

DIANLI DIANZI JISHU



电力电子技术

主 编 姚绪梁
副主编 张敬南 卢 芳 巩 冰

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

电力电子技术

主 编 姚绪梁

副主编 张敬南 卢 芳 巩 冰

内 容 简 介

本书主要阐述电力电子技术的基本原理。全书共9章,可分为3个单元:概述和器件单元,包括第1章和第2章,主要阐述电力电子技术的发展历史和现状,各种电力电子器件的工作原理、基本特性和主要参数,器件的驱动、保护及串并联等;电力电子变流电路单元,包括第3章至第6章,分别阐述各种变流电路拓扑结构、工作原理、典型计算及仿真研究,这些电路包括整流电路、直流-直流变换电路、逆变电路和交流-交流变换电路;电力电子电路控制新技术及应用单元,包括第7章至第9章,其中第7章重点阐述PWM技术的工作原理及其在电力电子电路中的应用,第8章阐述3类软开关电路的工作原理,第9章阐述电力电子技术的应用,重点介绍了电力电子技术在船舶电力推进中的应用。

本书可作为电气工程及其自动化专业、自动化专业及其他相关专业本科生教材,也可作为从事本专业工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/姚绪梁主编. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2017.6
ISBN 978-7-5661-1212-5

I. ①电… II. ①姚… 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(2016)第 024203 号

选题策划 丁 伟
责任编辑 丁 伟
封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 18
字 数 466 千字
版 次 2017 年 6 月第 1 版
印 次 2017 年 6 月第 1 次印刷
定 价 39.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

随着功率半导体技术、控制技术、各种电气装置及材料技术的进步,电力电子技术获得了快速发展,并在各个领域获得广泛的应用。50 多年来,电力电子技术作为不同电能形式之间的桥梁,与微电子技术、自动控制技术等相辅相成,成为电气工程领域最为活跃的分支。特别是随着煤炭、石油和天然气等化石能源的日益枯竭,太阳能、风能、潮流能等清洁能源的使用得到迅速发展。而获取的不稳定性是清洁能源的主要缺点之一,其更需要依靠电力电子变换装置进行变压、变频等电力变换,达到可使用的状态。因此,社会对具有电气工程技术的科研技术人才的需求不断增加,作为电气工程领域的专业基础课,渴望学习电力电子技术课程的学生和技术人员的数量越来越多。

本书的编写吸收了编者多年的科研积累,在强调内容体系的全面性和合理性的同时,着重强调了电力电子电路的工作过程和基本分析方法。本书紧跟电力电子技术的发展,适当增加了电力电子技术领域的最新成果,以保持本书内容的新颖性和先进性。

本书共分 9 章:第 1 章介绍了电力电子技术的概念、电力电子技术的发展史及电力电子技术的应用;第 2 章讲述了电力电子器件及其驱动和保护电路,包括电力二极管、半控型晶闸管和全控型器件;第 3 章至第 6 章以电力电子电路为内容,分别介绍了整流电路、直流-直流变换电路、逆变电路和交流-交流变换电路这四种基本变换电路;第 7 章介绍了 PWM 控制技术,包含 PWM 控制的基本原理、PWM 逆变电路及其控制方法、PWM 跟踪控制技术、PWM 整流电路及其控制方法等部分;第 8 章专门讨论了谐振软开关技术,以适应变换电路高频化的发展趋势;第 9 章介绍了电力电子技术的应用实例,其内容典型综合了各类电路的具体应用。

姚绪梁教授为本书主编,编写了第 1,2,4,8 章内容;张敬南副教授编写了第 6,7,9 章内容;卢芳讲师编写了除 3.6 节全控整流电路的有源逆变工作状态部分外的第 3 章内容;巩冰讲师编写了第 5 章和 3.6 节内容。

研究生王秋瑶、蔡晶、王选卓、江晓明等同学参与了第 1,2,4,8 章的文字录入、绘制插图等工作,在此一并表示感谢!

本书是面向电气工程及其自动化专业的本科教材,同时也可作为自动化专业学生的参考书。

由于时间限制和编者学识的局限,书中难免有错误和遗漏之处,敬请读者在使用过程中提出宝贵意见。

编 者

2016 年 12 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电力电子技术概念	1
1.2 电力电子技术的发展史	3
1.3 电力电子技术的应用	6
1.4 电力电子技术的未来发展前景	9
1.5 说明	10
第2章 电力电子器件	11
2.1 电力电子器件概述	11
2.2 电力二极管	12
2.3 晶闸管	18
2.4 其他类型晶闸管	24
2.5 全控型电力电子器件	25
2.6 电力电子器件的驱动和保护	40
本章小结	51
思考题与练习题	52
第3章 整流电路	53
3.1 单相可控整流电路	53
3.2 三相可控整流电路	67
3.3 交流电路中电感对整流特性的影响	80
3.4 电容滤波的不可控整流电路	82
3.5 整流电路反电动势负载	88
3.6 全控整流电路的有源逆变工作状态	91
3.7 晶闸管整流电路的触发控制	96
3.8 整流电路的仿真	105
本章小结	115
思考题与练习题	115
第4章 直流-直流变流电路	117
4.1 基本斩波电路	117
4.2 复合斩波电路和多项多重斩波电路	127
4.3 直流-直流间接变流电路	130
4.4 直流斩波电路的仿真	135
本章小结	141
思考题与练习题	141
第5章 逆变电路	143
5.1 逆变电路的基本概念	143

5.2	电压型逆变电路	147
5.3	电流型逆变电路	154
5.4	逆变电路的多重化	160
5.5	多电平逆变电路	163
	本章小结	166
	思考题与练习题	166
第6章	交流-交流变流电路	168
6.1	交流调压电路	168
6.2	其他交流电力控制电路	178
6.3	交-交变频电路	179
6.4	矩阵式变频电路	188
6.5	交流调压电路仿真	191
	本章小结	198
	思考题与练习题	199
第7章	PWM 控制技术	200
7.1	PWM 控制技术的基本原理	200
7.2	PWM 逆变电路控制方法	202
7.3	PWM 跟踪控制技术	213
7.4	PWM 整流电路及其控制方法	216
7.5	PWM 电路仿真	220
	本章小结	224
	思考题与练习题	224
第8章	软开关技术	226
8.1	软开关的基本知识	226
8.2	典型的软开关电路	230
	本章小结	237
	思考题与练习题	237
第9章	电力电子技术的应用	238
9.1	直流电力拖动系统	238
9.2	变频器和交流调速系统	248
9.3	电源	255
9.4	功率因数校正技术	262
9.5	电力系统中的应用	266
9.6	船舶电力推进系统	273
9.7	电力电子技术的其他应用	278
	本章小结	280
	思考题与练习题	280
	参考文献	282

第 1 章 绪 论

什么是电力电子技术？其与模拟电子技术和数字电子技术有什么关系？其发展过程如何？我国电力电子技术发展得如何？船舶上应用的电力电子技术有哪些？对于刚刚开始学习电力电子技术的同学或对电力电子技术并不了解的人来说会有上述问题，甚至更多。本书在绪论中将针对上述问题进行一一解答，使读者对电力电子技术有一个较为全面的了解。

本章共分 3 大部分：电力电子技术概念，介绍了目前国内外对电力电子技术的定义，并给出作者认为较为合适的概念；电力电子技术的发展史，介绍了电力电子技术的起源及发展过程；电力电子技术的应用，介绍了目前电力电子技术的应用领域及今后的发展方向。

1.1 电力电子技术概念

电力电子技术(Power Electronics)出现于 20 世纪 60 年代，又名电力电子学、功率电子学。1974 年，美国学者 W. Newell 提出：电力电子学是由电子学(器件、电路)、电力学(静止变换器、旋转电机)、控制理论(连续、离散)三个学科交叉形成的，如图 1-1 所示。现已与模拟电子学、数字电子学并列成为三大电子学。

目前国际上出现了电力电子技术的新定义，如图 1-2 所示。新的定义几乎覆盖了所有电工及电气学科，体现了电力电子技术是一门多学科相互渗透的综合性技术学科。两种定义的差别反映了电力电子技术的迅速发展以及应用领域的不断扩大，预示着广阔的发展前景和未来。

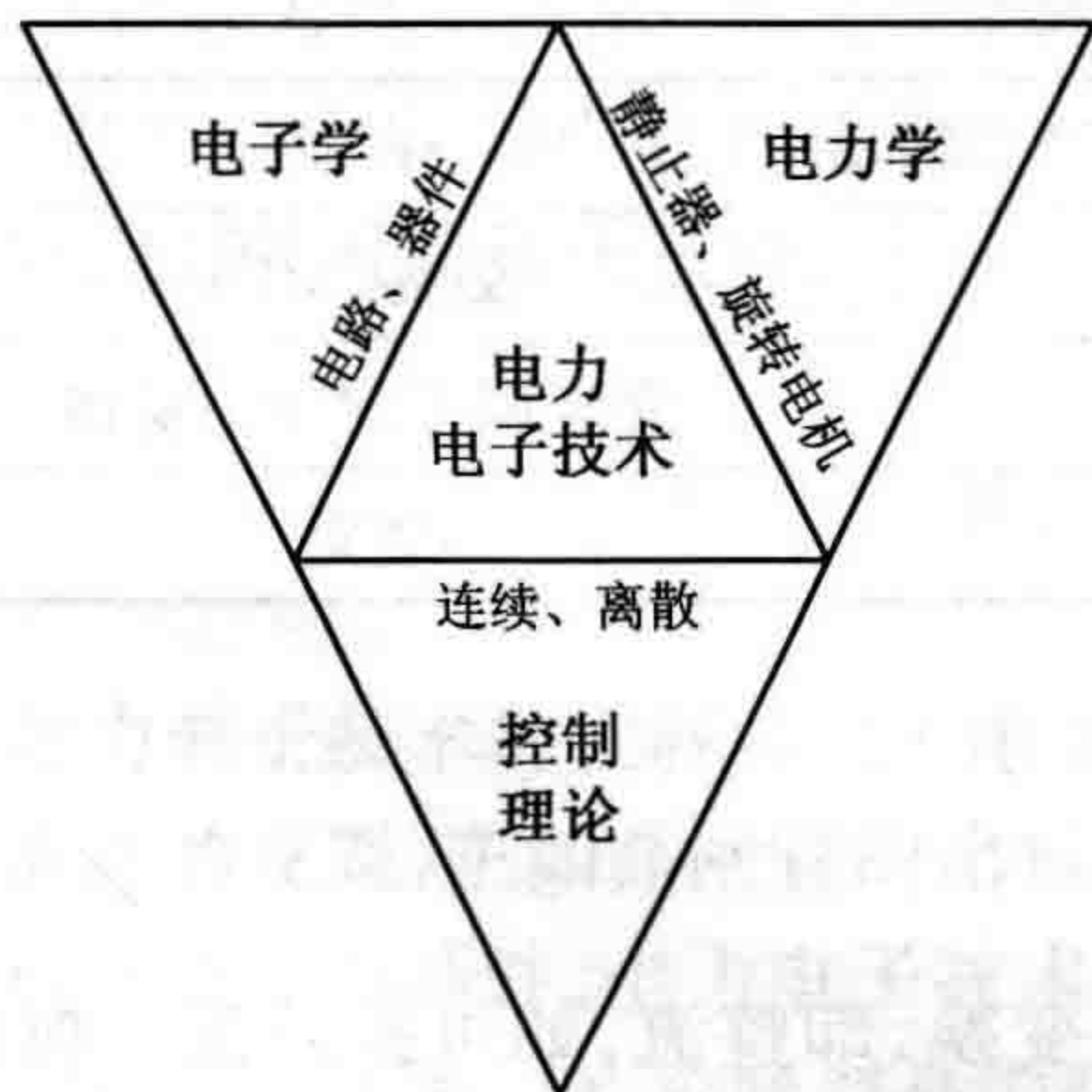


图 1-1 电力电子技术的 Newell 定义

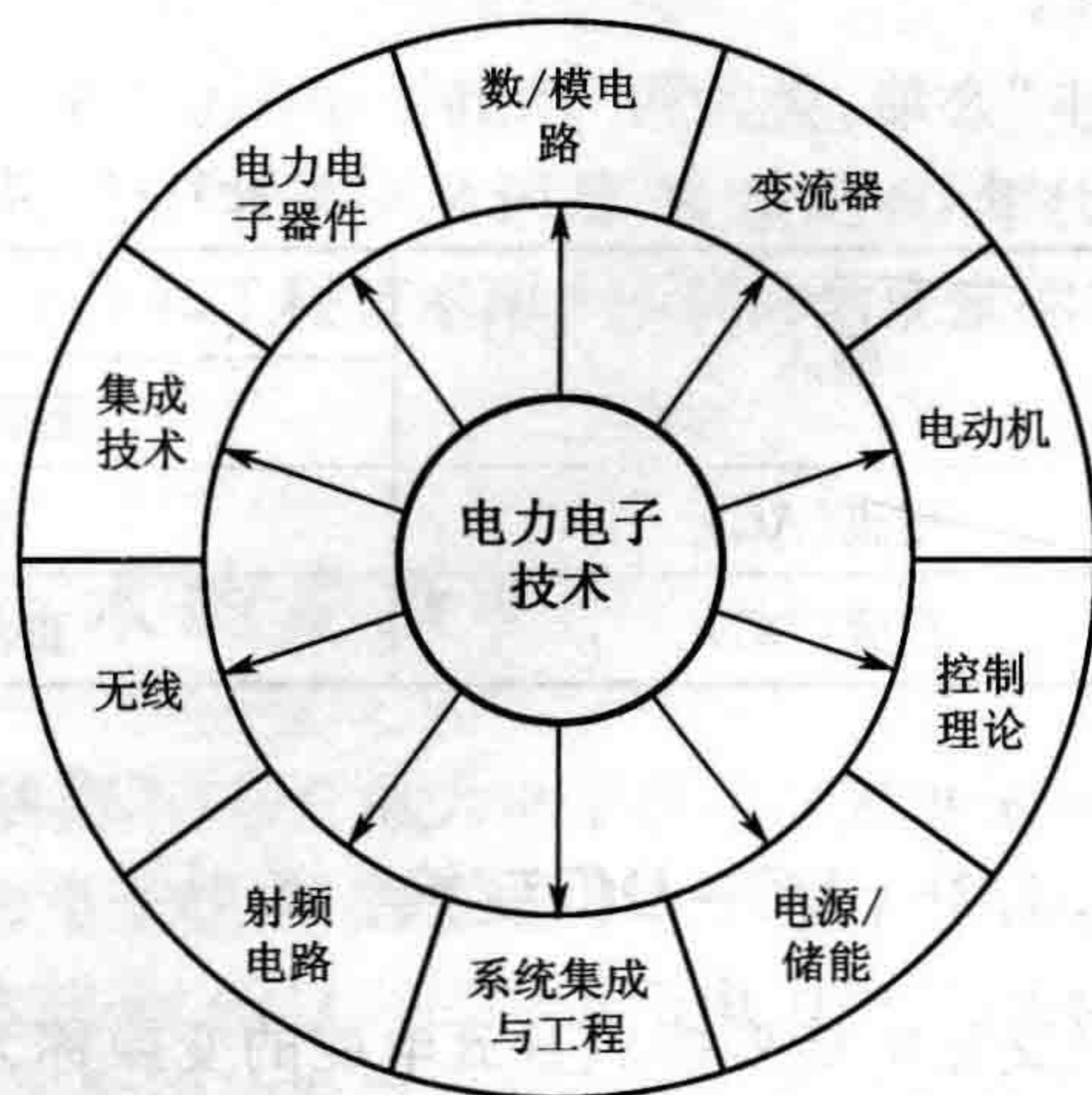


图 1-2 电力电子技术新定义

国际电气与电子工程师协会(IEEE)对电力电子技术的定义为:“有效地使用电力半导体器件,应用电路和设计理论以及分析开发工具,实现对电能的高效能变换和控制的一门技术,它包括电压、电流和频率、波形等方面的变换。”

具体地说,电力电子技术就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术,包括电能变换、电力电子器件、电力电子主电路、驱动与保护电路、电力电子的特殊应用等。

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。信息电子技术包含模拟电子技术和数字电子技术。目前所用的电力电子器件一般采用半导体制成,故称为电力半导体器件。在电力电子技术中应用的电路叫作电力电子电路;在信息电子技术中应用的电路叫作信息电子电路。二者都是对控制对象进行传输和控制。电力电子技术所变换的“电力”的功率可以大到数百兆瓦,甚至更大;也可以小至数瓦,甚至是毫瓦级,所以不能单靠变换的功率的大小来区分电力电子技术和信息电子技术。信息电子技术主要用于信息处理,而电力电子技术主要用于电力变换,这是二者本质上的不同;另外,由于信息电子技术传输的对象主要是信息,其对信息电子电路的损耗要求并不严格,如信息电子技术中三极管的放大区的功耗远远大于截止区和饱和区的功耗,所以其电路的功耗一般较大;而电力电子技术中传输的对象是电能,其对电力电子电路的电能损耗方面要求严格,电力半导体器件一般应用在饱和区和截止区,所以电力电子电路的电能损耗较小,这也是区别二者的另一因素。

通常所用的电力有交流和直流两种。从公用电网上直接得到的电力是交流的,从蓄电池和干电池中得到的电力是直流的。从这些电源得到的电力往往不能直接满足要求,需要进行电力变换。如表 1 - 1 所示,电力变换通常可分为四大类,即交流变直流(简称 AC - DC)、直流变交流(简称 DC - AC)、直流变直流(简称 DC - DC)和交流变交流(简称 AC - AC)。如图 1 - 3 所示,交流变直流称为整流,直流变交流称为逆变,直流变直流称为直流斩波,交流变交流称为交流调压变频,当然还包括相数(单相、三相或更多相)之间的变换。进行上述电力变换的技术也称为变流技术。在某些变流装置中,可能同时包含两种以上的变换过程。

表 1 - 1 电力变换的种类

输入	输出	
	直流(DC)	交流(AC)
交流(AC)	整流	交流调压、变频、变相
直流(DC)	直流斩波	逆变

1.1.1 AC - DC 变换

把交流电能变换成直流电能的变换称为 AC - DC 变换,即整流,如可控整流。典型的 AC - DC 变换是利用晶闸管和相控技术依靠电源电压的正负交变进行换流的。目前工业中应用的大多数变流装置都属于这类整流装置。其特点是控制简单,运行可靠,适宜大功率应用。

1.1.2 DC-AC 变换

把直流电能变换成频率固定或可调的交流电能的变换称为逆变。按电源性质可分为电压型和电流型两种；按控制方式可分为六拍（六阶梯）方波逆变器、PWM 逆变器和谐振直流开关（软开关）逆变器；按换流性质可分为依靠电源换流的有源逆变和全控型器件构成的无源逆变。逆变装置主要用于机车牵引、电动车辆、交流电机调速、不间断电源和感应加热等。

1.1.3 DC-DC 变换

把幅值固定或变化的直流电变换成可调或恒定的直流电称为 DC-DC 变换。按输出电压与输入电压的相对关系可分为降压式、升压式和升降压式。DC-DC 变换器被广泛地应用于计算机电源、各类仪器仪表、直流电机调速和金属焊接等。谐振型 DC-DC 变换器可减小变换器体积、质量，并提高可靠性。这种变换器有效地解决了开关损耗和电磁干扰问题，是 DC-DC 变换的主要发展方向。

1.1.4 AC-AC 变换

把电压幅值、频率固定或变化的交流电变换成电压幅值、频率可调或固定的交流电，还包括变换前后相数的变化，即为 AC-AC 变换，通常有交-交变频器和交流调压器。

变流技术是一种电力变换的技术，相对于电力电子器件制造技术而言，是一种电力电子器件的应用技术，它的理论基础是电路理论。变流技术主要包括：由电力电子器件构成各种电力变换的主电路、对主电路进行控制的技术，以及用这些技术构成电力电子装置和电力电子系统的技术。通常所说的“变流”就是指上述 4 种变换方式。例如，我们常见的充电器就使用了交流电变直流电的变流技术。

目前，电力电子技术方面包含“电力电子学”和“电力电子技术”两大类，那么“电力电子学”和“电力电子技术”的区别有哪些呢？电力电子学这一名词是 20 世纪 60 年代出现的。“电力电子学”和“电力电子技术”是分别从学术和工程技术两个不同的角度来称呼的，其实际内容并没有很大区别。

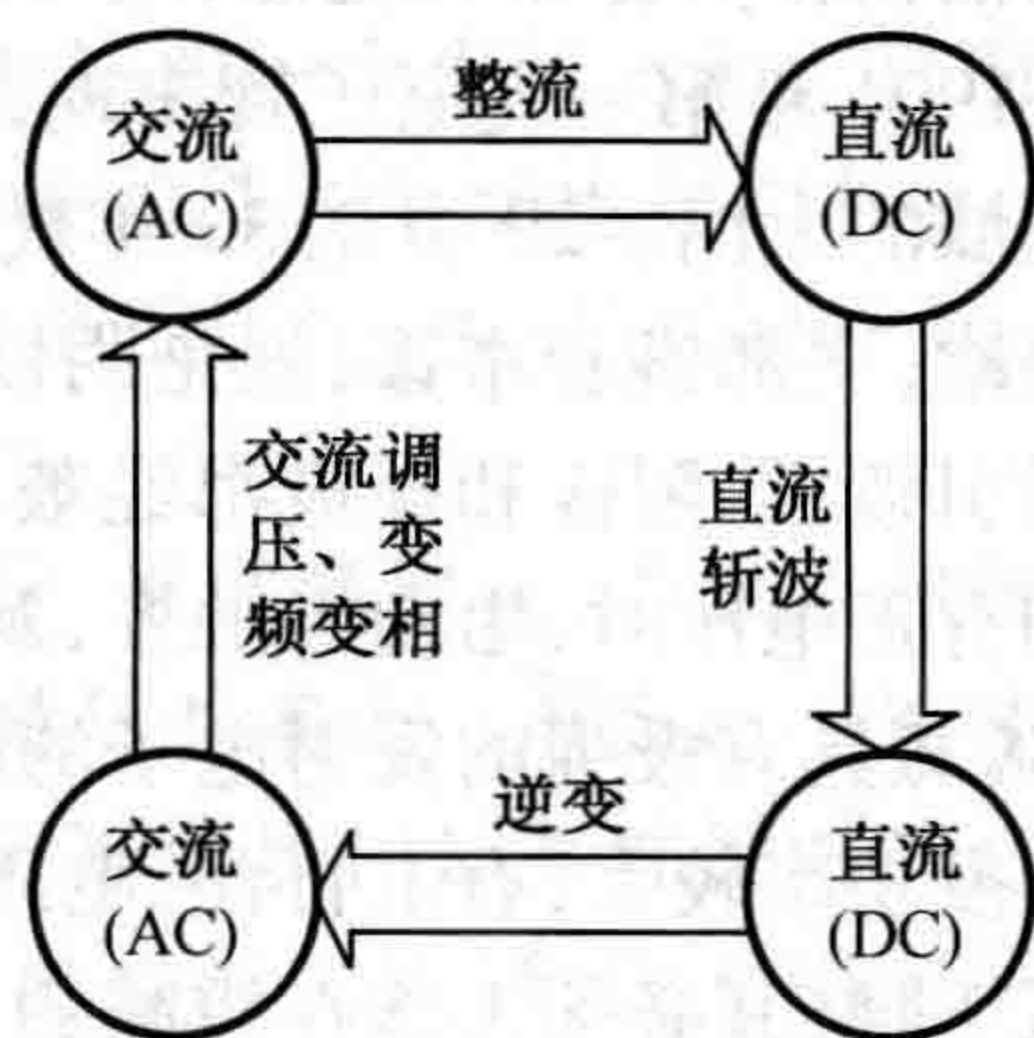


图 1-3 电力电子变流技术分类图

1.2 电力电子技术的发展史

电力电子技术的发展与电力电子器件的发展密不可分，电力电子技术的发展依赖电力电子器件的发展，正如晶闸管的出现产生了电力电子技术，随着电力电子器件由半控型器件发展到全控型器件，电力电子技术也有了巨大进步，所以大部分关于电力电子技术的书中介绍电力电子技术的发展都是围绕着电力电子器件的发展展开的。下面首先介绍电力电子器件的发展史。

大多数电力电子技术书籍中均以 1957 年第一支晶闸管的出现作为电力电子技术诞生的标志。在晶闸管出现以前，用于电力变换的装置是什么样的呢？最早的电力变换是通过电动机-发电机组进行转换的，即变流机组，也被称为旋转变流机组，我们现在使用的变流

器以前被称为静止变流器,是与旋转变流机组的称谓相对应的。

1904 年第一支电子管出现,它能在真空中对电子流进行控制,打开了电子技术用于电力领域的大门。20 世纪 30 年代出现了水银整流器(Mercury Rectifier),其结构是一个密封的铁罐,底部盛着水银,就是阴极,顶部引出阳极,在阳极和阴极之间(接近水银)引出栅极,也叫引弧极,阳极和栅极都经玻璃绝缘子引出。它的工作情况和晶闸管非常相似,是在阳极加有正电压时,由栅极触发,触发后,栅极至阴极形成一小电弧,小电弧在阴极面形成弧斑,弧斑具有极强的发射电子的能力,促使阳极至阴极导通,电流过零时熄灭。其缺点是栅极触发功率较大,有上百瓦,电压也要 200 ~ 300 V,水银整流器的阳极和阴极间有数十伏的电弧压降,其必须工作在较高的电压下才能获得较高的运行效率,所以采用水银整流器的整流装置规定取 825 V 直流工作电压,这使它的应用灵活性受到限制。20 世纪 50 年代水银整流器达到鼎盛时期,其应用遍及电解冶炼和电化学工业、电力机车牵引、城市无轨电车的整流站等领域。

1947 年,美国著名的贝尔实验室发明了晶体管,引发了电子技术的一场革命。20 世纪 50 年代初期,硅二极管获得了应用。硅二极管是最早用于电力领域的半导体器件。

1956 年美国贝尔公司发明了 PNP 可触发晶体管,1957 年通用电器(GE)进行了商业化开发,并命名为晶体闸流管,简称为晶闸管(Thyristor)或可控硅(简称 SCR)。晶闸管出现后,其优越的电气性能和控制性能,使其很快就取代了旋转变流机组和水银整流器,并且其应用范围迅速扩大。

晶闸管通过门极的控制能够使其导通而不能使其关断,故称其为半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式,简称相控方式。晶闸管的关断通常依靠电网电压或关断电路等外部条件来实现,同时晶闸管的开关频率较低(早期晶闸管的开关频率大约在 1 kHz 以内),这就使得晶闸管的应用受到了很大的限制。

20 世纪 70 年代后期,以门极可关断晶闸管(简称 GTO)、电力晶体管(简称 GTR)和电力场效应晶体管(简称电力 MOSFET)为代表的全控型器件迅速发展。全控型器件是通过门极(也称基极或栅极)的控制既可使其开通又可使其关断的器件。全控型器件的开关频率普遍高于晶闸管,可用于开关频率较高的电路。这期间脉冲宽度调制(简称 PWM)技术得到了迅速发展。PWM 技术在电力电子变流技术中占有十分重要的地位,它在直流斩波、整流、交流-交流控制特别是逆变等电力电子电路中均有应用。它使电力电子变流电路中的动、静态输出特性大为改善,对电力电子技术的发展产生了深远的影响。

在 20 世纪 80 年代后期,出现了结合 MOSFET 和 GTR 的复合型器件,即绝缘栅双极型晶体管(简称 IGBT)。它把 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快的优点和 BJT 的通态压降小、载流能力大、可承受电压高的优点集于一身,性能十分优越,使之成为现代电力电子技术的主导器件。与 IGBT 相对应,MOS 控制晶闸管(简称 MCT)和集成门极换流晶闸管(简称 IGCT)复合了 MOSFET 和 GTO,它们综合了这两种器件的优点,但由于其受到生产工艺高及生产厂家数量过少等限制,一直没有被普遍应用。目前随着 IGBT 生产工艺的进步,在中小功率的市场上 IGBT 已占据主导地位,并有往中大功率的市场拓展的趋势。

为了使电力电子装置结构紧凑、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、保护电路和电力电子器件集成在一起,构成电力电子集成电路(简称 PIC)、智能功率模块(简称 IPM),目前电力电子集成电路的功率都还较小,电压也较低,它面临着电压隔离(主电路为高压,而控

制电路为低压)、热隔离(主电路发热严重)、电磁干扰(开关器件通断高压大电流,它和控制电路处于同一芯片)等几大难题,但这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。目前世界上许多大公司已开发出 IPM 智能化功率模块,除了集成功率器件和驱动电路以外,还集成了过压、过流和过热等故障检测电路,并可将监测信号传送至模块外,通过对该信号的检测和处理以保证 IPM 自身不受损害。

现在电力电子器件的研究和开发已进入大功率化、高频化、标准模块化、集成化和智能化时代。由于加工工艺的不断进步,各类电力电子器件的容量日益增大。电力电子器件的高频化是今后电力电子技术创新的主导方向,而硬件结构的标准模块化是器件发展的必然趋势。目前先进的模块,已经包括开关元件和与其反向并联的续流二极管,以及驱动保护电路等多个单元,都已标准化生产出系列产品,并且可以在一致性与可靠性上达到极高的水平。

近年来,宽禁带材料的电力电子器件得到了很大发展,将成为未来电力电子器件的主力。理论和多年的研发实践都已证明,碳化硅、氮化镓和金刚石等宽禁带半导体比硅更适合用来制造电力电子器件。随着材料与器件工艺以及封装技术的逐渐完善,这些器件表现出比一般电力电子器件好得多的高阻断电压、低通态电阻和低开关损耗以及耐高温抗辐射等特点,目前碳化硅电力二极管已获得很好的应用。使用宽禁带器件的装置因为散热条件的简化和无源元件的缩小而具有更大的功率密度。

1960 年我国研究成功硅整流管,1962 年我国研究成功晶闸管,20 世纪 70 年代出现电力晶体管、电力场效应管。虽然我国电力电子器件的研究开发已有 50 多年的历史,但是由于受到国内半导体材料、器件设计、生产制造工艺水平等因素的制约,我国研发电力电子器件与国外相比仍有很大差距,具体表现在器件的种类、器件的容量以及器件的可靠性等方面。我国在 IGBT,IGCT,IPM 等全控型器件设计生产方面起步很晚,2010 年以后陆续才有国营和民营企业涉足 IGBT 的设计生产领域,2012 年 7 月份我国已经开始了 8 in(1 in = 2.54 cm) IGBT 芯片生产线的建设,6 500 V/600 A,3 300 V/1 200 A,1 700 V/1 200 A IGBT 模块已经通过技术鉴定。可以预见,经过我国科技工作者的不懈努力,我们一定能放心地使用我国自行设计、研发、生产的 IGBT 等全控型器件。

我们也应该清醒地认识到我国开发研制电力电子器件的综合技术能力与国外发达国家相比,仍有较大的差距,要发展和创新我国电力电子技术,并形成产业化规模,就必须走产、学、研创新之路,即牢牢坚持和掌握产、学、研相结合的方法,走共同发展之路。从跟踪国外先进技术,逐步走上自主创新;从交叉学科的相互渗透中创新,从器件开发选择及电路结构变换上创新,这对电力技术创新是尤其实用的;也要从器件制造工艺技术引导创新,从新材料科学的应用上创新,以此推动电力电子器件制造工艺的技术创新,提高器件的可靠性,由此形成基础积累型的创新之路;并要把技术创新与产品应用及市场推广有机结合,加快科技创新自我强化的循环,促进和带动技术创新,以使我国电力电子技术及器件制造工艺水平得以长足地发展,并形成一个新的产业,转化为巨大的生产力,推动我国工业领域由粗放型经营走向集约型经营,促进国民经济高速、高效、可持续发展。

1.3 电力电子技术的应用

电力电子技术的特点之一是开关控制,通态压降很小,本身的损耗很低。近年来单片机、ARM、DSP、FPGA 等控制芯片的运算速度和运算精度的不断提高,为电力电子设备采用现代智能控制算法提供了基础,PWM 技术、软开关技术的引入在降低电力电子设备自身损耗的同时提高了电力电子设备的输出效率,具有明显的节能效果。在能源紧张的今天,节能将是长期受关注的话题。

近年来,电力电子技术得到了迅猛发展,经过变流技术处理的电能在整个国民经济的耗电量中所占比重越来越大,已成为其他工业技术发展的重要基础。它不仅用于一般工业,也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等,在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。下面举例概括说明。

1.3.1 传统电力电子技术的应用

1. 在工业和民用电源系统中的应用

工业中大量应用各种交、直流电动机,其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置,其精确调速用的驱动器也是采用电力电子技术。各种轧钢机、数控机床的伺服电动机,以及矿山牵引等场合都广泛采用电力电子交流调速技术。一些对调速性能要求不高的大型鼓风机等设备近年来也采用了变频技术,以达到节能的目的。还有些并不特别要求调速的电动机,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装置。

耗电最多的是电解铝和烧碱工业,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场合。

2. 电力电子技术在电力系统中的应用

在长距离、大容量输电方面直流输电有很大的优势,其送电端的整流阀和受电端的逆变阀一般采用晶闸管变流装置,而轻型直流输电则主要采用全控型的 IGBT 器件。

无功补偿和谐波抑制(VAR)对电力系统具有重要的意义。晶闸管控制电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等新型电力电子装置具有较好的无功功率和谐波补偿的性能。在配电网系统中,电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等故障,以进行电能质量控制,改善供电质量。

3. 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。

电动汽车或混合动力汽车中的电机靠电力电子装置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装置。一辆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并控制。

飞机、船舶需要很多不同型号的电 源,因此航空和航海都离不开电力电子技术。

4. 电子装置用电源

由于高频开关电源体积小、质量轻、效率高,现在已逐步取代了传统的线性稳压电源。各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。现在一般均采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在大都采用高频开关电源。

5. 家用电器

电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源,通常被称为“节能灯”,正逐步取代传统的白炽灯和日光灯。

变频空调是家用电器中应用电力电子技术的典型例子之一。电视机、音响设备、家用计算机等电子设备的电源部分也都需要电力电子技术。此外,有些洗衣机、电冰箱、微波炉等电器也应用了电力电子技术。

1.3.2 现代电力电子技术的应用领域

1. 计算机高效率绿色电源

随着计算机技术的发展,产生了绿色电脑和绿色电源的概念。绿色电脑泛指对环境无害的个人电脑和相关产品,绿色电源是指与绿色电脑相关的高效省电电源。根据美国环境保护署 1992 年 6 月 17 日“能源之星”计划规定,桌上型个人电脑或相关的外围设备,在睡眠状态下的耗电量小于 30 W,才符合绿色电脑的要求,就目前效率为 75% 的 200 W 开关电源而言,电源自身的功耗就将近 50 W,因此提高电源效率是降低电源自身功耗的根本途径。

2. 通信用高频开关电源

通信业的迅速发展极大地推动了通信电源的发展。高频小型化的开关电源已成为现代通信供电系统的主流。在通信领域中,通常将整流器称为一次电源,而将直流-直流(DC-DC)变换器称为二次电源。一次电源的作用是将单相或三相交流电源变换成标称值为 48 V 的直流电源。目前在程控交换机用的一次电源中,传统的相控式稳压电源已被高频开关电源取代。高频开关电源通过 MOSFET 或 IGBT 的高频工作,开关频率一般控制在 100 kHz 左右甚至更高,实现高效率和小型化。近几年,开关整流器的功率容量不断扩大,单机容量已从 48 V/12.5 A,48 V/20 A 扩大到 48 V/200 A,48 V/400 A。

3. 直流-直流(DC-DC)变换器

DC-DC 变换技术被广泛应用于无轨电车、地铁列车、电动车的无级变速和控制,同时使上述控制获得加速平稳、快速响应的性能,并同时收到节约电能的效果。用直流斩波器代替变阻器可节约电能 20%~30%。直流斩波器不仅能起调压的作用(开关电源),同时还能有效地抑制电网侧谐波电流噪声。

通信电源的二次电源 DC-DC 变换器已商品化,模块采用高频 PWM 技术,开关频率在 500 kHz 左右,功率密度为 5~20 W/in³^①。随着大规模集成电路的发展,要求电源模块实现小型化,就要不断提高开关频率和采用新的电路拓扑结构。目前已有一些公司研制生产了采用零电流开关和零电压开关技术的二次电源模块,功率密度有较大幅度的提高。

① 1 in = 2.54 cm

4. 不间断电源(UPS)

UPS 是计算机、通信系统以及要求提供不能中断供电场合所必需的一种高可靠、高性能的电源。交流市电输入经整流器变成直流,一部分能量给蓄电池组充电,另一部分能量经逆变器变成交流,经转换开关送到负载。为了在逆变器故障时仍能向负载提供能量,另一路备用电源通过电源转换开关来实现。

现代 UPS 普遍采用了脉宽调制技术和功率 MOSFET, IGBT 等现代电力电子器件,电源的噪声得以降低,效率和可靠性得以提高。微处理器软硬件技术的引入,可以实现对 UPS 的智能化管理,进行远程维护和远程诊断。

目前在线式 UPS 的最大容量已达到 600 kVA 以上。超小型 UPS 发展也很迅速,已经有 0.5 kVA, 1 kVA, 2 kVA, 3 kVA 等多种规格的产品。

5. 变频器电源

变频器电源主要用于交流电机的变频调速,其在电气传动系统中占据的地位日趋重要,已获得巨大的节能效果。变频器电源主电路均采用交流-直流-交流方案。工频电源通过整流器变成固定的直流电压,然后由大功率晶体管或 IGBT 组成的 PWM 高频变换器将直流电压逆变成电压、频率可变的交流输出,电源输出波形近似于正弦波,用于驱动交流异步电动机实现无级调速。

6. 高频逆变式整流焊机电源

高频逆变式整流焊机电源是一种高效的新型焊机电源,代表了当今焊机电源的发展方向。由于 IGBT 大容量模块的商用化,这种电源有着更广阔的应用前景。

逆变焊机电源大都采用交流-直流-交流-直流(AC-DC-AC-DC)变换的方法。50 Hz 交流电经全桥整流变成直流,IGBT 组成的 PWM 高频变换部分将直流电逆变成 20 kHz 的高频矩形波,经高频变压器耦合,整流滤波后成为稳定的直流,供电弧使用。

由于焊机电源的工作条件恶劣,频繁地处于短路、燃弧、开路交替变化之中,因此高频逆变式整流焊机电源的工作可靠性问题成为最关键的问题,也是用户最关心的问题。采用微处理器作为 PWM 的相关控制器,通过对多参数、多信息的采集与分析,达到预知系统各种工作状态的目的,进而提前对系统做出调整和处理,提高了目前大功率 IGBT 逆变电源的可靠性。国外逆变焊机已可做到额定焊接电流 300 A,负载持续率 60%,全载电压 60~75 V,电流调节范围 5~300 A,质量 29 kg。

7. 大功率开关型高压直流电源

大功率开关型高压直流电源广泛应用于静电除尘、水质改良、医用 X 光机和 CT 机等大型设备。电压高达 50~159 kV,电流达到 0.5 A 以上,功率可达 100 kW。

自从 20 世纪 70 年代开始,日本的一些公司开始采用逆变技术,将市电整流后逆变为 3 kHz 左右的中频,然后升压。进入 20 世纪 80 年代,高频开关电源技术迅速发展。德国西门子公司采用功率晶体管做主开关元件,将电源的开关频率提高到 20 kHz 以上,并将干式变压器技术成功地应用于高频高压电源,取消了高压变压器油箱,使变压器系统的体积进一步减小。

国内对静电除尘高压直流电源进行了研制,市电经整流变为直流,采用全桥零电流开关串联谐振逆变电路将直流电压逆变为高频电压,然后由高频变压器升压,最后整流为直流高压。在电阻负载条件下,输出直流电压达到 55 kV,电流达到 15 mA,工作频率为 25.6 kHz。

8. 电力有源滤波器

传统的交流-直流(AC-DC)变换器在投运时,将向电网注入大量的谐波电流,引起谐波损耗和干扰,同时还出现装置网侧功率因数恶化的现象,即所谓“电力公害”,例如,不可控整流加电容滤波时,网侧三次谐波含量可达70%~80%,网侧功率因数仅有0.5~0.6。

电力有源滤波器是一种能够动态抑制谐波的新型电力电子装置,能克服传统LC滤波器的不足,是一种很有发展前景的谐波抑制手段。

9. 电力电子技术在船舶上的应用

当今,随着综合电力系统、全电力舰船等概念的日趋热化,电力电子技术将在未来的船舶电力系统中发挥重大的作用。例如功率变换器在舰船电力系统中的典型应用有舰载直升机舰面供电电源、船用UPS、电机驱动变频器等。而电力推进技术在包括军用船舶在内的多种船舶中得到了广泛的应用,如客船,石油和天然气的开采与勘探所用的钻井装置,采油船和油船,海洋工程支援船和海上施工船,破冰船和冰区航行船,科学考察船,液化天然气船及大型水面作战舰艇等。常规潜艇已经实现了以直流为主的全电力推进,目前的主要任务是开发高功率体积比的新型交流推进电机,以实现交流电力推进。其发展方向是带变频模块、集成化的多相永磁同步电机。

目前世界上有三种主流电力推进系统,分别是轴系推进系统、全方位推进系统和吊舱式推进系统。特别是吊舱式推进系统除了具有噪声低和振动小的特点外,还能够大大提高舰船的机动性,显著降低船舶燃料费用,并能够将船舶的推进效率提高近10%,因此目前绝大部分新造的豪华游船都采用吊舱式电力推进系统。应用电力推进技术的推进电机控制器均采用电力电子技术。

1.4 电力电子技术的未来发展前景

当前,电力电子技术的发展已经进入到各个领域,它在人们的生活中扮演着重要的角色,有着良好的发展前景,这主要体现在以下几个方面:

(1)材料进一步更新。随着社会经济的发展,人们生活水平越来越高,对于新材料的需求也会越来越高。同样,电力电子技术也会进一步加快研究步伐,进一步提高器件的开关频率,减小器件体积,改进系统性能;同时,成本将会大幅度下降,使越来越多的领域受益。

(2)改进器件和装置封装形式。在未来的发展中,电力电子技术将会对电力电子器件和装置形式不断进行改进,实现系统集成,减小各项生产成本,同时通过新技术的运用使其获得更高的集成化和可靠性。

(3)使用无需吸收电路,并且关断延时小的集成门极换流晶闸管。可以有更多的器件来选择应用,特别是在一些大功率应用场合的器件选择时,选择的范围将会越来越广,给人们的社会生活带来方便。

(4)发展新型的全半导体变流系统。随着社会经济的迅速发展,在选择上越来越倾向于体积小、应用广的电子器件,因此电力电子技术的发展将会在体积小、质量轻、损耗小的全半导体变流系统上深入研究,满足日益增长的需要。

(5)发明新型家用电器产品。随着低碳经济的提倡,人们在生活中越来越追求低碳的概念,低碳对于人们的生活有着非常重要的意义。现阶段,各种低碳产品已经逐步进入人们的视线和生活之中,新型汽车、新型电动车等低碳产品供不应求,因此电子器件的发展趋

势将会进一步向家用电器延伸。

1.5 说 明

电力电子技术课程的前修课程主要有电路基础、模拟电子技术、数字电子技术。本课程为学习自动控制系统、电力传动控制基础、电力电子装置及控制、开关电源技术、柔性输电系统等课程奠定了基础。

第2章 电力电子器件

第1章中介绍了电力电子技术的发展依赖电力电子器件的发展,电力电子器件是电力电子电路的基础,要想学好电力电子技术,必须先掌握电力电子器件的特性和正确使用方法。本章主要介绍电力电子器件中的不可控器件、半控型器件、全控型器件的概念、工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应该注意的问题,各种电力电子器件的驱动、保护电路以及串并联中应该注意的问题。

2.1 电力电子器件概述

在电力设备或电力系统中,直接承担电能变换或控制任务的电路称为主电路。电力电子器件指主电路中直接控制电能通断的电子器件,能承受较高的工作电压和较大的电流,主要工作在开关状态,因此电力电子器件也称为“电力开关”。电力电子器件工作在开关状态时有较低的通态损耗,因此可以提高功率变换电路的效率。目前电力电子器件种类繁多,分类形式大致有以下四种。

2.1.1 按照控制程度分类

1. 不可控器件

不需要控制信号来控制其通断的电力电子器件,称为不可控器件。由于不需要驱动电路,这类器件只有两个端子,其代表为电力二极管。其基本特性与普通二极管相似,器件的导通和关断完全由加在器件两端的电压极性决定。

2. 半控型器件

能在控制端施加控制信号控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件,称为半控型器件。由于有控制端,这类器件一般有三个端子,其代表为晶闸管(Thyristor)及其大部分派生产品,器件的关断需要依靠电网电压或关断电路来完成。

3. 全控型器件

能在控制端施加控制信号控制其通断的电力电子器件,称为全控型器件,又称为自关断器件。由于有控制端,这类器件一般也有三个端子,其代表为可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、电力场效应晶体管(电力MOSFET)。

2.1.2 按照控制信号的性质分类

1. 电流驱动型

通过从器件的控制端注入或者抽出电流来实现其导通或者关断的电力电子器件,称为电流驱动型电力电子器件或者电流控制型电力电子器件,其代表为晶闸管、GTO、GTR等器件。

2. 电压驱动型

通过在器件的控制端施加一定的电压信号就可实现其导通或者关断的电力电子器件,