

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Proposição, Análise, Projeto e
Implementação Prática de
Um Novo Retificador Trifásico
com Elevado Fator de Potência**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica

Ewaldo Luiz de Mattos Mehl

Florianópolis, 1996.

**Proposição, Análise, Projeto e Implementação Prática de
Um Novo Retificador Trifásico com Elevado Fator de Potência**

Ewaldo Luiz de Mattos Mehl

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, especialidade Engenharia Elétrica, área de Sistemas de Energia, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.

Florianópolis, 31 de maio de 1996.

Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.
Orientador

Prof. Ênio Valmor Kassick, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.

Prof. Arnaldo José Perin, Dr. Ing.

Prof. Denizar Cruz Martins, Dr. Ing.

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr.

Prof. Domingos L. S. Simonetti, Dr.

Para Herley Mehl, meu pai, que nos deixou
tão cedo...

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ivo Barbi, pela orientação segura e competente durante todo o Curso de Doutorado e, em especial, durante todas as etapas de elaboração do trabalho de pesquisa que culminou nessa Tese.

Aos professores Arnaldo José Perin, Denizar Cruz Martins, Ênio Valmor Kassick, Hari Bruno Mohr e João Carlos dos Santos Fagundes, do Instituto de Eletrônica de Potência da UFSC, pelos ensinamentos adquiridos nas ocasiões em que tive o privilégio de ser seu aluno e pela amizade demonstrada durante minha permanência em Florianópolis.

Aos funcionários do Instituto de Eletrônica de Potência da UFSC Antônio Luis S. Pacheco e Luiz Marcellus Coelho, pelo auxílio e contribuições durante a montagem dos protótipos.

Aos colegas durante o Curso de Doutorado, professores Alexandre Ferrari de Souza (UFSC), Carlos Alberto Canesin (UNESP), Carlos Augusto Ayres (EFEI) e Henrique Antonio Carvalho Braga (UFJF), pela amizade e colaboração em várias ocasiões.

Aos colegas em várias disciplinas durante a fase de obtenção de créditos, Cézár André Pedersen, Everton Luiz Ferret dos Santos, Fernando Cardoso Castaldo, Gilberto Valentin Silva e Gilvani dos Santos Ferret, pela amizade e companheirismo durante este período.

Ao colega na Universidade Federal de Santa Catarina, Peter Mantovanelli Barbosa, que com satisfação terei agora como colega professor na Universidade Federal do Paraná, pelo auxílio nos trabalhos de laboratório e pela amizade demonstrada em várias ocasiões.

Ao Eng^o Paulo R. Gaidzinski, atualmente na empresa PHB ELETRÔNICA, pela ajuda prestada durante os trabalhos experimentais.

Aos colegas professores no Departamento de Eletricidade da Universidade Federal do Paraná, por terem assumido as aulas e demais tarefas que me caberiam, durante minha ausência de Curitiba e me incentivado a realizar o Curso de Doutorado.

Aos alunos do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, aos quais, em última análise, destinam-se os conhecimentos adquiridos.

Aos dirigentes da INDEL INDÚSTRIA ELETRÔNICA LTDA., pela colaboração na forma de componentes para a montagem do protótipo de 12 kW e em especial, ao seu funcionário Eng^o Claudiner Mendes de Seixas, pelo apoio e incentivo na fase de projeto.

À Universidade Federal do Paraná por ter permitido o afastamento de minhas atividades em Curitiba, tornando possível esse aperfeiçoamento e à CAPES, pelas bolsas recebidas e pelo auxílio para apresentação de trabalho em congresso no exterior.

Aos demais alunos, funcionários e bolsistas do Instituto de Eletrônica de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo apoio em diversas ocasiões e pela oportunidade de sua companhia.

Aos amigos que ganhei em minha permanência em Florianópolis, que me receberam com carinho e me ajudaram a suportar a ausência do lar.

À minha família, pelo estímulo e compreensão que sempre demonstraram em todos os passos da minha vida.

Sumário

	Página
Simbologia	v
Biografia do Autor	vii
Resumo	ix
<i>Abstract</i>	x
Apresentação	xi
 Capítulo 1: Histórico, Motivações e Revisão Bibliográfica	
1.1. Apresentação	1-1
1.2. Fundamentos Históricos	1-1
1.3. Fator de Potência em Cargas Lineares	1-3
1.4. Fator de Potência de Equipamentos Eletrônicos	1-5
1.5. Fator de Potência e a Qualidade do Sistema Elétrico.....	1-9
1.6. Normas Técnicas	1-11
1.7. Algumas Soluções para Elevação do Fator de Potência em Retificadores Trifásicos ...	1-14
1.7.1. Retificador Trifásico com Filtro Indutivo no Lado AC	1-14
1.7.2. Retificador Trifásico com Filtro Indutivo no Lado DC	1-16
1.7.3. Retificador Trifásico com Transformador Trifásico Auxiliar.....	1-17
1.7.4. Adição de um Conversor DC-DC operando com Corrente Descontínua	1-19
1.7.5. Retificador Trifásico com LITs.....	1-20
1.7.6. Retificador Trifásico com Três Interruptores Auxiliares.....	1-22
1.7.7. Retificador Trifásico com Modulação por Largura de Pulso.....	1-24
1.8. Conclusões.....	1-25
 Capítulo 2: Proposta de um Novo Retificador Trifásico	
2.1. Apresentação	2-1
2.2. Desenvolvimento do Novo Retificador Trifásico.....	2-1
2.3. Conclusões.....	2-5
 Capítulo 3: Análise Matemática	
3.1. Apresentação	3-1
3.2. Suposições Gerais.....	3-1
3.3. Estados Topológicos.....	3-2
3.4. Análise da “Etapa Ímpar”	3-5
3.5. Análise da “Etapa Par”	3-8
3.6. Um Circuito Monofásico Equivalente.....	3-13
3.7. Introdução da “Indutância Crítica”	3-18
3.8. Cálculo da “Indutância Crítica”.....	3-19
3.9. Análise Harmônica, Taxa de Distorção Harmônica e Fator de Potência	3-21

3.10. Comparação do Modelo Matemático com Resultados de Simulação	3-23
3.10.1. Obtenção de Parâmetros para Simulação de um Caso—Exemplo.....	3-23
3.10.2. Principais Resultados da Simulação	3-25
3.11. Conclusões.....	3-29
Capítulo 4: Equações e Considerações Adicionais para Projeto	
4.1. Apresentação	4-1
4.2. Implementação dos Interruptores Bidirecionais.....	4-1
4.3. Dados para Projeto	4-3
4.4. Tensão Média de Saída e Corrente Média na Carga	4-3
4.5. Dimensionamento dos Indutores de Entrada.....	4-3
4.6. Dimensionamento dos Componentes dos Interruptores Bidirecionais.....	4-5
4.7. Dimensionamento dos Diodos Retificadores	4-8
4.8. Considerações quanto aos Capacitores de Saída.....	4-10
4.9. Conclusões.....	4-11
Capítulo 5: Trabalhos Experimentais	
5.1. Apresentação	5-1
5.2. Projeto do Primeiro Protótipo.....	5-1
5.2.1. Tensão de Saída e Corrente Média para Potência Nominal.....	5-2
5.2.2. Indutores de Entrada	5-2
5.2.3. Componentes dos Interruptores Bidirecionais	5-3
5.2.4. Diodos Retificadores.....	5-5
5.2.5. Circuito para Geração dos Sinais de Comando dos Interruptores	5-5
5.2.6. Capacitores Eletrolíticos	5-7
5.3 Ensaio do Primeiro Protótipo.....	5-8
5.3.1. Ensaio com Potência Nominal e Ângulo de Condução fixo em 30°	5-8
5.3.2. Comportamento com Carga Variável e Ângulo de Condução Fixo	5-11
5.3.3. Utilização do Ângulo de Condução para Regulação da Tensão de Saída	5-12
5.4. Projeto do Segundo Protótipo.....	5-16
5.4.1. Tensão de Saída e Corrente Média para Potência Nominal.....	5-17
5.4.2. Indutores de Entrada	5-17
5.4.3. Componentes dos Interruptores Bidirecionais	5-18
5.4.4. Diodos Retificadores.....	5-19
5.4.5. Circuito para Geração dos Sinais de Comando dos Interruptores	5-19
5.4.6. Capacitores Eletrolíticos	5-19
5.5. Ensaio do Segundo Protótipo.....	5-20
5.5.1. Ensaio com Potência Nominal.....	5-21
5.5.2. Característica de Saída.....	5-22
5.5.3. Utilização do Ângulo de Condução para Regulação da Tensão de Saída	5-23
5.6. Conclusões.....	5-24

Capítulo 6: Discussão dos Resultados Experimentais	
6.1. Apresentação	6-1
6.2. Comparações com Soluções “Passivas”	6-1
6.3. Comparações com Soluções “Ativas”	6-2
6.3.1. Índice de Comutação	6-2
6.3.2. Comparação com o Retificador Trifásico associado a um Conversor DC-DC..	6-4
6.3.3. Comparação com o Retificador Trifásico com Três Interruptores e Modulação de Largura de Pulso.....	6-6
6.4. Conclusões.....	6-7

Capítulo 7: Conclusões Gerais

Referências Bibliográficas

Simbologia

1. Símbolos usados em expressões matemáticas

Símbolo	Significado	Unidade
α	Intervalo angular durante o qual os interruptores bidirecionais estão em estado de condução	°
ω	Frequência angular da rede de corrente alternada	rad/s
ω_n	Frequência angular da n-ésima componente harmônica da corrente	rad/s
π	3,141592654	
φ	Ângulo de defasamento da corrente em relação à tensão	°
φ_1	Ângulo de defasamento da primeira componente harmônica da corrente em relação à tensão	°
φ_n	Ângulo de defasamento da n-ésima componente harmônica da corrente em relação à tensão	°
$\eta(\%)$	Taxa de eficiência percentual	
ψ_{\max}	Índice de Comutação Máxima	
ψ_{med}	Índice de Comutação Média	
ψ_{rms}	Índice de Comutação Eficaz	
cos	Função trigonométrica co-seno	
f	Frequência da rede de corrente alternada	Hz
I	Amplitude da corrente alternada senoidal	A
$I(t)$	Função matemática da corrente elétrica no tempo	A
I_i	Valor eficaz da corrente alternada de entrada do retificador	A
$I_{\max(D)}$	Valor máximo da corrente que flui através de um dos diodos retificadores	A
$I_{\max(L)}$	Valor máximo da corrente que flui através de um dos indutores de entrada	A
$I_{\max(S)}$	Valor máximo da corrente que flui nos interruptores bidirecionais do retificador	A
I_o	Corrente média na carga, em corrente contínua	A
I_{rms}	Valor eficaz da corrente alternada	A
$I_{\text{rms}(1)}$	Valor eficaz da primeira componente harmônica da corrente	A
$I_{\text{rms}(C)}$	Valor eficaz da corrente que flui através de um dos capacitores de saída	A
$I_{\text{rms}(D)}$	Valor eficaz da corrente que flui através de um dos diodos retificadores	A
$I_{\text{rms}(L)}$	Valor eficaz da corrente que flui através de um dos indutores de entrada	A
$I_{\text{rms}(S)}$	Valor eficaz da corrente que flui nos interruptores bidirecionais do retificador	A
L	Indutância crítica do retificador	H
P	Potência média em corrente contínua; Potência eficaz em corrente alternada	W
Q	Potência reativa	var
R	Resistência	Ω
s	Variável fundamental no domínio da frequência complexa	
S	Potência aparente	V.A
sen	Função trigonométrica seno	

t	Tempo	s
T	Período de uma oscilação periódica	s
V	Amplitude da tensão alternada senoidal	V
$v(t)$	Função matemática da tensão no tempo	V
V_{cap}	Tensão média nos terminais do capacitor eletrolítico	V
V_i	Valor eficaz da tensão de linha (“fase—fase”) da rede trifásica em corrente alternada	V
$V_{max(D)}$	Valor máximo da tensão entre os terminais do diodo retificador durante o bloqueio	V
$V_{max(M)}$	Valor máximo da tensão entre os terminais <i>drain</i> e <i>source</i> do MOSFET durante o bloqueio	A
V_o	Tensão média sobre a carga, em corrente contínua	V
V_{rms}	Valor eficaz da tensão alternada	A
Z	Impedância	Ω

2. Símbolos usados para referenciar elementos em diagramas de circuitos

Símbolo	Significado
C	Capacitor
D	Diodo
L	Indutor
M	MOSFET
R	Resistor
S	Interruptor bidirecional
V	Fonte de tensão

3. Acrônimos e Abreviaturas

	Significado
AC	Corrente alternada (do inglês <i>alternate current</i>)
CAPES	Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CENELEC	<i>Commission Européen pour la Normalisation Eléctrique</i>
Cf.Eq.	Conforme a Equação
CI	circuito integrado
DC	Corrente contínua (do inglês <i>direct current</i>)
div.	Divisão
Eq.	Equação
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	<i>Isolated-Gate Bipolar Transistor</i>
INEP	Instituto de Eletrônica de Potência
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
PWM	<i>pulse width modulation</i>

rms	<i>root mean square</i> (valor eficaz)
TDD	taxa de distorção harmônica relativamente à máxima corrente de demanda
TDH	taxa de distorção harmônica de um sinal periódico
TELEBRÁS	Telecomunicações do Brasil S.A.
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

4. Símbolos de Unidades de Grandezas Físicas do SI (Sistema Internacional de Unidades)

Símbolo	Nome da Unidade
Ω	ohm
A	ampère
F	farad
H	henry
Hz	hertz
kg	quilograma
kW.h	quilowatt-hora
m	metro
rad/s	radianos por segundo
s	segundo
V	volt
W	watt

5. Símbolos de Unidades de Grandezas Físicas fora do SI, usados pela prática

Símbolo	Nome da Unidade
$^{\circ}$	grau trigonométrico

Biografia do Autor

EWALDO LUIZ DE MATTOS MEHL nasceu em Curitiba, Paraná, em 29 de fevereiro de 1956. Concluiu o Curso de graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná (UFPR) em 1980, tendo no mesmo ano começado a trabalhar na Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL), na área de manutenção de centrais hidrelétricas. Em 1982, aprovado em concurso público, começou a lecionar no Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao mesmo tempo em que, na COPEL, era transferido para o recém—criado Laboratório Central de Eletrotécnica e Eletrônica (LAC), centro de ensaios e pesquisas mantido sob convênio entre a UFPR e a COPEL, em Curitiba. No LAC, participou da montagem do Laboratório de Padrões Elétricos, destinado a aferição de instrumentos elétricos e chefiou o setor encarregado de ensaios em equipamentos de baixa tensão. No período de 1985 a 1986 licenciou-se de suas atividades na UFPR e na COPEL para realizar Curso de Pós-Graduação a nível de Mestrado na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), na área de Materiais Elétricos. A pesquisa que levou à dissertação de Mestrado teve como tema uma proposta de ensaio para envelhecimento acelerado de materiais dielétricos. Defendeu sua dissertação de Mestrado em julho de 1987, obtendo grau de Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais, através da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) da UFRJ. Em 1988 realizou um estágio técnico no *Institut de Recherche d'Hydro-Québec* (IREQ) em Montreal, Canadá e um curso de especialização em materiais semicondutores no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em Cambridge, EUA. Em março de 1989 desligou-se da COPEL e passou a atuar na UFPR em regime de dedicação exclusiva. Além das atividades didáticas junto ao Curso de Engenharia Elétrica, na UFPR coordenou trabalhos de pesquisa na área de simulação e projeto de dispositivos semicondutores integrados e chefiou projetos de integração Universidade—Indústria. A partir de março de 1992 licenciou-se novamente da UFPR, com o objetivo de realizar Curso de Doutorado na Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis, na área de Sistemas de Energia, trabalhando junto ao Instituto de Eletrônica de Potência (INEP), sob orientação do Prof. Dr. Ivo Barbi. Seu trabalho desenvolvido ali resultou em um novo circuito retificador trifásico, que foi objeto de Patente registrada junto ao INPI-BR em seu nome e do seu orientador. Em março de 1996, com o término do seu período de afastamento para Doutorado, reassumiu suas funções como professor no Curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Paraná em Curitiba.

Resumo

Este trabalho apresenta um novo circuito retificador trifásico, no qual emprega-se indutores de entrada e três interruptores semicondutores com característica de corrente bidirecional. A principal característica do novo circuito é apresentar Fator de Potência próximo à unidade e baixo valor da Taxa de Distorção Harmônica das correntes de entrada. É apresentada uma revisão sobre o Fator de Potência e sobre o comportamento dos retificadores trifásicos quando conectados ao sistema elétrico, bem como as principais alternativas até o momento existentes na literatura especializada sobre a correção do Fator de Potência de retificadores trifásicos. Através da análise do circuito, foi deduzido um conjunto de equações que descrevem o comportamento do novo retificador, comparando-se os resultados obtidos com resultados de simulações do circuito. Em seguida são apresentadas as equações para projeto, bem como a implementação prática de dois protótipos de laboratório usando-se o novo retificador. Os ensaios levados a efeito nos protótipos em laboratório confirmaram as previsões teóricas quanto ao desempenho do circuito proposto. Foi também detectado por meio de ensaios que o novo circuito permite a obtenção de tensão de saída regulada em uma ampla faixa de potência, através do controle do ângulo de condução dos interruptores bidirecionais.

Abstract

This work presents a new three-phase rectifier circuit, with input inductors and three semiconductor switches with bi-directional current characteristic. The main feature of the new circuit is to achieve Power Factor near to the unity and low Total Harmonic Distortion figure on the input currents. It is presented a revision on Power Factor and on the behavior of three-phase rectifiers when connected to the power system, as well as the main alternatives found on the specific literature on the subject of Power Factor Correction of three-phase rectifiers. Using circuit analysis a set of equation was derived, describing the circuit behavior and making possible a comparison with results obtained via circuit simulation. In sequence it is presented the design equations and the practical implementation of two laboratory prototypes, using the proposed circuit. Laboratory test on such prototypes confirmed the theoretical predictions on the performance of the new rectifier. It was also detected on the laboratory tests that the new circuit can achieve an output voltage regulation for a wide output power range, by means of controlling the conduction angle of the bi-directional switches.