



普通高等教育“十二五”规划教材

电力电子技术

(第二版)

石新春 王 毅 孙丽玲 编



配套多媒体课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电力电子技术

(第二版)

石新春 王 毅 孙丽玲 编
段善旭 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书由电力电子器件、基本电力变换电路和电力电子技术在电力系统中的应用等部分组成，共分为9章。其主要内容包括电力电子器件、相控整流电路、直流斩波电路与交流电力控制电路、无源逆变电路、PWM控制技术、高压直流输电、静止无功补偿装置、有源电力滤波器、电力电子技术在风力发电中的应用等。本书在讲述电力电子学基本理论的基础上，突出了应用技术所占的比重。

本书既可作为电气类、自动化类等相关专业电力电子课程的本科教材，也可作为相关专业研究生的参考教材，同时可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/石新春,王毅,孙丽玲编. —2版. —北京:
中国电力出版社, 2013. 10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-4897-4

I. ①电… II. ①石… ②王… ③孙… III. ①电力电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第215943号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年3月第一版

2013年10月第二版 2013年10月北京第七次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14印张 341千字

定价 26.60元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前言

作为对电能高效变换和控制的重要手段,电力电子技术一直处在蓬勃发展之中,而智能电网与新能源应用的兴起为电力电子技术提供了更为广阔的空间。如今电力电子技术已经成为高等院校电气工程及其自动化专业的必修课程,而且与其专业课程的联系日益紧密。本书在介绍电力电子器件、分析电力变换电路的基础上,引入了电力电子技术在电力系统中的典型应用,便于学生将电力电子技术的基础理论与应用领域的知识相结合,加深了解电力系统中先进电力电子变换装置的性能,为进一步深入学习智能电网与新能源领域的专业知识奠定基础。

从本书第一版出版至今,电力电子技术在拓扑结构、控制技术和应用领域都有新的发展。本书第二版重点对直流斩波电路、PWM 控制技术、多电平电路的内容进行了补充和完善,在应用部分将“电力电子技术在风力发电中的应用”替代了第一版中的“电力电子技术在同步电机中的应用”,以突出电力电子技术在新能源领域的重要作用。

本书内容可分为器件、电路、控制和应用四个部分,第 1 章介绍典型的电力电子器件,第 2~4 章分析了四种基本类型的电力变换电路的原理,第 5 章阐述了 PWM 控制的原理和实现方法,第 6~9 章则介绍了电力电子技术在电力系统中的典型应用。第 1 章首先简述电力电子器件的概念、基本类型和特点;然后重点介绍了几种广泛应用的电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数及应用情况;最后简单介绍一些新型电力电子器件及电力电子器件的发展趋势。第 2 章分析了重点电路——相控整流电路的工作原理,以及其有源逆变工作状态、变压器漏抗影响、谐波和无功等问题。第 3 章则涵盖了 DC-DC 变换电路和 AC-AC 变换电路两部分内容。第 4 章分析了方波控制下的电压型、电流型和谐振型的无源逆变电路的工作原理。第 5 章介绍为获得正弦化交流输出波形的正弦脉宽调制 (SPWM) 的基本原理、实现方法、谐波特点等,并着重阐述基于 PWM 控制技术的 DC-AC 变换电路——PWM 变流器的工作原理。第 6 章介绍了整流电路的典型应用——高压直流输电的发展概况、应用现状、基本组成、换流器及控制系统的基本原理。第 7 章介绍了交流电力变换电路在电力系统中的应用——静止无功补偿的基本原理,具体阐述了晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电容器 (TSC) 和静止同步补偿器 (STATCOM) 的工作原理。而第 8 章和第 9 章均是介绍 PWM 变流器在电力系统中的应用装置。第 8 章首先介绍有源滤波器的基本原理和结构、发展现状和应用情况、三相电路的瞬时无功功率理论以及检测方法,最后着重介绍了目前应用比较广泛的并联型有源电力滤波器。第 9 章主要介绍风力发电的发展、风力发电机组的主要类型、典型风力发电机组的工作原理以及电力电子技术在风力发电中的应用。

为了便于教学和提高学生的学习兴趣,本教材还配套了多媒体课件、基于 PSIM 软件的电力电子电路仿真程序,帮助学生深入分析和理解各种变换电路的拓扑结构和控制原理,并能进一步对电路的参数进行设计和优化。

在本书的编写过程中得到了华北电力大学杨京燕、朱凌等老师们的支持和帮助,同时该

教研室的研究生马韬、郭秀红、韩冰、苏小晴、马然等同学参与了部分内容校对、文字录入及插图绘制工作，在此向他们表示感谢。

华中科技大学的段善旭教授在审阅本书的过程中提出了许多宝贵意见，编者在此表示衷心感谢。

编者殷切希望广大读者对书中内容的疏漏、错误之处给予批评指正。

编 者

2013 年 6 月于华北电力大学



第一版前言

电力电子技术又称为功率电子技术,它是用于电能变换和功率控制为主要目的的电子技术。电力电子技术是弱电控制强电的方法和手段,是当代高新技术发展的重要内容,也是支持电力系统技术革新和技术革命发展的重要基础,并成为节能降耗、增产节约、提高生产效能的重要手段。随着微电子技术、计算机技术以及大功率电力电子技术的快速发展,极大地推动了电工技术、电气工程和电力系统的技术发展和技术进步。

电力电子器件是电力电子技术发展的基础。正是大功率晶闸管的发明,使得半导体变流技术从电子学中分离出来,发展成为电力电子技术这一专门的学科。而20世纪九十年代各种全控型大功率半导体器件的发明,极大地拓展了电力电子技术应用和覆盖的领域和范围。电力电子技术的应用领域已经深入到国民经济的各个部门,包括钢铁、冶金、化工、电力、石油、汽车、运输以及人们的日常生活。功率范围大到几千兆瓦的高压直流输电,小到不足1W的手机电池充电器,电力电子技术的应用随处可见。据统计,在发达的工业化国家,电厂发出的电力有60%以上要经过各种电力电子装置变换以后才最终使用。电力电子技术提高了用电效率,降低了能源的消耗,方便了人们的生活,提高了劳动生产率。各个电力电子设备的生产厂家形成了相关的产业群体,是国民经济的重要组成部分。

电力电子技术在电力系统中的应用也有长足的发展。例如,高压直流输电(HVDC)、静止无功补偿(SVC)、大型发电机静止励磁、抽水蓄能机组的软启动、超高压交流输电线的可控串联补偿(TCSC)等。电力电子技术是电力系统中发展最快、最具活力的组成部分。电力电子装置与传统的以机械式开关操作的设备相比,具有动态响应快,控制方便、灵活的特点,能够显著地改善电力系统的特性,在提高系统稳定、降低运行风险、节约运行成本方面具有很大的潜力。最近,电力系统的研究发展的热点“灵活交流输电系统”就是以电力电子技术在电力系统的应用为主要的技术手段,以改进和提高电力系统的可控性和灵活性为主要目的。各种用户的特制电力供电方式也离不开电力电子技术。

本书由电力电子器件、基本电力变换电路和电力电子技术在电力系统中的应用三大部分组成。第1章系统介绍了电力电子器件的发展概貌、各种典型电力电子器件的原理、结构、特性和参数;第2~5章讲述了四种基本电力变换电路的原理及其控制方法;第6~9章以电力系统为背景,介绍了各种电力变换电路的典型应用:高压直流输电、静止无功补偿、有源电力滤波、同步电机控制。相对于其他电力电子教材,本书突出了应用技术所占的比重,体现了作为一门工程技术,基础理论与应用技术并重的特点。

本书力求概念清晰、结构严谨、深入浅出、内容新颖,并结合电力系统的特点,做到理论联系实际,照顾到行业特点和实用性。本书适合电气工程专业、自动化专业的本科学生学习,也适合从事相关工作的技术人员阅读和参考。

本书由华北电力大学石新春教授、杨京燕教授和王毅博士合作编写,由朱凌副教授审

阅。在编写过程中得到了许多同仁们的关怀和支持，并参阅了许多同行专家的论著和文献，在此一并表示感谢。由于时间仓促、编者水平所限，书中错误之处在所难免，敬请同行和广大读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月于华北电力大学



目 录

前言

第一版前言

绪论	1
1 电力电子器件	8
1.1 概述	8
1.2 电力二极管	11
1.3 晶闸管及其派生器件	16
1.4 门极可关断晶闸管	23
1.5 电力晶体管	25
1.6 功率场效应晶体管	29
1.7 绝缘栅双极晶体管	33
1.8 其他新型电力电子器件	38
习题一	42
2 相控整流电路	43
2.1 单相可控整流电路	43
2.2 三相可控整流电路	52
2.3 变压器漏抗对整流电路的影响	60
2.4 有源逆变电路	63
2.5 电容滤波的不可控整流电路	67
2.6 整流电路的谐波与功率因数	72
2.7 其他可控整流电路	77
习题二	79
3 直流斩波电路与交流电力控制电路	81
3.1 DC/DC 变换电路概述	81
3.2 非隔离型 DC/DC 变换电路	82
3.3 隔离型 DC/DC 变换电路	89
3.4 交流电力控制器	96
习题三	101
4 无源逆变电路	103
4.1 概述	103
4.2 电压型逆变电路	105
4.3 电流型逆变电路	110
4.4 谐振型逆变电路	112
习题四	117

5 PWM 控制技术	119
5.1 概述	119
5.2 载波调制的 PWM 控制方法	121
5.3 空间矢量调制的 PWM 控制方法	131
5.4 三电平逆变器的 PWM 控制	136
习题五	138
6 高压直流输电	139
6.1 高压直流输电概述	139
6.2 换流器的工作原理	143
6.3 高压直流输电系统的谐波抑制及无功补偿	146
6.4 高压直流输电的基本控制原理	151
习题六	154
7 静止无功补偿装置	156
7.1 概述	156
7.2 晶闸管控制电抗器 (TCR)	160
7.3 晶闸管投切电容器 (TSC)	166
7.4 静止同步补偿器 (STATCOM)	170
习题七	176
8 有源电力滤波器	177
8.1 有源电力滤波器概述	177
8.2 瞬时无功功率理论与谐波电流检测	184
8.3 并联型有源电力滤波器	189
习题八	196
9 电力电子技术在风力发电中的应用	197
9.1 风力发电概述	197
9.2 风力机的特性与最大功率跟踪控制	202
9.3 双馈风力发电机组的控制策略	204
9.4 永磁直驱风力发电机组的控制策略	211
习题九	214
参考文献	215

绪 论

1. 电力电子技术的概念

电力电子技术是研究电力变换和控制的一门工程技术,目的是为了更方便、更为有效地使用电能,使电能更好地为人们服务。按照美国 IEEE 电力电子学会的定义,电力电子技术是有效地使用功率半导体器件,应用电路和控制理论以及分析开发工具,实现对电能高效的变换和控制的一门技术,它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。国际电工委员会认为,电力电子技术就是应用于电力领域的电子技术,它是电气工程三大领域——电力、电子和控制之间的边缘学科,被学术界普遍承认的倒三角(见图 0-1)形象地描述了这一特征。采用变压器、交流电动机一直流发电机组等方式也可对电能进行变换,但因为不含有电力电子器件,所以不属于电力电子技术的范畴。

电力电子技术通常分为电力电子器件的制造技术、电力电子器件和电路的应用技术,即变流技术。器件制造技术包括各种功率半导体器件的设计、测试、模型分析、工艺及数字仿真等,是电力电子技术的基础。变流技术包括用电力电子器件构成各种电力变换电路并对其进行控制的技术,以及由这些电路构成电力电子装置及系统的技术。器件制造技术和变流技术相互支持、相互促进。

电能分为直流(Direct Current—DC)和交流(Alternating Current—AC)两种类型,电力变换(Power Conversion,也称作功率变换)的基本类型就是这两种电能之间的四种变换形式,如图 0-2 所示。

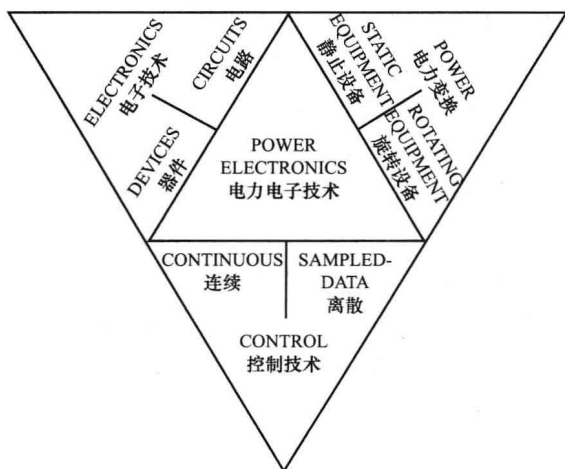


图 0-1 美国 W. Newell 的电力电子学定义

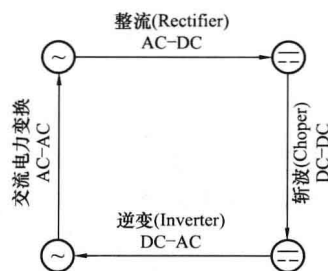


图 0-2 电力变换的基本类型

根据应用目的不同和功率强弱,电子技术可分为信息电子技术和电力电子技术两大类。信息电子技术应用于信息处理,属于弱电领域,包括微电子学、纳米电子学、光电子学等分支。基于信息电子技术出现了计算机技术、通信技术(移动通信、光纤通信、卫星通信与导

航)、互联网技术, 这些技术的发展与融合使人类从电气时代走向了信息时代。而电力电子技术应用于电力变换, 属于强电领域, 包括器件制造技术和变流技术。经过电力电子技术对电力系统产生电能的高效变换之后, 可满足航空航天、一般工业、电力传动、家用电器等各个方面的供电需求。信息电子技术和电力电子技术之间既有一定联系又有所区别。在器件的制造技术方面, 二者理论基础、工艺方法相似, 在电路分析方法上也有许多相通之处, 如数字仿真方法等。二者的一个显著区别是: 在电力电子技术中, 为了避免功率损耗过大, 电力电子器件总是工作在开关状态; 而在信息电子技术中, 既有半导体器件处于放大状态的模拟电子技术, 也有半导体器件处于开关状态的数字电子技术。

电力电子技术具有以下特点。

(1) 以小信号输入控制大功率输出, 使电力电子设备成为强弱电之间接口。这样, 电子技术和计算机的新成果可以通过这一接口移植到传统工业产品, 可以促进传统工业产品的更新换代。如果把计算机比作是现代化生产设备的大脑, 电动机和各种电磁执行元件是手足, 而电力电子装置就是支配手足动作的肌肉和神经。

(2) 在电力电子装置中, 电力半导体器件一般都工作在开关状态, 可以减小自身损耗, 以实现电能的高效变换。但器件在短暂的开关过程中, 仍然会产生一定损耗, 一般需要散热器。

(3) 作为一种应用技术, 电力电子技术的特点是综合性强、涉及面广、与工程实践联系密切。目前, 几乎所有从兆瓦级到吉瓦级的功率变换, 都会用到电力电子技术。

2. 电力电子技术的发展

(1) 电力电子器件的发展。

电力电子器件是电力电子技术的基础, 也是电力电子技术发展的“龙头”, 其发展历程可大致分为两个阶段: 1956 年~1979 年是晶闸管及其派生器件的半控型器件发展阶段, 该阶段的主要应用是电解电源装置、电热冶金用电源及直流传动电源等; 1980 年至今则是多种全控型电力电子器件的发展阶段, 该阶段的主要应用是大功率交流传动及开关电源等。

20 世纪 30~50 年代, 出现了水银整流器(汞弧阀), 可实现大功率电能的控制, 用于电气铁路、直流输电等。1947 年 12 月, 美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉顿组成的研究小组, 研制出一种点接触型的锗晶体管。1955 年, 贝尔实验室开始用硅代替锗制成了电力二极管。1956 年, 贝尔实验室研制出晶闸管雏形。这些技术的发展在器件工艺和电路拓扑方面为电力电子技术的诞生奠定了基础。1957 年第一支大功率半导体器件——晶闸管的元件在 GE 公司问世, 1958 年获得工业应用, 标志着电力电子技术的诞生。1973 年 6 月, 美国 IEEE 三个学会联合发起召开 PESC 会议, William E. Newell 博士首次给出电力电子的经典定义。由于半导体器件用于电能变换具有损耗小、体积小、噪声及污染小等显著优点, 很快取代了水银整流器和旋转变流机组。

20 世纪 70 年代, 晶闸管开始形成由低压小电流到高压大电流的系列产品。由于自身容量的不断增大和性能的不断完善, 已经在交流调压、调功、电解、电镀、冶金、直流调速、交流调速等电力电子设备中广泛应用, 同时, 非对称晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等晶闸管派生器件相继问世, 其派生的半控器件在过去几乎渗透到电力电子技术应用的所有领域, 其功率之大一直都是其他电力半导体器件所无法比拟的。

1969 年美国 GE 公司率先研制成功 200A/600V 的门极可关断晶闸管(GTO), 从此可

自关断的全控型器件受到广泛重视,并迅速发展。电力双极型晶体管(GTR)是20世纪70年代后期出现的产品,它把双极晶体管的应用领域从弱电扩展到强电领域。GTO和GTR的出现,使电力电子技术的应用范围扩展到交流调速、机车牵引、开关电源、中小功率UPS等领域。

20世纪80年代后期,电力场效应晶体管(Power MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)等高频全控器件得到广泛应用,使变频器的输出波形大为改观,谐波含量大为减少,且解决了GTO、GTR变频器工作时产生的噪声问题。高频电力半导体器件的出现,使电力电子设备的工作频率已高达几兆赫兹,体积成倍缩小,促进了变频器和开关电源的广泛应用,对改进生产工艺水平、提高产品质量、降低能耗起到了很大的作用。此外,高频电力电子应用技术及高频传感器、高频电容、高频抗干扰技术等配套设备的迅猛发展及日趋完善,使电力电子设备的高频化应用领域迅速扩大。20世纪90年代中后期集成门极换流晶闸管(IGCT)和电子注入增强栅晶体管(IEGT)的诞生,对高压大电流电力变换控制系统是一个突破。目前,IGCT、IEGT已在大容量电力电子设备中得到应用,国内外均有成套装置应用到轧钢、造纸、水泥、煤炭等工业领域和电动汽车、城市轻轨、机车牵引、船舶推进等交通工具中。集高频、高压和大电流于一身的功率半导体复合器件的出现,标志着传统电力电子技术已经进入现代电力电子技术时代。

电力电子器件发展同时,其驱动和保护技术也日趋完善,为电力电子设备的广泛应用奠定了坚实的基础。自关断器件的基极(或门极、栅极)的驱动和快速保护在应用中是一个关键问题,为此,许多公司生产可关断器件的同时,开发生产了配套的驱动和保护电路,如日本富士电机公司生产的GTR厚膜驱动电路(EXB356、EXB357)、IGBT厚膜驱动电路(EXB840、EXB841、EXB850、EXB851),日本三菱电机公司生产的GTR厚膜驱动电路(M572XX系列)和IGBT厚膜驱动电路(M579系列),东芝公司生产的MOSFET及IGBT混合驱动电路(TLP250),国产的GTR、IGBT、MOSFET及GTO厚膜驱动和保护电路(HL系列),美国IR公司生产的MOSFET和IGBT集成驱动电路(IR21系列)等。

为了使电力电子设备的结构紧凑、体积减小,常常把若干个电力电子器件及必要的辅助元件做成模块的形式,这给应用带来了很大的方便。后来,又把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起,构成功率集成电路(PIC)。目前功率集成电路的功率都还较小,但这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

(2) 电力变换电路的发展。

电力电子电路可以完成AC-DC、DC-AC、DC-DC、AC-AC等各种电力变换,而每种电力变换形式都有多种电路拓扑结构,以适应不同应用场合。整流电路、逆变电路、周波变换电路的理论在功率半导体器件出现之前的水银整流器时代,就已经发展成熟。20世纪70年代以前,整流电路占主导地位;20世纪80年代后逆变电路的应用日益广泛,但是整流电路仍占重要地位。这除了因为整流器应用仍然很广外,还因为在逆变器和斩波器中,都需要直流电源,这些直流电源绝大多数都是通过交流电源整流得到的。在整流电源中,目前常用的几乎都是晶闸管相控整流电路或二极管整流电路。晶闸管相控整流电路需要电网提供大量的无功功率,同时也给电网带来严重的谐波污染。二极管整流电路虽然输入电流的基波没有滞后,位移因数近似为1,但谐波电流却很大,给电网造成了严重的污染。

电力电子设备对电网造成的污染类似现代大工业对地球的污染,也是经历先污染后治理

的过程。目前这种污染仍日趋严重,但人们对防止和治理这种污染的意识已越来越强。治理电力电子设备污染的方法有两种,一种是设法补偿无功功率和抑制谐波,另一种是使电力电子设备本身不消耗无功功率,不产生谐波。补偿无功功率和抑制谐波的装置主要有静止无功功率补偿设备和电力有源滤波器,这两种设备也属电力电子技术的范畴。

与先产生谐波并消耗无功功率、再去进行抑制和补偿的方法相比较,更为积极的办法是让电力电子设备既具有所需要的功能,又不产生谐波,不消耗无功功率。为此,最基本的方法就是在整流电路中采用自关断器件,即采用高功率因数整流装置,并对其进行 PWM 控制。这样既可使输入电流无谐波,又可使其功率因数为 1。在电力电子装置中,随着开关频率的提高,开关损耗也将成比例地增加,开关损耗成了制约开关频率提高的重要原因,同时也成为器件能量损耗的主要部分,使变流器效率降低。另外,随着变流器的高频化,电磁干扰 (EMI) 问题也日益突出。除无功功率和谐波问题外,电磁干扰问题是电力电子设备所产生的另一公害。

20 世纪 80 年代后期出现的软开关 (Soft Switching) 电路是基于谐振原理,可使开关器件在零电压或零电流的条件下动作,因而在理论上可以把开关损耗降为零。零电压开关电路直流侧电压较高,需要采用耐压高的器件,而零电流开关电路的负载电流和谐振电流重叠流过器件,使器件需要的电流容量较大。用这种软开关电路可以使开关损耗降到很低,因而可以使电路的工作频率大大提高。同时,这种电路也可有效地防止电磁干扰。因此,近年来对软开关电路的研究很受关注。

20 世纪 90 年代以来,电力电子技术向高频化和大功率的方向发展,电力电子电路拓扑的研究也活跃起来。近年来一些新的电路拓扑形式如谐振型逆变电路、矩阵式变频电路、多电平逆变电路等不断涌现。人们也期待着通过对电力电子电路拓扑的不断研究,发现一些更新的拓扑形式,使电力电子设备的性能更为优良。

(3) 控制技术的发展。

电力电子的控制技术包括电力电子电路的驱动控制技术 (如相位控制和 PWM 控制技术) 和电力电子设备应用领域的控制技术 (如电机的相量控制和直接转矩控制技术)。早期的晶闸管整流器时期,主要采用的是相位控制和经典的 PI 控制。20 世纪 80 年代以来,在电力电子技术的高频化的发展过程中,一些新的控制方式逐渐占有重要地位,如 PWM 控制方式、应用静止/旋转坐标变换的矢量控制及瞬时无功功率控制、现代控制理论 (包括自适应控制、采用状态观测器的控制及无差拍控制、无传感器控制等)、各种非线性控制 (包括模糊控制、神经元网络控制等)。

晶闸管电路的控制主要采用相位控制方式,这使其在可控整流和有源逆变电路中有比较低的功率因数,同时有比较大的高次谐波电流,对电网产生“污染”,造成了负面影响。与晶闸管电路的相位控制方式相对应,采用全控型器件的电路的主要控制方式为脉冲宽度调制 (PWM) 方式。PWM 控制对推动电力电子技术的发展起了历史性的作用,其应用范围遍及斩波、逆变、整流、变频及交流调压等各种电路。目前各种新的控制方式仍不断出现,矢量控制使交流调速的控制性能可以与直流调速相媲美,使电气传动技术面目一新。由于电力电子电路良好的控制特性及现代微电子技术的不断进步,使得几乎所有新的控制理论、控制方式都得以在电力电子设备上应用或尝试。因此,近年来电力电子设备控制技术的研究十分活跃,各种现代控制理论、专家系统、模糊控制及神经元控制都是研究热点,这使得电力电子

系统的控制技术发展到一个崭新的阶段。

电力电子系统控制技术的进步在很大程度上依赖于微处理器。微处理器性能的迅速提高使许多原来无法实现的控制方式得以实现。特别是 20 世纪 80 年代后期出现的具有浮点小数运算能力的 32 位 DSP 芯片,其运算速度快、功能强,已广泛运用于各种电力电子设备。目前基于微处理器的数字控制技术应用范围越来越广,在许多范围已取代了原有的模拟控制。

3. 电力电子技术的主要应用领域

进入 21 世纪,随着新理论、新器件、新技术的不断涌现,特别是与计算机控制和信息技术的日益融合,电力电子技术的应用领域也必将不断地得以拓展。目前,电力电子技术的应用已从机械、石化、纺织、冶金、电力、铁路、航空、航海等领域,进一步扩展到汽车、现代通信、家用电器、医疗设备、灯光照明等领域。以下分几个应用领域简要介绍。

(1) 一般工业。

工业中大量应用各种交、直流电动机。直流电动机有良好的调速性能,为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子设备。近年来,由于电力电子变频技术的迅速发展,使得交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美,交流调速技术大量应用并占据主导地位,大至数千千瓦的各种轧钢机,小到几百瓦的数控机床的伺服电动机,以及矿山牵引等场合都广泛采用交直流调速技术。一些对调速性能要求不太高的大型鼓风机等近年来也采用了变频装置,以达到节能的目的。还有些不调速的电机为了避免启动时的电流冲击而采用了软启动装置,这种软启动装置也是电力电子设备。

电化学工业大量使用直流电源,电解铝、电解食盐水等都需要大容量整流电源。电镀装置也需要整流电源。电力电子技术还大量应用于冶金工业中的高频或中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等领域。

(2) 交通运输。

电气化铁道中广泛采用电力电子技术。电气机车中的直流机车中采用整流装置,交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆。在磁悬浮列车中,电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电动机传动外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。

电动汽车的电机靠电力电子设备进行电力变换和驱动控制,其蓄电池的充电也离不开电力电子设备。一台高级汽车中需要许多控制电机,它们也要靠变频器和斩波器驱动控制。

飞机、船舶需要很多不同要求的电源,因此航空和航海都离不开电力电子技术。

电梯的驱动控制也需要电力电子技术。以前的电梯大都采用直流调速系统,而近年来交流变频调速已成为主流。

(3) 电力系统。

电力电子技术在电力系统有着非常广泛的应用。据统计,发达国家在用户最终使用的电能中,有 80% 以上的电能经过一次以上电力电子变流装置的处理。电力系统在通向现代化的进程中,电力电子技术是关键技术之一。可以毫不夸张地说,如果离开电力电子技术,电力系统的现代化是不可想象的。

以高压直流输电技术、柔性交流输电技术、用户电力技术和分布式发电技术为代表的先进电力电子技术广泛应用到我国电网中,它是建设统一智能电网的重要基础和手段。智能电网是以先进的计算机、电子设备和电力开关器件为基础,通过引入通信、自动控制和其他信息技术,从而实现对现有电力网络的改造,达到使电力系统更加经济、安全、高效和环保这

一根本目标。在智能电网的几大关键性支撑技术中,蓬勃发展的现代电力电子技术的重要性逐渐凸显。

高压直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,其送电端和受端的换流站均采用晶闸管变流装置。近年来,直流输电技术又有新的进展,基于电压源换流器(VSC)的柔性直流输电是一种以电压源换流器和脉冲宽度调制技术(PWM)为基础的新型直流输电技术,解决了用直流输电向无交流电源的负荷点送电的问题,可用于孤岛供电、城市配电网增容改造、交流系统间互联和大规模风力发电场并网等。

智能电网对电能质量和电网工作状况的稳定有较高要求,这些要求的实现需要电力系统有无功补偿和谐波抑制技术的密切配合。在智能电网概念出现之前就已经发展起来的柔性交流输电(FACTS)技术也是依靠电力电子设备得以实现的,可提高电网的输送容量和可靠性,由基于半控器件的静止无功补偿器(SVC)及基于可关断器件的静止同步补偿器(STATCOM)、统一潮流控制器(UPFC)、有源电力滤波器(APF)等新型电力电子设备构成,具有更为优越的无功功率补偿和谐波抑制的性能。在配电网系统中,目前广泛采用的用户电力技术装置主要有有源电力滤波器(APF)、动态电压调节器(DVR)以及配电网静止同步补偿器等电力电子设备,可用于防止电网瞬间停电、瞬时电压跌落、电压闪变等,以改善供电效果,进行电能质量控制。这些也是智能电网中配电网自动化的重要组成部分。

传统的发电方式是火力发电、水力发电以及核能发电,进入21世纪后,随着煤、石油及天然气等不可再生资源的逐渐消耗,人们日益感受到能源危机的逼近,越来越重视各种可再生能源构成的新型发电方式。其中风力发电、光伏发电已进入大规模发展阶段,在电网中的渗透率不断增加。由于可再生能源的能量密度低、稳定性差,这些新型的发电方式都需要电力电子技术参与调节与控制,当这些发电方式发出来的电能参与储能和联网时亦离不开电力电子技术。

在全球能源问题日益紧张的今天,智能电网的出现无疑将是一场引人瞩目和影响巨大的变革。现代电力电子技术对智能电网可以起到多方面的支撑和提升作用。随着新型电力电子器件、电路拓扑及控制技术的不断涌现,有理由相信,现代电力电子技术将更好地为智能电网的建设服务。

(4) 计算机与家用电器。

计算机和各种电子设备都需要不同电压等级的直流电源供电。过去都是采用线性稳压电源或整流电源,现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。由于高频开关电源体积小、质量轻、效率高,逐渐取代了线性电源。采用晶体管镇流器的照明灯发光效率高,节省电能显著,通常被称为“节能灯”,正逐步取代传统的白炽灯和日光灯。电视机、变频空调、洗衣机、微波炉等也都采用了电力电子技术。电力电子技术的广泛应用使我们的生活变得越来越方便。

总之,电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙的探索到国民经济各个环节以及人们的衣食住行都有电力电子技术的参与和贡献。现代化的社会和生活几乎每时每刻都离不开电能,而电力电子技术则是人们高效、方便地使用电能的方法和手段。电力电子技术研究的是各种电能的变换方式,也可称之为电源技术;同时它又十分重视变换过程中的节能与效率,因此,电力电子技术又是一种重要的节能技术。

4. 本书的主要内容

本书主要介绍电力电子技术的基本原理及其在电力系统中的应用,可以分为器件、电

路、控制和应用四大部分。第 1 章内容为电力电子器件，作为后续电路分析的基础，重点介绍几种广泛应用的电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数及应用情况。第 2~5 章为四种基本电力变换电路及其控制方法，是电力电子变流技术的核心部分，也是本课程的重点学习内容。第 6~9 章为电力电子技术在电力系统中的应用介绍，涵盖了传统晶闸管相控整流电路构成的高压直流输电、IGBT 的 PWM 变流器为核心的风力发电并网控制等广泛应用的电力电子装置，分析了定电压和定电流控制、矢量控制、瞬时无功理论等不同应用领域中的控制策略。



1 电力电子器件

半导体器件不仅用于信息及信号处理,而且也用于电气与电子电路中电流与功率的控制。用于电能的变换与控制时,这些器件必须承受相当大的电流与电压,通常被称为功率半导体器件或电力电子器件,电力电子器件是电力电子技术的基础。本章首先简述电力电子器件的概念、基本类型和特点,然后重点介绍几种广泛应用的电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数及应用情况,最后简单介绍一些新型电力电子器件及电力电子器件的发展趋势。

1.1 概 述

1.1.1 电力电子器件的概念与特征

电力电子器件与普通半导体器件一样,目前它所采用的主要材料仍然是单晶硅,但由于电压等级和功率要求不一样,制造工艺也有所不同。以开关方式应用于主电路之中,对电能进行变换和控制的半导体器件称为电力电子器件。其主要特点如下:

- (1) 电力电子器件具有体积小、质量轻、寿命长、耗电省、耐振性好等优点。
- (2) 与用于电子电路的半导体器件相比,由于电力电子器件直接用于电力电路,所以承受电压、电流的能力是它的重要参数,提高其所能处理电功率的能力是电力电子器件制造和应用的首要问题。
- (3) 电力电子器件一般都工作在开关状态,目的是为了减小本身的损耗,高效地完成对电能的变换与控制。
- (4) 实际应用中,电力电子器件还需要控制电路、驱动保护电路以及必要的散热措施等,才能构成一个完整的电力电子系统。

1.1.2 电力电子器件的基本类型

近 60 年来,电力电子器件经历了非常迅猛的发展,从大功率电力二极管、半控型器件晶闸管到开通关断都可控的全控型器件,从驱动功率较大的电流控制器件到驱动功率很小的电压控制器件,从低频开关到高频开关,从低压小功率到高压大功率,先后出现了多种电力电子器件。各种电力电子器件见表 1-1 所示。对其可从以下三个角度进行分类。

表 1-1 各种类型的电力电子器件

类型			名称	
			中文名称	英文名称
分立器件	不可控器件		电力二极管	Power Diode
	半控型器件		晶闸管(可控硅)	Thyristor (SCR)
	全控型器件	电流控制器件	电力晶体管(双极型晶体管)	GTR (BJT)
			门极可关断晶闸管	GTO