



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力电子学

——电力电子变换和控制技术

第三版

主编 陈 坚 康 勇

参编 阮新波 彭 力 熊 健



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力电子学

——电力电子变换和控制技术

Dianli Dianzixue — Dianli Dianzi Bianhuan he Kongzhi Jishu

第 三 版

主编 陈 坚 康 勇

参编 阮新波 彭 力 熊 健



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是基于普通高等教育“十五”国家级规划教材《电力电子学——电力电子变换和控制技术》(第二版)(2004年12月由高等教育出版社出版)六年多的使用情况并参考国外出版的相关教材的体系、内容作了增、删修订。

第三版修订原则是:以电路理论、电子学和控制理论的基本原理为起点,完整、系统地介绍电力电子变换和控制的基本知识和新技术的发展,论述电力电子变换电源和电力系统中电力电子补偿控制技术。第三版共分10章,保留了第二版的体系结构:电力电子开关器件,直流/直流、直流/交流、交流/直流和交流/交流四类电力电子变换器,辅助元器件和系统,谐振开关型变换器,多级开关电路组合型电力电子变换电源,电力电子开关型电力电子补偿控制器。鉴于全控型开关器件的广泛应用、控制技术的新发展以及电力电子技术的应用已逐渐从电力电子变换电源扩展到电力系统中高压大功率电力电子补偿控制,第三版各章内容都有一些修改、调整,使全书内容的选取和安排更趋合理、完善。

本书配有精选的四个教学实验,也已录入与本书配套的多媒体课件光盘,以供选用。

本书适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业及其他相关专业的本科生,可用作相关专业研究生的参考书,也可供从事电力电子变换和控制技术的工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子学:电力电子变换和控制技术 / 陈坚, 康勇主编. —3版. —北京:高等教育出版社, 2011.6

ISBN 978-7-04-031668-1

I. ①电… II. ①陈…②康… III. ①电力电子学-高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 049788 号

策划编辑 金春英 责任编辑 王勇莉 封面设计 于文燕 版式设计 马敬茹
责任校对 刘 莉 责任印制 张泽业

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	三河市华润印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787×1092 1/16	版 次	2002年1月第1版
印 张	21.5		2011年6月第3版
字 数	520 000	印 次	2011年6月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	33.60元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究
物料号 31668-00

第三版前言

采用半导体电力开关器件构成各种开关电路,按一定的规律,周期性地,实时、适式地控制开关器件的通、断状态,可以实现电子开关型电力变换和控制。这种电力电子变换和控制,被称为电力电子学(Power Electronics)或电力电子技术。

电力电子学——电力电子变换和控制技术,是高等工科院校电气工程及其自动化、自动化以及机电一体化等专业学生所必修的一门专业基础课程。

鉴于几乎所有与电力、电子有关的高科技领域都涉及电力电子变换和控制技术,电力电子学也应是从事相关工作专业人员所必需具有的基础知识。

本书第一版 2002 年 1 月出版后,基于三年的试用情况并参考随后国外出版的相关教材的体系、内容,对第一版作出了增删修订,第二版于 2004 年 12 月作为普通高等教育“十五”国家级规划教材出版。第二版教材继承了第一版的体系,但删除了一些可移放至其他选修课的内容,简化了一些开关电路工作时序过程和运行特性较复杂的数学分析,着重于物理过程、特性的说明。第二版还增加了一些例题,以加深读者的理解。随后又经历六年多的教学使用,经评审本书又被确定为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,修订第三版。同时,华中科技大学开设的“电力电子学——电力电子变换和控制技术”也被评为国家精品课程。

本书第三版内容的选取原则仍是:以电气工程、电子学和控制理论最基本的原理为起点,完整、系统地讲述电力电子变换和控制技术的基础知识、新技术的发展和前景。第三版仍为 10 章,对第二版各章内容都有一些调整、删减、提炼、修改。第 1 章电力电子变换和控制技术导论,概括性地介绍了电力电子学科的形成,四类基本的开关型电力电子变换电路,两种基本的控制方式(相控和脉冲宽度调制控制),两类应用领域(电力变换电源和电力系统中的电力补偿控制器)。这一章还归纳了电力电子变换器的基本特性,说明了开关型电力电子补偿控制器,用于补偿控制电力系统电压、电流、阻抗和功率的基本原理。学习导论这一章后,读者可对电力电子变换和控制技术有一个全貌性的认识。第 2 章半导体电力开关器件,介绍八类半导体电力开关器件的基本工作原理和静态特性。随后第 3、4、5、6 四章分别介绍直流/直流(DC/DC),直流/交流(DC/AC),交流/直流(AC/DC),交流/交流(AC/AC)四类电力电子变换电路的工作原理和基本特性。学习了四类基本变换电路以后,在第 7 章讲述电力电子变换器中的辅助元器件和系统,这一章在分析开关器件的开通、关断过程后,介绍各种缓冲器、滤波器、散热器、控制系统原理性结构和辅助电源。紧接着在第 8 章介绍谐振开关型变换器。第 9、10 两章分别介绍电力电子变换电路的两类典型应用:多级开关电路组合型电力电子变换电源的应用和电力电子开关型电力补偿、控制器。第一类应用——多级开关电路组合型电力电子变换电源,是以往 40 多年间电力电子技术的主要应用领域。第二类应用——电力电子开关型电力补偿、控制器,在今后 10~20 年间,将会在电力系统(发电、输电、配电网和负载用电)及负载电能质量控制领域得到广泛应用,这将大力促进柔性电力系统、智能电网的发展,导致传统电力系统发生革命性的变革。与此

同时又会为电力电子学科的新发展带来巨大的机遇,推动电力电子技术在更高水平上的发展。

参加本书第三版编写的有阮新波教授(第8章),彭力教授(第5章),熊健副教授(第4章),其余各章由陈坚、康勇修改定稿。

为便于某些读者的学习,书中也简略地介绍了一些与电力电子学课程内容相关的背景知识,如7.5、9.4、10.1等节,都不必在课堂上讲授。第三版中仍介绍了一些超出现在本科学生教学要求的内容(节的左上角注*号),作为优秀学生自学和扩大知识面,亦可作为相关专业研究生教学参考。

为了便于本教材的教学,课程教学小组任课教师制作了配套的多媒体课件。使用该课件可丰富教师的教学手段,对学生学习和理解教材内容都会有所帮助。

电力电子技术是一门实践性很强的专业基础课程。在课堂讲授的基础上学生应独立完成一些基本教学实验。本书精选了四个教学实验,由熊蕊教授、杨莉莎、李军、邓春花等老师设计、组装的实验装置及编写的电力电子技术实验指导书也已录入多媒体课件光盘供选用。

在本书的编写过程中得到华中科技大学电气与电子工程学院应用电子技术系邹云屏、段善旭、熊蕊、徐至新、林桦、杨荫福、张凯、张宇、戴珂、林新春、张蓉等教授的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。向为本书第三版制图、书稿计算机录入付出辛勤劳动的张睿、葛晏辰和博士后、博士、硕士研究生王学华、王兴伟、张锦、张雨、赵晖等同学表示感谢。

为我国电力电子学科的发展和人才培养做出重大贡献的陈伯时教授,审阅了本书第三版,并给予了许多宝贵意见,编者在此衷心地向陈伯时教授致谢!

编者还要对书末所列参考文献的作者表示衷心感谢。

编者殷切希望使用本教材的教师、同学和专业技术人员,对本书的内容、结构及疏漏、错误之处给予批评、指正。

编者

华中科技大学

电气与电子工程学院

2011年2月

第二版前言

采用半导体电力开关器件构成各种开关电路,按一定的规律,周期性地,实时、适式地控制开关器件的通、断状态,可以实现电子开关型电力变换和控制。这种电力电子变换和控制,被称为电力电子学(Power Electronics)或电力电子技术。本书定名为电力电子学——电力电子变换和控制技术。

电力电子学——电力电子变换和控制技术,是高等工科院校电气工程及其自动化、自动化以及机电一体化等专业学生所必修的一门技术基础课程。

鉴于几乎所有与电力、电子有关的高科技领域都涉及电力电子变换和控制技术,电力电子学也应是从事相关工作专业人员所必须具有的基础知识。

本书于2002年1月出版后,基于三年的试用情况并参考最近三年国外出版的相关教材的体系、内容,对本书第一版作出了增删修订。第二版教材继承了第一版的体系,但删除了一些可移放至其他选修课的内容,简化了一些开关电路工作情况过程和特性复杂的数学分析,着重于物理过程特性的说明并给出一些简明的结论。

本书第二版内容的选取原则仍是:以电气工程、电子学和控制理论最基本的原理为起点,完整、系统地讲述电力电子变换和控制技术的基础知识、新技术的发展和应用前景。鉴于改进教学方式,例如采用多媒体教学,可以提高电力电子学课程的教学效率,本书所选内容较以往50学时课程内容要多一些。为便于自学,重要内容的分析和重要公式的推证都比较详细。每章最后有小结、复习题及思考题。第二版增加了一些例题,以加深读者的理解。

本书共10章。第1章电力电子变换和控制技术导论,概括性地介绍了电力电子学科的形成、四类基本的开关型电力电子变换电路、两种基本的控制方式(相控和脉冲宽度调制控制)、两类应用领域(电力变换电源和电力补偿控制)。这一章还归纳了电力电子变换器的基本特性。学习导论这一章后,读者可对电力电子变换和控制技术有一个全貌性的认识。第2章半导体电力开关器件,介绍各类半导体电力开关器件的基本工作原理和静态特性。随后第3、4、5、6四章分别介绍直流/直流(DC/DC)、直流/交流(DC/AC)、交流/直流(AC/DC)、交流/交流(AC/AC)四类电力电子变换电路的工作原理和基本特性。学习了四类基本变换电路以后,在第7章讲述电力电子变换器中的辅助元器件和系统,这一章在分析开关器件的开通、关断过程之后介绍各种缓冲器。紧接着在第8章介绍谐振开关型变换器。第9、10两章分别介绍电力电子变换电路的两类典型应用:多级开关电路组合型交流、直流电源和电力电子开关型电力补偿、控制器。电力电子开关型变换电源,是以往40多年间电力电子技术的主要应用领域,第二类应用——电力电子开关型电力补偿、控制器,在今后10~20年间,将会在电力系统(发电、输电、配电网路)及负载电能质量控制领域得到广泛应用,并将导致电力系统发生革命性的变革。

为便于某些读者的学习,书中也简略地介绍了一些与电力电子学课程内容相关的背景知识(节的左上角注·号)。书中也介绍了一些超出现在本科学生教学要求的内容(节的左上角注*

号),是为优秀学生自学、扩大知识面提供的,亦可作为相关专业研究生教学参考。

为了便于本教材的教学,我们正在制作配套的多媒体课件。使用该课件可丰富教师的教学手段,对学生学习和理解教材的精髓都会有所帮助。

电力电子技术是一门实践性很强的技术基础课程。在课堂讲授的基础上学生应独立完成一些基本教学实验。本书精选了四个教学实验,由杨莉莎高级工程师等人设计、组装的实验装置及编写的电力电子技术实验指导书也已录入多媒体课件光盘供选用。

在本书长时期的编写过程中得到华中科技大学教师们的支持和帮助,在此向邹云屏、康勇、徐至新、熊蕊、李晓帆、杨荫福等教授表示衷心感谢。向为本书第二版制图、书稿计算机录入付出辛勤劳动的博士研究生赵阳、王归新、刘飞、马学军、谭智力等同学表示感谢。

本书初版于2001年7月完成,2002年元月出版。此为修订后的第二版。

上海交通大学陈敏逊教授、东南大学冷增祥教授在审阅本书中提出了许多宝贵的意见,编者在此表示衷心感谢。

编者还要对书末所列参考文献的作者表示衷心感谢。

编者殷切希望各校教师、学生和专业技术人员,对本书的内容、结构及疏漏、错误之处给予批评、指正。

编者
华中科技大学
电气与电子工程学院
2004年8月

第一版前言

采用半导体电力开关器件构成各种开关电路,按一定的规律,周期性地,实时、适式地控制开关器件的通、断状态,可以实现电子开关型电力变换和控制。这种电力电子变换和控制,被称为电力电子学(Power Electronics)或电力电子技术。本书定名为电力电子学——电力电子变换和控制技术。

电力电子学——电力电子变换和控制技术,是高等工科院校电气信息类电气工程及其自动化专业、自动化专业的学生所必修的一门专业基础课程。

鉴于几乎所有与电力、电子有关的高科技领域都涉及电力电子变换和控制技术,电力电子学也应是专业人员从事相关工作所必需具有的基础知识。

本书共 10 章。第 1 章电力电子变换和控制技术导论,概括性地介绍了电力电子学科的形成,四类基本的开关型电力电子变换电路,两种基本的控制方式(相控和脉冲宽度调制控制),两类应用领域(电力变换电源和电力补偿控制)。这一章还归纳了电力电子变换器的基本特性。学习导论这一章后,读者可对电力电子变换和控制技术有一个全貌性的认识。第 2 章半导体电力开关器件,介绍各类半导体电力开关器件的基本工作原理和静态特性。随后第 3、4、5、6 四章分别介绍直流/直流(DC/DC),直流/交流(DC/AC),交流/直流(AC/DC),交流/交流(AC/AC)四类电力电子变换电路的工作原理和基本特性。学习了四类基本变换电路以后,在第 7 章讲述电力电子变换器中的辅助元器件和系统:驱动器、缓冲器,电感和变压器、滤波器,散热系统和控制系统,这一章在分析开关器件的开通、关断过程之后介绍各种缓冲器。紧接着在第 8 章介绍软开关变换器。第 9、10 两章分别介绍电力电子变换电路的两类典型应用:多级开关型变压、变频电源,电力电子开关型电力补偿、控制器。第一类应用,电力电子开关型变换电源(通用恒频恒压电源和向交、直流电动机供电的变压、变频电源),是以往 40 多年间电力电子技术的主要应用领域;第二类应用,电力电子开关型电力补偿、控制器,在今后 10~20 年间,将会在电力系统(发电、输电、配电网路)及负载电能质量控制领域得到广泛应用,并将导致电力系统发生革命性的变革。

本书内容的选取原则是:以电工、电子学和控制理论最基本的原理为起点,完整、系统地讲述电力电子变换和控制技术的基础知识、新技术的发展和前景。鉴于改进教学方式,例如采用多媒体教学,可以提高电力电子学课程的教学效率,本书所选内容较以往 50 学时课程内容要多一些。为便于自学,重要内容的分析、说明,重要公式的推证都比较详细。每章最后有小结,并给出复习题及思考题。

为便于某些读者的学习,书中也简略地介绍了一些与电力电子学课程内容相关的背景知识。书中介绍的另一类标有*号的内容,是为优秀学生自学、扩大知识面提供的,亦可作为相关专业研究生教学参考。这两种内容都不必在本科生课堂上讲授。

在本书长时期的编写过程中得到前华中理工大学教师们的支持和帮助,在此向邹云屏、康

勇、徐至新、熊蕊、李晓帆、杨荫福等教授表示衷心感谢。向为本书制图、书稿计算机录入付出辛勤劳动的博士、硕士研究生李剑、李勋、邓文丹、张军建、邹旭东等同学表示感谢。

上海交通大学陈敏逊教授在审阅本书中提出了许多宝贵的意见,编者在此表示衷心感谢。

编者还要对书末所列参考文献的作者表示衷心感谢。

编者殷切希望采用本书的教师、学生和使用本书的专业技术人员,对本书的内容、结构及疏漏、错误之处给予批评、指正。

编 者

华中科技大学

电气与工程学院

2001年10月

目 录

第 1 章 电力电子变换和控制技术导论 … 1	
1.1 电力电子学科的形成 …… 1	
1.2 电力电子变换和控制的技术经济意义 …… 4	
1.3 开关型电力电子变换基本原理及控制方法 …… 5	
1.4 开关型电力电子变换器的基本特性 …… 16	
1.5 开关型电力电子变换器的应用领域 …… 17	
小结 …… 20	
复习题及思考题 …… 21	
第 2 章 半导体电力开关器件 …… 22	
2.1 电力二极管 …… 22	
2.1.1 半导体 PN 结 …… 22	
2.1.2 半导体二极管基本特性 …… 24	
2.1.3 电力二极管 …… 27	
2.1.4 电力二极管的主要应用 …… 29	
2.2 双极结型晶体管 BJT …… 30	
2.2.1 基极电流对集电极电流的控制作用 …… 30	
2.2.2 静态特性 …… 32	
2.2.3 电力晶体管使用参数和特性 …… 34	
2.3 晶闸管及其派生器件 …… 35	
2.3.1 逆阻型晶闸管 SCR …… 35	
2.3.2 逆导型晶闸管 RCT …… 41	
2.3.3 光控晶闸管 LCT …… 41	
2.3.4 双向晶闸管 TRIAC …… 41	
2.4 门极可关断晶闸管 GTO …… 42	
2.5 电力场效应晶体管 P-MOSFET …… 43	
2.6 绝缘门极双极型晶体管 IGBT …… 46	
2.6.1 工作原理 …… 46	
2.6.2 静态特性 …… 47	
2.6.3 擎住效应 …… 48	
*2.7 MOS 控制晶闸管 MCT 和集成门极换流可关断晶闸管 IGCT …… 48	
2.8 半导体电力开关模块和功率集成电路 PIC …… 50	
小结 …… 52	
复习题及思考题 …… 54	
第 3 章 直流/直流变换器 …… 56	
3.1 直流/直流降压变换器 (Buck DC/DC 变换器) …… 56	
3.1.1 电路结构和降压原理 …… 56	
3.1.2 电感电流连续时工作特性 …… 58	
3.1.3 电感电流断流时工作特性 …… 61	
3.2 直流/直流升压变换器 (Boost DC/DC 变换器) …… 65	
3.2.1 电路结构和升压原理 …… 65	
3.2.2 电感电流连续时工作特性 …… 67	
3.2.3 电感电流断流时工作特性 …… 68	
3.3 直流升压-降压变换器 (Boost-Buck 变换器或 CuK 变换器) …… 71	
3.3.1 电路结构和电流连续时的工作特性 …… 71	
*3.3.2 电流断流时工作特性 …… 74	
*3.3.3 两电感有耦合的 Cuk 变换器 …… 74	
*3.4 两象限、四象限直流/直流变换器 …… 77	
3.4.1 两象限直流/直流变换器 …… 77	
3.4.2 四象限直流/直流变换器 …… 78	
*3.5 多相、多重直流/直流变换器 …… 80	
3.6 带隔离变压器的直流/直流	

变换器	81	4.5.1 电压型三相逆变工作原理	116
3.6.1 隔离型 Buck 变换器——单端正 激变换器 (Forward Converter)	82	4.5.2 电流型三相逆变工作原理	119
3.6.2 隔离型 Buck - Boost 变换器——单端 反激变换器 (Flyback Converter)	83	4.5.3 三相逆变器的 SPWM 控制	121
*3.6.3 隔离型 Cuk 变换器	88	*4.5.4 谐波注入 SPWM 调制	123
3.7 具有中间交流环节 (DC - AC - DC) 变压器隔离型直流变换电源	89	4.5.5 三相逆变器电压空间矢量 调制	125
3.7.1 半桥型 DC/AC - AC/DC 直流 电源	89	4.6 大功率逆变电路	128
3.7.2 全桥型 DC/AC - AC/DC 直流 电源	91	4.6.1 变压器耦合型多重化逆变器	128
3.7.3 变压器中点抽头推挽型 DC/AC - AC/DC 直流电源	91	4.6.2 多电平逆变器	132
小结	92	小结	135
复习题及思考题	93	复习题及思考题	136
第 4 章 直流/交流变换器 (逆变器)	94	第 5 章 交流/直流变换器 (整流器)	138
4.1 逆变器的类型和性能指标	94	5.1 整流的基本原理	138
4.1.1 逆变器的类型	94	5.1.1 不控整流电路	138
4.1.2 逆变器输出波形性能指标	95	5.1.2 相控整流电路	141
4.2 电压型单相方波逆变电路 工作原理	96	5.2 负载性质对整流特性的影响	146
4.2.1 电压型单相半桥逆变电路	96	5.2.1 负载电感对整流特性的影响	146
4.2.2 电压型单相全桥逆变电路	98	5.2.2 反电势负载时相控整流特性	154
4.2.3 变压器中心抽头推挽式单相 逆变电路	100	5.2.3 电容对不控整流电路特性的 影响	156
4.3 单相逆变器的单脉波脉冲 宽度调制 (PWM)	101	5.3 交流电路电感对整流特性的 影响	159
4.4 正弦脉冲宽度调制 (SPWM) 技术	104	5.4 相控整流电路输出电压的谐波 分析	163
4.4.1 SPWM 基本原理	104	*5.4.1 m 脉波相控整流电压通用 公式	164
4.4.2 双极性正弦脉冲宽度调制	106	*5.4.2 m 脉波不控整流电压通用 公式	165
4.4.3 单极性倍频正弦脉冲宽度 调制	109	5.4.3 单相和三相桥式相控整流输出 电压谐波特性	167
4.4.4 规则采样 SPWM	111	5.5 带平衡电抗器的双三相桥 12 脉 波整流电路	168
4.4.5 SPWM 的谐波特性	112	5.6 相控有源逆变电路	172
*4.4.6 指定谐波消除 PWM	114	5.6.1 有源逆变原理	172
4.5 三相逆变电路工作原理	116	5.6.2 有源逆变安全工作条件	174
		5.6.3 三相全桥相控整流和有源逆变 的控制特性	176
		5.6.4 晶闸管相控有源逆变的应用	177

5.7 相控整流及有源逆变晶闸管 触发控制.....	177	7.1.2 GTO 的触发驱动器	213
5.8 三相高频 PWM 整流	180	7.1.3 BJT 的驱动器	214
5.8.1 能量可回馈的高频 PWM 整流电路	180	7.1.4 P-MOSFET、IGBT 的驱动器	215
5.8.2 交流/直流双向 PWM 变换器 工作原理	181	7.2 过电流保护和过电压保护	216
5.8.3 三相电压型高频 PWM 整流 控制系统	184	7.2.1 过电流保护	216
5.9 整流器的类型和性能指标	185	7.2.2 过电压保护	217
小结	186	7.2.3 开关器件串联、并联应用时的 均压、均流保护	218
复习题及思考题	187	7.3 开关器件的开通、关断过程与 安全工作区	219
第 6 章 交流/交流变换器	189	7.3.1 线路电感 $L_{\sigma} = 0$ 时开关器件的 开通、关断过程	220
6.1 晶闸管交流电压控制器的 类型	189	7.3.2 线路电感 $L_{\sigma} \neq 0$ 时开关器件的 开通、关断过程	222
6.2 单相交流电压控制器	190	7.3.3 安全工作区	224
6.2.1 电阻负载	190	7.4 缓冲器	224
6.2.2 电阻、电感性负载	194	*7.4.1 全控型开关管 LCRD 型复合 缓冲器	224
*6.2.3 PWM 交流电压控制器	196	7.4.2 电力二极管、晶闸管的 RC 缓冲电路	230
6.3 三相交流电压控制器	197	7.4.3 P-MOSFET、IGBT 的限幅钳位 缓冲器	230
6.3.1 三相星形联结交流电压 控制器	197	7.5 电感(电抗器)、方波变压器和 脉冲变压器	235
6.3.2 三相开口三角形交流电压 控制器	200	7.5.1 电感(电抗器)	235
6.4 有变压器抽头的电压控制器	201	7.5.2 方波变压器和脉冲变压器	237
*6.5 晶闸管相控交流/交流直接 变频器	202	7.6 滤波器	240
6.5.1 基本工作原理	203	7.6.1 滤波器基本功能和类型	240
6.5.2 实用电路结构	207	*7.6.2 LC 滤波器特性分析	241
6.5.3 交流/交流相控直接变频的优 缺点	207	*7.6.3 谐振型滤波器	245
*6.6 矩阵式交流/交流直接变频 电路	209	7.7 散热系统	246
小结	210	7.8 控制系统和辅助电源	248
复习题及思考题	211	小结	249
第 7 章 辅助元器件和系统	212	复习题及思考题	249
7.1 触发、驱动器	212	第 8 章 谐振开关型变换器	251
7.1.1 晶闸管 SCR 的触发驱动器	213	8.1 软开关变换器的分类	251
		8.1.1 硬开关的概念	251
		8.1.2 软开关的概念	252

8.1.3 软开关的分类	253	9.6.1 含升压(Boost)型功率因数校正器 的高频整流	289
8.2 准谐振变换器(QRCs)	254	9.6.2 带反激式功率因数校正器的 高频整流	291
8.2.1 谐振开关	254	9.6.3 电池充电电源	292
8.2.2 零电流开关准谐振变换器 (ZCS QRCs)	255	9.7 荧光灯-电子镇流器照明 电源	294
8.2.3 零电压开关准谐振变换器 (ZVS QRCs)	258	9.8 感应加热电源、电焊和电磁灶 电源	296
*8.3 零电流开关(ZCS)PWM 变换 器和零电压开关(ZVS)PWM 变换器	262	9.8.1 感应加热电源	296
8.3.1 ZCS PWM 变换器	263	9.8.2 高频电焊电源	297
8.3.2 ZVS PWM 变换器	265	9.8.3 电磁灶电源	297
*8.4 零电压转换 PWM 变换器	267	小结	298
8.5 移相控制零电压开关全桥 变换器	270	复习题及思考题	298
8.5.1 工作原理	270	第 10 章 电力电子开关型电力补偿、 控制器	299
8.5.2 主要特性	272	10.1 电力传输基本运行特性	299
*8.6 谐振直流环节逆变器	274	10.2 晶闸管开关型并联补偿 控制器	302
小结	277	10.2.1 晶闸管投、切并联电容器 TSC ...	302
复习题及思考题	278	10.2.2 晶闸管相控并联电抗器 TCR ...	303
第 9 章 多级开关电路组合型电力 电子变换电源的应用	279	10.3 晶闸管开关型串联电容 补偿器	305
9.1 变速恒频交流发电系统	279	10.3.1 晶闸管控制的串联电容 补偿器 TCSC	305
9.1.1 直驱型永磁同步电机风力 发电系统	279	*10.3.2 可关断晶闸管 GTO 控制的 串联电容补偿器 GCSC	306
9.1.2 绕线型转子交流励磁双馈异步 电机风力发电系统	280	10.4 PWM 变流器型静止同步(并联) 补偿器 STATCOM	308
9.2 太阳能光伏发电系统	282	10.5 PWM 变流器型静止同步串联 补偿器 SSSC	310
9.3 晶闸管相控整流-有源逆变的 直流输电系统	283	10.6 谐波电流补偿器 HCC(或并联 型电力有源滤波器 PAPF)	312
9.4 交流异步电动机变频变速 传动系统	285	10.7 谐波电压补偿器 HVC(或串联型 电力有源滤波器 SAPF)	313
*9.5 AC/DC-DC/AC 恒压、恒频 (CVCF)不间断电源 UPS	287	*10.8 统一潮流控制器 UPFC	314
9.5.1 典型在线双变换式 UPS	287	*10.9 统一电能质量控制 器 UPQC	316
9.5.2 典型后备式 UPS	288		
9.6 带功率因数校正(APFC)的 开关电源和充电电源	289		

小结	318	附录 B 常系数线性二阶微分方程的	
复习题及思考题	319	通解	324
附录 A 傅里叶级数	320	参考文献	326

第 1 章 电力电子变换和控制技术导论

本章叙述了现代电力电子学科的形成,说明了电力电子变换和控制的技术经济意义,简介了开关型电力电子变换电路的基本原理、控制方法和基本特性,最后归纳了开关型电力电子变换电路的两类应用领域:电力电子变换电源和电力电子补偿控制器。

1.1 电力电子学科的形成

在人类文明历史中,能源和动力,尤其是电能的开发以及电力和电子技术的应用具有重要意义。从原始社会到机器出现之前漫长的历史时期中,人类利用手工工具直接改造自然,使用工具的主要动力是人力,此后人类逐步学会利用畜力、风力、水力等自然力,进而以机器代替手工工具,技术进步极大地推动了人类社会的发展。

人类近代历史上第一次技术革命的主要标志是 1769 年瓦特(J. Watt,1736—1819)发明蒸汽机。蒸汽机取代自然力成为机器制造、采矿、冶金、铁路、纺织等行业的主要动力,蒸汽机的广泛应用大大促进了社会生产力的发展,从此人类开始从农业社会跨入工业社会。第一次技术革命所引发的产业革命为资本主义社会的发展奠定了物质基础,在不到一百年的时间里所创造的物质财富超过了以往历史时代的总和。

人类近代历史上第二次技术革命起源于 19 世纪初英国物理学家法拉第(M. Faraday,1791—1867)等人发现电磁感应现象和对电磁学基本原理的研究。19 世纪末以后,三相交流发电机、变压器、电动机、远距离输电以及有线电、无线电通信技术的发明和应用,是第二次技术革命的主要标志。发电机、变压器和远距离输电技术的发明,给工业、农业和交通运输提供了全新的廉价动力,电动机取代蒸汽机成为机械的原动力,社会生产力得到更迅猛的发展。电能在工农业、交通运输和人类生活中的广泛应用以及电子技术、通信和自动化技术的发展,使人类逐步摆脱了繁重的体力劳动。到 20 世纪中期,各类电子器件(电子管器件、半导体器件、集成电路、微处理器等)及电报、电话、无线电通信、广播、收音机、电视、电子计算机、电子录像机、传真机等等一系列与电有关的发明大量涌现,这不仅促进了社会生产力的发展,同时也极大地提高了人类的物质文化生活水平。第二次技术革命所引发的产业革命使人类的生产能力在半个多世纪期间又提高了 10 倍以上,其主要推动力是电力技术和电子技术。

1. 电力技术

电力技术是一门涉及发电、输电、配电及电力应用的科学技术。发电设备将其他形态的能源变为电能,再通过输电、配电网络将电能送至用电设备(负载),用电设备再将电能转变为其他形态的能源。如照明设备将电能转变为光能,电动机将电能转变为机械能以驱动机械运动,电热设备将电能转变为热能供生活取暖或金属加热冶炼,电化学设备将电能转变为化学能实现电解、

电镀或给蓄电池充电等等。电能是现代社会最重要的能源,电能可以由自然界中各种一次能源(煤、石油、天然气、风力、水力、核能、太阳光、化学能等等)转变得到。电能既可以经济地远距离传输和配送,又可以方便、无污染地转化为其他形态的能源。现代社会中各个领域的技术设备大多都是用电设备,都需要由一定类型的电源供电。

发电、输配电及电力应用技术的理论基础是电磁学(电路、磁路、电场、磁场的基本原理),利用电磁学基本原理处理发电、输配电及电力应用的技术统称电力技术。

2. 电子技术(电子学)

1865年英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1873)在奥斯特、安培、法拉第等人工作的基础上,系统总结了19世纪中期以前电磁学研究的成果,归纳出完整、严谨的电磁场基本方程,为随后的电气工程,特别是电子工程技术的发展奠定了理论基础。1887年德国物理学家赫兹(H. R. Hertz, 1857—1894)发表了有关电磁波存在的实验论文,1897年意大利马可尼(G. Marconi, 1874—1937)发明了无线电报并建成世界上第一座无线电台。到20世纪40年代,在民用通信及军事装备需求的推动下,逐步形成了一个与电力技术并行发展的电子技术领域。电子技术又称为电子学,它是与电子器件、电子电路(在LCR电路中引入电子器件的电路)以及由各种电子电路所组成的电子设备和系统有关的科学技术。最早期的电子器件是1904年出现的电子管,它能控制电路的通、断和电路中电流的大小。随后发展到晶体管、晶体管集成电路(简称集成电路)和微处理器。

电力技术研究的是发电机、变压器、电动机、输配电线路等电力设备,以及如何利用电力设备来处理电力电路中电能的产生、传输、分配和应用等问题;而电子技术则是研究电子器件,以及如何利用电子器件来处理电子电路中电信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收等问题。研究信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收的电子技术(电子学)又称为信息电子技术或信息电子学。

电力技术的发展依赖于发电机、变压器、电动机等电力设备和输配电系统,而电子技术的发展依赖于各种电子器件。20世纪50年代以前的电子器件是电子管。1946年,世界上第一台电子计算机就使用了18 000个电子管,重30 t(吨),占地 167 m^2 ,耗电156 kW,运算速度为每秒5 000次加法。1948年,美国贝尔实验室的肖克莱(W. B. Shockley)等人在半导体P-N结(二极管)单向导电的基础上,加进了第三个电极——控制极,发明了能放大电信号的晶体管(N-P-N或P-N-P三极结构,故又称为三极管),开创了现代电子学——固体电子学或晶体管电子学的新时代。在体积、重量、耗电、可靠性等方面,晶体管比电子管优越得多。1952年,英国雷达研究所的达默提出了一个设想:能否按电子电路功能的要求,将一个电子电路中包含的晶体二极管、晶体管以及电阻、电容、电感等元件全部制作在一块半导体晶片上,从而构成一块具有一定的信号变换、处理功能的完整电路——集成电路?达默的这一设想引发了人类历史上具有划时代意义的微电子技术革命。20世纪50年代占满一个房间的电子电路系统现在已可以由一块体积远小于大拇指大小的集成电路芯片替代。至今,具有各种信息处理功能的集成电路芯片和电子装置系统,其集成密度、运算速度仍在急剧上升,而成本价格则不断下降,使其在许多领域都能得到广泛应用。微电子技术的成就为现代电子技术的发展和广泛应用奠定了基础。

3. 电力电子技术(电力电子学)

早期的电力技术并不涉及电子器件,也不应用电子技术。例如,20世纪20年代法国建成的

一套直流输电系统(125 kV、输送功率 20 MW、输电距离 225 km),在直流输电线首端采用交流电动机拖动直流发电机实现交流 - 直流交换(简称整流),在直流输电线末端采用直流电动机拖动交流发电机实现直流 - 交流变换(简称逆变),并不像现在的直流输电系统,采用电力电子开关实现整流和逆变。虽然到 20 世纪 40 年代,发电机励磁系统、电动机调速系统以及直流输电系统等领域已出现应用电子管器件的试验研究,但由于电子管器件的固有缺陷,在 20 世纪 60 年代以前,电子技术并未在电力技术领域中得到广泛应用。

1957 年,美国通用电气公司在晶体管的基础上发明了晶体闸流管(Thyristor,简称晶闸管)。晶闸管是一个固态开关器件,它体积小、重量轻,电压电流额定值高,导通时压降小、阻断时漏电流小,开关速度快,控制简便,工作可靠。晶闸管具有可控的单向导电性,因此首先被用于可控整流电路,实现交流一直流变换,又由于使用硅半导体材料,因此初期曾被称为可控硅整流器 SCR(Silicon Controlled Rectifier)。不久,晶闸管的开关功能又被用于逆变(实现直流 - 交流电源变换)、交流 - 交流电压调节和直流 - 直流电压变换。随后国际电工委员会正式将其命名为 Thyristor——晶体闸流管,简称晶闸管。

晶闸管是从半导体二极管(P-N 结)、晶体管(N-P-N 或 P-N-P 三层结构)发展起来的三端(阳极、阴极、控制极)、四层(P-N-P-N)结构的高压、大电流半导体电力开关器件。20 世纪 60 年代以后,以晶闸管为代表的各类高电压、大电流半导体开关器件(简称半导体电力开关器件)相继研制成功并得到广泛应用。最近二十多年,以微电子技术精细加工为基础的高频、高压、大电流、全控型半导体电力开关器件的研制工作发展很快,多种新器件都已得到广泛应用。电压、电流额定值更高,特性更优良,开关速度更快的新器件有望在今后得到广泛应用。利用半导体电力开关器件组成电力开关电路,利用晶体管集成电路和微处理器芯片构成信号处理和控制系统,对电力开关电路进行实时、适式的控制,可以经济有效地实现开关模式的电力变换和电力控制,包括电压(电流)的大小、频率、相位和波形的变换和控制。将现代电子技术和控制技术引入传统的电力技术领域实现电力变换和控制,即电力电子变换和控制技术,是一门综合了电子技术、控制技术和电力技术的新兴交叉学科。这种电力电子变换和控制技术,被国际电工委员会命名为电力电子学(Power Electronics)或称为电力电子技术。可以用图 1.1 所示的倒三角形来表征电力电子技术学科的构成:电力电子学,即电力电子变换和控制技术是电力技术、电子技术与控制技术三者结合的交叉学科。

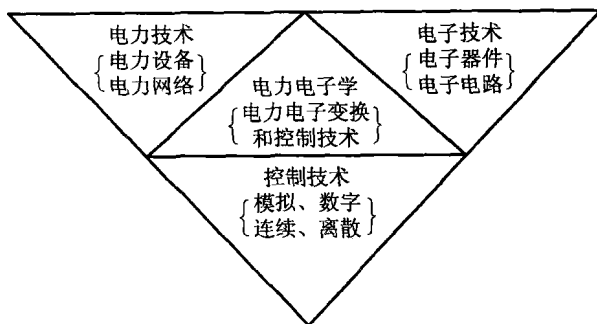


图 1.1 表征电力电子技术的倒三角形