I_{SC} - Corrente de curto-circuito máxima no PCC;
- I_L - Corrente de carga de demanda máxima (fundamental) no PCC;
- h - Ordem do harmônico.

No caso do extremo do sistema de transmissão de energia analisado, ou seja, o lado da carga, estar situado em instalação sujeita à regulamentação da ANEEL e do ONS, os índices de qualidade de tensão e corrente devem atender ao que é estabelecido pelos procedimentos de rede do ONS [87] e [88].

Tabela 14 – Limites de harmônicos de corrente – Tensão entre 61001 e 161000 V.

Máxima distorção harmônica de corrente, em percentagem de I_L.						
Ordem do Harmônico Individual - (69001 V - 161000 V)						
(Harmônicos Ímpares)						
I_{SC} / I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20*	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Tabela 15 - Limites de harmônicos de corrente – Tensão acima de 161000 V.

Máxima distorção harmônica de corrente, em percentagem de I_L.						
Ordem do Harmônico Individual - (> 161000 V)						
(Harmônicos Ímpares)						
I_{SC} / I_L	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

A Tabela 16, obtida dos Procedimentos de Rede da ONS - Padrões de Desempenho da Rede Básica, apresenta os padrões de tensões harmônicas de ordens 2 a 50, bem como o padrão para a Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT).

Tabela 16 – Limites globais de tensão expressos em percentagem da tensão fundamental.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥ 8	1%			≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
DTHT = 6%				DTHT = 3%			

A Tabela 17, obtida dos Procedimentos de Rede da ONS - Requisitos Técnicos para a Conexão à Rede Básica, apresenta os limites individuais de tensões harmônicas de ordens 2 a 50 bem como o limite para a Distorção de Tensão Harmônica Total (D).

Tabela 17 – Limites individuais expressos em percentagem da tensão fundamental.

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR	ORDEM	VALOR
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
D = 3%				D = 1,5%			

D – distorção harmônica total

O limite global nos barramentos da rede básica para desequilíbrio de tensão é $K \leq 2\%$.

Sendo:

$$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100, \quad (\text{A-6-2})$$

onde:

K - é o fator de desequilíbrio de tensão por consumidor;

V_1 - componente de seqüência positiva da tensão;

V_2 - componente de seqüência negativa da tensão.

Os “Agentes Distribuidores” e os “Consumidores Livres” devem manter as cargas balanceadas de forma que o desequilíbrio da tensão, nos pontos de conexão, não exceda o limite de $K \leq 1,5 \%$.