



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

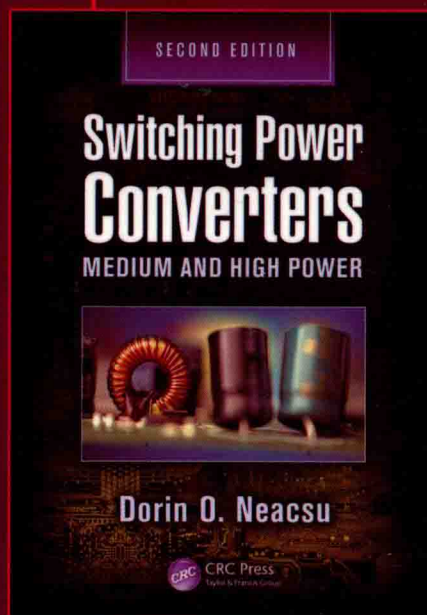
中大功率开关变换器 (原书第2版)

Switching Power Converters
Medium and High Power, Second Edition

[美] 多林 O. 内亚克苏 (Dorin O. Neacsu) 著
路秋生 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

中大功率开关变换器

(原书第2版)

[美] 多林 O. 内亚克苏 (Dorin O. Neacsu) 著
路秋生 译



机械工业出版社

Switching Power Converters, Second Edition/by Dorin O. Neacsu/ISBN: 9781466591929
Copyright © 2014 by CRC Press

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版, 版权所有, 侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2014-4865 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

中大功率开关变换器: 原书第 2 版/ (美) 多林 O. 内亚克苏著; 路秋生译.
—北京: 机械工业出版社, 2016. 11

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Switching Power Converters Medium and high Power (2nd Edition)
ISBN 978-7-111-54960-4

I. ①中… II. ①多…②路… III. ①大功率-开关-变换器 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 232664 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧

责任校对: 张 征 封面设计: 马精明

责任印制: 李 洋

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 32.25 印张 · 613 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-54960-4

定价: 139.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书对中大功率开关变换器系统的多学科方面进行了有关讨论,包括基本的电力电子技术、数字控制和硬件、传感器、模拟信号的预处理、保护器件和故障管理、脉冲宽度调制(PWM)算法、中大功率开关变换器等。

本书适合从事电力电子技术设计与制造的工程技术人员阅读,也可作为电气自动控制技术相关专业本科生和研究生的参考书。

译 者 序

作者 Dorin O. Neacsu 博士拥有罗马尼亚雅西科技大学的电子硕士和博士学位，并且拥有美国马萨诸塞州梅德福塔夫斯大学 (Tufts University) 著名戈登研究所的工程硕士管理硕士学位。目前是罗马尼亚雅西科技大学的副教授。

Dorin O. Neacsu 博士拥有在美国和加拿大多个大学、研究所和公司的工作经历。是 IEEE 高级会员，曾担任多个 IEEE 学报的评论员工作，并在不同 IEEE 会议的技术程序委员会或组织委员会担任委员。他的主要研究工作集中在静态功率变换器、功率半导体器件、PWM 算法、微处理器控制和功率变换器的仿真与建模。他拥有三项美国专利，在加拿大和罗马尼亚与同事合作写了几本大学教材，并著有《功率变换器的仿真建模》一书，在先进的栅极驱动器、同步热插拔、并联三相电源变换器和交错式功率变换器等工作领域做出了创新性的工作。他在电力电子技术设计、研究和管理方面拥有丰富的理论和实践经验。本书也是作者在电力电子技术领域工作的结晶。

电力电子技术在家电、电梯、交直流电机驱动控制、电机节能控制、风电和光电电能变换、电动汽车的驱动控制、电池充放电管理、电能质量管理（例如谐波治理、EMI 抑制）等应用场合都得到了广泛应用。不同的驱动控制策略、不同的变换器电路拓扑结构使电力变换的性能结果不一样。使用的器件（例如 MOSFET、IGBT、SiC 器件等）不一样，电力变换电路的功率范围不一样，电力变换电路的工作性能也不一样。驱动控制算法对电力电子电路的工作性能有很大的影响。同时，为了节省电力电子电路的设计时间和对所设计的电力电子电路性能预先有所了解，电力电子电路的计算机仿真也是个很重要的话题。而在本书中对以上问题都一一做出了详细的分析和讨论。

本书是作者所著《中大功率开关变换器》一书的第 2 版，由 CRC 出版社于 2013 年出版。

本书包含许多新的特点，针对原书第 1 版对以下的有关章节进行了改进。

- 1) 热管理和可靠性；
- 2) 智能功率模块 (IPM)；
- 3) AC-DC 和 DC-AC 电流源变换器；
- 4) 多电平变换器；
- 5) 以“开关网络”概念使用 IPM；
- 6) 功率半导体器件；

IV 中大功率开关变换器 (原书第2版)

7) 矩阵变换器;

8) 构建电力变换器的有关实用方面问题。

本书提供了功率电子技术最新的研究和技术发展信息,随着例如家电、航空、造船、汽车电子、工业电机驱动和可再生能源产品的电网接口等众多成功的实例,本书强调了功率电子封装技术的进步,跟踪了混合电路的发展,混合电路的发展使得能够在同一个封装内把控制电路和功率级封装在一起,并且本书从系统层面探讨了电路的可靠性设计。

机械工业出版社组织翻译出版了一系列从国外引进的优秀科技图书,目的是学习国外先进技术,促进国内相关行业的技术进步。译者很荣幸能够把这本优秀的科技图书介绍给国内同行,以期对他们的工作有所帮助。在翻译过程中得到了机械工业出版社给予的帮助和指导。在此,表示衷心的感谢。由于译者水平有限,错漏之处在所难免,敬请各位读者指正。

路秋生
2016年8月

原 书 前 言

电力电子技术是致力于电能变换的一个电子技术分支。这个变换包括适应多种应用的电能变换,如电源电压或电流的变换、电气传动、电力系统有源滤波、分布式发电和智能电网、电化学过程、感应加热、照明和烹饪控制、分布式发电和海军或汽车电子。这个很广泛的应用促进了其研究和开发,每天都有电力硬件新控制方法推出。中大功率变换器系统要求基本电力电子等多学科知识,例如数字控制和硬件、传感器、信号的模拟预处理、热管理、可靠性、保护装置和故障管理,或数学演算。

由于对同一概念有许多不同的技术解决方案,这使得执业工程师或学生跟踪新的发展或在给定的时间内找到最合适解决方案变得有点困难。这使得在开发一个推理问题的基础上,对系统层次的理解而不是针对百科全书收集的解决方案要更容易。这自然将问题从“如何做”变成了“如何做得更好”。因此,一个涉及工业活动的好工程师需要了解技术的演进、市场时机、元器件的可用性和技术的循环、社会环境和可靠性要求,所有这些都和经典的现代电路设计有关。图书馆和书店提供了大量关于电力电子技术的书籍,这些书籍没有太深入技术开发实践方面的内容,主要是一些侧重于理论性的学术教材。

其他出版物也提供了多种设计方案,这些设计方案被收录在百科全书式的手册中。给出了在工业界和学术界关注的边缘多学科知识的需要,并且给出了大量应用的各种技术资料,提供的这些技术应用资料往往超出了手册提供的范围。

相反地,本书提供了一个技术回顾,而不是各种设计步骤的集合。为读者提供了重要成就的历史信息,当今业界的预期,从激进到渐进式解决方案的技术演进,S曲线和技术开发周期内的技术成果,以及可靠性设计或标准的现代要求。所有这些使本书有别于图书馆书架上的书,本书以一个非常独特的技术视角看待电力电子系统技术。这样,开发的决策并非完全取决于对电路进行调查然后再做出决策,而需要考虑到许多其他技术相关的标准。

本书也可以被看成是一个中大功率变换器尖端领域以精确方式论述的技术文摘,有大量的实例和参考文献。从过去的25年中世界各地出版的众多论文、专利、研究报告中介绍的有关方法,大都是相关行业已被选定为技术演进的样本。在电力电子技术和性能的改进的每个话题都给予强调和公正评价,并证明其在电力电子技术史上的地位。这本书最重要的焦点是专用的PWM算法,希望本书很好地表达了这一概念。

VI 中大功率开关变换器 (原书第2版)

从简单的事实陈述到前沿研究课题,无须读者在电气工程或电力电子技术有很深的技术背景。在本书第1部分的章节结束部分留有有关问题以帮助读者提高学习效果。本书结合理论和实例,是作者多年来在不同大学教学的结果及作者大量来自工业“实践”的第一手经验。

本书首先概述了工作于中高功率工业电源变换器和功率半导体,介绍了包括市场的有关内容。在本书第2章简要对功率半导体技术回顾后,本书第3~5章通过对工作于脉冲宽度调制(PWM)的传统三相逆变器,定义了传统三相逆变器的基本工作。第6~10章结合许多实例,基于现有的工业平台主要介绍了有关具体实现的实际问题。本书第11~17章主要介绍来了其他特殊三相拓扑及有关控制。第14章介绍了一个在过去几年中已被更频繁使用,利用传统低功率变换器来实现更高的功率的解决方案。常用三相逆变器并联或交错运行有助于通过多个在市场上可以得到的低功率单元电路来提高变换器的功率容量。

最后,受益于IPM工作可靠性的提高和损耗的降低,本书第18章给出了未来采用开关网络的概念,给出了采用IPM作为构建模块的概念来构建新颖变换器拓扑结构有关研究课题的构思。作者相信开关网络概念可以代表当代电力电子从双极晶体管到集成电路的过渡,类似于20世纪70年代模拟电子技术过渡的年代。

本书涵盖了当代关心的三相中大功率DC-AC或AC-DC变换的相关主题,本书可以作为研究生的教材或作为业内工程师在工作中的参考书。

Dorin O. Neacsu

Iasi, Romania

和

Westford, Massachusetts

MATLAB®和Simulink®是MathWorks, Inc公司的注册商标。如需获得产品信息,请联系:

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760 - 2098 USA

Tel: 508 647 7000

Fax: 508 - 647 - 7001

E-mail: info@mathworks.com

Web: www.mathworks.com

致 谢

我感谢所有教授、经理和同事帮助我作为一名工程师的个人职业发展和在本书中知识的共享。他们在电力电子领域的领导能力和远见有助于描绘现代大功率开关变换器的前沿发展趋势，我希望本书能对新一代电力电子工程师产生积极影响。这是找到其他领导人物需要做的工作，并为他们答疑解惑，使产生积极的影响成为可能。

我很感谢 Mihai lucanu 和 Dimitrie Alexa 教授对我开始在罗马尼亚雅西科技大学学习和工作的鼓励和指导，本书许多研究成果源于在他们指导下的有关教育项目。特别感谢 Venkatachari Rajagopalan（加拿大）和 Frede Blaabjerg（丹麦）教授引导我到了 IEEE 和高度竞争的现代技术世界。

我感谢所有美国工业界的同事，他们是德尔福汽车公司的 Kaushik Rajashekara、James Walters、T. V. Sriram、Fani Gunawan 和 Balarama Murty；国际整流器（IR）公司的 Toshio Takahashi、David Tam、Brian Pelly、HuaHuu Nguyen 和 Eric Person；美国赛康科技有限公司的 Ted Lesster、Bogdan Borowy、William Bonnice、Geoffrey Lansberry 和 Evgeny Humansky；Azure Dynamics/Solectria 公司的 James Worden、Viggo Selchau - Hansen、Lance Haines、Beat Arnet、Lu Jiang 和 Don Lucas。

作者简介

Dorin O. Neacsu, PhD (IEEE M95, SM00) 分别于1988和1994在罗马尼亚雅西科技大学获得电子学硕士和博士学位。Neacsu博士还拥有美国马萨诸塞州梅德福塔夫斯大学 (Tufts University) 著名戈登研究所的工程管理硕士学位。

Neacsu博士在罗马尼亚雅西科技大学的TAGCM-SUT从1988年到1990年度过了他的强制性工业试用期。并在1990~1999年,在罗马尼亚的雅西科技大学电子系任副教授。在这期间,他还是位于加拿大Trois河畔的魁北克大学、美国通用汽车/德尔福、印第安纳波利斯、印第安娜的访问学者。Neacsu博士从1999年8月至2006年6月在美国工业界持有不同的位置(咨询顾问、工程师、产品经理),分别在国际整流器(IR)公司、Satcon技术公司和Azure Dynamics/Solectria公司工作过。他在先进的栅极驱动器、同步热插拔、并联三相电源变换器和交错式功率变换器等工作领域做出了创新性的工作。自2006年8月后,Neacsu博士在多个美国学术机构,包括新奥尔良大学、麻省理工学院和美国联合技术研究中心作访问学者或做短期工作。目前,Neacsu博士是罗马尼亚雅西科技大学的副教授。

Neacsu博士已在IEEE学报、会议和其他的国际期刊发表过80多篇论文和研究报告,并在各大洲举办的IEEE会议做了7场技术报告。他拥有三项美国专利,在加拿大和罗马尼亚与同事合作写了几本大学教材,并著有《功率变换器的仿真建模》一书。Neacsu博士是IEEE高级会员,曾担任多个IEEE学报的评论员,并在不同IEEE会议的技术程序委员会或组织委员会担任委员。他的主要研究工作集中在静态功率变换器、功率半导体器件、PWM算法、微处理器控制和功率变换器的仿真与建模。

目 录

译者序

原书前言

致谢

作者简介

第 1 章 中大功率开关变换器简介	1
1.1 中大功率变换器市场	1
1.1.1 技术现状	1
1.1.2 交通电气化系统	3
1.1.3 传统工业中的应用	5
1.2 本书主要内容	6
1.3 可调速驱动器	8
1.3.1 AC-DC 变换器	8
1.3.2 中间电路	9
1.3.3 直流电容器组	9
1.3.4 软充电电路	10
1.3.5 直流电抗器	10
1.3.6 制动电路	10
1.3.7 三相逆变器	11
1.3.8 保护电路	11
1.3.9 传感器	11
1.3.10 电动机的连接	11
1.3.11 控制器	12
1.4 电网接口或分布式发电	13
1.4.1 电网谐波	14
1.4.2 功率因数	14
1.4.3 直流电流注入	14
1.4.4 电磁兼容性和电磁干扰	15
1.4.5 频率和电压变化	16
1.4.6 低压电网的最大连接功率	16
1.5 多变换器电力电子系统	16
1.6 总结	18
参考文献	18

第 1 部分 传统功率变换器

第 2 章 大功率半导体器件	20
2.1 功率半导体市场现状	20
2.2 功率 MOSFET	23
2.2.1 工作原理	23
2.2.2 控制	29
2.3 IGBT	30
2.3.1 工作原理	30
2.3.2 控制及栅极驱动	34
2.3.3 保护	39
2.4 功率损耗估算	41
2.5 有源栅极驱动电路	42
2.6 GTO 晶闸管	45
2.7 先进功率器件	45
2.7.1 特种器件	45
2.7.2 高频、高电压器件	46
2.7.3 采用新基板材料的器件	47
2.8 数据手册信息	48
问题	50
参考文献	50
第 3 章 基本三相逆变器	53
3.1 用作简单开关的大功率器件	53
3.2 逆变器引脚与感性负载工作	54
3.3 什么是 PWM 算法	56
3.4 基本三相电压源逆变器的工作原理与功能	60
3.5 性能指标的定义和在不同国家使用的术语	65
3.5.1 频率分析	66
3.5.2 三相变换器的调制指数	67
3.5.3 性能指标	67
3.6 利用逆变器波形直接计算谐波频谱	70
3.6.1 准矩形波形分解	70
3.6.2 矢量法	71
3.7 三相逆变器的预编程 PWM	72
3.7.1 用于单相逆变器的编程 PWM	72
3.7.2 用于三相逆变器的编程 PWM	75
3.7.3 二进制编程的 PWM	76
3.8 三相逆变器的开关函数建模	77

3.9 电动机驱动电源变换器中的制动脚	78
3.10 AC-DC-AC 电源变换器中的直流母线电容器	79
3.11 总结	81
问题	82
参考文献	82
第4章 基于载波的 PWM 和工作限制	84
4.1 载波 PWM 算法: 历史的重要性	84
4.2 改进基准信号基于载波的 PWM 算法	88
4.3 压/频驱动中使用的 PWM: 根据要求的电流谐波系数选择脉冲数	92
4.3.1 工作于低频范围	92
4.3.2 工作于高频范围	94
4.4 采用载波 PWM 实现谐波抑制	94
4.5 工作限制: 最小脉冲宽度	96
4.5.1 利用谐波注入避免脉冲下降	101
4.6 工作限制	106
4.6.1 死区时间	106
4.6.2 零电流钳位	110
4.6.3 过调制	110
4.7 总结	112
问题	112
参考文献	113
第5章 用于基本三相逆变器的矢量 PWM	115
5.1 空间矢量理论回顾	115
5.1.1 概念的历史和演变	115
5.1.2 理论: 矢量变换和优势	116
5.1.3 三相控制系统的应用	119
5.2 三相逆变器的矢量分析	120
5.2.1 在复平面 6 步工作电流空间矢量轨迹的数学推导	120
5.2.2 磁通矢量和理想磁通轨迹的定义	124
5.3 SVM 理论: 通过有源和零状态平均时间间隔的推导	125
5.4 自适应 SVM: 直流纹波补偿	127
5.5 连接到矢量控制: 在 (d, q) 坐标系中不同形式和时间间隔方程表达式	127
5.6 开关基准函数的定义	130
5.7 开关序列的定义	133
5.7.1 连续基准函数: 不同的方法	133
5.7.2 用于降低开关损耗的不连续基准函数	136
5.8 不同矢量 PWM 之间的比较	143
5.8.1 损耗特性	143

XII 中大功率开关变换器 (原书第2版)

5.8.2 THD/HCF 的比较	143
5.9 SVM 的过调制	144
5.10 PWM 逆变器的 V/Hz 控制	145
5.10.1 低频工作模式	146
5.10.2 高频工作模式	147
5.11 改善高速变换器的瞬态响应	148
5.12 总结	154
问题	155
参考文献	156
第6章 构建三相功率变换器的实践	159
6.1 三相逆变器中功率器件的选择	159
6.1.1 电动机驱动	159
6.1.2 电网应用	159
6.2 保护	160
6.2.1 过电流保护	160
6.2.2 熔断器保护	163
6.2.3 过温度保护	167
6.2.4 过电压保护	167
6.2.5 缓冲电路	168
6.2.6 栅极驱动器故障	176
6.3 系统保护管理	176
6.4 通过逆变器技术降低共模 EMI	177
6.5 取决于功率等级的传统逆变器典型构建结构	180
6.5.1 功率半导体器件的封装	181
6.5.2 变换器的封装	183
6.5.3 外壳	183
6.6 辅助电源	185
6.6.1 技术要求	185
6.6.2 用于电源的集成电路	186
6.6.3 反激式开关电源变换器的工作	188
6.7 总结	190
问题	190
参考文献	191
第7章 热管理与可靠性	193
7.1 热管理	193
7.1.1 理论	193
7.1.2 瞬态热阻抗	195
7.2 可靠性和寿命定义理论	198

7.3 故障和寿命	200
7.3.1 系统故障率	200
7.3.2 器件故障率	200
7.3.3 用于电力电子系统不同元器件的失效率	202
7.3.4 功率半导体器件的故障模式	203
7.3.5 功率半导体器件的损耗机制	203
7.4 寿命计算与建模	204
7.4.1 问题的提出	204
7.4.2 电子设备的加速测试	205
7.4.3 物理故障建模	210
7.5 标准和软件工具	210
7.5.1 标准	210
7.5.2 软件工具	211
7.6 半导体厂商的可靠性测试	213
7.7 可靠性设计	213
7.8 总结	214
参考文献	215
第8章 PWM 算法的实现	218
8.1 模拟 PWM 控制器	218
8.2 混合工作模式电动机控制器集成电路	220
8.3 计数器的数字结构: FPGA 实现	221
8.3.1 数字 PWM 控制器工作原理	221
8.3.2 总线兼容的数字 PWM 接口	224
8.3.3 SVM 控制器的 FPGA 实现	225
8.3.4 死区时间数字控制器	228
8.4 通用和专用数字处理器市场	228
8.4.1 在功率变换器控制中使用微处理器/微控制器的历史	228
8.4.2 用于功率变换器控制的 DSP	231
8.4.3 多处理器结构的并行处理	233
8.5 低成本微控制器的软件实现	234
8.5.1 计数器定时的软件控制	234
8.5.2 时间间隔常数计算	234
8.6 有功率变换器接口的微控制器	239
8.7 电动机控制协处理器	240
8.8 在 TI 公司的 DSP 中使用事件管理器	240
8.8.1 事件管理器结构	240
8.8.2 载波 PWM 的软件实现	241
8.8.3 SVM 的软件实现	242

8.8.4 SVM 的硬件实现	243
8.8.5 死区时间	245
8.8.6 每个 PWM 通道	245
8.9 使用闪存	246
8.10 PWM 实现的分辨率和精度	248
8.11 总结	250
参考文献	251
第9章 闭环控制的实际应用	253
9.1 作用和原理图	253
9.2 电流测量——与 PWM 同步	253
9.2.1 并联电阻	253
9.2.2 霍尔传感器	255
9.2.3 电流互感器	256
9.2.4 同步 PWM	256
9.3 电流采样率——过采样	257
9.4 (a, b, c) 坐标系中的电流控制	258
9.5 电流变换 $(3 \rightarrow 2)$ 变换的软件计算	260
9.6 (d, q) 坐标系中的电流控制 - 模型 - PI 校准	261
9.7 抗饱和保护——输出限制和范围定义	263
9.8 总结	263
参考文献	264
第10章 IPM	265
10.1 市场和技术考虑	265
10.1.1 历史	265
10.1.2 优点和缺点	266
10.1.3 IGBT 芯片	267
10.1.4 栅极驱动器	268
10.1.5 封装	269
10.1.6 其他方法	270
10.2 IPM 可用性的审查	270
10.3 IPM 器件的使用	273
10.3.1 本地电源	273
10.3.2 再生能量钳位	276
参考文献	276

第2部分 其他拓扑结构

第11章 谐振三相变换器	278
11.1 通过谐振与先进 PWM 器件降低开关损耗	278

11.2 是否还会从谐振大功率变换器中得到好处	280
11.3 IGBT 器件的零电压过渡	283
11.3.1 工作于 ZVS 的功率半导体器件	283
11.3.2 降压变换	286
11.3.3 升压功率变换	289
11.3.4 双向功率传输	292
11.4 IGBT 器件的零电流过渡	293
11.4.1 工作于零电流开关的功率半导体器件	293
11.4.2 降压变换	295
11.4.3 升压变换	297
11.5 准谐振变换器的可能拓扑结构	300
11.5.1 极电压	300
11.5.2 谐振直流总线	300
11.6 三相谐振变换器专用 PWM	302
问题	302
参考文献	302
第 12 章 元器件小型化的三相功率变换器	304
12.1 减少元器件数量的解决方案	304
12.1.1 新逆变器拓扑结构	304
12.1.2 直接变换器	307
12.2 B4 逆变器	308
12.2.1 B4 逆变器的矢量分析	308
12.2.2 对 B4 逆变器 PWM 算法的定义	313
12.2.3 直流电压变化的影响和相应的补偿方法	314
12.3 用于两相感应电动机的馈电两引脚变换器	317
12.4 Z 源逆变器	318
12.5 总结	320
参考文献	321
第 13 章 基于三相电压源变换器的 AC-DC 电网接口	322
13.1 特性-控制目标-有功功率控制	322
13.2 控制系统中 PWM 的意义	326
13.2.1 单开关应用	326
13.2.2 6 开关变换器	335
13.2.3 有电流注入器件的拓扑	340
13.3 闭环电流控制法	343
13.3.1 简介	343
13.3.2 PI 电流环	343
13.3.3 瞬态响应时间	344