

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**COMPENSAÇÃO DO EFEITO DE
DESEQUILIBRIO DAS TENSÕES DE
ALIMENTAÇÃO EM PONTES
RETIFICADORAS CONTROLADAS**

Juliana Cortez de Sá Camposilvan

Itajubá, Novembro de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Juliana Cortez de Sá Camposilvan

**COMPENSAÇÃO DO EFEITO DE
DESEQUILIBRIO DAS TENSÕES DE
ALIMENTAÇÃO EM PONTES
RETIFICADORAS CONTROLADAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Elétrica como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Doutor
em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:
Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Alberto Murari Pinheiro.

Novembro de 2014

Itajubá - MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Juliana Cortez de Sá Camposilvan

**COMPENSAÇÃO DO EFEITO DE
DESEQUILIBRIO DAS TENSÕES DE
ALIMENTAÇÃO EM PONTES
RETIFICADORAS CONTROLADAS**

Tese aprovada por Banca examinadora em 28 de novembro de 2014 conferindo ao autor o título de **Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto Murari Pinheiro (Orientador) – UNIFEI

Prof. Dr. Ronaldo Rossi – UNESP – FEG

Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis - UNESP- FEG

Prof. Dr. Valberto Ferreira da Silva - UNIFEI

Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek - UNIFEI

Itajubá

2014

A Deus

Aos meus pais, Jocélio e Ana Maria,

Ao meu marido Rafael e meu filho Matheus,

por sempre me apoiarem para a realização dessa conquista

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por ter me protegido ao longo dessa caminhada, me proporcionando saúde, paciência, persistência e perseverança.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Murari Pinheiro, que me aceitou como sua orientanda, e me orientou de maneira brilhante, sempre com muita clareza e objetividade.

Ao meu marido Rafael e meu filho Matheus, pelo apoio que sempre me deram durante esses anos.

A minha querida mãe, minhas irmãs e sobrinha pelo apoio nas minhas decisões, sempre com muito amor e carinho.

Aos amigos Francisco Galvão e Lauro Mohallem pela ajuda que me deram para realização desse trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

E por fim, um agradecimento especial ao meu amado pai, que sempre foi exemplo para mim, me apoiou e me ajudou durante a realização desse sonho, sempre com muita dedicação. Te amo pai.

RESUMO

Quando ocorrem distúrbios em um sistema elétrico devem ser tomadas medidas que basicamente visam corrigir o problema ou mitigar os efeitos provocados. Um dos efeitos mais marcantes na definição da qualidade de energia elétrica é o comportamento das tensões de um sistema trifásico em termos dos seus módulos e dos argumentos correspondentes. Sistemas elétricos industriais frequentemente apresentam tensões alternadas desequilibradas provocadas por topologias inadequadas, pela presença marcante de cargas monofásicas e mesmo por redes de distribuição longas sem transposição dos cabos de alimentação. O desequilíbrio resultante pode afetar a operação de diferentes tipos de cargas, tais como motores de indução trifásicos e conversores estáticos comutados pela rede, entre outros. No caso de retificadores controlados comutados pela rede este desequilíbrio interfere diretamente no valor médio da tensão do lado de corrente contínua dos conversores, o que pode ocasionar distúrbios transitórios na regulação de velocidade de motores de corrente contínua ou na tensão de geradores elétricos que sejam alimentados por retificadores controlados. O efeito de desequilíbrios de tensão pode ser compensado através de um procedimento adicional de correção do ângulo de disparo dos conversores controlados em questão, além da correção convencional associada a malhas de regulação de um determinado sistema. Este trabalho propõe um método de compensação adicional para correção do ângulo de disparo de conversores comutados pela rede, que é baseado nas medições dos valores eficazes das tensões de linha de alimentação dos mesmos, associado à aplicação da teoria de componentes simétricas. A correção resultante é rápida e funciona paralelamente com a malha de regulação utilizada. A validação do método proposto é realizada por métodos algébricos, simulações computacionais e ensaios de laboratório.

Palavras chave: Desequilíbrio de tensões, conversores estáticos, componentes simétricas, compensação de ângulo de disparo.

ABSTRACT

When there are disturbances in an electrical system, actions should be taken in order to solve or at least mitigate the effects caused by it. One of the most striking effects on the definition of the electrical energy quality on a triphasic system is the behavior of the voltages considering its absolute values and its corresponding angles. Industrial electrical systems frequently present unbalanced alternating currents, caused by inadequate topologies, by the striking presence of monophasic charges and even by distribution networks without the transposition of the supplying cables. The resulting unbalance can affect different load types, such as three-phase induction motors and static convertors commuted with natural switching, among others. In the case of commutation in controlled convertors, this unbalance in the networks directly interferes in the average value of the rectified voltage on the DC side of the convertors, which can cause disturbances in the regulation of the velocity of direct current motors or in electric voltage generators which are driven by commuted rectifiers throughout the network. The effects of unbalanced voltages can be compensated by an additional procedure of correction of the trigger angle of the converter itself, beyond the conventional correction associated to regulation loop of a system. This thesis proposes a method of additional compensation for the correction of the trigger angle of commuted convertors, which is based on the measures of the R.M.S. values of the line voltages that supplies the above-mentioned convertors, associated to the application of the Symmetrical Components Theory. The resultant correction is quick and works in parallel with the regulation mesh involved. The validation of the proposed method is realized by algebraic methods, computacional simulations and laboratory tests.

Key words: Unbalance voltage, static convertors, symmetrical components, trigger angle compensation.

Sumário

| | |
|---|-----|
| AGRADECIMENTO | ii |
| RESUMO | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE TABELAS | x |
| LISTAS DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVEAÇÕES | xi |
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 Introdução Geral..... | 14 |
| 1.2 Organização..... | 13 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 Introdução | 15 |
| 2.2 Resenha Bibliográfica | 15 |
| 3 REVISÃO DE CONCEITOS..... | 19 |
| 3.1 Introdução | 19 |
| 3.2 Conversores Estáticos..... | 19 |
| 3.2.1 Conceitos Básicos..... | 19 |
| 3.2.2 Conversor Configurado em Ponte Trifásica..... | 20 |
| 3.3 O Desequilíbrio de Tensões..... | 26 |
| 3.3.1 Origem dos Desequilíbrios de Tensões..... | 26 |
| 3.3.2 Quantificação de Desequilíbrios | 28 |
| 3.3.3 Considerações sobre a Avaliação do Desequilíbrio de Tensão | 31 |
| 4 Conversores Estáticos Controlados Alimentados com Tensões Desequilibradas | 33 |
| 4.1 Considerações Iniciais | 33 |
| 4.2 Obtenção dos Fasores das Tensões a partir de Medições dos Valores Eficazes das Tensões de Linha | 34 |
| 4.3 Análise da Operação de um Conversor Controlado Ligado em Ponte Trifásica Alimentado por um Sistema de Tensões Desequilibradas | 36 |
| 4.4 Valor Médio da Tensão Retificada por um Conversor Desequilibrado..... | 38 |
| 4.5 Obtenção das Componentes Simétricas das Tensões de Linha para Correção do Ângulo de Disparo do Conversor..... | 42 |
| 4.6 Considerações Finais | 43 |
| 5 PROCEDIMENTO PARA CORREÇÃO DO ÂNGULO DE DISPARO DO CONVERSOR | 45 |
| 5.1 Considerações Iniciais | 45 |
| 5.2 Procedimento de Compensação | 45 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.3 | Comprovação Algébrica do Método..... | 48 |
| 5.3.1 | Exemplo 1: Conversor Não Controlado..... | 49 |
| 5.3.2 | Exemplo 2: Ponte Trifásica Controlada..... | 52 |
| 5.3.2 | Exemplo 3: Ponte Semi-Controlada..... | 54 |
| 5.4 | Considerações Finais..... | 56 |
| 6 | RESULTADOS DE SIMULAÇÕES E DE ENSAIOS EM LABORATÓRIO..... | 59 |
| 6.1 | Considerações Iniciais..... | 59 |
| 6.2 | Simulações Computacionais..... | 60 |
| 6.3 | Ensaio de Laboratório..... | 65 |
| 6.4 | Considerações Finais..... | 75 |
| 7 | CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 76 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 78 |
| | ANEXO A..... | 81 |
| | ANEXO B..... | 85 |
| | ANEXO C..... | 87 |
| | ANEXO D..... | 89 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 3.1 – Conversor não controlado ligado em ponte trifásica.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Figura 3.2 – Formas de onda das tensões de linha de alimentação do conversor e da tensão no lado de corrente contínua (admitindo-se que as tensões de linha são equilibradas).....</i> | <i>21</i> |
| <i>Figura 3.3 – Formas de onda das correntes no retificador não controlado ligado em ponte trifásica alimentando uma carga indutiva (a comutação de um diodo para outro é considerada instantânea).....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 3.4 – Conversor controlado ligado em ponte trifásica.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Figura 3.5 – Forma de onda da tensão $v_{d\alpha}$ no lado de corrente contínua do conversor controlado ligado em ponte trifásica para $\alpha = 30^0$.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 3.6 – Formas de onda de tensão e corrente na fase a do lado de corrente alternada do conversor ligado em ponte trifásica para $\alpha = 0^0$ e para $\alpha = 30^0$.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figura 3.7 – Forma de onda da tensão $v_{d\alpha}$ no lado de corrente contínua do conversor controlado para $\alpha = 75^0$.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 3.8 – Fasores das tensões de linha de um sistema elétrico equilibrado (a) e desequilibrado (b).....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 3.9 – Diagramas fasoriais das componentes simétricas de tensões.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 4.1 - Medição dos valores eficazes e cálculo dos fasores associados.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Figura 4.2 - Fasores das tensões de linha a partir dos valores eficazes.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 4.3 - Conversor em ponte trifásica comutado pela rede.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 4.4 - Tensões de linha desequilibradas de alimentação do conversor.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Figura 4.5 - Ilustração dos intervalos de tempo de condução.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 4.6 – Ponte trifásica semicontrolada.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 4.7 – Formas de onda das tensões de alimentação e da tensão de saída do retificador ligado em ponte trifásica semicontrolada.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 4.8 - Procedimento para cálculo das componentes simétricas.....</i> | <i>43</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 5.1 - Procedimento para correção do ângulo de disparo do conversor.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 5.2 – Ponte trifásica não controlada.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 5.3 – Referência para contagem do ângulo de disparo.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figura 5.4 – Conversor controlado ligado em ponte trifásica.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 5.5- Ponte trifásica semi-controlada.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Figura 6.1 – Estrutura considerada nas simulações computacionais.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 6.2 – Comportamento do sistema sem a ação da compensação extra.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 6.3 – Detalhe da velocidade do sistema sem a compensação adicional.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 6.4 – Comportamento do sistema com compensação de ângulo.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 6.5 – Detalhe da velocidade do sistema com a compensação adicional.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figura 6.6 – Estrutura da bancada de testes utilizada nos experimentos.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figura 6.7 – (Foto 1) Instrumentação da bancada de testes.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figura 6.8 – (Foto 2) Instrumentação da bancada de testes.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 6.9 – (Foto 3) Instrumentação da bancada de testes.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 6.10 – Tacômetro usado na bancada de testes.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 6.11 – Diagrama relacionado com a primeira fase dos testes.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figura 6.12 – Caso 1 para $V_+ = 223 [V]$ e $\alpha_{atual} = 30^\circ$.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 6.13 – Caso 1 para $V_+ = 199 [V]$ e $\alpha_{atual} = 30^\circ$.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 6.14 – Caso 1 para $V_+ = 199 [V]$ e $\alpha_{corrigido} = 16,6^\circ$.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 6.15 – Caso 2 para $V_+ = 230 [V]$ e $\alpha_{atual} = 30^\circ$.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figura 6.16 – Caso 2 para $V_+ = 230 [V]$ e $\alpha_{corrigido} = 34,5^\circ$.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figura 6.17 – Comportamento do sistema sem a ação da compensação extra.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Figura 6.18 – Comportamento do sistema com compensação de ângulo.....</i> | <i>74</i> |
| <i>Figura B-1 – Comportamento do sistema com compensação de ângulo.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figura B-2 – Comportamento do sistema com compensação de ângulo.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Figura C-1 – Ponte semi-controlada.....</i> | <i>87</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Figura C-2 – Formas de onda dos sinais de tensão de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Figura D-1 – Formas de onda dos sinais de tensão de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Figura D-2 – Formas de onda dos sinais de tensão de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Figura D-3 – Formas de onda dos sinais de tensão de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Figura D-4 – Formas de onda dos sinais de tensão de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.....</i> | <i>95</i> |
| <i>Figura D-5 – Formas de onda dos sinais de tensão de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.....</i> | <i>97</i> |
| <i>Figura D-6 – Formas de onda dos sinais de tensão de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.....</i> | <i>98</i> |
| <i>Figura D-7 – Formas de onda dos sinais de tensão de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.....</i> | <i>100</i> |
| <i>Figura D-8 – Gráfico da tensão do lado de corrente contínua do conversor para $V_{ab}=V_{bc}=V_{ca}= 440(V)$, cujo valor médio resultante da simulação foi de $V_{da} = 488,3[V]$.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Figura D-9 – Figura D9 – Gráfico da tensão do lado de corrente contínua do conversor para $V_{ab}=415 (V), V_{bc}=440 (V), V_{ca}=450(V)$, cujo valor médio resultante da simulação foi de $V_{da} = 465,9[V]$.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Figura D-10 – Figura D10 – Gráfico da tensão do lado de corrente contínua do conversor para $V_{ab}=V_{bc}=V_{ca}=419,73(V)$, cujo valor médio resultante da simulação foi de $V_{da} = 465,8[V]$.....</i> | <i>108</i> |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabela 4.1 – Referência para contagem da condução do par de tiristores.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabela 4.2 – Forma de operação da ponte trifásica semicontrolada.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabela 4.3 – Intervalos e respectivas funções.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabela 6.1 – Valores de ensaios práticos realizados na bancada de testes.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Tabela D1 – Valores de ensaios práticos realizados na bancada de testes.....</i> | <i>96</i> |
| <i>Tabela D2 – Valores de ensaios práticos realizados na bancada de testes.....</i> | <i>97</i> |

LISTAS DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVEAÇÕES

| | |
|------------|---|
| a | <i>Operador Rotacional</i> |
| $AIEE$ | <i>American Institute of Electrical Engineers</i> |
| C_M | <i>Constante de torque</i> |
| C_N | <i>Constante da tensão induzida</i> |
| D | <i>Diodo</i> |
| I_{AN} | <i>Corrente de armadura nominal</i> |
| i_A | <i>Valor instantâneo da corrente na fase A</i> |
| I_2 | <i>Valor eficaz da corrente de linha no lado de corrente alternada do conversor</i> |
| I_d | <i>Valor média da corrente no lado de corrente contínua do conversor</i> |
| I_P | <i>Corrente de partida</i> |
| K | <i>Fator de desequilíbrio de tensões</i> |
| K_E | <i>Ganho do circuito de armadura</i> |
| K_i | <i>Ganho integral do regulador de velocidade</i> |
| K_n | <i>Constante do tacômetro</i> |
| K_p | <i>Ganho proporcional do regulador de velocidade</i> |
| n_N | <i>Velocidade nominal</i> |
| M_C | <i>Conjugado da carga</i> |
| M_N | <i>Conjugado nominal</i> |
| P_d | <i>Potência ativa disponibilizada pelo conversor</i> |
| P_N | <i>Potência nominal</i> |
| Q_α | <i>Potência não ativa devido ao deslocamento da corrente em relação à tensão associada ao ângulo de disparo</i> |
| Q_h | <i>Potência não ativa devido à distorção da corrente</i> |

| | |
|---------------|--|
| R_A | <i>Resistência do circuito de armadura</i> |
| R_C | <i>Resistência de comutação</i> |
| S_d | <i>Potência aparente disponibilizada pelo conversor</i> |
| T | <i>Tiristor</i> |
| T_E | <i>Constante de tempo elétrica da armadura</i> |
| T_M | <i>Constante de tempo mecânica</i> |
| t | <i>Tempo</i> |
| V_{AB} | <i>Valor instantâneo da tensão entre as fases A e B</i> |
| V_{AC} | <i>Valor instantâneo da tensão entre as fases A e C</i> |
| V_{BC} | <i>Valor instantâneo da tensão entre as fases B e C</i> |
| V_{BA} | <i>Valor instantâneo da tensão entre as fases B e A</i> |
| V_{CB} | <i>Valor instantâneo da tensão entre as fases C e B</i> |
| V_{CA} | <i>Valor instantâneo da tensão entre as fases C e A</i> |
| V_d | <i>Valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor não controlado</i> |
| V | <i>Valor eficaz da tensão de linha de alimentação do conversor</i> |
| v_A | <i>Valor instantâneo da tensão na fase A</i> |
| V_{AN} | <i>Tensão de armadura nominal</i> |
| $v_{d\alpha}$ | <i>Valor instantâneo da tensão no lado de corrente contínua de um conversor controlado</i> |
| v_d | <i>Valor instantâneo da tensão no lado de corrente contínua de um conversor não controlado</i> |
| $V_{d\alpha}$ | <i>Valor médio da tensão no lado de corrente contínua de um conversor controlado</i> |
| V_m | <i>Valor médio da tensão de linha</i> |
| V_f | <i>Tensão nominal de linha</i> |

| | |
|-------------------|--|
| V_p | <i>Componente de sequencia positiva da tensão</i> |
| \dot{V}_{ab} | <i>Fasor que representa a tensão de linha v_{ab}</i> |
| \dot{V}_{bc} | <i>Fasor que representa a tensão de linha v_{bc}</i> |
| \dot{V}_{ca} | <i>Fasor que representa a tensão de linha v_{ca}</i> |
| $\dot{V}_{ab(+)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia positiva da tensão v_{ab}</i> |
| $\dot{V}_{ab(-)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia negativa da tensão v_{ab}</i> |
| $\dot{V}_{bc(+)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia positiva da tensão v_{bc}</i> |
| $\dot{V}_{bc(-)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia negativa da tensão v_{bc}</i> |
| $\dot{V}_{ca(+)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia positiva da tensão v_{ca}</i> |
| $\dot{V}_{ca(-)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia negativa da tensão v_{ca}</i> |
| $\dot{V}_{ab(0)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia zero da tensão v_{ab}</i> |
| $\dot{V}_{bc(0)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia zero da tensão v_{bc}</i> |
| $\dot{V}_{ca(0)}$ | <i>Fasor que representa a componente de sequencia zero da tensão v_{ca}</i> |
| x | <i>Reatância indutiva</i> |
| α | <i>Ângulo de Disparo</i> |
| β | <i>Fator utilizado para definição do desequilíbrio no método CIGRE</i> |
| μ | <i>Ângulo de comutação</i> |
| ΔV | <i>Maior desvio das tensões de linha em relação ao valor médio.</i> |

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução Geral

Um conversor estático controlado alimentado por um sistema de tensões alternadas equilibrado opera com um ângulo de disparo definido pelo funcionamento do sistema de controle associado. A ocorrência de um desequilíbrio de tensão altera o valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor. O procedimento proposto neste trabalho realiza a correção do ângulo de disparo corrente para que o valor médio da tensão seja mantido, mesmo que na presença de desequilíbrios nas tensões de alimentação do sistema.

Em uma rede trifásica com tensões desequilibradas, a avaliação do nível de desequilíbrio pode ser realizada diretamente através de medição dos valores eficazes das tensões de linha. Isto condiz com várias situações práticas, pois o mesmo grau de desequilíbrio pode ser provocado por diferentes conjuntos de tensões, mostrando que os efeitos provocados pelo desequilíbrio de tensão em um conversor estático não dependem apenas do grau do desequilíbrio, mas dos valores eficazes das tensões do sistema. Com base nas medições dos valores eficazes das tensões, pode ser realizada uma correção adicional do ângulo de disparo corrente objetivando compensar o efeito do desequilíbrio no valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor. A medição das tensões de linha de alimentação de um conversor pode ser realizada diretamente através de transformadores de potencial convencionais, ou por sondas de efeito Hall.

A teoria de componentes simétricas é utilizada para realizar os equacionamentos necessários para obtenção das componentes de sequência positiva e de sequência negativa que representam o sistema de tensões de linha desequilibrado, lembrando que as componentes de sequência zero são nulas em um sistema elétrico cujas tensões de

linha estão desequilibradas sem contato a terra.

A correção do ângulo de disparo é realizada a partir do valor da componente de sequência positiva da tensão do sistema, obtida por medições dos valores eficazes das tensões de linha.

1.2 Organização

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de trabalhos que abordam a operação de conversores estáticos alimentados com tensões desequilibradas, e de trabalhos que utilizam a teoria de componentes simétricas para modelagem dos sistemas correspondentes.

Capítulo 3 - Revisão de Conceitos: Esse capítulo contém uma revisão básica dos conceitos que serão utilizados nesta tese: o conceito de desequilíbrio de tensão dentro da área de Qualidade de Energia Elétrica, as normas que analisam e quantificam os desequilíbrios de tensões; a conceituação de componentes simétricas; as topologias e modelagens básicas de conversores estáticos controlados; etc.

Capítulo 4 - Conversores Estáticos Controlados Alimentados com Tensões Desequilibradas: Nesse capítulo é realizado o desenvolvimento algébrico e apresentado o método que permite a obtenção dos fasores de tensão a partir de medições dos valores eficazes das tensões de linha de um sistema trifásico desequilibrado. É analisada a operação de um conversor controlado ligado em ponte trifásica alimentado por um sistema de tensões desequilibradas, dos quais se conhecem os módulos e argumentos das tensões de linha. É desenvolvido o equacionamento para obtenção do valor médio da tensão retificada em função do ângulo de disparo do conversor. É utilizada a teoria de componentes simétricas, e apresentado o método para obtenção das componentes de sequência positiva e de sequência negativa das tensões de linha a partir dos fasores obtidos, cujas informações servirão de base para o procedimento de correção do ângulo de disparo de um conversor controlado na presença de desequilíbrios de tensões.

Capítulo 5 - Procedimento para Correção do ângulo de Disparo do Conversor: Nesse capítulo é proposto um procedimento para correção do ângulo de disparo de

retificadores controlados a partir da quantificação da componente de sequência positiva da tensão de alimentação do conversor. A comprovação algébrica do método será exemplificada através de exemplos numéricos.

Capítulo 6 - Resultados de Simulações e de Ensaios em Laboratório: Esse capítulo contém resultados originados de simulações computacionais utilizando a metodologia desenvolvida, comprovando a validade do mesmo em alguns contextos de aplicações práticas. Um dos exemplos ilustra que um distúrbio relacionado com desequilíbrio de tensão de alimentação de um conversor, provoca uma alteração transitória no valor médio da tensão retificada, que alimentando um motor de corrente contínua, ocasiona um transitório na rotação da máquina. Com a compensação adicional do ângulo de disparo do conversor, a rotação em questão é corrigida em um tempo muito menor pelo sistema proposto do que pela forma convencional de controle. Resultados de ensaios de laboratório também são apresentados, comprovando experimentalmente os resultados obtidos nas simulações computacionais.

Capítulo 7 - Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros: Esse capítulo contém as conclusões deste trabalho e são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão bibliográfica sobre os principais temas pesquisados para realização deste trabalho.

2.1 Introdução

Trabalhos relacionados à “Qualidade da Energia Elétrica” são cada vez mais frequentes devido às exigências técnicas que se impõe nos processos de geração, transmissão, distribuição, e principalmente consumo de energia elétrica. No que se refere à influência da qualidade da tensão de alimentação nos consumidores destacam-se os trabalhos referentes à operação com tensões distorcidas e com tensões desequilibradas.

Nos trabalhos relacionados à operação com tensões distorcidas são abordadas as causas, os efeitos e os métodos de mitigação, ao passo que nos trabalhos relacionados à tensões desequilibradas são analisados principalmente os efeitos nas cargas elétricas. A influência do desequilíbrio de tensões em conversores estáticos e em motores de indução trifásicos são os temas bem frequentes.

Segue uma resenha dos textos pesquisados referentes às causas, a quantificação e aos efeitos provocados por tensões desequilibradas em conversores estáticos controlados, principalmente em retificadores.

2.2 Resenha Bibliográfica

Os textos pesquisados foram separados em relação aos temas:

- Trabalhos que envolvem a aplicação de componentes simétricas para análises de sistemas elétricos desequilibrados.

- Textos que analisam conversores submetidos a tensões desequilibradas utilizando-se de abordagens diversas.
- Artigos que analisam a influência do desequilíbrio de tensões em cargas diversas, principalmente quando alimentadas através de conversores estáticos.

Inicialmente referencia-se o trabalho de Fortescue (1918), onde está descrita a metodologia utilizada para análise de redes trifásicas desequilibradas. Neste texto um sistema elétrico desequilibrado é representado por três sistemas trifásicos equilibrados e o método associado é conhecido como teoria das componentes simétricas.

No trabalho de Rashid e Maswood (1988) foi analisado e avaliado o desempenho de um conversor AC-DC alimentado com tensões desequilibradas. Foi observado que o nível de desequilíbrio de tensões tem um papel significativo nas características operacionais do conversor, especialmente em condições de operação em baixas tensões.

No trabalho desenvolvido por Ojo e Bhat (1994) foi analisada em condições de regime permanente e de regime transitório a operação de um retificador controlado alimentado com tensões desequilibradas. As análises resultantes foram realizadas através da transformada d-q .

No trabalho de Strobl et al. (1999) foi apresentada a aplicação da teoria das componentes simétricas em conversores estáticos. No artigo o método foi utilizado para realização de diagnóstico de falhas em conversores estáticos, o procedimento desenvolvido se mostrou eficiente para detecção de falhas em contextos diversos de funcionamento de conversores estáticos.

A análise do desequilíbrio de tensões, assim como as causas e efeitos resultantes em sistemas elétricos foram abordados no trabalho de Von Jouanne e Banerjee (2001). As causas de desequilíbrios em sistemas de alimentação e instalações elétricas industriais, bem como os efeitos adversos resultantes em equipamentos, tais como motores de indução e conversores eletrônicos de potência foram analisadas. O artigo também abordou e comentou as normas que tratam do desequilíbrio de tensões.

Abdel-Salam et al. (2007) descrevem um método para simulações dinâmicas de sistemas multi-conversores. A modelagem dos sistemas baseou-se em componentes simétricas, onde foram abordados conversores alimentados com transformadores em

configurações típicas de seus enrolamentos primários e secundários (delta, estrela, etc.). A modelagem resultante se mostrou adequada para a análise e a quantificação de harmônicos característicos e não característicos presentes nos conversores considerados.

Em Kazem et al. (2009) foi apresentada a modelagem de uma ponte retificadora de seis pulsos quando alimentada por um sistema trifásico de tensões desequilibradas. Uma das contribuições deste trabalho consistiu na realização da modelagem no domínio do tempo do sistema com diversos tipos de cargas.

No trabalho de Tang et al. (2010) foi proposto um sistema de controle “One-Cycle-Control” modificado para controlar de um conversor PWM alimentado com tensões desequilibradas e distorcidas. No conversor considerado os efeitos dos desequilíbrios e das distorções foram modelados no circuito intermediário de corrente contínua do sistema, onde uma modificação indicada na estrutura foi proposta para a compensação destes efeitos.

Costa et al. (2011) apresentam um estudo do método denominado Componentes Simétricas Generalizadas para análise de sistemas trifásicos com tensões desequilibradas e distorcidas. O método foi aplicado com sucesso na modelagem de conversores estáticos de energia.

No trabalho de Chomat, et al. (2011) analisou-se as pulsações de tensão no circuito intermediário de corrente contínua de um inversor de tensão imposta alimentado com tensões desequilibradas. No trabalho foi proposto um procedimento para minimizar os efeitos destas pulsações na operação do conversor quando aplicado no acionamento de uma máquina elétrica.

No trabalho de Suh et al. (2011) foi analisado um procedimento para compensação de desequilíbrio de tensão em um retificador aplicado na alimentação de um motor de alta potência. Três algoritmos de controle diferentes foram formulados com base nas componentes simétricas e na técnica de decomposição d-q para o sistema operando em condições operacionais desequilibradas generalizadas. O desempenho dos algoritmos foi considerando no contexto de geração de harmônicos e eficiência energética.

Em Lara e Vieto (2012) análises foram realizadas em um motor de indução trifásico alimentado por um sistema elétrico desequilibrado. Os efeitos decorrentes de

desequilíbrios foram quantificados e sugeridos procedimentos para minimizar os mesmos.

No de livro GOTTFRIED, M (1984) encontra-se a teoria básica de conversores estáticos controlados e não controlados, operando alimentados com tensões equilibradas.

Em Hussein et al. (2009) foram disponibilizadas simulações mostrando a influência do desequilíbrio das tensões de alimentação no efeito de comutação de conversores ligados em ponte trifásica.

No trabalho de Cano et al. (2001) foi proposto um novo método para quantificar distorções harmônicas provocadas por conversores controlados. No método proposto as distorções foram quantificadas utilizando-se funções de transferência.

No trabalho de Enjeti e Ziogas (1990) foi proposto um método para análise do funcionamento de conversores estáticos, operando com sistemas equilibrados e desequilibrados. O método também propõe uma análise envolvendo ângulos de comutação.

Em Hwang e Lehn (2008) foi desenvolvido um método de controle para mitigação de harmônicos provocados por conversores de corrente alternada em corrente contínua, onde a eficácia do método foi comprovada através de resultados experimentais.

No trabalho de Murty et al. (1984) foi desenvolvido um microprocessador para diagnósticos de falhas utilizados em conversores trifásicos totalmente controlados. Além do monitoramento de falhas, o sistema também apresenta uma malha de controle para proteção contra curto-circuito nos terminais da carga.

No trabalho de Ngandui et al. (1997) foi feita uma abordagem estabelecendo equações analíticas para análise de harmônicos produzidos por conversores de 12, 18 e 24 pulsos. A análise foi feita utilizando-se componentes simétricas.

Paulillo e Abreu (2001) propõe uma solução para conversores alimentados com tensões desequilibradas. A solução proposta é baseada em uma nova topologia utilizando-se um transformador (ADZ) e seu desenvolvimento como compensador de desequilíbrio de tensão de alimentação do conversor.

No trabalho de Wasynczuk (1994) é proposto um método para análise das características de desempenho de conversores alimentados com tensões desequilibradas.

CAPÍTULO 3

3 REVISÃO DE CONCEITOS

3.1 Introdução

Com a finalidade de estabelecer uma base teórica para o desenvolvimento da metodologia que deu origem a ferramenta para correção dos efeitos dos desequilíbrios de tensões no valor médio da tensão de saída de conversores, são apresentados neste capítulo topologias e modelagens básicas de conversores estáticos, a conceituação de desequilíbrios de tensão, a normalização pertinente ao assunto e a teoria de componentes simétricas.

3.2 Conversores Estáticos

3.2.1 Conceitos Básicos

Denomina-se conversor estático de corrente alternada em corrente contínua todo o equipamento que tem por objetivo a interligação de uma rede de corrente alternada com tensão e frequência constantes a uma rede de corrente contínua. Se o conversor é controlado o valor médio da tensão no lado de corrente contínua é variável, sendo possível controlar o fluxo de potência ativa tanto da rede de corrente alternada para a rede de corrente contínua (operação como retificador), quanto da rede de corrente contínua para a rede de corrente alternada (operação como inversor). A potência não ativa necessária a operação do conversor é sempre fornecida pela rede de corrente alternada, ou seja, todo o processo de comutação é realizada pela mesma.

Este tipo de conversor é de importância fundamental em vários processos práticos, tendo como aplicações principais a alimentação de acionamentos controlados que utilizam máquinas de corrente contínua ou de corrente alternada, transmissão de energia elétrica em corrente contínua, tração elétrica, entre outras. Existem várias

formas de configuração dos conversores estáticos, porém a mais utilizada é a configuração em ponte trifásica ou em “Formação Graetz” (Gottfried, 1984).

3.2.2 Conversor Configurado em Ponte Trifásica.

Com a finalidade de estabelecer conceitos fundamentais do conversor controlado configurado em ponte trifásica, inicialmente será analisado o conversor não controlado também em ponte trifásica.

3.2.2.1 – Conversores Não Controlados

A Figura 3.1 ilustra um conversor não controlado ligado em ponte trifásica.

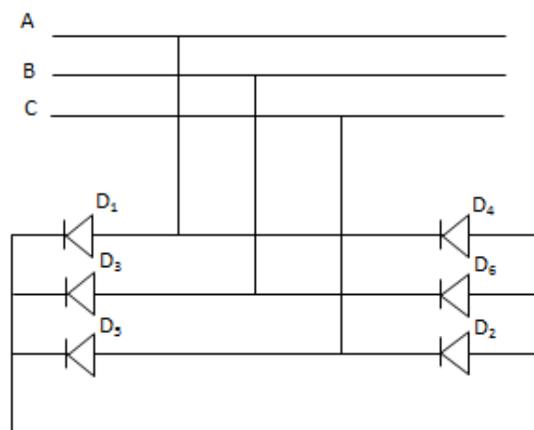


Figura 3.1 – Conversor não controlado ligado em ponte trifásica.

O sistema da Figura 3.1 é conectado diretamente à rede de corrente alternada. Admitindo-se que as tensões de linha da rede de corrente alternada de alimentação do conversor são equilibradas, a Figura 3.2 mostra as formas de onda das tensões no lado de corrente alternada e no lado de corrente contínua do conversor. A condução ocorre sempre através do par de diodos que está submetido à tensão de linha mais positiva.

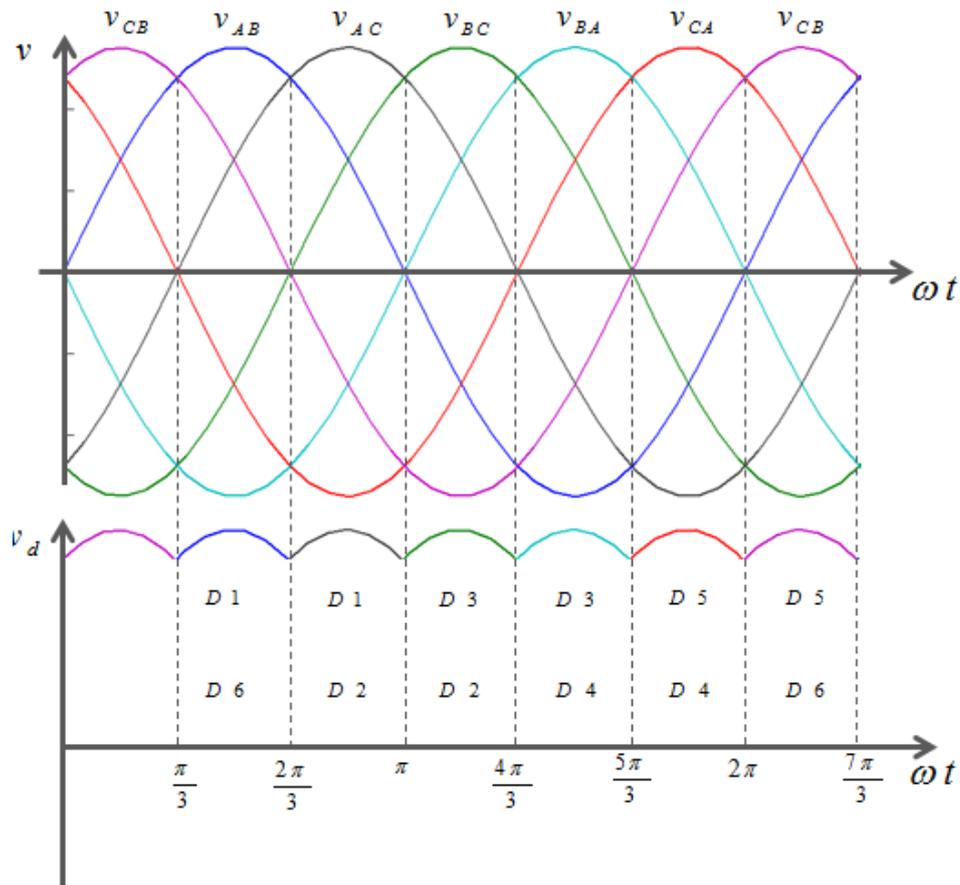


Figura 3.2 – Formas de onda das tensões de linha de alimentação do conversor e da tensão no lado de corrente contínua (admitindo-se que as tensões de linha são equilibradas).

O valor médio da tensão V_d no lado de corrente contínua do conversor é definido pela equação (3.1), que é função do valor eficaz da tensão de linha do lado de corrente alternada V .

$$V_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2}V \sin \omega t d\omega t = 1,35V \quad (3.1)$$

A Figura 3.3 mostra as formas de onda das correntes de carga I_d , nos diodos e nas fases de alimentação do conversor.

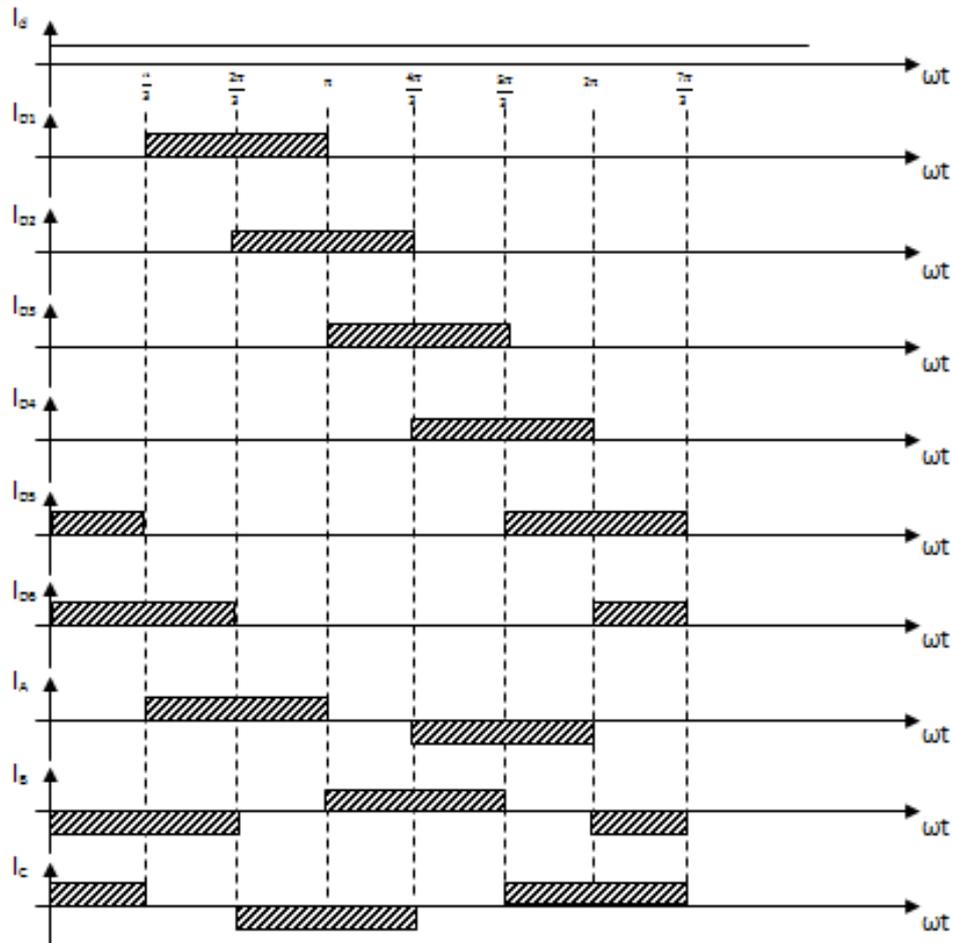


Figura 3.3 – Formas de onda das correntes no retificador não controlado ligado em ponte trifásica alimentando uma carga indutiva, onde a comutação de um diodo para outro é considerada instantânea.

3.2.2.2 – Conversores Controlados

A Figura 3.4 mostra o circuito de um conversor controlado em ponte trifásica.

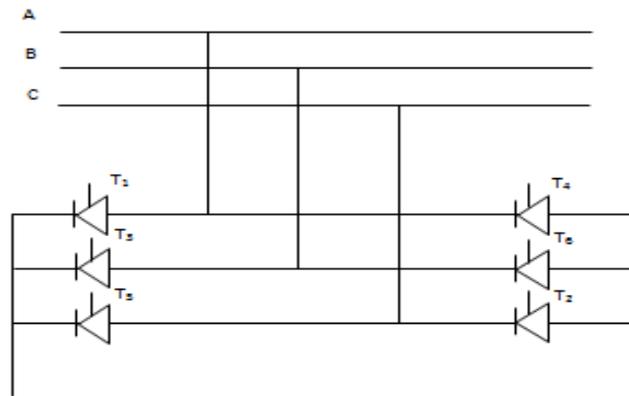


Figura 3.4 – Conversor controlado em ponte trifásica.

Conceitualmente cada tiristor pode assumir eletricamente três estados operacionais. O tiristor está bloqueado quando fica submetido a uma tensão reversa, o mesmo ocorrendo quando o componente é submetido à tensão direta, mas quando não recebe pulso de acionamento no seu terminal de gatilho. O terceiro estado operacional, ou seja, o estado de condução ocorre quando o componente além de submetido a uma tensão direta também é acionado, o que significa aplicar um pulso de corrente em sua entrada de comando denominada gatilho (*gate*). Este pulso de corrente é produzido por um circuito denominado circuito de disparo. Desta forma, no conversor controlado a entrada de um par de tiristores depende de duas condições operacionais:

- Cada par de tiristores deve ser acionado simultaneamente;
- Cada par de tiristores disparados tem que estar submetido à tensão de linha de valor instantâneo mais positivo no instante dos disparos.

O instante de disparo de um par de tiristores é definido pelo ângulo de disparo do circuito de comando. Para cada par de tiristores o ângulo de disparo é contado a partir do ponto onde ocorreria a entrada em condução do mesmo, se no lugar de tiristores existissem apenas diodos.

A Figura 3.5 ilustra a forma de onda da tensão $v_{d\alpha}$ no lado de corrente contínua do conversor para um ângulo de disparo $\alpha = 30^\circ$. Nesta figura também estão indicados os pontos onde os pares de tiristores são acionados. Observe, por exemplo, que o par $T1$ e $T6$ é disparado 30° após a intersecção dos valores instantâneos que representam as tensões de linha v_{cb} e v_{ab} . Para obtenção da forma de onda mostrada na Figura 3.5 a comutação de um par para outro par de tiristores é considerada instantânea.

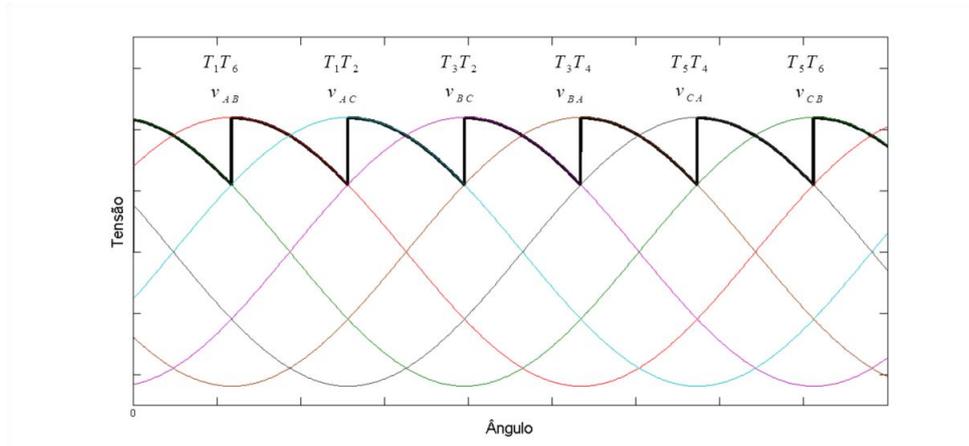


Figura 3.5 – Forma de onda da tensão $v_{d\alpha}$ no lado de corrente contínua do conversor controlado ligado em ponte trifásica para $\alpha = 30^\circ$.

A Figura 3.6 mostra, para fins de comparação, as posições relativas das correntes e das tensões de linha do conversor para $\alpha = 0^\circ$ (o mesmo que para um conversor não controlado) e para $\alpha = 30^\circ$. Pode-se observar que o ângulo de deslocamento da corrente em relação à tensão aumenta com o ângulo de disparo.

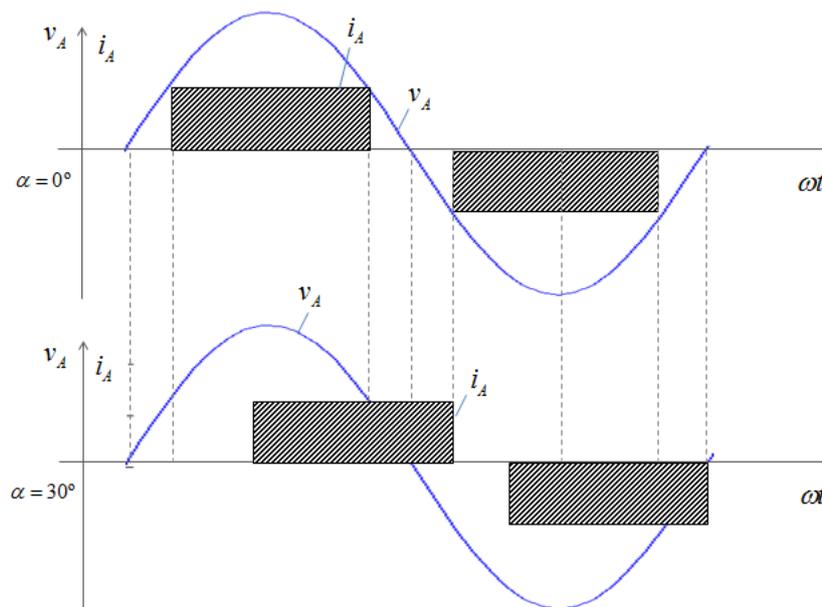


Figura 3.6 – Formas de onda de tensão e corrente do lado de corrente alternada do conversor em ponte trifásica para $\alpha = 0^\circ$ e para $\alpha = 30^\circ$.

A Figura 3.7 mostra a forma de onda da tensão $v_{d\alpha}$ para $\alpha = 75^\circ$, e onde se considerou que não ocorra intermitência de corrente para valores de ângulo maiores que 60° devido à carga do conversor ter comportamento indutivo.

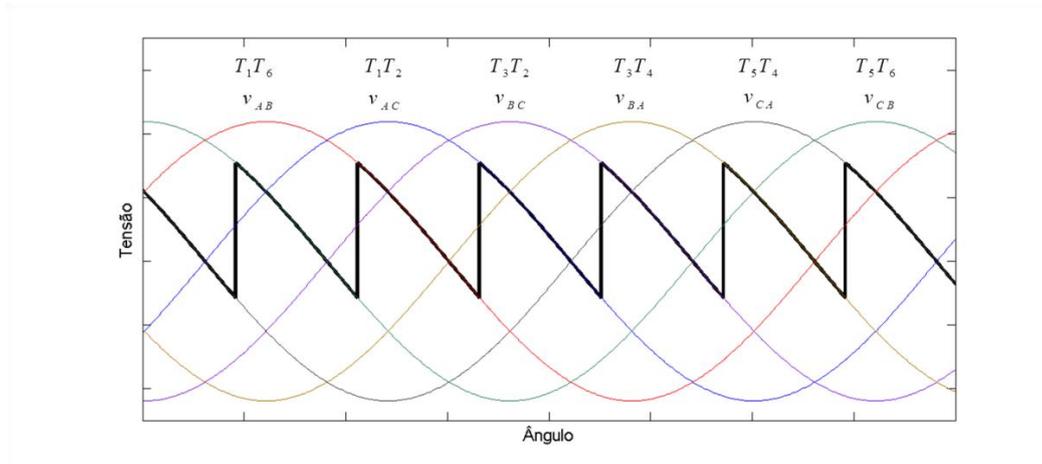


Figura 3.7 – Forma de onda da tensão $v_{d\alpha}$ no lado de corrente contínua do conversor controlado para $\alpha = 75^\circ$.

O valor médio da tensão em um conversor controlado em ponte trifásica $V_{d\alpha}$ é dado por (3.2).

$$V_{d\alpha} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{2}V_s \sin \omega t d\omega t = 1,35V_s \cos \alpha \quad (3.2)$$

Esta equação é válida para corrente com comportamento não intermitente e não leva em conta o efeito de comutação do conversor. Indutâncias do lado de corrente alternada do conversor, que estão ligadas em série com os tiristores como as de transformadores e indutores limitadores de variação de corrente (di/dt), minimizam a ocorrência de intermitência na condução dos tiristores, mas também podem ocasionar efeitos de comutação. Assumindo que no retificador ligado em ponte trifásica, cujo circuito está mostrado na Figura 3.4, o par de tiristores em condução é T1 e T2 e que ocorrerá a comutação da corrente do sistema do tiristor T1 para o tiristor T3 (que ocorre após a comutação do par em condução será T3 e T2), considerando-se as indutâncias em série com os tiristores envolvidos no processo de comutação, tanto o crescimento da corrente no tiristor T3 quanto a redução da corrente no tiristor T1, a comutação dos tiristores associados não ocorrem instantaneamente. Isto significa que durante o intervalo $\omega t = \mu$ do ângulo de comutação os tiristores conduzem ao mesmo tempo. Conforme Moeltigen (1984) valem as seguintes observações:

a – A tensão na saída do retificador assume o valor médio das tensões envolvidas durante o processo de comutação. Para o par de tiristores T_1 e T_2 conduzindo tem-se $v_{d\alpha} = v_{AC}$, e para o par de tiristores T_3 e T_2 conduzindo tem-se $v_{d\alpha} = v_{BC}$. Desta forma, durante o processo de comutação a tensão na saída do retificador é dada por (3.3).

$$V_{d\alpha} = \frac{v_{AC} + v_{BC}}{2} \quad (3.3)$$

b – O valor médio da tensão na saída no retificador será alterado em relação ao valor não se considerando o processo de comutação. O novo valor depende do ângulo de disparo α e do ângulo de comutação μ conforme a equação (3.4). (Anexo D)

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35V}{2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)] \quad (3.4)$$

c – A equação (3.4) é válida para o conversor configurado em ponte trifásica e com a corrente de carga sem intermitência e sem ondulação (considerando a parcela indutiva da carga com um valor alto). O valor médio $V_{d\alpha}$ também pode ser calculado diretamente por (3.5) a partir dos parâmetros do circuito no lado de corrente alternada do retificador, sendo R_C um parâmetro denominado resistência de comutação que é definido em função da reatância X do lado de corrente alternada do retificador. O valor médio da tensão na saída do retificador será definido em função deste parâmetro, do valor eficaz da tensão de linha de alimentação do retificador V , do ângulo de disparo α e do valor médio da corrente de carga I_d .

$$V_{d\alpha} = 1,35V \cos \alpha - R_C I_d \quad (3.5)$$

$$R_C = \frac{3X}{\pi} \quad (3.6)$$

3.3 O Desequilíbrio de Tensões

3.3.1 Origem dos Desequilíbrios de Tensões

As tensões de um sistema elétrico que opera em regime permanente podem ser representadas por fasores que se caracterizam por um módulo e um argumento. Em um sistema trifásico as tensões de linha ou entre fases são representados por três fasores que são iguais em módulo e defasados entre si de 120° , constituindo um sistema elétrico de tensões equilibradas. Se os fasores das tensões de linha não atendem estas condições, o sistema elétrico é considerado desequilibrado. A Figura 3.8 ilustra os fasores das tensões de linha de um sistema elétrico, onde a figura (a) ilustra um sistema equilibrado e (b) um sistema desequilibrado.

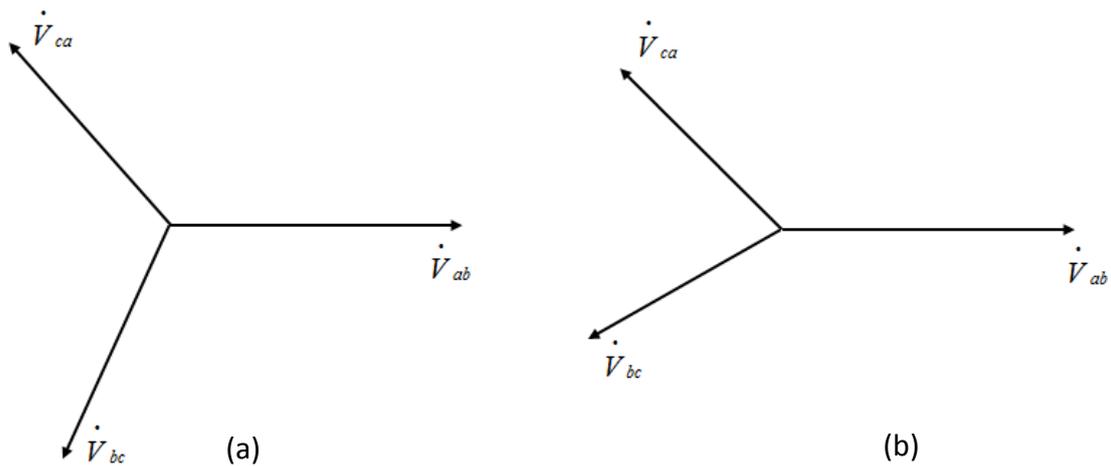


Figura 3.8 – Fasores das tensões de linha de um sistema elétrico equilibrado (a) e desequilibrado (b).

Desequilíbrios de tensões em relação a cargas monofásicas (sejam ligadas entre fases ou entre fase e neutro) interferem nas tensões aplicadas na carga por terem diferentes valores nominais. Já para cargas trifásicas podem ocorrer condições operacionais sensíveis e até inadmissíveis, como em motores de indução trifásicos e conversores estáticos, que são responsáveis pelo maior consumo de energia elétrica em sistemas industriais. O funcionamento de motores de indução trifásicos se baseia na interação de forças magneto-motrizes produzidas no estator e no rotor. Se o motor é alimentado com tensões equilibradas, a interação destas forças magneto-motrizes terá como resultado a produção de um conjugado motor uniforme e otimizado. Caso o sistema de tensões de alimentação do motor seja desequilibrado a interação das forças magneto-motrizes terá como consequência a produção de torques tanto no sentido de rotação do motor, quanto em sentido contrário, resultando em aquecimentos que levam a redução de sua vida útil.

No caso de conversores estáticos controlados, como nos retificadores, foco deste trabalho, o desequilíbrio das tensões de linha de alimentação leva a alteração no valor médio da tensão do lado de corrente contínua, obrigando o sistema de controle realizar alterações do ângulo de disparo sem a correspondente variação de carga do sistema.

A operação normal de grandes máquinas síncronas, responsáveis pela geração de energia elétrica que alimentam o parque industrial, produzem forças eletromotrizes equilibradas, mas tensões nas cargas resultam desequilibradas por correntes diferentes nas três fases, e também por impedâncias diferentes das três fases de transmissão ou distribuição de energia.

O desequilíbrio provocado por diferenças nas impedâncias das três fases é denominado estrutural e ocorre nos transformadores e nas linhas de transmissão e de distribuição. A transposição dos condutores nas linhas de transmissão e de distribuição minimiza o desequilíbrio estrutural.

Já o desequilíbrio provocado por desigualdade das correntes nas três fases se deve a cargas monofásicas distribuídas de maneira não uniforme e de funcionamento aleatório.

Em redes elétricas com baixo nível de curto-circuito a ocorrência de desequilíbrio de tensões é mais frequente.

3.3.2 Quantificação de Desequilíbrios

Como é comum em várias áreas das engenharias, é importante ter-se uma métrica ou um fator para quantificar o desequilíbrio de tensões com o objetivo de estabelecer o que é ou não aceitável. A quantificação do desequilíbrio de tensões é realizada através de um indicador denominado fator de desequilíbrio de tensões ou fator K . Existem quatro métodos mais comumente empregados para o cálculo do fator K :

- Método das componentes simétricas;
- Método da “International Council on Large Electric Systems – CIGRÉ”;
- Método da “National Electrical Manufacturers Association – NEMA”;

- Método do “Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE”.

3.3.2.1 Método das Componentes Simétricas

Este é o método considerado pela norma brasileira. Ele se baseia em artigo de Fortescue publicado em 1918 no anuário AIEE, onde se demonstrou que qualquer grupo desequilibrado de n fasores associados pode ser resolvido em n grupos de fasores equilibrados, sendo denominados componentes simétricas dos fasores originais.

Com base neste teorema, um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas simétricos e equilibrados, onde:

- Um sistema de sequência positiva tem a mesma sequência de fases do sistema desequilibrado original;
- Um sistema de sequência negativa tem uma sequência de fases inversa da sequência de fases do sistema desequilibrado original;
- Um sistema de sequência zero é composto de fasores simétricos e paralelos.

A Figura 3.9 ilustra os diagramas fasoriais das componentes simétricas que representam um sistema desequilibrado de tensões.

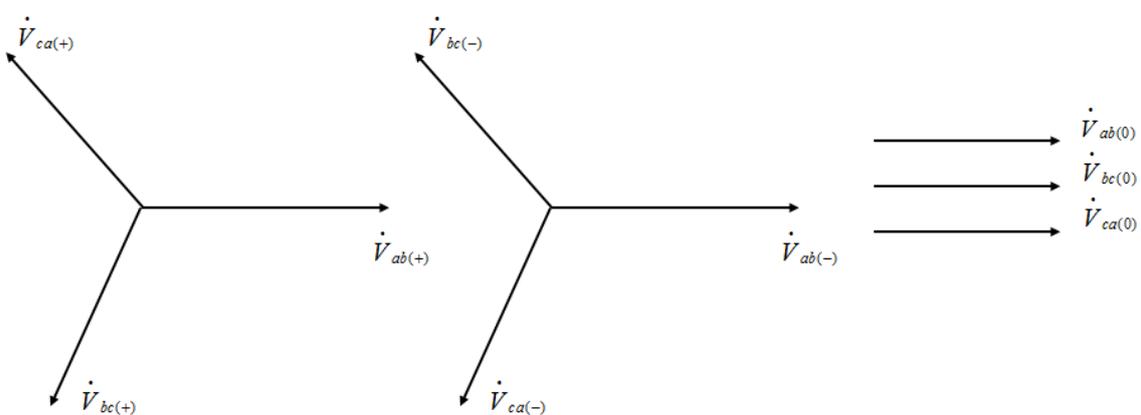


Figura 3.9 – Diagramas fasoriais das componentes simétricas de tensões.

Na figura 3.9 têm-se:

$\dot{V}_{ab(+)} , \dot{V}_{bc(+)} e \dot{V}_{ca(+)}$ (sistema de componentes de seqüência positiva);

$\dot{V}_{ab(-)} , \dot{V}_{bc(-)} e \dot{V}_{ca(-)}$ (sistema de componentes de seqüência negativa);

$\dot{V}_{ab(0)} , \dot{V}_{bc(0)} e \dot{V}_{ca(0)}$ (sistema de componentes de seqüência zero).

Conhecidos os fasores das tensões do sistema desequilibrado $\dot{V}_{ab} , \dot{V}_{bc} e \dot{V}_{ca}$, a determinação dos fasores das componentes simétricas é realizada a partir da matriz (3.7) de Fortescue.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ \dot{V}_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{(0)} \\ \dot{V}_{(+)} \\ \dot{V}_{(-)} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Nesta equação, a é o operador rotacional cujo módulo é unitário e o argumento vale 120° , ou seja, $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ (sendo “j” a notação de número imaginário). Os símbolos $\dot{V}_{(0)} , \dot{V}_{(+)} e \dot{V}_{(-)}$ representam os fasores das tensões de seqüência zero, positiva e negativa, respectivamente.

Em um sistema trifásico com tensões de linha desequilibradas a componente de seqüência zero destas tensões é nula, portanto o sistema é representado apenas pelas componentes de seqüências positiva e negativa.

Conforme o Módulo 8 do PRODIST (Procedimento de Distribuição), elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, o fator de desequilíbrio de tensão K (3.8) é definido em termos percentuais pela relação entre o módulo da componente de seqüência negativa $V_{(-)}$ e o módulo da componente de seqüência positiva $V_{(+)}$.

$$K = \frac{V_{(-)}}{V_{(+)}} 100 [\%] \quad (3.8)$$

Os valores dos fasores das componentes de seqüência positiva e negativa são obtidos conforme as equações a seguir.

$$\dot{V}_{(+)} = \frac{1}{3} (\dot{V}_{ab} + a\dot{V}_{bc} + a^2\dot{V}_{ca}) \quad (3.9)$$

$$\dot{V}_{(-)} = \frac{1}{3} (\dot{V}_{ab} + a^2\dot{V}_{bc} + a\dot{V}_{ca}) \quad (3.10)$$

3.3.2.2 Método CIGRÉ

Neste método o fator de desequilíbrio K é definido pela equação (3.11), onde o parâmetro β (3.12) é definido em função dos módulos das tensões de linha.

$$K = \sqrt{\frac{1+\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3+6\beta}}} 100 [\%] \quad (3.11)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3.12)$$

3.3.2.3 Método NEMA

Este método é definido na norma NEMA – MG – 14.34. O fator de desequilíbrio K (3.13) é definido pela relação entre o maior desvio entre as tensões de linha em relação ao valor médio destas tensões ΔV e o valor médio das tensões V_m .

$$K = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100 [\%] \quad (3.13)$$

3.3.2.4 Método IEEE

O fator de desequilíbrio K (3.14) é definido como sendo a relação entre a maior diferença entre as tensões de linha e a média dessas tensões.

$$K = \frac{V_{max} - V_{min}}{\left(\frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}\right)} 100 [\%] \quad (3.14)$$

3.3.3 Considerações sobre a Avaliação do Desequilíbrio de Tensão

Neste capítulo foram apresentadas as principais causas de desequilíbrio de tensões e as diversas formulações propostas para definição do fator de desequilíbrio K . É importante observar que para algumas aplicações a definição deste fator não é suficiente para determinar adequadamente o efeito do desequilíbrio de tensões em determinados contextos. Isto ocorre para cargas que tem seu funcionamento influenciado pela redução da tensão de operação, como é o caso de motores de indução trifásicos e de conversores estáticos controlados, uma vez que o mesmo fator de desequilíbrio pode ser obtido para

diversas combinações de tensões. O dado de maior interesse é o valor assumido pela componente de sequência positiva, conforme será analisado nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 4

4 Conversores Estáticos Controlados Alimentados com Tensões Desequilibradas

4.1 Considerações Iniciais

A operação de um conversor estático controlado alimentado com tensões desequilibradas produz um valor médio da tensão, no lado de corrente contínua do conversor, que não depende apenas do valor eficaz da tensão de linha de alimentação do conversor e da informação do ângulo de disparo, mas sim dos módulos e argumentos que assumem cada um dos fasores que representam as tensões de linha de alimentação do conversor.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma ferramenta para compensar uma das consequências do desequilíbrio das tensões em retificadores controlados, que é a alteração no valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor. Este capítulo abordará os seguintes assuntos:

- o desenvolvimento de um método para obtenção dos fasores representativos das tensões de linha de alimentação do conversor, onde se utiliza de medições dos valores eficazes das tensões de linha de um sistema desequilibrado.
- a análise da operação de um conversor controlado em ponte trifásica alimentado por um sistema de tensões desequilibradas.
- o cálculo do valor médio da tensão retificada em função do ângulo de disparo e dos fasores das tensões de linha de alimentação do conversor.
- um procedimento para obtenção das componentes de sequência positiva e de sequência negativa das tensões de linha, partindo-se das informações dos fasores obtidos via método das componentes simétricas, cujas informações servirão de base para o procedimento de correção do ângulo de disparo de um conversor controlado na presença de desequilíbrios de tensões.

4.2 Obtenção dos Fasores das Tensões a partir de Medições dos Valores Eficazes das Tensões de Linha

A Figura 4.1 ilustra o procedimento utilizado para obter os fasores das tensões de linha a partir da medição dos valores eficazes das tensões de alimentação de um conversor estático. Inicialmente são realizadas medidas dos valores eficazes das tensões de linha V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} . E com estas informações são calculados os módulos das tensões e os argumentos associados aos fasores correspondentes.

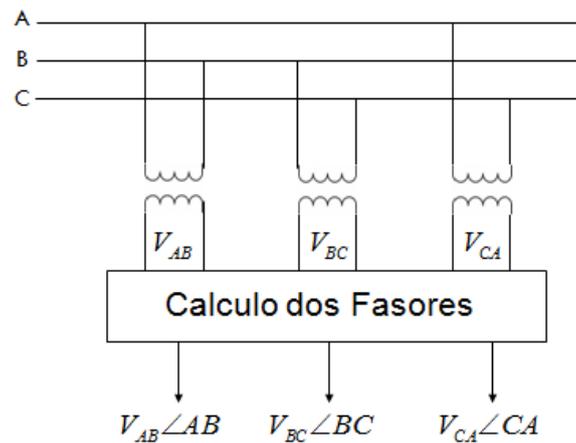


Figura 4.1 - Medição dos valores eficazes e cálculo dos fasores associados.

O cálculo dos argumentos dos fasores das tensões de linha a partir dos valores eficazes medidos é realizado com base no diagrama mostrado na Figura 4.2. O triângulo formado pelos pontos ABC representa os fasores de um sistema elétrico trifásico baseado no fato de que, na decomposição em componentes simétricas, a componente de sequência zero de um sistema desequilibrado de tensões de linha possui valor nulo.

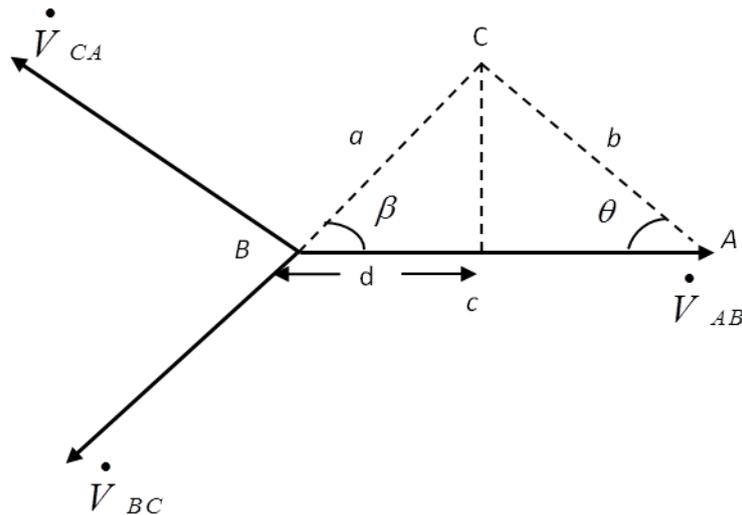


Figura 4.2 - Fasores das tensões de linha a partir dos valores eficazes

Do triângulo definido pelos pontos A, B e C com os lados a, b e c na Figura 4.2, obtêm-se as relações (4.1) e (4.2).

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \theta \quad (4.1)$$

$$d = c - b \cdot \cos \theta \Rightarrow d = a \cdot \cos \beta \quad (4.2)$$

Sendo:

$$a = V_{BC}; \quad (4.3)$$

$$b = V_{CA}; \quad (4.4)$$

$$c = V_{AB}; \quad (4.5)$$

$$V_{BC}^2 = V_{CA}^2 + V_{AB}^2 - 2V_{CA}V_{AB} \cos \theta \quad (4.6)$$

Os ângulos θ e β indicados na figura são dados por (4.7) e (4.8), respectivamente.

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{V_{AB}^2 + V_{CA}^2 - V_{BC}^2}{2V_{AB} \cdot V_{CA}} \right] \quad (4.7)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left[\frac{V_{AB} - V_{CA} \cos \theta}{V_{BC}} \right] \quad (4.8)$$

Os valores destes ângulos permitem a determinação dos argumentos dos fasores associados, ou seja, (4.9), (4.10) e (4.11).

$$\dot{V}_{AB} = V_{AB} \angle 0^\circ \quad (4.9)$$

$$\dot{V}_{BC} = V_{BC} \angle -(180 - \beta)^\circ \quad (4.10)$$

$$\dot{V}_{CA} = V_{CA} \angle -(180 + \theta)^\circ \quad (4.11)$$

4.3 Análise da Operação de um Conversor Controlado Ligado em Ponte Trifásica Alimentado por um Sistema de Tensões Desequilibradas

Seja um conversor comutado pela rede elétrica em ponte trifásica conforme ilustrado na Figura 4.3.

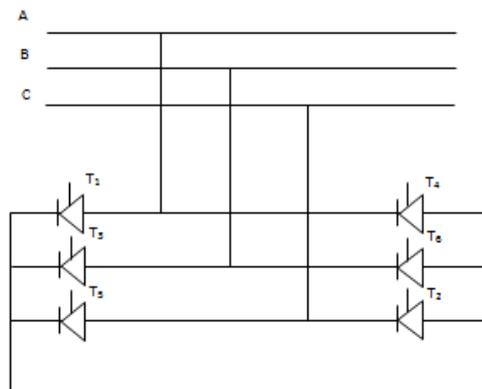


Figura 4.3 - Conversor em ponte trifásica comutado pela rede.

Se o conversor opera alimentado com tensões de linha equilibradas, com valor eficaz V e com um ângulo de disparo α , então o valor médio da tensão do lado de corrente contínua $V_{d\alpha}$ é definido pela equação (3.2), conforme apresentado no capítulo anterior e repetida a seguir.

$$V_{d\alpha} = 1,35V \cos \alpha \quad (4.12)$$

Admitindo que o conversor opere com tensões desequilibradas, cujos fasores são definidos pelas equações (4.9), (4.10) e (4.11), o mesmo ficará submetido a tensões com os valores instantâneos que são definidos pelas equações (4.13), (4.14) e (4.15).

$$v_{AB} = \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4.13)$$

$$v_{BC} = \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen}[\omega t - (180 - \beta)^\circ] \quad (4.14)$$

$$v_{CA} = \sqrt{2} \cdot V_{CA} \cdot \text{sen}[\omega t - (180 + \theta)^\circ] \quad (4.15)$$

A Figura 4.4 ilustra determinados valores das tensões de linha de alimentação do conversor em questão.

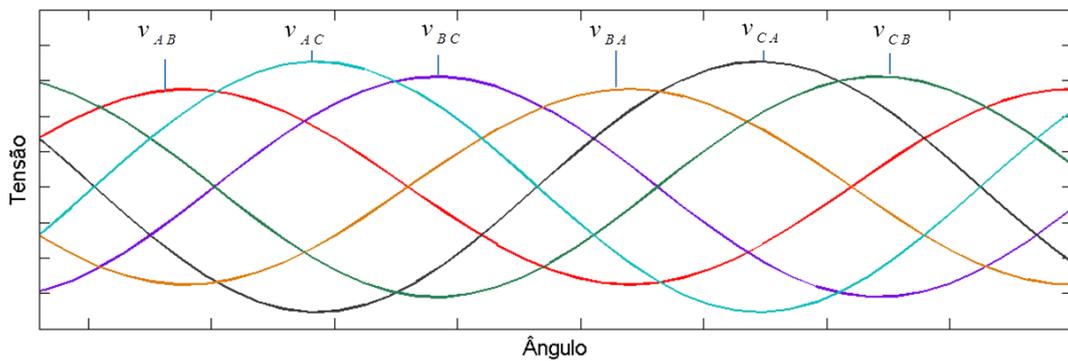


Figura 4.4 - Tensões de linha desequilibradas de alimentação do conversor.

Considerando-se que a contagem do ângulo de condução dos tiristores é realizada a partir do instante no qual ocorreria a entrada em condução se no lugar de tiristores existissem diodos, os intervalos de condução não serão de 60° , como ocorre em conversores alimentados com tensões equilibradas. Para um determinado ângulo de disparo, o valor médio da tensão retificada será diferente daquele com tensões alternadas equilibradas. O valor médio da tensão é calculado considerando-se os intervalos de tempo de condução dos tiristores, cujas referências para contagem do ângulo de disparo estão ilustradas na Figura 4.5.

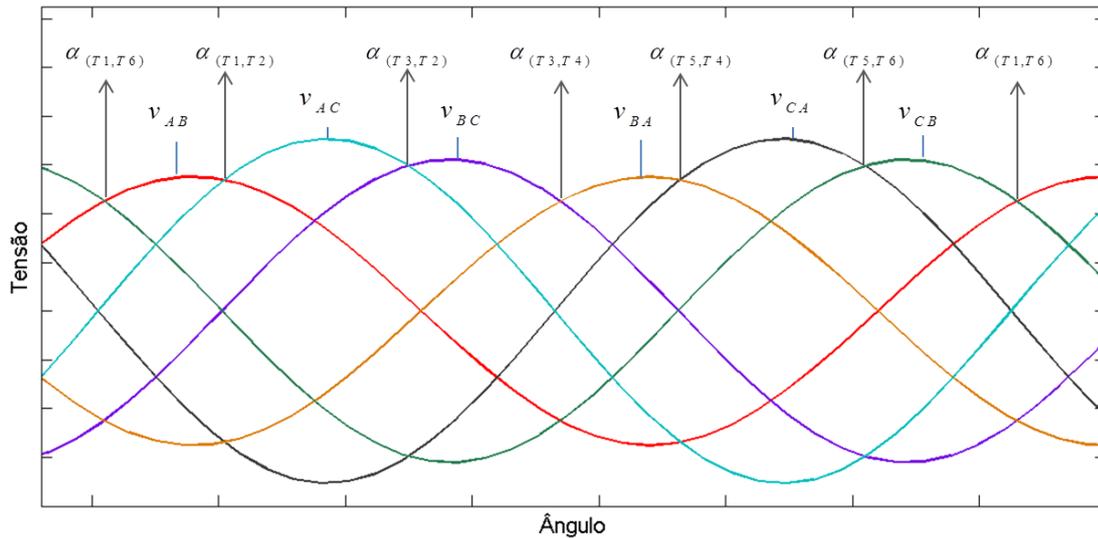


Figura 4.5 - Ilustração dos intervalos de tempo de condução.

Por se tratar de um sistema trifásico, mesmo que desequilibrado, a soma dos valores instantâneos das tensões de linha é sempre nula. Isto significa que a interseção de duas tensões de linha ocorre sempre com a passagem da outra pela referência de zero. Assim, obtêm-se as referências (exemplificadas na Tabela 4.1) para contagem dos ângulos de condução dos pares de tiristores do conversor correspondente.

Tabela 4.1 – Referência para contagem da condução do par de tiristores.

| PAR DE TIRISTORES | Valor de ωt para contagem do ângulo de disparo |
|-------------------|--|
| T1-T6 | θ^0 |
| T1-T2 | $(180 - \beta)^0$ |
| T3-T2 | 180^0 |
| T3-T4 | $(180 + \theta)^0$ |
| T5-T4 | $(360 - \beta)^0$ |
| T5-T6 | 0^0 |

4.4 Valor Médio da Tensão Retificada por um Conversor Desequilibrado

Considerando um conversor ligado em ponte trifásica (Figura 4.3) alimentado com

tensões de linha desequilibradas, cujas tensões de alimentação são definidas pelas equações (4.13), (4.14) e (4.15), repetidas a seguir por questões didáticas (com as representações ilustradas na Figura 4.4), as referências para contagem dos ângulos de disparo estão mostradas na Figura 4.5 e indicadas na Tabela 4.1.

$$\begin{aligned}v_{AB} &= \sqrt{2}V_{AB}\text{sen}(\omega t) \\v_{BC} &= \sqrt{2}V_{BC}\text{sen}[\omega t - (180 - \beta)^\circ] \\v_{CA} &= \sqrt{2}V_{CA}\text{sen}[\omega t - (180 + \theta)^\circ]\end{aligned}$$

A equação (4.16) mostra que o valor médio da tensão retificada do conversor vai depender dos valores eficazes e dos argumentos das tensões de alimentação da rede elétrica, juntamente com a informação do ângulo de disparo α do conversor.

$$\begin{aligned}V_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{\theta+\alpha}^{180-\beta+\alpha} \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen } \omega t + \int_{180-\beta+\alpha}^{180+\alpha} \sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot \text{sen}(\omega t - \theta) \cdot d\omega t + \right. \\ \left. \int_{180+\alpha}^{180+\theta+\alpha} \sqrt{2} \cdot V_{BC} \text{sen}[\omega t - (180 - \beta)] \cdot d\omega t \right] \quad (4.16)\end{aligned}$$

Isto significa que para um determinado ângulo de disparo, o valor médio da tensão de saída do conversor vai depender do desequilíbrio das tensões de linha de alimentação do conversor.

Um tipo de ponte trifásica com utilização muito frequente na prática é a semi-controlada, cuja estrutura básica está indicada na Figura 4.6. Se o conversor opera alimentado com tensões de linha equilibradas de valor eficaz V e com um ângulo de disparo α , o valor médio da tensão $V_{d\alpha}$ do lado de corrente contínua é definido pela equação (4.17), maiores detalhes estão disponíveis no ANEXO C.

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35V}{2} \cdot (1 + \cos \alpha) \quad (4.17)$$

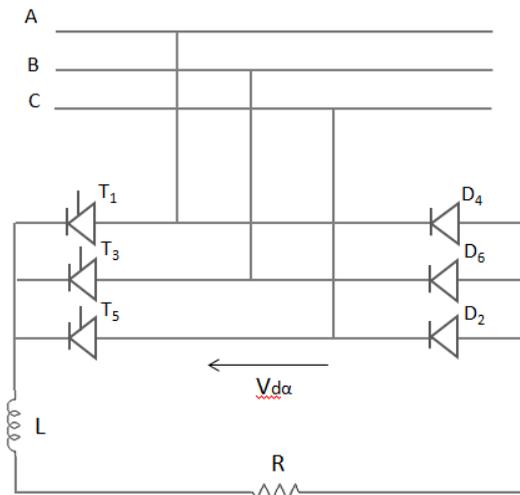


Figura 4.6 – Ponte trifásica semicontrolada.

Se o conversor opera com tensões de linha desequilibradas, cujos comportamentos são definidos pelas equações (4.13), (4.14) e (4.15), repetidas a seguir (e representadas na Figura 4.4), as referências para contagem dos ângulos de disparo dos tiristores T1, T3 e T5 são as mostradas na Tabela 4.1.

$$v_{AB} = \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$v_{BC} = \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen}[\omega t - (180 - \beta)^\circ]$$

$$v_{CA} = \sqrt{2} \cdot V_{CA} \cdot \text{sen}[\omega t - (180 + \theta)^\circ]$$

A Figura 4.7 mostra as formas de onda das tensões de linha e da tensão de saída do retificador para um determinado ângulo de disparo α .

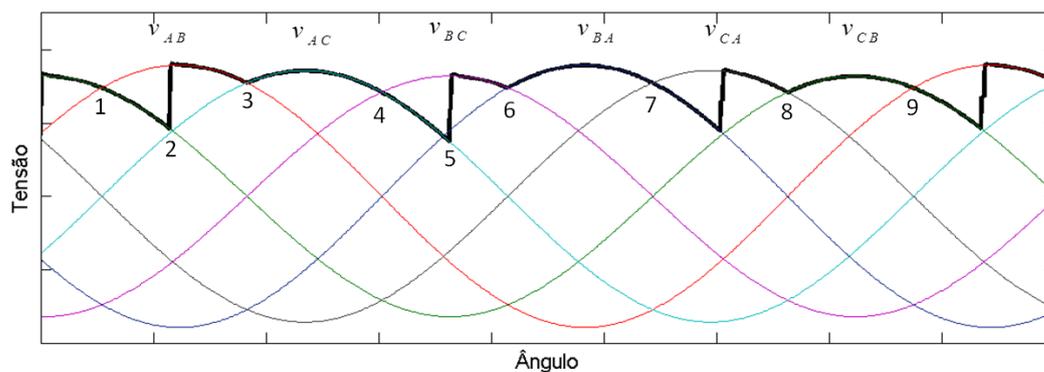


Figura 4.7 – Formas de onda das tensões de alimentação e da tensão de saída do retificador ligado em ponte trifásica semicontrolada.

Os pontos indicados na Figura 4.10 referem-se à referência para contagem do ângulo de disparo e os intervalos de condução de cada elemento do conversor. A Tabela 4.2 mostra os pontos e os intervalos correspondentes.

Tabela 4.2 – Forma de operação da ponte trifásica semicontrolada.

| Referência | Contexto | ωt |
|------------|---|---|
| 1 | Referência para contagem do disparo de T1 | θ |
| 2 | T1 é disparado | $\theta + \alpha$ |
| 2-3 | Conduz o par T1 e D6 | $(\theta + \alpha)$ até $(180 - \beta)$ |
| 3-5 | Conduz o par T1 e D2 | $(180 - \beta)$ até $(180 + \alpha)$ |
| 4 | Referência para contagem do disparo de T3 | 180 |
| 5 | T3 é disparado | $180 + \alpha$ |
| 5-6 | Conduz o par T3 e D2 | $(180 + \alpha)$ até $(180 + \theta)$ |
| 6-8 | Conduz o par T3 e D4 | $(180 + \theta)$ até $(360 - \beta + \alpha)$ |
| 7 | Referência para contagem do disparo de T5 | $360 - \beta$ |
| 8 | T5 é disparado | $360 - \beta + \alpha$ |
| 8-9 | Conduz o par T5 e D4 | $(360 - \beta + \alpha)$ até 360 |
| 9-2 | Conduz o par T5 e D6 | 360 até $(\theta + \alpha)$ |

O valor médio da tensão no lado de corrente contínua do retificador é dado por (4.18), tomando como base as informações da Figura 4.7 e os limites definidos na Tabela 4.2. A Tabela 4.3 define os intervalos e as representações associadas.

Tabela 4.3 – Intervalos e respectivas funções.

| Par em condução | Intervalo | Representações |
|----------------------|---|---|
| Conduz o par T1 e D6 | $(\theta + \alpha)$ até $(180 - \beta)$ | $\sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen } \omega t$ |
| Conduz o par T1 e D2 | $(180 - \beta)$ até $(180 + \alpha)$ | $\sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot \text{sen}(\omega t - \theta)$ |
| Conduz o par T3 e D2 | $(180 + \alpha)$ até $(180 + \theta)$ | $\sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen}(\omega t - 180 + \beta)$ |
| Conduz o par T3 e D4 | $(180 + \theta)$ até $(360 - \beta + \alpha)$ | $\sqrt{2} \cdot V_{BA} \cdot \text{sen}(\omega t - 180)$ |
| Conduz o par T5 e D4 | $(360 - \beta + \alpha)$ até 360 | $\sqrt{2} \cdot V_{CA} \cdot \text{sen}(\omega t - 180 - \theta)$ |
| Conduz o par T5 e D6 | 360 até $(\theta + \alpha)$ | $\sqrt{2} \cdot V_{CB} \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$ |

$$\begin{aligned}
V_{d\alpha} = \frac{1}{2\pi} \cdot & \left[\int_{\theta+\alpha}^{(180-\beta)} \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen } \omega t \cdot d\omega t + \int_{(180-\beta)}^{(180+\alpha)} \sqrt{2} \cdot V_{AC} \text{sen}(\omega t - \theta) \cdot d\omega t + \right. \\
& \int_{(180+\alpha)}^{(180+\theta)} \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen}[\omega t - (180 - \beta)] \cdot d\omega t + \int_{(180+\theta)}^{(360-\beta+\alpha)} \sqrt{2} \cdot V_{BA} \text{sen}(\omega t - \\
& 180) \cdot d\omega t + \int_{(360-\beta+\alpha)}^{360} \sqrt{2} \cdot V_{CA} \cdot \text{sen}[\omega t - (180 + \theta)] \cdot d\omega t + \int_0^{\theta+\alpha} \sqrt{2} \cdot V_{CB} \cdot \text{sen}(\omega t + \\
& \left. \beta) \cdot d\omega t \right] \quad (4.18)
\end{aligned}$$

4.5 Obtenção das Componentes Simétricas das Tensões de Linha para Correção do Ângulo de Disparo do Conversor.

Um sistema trifásico de tensões de linha desequilibradas pode ser representado com auxílio da teoria de componentes simétricas por dois sistemas de tensões equilibradas, ou seja, um sistema de componentes de sequência positiva e um sistema de componentes de sequência negativa, lembrando que neste contexto que as componentes de sequência zero são nulas. As componentes de sequência positiva são compostas pelos fasores denominados $V_{AB(+)}$, $V_{BC(+)}$ e $V_{CA(+)}$, cujos módulos são iguais e defasados de 120° entre si. As componentes de sequência negativa são definidas pelos fasores $V_{AB(-)}$, $V_{BC(-)}$ e $V_{CA(-)}$ de módulos iguais e defasados de 120° , representadas a partir do fasor $V_{AB(-)}$ e com sentido de rotação inverso ao do sistema de sequência positiva. Os valores de módulo e argumento fornecidos pelo procedimento ilustrado na Figura 4.1 são fornecidos a um processador que realiza as computações ilustradas na Figura 4.8, fornecendo os módulos das componentes de sequência positiva e negativa, cujos processamentos são dados por (4.19) e (4.20).

$$\dot{V}_{AB(+)} = \frac{1}{3} \left(\dot{V}_{AB} + a \dot{V}_{BC} + a^2 \dot{V}_{CA} \right) \quad (4.19)$$

$$\dot{V}_{AB(-)} = \frac{1}{3} \left(\dot{V}_{AB} + a^2 \dot{V}_{BC} + a \dot{V}_{CA} \right) \quad (4.20)$$

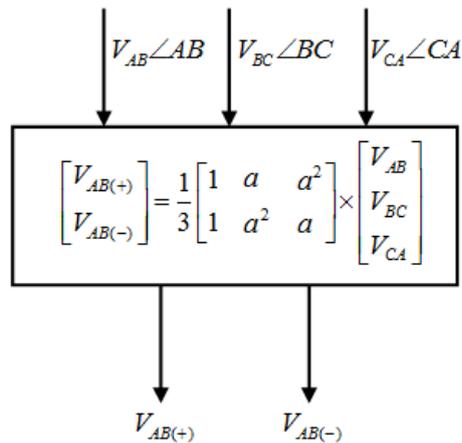


Figura 4.8 - Procedimento para cálculo das componentes simétricas.

4.6 Considerações Finais

Das análises realizadas neste capítulo podem ser tiradas algumas conclusões, que estão indicadas a seguir.

- A alimentação de um conversor com tensões desequilibradas tem como consequência principal a dependência do valor médio da tensão retificada não apenas do ângulo de disparo, mas também dos valores dos fasores das tensões. É importante observar que ao contrário de alguns efeitos do desequilíbrio de tensões em sistemas e equipamentos elétricos nos quais o grau de desequilíbrio define a influência na operação dos mesmos, no caso de conversores torna-se necessário o conhecimento dos fasores das tensões de linha. Isto se deve ao fato que um mesmo grau de desequilíbrio pode ser obtido com diversas combinações de tensões de linha.

- O valor médio da tensão do lado de corrente contínua (CC) de um conversor tem influência do desequilíbrio de tensões, sendo função principalmente dos valores dos módulos das tensões de linha do sistema de alimentação do retificador.

- Dos valores das componentes simétricas verifica-se que a componente de sequência positiva reflete o aumento ou redução das tensões com um todo, ao passo que a componente de sequência negativa reflete mais o grau de desequilíbrio do sistema de alimentação.

Com base nestas considerações, no capítulo seguinte é proposto um procedimento para

correção do ângulo de disparo de retificadores controlados a partir da quantificação da componente de sequência positiva da tensão de alimentação do conversor. A finalidade do procedimento é de compensar o efeito de desequilíbrios de tensões que conduzem a valores distintos da tensão do lado CC de um conversor. A comprovação algébrica do método será exemplificada através de exemplos numéricos, computacionais e de experimentos de laboratório.

CAPÍTULO 5

5 PROCEDIMENTO PARA CORREÇÃO DO ÂNGULO DE DISPARO DO CONVERSOR

5.1 Considerações Iniciais

No capítulo anterior foi mostrado que a ocorrência de tensões desequilibradas nas linhas de alimentação de um retificador estático provoca variações na tensão do lado CC do conversor. Considerando-se que um sistema desequilibrado pode ser representado por dois sistemas equilibrados, um de sequência positiva e outro de sequência negativa, os efeitos associados aos desequilíbrios de tensão podem ser quantificados em função das informações associadas a estas componentes. Em conversores comutados pela rede este efeito é quantificado na componente de sequência positiva. O ângulo de disparo associado aos tiristores de um retificador controlado está relacionado com as condições operacionais da aplicação onde o conversor está inserido, e desequilíbrios nas tensões de entrada do sistema provocam alterações na tensão de saída do conversor. O objetivo deste trabalho é desenvolver um procedimento de compensação do ângulo de disparo de conversores controlados, que mesmo na presença de tensões desequilibradas, funcionem como se as linhas de alimentação fossem equilibradas. Exemplos numéricos, simulações computacionais e experiências em laboratório servirão para ilustrar a abordagem proposta.

5.2 Procedimento de Compensação

Conversores controlados são usados para alimentação de cargas que operam com corrente contínua, como acionamentos de motores CC, circuitos de excitação de máquinas síncronas, alimentação de bancos de baterias, etc. Nestas aplicações o ângulo de disparo de um conversor controlado é comandado por circuitos eletrônicos que fornecem os pulsos de gatilho dos tiristores do conversor em questão. Geralmente estes circuitos estão associados a malhas de controle com propósitos específicos. Em uma malha de controle se compara o valor atual da grandeza a ser controlada com o valor de

referência do sistema de regulação correspondente. O erro resultante desta comparação (subtração) é devidamente processado, e estando associado a um circuito de disparo modifica o ângulo de gatilho dos tiristores do conversor de modo a provocar a variação do valor médio da tensão de saída do processo, por exemplo, para regular a velocidade de um motor CC, manter a tensão gerada por uma máquina síncrona em valores pré-estabelecidos, manter a corrente de carga de um banco de baterias, etc. Nestes tipos de processos, o ângulo de disparo do conversor utilizado deve ser modificado quando existem variações de erro nas malhas de controle correspondentes associadas a variações de carga, modificações de referências de comando, ou a perturbações externas. Para uma determinada referência de entrada pré-estabelecida, o erro da malha de controle associada vai se alterar nas seguintes condições:

- Em alterações no processo a ser controlado, exigindo uma modificação no valor médio da tensão fornecida pelo conversor;
- Em defeitos no conversor que provoquem alteração no valor médio da tensão de saída do equipamento;
- Em alterações na tensão de alimentação do conversor. Dentre os possíveis eventos cita-se a ocorrência de sub ou sobre tensões e de desequilíbrio de alimentação, onde eventos com alterações repentinas causam maiores impactos nos sistemas de controle associados. E estes eventos podem ser caracterizados como perturbações externas.

A modificação do ângulo de disparo para que um conversor altere o valor médio da tensão do lado CC em função de uma necessidade do processo, é a função básica do sistema de controle associado. Quando ocorre um defeito interno em um conversor que resulta em uma variação do valor médio da tensão fornecida pelo sistema, o defeito deve ser adequadamente sinalizado e o sistema reparado. Na ocorrência de variações repentinas devido a desequilíbrios das tensões de linha de alimentação do conversor, que vão refletir no valor médio da tensão do lado CC, a variação do ângulo de disparo também pode ser resultante das ações de malhas de controle destas perturbações externas. Entretanto, se existir um procedimento que compense este efeito de forma direta, as ações de controle resultantes podem ser mais efetivas.

A seguir é proposto e descrito um método que para ajustar o ângulo de disparo de conversores estáticos controlados visando à compensação de desequilíbrios de tensão de

alimentação do processo, antecipando a atuação de um sistema de controle convencional.

Seja um conversor controlado ligado em ponte trifásica alimentado com tensões de linha equilibradas com valor eficaz nominal V_N e operando com o ângulo de disparo α_{atual} . O valor médio da tensão de saída $V_{d\alpha}$ é definido em GOTTFRIED (1984), pela equação (5.1), considerando-se o efeito de comutação através da resistência de comutação R_C e sendo I_d o valor médio da corrente de carga.

$$V_{d\alpha} = 1,35V_N \cos \alpha_{atual} - R_C I_d \quad (5.1)$$

Ocorrendo um desequilíbrio das tensões de alimentação do conversor, o novo valor médio da tensão $V_{d\alpha}$ será definido pela equação (4.16). Conforme será demonstrado a seguir algebricamente, através de simulações e de experiências em laboratório, o mesmo valor médio de tensão é obtido considerando-se a equação (5.2), porém com o valor eficaz da tensão de linha de alimentação V_N sendo substituído pelo valor eficaz da componente simétrica de sequência positiva $V_{(+)}$.

$$V_{d\alpha} = 1,35V_{(+)} \cos \alpha_{atual} - R_C I_d \quad (5.2)$$

Considerando-se que para restabelecer a condição anterior, isto é o valor médio da tensão voltar ao valor $V_{d\alpha}$, o ângulo de disparo deve ser corrigido para $\alpha_{corrigido}$ para que o processo retorne a condição inicial como se o sistema fosse equilibrado, resultando em (5.3).

$$V_{d\alpha} = 1,35V_{(+)} \cos \alpha_{corrigido} - R_C I_d \quad (5.3)$$

Comparando-se as equações (5.1) e (5.3), tem-se (5.4).

$$1,35V_N \cos \alpha_{atual} - R_C I_d = 1,35V_{(+)} \cos \alpha_{corrigido} - R_C I_d \quad (5.4)$$

Nas equações (5.2), (5.3) e (5.4) considerou-se que para mesma corrente de carga a queda de tensão devido ao efeito de comutação é a mesma para operação com tensões equilibradas e desequilibradas. A comprovação desta consideração está no ANEXO D desta tese.

Logo, o ângulo de disparo corrigido é dado por (5.5).

$$\alpha_{corrigido} = \cos^{-1} \left[\frac{V_N}{V_{(+)}} \cos \alpha_{atual} \right] \quad (5.5)$$

A Figura 5.1 ilustra a abordagem proposta para o procedimento de correção, onde se usa o valor atual do ângulo de disparo α_{atual} , o valor eficaz da componente de sequência positiva $V_{(+)}$, juntamente com o valor eficaz V_N da tensão de linha nominal de alimentação do conversor para obter-se o ângulo de disparo corrigido $\alpha_{corrigido}$. Esta informação é então fornecida ao circuito de disparo do conversor para efetuar a correção do ângulo de acionamento do processo correspondente.

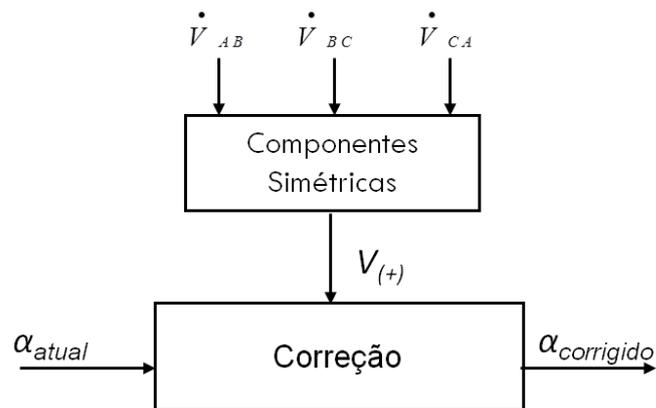


Figura 5.1 - Procedimento para correção do ângulo de disparo do conversor.

5.3 Comprovação Algébrica do Método

Para comprovação algébrica do método proposto são apresentados alguns exemplos. No primeiro supõe-se um retificador não controlado em ponte trifásica alimentado com tensões desequilibradas. O objetivo é mostrar que o valor médio da tensão retificada obtida a partir das tensões desequilibradas é igual ao valor médio calculado admitindo-se que o conversor é alimentado com tensões equilibradas com valor eficaz igual a componente de sequência positiva da tensão de entrada do sistema. O segundo exemplo é desenvolvido para um retificador controlado e tem por objetivo mostrar a validade do método proposto, ou seja, a compensação do ângulo de disparo mediante desequilíbrios na alimentação. O terceiro exemplo tem o mesmo objetivo do segundo, porém considerando para uma ponte trifásica semi-controlada.

5.3.1 Exemplo 1: Conversor Não Controlado

Seja um conversor não controlado ligado em ponte trifásica, cujo circuito está ilustrado na Figura 5.2.

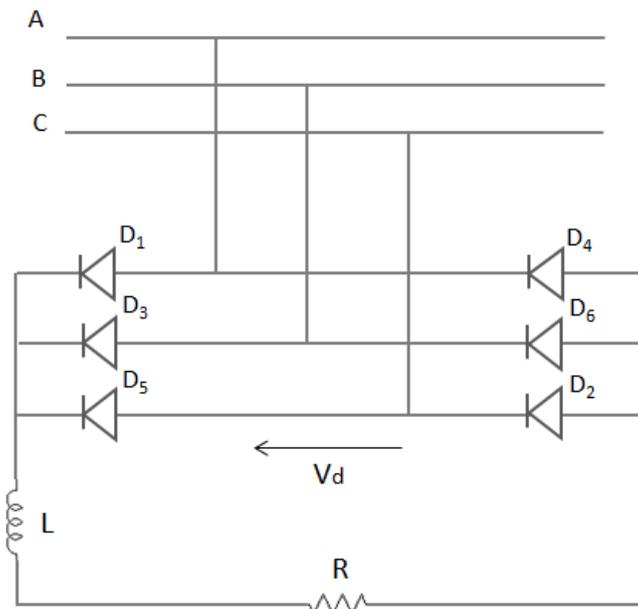


Figura 5.2 – Ponte trifásica não controlada.

Seja o valor eficaz nominal da tensão de alimentação do conversor em 440 [V]. Porém, devido a desequilíbrios o sistema apresenta os seguintes valores de tensões de linha: $V_{AB} = 415$ [V]; $V_{BC} = 440$ [V]; $V_{CA} = 405$ [V]. Usando as equações (4.7) e (4.8), se obtêm os dados para cálculo dos argumentos dos fasores das tensões de linha:

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{415^2 + 405^2 - 440^2}{2 \cdot 415 \cdot 405} \right] = 64,89^\circ;$$

$$\beta = \cos^{-1} \left[\frac{415 - 405 \cdot \cos 64,89}{440} \right] = 56,46^\circ.$$

Usando as equações (4.9),(4.10) e (4.11) obtêm-se os argumentos dos fasores que definem os valores das tensões de alimentação do conversor:

$$\begin{aligned}\angle V_{AB} &= 0^\circ; \\ \angle V_{BC} &= -(180 - 56,46) = -123,54^\circ; \\ \angle V_{CA} &= -(180 + 64,89) = -244,89^\circ;\end{aligned}$$

onde os fasores das tensões de linha são expressos pela representação seguinte:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{AB} &= 415\angle 0^\circ [V]; \\ \dot{V}_{BC} &= 440\angle -123,54^\circ [V]; \\ \dot{V}_{CA} &= 405\angle -244,89^\circ [V].\end{aligned}$$

Os respectivos valores instantâneos das tensões de linha são dados por:

$$\begin{aligned}v_{AB} &= \sqrt{2} \cdot 415 \cdot \text{sen } \omega t; \\ v_{BC} &= \sqrt{2} \cdot 440 \cdot \text{sen}(\omega t - 123,54^\circ); \\ v_{CA} &= \sqrt{2} \cdot 405 \cdot \text{sen}(\omega t - 244,89^\circ).\end{aligned}$$

As componentes de sequência positiva e negativa das tensões de linha são definidas com auxílio das equações (3.9) e (3.10), onde $a = e^{j120^\circ}$:

$$\begin{aligned}\dot{V}_{(+)} &= \frac{1}{3} \cdot (415\angle 0^\circ + a \cdot 440\angle -123,54^\circ + a^2 \cdot 405\angle -244,89^\circ); \\ \dot{V}_{(-)} &= \frac{1}{3} \cdot (415\angle 0^\circ + a^2 \cdot 440\angle -123,54^\circ + a \cdot 405\angle -244,89^\circ).\end{aligned}$$

Calculando os valores dos módulos das expressões acima, têm-se os valores eficazes e o fator de desequilíbrio ($K = FD$) correspondente:

$$\begin{aligned}V_{AB(+)} &= 419,73 [V]; \\ V_{AB(-)} &= 21 [V]; \\ FD &= \frac{21}{419,73} \cdot 100 = 5\%.\end{aligned}$$

O valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor pode ser calculado a partir da equação (4.16), considerando-se $\alpha = 0^\circ$ (retificador não controlado), ou conforme proposto neste trabalho utilizando-se a equação (3.1) considerando o valor eficaz igual à informação da componente de sequência positiva $V_{(+)}$. A Figura 5.3

ilustra as tensões do lado de corrente alternada, com as respectivas referências para contagem do ângulo de disparo.

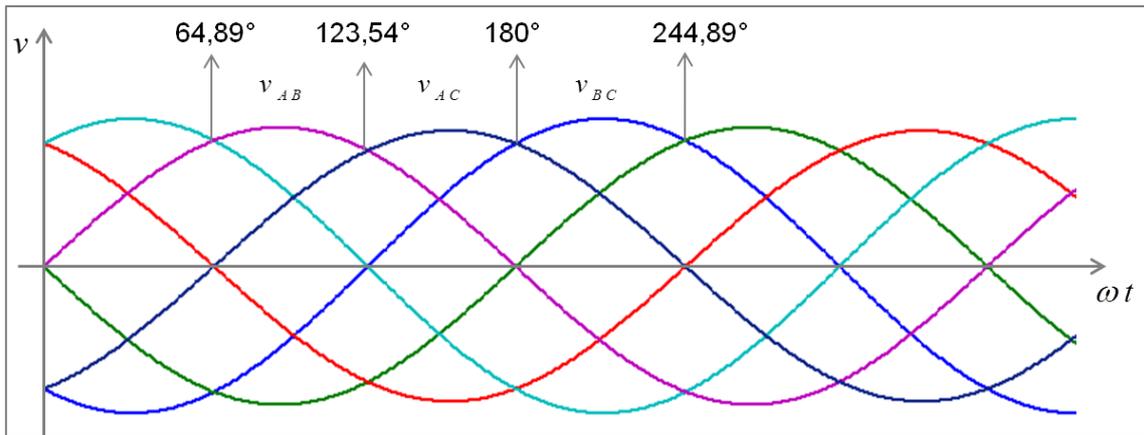


Figura 5.3 – Referências para contagem do ângulo de disparo.

Utilizando-se a equação (4.16), obtém-se:

$$\begin{aligned}
 V_d = \frac{1}{\pi} \cdot & \left[\int_{64,89}^{123,54} \sqrt{2} \cdot 415 \cdot \text{sen } \omega t \cdot d\omega t \right. \\
 & + \int_{123,54}^{180} \sqrt{2} \cdot 405 \cdot \text{sen}(\omega t - 64,89) \cdot d\omega t \\
 & \left. + \int_{180}^{244,89} \sqrt{2} \cdot 440 \text{sen}(\omega t - 123,54) \cdot d\omega t \right] \\
 V_d = & 567,20 \text{ [V]}.
 \end{aligned}$$

Usando-se a equação (3.1) e tomando-se como tensão de linha a componente da sequência positiva, obtém-se:

$$V_d = 1,35 \cdot V_{(+)} = 1,35 \cdot 419,73 = 566,7 \text{ [V]}.$$

Comparando-se os resultados obtidos verifica-se que o erro entre as duas formas de cálculo é menor que 0,1%, comprovando a validade do método.

5.3.2 Exemplo 2: Ponte Trifásica Controlada

Neste exemplo considera-se um conversor controlado em ponte trifásica, cujo circuito está ilustrado na Figura 5.4.

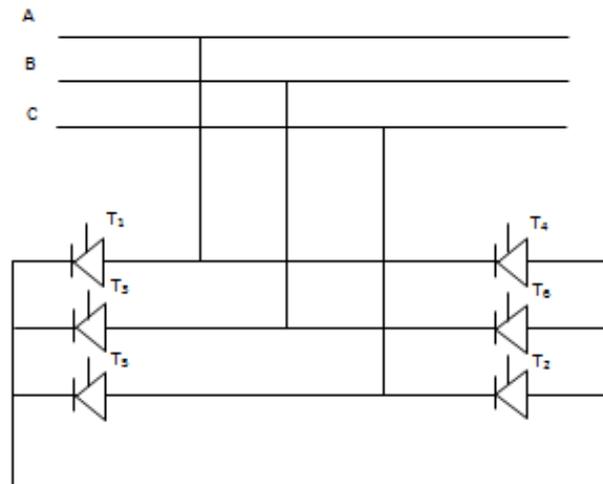


Figura 5.4 – Conversor controlado ligado em ponte trifásica.

Inicialmente admite-se o conversor operando alimentado com tensões equilibradas com valores nominais em $V_N = 440 [V]$ e com um ângulo de disparo atual $\alpha_{atual} = 30^\circ$. Desconsiderando-se o efeito de comutação, que conforme mostrado no ANEXO D não interfere no método de correção do ângulo de disparo, obtém-se o valor médio da tensão de saída:

$$V_{d\alpha} = 1,35.440. \cos 30^\circ = 514,42 [V].$$

Admitindo-se a ocorrência de um desequilíbrio com os mesmos valores de tensões de linha do exemplo anterior, isto é: $V_{AB} = 415 [V]$; $V_{BC} = 440 [V]$; $V_{CA} = 405 [V]$. Cujos fasores das tensões e os valores instantâneos das tensões são:

$$\dot{V}_{AB} = 415 \angle 0^\circ [V];$$

$$\dot{V}_{BC} = 440 \angle -123,54^\circ [V];$$

$$\dot{V}_{CA} = 405 \angle -244,89^\circ [V];$$

$$v_{AB} = \sqrt{2}.415. \sin \omega t;$$

$$v_{BC} = \sqrt{2}.440.\text{sen}(\omega t - 123,54^\circ);$$

$$v_{CA} = \sqrt{2}.405.\text{sen}(\omega t - 244,89^\circ).$$

Com a ocorrência do desequilíbrio de tensões, o valor médio da tensão fornecida pelo retificador pode ser calculado com auxílio da equação (4.16):

$$V_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \left[\int_{(64,89+30)}^{(23,54+30)} \sqrt{2}.415.\text{sen } \omega t . d\omega t \right. \right. \\ \left. \left. + \int_{(123,54+30)}^{(180+30)} \sqrt{2}.405.\text{sen}(\omega t - 64,89^\circ). d\omega t \right. \right. \\ \left. \left. + \int_{(180+30)}^{(244,89+30)} \sqrt{2}.440\text{sen}(\omega t - 123,54^\circ). d\omega t \right] \right\}$$

$$V_{d\alpha} = 491,21 [V].$$

A redução resultante do valor médio da tensão na saída do retificador (devido ao desequilíbrio) deverá ser corrigida através do ângulo de disparo calculado através da equação (5.5):

$$\alpha_{\text{corrigido}} = \cos^{-1} \left[\frac{440}{419,73} \cdot \cos 30^\circ \right] = 24,79^\circ.$$

$$\text{Assim, } V_{d\alpha} = 1,35.419,73.\cos 24,79^\circ = 514,92[V].$$

A verificação do procedimento pode ser feita realizada através do cálculo do valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor para o sistema com tensões desequilibradas:

$$V_{d\alpha} = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \left[\int_{(64,89+24,79)}^{(123,54+24,79)} \sqrt{2}.415.\text{sen } \omega t . d\omega t \right. \right. \\ \left. \left. + \int_{(123,54+24,79)}^{(180+24,79)} \sqrt{2}.405.\text{sen}(\omega t - 64,89^\circ). d\omega t \right. \right. \\ \left. \left. + \int_{(180+24,79)}^{(244,89+24,79)} \sqrt{2}.440.\text{sen}(\omega t - 123,54^\circ). d\omega t \right] \right\}$$

$$V_{d\alpha} = 514,93 [V].$$

Os resultados obtidos mostram que a correção do ângulo de disparo utilizando-se a

componente de sequência positiva foi eficaz, resultando em um erro também menor que 0,1%.

5.3.2 Exemplo 3: Ponte Semi-Controlada

Neste exemplo será considerada uma ponte trifásica, cujo circuito está mostrado na Figura 5.5.

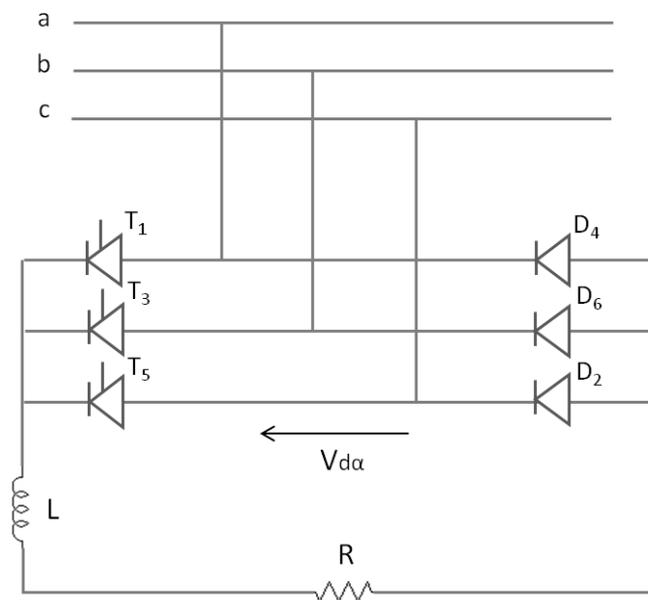


Figura 5.5 – Ponte trifásica semi-controlada.

Da mesma forma que no exemplo anterior inicialmente admite-se o conversor operando alimentado com tensões equilibradas com valor eficaz da tensão de linha $V_N = 440$ [V] e com um ângulo de disparo atual $\alpha_{atual} = 30^\circ$. Desconsiderando-se o efeito de comutação, que conforme já mostrado anteriormente não interfere no método de correção do ângulo de disparo, obtém-se para o valor médio da tensão de saída:

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35 \cdot 440}{2} \cdot (1 + \cos 30^\circ) = 554,21 \text{ [V]}.$$

Admitindo-se a ocorrência de um desequilíbrio com os mesmos valores de tensões de linha do exemplo anterior, isto é: $V_{AB} = 415$ [V]; $V_{BC} = 440$ [V]; $V_{CA} = 405$ [V]. Os valores dos fasores das tensões e os valores instantâneos das tensões são as mesmas do exemplo anterior. Com a ocorrência do desequilíbrio de tensões, o valor médio da tensão $V_{d\alpha}$ pode ser calculado com auxílio da equação (4.18):

$$\begin{aligned}
V_{d\alpha} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \int_{(64,89+30)}^{(180-56,46)} \sqrt{2} \cdot 415 \cdot \text{sen } \omega t \cdot d\omega t \right. \\
+ \int_{(180-56,46)}^{(180+30)} \sqrt{2} \cdot 405 \cdot \text{sen}(\omega t - 244,89 + 180) \cdot d\omega t \\
+ \int_{(180+30)}^{(180+64,89)} \sqrt{2} \cdot 440 \cdot \text{sen}[\omega t - (180 - 56,46)] \cdot d\omega t \\
+ \int_{(180+64,89)}^{(360-56,46+30)} \sqrt{2} \cdot 415 \cdot \text{sen}(\omega t - 180) \cdot d\omega t \\
+ \int_{(360-56,46+30)}^{360} \sqrt{2} \cdot 405 \cdot \text{sen}[\omega t - (180 + 64,89)] \cdot d\omega t \\
\left. + \int_0^{64,89+30} \sqrt{2} \cdot 440 \cdot \text{sen}(\omega t + 56,46) \cdot d\omega t \right\}
\end{aligned}$$

$$V_{d\alpha} = 529,20 [V].$$

O mesmo valor de tensão deve ser obtido supondo-se o conversor alimentado com tensões de linha equilibradas com valor eficaz igual ao da componente de sequência positiva (que foi calculado anteriormente em 419,73 [V]):

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35 \cdot 419,72}{2} \cdot (1 + \cos 30^\circ) = 528,67 [V].$$

Para que o valor médio da tensão retificada seja restabelecido deve ocorrer uma correção no ângulo de disparo. Fazendo-se as mesmas considerações que foram feitas para a ponte trifásica controlada, tem-se:

$$\frac{1,35 \cdot V_N}{2} \cdot (1 + \cos \alpha_{atual}) = \frac{1,35 \cdot V_{(+)}}{2} \cdot (1 + \cos \alpha_{corrigido}).$$

Logo, vem (5.6).

$$\alpha_{corrigido} = \cos^{-1} \left[\frac{V_N}{V_{(+)}} \cdot (1 + \cos \alpha_{atual}) - 1 \right] \quad (5.6)$$

Calculando o valor correspondente com os dados do problema, tem-se:

$$\alpha_{corrigido} = \cos^{-1} \left[\frac{440}{419,72} \cdot (1 + \cos 30^\circ) - 1 \right] = 17,02^\circ$$

A verificação da correção do ângulo é realizada de duas maneiras:

$$\begin{aligned}
V_{d\alpha} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \int_{(64,89+17,02)}^{(180-56,46)} \sqrt{2} \cdot 415 \cdot \text{sen } \omega t \cdot d\omega t \right. \\
+ \int_{(180-56,46)}^{(180+17,02)} \sqrt{2} \cdot 405 \cdot \text{sen}(\omega t - 244,89 + 180) \cdot d\omega t \\
+ \int_{(180+17,02)}^{(180+64,89)} \sqrt{2} \cdot 440 \cdot \text{sen}[\omega t - (180 - 56,46)] \cdot d\omega t \\
+ \int_{(180+64,89)}^{(360-56,46+17,02)} \sqrt{2} \cdot 415 \cdot \text{sen}(\omega t - 180) \cdot d\omega t \\
+ \int_{(360-56,46+17,02)}^{360} \sqrt{2} \cdot 405 \cdot \text{sen}[\omega t - (180 + 64,89)] \cdot d\omega t \\
\left. + \int_0^{64,89+17,02} \sqrt{2} \cdot 440 \cdot \text{sen}(\omega t + 56,46) \cdot d\omega t \right\}
\end{aligned}$$

$$V_{d\alpha} = 554,78 [V];$$

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35.419,72}{2} \cdot (1 + \cos 17,02^\circ) = 554,21 [V].$$

Da mesma forma que para ponte totalmente controlada, os resultados obtidos mostram que a correção do ângulo de disparo utilizando-se a componente de sequência positiva foi eficaz, resultando em um erro também menor que 0,1%.

5.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o método para correção do ângulo de disparo para compensação da influência de desequilíbrios das tensões de alimentação de conversores controlados. Através de exemplos numéricos foi comprovada a validade do método. A componente de sequência positiva da tensão de alimentação quantifica a variação do valor eficaz da tensão devido ao desequilíbrio, sendo então tomada como referência para correção do ângulo de disparo.

Resta uma questão bastante interessante: qual o significado físico da componente de sequência negativa da tensão para o caso de conversores?

A seguir são feitas algumas considerações que podem ser tomadas como ponto de

partida para realização de um próximo trabalho.

- Para conversores não controlados, ou mesmo para o conversor operando com o ângulo de disparo igual a zero, a componente de sequência positiva reflete também o consumo de potência ativa P_d do conversor, conforme mostra a equação (5.7):

$$P_d = V_d \cdot I_d = 1,35 \cdot V_{(+)} \cdot I_d. \quad (5.7)$$

- Para conversores controlados a componente de sequência positiva define tanto a potência ativa quanto a potência não ativa devido ao deslocamento da corrente em relação à tensão, conforme as equações (5.8) e (5.9):

$$P_d = V_{d\alpha} \cdot I_d = 1,35 \cdot V_{(+)} \cdot \cos \alpha \cdot I_d; \quad (5.8)$$

$$Q_\alpha = 1,35 \cdot V_{(+)} \cdot \sen \alpha \cdot I_d \quad (5.9)$$

- Tanto para conversores controlados quanto para não controlados, existe o consumo de potência não ativa devido ao conteúdo harmônico das correntes dos mesmos. Para uma ponte trifásica controlada ou não controlada, a potência aparente S_d disponibilizada ao conversor pela rede de suprimento de energia é função do valor eficaz da tensão de linha V e do valor eficaz da corrente de linha I_2 , conforme a equação (5.10):

$$S_d = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_2 \quad (5.10)$$

A relação entre a tensão de linha do lado de corrente alternada e o valor médio da tensão do lado CC do conversor é definida pela equação (3.2). A relação entre o valor eficaz da corrente I_2 e o valor médio da corrente de carga I_d pode ser obtido da Figura 3.6, conforme as equações (5.11) e (5.12):

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_d^2 d\omega t} \quad (5.11)$$

$$I_2 = I_d \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (5.12)$$

Considerando-se as equações (3.2) e (5.12) na equação (5.10), obtém-se (5.13):

$$S_d = 1,048 \cdot \frac{V_{d\alpha} \cdot I_d}{\cos \alpha} \quad (5.13)$$

Admitindo-se $\alpha = 0$, o conteúdo harmônico da corrente permanece o mesmo, obtendo-se a equação (5.14):

$$S_d = 1,048.V_d.I_d = 1,048P_d \quad (5.14)$$

Isto significa que a potência não ativa Q_h para $\alpha = 0$, resulta apenas do conteúdo harmônico da corrente, conforme as equações (5.15) e (5.16):

$$Q_h = \sqrt{S_d^2 - P_d^2} \quad (5.15)$$

$$Q_h = \sqrt{(1,048.P_d)^2 - P_d^2} = 0,314.P_d \quad (5.16)$$

- Na ocorrência de desequilíbrio de tensões a componente de sequência negativa da tensão deve refletir o consumo de potência não ativa devido ao desequilíbrio, o que será quantificado em um próximo trabalho.

CAPÍTULO 6

6 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES E DE ENSAIOS EM LABORATÓRIO

6.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta resultados originados de simulações computacionais e de ensaios de laboratórios utilizando a metodologia desenvolvida. O objetivo é comprovar a validade da proposta em alguns contextos de aplicações práticas.

Na simulação considerada mostrou-se atuação da compensação proposta em um sistema de controle de velocidade, onde uma ponte controlada (sujeita a desequilíbrios de tensão) alimenta um motor de corrente contínua (CC). Inicialmente considerou-se uma malha de regulação de velocidade sem a ação da compensação adicional proposta, onde se verificou o comportamento da rotação da máquina mediante a ocorrência de um desequilíbrio de tensão repentino nas fases de alimentação da ponte retificadora do processo. O desequilíbrio repentino provoca uma variação abrupta no valor médio da tensão de saída do retificador controlado que alimenta o motor, ocasionando uma modificação correspondente na velocidade do motor que será regulada, após um determinado intervalo de tempo, pela malha de controle de rotação do sistema. Posteriormente realizou-se uma simulação do sistema em questão com mesmas condições operacionais descritas anteriormente, mas agora considerando a proposta de compensação adicional do ângulo de disparo dos tiristores da ponte controlada. Onde foi possível verificar que independente da ação da malha de controle de velocidade, a compensação adicional do ângulo de disparo promoveu uma recuperação da rotação do motor com uma dinâmica muito mais rápida, e praticamente sem variações de velocidade do processo.

No laboratório foram realizadas duas experiências. A primeira objetivando validar os exemplos numéricos mostrados nos capítulos anteriores. Neste contexto foi empregado um conversor controlado alimentado por um sistema trifásico que tenha tanto tensões equilibradas como desequilibradas. O ângulo de disparo dos tiristores do conversor é

medido juntamente com o valor médio da tensão retificada pelo conversor, assim como os valores eficazes das tensões trifásicas do sistema elétrico. Quando ocorre um desequilíbrio de tensão nas fases de alimentação do retificador, se registra o valor médio da tensão retificada pelo conversor, o ângulo de disparo corrente do mesmo, e os valores eficazes das tensões de linha do sistema elétrico de alimentação. Acionando o procedimento de compensação proposto, um processador digital estima a informação da componente de sequência positiva do sistema elétrico, e calcula qual deve ser o novo valor do ângulo de disparo do conversor para que o valor médio da tensão retificada seja equivalente à condição de equilíbrio de tensão. O ângulo de disparo do processo é atualizado automaticamente com este novo valor, e a tensão de saída do retificador é medida e comparada com a condição inicial de equilíbrio do sistema elétrico, comprovando desta forma a proposta deste trabalho.

A segunda experiência será realizada com o objetivo de verificar na prática a aplicação da proposta em um sistema de controle de velocidade real, validando os resultados obtidos nas simulações computacionais.

6.2 Simulações Computacionais

A Figura 6.1 ilustra a estrutura considerada nesta seção. Uma descrição dos elementos que constituem a mesma é fornecida a seguir. No sistema existe uma chave comutadora S com a seguinte funcionalidade: com a chave na posição 2, o procedimento de correção do ângulo de disparo para desequilíbrios de tensão se encontra desativado. Os efeitos de desequilíbrios são compensados pelo malha de controle convencional; com a chave na posição 1, o procedimento de compensação de desequilíbrio de fases é habilitado, adicionando uma compensação extra no circuito de disparo do conversor controlado. Neste contexto o ângulo de disparo da ponte retificadora é atualizado com um valor devidamente corrigido, compensando o efeito de desequilíbrios de tensão nas fases de alimentação do conversor.

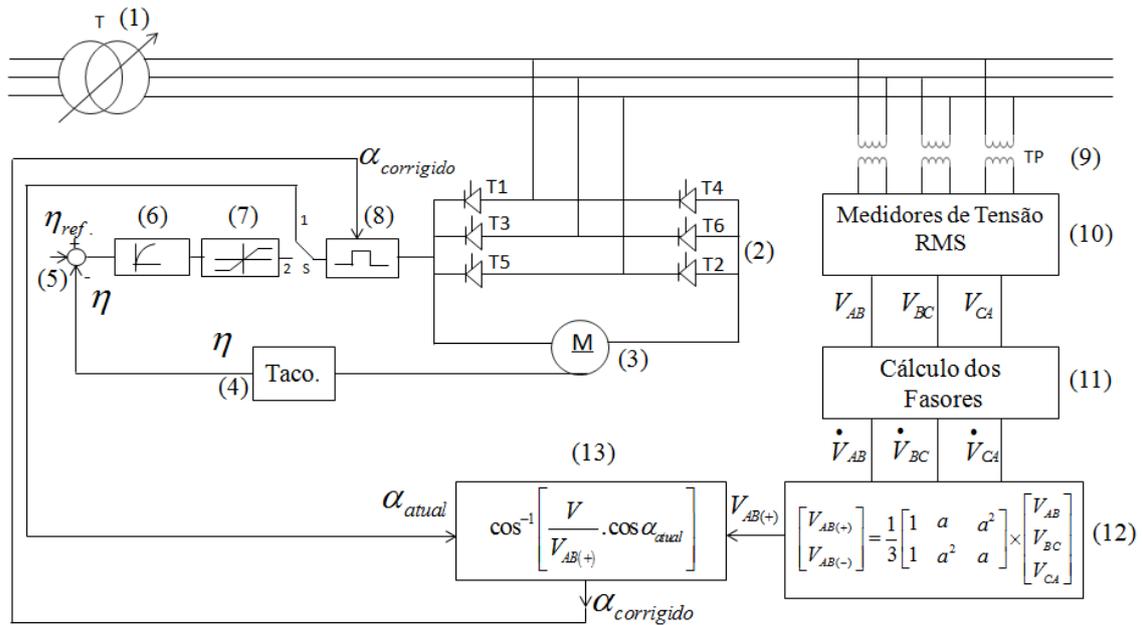


Figura 6.1 – Estrutura considerada nas simulações computacionais.

Elementos da estrutura da Figura 6.1:

- (1) – Transformador de potência para alimentação do conversor.
- (2) – Retificador trifásico controlado.
- (3) – Motor CC alimentado pela armadura e com excitação independente.
- (4) – Tacômetro.
- (5) – Bloco de subtração da referência de entrada e da medida de rotação.
- (6) – Regulador de velocidade.
- (7) – Limitador de corrente.
- (8) – Circuito de disparo.
- (9) – Transformadores para medições das tensões de linha.
- (10) – Conversor de valores RMS em valores DC (CC).
- (11) – Cálculo dos fasores das tensões de linha.
- (12) – Cálculo das componentes simétricas.
- (13) – Correção (compensação) do ângulo de disparo.

Parâmetros do Motor:

$$P_N = \text{potência nominal} = 380[\text{kW}]$$

$$V_{AN} = \text{tensão de armadura nominal} = 380[\text{V}]$$

$$R_A = \text{resistência do circuito de armadura} = 0,01[\text{ohm}]$$

$$n_N = \textit{velocidade nominal} = 1000[\textit{rpm}]$$

$$I_{AN} = \textit{corrente de armadura nominal} = 1385[A]$$

$$K_E = \textit{ganho do circuito de armadura} = 27,44$$

$$T_E = \textit{constante de tempo elétrica da armadura} = 0,1[s]$$

$$I_P = \textit{corrente de partida} = 2,5 \cdot I_{AN}$$

$$M_N = \textit{conjugado nominal} = 4774[N \cdot m]$$

$$M_C = \textit{conjugado da carga} = 0,9 \cdot M_N$$

$$T_M = \textit{constante de tempo mecânica} = 11,5[s]$$

$$C_M = \textit{constante de torque} = 3,45[N \cdot m/A]$$

$$C_N = \textit{constante da tensão induzida} = 0,37[V/\textit{rpm}]$$

$$V_f = \textit{tensão nominal de linha} = 440 [V]$$

Parâmetros da Malha de Controle:

$$K_n = \textit{constante do tacômetro} = 10/n$$

$$K_p = \textit{ganho proporcional do regulador de velocidade} = 1$$

$$K_i = \textit{ganho integral do regulador de velocidade} = 0,5 [1/s]$$

A maioria dos acionamentos industriais de corrente contínua tem a velocidade ou conjugado controlados através da tensão de armadura do motor. O controle de campo, por ser muito lento devido à elevada constante de tempo do circuito de excitação, sendo geralmente usado em acionamentos específicos, onde não existe preocupação em correções rápidas de velocidade, ou com o objetivo de se obter velocidades superiores à rotação nominal das máquinas.

Na malha de controle ilustrada na Figura 6.1, o tacômetro mede a rotação atual do motor que é subtraída da referência de velocidade estipulada para o processo. O regulador de velocidade atua processando o dado relacionado com o erro de velocidade, fornecendo uma informação de comando para o circuito de disparo do conversor estático, de forma a ajustar o ângulo de disparo dos tiristores da ponte controlada, objetivando regular a velocidade do motor em torno da rotação desejada. Na ocorrência de um desequilíbrio das tensões de alimentação do conversor, o valor médio da tensão de saída do retificador, conforme demonstrado em capítulos anteriores, é alterado.

Considerando que o desequilíbrio provoque uma redução na componente de sequência positiva das tensões de linha de alimentação do conversor, e conseqüentemente uma redução no valor médio da tensão de saída do retificador, isto ocasiona uma redução na velocidade da máquina. A malha de controle atua, após um intervalo de tempo, restabelecendo a rotação do motor em torno do valor de referência.

A Figura 6.2 ilustra a ocorrência de um desequilíbrio repentino em $t = 12$ [s]. A componente de sequência positiva cai provocando a redução da velocidade do motor. Com o procedimento de compensação de desequilíbrio de tensão desligado, a correção da velocidade é realizada através da malha de controle convencional, que reduz o ângulo de disparo do conversor com a finalidade de recuperar a velocidade do processo.

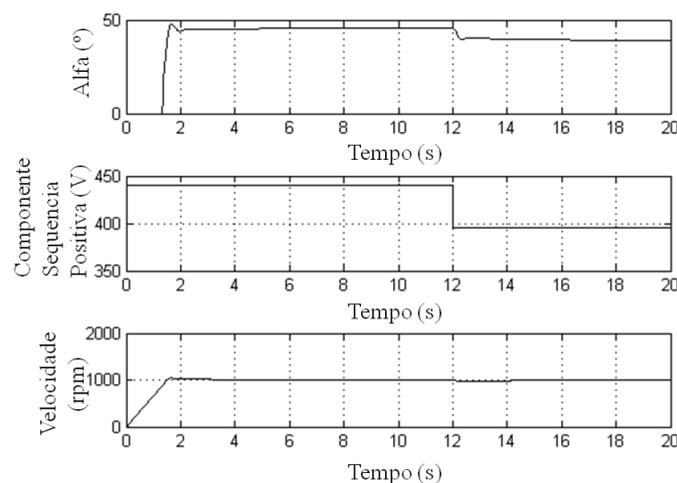


Figura 6.2 – Comportamento do sistema sem a ação da compensação extra.

A Figura 6.3 é uma ampliação da figura 6.2:

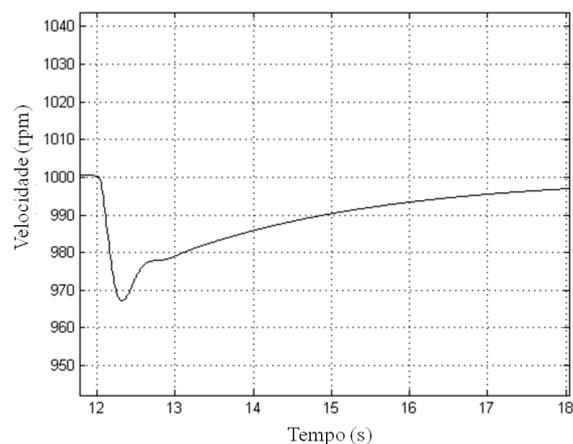


Figura 6.3 – Detalhe da velocidade do sistema sem a compensação adicional.

Na Figura 6.3 é mostrado o comportamento da velocidade do motor, onde se nota uma redução transitória no valor da rotação da máquina em torno de 3,25% do valor nominal (1000 [rpm]) estipulado para o processo. O tempo de restabelecimento da velocidade em aproximadamente 1% do valor nominal ficou em torno de três segundos.

A Figura 6.4 mostra o comportamento do sistema na mesma situação citada anteriormente, mas agora considerando o procedimento adicional de correção de desequilíbrios (chave S na posição 1, figura 6.1).

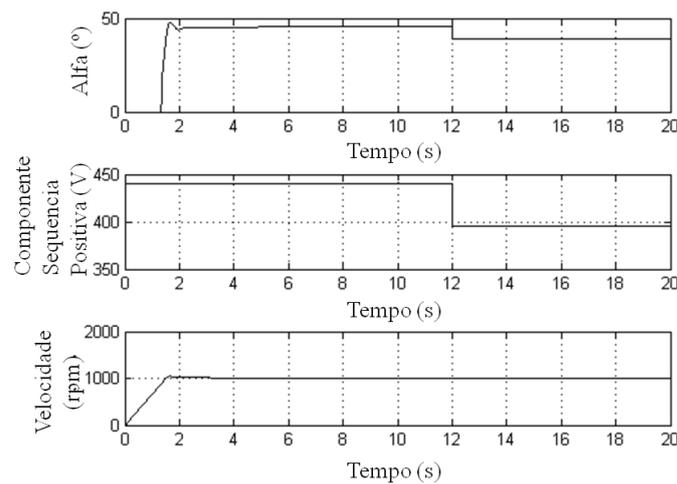


Figura 6.4 – Comportamento do sistema com compensação de ângulo.

A Figura 6.5 é uma ampliação da figura 6.4:

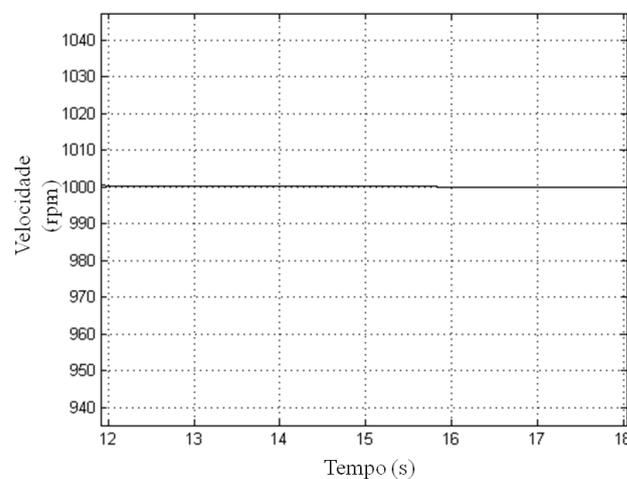


Figura 6.5 – Detalhe da velocidade do sistema com a compensação adicional.

Na Figura 6.5 está sendo ilustrado o comportamento da velocidade do motor, onde

agora se percebe que praticamente não houve alteração na velocidade nominal da máquina. O procedimento proposto de compensação do ângulo de disparo do conversor foi efetivo na ocorrência repentina de um desequilíbrio de tensão nas fases de alimentação do sistema, antecipando a ação da malha de controle de velocidade convencional. Esta característica de atuação é interessante em aplicações que necessitem de condições mais rigorosas de regulação de velocidade, como em processos de fabricação de papel ou em sistemas especiais de laminação, por exemplo. No ANEXO A deste trabalho encontra-se o programa de simulação utilizado neste exemplo.

6.3 Ensaios de Laboratório

Uma bancada de testes foi montada com o objetivo de comprovar na prática os resultados numéricos exemplificados nos capítulos anteriores, e para verificar experimentalmente o comportamento de um sistema de controle de velocidade similar ao simulado na seção anterior.

A Figura 6.6 ilustra a estrutura da bancada de teste em questão. Um transformador (TP) com *tap* continuamente variável alimenta uma ponte retificadora trifásica totalmente controlada, onde os valores das tensões de alimentação são medidos por voltímetros digitais (Medição). A tensão retificada pelo retificador controlado alimenta um conjunto de cargas como lâmpadas elétricas ou um motor CC. O valor de v_d (e da sua forma de onda) é registrado por um osciloscópio digital (Registro). Um circuito de disparo fornece pulsos elétricos para os terminais de gate-catodo dos tiristores do conversor estático em questão, onde uma informação de comando (u) define o ângulo de disparo da ponte retificadora. A informação de comando é fornecida por um conversor digital analógico (D/A_o) que está interligado com um processador digital (Computador). Três circuitos conversores de valores eficazes em valores contínuos (RMS/DC) têm suas entradas conectadas nos secundários de três transformadores de medição, cujos enrolamentos primários estão ligados nas fases (R, S, T) da rede elétrica que alimenta o sistema. As informações fornecidas pelos circuitos conversores RMS/DC (relacionadas com os valores eficazes das tensões das fases), são coletadas por conversores analógicos digitais (A/D₁, A/D₂, A/D₃) cujos dados correspondentes são lidos pelo processador do

sistema. Um tacômetro (Taco) acoplado no eixo do motor fornece a informação da velocidade da máquina, cujo dado correspondente é coletado por um conversor analógico digital (A/D_o).

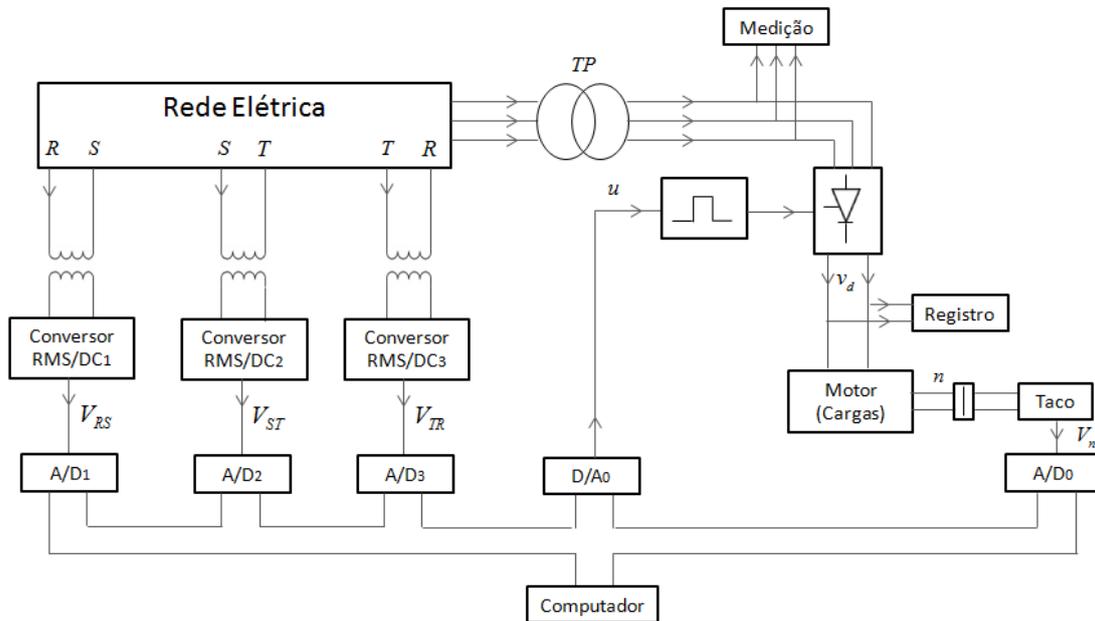


Figura 6.6 – Estrutura da bancada de testes utilizada nos experimentos.

As figuras a seguir contêm fotos que detalham a bancada em questão. A foto ilustrada na Figura 6.7 mostra parte dos elementos da bancada, onde a legenda abaixo informa os itens relacionados na foto em questão.

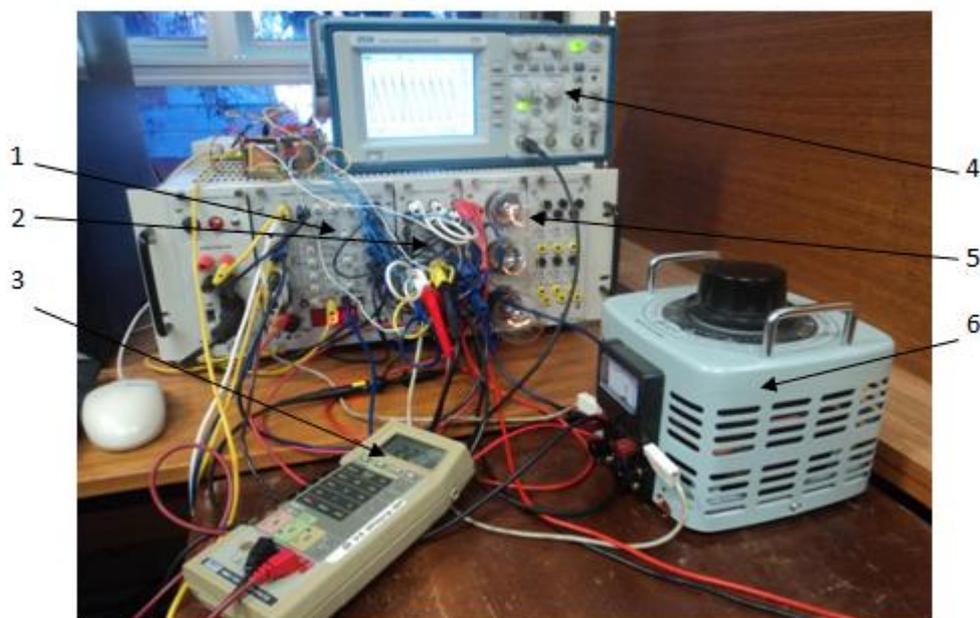


Figura 6.7 – (Foto 1) Instrumentação da bancada de testes.

Legenda da Foto 1:

- 1 – Circuito de disparo.
- 2 – Retificador controlado.
- 3 – Medição do valor eficaz da tensão de linha.
- 4 – Registro da tensão retificada.
- 5 – Cargas do retificador (lâmpadas elétricas).
- 6 – Variação dos valores eficazes das tensões de linha.

A foto da Figura 6.8 mostra outros elementos da bancada, onde a legenda a seguir informa os itens relacionados na foto.

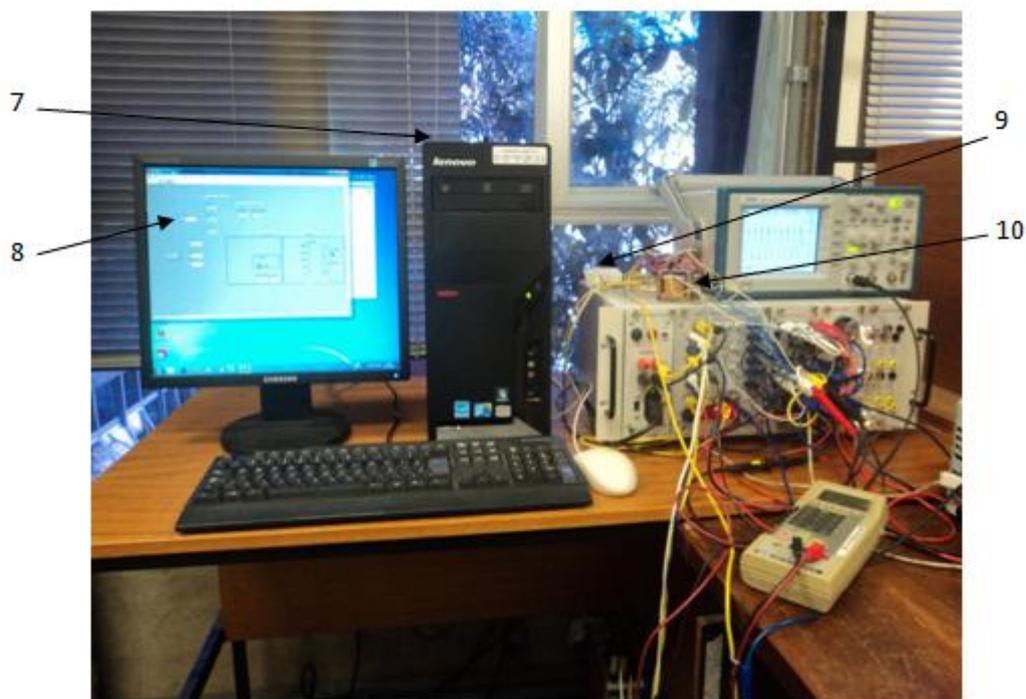


Figura 6.8 – (Foto 2) Instrumentação da bancada de testes.

Legenda da Foto 2:

- 7 – Computador de monitoramento e controle.
- 8 – Tela de supervisão.

9 – Sistema de aquisição de dados que contém os conversores A/D e D/A.

10 – Transformadores para medição das tensões de linha e circuitos condicionadores associados (conversores RMS/DC).

As fotos das Figuras 6.9 e 6.10 mostram o motor de corrente contínua e o tacômetro utilizados na bancada.

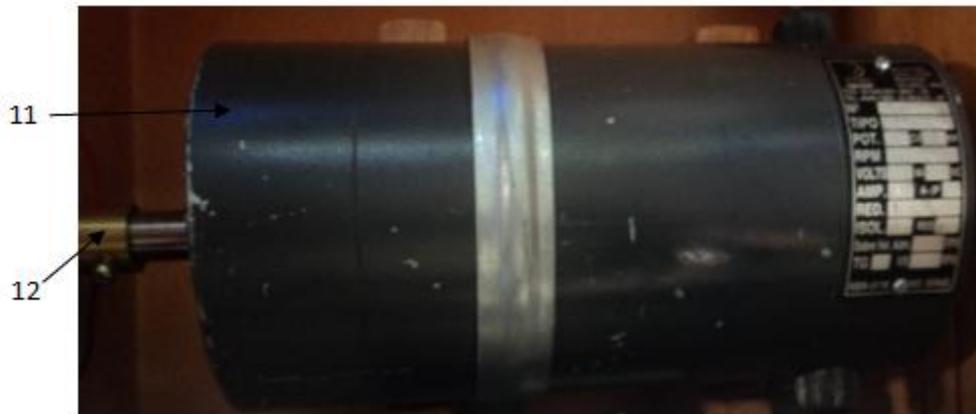


Figura 6.9 – (Foto 3) Bancada de testes com motor e freio.

Legenda da Foto 3:

11 – Motor de corrente contínua com excitação por ímã permanente.

12 – Acoplamento para o tacômetro.



Figura 6.10 – Tacômetro usado na bancada de testes.

O diagrama ilustrativo da Figura 6.11 constitui uma simplificação da Figura 6.1, que estará relacionado com os primeiros ensaios realizados na bancada de testes.

Inicialmente a carga da ponte retificadora será composta apenas por resistências elétricas, e a seleção do ângulo de disparo do retificador será realizada manualmente. O valor médio da tensão retificada ($v_d = V_{d\alpha}$) será medido por meio de um voltímetro e com o osciloscópio digital da bancada. O valor do ângulo de disparo (α_{atual}) da ponte retificadora será informado pelo display digital do circuito de disparo. Os valores eficazes das tensões de linha do conversor são fornecidos pelos voltímetros digitais da bancada.

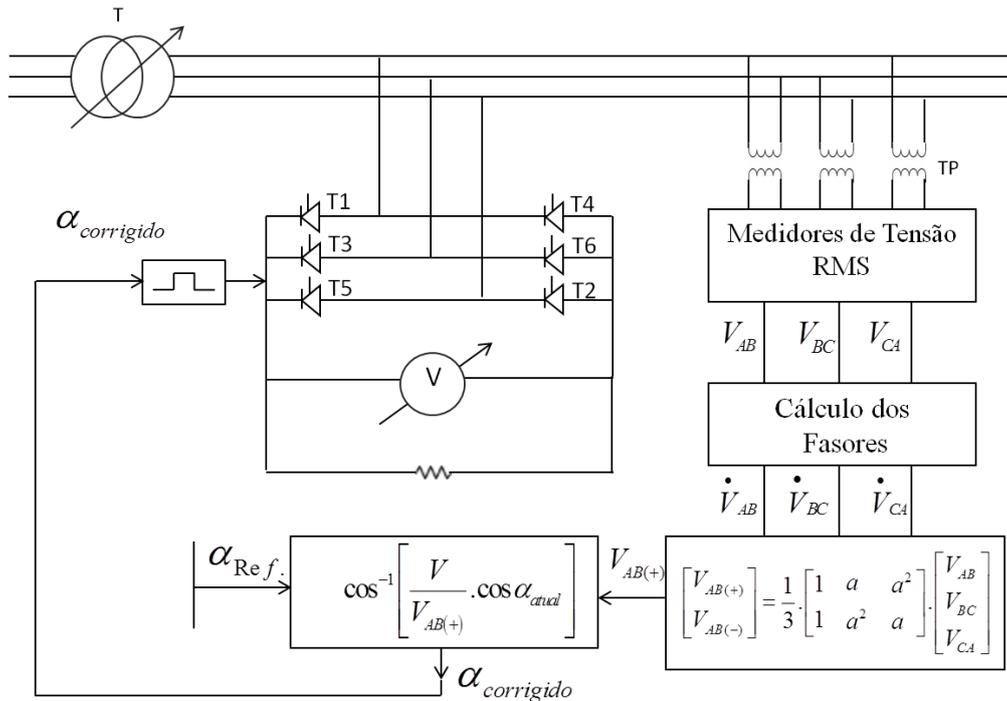


Figura 6.11 – Diagrama relacionado com a primeira fase dos testes.

A Tabela 6.1 contém valores de ensaios práticos realizados na bancada de testes.

Tabela 6.1 – Valores de ensaios práticos realizados na bancada de testes.

| Caso | V_{AB} [V] | V_{BC} [V] | V_{CA} [V] | $V_{(+)}$ [V] | α_{atual} | $\alpha_{corrigido}$ | V_{da} [V] |
|------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|----------------------|--------------|
| 1 | 220 | 225 | 222 | 223 | 30^0 | - | 261 |
| | 173 | 225 | 202 | 199 | 30^0 | - | 236 |
| | 173 | 225 | 202 | 199 | - | $16,6^0$ | 260 |
| 2 | 220 | 225 | 222 | 223 | 30^0 | - | 261 |
| | 240 | 225 | 220 | 230 | 30^0 | - | 273 |
| | 240 | 225 | 220 | 230 | - | $34,5^0$ | 260 |
| 3 | 220 | 225 | 222 | 223 | 45^0 | - | 210 |
| | 168 | 225 | 200 | 197 | 45^0 | - | 187 |
| | 168 | 225 | 200 | 197 | - | $37,6^0$ | 211 |
| 4 | 220 | 224 | 222 | 222 | 60^0 | - | 148 |
| | 182 | 224 | 205 | 206 | 60^0 | - | 138 |
| | 182 | 224 | 205 | 206 | - | $58,1^0$ | 147 |

O valor nominal assumido para as tensões das fases de alimentação do sistema foi de 220 [V]. Foram considerados quatro casos nos experimentos realizados.

Inicialmente no primeiro caso (ver dados da primeira linha da Tabela 6.1), o *tap* do transformador de força foi ajustado de forma a ter-se um sistema razoavelmente equilibrado, onde os valores eficazes das tensões das fases ($V_{AB} = 220$ [V], $V_{BC} = 225$ [V], $V_{CA} = 222$ [V]) foram registrados pelo sistema de aquisição de dados computadorizado e conferidos por meio dos voltímetros digitais de medição da bancada. Com os dados adquiridos o processador digital calculou a componente de sequência positiva ($V_+ = 223$ [V]), registrando o valor correspondente na tela do computador. Um ângulo de disparo com valor $\alpha_{atual} = 30^0$ foi estipulado para o circuito de disparo da ponte retificadora, a tensão retificada ($V_{da} = 261$ [V]) foi lida pelo voltímetro digital da bancada, e a forma de onda retificada correspondente foi registrada pelo osciloscópio digital utilizado (cujo gráfico associado está na Figura 6.12).

Posteriormente (informações da segunda linha da Tabela 6.2), mudou-se a posição do *tap* do transformador de força de modo a desequilibrar as tensões de alimentação do

sistema ($V_{AB} = 173$ [V], $V_{BC} = 225$ [V], $V_{CA} = 202$ [V]), onde a componente de sequência positiva associada teve o seu valor alterado para $V_+ = 199$ [V]. A tensão retificada correspondente se altera para $V_{da} = 236$ [V], e a forma de onda relacionada foi registrada pelo osciloscópio (Figura 6.13).

O sistema computadorizado calcula qual deve ser o ângulo de disparo corrigido ($\alpha_{corrigido} = 16,6^\circ$), com o objetivo de compensar o desequilíbrio de tensão associado, e atualizar este valor no circuito de disparo do equipamento. A nova tensão retificada ($V_{da} = 260$ [V]) é lida pelo voltímetro e a forma de onda correspondente é registrada pelo osciloscópio (Figura 6.14). As informações associadas estão contidas na terceira linha da Tabela 6.1.

No segundo caso (Caso 2 na Tabela 6.1) as condições iniciais são as mesmas do teste anterior ($V_+ = 223$ [V]; $\alpha_{atual} = 30^\circ$), e agora o desequilíbrio nas tensões das fases ($V_{AB} = 240$ [V], $V_{BC} = 225$ [V], $V_{CA} = 220$ [V]) resultou em um valor da componente positiva igual a $V_+ = 230$ [V], elevando o valor da tensão retificada para $V_{da} = 273$ [V] (Figura 6.15). O computador calcula qual deve ser o valor de correção do ângulo de disparo ($\alpha_{corrigido} = 34,5^\circ$), atualizando o dado correspondente no circuito de disparo da ponte retificadora, retornando o valor original da tensão retificada similar à condição inicial das tensões das fases equilibradas ($V_{da} = 260$ [V]). Ver gráfico associado na Figura 6.16.

Os outros dois testes (com os dados correspondentes informados nos campos Caso 3 e Caso 4 na Tabela 6.1) são similares aos casos anteriores, onde foram utilizados valores diferentes de ângulos de disparo.

As figuras a seguir contêm as formas de onda referenciadas no contexto dos testes efetuados.

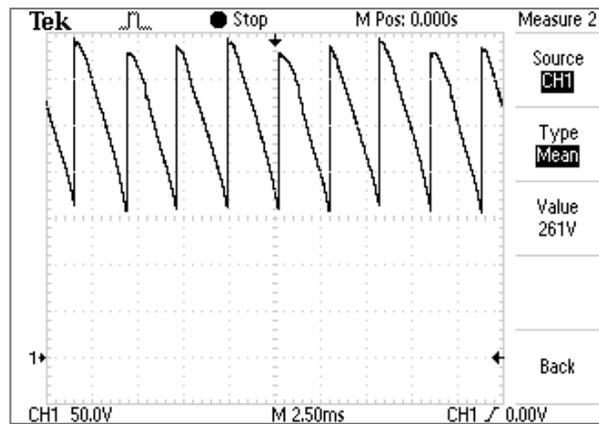


Figura 6.12 – Caso 1 para $V_+ = 223$ [V] e $\alpha_{atual} = 30^\circ$.

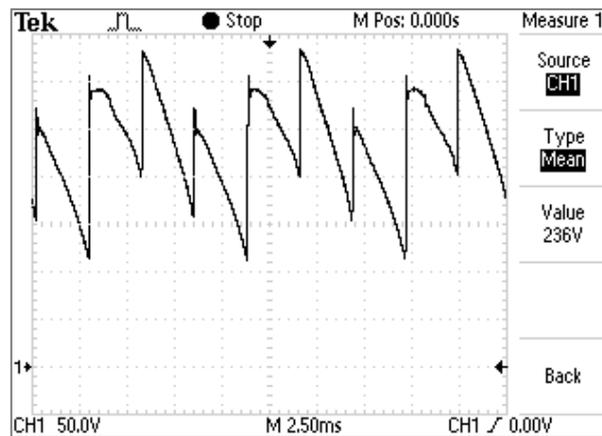


Figura 6.13 – Caso 1 para $V_+ = 199$ [V] e $\alpha_{atual} = 30^\circ$.

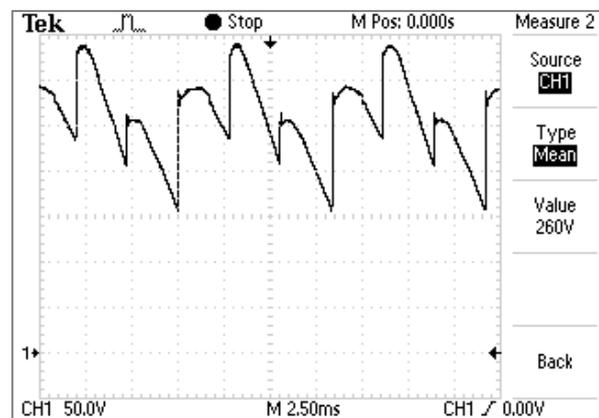


Figura 6.14 – Caso 1 para $V_+ = 199$ [V] e $\alpha_{corrigido} = 16,6^\circ$.

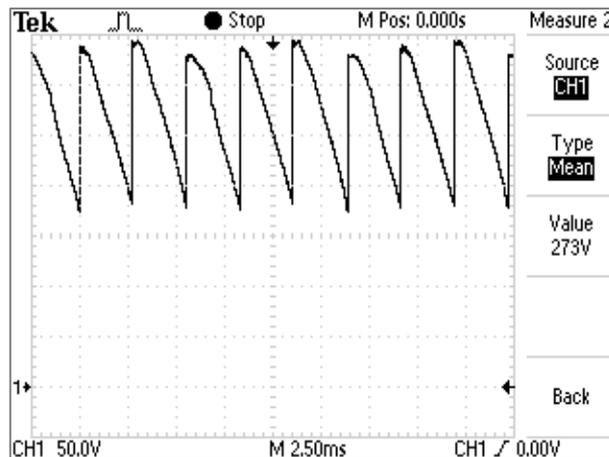


Figura 6.15 – Caso 2 para $V_+ = 230$ [V] e $\alpha_{\text{atual}} = 30^\circ$.

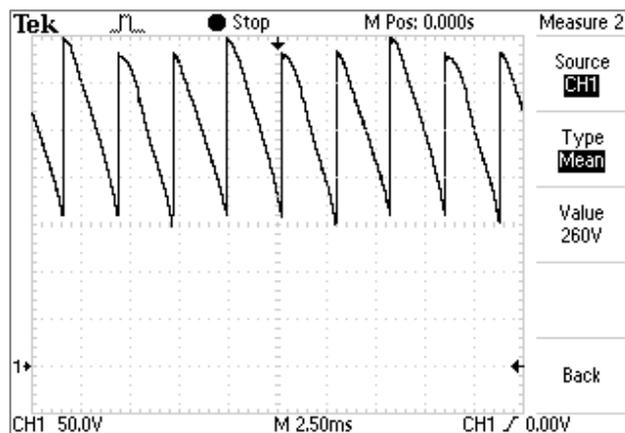


Figura 6.16 – Caso 2 para $V_+ = 230$ [V] e $\alpha_{\text{corrigido}} = 34,5^\circ$.

O segundo experimento está associado com a estrutura ilustrada na Figura 6.6 referente à bancada de testes. O objetivo consiste em se verificar o efeito da compensação adicional de correção do ângulo de disparo de uma ponte retificadora controlada, sujeita a desequilíbrios repentinos nas tensões trifásicas de alimentação, atuando em conjunto com uma malha de controle convencional com a finalidade de regular a velocidade de um motor alimentado pelo conversor em questão. Buscou-se verificar se os resultados obtidos na prática são compatíveis com aqueles originados da simulação computacional efetuada anteriormente. Outro objetivo foi de verificar se o procedimento proposto de compensação é factível em realizações de tempo real, dado o volume de informações a serem processadas. No experimento foi utilizado um motor CC e uma malha de controle de velocidade, cujos modelos em escala reduzida correspondem à modelagem do sistema simulado anteriormente.

A Figura 6.17 ilustra a ocorrência de um desequilíbrio em $t = 10,75$ [s], onde a componente de sequência positiva cai provocando a redução da velocidade do motor. A correção da velocidade é realizada através da malha de controle convencional, que reduz o ângulo de disparo (Alfa) do conversor com a finalidade de recuperar a velocidade do processo.

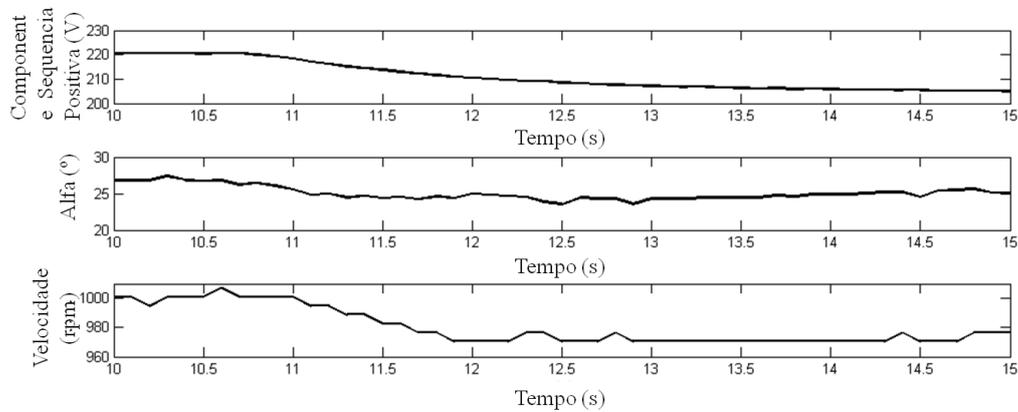


Figura 6.17 – Comportamento do sistema sem a ação da compensação extra.

A Figura 6.18 mostra o comportamento do sistema na mesma situação citada anteriormente, mas agora considerando o procedimento adicional de correção do ângulo de disparo da ponte retificadora.

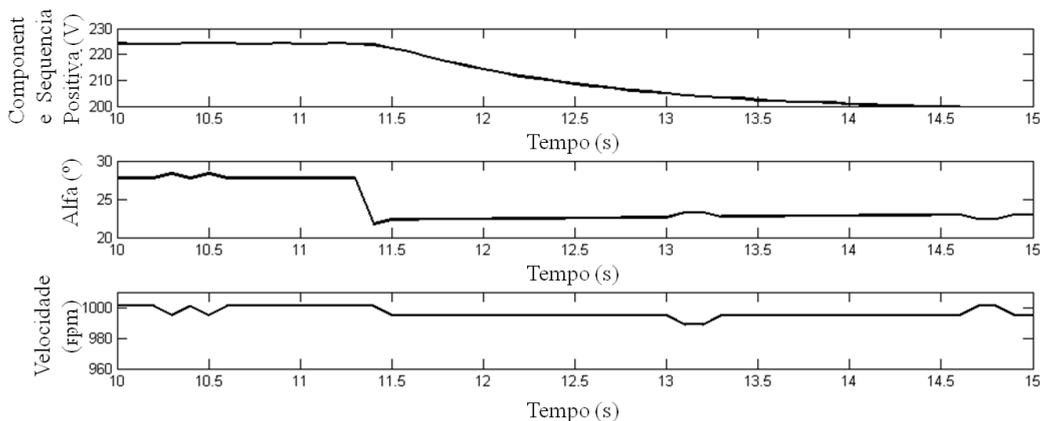


Figura 6.18 – Comportamento do sistema com compensação de ângulo.

Verificando o comportamento real da informação da velocidade do motor nos gráficos associados com as Figuras 6.17 e 6.18, nota-se que a variação da rotação na malha que utilizou a compensação adicional do ângulo de disparo (informação da velocidade na Figura 6.18), foi menor em relação à variação da rotação associada a malha de controle

convencional (Figura 6.17). No ANEXO B deste trabalho encontra-se o código fonte do programa desenvolvido para as experiências práticas mostradas neste capítulo, onde os cálculos envolvidos são compatíveis com a utilização de controladores industriais e de processadores digitais comerciais, possibilitando soluções “embarcadas” em equipamentos de mercado.

6.4 Considerações Finais

Os resultados das simulações e das experiências de laboratório comprovaram a eficiência do método proposto para compensação de desequilíbrios das tensões de alimentação de conversores controlados. A compensação realizada, a partir da determinação da componente de sequência positiva do sistema elétrico, possibilitou corrigir eventuais efeitos de desequilíbrios através da alteração do ângulo de disparo do retificador controlado associado.

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

O objetivo deste trabalho foi apresentar um procedimento e mostrar a sua aplicação efetiva na compensação de desequilíbrios de tensões de alimentação de conversores estáticos controlados com a configuração de pontes trifásica com comutação pela rede.

Os conversores controlados com a configuração em PWM permitem através de algoritmos que o efeito de desequilíbrio das tensões de alimentação seja compensado.

Nos conversores comutados pela rede com configuração a SCRs, encontrados em grande quantidade em instalações elétricas industriais, por exemplo, em acionamentos de corrente contínua, a ocorrência do desequilíbrio de tensões provoca modificação no valor médio da tensão de saída do conversor sendo seu efeito corrigido com base em alteração do comportamento do processo.

A abordagem proposta oferece a possibilidade de compensação do efeito do desequilíbrio das tensões de alimentação do conversor no valor médio da tensão do lado CC de forma rápida e precisa. Foi mostrado que em acionamentos controlados, a correção proposta é muito mais rápida do que aquela realizada apenas com uma malha de regulação convencional. Exemplos numéricos, simulações computacionais e ensaios experimentais ainda demonstraram a precisão do método. Os testes práticos efetuados indicaram a factibilidade para aplicações em tempo real do procedimento de compensação apresentado, onde os cálculos associados são compatíveis com as capacidades dos controladores industriais ou dos processadores comerciais disponíveis no mercado.

Finalmente é importante ressaltar que o sistema proposto independe da potência do conversor e é recomendável para acionamentos de corrente contínua como em sistemas de laminação de chapas.

Em trabalho futuro pretende-se verificar o contexto da aplicação da proposta apresentada neste artigo em aplicações de reguladores automáticos de tensão para

geradores elétricos.

Outra investigação possível diz respeito ao consumo de energia não ativa em conversores controlados, que se deve basicamente ao deslocamento da corrente em relação à tensão do sistema, fenômeno associado ao ângulo de disparo do conversor.

Quando um sistema de alimentação é desequilibrado o consumo de energia não ativa do mesmo aumenta. Se o desequilíbrio de tensões resulta em uma componente de sequência positiva menor que a tensão nominal do sistema (que é o caso mais comum), o aumento do consumo de energia não ativa devido a desequilíbrios é compensado pela redução do consumo de energia não ativa dado pelo deslocamento da tensão em relação a corrente. Ou seja, a correção adicional do o ângulo de disparo do sistema pode reduzir esta parcela de energia consumida.

O trabalho resultante desta tese originou os seguintes artigos para publicação:

Sá Camposilvan, J.C., Pinheiro, C.A.M., Sá, J.S. Compensação do Efeito de Desequilíbrio de Tensões de Alimentação em Pontes Retificadoras Controladas. Brazilian Journal Of Power Electronics.

Sá Camposilvan, J.C., Pinheiro, C.A.M., Sá, J.S. Compensação do Efeito de Desequilíbrio das Tensões de Alimentação em Pontes Retificadoras. IEEE Induscon 2014.

Sá Camposilvan, J.C., Pinheiro, C.A.M., Sá, J.S. Utilização de Componentes Simétricas para Análise da Comutação em Pontes Trifásicas Alimentadas com Tensões Desequilibradas. IEEE Induscon 2014.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-SALAM, M., ABDEL-SATTAR, S., ABDALLAH A., ALI H.. Symmetrical Components Analysis of Multi-Pulse Converter Systems. *Electric Power Components and Systems*, v. 34, n. 8, p. 867-888, 2007.

CANO, J. M., ALONSO ORCAJO, G., GARCIA MAYAORDOMO, J., ASENSI, R., FERNÁNDEZ CABANAS, M., GARCIA MELERO, M.. New Transfer Functions for an Accurate Estimation of Harmonic Distortion in AC/DC Converters Working under Unbalanced Conditions, *IEEE Trans. Ind. Aplicat*, v.37, n 2. p 642-649, 2001.

CHOMAT, M., SCHREIER, L., BENDL, J.. Control of active front-end rectifier under unbalanced voltage supply and DC-link pulsations. *Electrical Machines and Drives Conference, Niagara Falls*, p. 324-329, 2011.

COSTA, L.L.H., SERNI, P.J.A., MARAFAO, F.P.. An analysis of Generalized Symmetrical Components in non-sinusoidal three phase systems. *Power Electronics Conference, Praiamar*, p. 502-507, 2011.

ENJETI, P. N., ZIOGAS, P. D.. Analysis of a Static Power Converter under Unbalance: A Novel Approach. *IEEE Trans. Ind. Electron.* v. 37, n.1, p. 91-93. 1990.

FORTESCUE, C. L.. Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Poly-phase Networks. *Trans. AIEE*, v. 37, p. 1027-1140, 1918.

GOTTFRIED, M.. *Converter Engineering, An Introduction to Operation and Theory*. Siemens Aktiengesellschaft, John Wiley and Sons, 1984.

HUSSEIN, A., ZAHAWI, B., GIAORIUS, D.. Modeling of Six-Pulse Rectifier operating under Unbalanced Supply Conditions, *Journal of Engineering and Applied Science*, v.4, p 71-75, 2009.

HWANG, J. G., LEHN, P.W.. Control of AC-DC Converters under Unbalanced Operating Conditions Using the DC Space Vector Control Concept. *Power Electronics Specialists Conference PESC*, p. 830-836. 2008.

KAZEM , A., ZAHAWI, B., GIAOURIS, D.. Modeling of Six-Pulse Rectifier operating under Unbalanced Supply Conditions. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 4, n. 1, p. 71-75, 2009.

LARA, J.D., VIETO I.. Optimal Sizing of Static Converters for Single Phase Feeding of Three Phase Induction Motor, Electrical Machines (ICEM), International Conference, Marseille, France, p. 2-5, 2012.

MURTY, Y. V. V. S., DUBEY, G. K., SINHA, R. M. K.. Fault Diagnosis in Three-Phase Thyristor Converters Using Microprocessor. IEEE Trans. on Ind. Appl., v. 20, n. 6, p. 1490–1497, 1984.

NGANDUI, É., OLIVIER, G., APRIL, G.É., GUIMARÃES, C.. DC Harmonic Distortion Minimization of Thyristor Converter under Unbalanced Voltage Supply Using Asymmetrical Firing Angle. IEEE Trans. Power Electron. v.12, n. 2, p. 332-342, 1997.

OJO, O., BHAT, I.. Influence of input supply voltage unbalances on the performance of AC/DC buck rectifiers. Power Electronics Specialists Conference, PESC '94, 25th Annual IEEE , v. 2, p. 777-784, 1994.

PAULILLO G., ABREU J.P.G.. Power Converters under Voltage Unbalanced – A novel Solution, IEEE Tech. Conf. Porto 2001.

RASHID, M. H., MASWOOD, A. I.. Analysis of three-phase AC-DC converters under unbalanced supply conditions. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 24, n.3, p. 449-455, 1988.

Sá Camposilvan, J.C., Pinheiro, C.A.M., Sá, J.S. Compensação do Efeito de Desequilíbrio de Tensões de Alimentação em Pontes Retificadoras Controladas. Brazilian Journal Of Power Electronics. Artigo aceito para publicação.

Sá Camposilvan, J.C., Pinheiro, C.A.M., Sá, J.S. Compensação do Efeito de Desequilíbrio das Tensões de Alimentação em Pontes Retificadoras. IEEE Induscon, Juíz de Fora, Brasil, 2014.

Sá Camposilvan, J.C., Pinheiro, C.A.M., Sá, J.S. Utilização de Componentes Simétricas para Análise da Comutação em Pontes Trifásicas Alimentadas com Tensões Desequilibradas. IEEE Induscon, Juíz de Fora, Brasil, 2014.

STROBL B., HEINRICH, W., HERALD, G.. Analysis and Identification of Faults in Bridge Converters Using the Symmetrical Space Phasor Components. 8th European Power Electronics and Drives Conference, Lausanne, Switzerland, p. 1-9, 1999.

SUH, Y., GO, Y., RHO, D.. A Comparative Study on Control Algorithm for Active Front-End Rectifier of Large Motor Drives Under Unbalanced Input. IEEE Trans. on Ind. Appl., v. 47, n. 3, p. 1419-1431, 2011.

TANG, Y., LO, P. C., WANG, P., CHOO, F. H.. One-cycle controlled three-phase PWM rectifiers with improved regulation under unbalanced and distorted input voltage conditions. Power Electronics, IEEE Transactions on, v.25, n.11, p. 2786-2796, 2010.

VON JOUANNE, A., BANERJEE, B.. Assessment of Voltage Unbalance. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 4, p. 782-790, 2001.

WASYNCZUK, O.. Analysis of Line-Commutated Converter during Unbalanced Operating Conditions. IEEE-Trans. On EC, v. 9 p 420-426, 1994.

ANEXO A

A seguir está apresentado o programa de simulação utilizado no exemplo citado no item de simulações computacionais do Capítulo 6.

Simulação de Controle de Velocidade de Motor de Corrente Contínua via Retificador Controlado.

```
% Simulação de Controle de Velocidade de Motor CC via Retificador
Controlado

% Parâmetros do Motor
Ua = 380; n = 1000; Ra = 0.01; Ke = 27.44; Te=0.1; Ia = 1385; Ip =
2.5*Ia;
Mm = 4774; Mc = 0.9*Mm; Tm = 11.5; Cm = 3.45; Cn = 0.37; Vf = 440;

% Parâmetros da Malha de Controle
Kn = 10/n; Kp = 1; Ki = 0.5;

% Dados de Simulação e Condições Iniciais
Np=2000; dt=0.01; t=0; Ia=0; n=0; In=0;

for k=1:Np % Laço de Simulação

    % Referência de Velocidade (em nível de tensão correspondente):
    % 10 [V] equivale a 1000 [rpm]
    ref = 10;

    en = ref - Kn*n; % Erro da Malha de Velocidade

    Pn = Kp*en; % Ação Proporcional (P)

    In = In + Ki*en*dt; % Ação Integral (I)

    u = Pn + In; % Ação PI

    % Limitação da Informação de Comando de Disparo
    % Onde u = 0 corresponde a alfa = 90 e u = 5 a alfa = 0.
    if u < 0
        u = 0;
    end
    if u > 5;
        u = 5;
    end

    % Função do Circuito de Disparo tipo Rampa com Ação Linear
    alfa = acos(u/5);

    % Função do Retificador Controlado
    Ua = 1.35*Vf*cos(alfa);
```

```

% Modelo do Motor
E = Cn * n; % Tensão Induzida
V = Ua - E; % Diferença de Tensão

% Armazenamento de Valores
vt(k)=t; valfa(k)=alfa; vn(k)=n;

dIa = (Ke*V - Ia)/Te; % Equação diferencial relativa a Ia
Ia = Ia + dIa*dt; % Integração pelo método de Euler

%Limitação de Corrente (equivale ao regulador de corrente)
if Ia < 0
    Ia = 0;
end
if Ia > Ip
    Ia = Ip;
end

vIa(k)=Ia; % Armazenamento de Valor

Mm = Cm*Ia; % Torque desenvolvido pelo Motor
Ma = Mm - Mc; % Torque Acelerante

dn = Ma/Tm; % Equação diferencial relativa a rotação
n = n + dn*dt; % Integração pelo método de Euler

% Simulação de desequilíbrio nas fases equivalente a um
% afundamento de tensão de 10%
if t >= 12
    Vf = 396;
end

vp(k) = Vf; % Armazenamento de Valor

t = t + dt; % Incremento do Tempo

end

```

Simulação de Compensação de Ângulo de Disparo em Retificador Controlado no Controle de Velocidade de um Motor de Corrente Contínua.

```

% Simulação de Compensação de Angulo de Disparo em Retificador
% Controlado no Controle de Velocidade de um Motor CC

% Parâmetros do Motor
Ua = 380; n = 1000; Ra = 0.01; Ke = 27.44; Te=0.1; Ia = 1385; Ip =
2.5*Ia;
Mm = 4774; Mc = 0.9*Mm; Tm = 11.5; Cm = 3.45; Cn = 0.37;

% Valor da Tensão Nominal da Rede de Alimentação
vl = 440;

% Parâmetros da Malha de Controle
Kn = 10/n; Kp = 1; Ki = 0.5;

```

```

% Dados de Simulação e Condições Iniciais
Np=2000; dt=0.01; t=0; Ia=0; n=0; In=0;

% Simulação de Medidas RMS das Tensões entre Fases da Rede
vab = 440; vbc = 440; vca = 440;

for k=1:Np % Laço de Simulação
    % Referência de Velocidade (em nível de tensão correspondente):
    % 10 [V] equivale a 1000 [rpm]
    ref = 10;

    en = ref - Kn*n; % Erro da Malha de Velocidade

    Pn = Kp*en; % Ação Proporcional (P)

    In = In + Ki*en*dt; % Ação Integral (I)

    u = Pn + In; % Ação PI

    % Limitação da Informação de Comando de Disparo
    % Onde u = 0 corresponde a alfa = 90 e u = 5 a alfa = 0.
    if u < 0
        u = 0;
    end
    if u > 5;
        u = 5;
    end

    % Função do Circuito de Disparo tipo Rampa com Ação Linear
    alfa = acos(u/5);

% Procedimento de Compensação de Alfa:
% Calculo dos Angulos Teta e Beta
teta=acos((vab^2+vca^2-vbc^2)/(2*vab*vca));
tetagr=teta*180/pi;
beta=acos((vab-(vca*cos(teta)))/vbc);
betagr=beta*180/pi;

% Calculo dos Argumentos
angvab=0;
angvbc=-180+betagr;
angvca=-180-tetagr;

% Calculo da Componente de Sequencia Positiva
vabp = vab*exp(i*(angvab*(pi/180)));
vbcp = vbc*exp(i*(angvbc*(pi/180)));
vcap = vca*exp(i*(angvca*(pi/180)));
a = exp(i*(120*(pi/180)));
m1=[1, a, a^2; 1, a^2, a];
m2=[vabp; vbcp; vcap];
m=(1/3)*(m1*m2);
mpos=m(1,1);
vab_pos=abs(mpos);

% Calculo Alfa Corrigido
alfa_corr=acos((vl/vab_pos)*cos(alfa));
% Função do Retificador Controlado
Ua = 1.35*vab_pos*cos(alfa_corr);

```

```

% Modelo do Motor
E = Cn * n; % Tensão Induzida
V = Ua - E; % Diferença de Tensão

% Armazenamento de Valores
vt(k)=t; vn(k)=n;

dIa = (Ke*V - Ia)/Te; % Equação diferencial relativa a Ia
Ia = Ia + dIa*dt; % Integração pelo método de Euler

%Limitação de Corrente (equivale ao regulador de corrente)
if Ia < 0
    Ia = 0;
end
if Ia > Ip
    Ia = Ip;
end

vIa(k)=Ia; % Armazenamento de Valor
valfa(k)=alfa_corr;
vp(k)=vab_pos;

Mm = Cm*Ia; % Torque desenvolvido pelo Motor
Ma = Mm - Mc; % Torque Acelerante

dn = Ma/Tm; % Equação diferencial relativa a rotação
n = n + dn*dt; % Integração pelo método de Euler

% Simulação de desbalanço na rede em t = 12 [s]
if t >= 12
    % Simulação de afundamento de tensão de 10%
    vab = 396; vbc = 396; vca = 396;
end

t = t + dt; % Incremento do Tempo

end

```

ANEXO B

A seguir é apresentado o console do aplicativo desenvolvido para as experiências práticas mostradas no Capítulo 6.

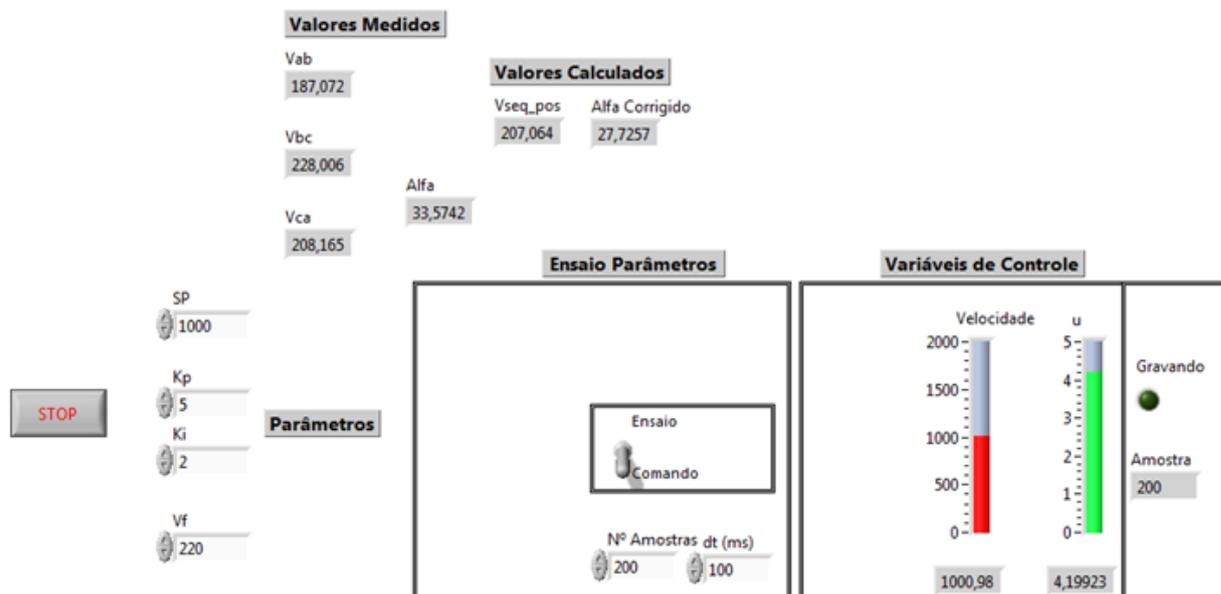


Figura B1 - Console do Aplicativo Desenvolvido.

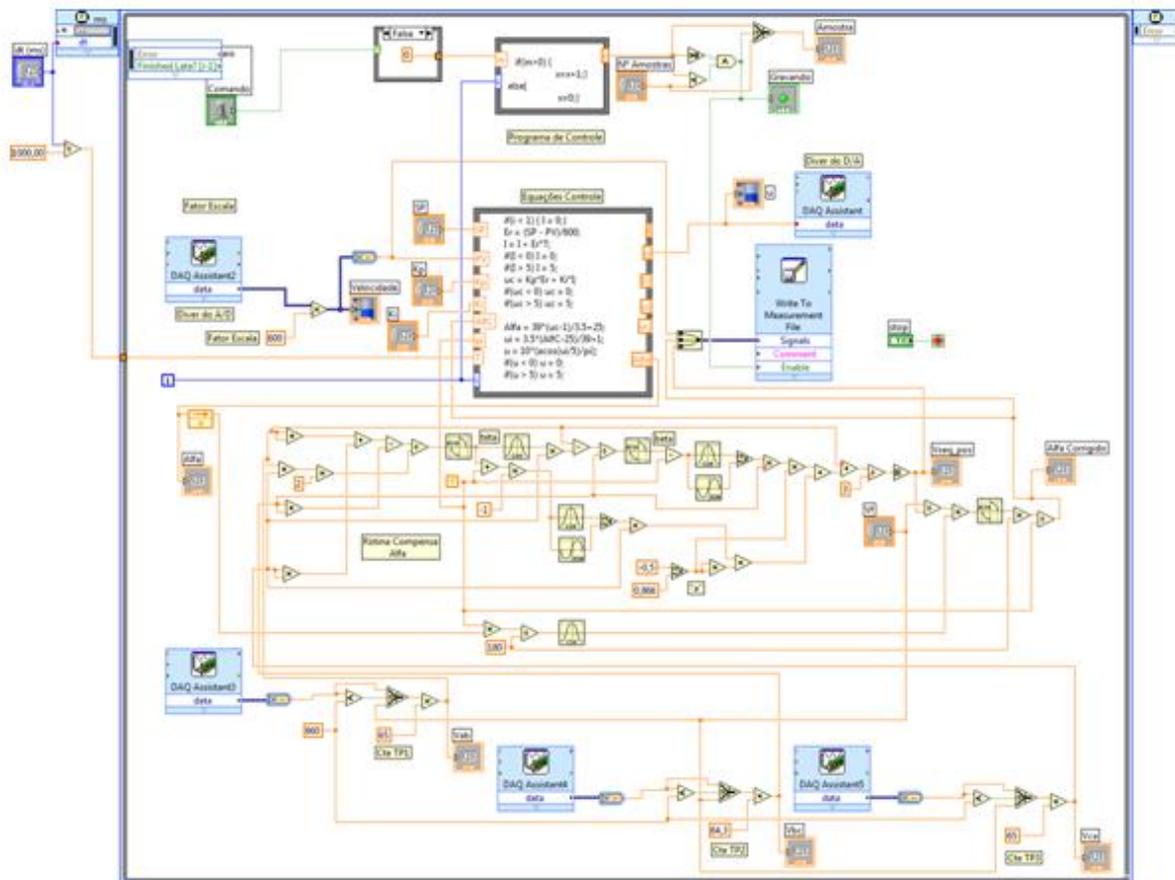


Figura B2 - Diagrama funcional do algoritmo de controle desenvolvido.

ANEXO C

A Figura C1 mostra a estrutura básica de uma ponte trifásica semicontrolada.

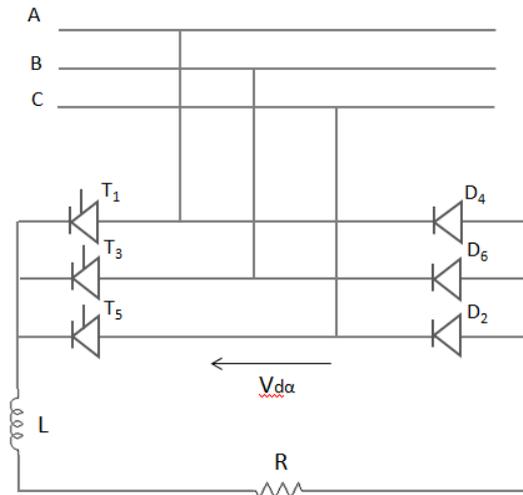


Figura C1 – Ponte semicontrolada.

A Figura C2 ilustra as tensões de alimentação do conversor e do lado de corrente contínua para um ângulo de disparo α .

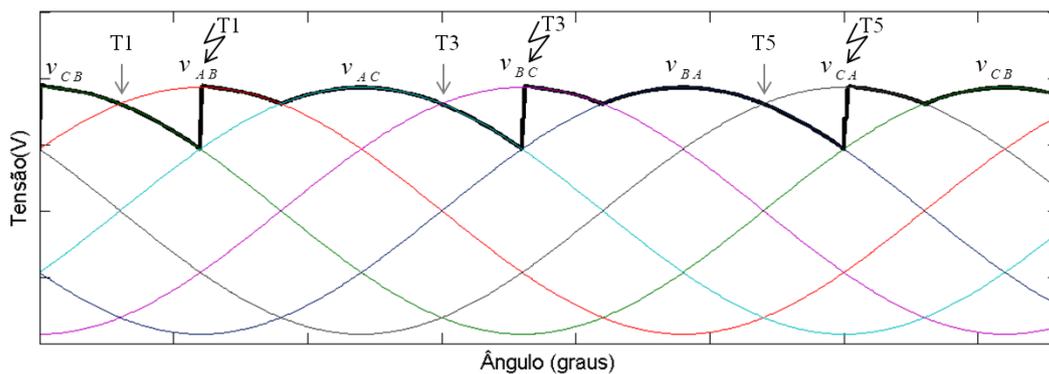


Figura C2 – Tensões de alimentação e do lado de corrente contínua do conversor.

Sendo:

$$v_{AB} = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega t;$$

$$v_{BC} = \sqrt{2} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{3\pi}{2} \right);$$

$$v_{CA} = \sqrt{2} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{3\pi}{2} \right).$$

O valor médio da tensão no lado de corrente contínua é definido por:

$$V_{d\alpha} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \cdot \left[\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) \cdot d\omega t \right];$$

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35 \cdot V}{2} \cdot (1 + \cos \alpha).$$

ANEXO D

Utilização de Componentes Simétricas para Análise da Comutação em Pontes Trifásicas Alimentadas com Tensões Desequilibradas

1 Introdução

A comutação de corrente em pares de tiristores em retificadores comutados pela rede não ocorre instantaneamente devido às indutâncias do lado de corrente alternada do conversor. O intervalo da comutação em um conversor alimentado com tensões equilibradas é uniforme. A comutação ocasiona a alteração do valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor. Será analisado o efeito do desequilíbrio das tensões de alimentação de pontes trifásicas no processo de comutação e conseqüentemente sua influência no valor médio da tensão no lado de corrente contínua para o conversor operando com carga nominal. Será proposta também uma metodologia para analisar este efeito utilizando a teoria das componentes simétricas.

2 Determinação do Ângulo de Comutação para Ponte Trifásica Alimentada com Tensões Equilibradas

Esta seção apresenta uma revisão do equacionamento para determinação do ângulo de comutação e da variação do valor médio da tensão no lado CC de um conversor com comutação natural. O equacionamento é desenvolvido para permitir a análise do processo quando o conversor é alimentado com tensões desequilibradas. Na Figura D1 tem-se a estrutura típica de uma ponte trifásica controlada alimentada com tensões de linha equilibradas. As tensões de linha de alimentação do conversor são definidas por (1), (2) e (3).

$$v_{AB} = \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen} \omega t \quad (1)$$

$$v_{BC} = \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2)$$

$$v_{CA} = \sqrt{2} \cdot V_{CA} \cdot \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

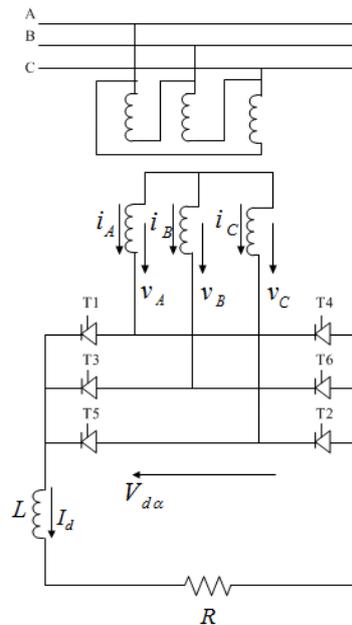


Figura D1 - Retificador controlado ligado em ponte trifásica.

Para analisar o efeito da comutação admite-se que estão conduzindo inicialmente os tiristores T1 e T2, e que T3 é disparado com um ângulo α iniciando a comutação da corrente do tiristor T1 para o tiristor T3. Ao final do processo fica conduzindo o par T2 e T3, mas durante o processo de comutação os tiristores T1 e T3 conduzem simultaneamente. Assumindo L como sendo a indutância total de cada fase do lado de corrente alternada do retificador, e considerando-se que as tensões das fases A e B estão associadas como fontes de tensão em paralelo durante a comutação, têm-se (4) e (5).

$$v_A - L_T \cdot \frac{di_A}{dt} = v_B - L_T \cdot \frac{di_B}{dt} \quad (4)$$

$$i_A + i_B = I_d \quad (5)$$

Admitindo uma carga com parcela indutiva (L) considerável, a corrente I_d pode ser considerada constante. Da equação (5) obtém-se (6).

$$\frac{di_B}{dt} = -\frac{di_A}{dt} \quad (6)$$

Com relação às tensões de fase envolvidas na análise, tem-se (7).

$$v_B - v_A = v_{BA} = \sqrt{2}.V_{BA}.\text{sen}(\omega t - \pi) \quad (7)$$

Desta forma, da equação (4) resulta em (8).

$$2.\omega.L_T.\frac{di_B}{dt} = \sqrt{2}.V_{BA}.\text{sen}(\omega t - \pi) \quad (8)$$

Assumindo $X_T = \omega L$ (a reatância do lado de corrente alternada do conversor), têm-se (9) e (10), onde K é a constante de integração associada à solução de (9).

$$i_B = \frac{\sqrt{2}.V_{BA}}{2.X_T} \int \text{sen}(\omega t - \pi).d\omega t \quad (9)$$

$$i_B = -\frac{\sqrt{2}.V_{BA}}{2.X_T}.\text{cos}(\omega t - \pi) + K \quad (10)$$

A Figura D2 ilustra as formas de onda das tensões de linha de alimentação do conversor, assim como o processo de comutação do tiristor T1 para o tiristor T3.

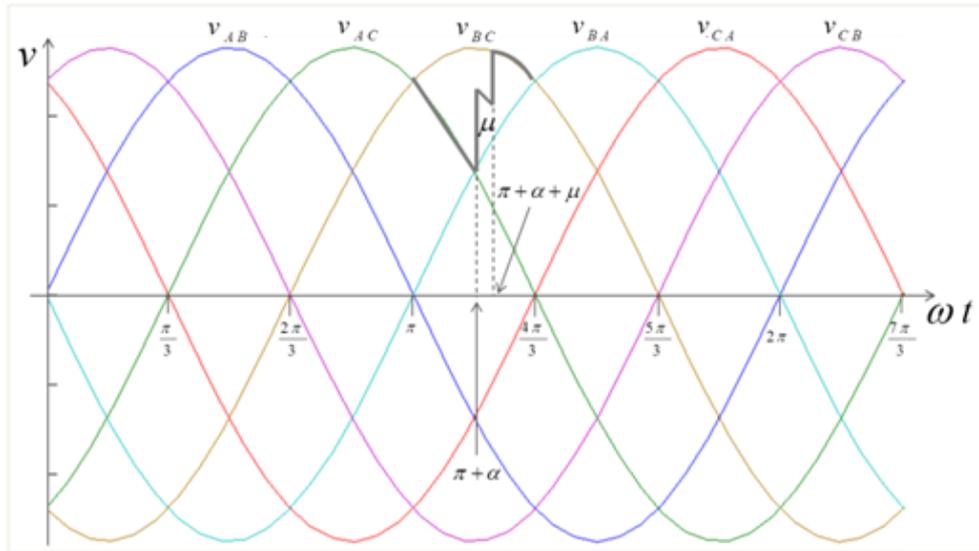


Figura D2 - Formas de onda das tensões de linha de alimentação do conversor e processo de comutação dos tiristores T1 e T3.

Considerando-se α o ângulo de disparo e μ o ângulo de comutação, a mudança de condução de corrente se inicia em $\omega t = \pi + \alpha$, e finaliza em $\omega t = \pi + \alpha + \mu$ quando $i_B = I_d$. Desta forma a constante de integração K é determinada para a condição inicial do circuito associado, obtendo-se:

$$K = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{BA}}{2 \cdot X_T} \cdot \cos \alpha$$

Substituindo o valor da constante em (10), tem-se (11):

$$i_B = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{BA}}{2 \cdot X_T} \cdot [\cos \alpha - \cos(\omega t - \pi)] \quad (11)$$

Ao final da comutação a corrente que circula na carga é dada por (12).

$$I_d = -\frac{\sqrt{2} \cdot V_{BA}}{2 \cdot X_T} \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)] \quad (12)$$

Assim, o ângulo de comutação fica definido por (13).

$$\mu = \cos^{-1} \left[\cos \alpha - \frac{2 \cdot X_T \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot V_{AB}} \right] - \alpha \quad (13)$$

3 Influência da Comutação no Valor Médio da Tensão para o Conversor Alimentado com Tensões Equilibradas

Tomando como base o conversor mostrado na Figura D1 e considerando-se o processo de comutação do par de tiristores T1-T2 para o par de tiristores T3-T2, a tensão $v_{d\alpha}$ no lado de corrente contínua do retificador pode ser definida em função das tensões v_{AC} , v_{BC} conforme as equações (14) e (15).

$$v_{d\alpha} = v_{AC} - L_T \cdot \frac{di_A}{dt} - L_T \cdot \frac{dI_d}{dt} \quad (14)$$

$$v_{d\alpha} = v_{BC} - L_T \cdot \frac{di_B}{dt} - L_T \cdot \frac{dI_d}{dt} \quad (15)$$

Somando-se as equações (14) e (15) e considerando-se a equação (6), obtém-se (16).

$$v_{d\alpha} = \frac{v_{AC} + v_{BC}}{2} \quad (16)$$

Isto significa que durante o processo de comutação a tensão no lado de corrente contínua do conversor assume o valor médio das tensões do lado de corrente alternada do sistema, conforme ilustrado na Figura D3.

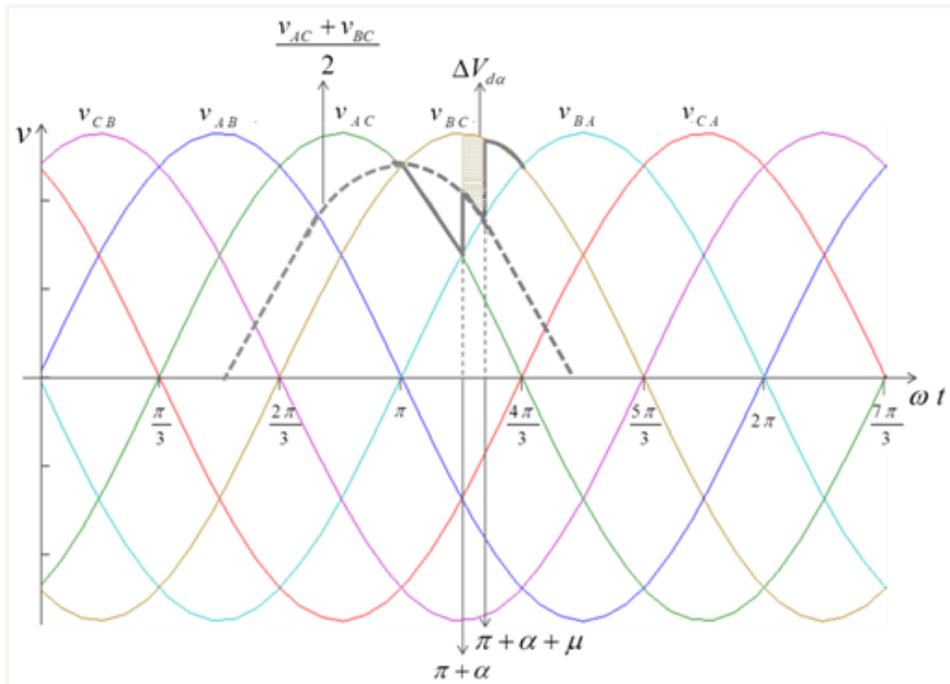


Figura D3 - Variação do valor médio da tensão do lado de corrente alternada do conversor devido ao efeito da comutação.

A partir dos gráficos das tensões mostrados na Figura D3, o valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor é dado por (17).

$$\begin{aligned}
 V_{d\alpha} = & \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{4\pi}{3} + \alpha} \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot d\omega t + \\
 & + \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\pi + \alpha}^{\pi + \alpha + \mu} \left[\frac{\sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot \text{sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) + \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)}{2} \right] \cdot d\omega t
 \end{aligned} \tag{17}$$

Considerando V_2 o valor eficaz da tensão de linha de alimentação do conversor operando com tensões equilibradas, segue (18).

$$V_{AC} = V_{BC} = V_2 \tag{18}$$

Conseqüentemente, a expressão (17) resulta em (19).

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35 \cdot V_2}{2} \cdot [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)] \tag{19}$$

4 Determinação do Ângulo de Comutação para Ponte Trifásica Alimentada com Tensões Desequilibradas

Um sistema trifásico com tensões de linha desequilibradas pode ser representado pelos valores eficazes destas tensões. O cálculo dos argumentos dos fasores das tensões de linha associadas é realizado com base no diagrama mostrado na Figura D4. O triângulo ABC formado pelos fasores se baseia no fato de que, na decomposição em componentes simétricas, a componente de sequência zero de um sistema desequilibrado de tensões de linha é nulo.

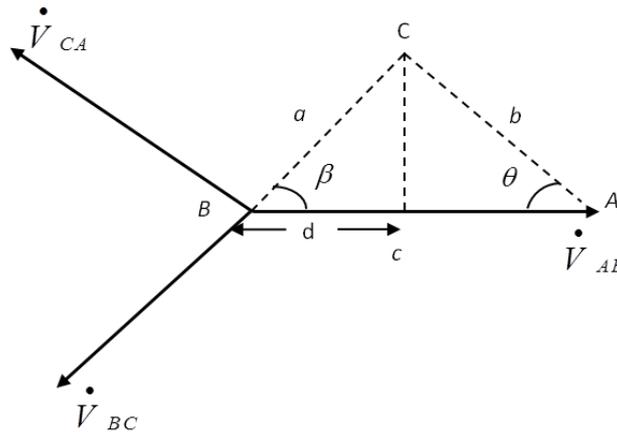


Figura D4 - Obtenção dos fasores das tensões de linha via valores eficazes.

Na figura 4, no triângulo definido pelos pontos A , B e C , onde $a = V_{BC}$, $b = V_{CA}$ e $c = V_{AB}$, obtém-se as relações (20) e (21).

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2b.c.\cos\theta \quad (20)$$

$$d = c - b.\cos\theta; d = a.\cos\beta \quad (21)$$

Os ângulos θ e β indicados na figura são dados por (22) e (23), respectivamente.

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{V_{AB}^2 + V_{CA}^2 - V_{BC}^2}{2V_{AB} \cdot V_{CA}} \right] \quad (22)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left[\frac{V_{AB} - V_{CA} \cdot \cos\theta}{V_{BC}} \right] \quad (23)$$

Estes ângulos permitem a determinação dos argumentos dos fasores associados, tendo-se então (24), (25) e (26).

$$\dot{V}_{AB} = V_{AB} \angle 0^\circ \quad (24)$$

$$\dot{V}_{BC} = V_{BC} \angle -(180 - \beta)^\circ \quad (25)$$

$$\dot{V}_{CA} = V_{CA} \angle -(180 + \theta)^\circ \quad (26)$$

Tomando como base o conversor mostrado na Figura D1, a Tabela D1 indica as tensões de linha aplicadas aos pares de tiristores nos processos de comutação para o conversor alimentado com as tensões desequilibradas, cuja representação é dada pelas equações (24), (25) e (26).

Tabela D1 - Tensões envolvidas nos processos de comutação.

| Do Tiristor | Para o Tiristor | Módulo da Tensão | Valor Instantâneo da Tensão |
|-------------|-----------------|------------------|--|
| 1 | 3 | V_{BA} | $v_{BA} = \sqrt{2} \cdot V_{BA} \cdot \text{sen}(\omega t - \pi)$ |
| 2 | 4 | V_{CA} | $v_{CA} = \sqrt{2} \cdot V_{CA} \cdot \text{sen}[\omega t - (\pi + \theta)]$ |
| 3 | 5 | V_{CB} | $v_{CB} = \sqrt{2} \cdot V_{CB} \cdot \text{sen}[\omega t + \beta]$ |
| 4 | 6 | V_{AB} | $v_{AB} = \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen } \omega t$ |
| 5 | 1 | V_{AC} | $v_{AC} = \sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot \text{sen}[\omega t - \theta]$ |
| 6 | 2 | V_{BC} | $v_{BC} = \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen}[\omega t - (\pi - \beta)]$ |

Considerando-se que a contagem do ângulo de disparo de um tiristor é realizada sempre a partir do instante no qual ocorreria a entrada em condução do mesmo, se no lugar de tiristores existissem apenas diodos, os intervalos de disparo (entre os elementos numerados de 1 a 6) não serão de 60° como ocorre em conversores alimentados com tensões equilibradas. Os instantes para contagem dos ângulos de disparo e os respectivos intervalos de condução estão ilustrados na Figura D5. Por se tratar de um sistema trifásico, mesmo que desequilibrado, a soma dos valores instantâneos das tensões de linha é sempre nula. Isto significa que a interseção de duas tensões de linha ocorre sempre com a passagem da outra por zero. Desta forma, obtêm-se as referências para contagem dos ângulos de disparos dos pares de tiristores, conforme indicado na

Tabela D2.

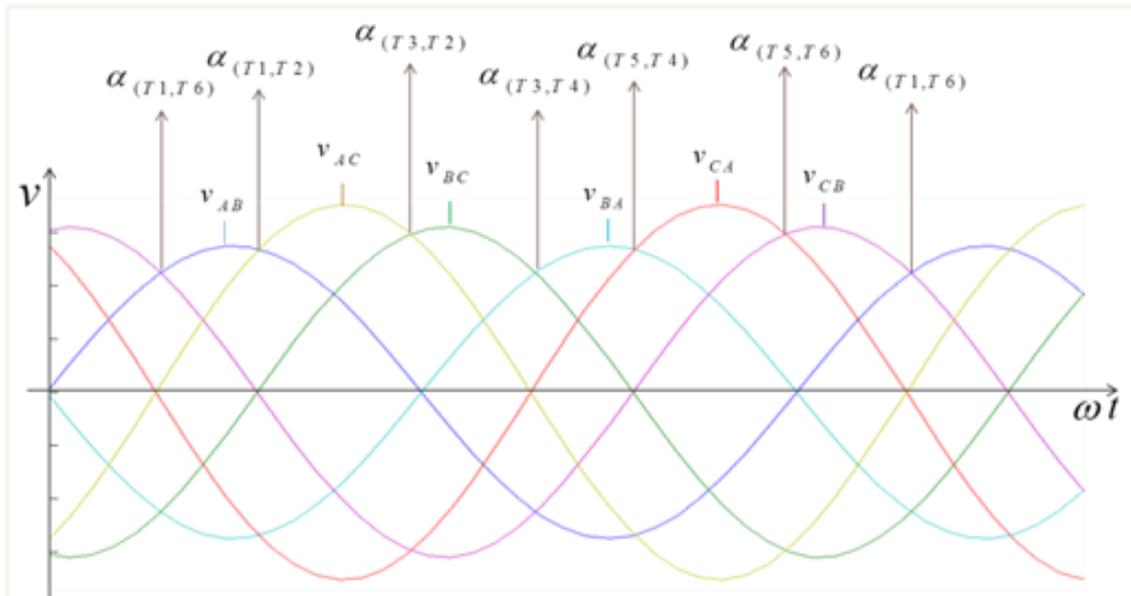


Figura D5 - Ilustração dos intervalos de tempo de comutação.

Tabela D2 - Referência para contagem dos ângulos de disparo dos pares de tiristores.

| Par de Tiristores | Valor de ωt para Contagem do Angulo de Disparo |
|-------------------|--|
| T1-T6 | θ |
| T1-T2 | β |
| T3-T2 | 180° |
| T3-T4 | $(180^\circ + \theta)$ |
| T5-T4 | $(180^\circ + \beta)$ |
| T5-T6 | 0° |

A análise do processo de comutação do par de tiristores T3 e T4 para o par T5 e T4 segue o equacionamento dado por (27) e (28) durante a condução simultânea de T3 e T5.

$$v_B - L_T \cdot \frac{di_B}{dt} = v_C - L_T \cdot \frac{di_C}{dt} \quad (27)$$

$$i_B + i_C = I_d \quad (28)$$

Para a corrente de carga I_d , tem-se (29).

$$\frac{di_C}{dt} = -\frac{di_B}{dt} \quad (29)$$

Com relação às tensões considerando-se a Tabela D1, tem-se o equacionamento a seguir.

$$v_C - v_B = v_{CB} = \sqrt{2} \cdot V_{CB} \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$

$$2 \cdot \omega \cdot L_T \cdot \frac{di_C}{d\omega t} = \sqrt{2} \cdot V_{CB} \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$

$$i_C = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{CB}}{2 \cdot X_T} \cdot \int \text{sen}(\omega t + \beta) \cdot d\omega t \quad (30)$$

Resolvendo a integral em (30), tem-se (31), onde K é a constante de integração.

$$i_C = -\frac{\sqrt{2} \cdot V_{CB}}{2 \cdot X_T} \cdot \text{cos}(\omega t + \beta) + K \quad (31)$$

A Figura D6 mostra as formas de onda das tensões durante o processo de comutação. Considerando-se α o ângulo de disparo e μ o ângulo de comutação, a transferência de corrente se inicia em $\omega t = 2\pi - \beta + \alpha$ quando $i_C = 0$, e é encerrada para $\omega t = 2\pi - \beta + \alpha + \mu$ quando $i_C = I_d$.

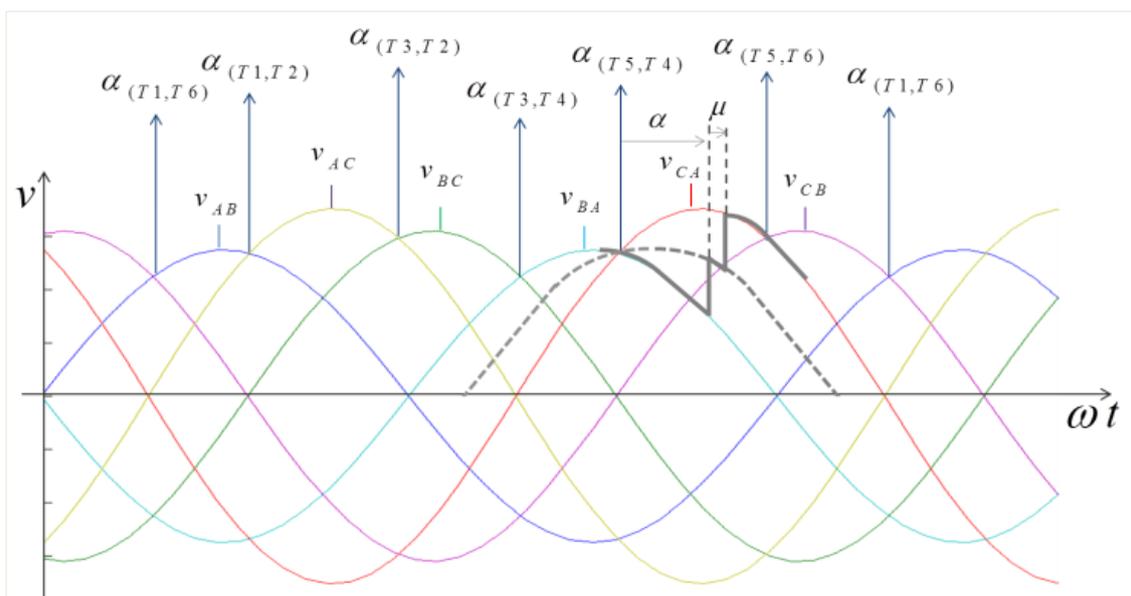


Figura D6 - Processo de comutação dos tiristores T3 e T5.

Da equação (31) chega-se a (32) que modela o valor da corrente i_c considerada, onde constante de integração K é determinada para a condição inicial do circuito associado:

$$K = \frac{\sqrt{2}.V_{CB}}{2.X_T}.\cos\alpha.$$

$$i_c = \frac{\sqrt{2}.V_{CB}}{2.X_T}.\left[\cos\alpha - \cos(\omega t + \beta)\right] \quad (32)$$

Ao final da comutação tem-se a corrente de carga modelada por (33).

$$I_d = \frac{\sqrt{2}.V_{CB}}{2.X_T}.\left[\cos\alpha - \cos(2.\pi - \beta + \alpha + \mu + \beta)\right] \quad (33)$$

O ângulo de comutação é definido por (34).

$$\mu = \cos^{-1}\left[\cos\alpha - \frac{2.X_T.I_d}{\sqrt{2}.V_{CB}}\right] - \alpha \quad (34)$$

Verifica-se que apenas o valor eficaz da tensão de linha aplicada nos tiristores em processo de comutação influencia no valor do ângulo de comutação. Analisando a comutação dos outros pares de tiristores chega-se a mesma conclusão.

5 Influência da Comutação no Valor Médio da Tensão para o Conversor Alimentado com Tensões Desequilibradas

A Figura D7 ilustra os gráficos das tensões de linha de alimentação do conversor considerado na Figura D1.

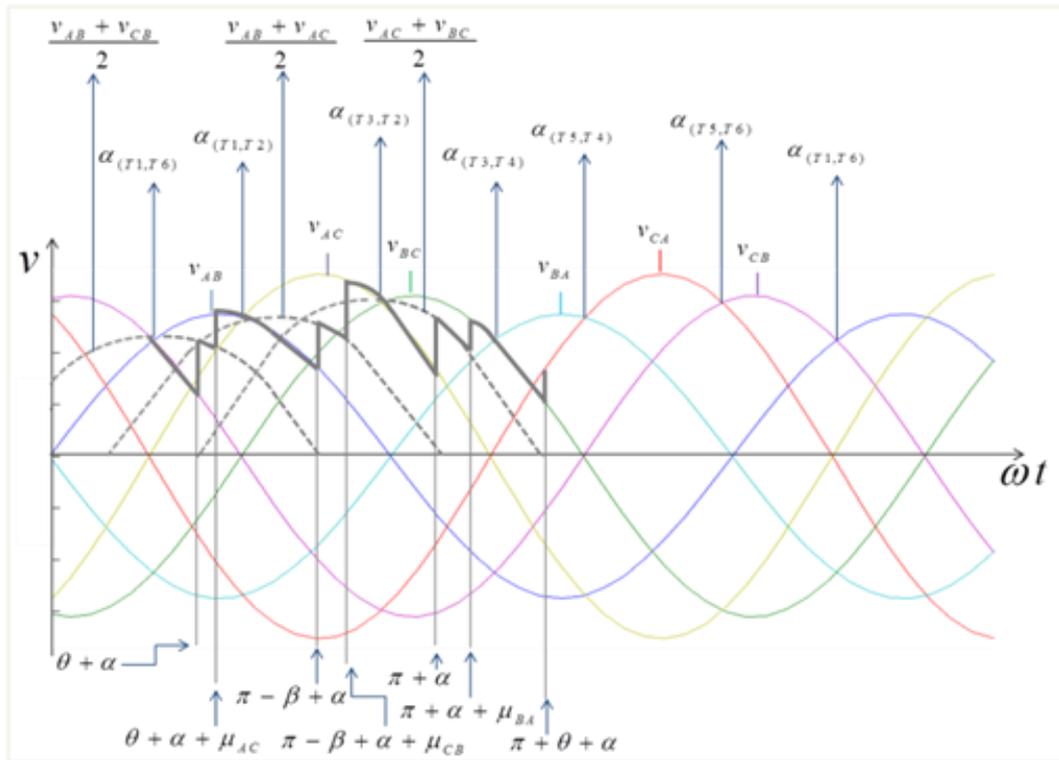


Figura D7 - Formas de onda das tensões de alimentação do conversor.

Para a determinação do valor médio da tensão de saída do retificador, algumas considerações são realizadas. O dado expresso por (35) para o cálculo do valor médio é definido pelos limites de condução que estão indicados na Figura D7.

$$\begin{aligned}
 T &= \pi - \beta + \alpha - \theta - \alpha + \pi + \alpha - \pi + \\
 &+ \beta - \alpha + \pi + \theta + \alpha - \pi - \alpha = \pi
 \end{aligned}
 \tag{35}$$

Desta forma, as equações que definem o comportamento das tensões envolvidas no cálculo do valor médio estão indicadas a seguir, e foram obtidas a partir da Tabela D1.

$$\begin{aligned}
 v_{AB} &= \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen} \omega t \\
 v_{AC} &= \sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot \text{sen}(\omega t - \theta) \\
 v_{BC} &= \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen}(\omega t - \pi + \beta) \\
 v_{CB} &= \sqrt{2} \cdot V_{CB} \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)
 \end{aligned}$$

Os ângulos de comutação nos períodos considerados são diferentes, pois dependem dos valores eficazes das tensões envolvidas no processo de comutação. Desta forma, têm-se (36), (37) e (38).

$$\mu_{BA} = \mu_{AB} = \cos^{-1} \left[\cos \alpha - \frac{2X_T \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot V_{AB}} \right] - \alpha \quad (36)$$

$$\mu_{AC} = \mu_{CA} = \cos^{-1} \left[\cos \alpha - \frac{2X_T \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot V_{AC}} \right] - \alpha \quad (37)$$

$$\mu_{CB} = \mu_{BC} = \cos^{-1} \left[\cos \alpha - \frac{2X_T \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot V_{BC}} \right] - \alpha \quad (38)$$

Com base nestas considerações, o valor médio da tensão no lado de corrente contínua do conversor é dado por (39), resultando em (40).

$$\begin{aligned} V_{d\alpha} = & \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{\theta+\alpha+\mu_{AC}}^{\pi-\beta+\alpha} \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen} \omega t \cdot d\omega t + \right. \\ & + \frac{1}{2} \int_{\theta+\alpha}^{\theta+\alpha+\mu_{AC}} \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen} \omega t \cdot d\omega t + \\ & + \left. \frac{1}{2} \int_{\theta+\alpha}^{\theta+\alpha+\mu_{AC}} \sqrt{2} \cdot V_{CB} \cdot \text{sen}(\omega t + \beta) \cdot d\omega t \right] + \\ & + \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{\pi-\beta+\alpha+\mu_{CB}}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot \text{sen}(\omega t - \theta) \cdot d\omega t + \right. \\ & + \frac{1}{2} \int_{\pi-\beta+\alpha}^{\pi-\beta+\alpha+\mu_{CB}} \sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot \text{sen}(\omega t - \theta) \cdot d\omega t + \\ & + \left. \frac{1}{2} \int_{\pi-\beta+\alpha}^{\pi-\beta+\alpha+\mu_{CB}} \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot \text{sen} \omega t \cdot d\omega t \right] + \\ & + \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_{\pi+\alpha+\mu_{BA}}^{\pi+\theta+\alpha} \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen}(\omega t - \pi + \beta) \cdot d\omega t + \right. \\ & + \frac{1}{2} \int_{\pi+\alpha}^{\pi+\alpha+\mu_{BA}} \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot \text{sen}(\omega t - \pi + \beta) \cdot d\omega t + \\ & + \left. \frac{1}{2} \int_{\pi+\alpha}^{\pi+\alpha+\mu_{BA}} \sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot \text{sen}(\omega t - \theta) \cdot d\omega t \right] \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned}
V_{d\alpha} = & \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \sqrt{2} \cdot V_{AB} \cdot [\cos(\theta + \alpha + \mu_{AC}) - \cos(\pi - \beta + \alpha)] \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V_{AB} \cdot [\cos(\theta + \alpha) - \cos(\theta + \alpha + \mu_{AC})] \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V_{CB} \cdot [\cos(\theta + \alpha + \beta) - \cos(\theta + \alpha + \beta + \mu_{AC})] \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \sqrt{2} \cdot V_{AC} \cdot [\cos(\pi - \beta + \alpha - \theta + \mu_{CB}) - \cos(\pi + \alpha - \theta)] \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V_{AC} \cdot [\cos(\pi - \beta + \alpha - \theta) - \cos(\pi - \beta + \alpha - \theta + \mu_{CB})] \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V_{AB} \cdot [\cos(\pi - \beta + \alpha) - \cos(\pi - \beta + \alpha + \mu_{CB})] \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \sqrt{2} \cdot V_{BC} \cdot [\cos(\beta + \alpha + \mu_{BA}) - \cos(\beta + \theta + \alpha)] \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V_{BC} \cdot [\cos(\beta + \alpha) - \cos(\beta + \alpha + \mu_{BA})] \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V_{AC} \cdot [\cos(\pi + \alpha - \theta) - \cos(\pi + \alpha - \theta + \mu_{BA})] \right\}
\end{aligned} \tag{40}$$

6 Utilização do Método das Componentes Simétricas para Análise do Efeito da Comutação

Um sistema trifásico de tensões de linha desequilibradas pode ser representado com auxílio da teoria de componentes simétricas por dois sistemas de tensões equilibradas, ou seja, um sistema de componentes de sequência positiva e um sistema de componentes de sequência negativa, dado que neste caso as componentes de sequência zero são nulas. As componentes de sequência positiva são compostas pelos fasores denominados $V_{AB(+)}$, $V_{BC(+)}$ e $V_{CA(+)}$, cujos módulos são iguais a $V_{(+)}$, estando defasados de 120° entre si. As componentes de sequência negativa são definidos pelos fasores $V_{AB(-)}$, $V_{BC(-)}$ e $V_{CA(-)}$ de módulos iguais a $V_{(-)}$, estando defasados de 120° a partir do fasor $V_{AB(-)}$, e possuindo sentido de rotação inverso ao do sistema de sequência positiva. Os módulos dos componentes de sequência positiva e negativa são definidos pelas equações (41) e (42), sendo $a = e^{j\frac{2}{3}\pi}$.

$$\dot{V}_{AB(+)} = \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{V}_{AB} + a \cdot \dot{V}_{BC} + a^2 \cdot \dot{V}_{CA} \right) \tag{41}$$

$$\dot{V}_{AB(-)} = \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{V}_{AB} + a^2 \cdot \dot{V}_{BC} + a \cdot \dot{V}_{CA} \right) \tag{42}$$

Admitindo o conversor em ponte trifásica alimentado com tensões de linha equilibradas,

com valor eficaz nominal V_N e operando com o ângulo de disparo α , o valor médio da tensão de saída $V_{d\alpha}$ é definido pela equação (43), onde se considera o efeito de comutação.

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35.V_N}{2} \cdot \left[\cos\alpha + \cos(\alpha + \mu_{V_N}) \right] \quad (43)$$

Ocorrendo um desequilíbrio das tensões de alimentação do conversor, o valor médio da tensão, considerando o efeito de comutação, pode ser calculado com auxílio da equação (40). E conforme será demonstrado algebricamente, o valor médio de tensão pode ser obtido de forma mais simples utilizando a equação (43), onde o valor eficaz da tensão de linha de alimentação V_N é substituído pelo valor eficaz da componente simétrica de sequência positiva $V_{(+)}$, e com o ângulo de comutação μ_{V_N} sendo substituído pelo ângulo de comutação $\mu_{V_{(+)}}$.

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35.V_{(+)}}{2} \cdot \left[\cos\alpha + \cos(\alpha + \mu_{V_{(+)}}) \right] \quad (44)$$

Sendo:

$$\mu_{V_{(+)}} = \cos^{-1} \left[\cos\alpha - \frac{2.X_T.I_d}{\sqrt{2}.V_{(+)}} \right] - \alpha. \quad (45)$$

7 Comprovação Algébrica

Será considerada uma ponte trifásica controlada conectada a uma rede elétrica de 13800 [V] através de um transformador (ilustrado na Figura D1), cujos dados estão indicados a seguir:

S_{TN} = Potência nominal = 1000 [kVA];

V_{1N} = Tensão primária nominal = 13800 [V];

V_{2N} = Tensão secundária nominal = 440 [V];

$Z\%$ = Impedância percentual = 10%

Assume-se que o retificador alimenta uma carga indutiva com uma corrente de carga $I_d = 1000$ [A]. Estando o conversor alimentado com tensões equilibradas e operando com um ângulo de disparo $\alpha = 30^\circ$, o valor médio da tensão sem considerar a queda de

tensão devido ao efeito de comutação será dado por:

$$V_{d\alpha(0)} = 1,35.440.\cos(30) = 514,42[V].$$

Assumindo a reatância do circuito equivalente do transformador, têm-se:

$$X_T = \frac{Z\%}{100} \cdot \frac{V_{2N}^2}{S_{TN}};$$

$$X_T = \frac{10}{100} \cdot \frac{440^2}{1000000} = 0,0194[\Omega].$$

O ângulo de comutação é dado por:

$$\mu = \cos^{-1} \left[\cos 30 - \frac{2 \cdot 0,0194 \cdot 1000}{\sqrt{2} \cdot 440} \right] - 30^\circ = 6,52^\circ.$$

O valor médio da tensão, considerando-se o efeito da comutação, pode ser calculado conforme a modelagem desenvolvida, fornecendo o valor:

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35.440}{2} \cdot [\cos 30 + \cos(30 + 6,52)] = 495,89[V].$$

A queda de tensão devido ao efeito de comutação para o conversor alimentado com tensões equilibradas é:

$$\Delta V_{d\alpha} = 514,42 - 495,89 = 18,53[V].$$

Admita a ocorrência de um desequilíbrio com os valores de tensões em $V_{AB} = 415 [V]$, $V_{BC} = 440 [V]$, $V_{CA} = 405 [V]$. Usando as equações (22) e (23), obtêm-se os argumentos dos fasores das tensões de linha, cujos valores são dados a seguir.

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{415^2 + 405^2 - 440^2}{2 \cdot 415 \cdot 405} \right] = 64,89^\circ$$

$$\beta = \cos^{-1} \left[\frac{415 - 405 \cdot \cos 64,89}{440} \right] = 56,46^\circ$$

Usando as equações (24), (25) e (26), obtêm-se os fasores que definem os valores das tensões de linha de alimentação do conversor conforme indicado a seguir.

$$\dot{V}_{AB} = 415 \angle 0^\circ [V]$$

$$\dot{V}_{BC} = 440 \angle -123,54^\circ [V]$$

$$\dot{V}_{CA} = 405 \angle -244,89^\circ [V]$$

Os ângulos de comutação devem ser calculados em função da tensão de linha aplicada no par de tiritores envolvidos no processo. Desta forma, obtêm-se os valores a seguir.

$$\mu_{AB} = \cos^{-1} \left[\cos 30 - \frac{2 \cdot 0,0194 \cdot 1000}{\sqrt{2 \cdot 415}} \right] - 30 = 6,88^\circ$$

$$\mu_{BC} = \cos^{-1} \left[\cos 30 - \frac{2 \cdot 0,0194 \cdot 1000}{\sqrt{2 \cdot 440}} \right] - 30 = 6,52^\circ$$

$$\mu_{CA} = \cos^{-1} \left[\cos 30 - \frac{2 \cdot 0,0194 \cdot 1000}{\sqrt{2 \cdot 405}} \right] - 30 = 7,03^\circ$$

Calculando o valor médio da tensão do retificador, obtém-se:

$$V_{d\alpha} = 472,65 [V].$$

O valor médio da tensão considerando-se o efeito da comutação pode ser também calculado com auxílio da abordagem via componentes simétricas, conforme indicado a seguir.

$$\mu_{V_{(+)}} = \cos^{-1} \left[\cos 30 - \frac{2.0,0194.1000}{\sqrt{2.419,73}} \right] - 30 = 6,81^\circ$$

$$V_{d\alpha} = \frac{1,35.419,73}{2} \cdot [\cos 30 + \cos(30 + 6,81)] = 472,20 [V]$$

Verifica-se que o valor médio da tensão calculado utilizando-se a componente de sequência positiva é praticamente igual ao valor calculado com auxílio da equação algébrica. Também é possível calcular o valor médio da tensão sem considerar o efeito de comutação. Neste caso, deve-se considerar:

$$\mu_{AB} = \mu_{AC} = \mu_{BC} = 0.$$

Obtendo-se:

$$V_{d\alpha(0)} = 491,21 [V].$$

A equação que utiliza a componente de sequência positiva também permite o cálculo do valor médio da tensão sem considerar o efeito de comutação. Neste caso tem-se:

$$\mu_{V_{(+)}} = 0.$$

Obtendo-se:

$$V_{d\alpha(0)} = 1,35.419,73.\cos 30 = 490,72 [V].$$

A queda de tensão devido ao efeito de comutação será:

$$\Delta V_{d\alpha} = 490,72 - 472,20 = 18,52 [V].$$

Portanto o desequilíbrio das tensões de alimentação do retificador em ponte trifásica tem pouca interferência na queda de tensão devido ao efeito de comutação, assumindo-se a mesma corrente de carga do sistema considerado.

Simulação Computacional

Para o exemplo algébrico descrito neste anexo foram realizadas simulações computacionais utilizando o MATLAB/Simulink, onde foram consideradas as seguintes situações:

- **Conversor alimentado com tensões equilibradas de valores iguais ao valor nominal:**

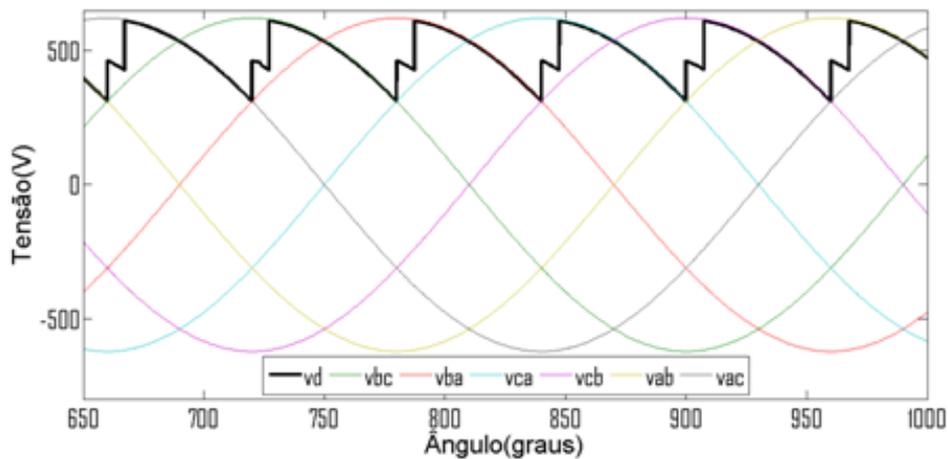


Figura D8 – Gráfico da tensão do lado de corrente contínua do conversor para $V_{ab}=V_{bc}=V_{ca}= 440(V)$, cujo valor médio resultante da simulação foi de $V_{d\alpha} = 488,3[V]$.

- **Conversor alimentado com tensões desequilibradas:**

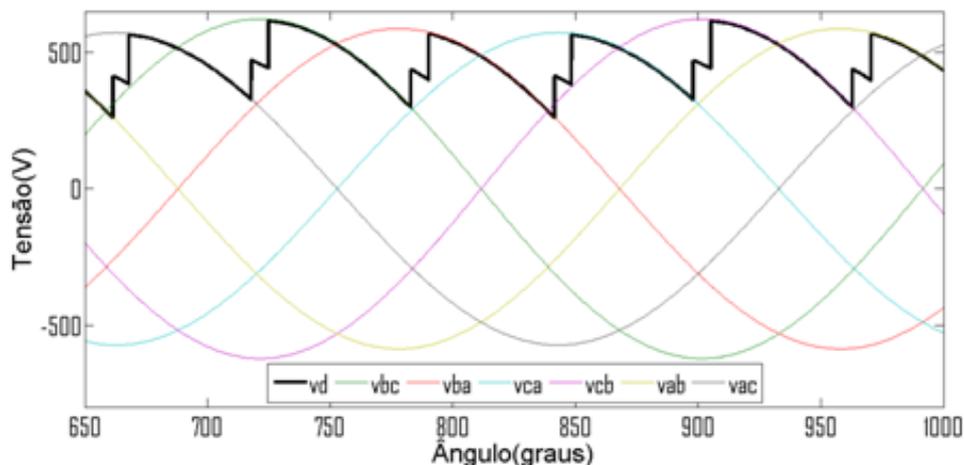


Figura D9 – Gráfico da tensão do lado de corrente contínua do conversor para $V_{ab}=415(V)$, $V_{bc}=440(V)$, $V_{ca}=405(V)$, cujo valor médio resultante da simulação foi de $V_{d\alpha} = 465,9[V]$.

- Conversor alimentado com tensões equilibradas de valores iguais a componente se sequência positiva:

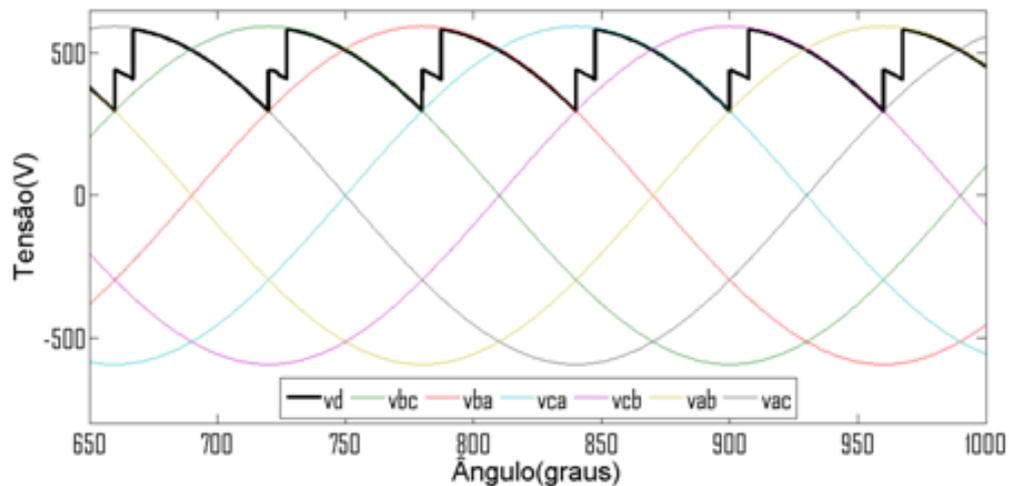


Figura D10 – Gráfico da tensão do lado de corrente contínua do conversor para $V_{ab}=V_{bc}=V_{ca}=419,73(V)$, cujo valor médio resultante da simulação foi de $V_{d\alpha} = 465,8[V]$.

A pequena diferença entre os valores médios da tensão no lado de corrente contínua calculados no exemplo de comprovação algébrica e os valores médios obtidos nas simulações, se deve a queda de tensão na reatância do transformador. A partir da análise dos resultados das simulações computacionais foi possível constatar a validade o método proposto.

Conclusão

Este estudo teve como objetivo principal analisar e equacionar o efeito da comutação no valor médio da tensão de saída em conversores ligados em ponte trifásica, quando os mesmos são alimentados com tensões desequilibradas. Também foi mostrado que a aplicação do método dos componentes simétricos possibilita uma modelagem como se o conversor fosse alimentado com tensões equilibradas. O desenvolvimento do trabalho resultou nas conclusões indicadas a seguir.

- Quando o conversor opera alimentado com tensões desequilibradas, o valor do ângulo de comutação não é o mesmo para todo o processo, mas depende do par de tiristores envolvidos no processo de comutação.

- Para mesma corrente de carga e ângulo de disparo, a comutação não depende do grau de desequilíbrio, mas apenas do valor eficaz da tensão de linha aplicada no par de

tiristores que participam do processo de comutação.

- Para os níveis de desequilíbrios que ocorrem usualmente em sistemas elétricos industriais, a redução do valor médio da tensão devido ao efeito de comutação é praticamente a mesma para o conversor operando com tensões equilibradas ou desequilibradas.

- O cálculo da queda de tensão devido ao efeito de comutação para o conversor alimentado com tensões desequilibradas pode ser feito supondo-se o conversor alimentado com tensões equilibradas de valor eficaz igual ao da componente de sequência positiva das tensões.