



WILEY

电力电子学

电力电子学 与能源变换系统 ——概论与硬开关变换器

Power Electronics and Energy Conversion Systems
Volume 1 Fundamentals and Hard-switching Converters

【以色列】 Adrian Ioinovici 著

刘鹿生 吕建勋 弭寒光 等译
袁海文 刘鹿生 审校

Power Electronics and Energy Conversion Systems
Volume 1 Fundamentals and Hard-switching Converters



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·电力电子学

电力电子学与能源变换系统

——概论与硬开关变换器

Power Electronics and Energy Conversion Systems

Volume 1 Fundamentals and Hard-switching Converters

[以色列] Adrian Ioinovici 著

刘鹿生 吕建勋 弭寒光 译
郭鑫 刘桂良 黄操

袁海文 刘鹿生 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要讲述电力电子学与能源变换的相关知识,包括理论、设计和应用,涉及基本知识、应用实践、电路设计和最新发展。阐述电力电子学的关键内容,从基本元器件及其工作原理,到当前经典的硬开关与软开关 DC-DC 变换器、整流器和逆变器。全书共分 4 章:第 1 章简要阐述能源变换的主要内容;第 2 章集中于开关型变换器建模的综合研究;第 3 章详细讨论了硬开关变换器,电压驱动与电流驱动的推挽,半桥和全桥变换器等器件;第 4 章主要讲述电流倍加、三倍与倍增整流器,电压倍加与倍增整流器。每章的内容都是逐步提高难度的,同时章末给出该章的小结和习题及答案。

本书可用于电气工程专业电力电子方向本科生、研究生教学或参考用书,也可供工业领域从事电力电子技术应用及微电子技术的工程技术人员作为参考资料。

Power Electronics and Energy Conversion Systems, Volume 1 Fundamentals and Hard-switching Converters, 9780470710999, Adrian Ioinovici

©2013, John Wiley & Sons. Ltd.

All rights reserved.

AUTHORIZED TRANSLATION OF THE EDITION PUBLISHED BY JOHN WILEY & SONS, LTD., NEWYORK., Chichester, Weinheim, Singapore, Brisbane, Toronto.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社, 中文版权属于 John Wiley & Sons, Ltd 和电子工业出版社共有。未经许可, 不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2014-7992

图书在版编目(CIP)数据

电力电子学与能源变换系统: 概论与硬开关变换器/(以)阿德里安·约伊诺维奇(Adrian Ioinovici)著; 刘鹿生等译. —北京: 电子工业出版社, 2017. 1

(经典译丛. 电力电子学)

书名原文: Power Electronics and Energy Conversion Systems, Volume 1 Fundamentals and Hard-switching Converters
ISBN 978-7-121-30166-7

I. ①电… II. ①阿… ②刘… III. ①电力电子学 ②开关-变换器 IV. ①TM1②TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 252965 号

策划编辑: 杨 博

责任编辑: 李秦华

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 39 字数: 998 千字

版 次: 2017 年 1 月第 1 版

印 次: 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 118.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: yangbo2@phei.com.cn。

译者序

过去的 20 多年,以功率 MOSFET 和 IGBT 为基础的新一代电力电子技术,亦称功率电子技术,其应用范畴从传统的电机传动、金属冶炼等迅猛地开拓和扩展到消费电子设备、汽车电子系统、智能电网、航空航天和船舶等几乎所有的工业领域。

在此期间,全球又面临能源短缺,许多国家,包括我国都制订了以节能为重要的国策之一。据估计,世界上超过 50% 的用电量是通过功率器件来控制的,而控制这些功率器件的正是本书的主题:电力电子技术。又据估计,美国如果按 2009 年的用电水准发展,20 年后需要增加大约 50% 的电能;如果充分利用和发挥功率器件及其应用技术的话,届时需要的电能不但不需要增加,反而可以减少。不管其预测的精度如何,电力电子技术(包括它应用的功率器件)的作用及其潜能是不应低估的。还有未来学专家预测,再次工业革命将以信息互联网和能源互联网(智能电网)的融合为特征,现在是在等待能源互联网(智能电网)的成长和壮大。

但是,2012 年前还几乎没有一本针对近 20 年来以电力电子新技术发展前沿为主题的综合性教科书或参考书。

以色列霍龙工学院(Holon Institute of Technology)院长,中山大学信息科学与技术学院国家“千人计划”特聘专家,Ioinovici 教授在 DC-DC 变换器、开关电容变换器与逆变器、软开关变换器、全桥与多电平变换器等电力电子学方面的学术研究处于世界领先地位。曾担任 IEEE CASS 电力电子和电力系统技术委员会主席、IEEE Transactions on Power Electronics 副主编、多次担任 IEEE ISCAS 和 PESC 会议的主席或技术委员会委员。

本书是软开关变换器的基础,包括理论、设计和应用。其阐述由浅入深,由入门基本知识到技术开发前沿的探索。对现代电力电子电路中开关的复杂又常被忽略的瞬态工作过程、性能和影响做了详细、深入的阐述和探讨;强调对能源变换器的开发和选择的第一要求是效率;对各种电路的详细分析都给出周密的设计思路和最复杂实际情况的处理;对相同要求的各种解决方案进行比较,以便于对各种应用选取最合适方案思路的理解。

我国第十二个五年规划中,重点支持和发展的七大战略性新兴产业之一的“新一代信息技术产业”的基础和关键支撑技术是电力电子器件(亦称功率电子器件)、半导体集成电路和光电器件,其中电力电子器件(包括其应用技术)是首次列入国家五年发展规划的。因此,该书除了作为本学科综合性、系统性的教材外,对现代电力电子技术不太熟悉的相关学者、研究生、科技人员来说还是亟需的补充读物或案头参考书。

为了让本书尽快和读者见面,由原国家科委主持的“电力电子技术发展战略研究软课题组”成员,退休后担任“北京电力电子学会”秘书长和《电力电子》期刊主编的刘鹿生研究员推荐和翻译第 1 章,由北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院袁海文教授、博导,负责总审校和组织、指导后三章的翻译。其中吕建勋博士翻译第 2 章,弭寒光、郭鑫博士翻译第 3 章,刘桂良硕士翻译第 4 章。另外,吕建勋协助统一汇总,刘鹿生协助审校。鉴于译者水平有限,翻译中难免有疏漏和欠佳之处,望读者赐教和见谅。

前 言

20 世纪的最后 10 年和 21 世纪的第一个 10 年,见证了电力电子电路的惊人发展和它们几乎扩展到我们生活的每一个领域:从消费电子和光电技术到航空航天和太空探索,从绿色能源到国防和交通运输行业。这些现代的能量变换系统从极低功耗的便携式电子装置到大功率的电气传动设备,覆盖了广阔的应用领域。节能意识更推动它为高效能量变换电路的探索进行持续的研究和创新。

上述多样性的应用需要广泛地使用电力电子技术。为此,研究人员开发了具有不同特点的新的变换器和逆变器。在越来越多的专业期刊和国际专业会议上发表的论文数量不停地增长。大量的多样化的新概念和解决方案已通过这些论文传播。

但是,近年来图书界对待电力电子的现代发展仍持谨慎态度。类似 1990 年之前出版的图书,它们主要阐述变换器和逆变器的基本知识。而本书注重阐述现代的主题——诸如软开关,开关电容和开关电感功率电路,具有直流增益大的电源,单级功率因数校正器,在高温和辐射等恶劣环境中工作的变换器,用集成电路(IC)技术在芯片上实现电源等。如果其中任何一项能用 IC 实现,都是很薄的。也许没有其他的技术领域出现这种具有大量的现代研究成果却没有多少人的成果形成专著书籍之间的矛盾。

今天,能源变换是任何严谨的电气和电子工程大学主修的课程。选修电力电子技术课程的本科生、研究生的数量,博士生、研究人员数量和专业水平,以及电子变换器设计师的数量一直没有停止增长。可是,遗憾的是,市场上现有的书籍未能提供所需要的知识,那些有兴趣者只能通过众多期刊中的论文和公司的应用手册来搜索。

本书是一本电力电子学的综合教科书,覆盖理论、设计和应用,从基础知识开始到最新发展。它可以作为 21 世纪第二个 10 年伊始的电力电子学的现代技术,作为进一步开发与应用的文献与书目库。

第 1 章从能量变换主题的概况开始:DC-DC 变换的原理,AC-DC 整流器,DC-AC 逆变器,开关电容、准谐振、谐振变换器,软开关,PWM(脉宽调制)和开关频率控制。该章还简要阐述了电力电子电路的组成,特别关注新技术的发展,如碳化硅或砷化镓半导体开关,纵向结构的功率晶体管,单片(芯片)的电感器和超级电容器。在此概况性的章节中甚至还讨论了实践方面的状况,例如用于大电流应用的驱动晶体管的达林顿方案,为了控制晶体管的开启/关闭速度使用图腾对的栅极驱动电路,用于驱动高侧晶体管的自举电路,计算机电源用的同步整流器。还包括商业上提供的相关元器件的性能图表。

第 2 章是对开关型变换器建模的全面研究。除了降阶状态空间平均方程和平均 PWM 开关模型,这一部分的所有资料不会在其他的书籍中完全找到。考虑到电感电流动态,导出了工作在连续和断续模式的基本 PWM 变换器的全阶模型。还导出了零电流开关和零电压开关的降压,升压和降压-升压准谐振变换器的模型和开环小信号传递函数,并和以前未发表的这些电路模型进行比较。

第 3 章详细地讨论了传统硬开关的降压,升压,降压-升压,SEPIC,Ćuk, Zeta,以及电压驱动和电流驱动推挽式,半桥和全桥变换器。理论处理从连续和断续工作模式的基本分析开

始,首先忽略寄生损耗,随后再做更准确的考虑。在此讨论了通常不能在现有图书中找到的主题: SEPIC, Ćuk, Zeta 转换器的断续电容器电压模式和实际的断续电感器电流模式及其在功率因数校正器中的应用; SEPIC, Ćuk, Zeta 转换器的交流小信号模型; 寄生电阻实际对直流电压增益影响的研究(输出电流的纹波,电容器的等效串联电阻引起的纹波,电容器的等效串联电感引起的纹波,为负载阶跃响应需要的停顿时间)。其他特定的科目包括正向变换器的磁芯复位策略,如第三变压器绕组,有源和无源谐振箝位电路或双晶体管技术。同样,用不同的技术论述耦合电感器的泄漏电感对反激变换器的影响。

指出了以前对上述变换器的设计的误解和错误: 深入的理论分析可以找到精确的方法来解释其为断续导通模式工作设计的效率值。在通常的实际技术参数下,全桥变换器无法进入断续导通模式。

变换器的许多数据范例研究,提供了完整的设计。但是,为了让学生能应用于实际需求和可选择的现实元件,以本书给出的公式为依据,添加和计算出了来自工业应用的案例。

第4章的内容在当前的图书市场上几乎难以找到。以电流倍加器、三倍器和多倍整流器的介绍开始,以及电压倍加器、多倍整流器,诸如 Greinacher、Cockroft-Wolton 或 Fibonacci 开关电容电路,它是为对高直流电压增益变换器做进一步研究的读者准备的。这些最新的变换器是用做电网前端的环保能源,或现代电信或汽车产业。分析和比较了一些特殊的变换器,如 Z 源降压-升压,间插(interleave)降压-升压和升压-降压,具有简单降压型控制规律的递升 KY, Watkins-Johnson 或 Sheppard-Taylor 变换器,并且指出了它们的优点和缺点。由于电压调节模块(VRM)以前作为计算机电源的重要性,在一个单独部分讨论了中心抽头电感降压和升压变换器。在高输入电压的应用方面,研究了来自具有低电压应力开关的全桥变换器的复杂结构,包括隔离三电平电压驱动变换器和非隔离三电平升压变换器。还有经常用于单相离线功率因数校正器。最后一部分探讨了中心抽头电感器的易控电流驱动的双桥转换器。

从教学的角度而言,每章的内容都是逐步提高难度的。本书开始于最基本的、最简单的阐述,接着一步一步地推导所有的方程式,对以前没有电力电子学知识基础的读者都可以理解。随后再做更精确的讨论,直到最复杂的实际问题。每章最后一节,都提示有要点和习题,便于读者学习。

本书第1章本身可成为一个独立单元,为任何选修电子学课程的大学生作为电力电子学的基础入门课程。书中用星号(*)表示的章节或部分可以作为理工科学士教科书,对电气工程专业的学生可安排一个或两个学期的课程。本章提供的所有资料可以作为研究生,在职的电力电子设计师和使用电力电子设备工程师的能量变换培训的教科书。本书的教辅资源包括各章要点和习题解答,采用本书作为教材的教师可登录 www.wiley.com//legacy/wileychi/ioinovic/ 注册下载。

诚挚地感谢很多帮助我完成本书著作的同事: Henry Chung 教授起草了第1章1.3节,1.6节和1.7节的大部分纲要。Ivo Barbi 教授长时间讨论和澄清以前的错误,如对全桥变换器中 DCM 设计或 DCM 的效率提出核算方法。香港工业管理学院电力系的 Franki N. K. Poon (From Power-e SIM, Hong Kong) 提供了第2章2.8节的工业级仿真实例。许多大学生帮助绘制图表,通过学习提出意见。香港城市大学和理工大学的 River Tin-Ho Li 指导学生绘制第1章1.3节的元器件规格表; Huai Wang 指导学生整理第2章和导出许多传递函数; Song Xiong 导出准谐振变换器的小信号模型。以色列 Holon 理工学院和 Sami Shamoon 工学院的 Martin Melincovsky 指导学生整理第4章。中山大学的 Alexei Komarov, Koby Hermony 和 Eran Saadya, 以及 Yafei Hu 要感谢 Eti Rosenblum 女士绘制了第3章的图表。当然还要感谢位于英国 Chichester 的 John Wiley & Sons Ltd 出版公司的编辑: Nicky Skinner, Laura Bell, Peter Mitchell, Liz Wingett, Clarissa Lim 和 Saurov Dutta 等。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 能源变换电子电路的应用领域	1
1.1.1 信息和电信产业的应用	1
1.1.2 可再生能源变换的应用	3
1.1.3 未来的能源变换——燃料电池	4
1.1.4 电动车辆	5
1.1.5 电子显示装置的应用	6
1.1.6 音频放大器	7
1.1.7 便携式电子设备	7
1.1.8 高电压物理实验和粒子加速器的应用	8
1.1.9 照明技术	8
1.1.10 AC-AC 变频器	9
1.1.11 电力系统调节	9
1.1.12 制造业的能源回收	9
1.1.13 航空航天的应用	10
1.1.14 国防应用	11
1.1.15 传动和大功率工业的应用	12
1.1.16 电力电子电路的分类	13
1.2 电力电子电路工作的基本原理	14
1.3 功率电路的基本组成: 功率半导体开关和无源电抗元件	20
1.3.1 不可控开关——功率二极管	21
1.3.2 半可控开关(晶闸管)	24
1.3.3 可控开关	25
1.3.4 氮化镓(GaN)开关技术	35
1.3.5 功率开关的能耗	38
1.3.6 无源电抗元件	46
1.3.7 超级电容器	60
1.4 占空比控制的恒定开关频率变换器的基本稳态分析	61
1.4.1 基本 DC-DC 变换器的输入/输出电压比	61
1.4.2 连续和断续导通工作模式	64
1.4.3 基本变换器的元件设计	65
1.4.4 占空比控制(PWM)的控制器	66
1.4.5 变换效率、硬开关和软开关	68
1.5 开关电容(SC)变换器简介	71

1.6	频率控制的变换器	76
1.6.1	谐振变换器	76
1.6.2	准谐振变换器(QRC)	81
1.7	AC-DC 整流器和 DC-AC 逆变器概述	87
1.7.1	整流器	87
1.7.2	逆变器	94
1.8	范例分析	100
1.8.1	范例 1	100
1.8.2	范例 2	105
1.8.3	范例 3	107
1.9	本章小结	110
	习题	110
	参考文献	112
第 2 章	DC-DC 变换器建模	115
2.1	功率级建模的目的	115
2.2	平均状态空间方程和低纹波近似(时间线性化)	117
2.3	针对 CCM 工作的变换器, 基于平均状态空间方程的直流电压增益和交流小信号开环传递函数	121
2.3.1	直流电压增益和交流开环干-负载电压的传递函数	121
2.3.2	小信号近似的占空比-输出电压的交流传递函数	122
2.3.3	CCM 工作的 Boost、Buck 以及 Buck-Boost 变换器的直流增益和交流小信号开环传递函数	124
2.3.4*	CCM 工作的 Boost、Buck 以及 Buck-Boost 变换器的图解平均模型	138
2.3.5*	CCM 工作的 DC-DC 变换器正则图解的平均模型	152
2.4	针对 DCM 工作的变换器, 基于平均状态空间方程的直流电压增益和交流小信号开环传递函数	157
2.4.1	降阶的平均模型	157
2.4.2*	全阶平均模型	171
2.5*	平均 PWM 开关模型	184
2.5.1	连续导通模式(CCM)工作的变换器的平均 PWM 开关模型	184
2.5.2	断续导通模式(DCM)工作的变换器的平均 PWM 开关模型	191
2.6	开关电阻和二极管正向电压的平均模型, PWM 平均模型	210
2.6.1	开关直流电阻和二极管正向电压的平均模型	210
2.6.2	PWM 平均模型	213
2.7*	准谐振变换器的直流和小信号分析用平均谐振开关模型	214
2.7.1	零电流(ZC)谐振开关的平均模型	214
2.7.2	零电压(ZV)谐振开关的平均模型	220
2.7.3	ZCS 准谐振变换器的直流分析和开环小信号传递函数	223
2.7.4	ZVS 准谐振变换器的直流分析和开环小信号传递函数	238

2.8	电力电子电路仿真和计算机辅助设计	249
2.9	案例分析	260
2.10	本章小结	263
	习题	268
	参考文献	270
第3章	传统 DC-DC PWM 硬开关变换	272
3.1	Buck DC-DC PWM 硬开关变换器	272
3.1.1	电感器直流阻抗的影响	272
3.1.2	边界控制	276
3.1.3	考虑电感电流纹波以及电容 ESR 时, CCM 工作的 Buck 变换器的损耗计算	277
3.1.4	CCM 工作的 Buck 变换器设计	281
3.1.5	带输入滤波器的 Buck 变换器	284
3.1.6	DCM 工作的 Buck 变换器的稳态分析综述	287
3.1.7	DCM 工作的 Buck 变换器设计	291
3.1.8*	Buck 变换器动态响应的特点	293
3.2	Boost DC-DC PWM 硬开关变换器	296
3.2.1	稳态 CCM 工作的 Boost 变换器	296
3.2.2	稳态 DCM 工作的 Boost 变换器	301
3.2.3*	Boost 变换器动态响应的特点	307
3.3	Buck-Boost DC-DC PWM 硬开关变换器	309
3.3.1	稳态 CCM 工作的 Buck-Boost 变换器	309
3.3.2	稳态 DCM 工作的 Buck-Boost 变换器	316
3.3.3*	Buck-Boost 变换器动态响应的特点	321
3.4	$\hat{C}uk$ 升-降压型(Boost-Buck) DC-DC PWM 硬开关变换器	321
3.4.1	$\hat{C}uk$ 变换器的推导和开关工作	321
3.4.2	CCM 工作的 $\hat{C}uk$ 变换器的稳态分析及设计	323
3.4.3*	存在寄生电阻的 $\hat{C}uk$ 变换器直流电压增益和交流小信号特性	328
3.4.4	设计实例和市售 $\hat{C}uk$ 变换器	333
3.4.5*	$\hat{C}uk$ 变换器的 DCM 工作	335
3.4.6*	带耦合电感的 $\hat{C}uk$ 变换器	344
3.5	SEPIC PWM 硬开关变换器	345
3.5.1	CCM 工作的 SEPIC 变换器	346
3.5.2	CCM 工作的 SEPIC 变换器的稳态分析	347
3.5.3*	CCM 工作的 SEPIC 变换器的小信号分析	352
3.5.4	市售 SEPIC 变换器: 实例研究	355
3.5.5*	DCM 工作的 SEPIC 变换器	360
3.5.6*	DICM 工作的 SEPIC 变换器的交流分析	368
3.5.7*	隔离型 SEPIC 变换器	370
3.6	Zeta(反向 SEPIC) PWM 硬开关变换器	370

3.6.1	CCM 工作的 Zeta 变换器	371
3.6.2	CCM 工作的 Zeta 变换器的稳态分析	371
3.6.3*	CCM 工作的 SEPIC 变换器的小信号分析	377
3.6.4	设计案例和范例分析	378
3.6.5*	DCM 工作的 Zeta 变换器	382
3.6.6*	隔离型 Zeta 变换器	388
3.7	正激变换器(正向变换器)	388
3.7.1	DC-DC 变换器结构中高频变压器的作用	388
3.7.2	正激变换器的推导	390
3.7.3	CCM 工作的正激变换器	391
3.7.4	DCM 工作的正激变换器和 CCM 与 DCM 的设计考虑	398
3.7.5*	多路输出正激变换器	401
3.7.6*	其他的磁芯复位策略	402
3.7.7	实用设计案例:范例分析	409
3.8*	隔离型Ćuk 变换器	412
3.9	反激变换器	416
3.9.1	反激变换器推导	416
3.9.2	反激变换器的 CCM 和 DCM 工作	417
3.9.3	耦合电感器漏感的影响	424
3.9.4*	反激变换器的小信号模型	431
3.9.5	反激变换器的设计:范例分析——实际考虑	432
3.10	推挽变换器	438
3.10.1	降压型的推挽变换器(电压驱动)	438
3.10.2	CCM 下的推挽变换器	438
3.10.3	推挽变换器中的非理想因素	443
3.10.4	DCM 工作	445
3.10.5*	升压型的推挽变换器(电流驱动)	450
3.10.6	设计实例	454
3.11	半桥变换器	457
3.11.1	Buck 半桥变换器拓扑	457
3.11.2	CCM 工作	457
3.11.3	输入到输出电压变换比和 CCM 工作的半桥变换器设计	464
3.11.4	实际问题	464
3.11.5	DCM 工作	466
3.11.6*	电流驱动半桥变换器	469
3.12	全桥变换器	472
3.12.1	全桥拓扑	472
3.12.2	Buck 全桥变换器的 CCM 工作	474
3.12.3	输入/输出电压变换比和 CCM 工作的 Buck 全桥变换器的设计	482

3.12.4 实际问题	483
3.12.5* 其他晶体管控制方式: 移相控制	484
3.12.6* 电流驱动型全桥变换器	486
3.13 本章小结	490
习题	498
参考文献	502
第4章 DC-DC 变换器的衍生结构	506
4.1 推挽、半桥和全桥变换器的倍流整流器(Current Doubler Rectifier, CDR)	506
4.1.1 倍流整流器的周期运行	507
4.1.2 具有倍流整流器(CDR)的变换器的电压变换比	510
4.1.3 电流纹波率	511
4.1.4* 其他结构的倍流整流器(CDR)	512
4.1.5 倍流整流器的缺点	515
4.1.6* 三倍流或多倍流整流器	516
4.2 倍压和多倍压整流器	517
4.2.1 全波桥式倍压整流器	517
4.2.2 Greinacher 倍压整流器	518
4.2.3 三倍压器及常规的 Cockcroft-Walton 多倍压器	521
4.2.4* 单电容倍压器	522
4.2.5 斐波那契开关电容多倍压器	523
4.2.6 分压器	526
4.2.7* “经济”电源和 4×8 电源	526
4.3 二次变换器	530
4.3.1 二次 Buck 变压器	530
4.3.2* Buck-Boost 二次变换器(占空比 < 0.5)	532
4.4* 双开关 Buck-Boost 变换器	534
4.4.1 升降压交错式双开关 Buck-Boost 变换器	534
4.4.2 正输出电压的 Z 源 Buck-Boost 变换器	537
4.5* 开关电容/开关电感集成的基本变换器	540
4.5.1 基于开关电容/开关电感结构的变换器系列	540
4.5.2 KY 变换器	552
4.5.3 Watkin-Johnson 变换器	556
4.6* Sheppard-Taylor 变换器	557
4.6.1 连续导通模式(CCM)工作	557
4.6.2 断续导通模式(DCM)工作	558
4.6.3 隔离型 Sheppard-Taylor 变换器	562
4.7* 有源开关电压应力低的变换器	564
4.7.1 具有 $V_{in}/2$ 初级开关电压应力的四开关全桥型变换器	564
4.7.2 初级侧开关应力为三分之一输入电压的变换器	566

4.7.3 三电平 Boost 变换器 568

4.8* 电感带抽头的变换器 572

4.8.1 电感带抽头的 Buck 变换器和 VRM(电压调节模块) 573

4.8.2 电感带抽头的 Boost 变换器 577

4.9* 有中心抽头电感的电流驱动双桥变换器 579

4.10 本章小结 584

习题..... 589

参考文献..... 589

术语表 591

第1章 概 论

1.1 能源变换电子电路的应用领域

随着电能应用在工业、运输、商业和住宅方面的进展,需要将电能变换成合适的用电形态,例如将交流电(AC)变换成直流电(DC),或者将高压电变换成低压电等。因此,开发了基于电磁变换的变压器。但是,随后发现变压器本身就需要耗费很大的能量,占用很大的空间,需要很高的维护成本。除此之外,使用变压器还不能满足所有的实际需要。例如,如果初始电源是电池的话,电池的输出电压会随时间降低,而用户需要的是恒定电压。或者,如果使用发电机供电的话,它的有效电压是变化的,而用户需要的直流电必须是恒定的。因此,电能变换必须具有可控制的机能。

20 世纪初,第一个解决方案是发明了水银整流器。在两次世界大战之间,开发了充气型固态开关装置,它们在能源可控的变换中使用,预示开创了电力电子学。接着产生饱和扼流圈磁性放大器,但是,真正的突破是 1950 年贝尔实验室发明的晶闸管和 1956 年通用电气公司对它的进一步开发。现代电力电子学是从使用新型功率半导体开关器件,如高频金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和后来崛起的碳化硅(SiC)器件开始的。当前的工业电气应用或消费者电子设备几乎没有不使用电力电子电路的。电力电子电路的应用功率从毫瓦(mW)到吉瓦(GW);它们将扩展成工业、公共设施和消费性电子产品。

根据 1970 - 1990 年间的进展,21 世纪的“电力电子”具有更广泛的含义。因为电力电子电路已变成系统的内在组成部分,诸如不间断电源(UPS),微处理器中的伺服器或电子消费品。它在整个系统中,除了变换电能之外,还是系统的优化者。通过排除干扰,电力电子电路还能系统提供所需要的许多优化功能,例如,将 AC 电压变换为 DC 电压时,变换器能给出优化的电力品质,如提供高输入功率因数和高电磁兼容性。21 世纪越来越多地突显电力电子电路必将承担更复杂的任务和要满足更严格的要求。因此,“电力电子”的称谓应该用“能源变换电子系统”来取代。

现在,让我们简要地观察电力电子的现代应用和传统应用。我们发现,日常生活中已广泛地应用了电力电子技术。回顾我们的童年就会想到无线电控制的玩具车辆,它首先使用了电力电子电路,因为它有一个可接收指令来控制玩具车辆速度的遥控器。以下列出了我们周围哪些领域应用了电力电子技术。

1.1.1 信息和电信产业的应用

一个典型的伺服器电源如图 1.1 所示。它将通用的 90 ~ 264 V 交流电(AC)变换成 380 V / 400 V 直流电(DC),然后再变换成为用电设备(例如微处理器)提供所需要的电压。而且不间断电源具有的后援时间(backup time)远短于高可靠性伺服器所需要的时间。

正如微处理器这样的用电设备不能没有电源。为了提供较长的反向时间(reverse time),电信产业设置一个 -48 V 的电源设备,需要时可随时给微处理器供电。如图 1.1 所示,这样的应用需要多种电力电子模块,每种模块必须满足不同的要求:第一种模块必须具有高值的功率因数将 AC 变换成 DC;第二种模块必须将电池的 48 V 提升到 DC 电压总线要求的 380 V,要实现如此大

的 DC 电压比,同时又不能影响效率、可靠性、成本或者使用的空间,这就大大地增加了设计的困难;第三种变换器必须将 DC 电压总线的 380 V 变换成伺服器需要的电压。这些应用要注意的重点是避免或尽量减少电磁干扰。

当前,通信系统和台式计算机发展的热点是用深亚微米、低电压 CMOS 逻辑技术来

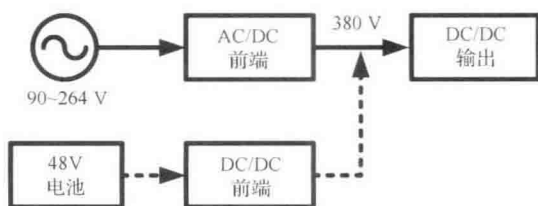


图 1.1 伺服器电源的方块图

设计微处理器和高速通信专用集成电路(ASIC)。它们工作在 GHz 级时钟频率,而且在低于 2 V 的电源电压时需要大电流。这需要多级严格的调节,也是对 DC/DC 变换电路提出困难的挑战。现代台式计算机使用混合的集中—分布式电源系统。它由集中的多路输出的 AC/DC 变换器(称为银盒)和分布式 12 V(或者 48 V)中转总线构成,供给靠近微处理器的变换器。这种变换器要在高电流时极精确地调节低电压,已开发了著名的电压调节模块(VRM)。

上述发明后的最初 10 年间,微处理器需要的功率低于 10 W;随后采用奔腾(Pentium)处理器,其功率一代代攀升,从 2000 年开始,一个芯片消耗 60~100 W。根据摩尔(Moore)定律,这些芯片的功率密度将产生不能接受的高温。较高的时钟频率和在单芯片设置更多的功能又暗示要求提供更大的负载电流。为了降低芯片的功耗及其引起的高温,解决方案是降低电源电压。按照 Intel 公司电源电压开发规划,微处理器的电源电压在 2014 年要低于 0.65 V(参见图 1.2)。针对 VRM 的需要,要求在 0.5~0.6 V 时供给负载 200 A,而且要严格监控在 100 A/ μ s 摆动时只允许 5~10 mV 的误差,这对电力电子设计来说无疑是新的挑战 and 新的机遇,因此,未来的能源变换科学家不得不拿出创新的方案。为了减小 VRM 的尺寸,开关频率必须从目前的几百 kHz 提高到 MHz 范畴。这样一来还必须开发低开关损耗的新型器件结构。一种解决方案是为了平均分配负载而将变换器并联起来。再用数字信号处理器(DSP)控制系统。其控制方法从传统的频率范畴的控制设计变为时间范畴的内—开关周期的控制。同时,固体开关器件产业需要生产影响改进栅极驱动效率和零反向恢复时间的更少寄生电容的 MOSFET。为了减小 MOSFET 与其驱动器之间的寄生电感还需要重新考虑封装。2013 年预测变换器的功率密度和性能价格比分别是 400 W/ in^3 和 \$0.058/\text{W}\$。一种 18 W 低功率,110 MHz 的谐振升压变换器早已验证。将开关频率提升到 300 MHz 的研究正在进行。

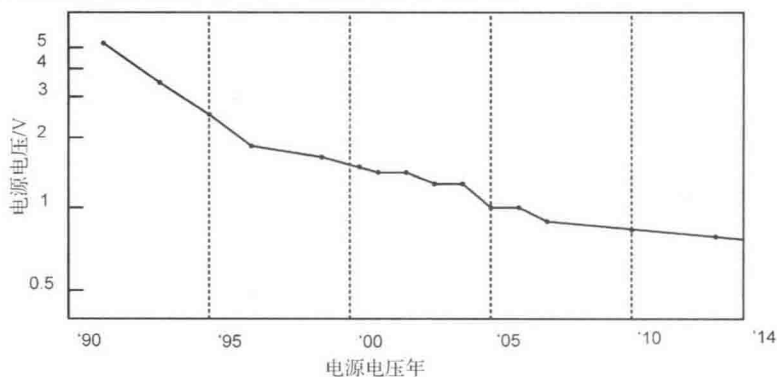


图 1.2 Intel 微处理器的电源电压开发规划[引自 Lidow and G. Sheridan, “Defining the future for microprocessor power delivery,” In Proc. Applied Power Electronics Conf. (APEC), 2003, Miami Beach, FL, vol. 1, pp. 3–9 Ed Stanford, Intel Corporation “Power technology roadmap for microprocessor voltage regulators,” presentation at Applied Power Electronics Conf. (APEC), 2004]

正如所见, 21 世纪的上半叶能源变换范畴需要很多研究和创新设计, 以应对信息和电信产业不断提出的更高要求。

1.1.2 可再生能源变换的应用

几个世纪以来, 世界经济一直依靠化石燃料来运转。除了传统能源的不足和所有的地缘政治问题之外, 在过去几十年中它们对环境的负面影响变得清晰可见了。当前, 为了实现能源多样化, 人们期望从周围环境(太阳能或者风能, 温度梯度, 摆动, 海洋潮汐能, 生物能等)“获取”能源。可再生能源不仅有助于减小温室效应的影响还非常灵活和轻便: 它们容易安装, 已模块化, 可安装在用户附近, 从而节约能源传输的成本。这种对环境清洁的可再生能源强烈地依靠电力电子技术。

自然界中一种最可用的能源是太阳能。光伏发电系统将太阳光变换成电能, 光伏电池有面板式和阵列式。为了获得更大的输出功率, 将光伏电池单元串联起来提高输出电压, 用增加表面面积或者并联电池来获得更大的输出电流。串联和/或并联光伏电池面板构成阵列。光伏电池本质上是半导体二极管, 只是它的 p-n 结要接受光线的照射。光线照射电池产生电荷载流子, 如果电池短路就会输出电流; 换句话说, 光伏电池吸收了太阳辐射就产生电荷载流子, 而载流子在电池的端子被收集。电荷载流子的产生率取决于入射光的流量。由于在日照期间光流量的变化使产生的电能具有不同的参数。局部的阴影也会改变电池的输出。因此, 每天的天气不同输出的功率也不同。光伏阵列的大量输出可以连接到电力电网。每个光伏发电站构成一个微电力电网。

个体光伏阵列的功率输出变动, 诸如电压或频率严重偏离额定值, 将使电力系统引发问题。为了平滑功率的变动和在任何日照条件下获得最大的输出功率, 使用了所谓跟踪最大功率点的电力电子电路。该电路能从光伏电池提取最大功率。它们按以下方式工作。任何水平的太阳辐射和温度在阵列的功率-电压曲线上都有一个产生最大功率的工作点(称为最大功率点 MPP)。为了从太阳能电池提取最大功率, 电力电子变换器的输入电阻必须等于在 MPP 时的太阳能电池的输出电阻。为了满足这样的条件变换器必须开发专用的控制技术。为了解决由于日照(“日照”指太阳辐射的能量)的变化而使频率偏离, 现在使用了一种类似模糊(fuzzy)控制器的先进的控制方法。已使 DC 能量变换电子电路用于电力调节系统, 其系统网络是基于连接个体光伏阵列, 用以提高总效率。电力电子电路还需要储存来自太阳能电池的过剩能量, 宛如电池银行。最后, 电力电子电路还要将 DC 电力变换成大功率品质的 AC 电力反馈给电力网。一些类似孤岛的处理技术必须统一成整体, 即如果主电网发生断开或中断供电, 作为替补能源的微电网将继续以稳定的电压连续地供给用户。这些应用需要专门设计的电力电子电路。

将电力电子电路和光伏电池集成起来会带来成本和效率的优势, 但是实现它并不简单。实际问题是: 变换器必须工作在高温和高湿度环境, 此外, 其安装位置使维修困难。集成变换器-光伏电池必须用高可靠性(使用最可靠的元件)和长寿命的标准来设计, 同时要永远铭记现代要求“美元/瓦”低的信条。

对低电压和低电流的用电设备可以采用环保能源。不过, 即使像智能传感器和智能安保卡等极低功耗的用电设备, 用直接供电的方式也是不能满足要求的。例如, 考虑热电堆(一种将热能转换为电能的电子器件), 它通常是以串联连接的方式构成热电偶。热电堆产生的输出电压正比于局部的温度差异。当出现低的温度梯度时就能输出电能, 即使输出电压太低也可利用[例如 127 个小型珀尔帖(Peltier)电池在 5℃ 温度梯度时热电堆才产生 200 mV 电压]。为

了将小功率生产者的电源电压变换到实用范围的公用电力网前端,需要稳定和数次提升可变的低电压。为此,开发和设计了定向的(purposely-oriented)电力电子电路。这样,要将 200 mV 输入电压变换到实用的,如 1.2 V 电压必须使用专用的变换器结构。参考小尺寸的便携式电子设备必须采用的集成技术,采用这种集成技术来实现上述的电力电子电路显然具有特别的吸引力。例如,必须使用低阈值电压的 N 沟道 MOS,折中低寄生效应,低阈值电压和低沟道电阻之间的制约。或者还要基于协调占用面积和最大电压升压增量的结果来选择电容器。

海浪拥有巨大的可再生潜能。但是,为了使成本合理必须提取最大可能的能量。一种具有这种控制功能的电子变换器可以实现“最大能量点跟踪”工作。这种功能也是太阳能电池提取太阳能时必需的。但是,对于海浪,其能量是以稳态周期中长时间持续的时变正弦波传递的。为了最大限度地提取能量,系统必须针对缓慢变化的海况进行调整。

地球拥有巨大的风能资源。据测定,如果能将其 10% 转化为适用的电能就可以满足全世界的电力需求。美国期望将风能从目前分担总消耗能量的 1% 到 2030 年时提高到 20%。但是,采用大型风力涡轮机(大于 5 MW)需要基于模块化技术的新型电力变换器。类似交叉存取和多电平技术开发,这是电力电子新技术研究的重任。对于大型海上风力发电站,一种 DC 电传输系统对陆地上的用电设备是有利的。因为具有现代技术的 DC 传输线路能够消除 AC 电缆的趋肤效应的损耗。这样,对于传输相同量级的能源,DC 系统占用的物理空间小于 AC 传输系统。这就增加了对能源的载运能力,又不影响稳定性。以新电力电子技术为基础的 DC 传输系统,对生产者,消费者双方和所用滤波器的小型化提供无功功率的全控制。如果涡轮机可变速运转就能转出最大的风能,因此需要专用的变换器。风能的性质要求系统增加更多的应变性;需要对“电网友好”的风力发电站。

理想情况下,风能和太阳能产生的电能是互补的:白天使用太阳能,晚上使用风能,因为通常晚上的风力更强大。

这些替代能源除了供应当地的偏远用电设备外,大多数可再生能源必须连接到现有的国家电力网。新的理念是推荐创建“智能”电力网;例如,建立能源中心来管理多个能源载体(电力,汽油等)。在每个中心,能源变换器将能源流从一种能源形态转换成另一种能源形态。能源流的管理包括能量控制和信息流,使生产者(传统的或可再生能源的),储能设备和负载之间灵活互连,各方都对电力网的安全责任。当能源生产者断开与国家电力网的连接,供给“微电力网”几个成员组成“集群”模式中一个单一的负荷时,从这些独立的情况看,不同的工作模式是可能的。最后,这些分布式生产者形成一个事实上的高累积电能生产者,直接由监控信号进行实际操作。电力网整合新能源和智能电力网的工作,都需要专用的电力电子系统。

1.1.3 未来的能源变换——燃料电池

也许,最能普及的替代能源是目前的燃料电池。燃料电池是基于电化学反应——氢和氧反应产生电能的。此过程不排放污染物,仅有的副产品是水蒸气,它还可用来加热。燃料电池的功率密度高于其他可替代能源电池。燃料电池可用于能源网络,车辆或便携式应用装置的前端。2008 年,波音公司使用氢燃料电池作为驱动力的小型载人飞机飞行了 20 分钟,开创了用氢或固体氧化物燃料电池的方法转变成小型载人或者无人驾驶飞机用的动力源的先例。

由于燃料电池的输出电压很低而且会跟随负载变化(其变化范围在满负载时的 0.4 V 到空负载时的 0.8 V 之间),因此必须将很多燃料电池串联堆叠起来才能成为有用的能源装置。例如,250 个电池串联起来在满负载时才能达到 100 V。影响每个电池产生电压的因素

有：薄膜的湿度，基本元件的或空气的压力以及催化剂的状态。各个电池的薄膜湿度可能不同，取决于电池内部的热分布。薄膜更湿润的电池将产生较大的电压。这就在堆叠的电池之间产生不均衡的电压分布和出现可变的电压。因此，燃料电池堆可提供可变的低输出电压；而且，它的电流纹波很小，能确保最佳的工作状态。这就是为什么电力电子电路能够提升电压和稳定 DC 电池电压必须采用燃料电池堆的原因。因为在考虑这样的电力电子 DC-DC 变换器的困难时，由于需要低输入电流纹波而增加了难度。为了消除电流纹波而增加一个 LC 滤波器是得不偿失的，因为这将降低能源变换的效率。必须研究结合燃料电池的专用结构变换器。燃料电池堆的常见结构及其电子变换器如图 1.3(a) 所示。这样的结构相当于串联连接电压源，如果其中一个电池出故障就能够将其从整个电池堆系统取出。图 1.3(b) 所示的模块化电池堆已经将燃料电池堆在电学上分成具有容错性能的几个部分：如果一部分出错，这部分失去功能，而系统的剩余部分能够提供较低的功率继续工作。如果在汽车的末端应用，出现故障时司机还能够用剩余的动力驾驶车辆直到汽车修理站。但是，这样的解决方案给电力电子电路设计者提出新的挑战：必须用能够提高系统可靠性的模块化 DC-DC 变换器。

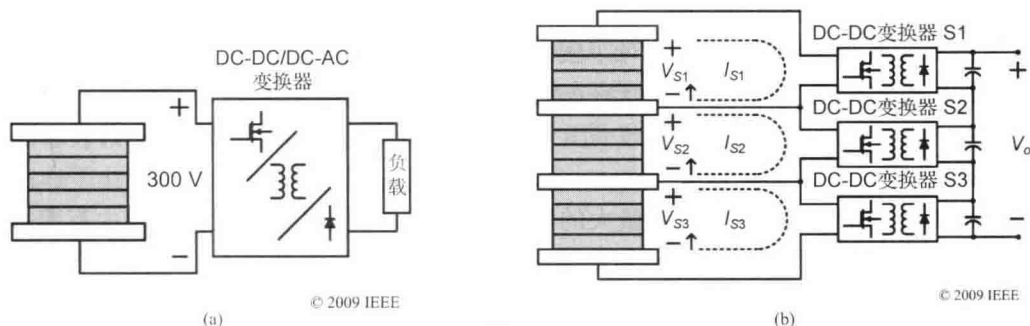


图 1.3 燃料电池堆及其电力电子变换器。(a) 简单的实施；(b) 模块化的实施(引自 L. Palma and P. N. Enjeti, "A modular fuel cell, modular DC-DC converter concept for high performance and enhanced reliability," IEEE Trans. Power Electronics, June 2009)

燃料电池不能及时响应负载的快速变化。如在燃料电池和负载之间串联一个变换器并不可取，因为负载电流的起伏立刻变成电池电流的起伏，这会降低电池的寿命。一个可能的解决方案是在燃料电池和负载之间连接两个变换器：一个变换器与电池串联，另一个变换器与电池并联。当负载恒定时只有串联的变换器工作，执行输出电压的调节，保证高的能效，如同由燃料电池直接提供输出功率一样。当输出功率变化时与电池并联的变换器对快速变化的负载电流进行补偿。

1.1.4 电动车辆

混合动力车辆已获得极佳的知名度，因为它比传统汽油车辆使用的燃料少和排放污染环境的二氧化碳也少。它需要电池或者超级电容器给要加速的汽车或者列车的电气传动系统提供能量。最常用的是镍金属氢化物或者锂离子电池，用后显示它们具有较大的功率，较高的能量密度和较低的自放电率。电池是由许多电池单元组成的。21 世纪的前 10 年，市售电池的额定电压在 250 V 内；但是，它们的工作电压在 150 ~ 270 V 范围，取决于充电状况。大电池设施需要复杂的电池充电系统，以便电池获得最佳性能，延长电池的寿命，为消费者提供高效充电