

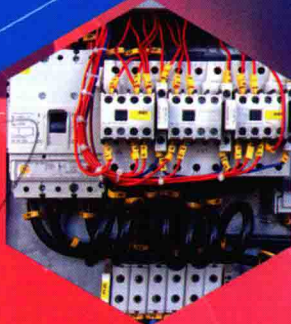
高等院校自动化系列规划教材

王立夫 金海明 主编

电力电子技术

(第2版)

DIANLI DIANZI
JISHU



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

高等院校自动化系列规划教材

电力电子技术

(第2版)

王立夫 金海明 主 编



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

电力电子技术是自动化专业、电气工程及其自动化专业的重要专业基础课程之一。本书主要内容包括：各种电力电子器件、交流-直流变换、直流-直流变换、直流-交流变换、交流-交流变换、软开关技术、电力电子装置及应用等。本书精选了电力电子技术的内容，既体现了系统、全面、简洁，又体现了创新和实用的特点。

本书是自动化专业改革系列教材之一，可用作电气工程及其自动化专业、自动化以及其他相关专业的本科生教材，也可供从事电力电子技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 王立夫, 金海明主编. -- 2 版. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5635-5172-9

I. ①电… II. ①王… ②金… III. ①电力电子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 188624 号

书 名: 电力电子技术(第 2 版)

著作责任者: 王立夫 金海明 主编

责任编辑: 刘 佳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 16.25

字 数: 419 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5172-9

定 价: 35.00 元

• 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

第2版前言

电力电子技术是一门融合了电力技术、电子技术和控制技术的交叉学科,是利用电力电子器件进行电能转换的技术,近年来发展十分迅速。为了适应科技与经济发展对电气和电子信息类应用型人才的需求,同时为了适应目前自动化专业及电气工程及其自动化专业的专业基础课程教学需要,本书作者对《电力电子技术》(第1版)进行了修订。

在第2版编写中继续保持了前一版的编写特点:以电力电子器件为基础,以大功率整流为核心,循序渐进地介绍其他有关理论及各种变换电路,知识点集中便于全面理解和掌握,充分考虑了与后续课程的衔接问题,既做到打好必要的基础又尽量避免重复。同时还根据多年的教学实践,在保持章节结构大体不变的前提下,对前一版内容的某些不足、图文错误进行了修正,并删减和增加了部分内容。

对比第1版,本书将以英文简写变换电路名称作为章节标题修订为汉字的变换电路名称(例如“AC/DC变换”修订为“交流-直流变换”);第2章电力电子器件及应用中将晶闸管保护的内容,移动到2.9节电力电子器件保护中,将缓冲电路也移动到2.9节电力电子器件保护中,电力电子器件的串并联单独作为一节,同时删除了各个器件驱动电路的详细介绍;第3章中以相位控制整流为主,删除了PWM整流电路的内容,PWM控制原理及实现以逆变为主进行介绍,放在第5章直流-交流变换电路中;删除第1版第4章4.3节DC/DC变换电路的关系;第5章逆变电路中根据逆变电路的分类增加了电流型逆变电路,并对SPWM控制中的多处内容进行了修订;第6章中将交流电力控制电路的内容,按照控制方法修订为三节内容;第7、8章的内容基本未做修订。鉴于实验教学在电力电子技术中占有重要地位和出版专门实验指导书的困难,增加第9章作为实验教学的内容。另外,全书还有多处细节经过修订,鉴于篇幅限制不能一一列举。

本书由东北大学秦皇岛分校王立夫、金海明共同担任主编。东北大学秦皇岛分校任良超、高原、李成铁和国网辽宁省电力有限公司信息通信分公司王立谦参加了编写,全书由王立夫统稿。在本书编写过程中得到了东北大学秦皇岛分校有关领导及同事的大力支持,对此表示衷心的感谢。

同时,对本书参考文献的所有作者,在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者学识水平有限,编写时间仓促,书中一定有很多疏漏及错误之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2016.12 于东北大学秦皇岛分校

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子技术的概念及特点	1
1.2 电力电子技术的发展历史	2
1.3 电力电子技术的应用	4
1.4 本教材的内容简介和使用说明	6
第 2 章 电力电子器件	7
2.1 电力电子器件概述	7
2.1.1 电力电子器件的概念和特征	7
2.1.2 电力电子器件的分类	8
2.2 电力二极管	9
2.2.1 电力二极管结构	9
2.2.2 电力二极管基本特性	9
2.2.3 电力二极管的主要参数	10
2.2.4 电力二极管的主要类型	11
2.3 晶闸管及其派生器件	12
2.3.1 晶闸管的结构和工作原理	12
2.3.2 晶闸管的基本特性	14
2.3.3 晶闸管的主要参数	16
2.3.4 晶闸管的派生器件	19
2.4 门极可关断晶闸管	20
2.4.1 GTO 的结构和工作原理	20
2.4.2 GTO 基本特性	21
2.4.3 GTO 的主要参数	22
2.5 电力晶体管	23
2.5.1 GTR 的结构和工作原理	23
2.5.2 GTR 的基本特性	24
2.5.3 GTR 的主要参数及安全工作区	25
2.5.4 GTR 的类型	26
2.6 电力场效应晶体管	26
2.6.1 电力 MOSFET 的结构和工作原理	27
2.6.2 电力 MOSFET 的基本特性	28
2.6.3 电力 MOSFET 的主要参数及安全工作区	29
2.7 绝缘栅双极型晶体管	30
2.7.1 IGBT 的结构和工作原理	30

2.7.2	IGBT 的基本特性	31
2.7.3	IGBT 的主要参数、擎住效应和安全工作区	33
2.8	其他新型电力电子器件	34
2.8.1	静电感应晶体管	34
2.8.2	静电感应晶闸管	34
2.8.3	MOS 控制晶闸管	34
2.8.4	集成门极换流晶闸管	35
2.8.5	基于宽禁带半导体材料的电力电子器件	35
2.8.6	功率集成电路和集成电力电子模块	36
2.9	电力电子器件的保护	37
2.9.1	过电压的产生及过电压的保护	37
2.9.2	过电流的保护	38
2.9.3	缓冲电路	38
2.10	电力电子器件的串并联	40
2.10.1	器件的串联与均压	40
2.10.2	器件的并联与均流	41
	本章小结	42
	习题及思考题	44
第3章	交流-直流变换	45
3.1	概述	45
3.1.1	整流电路的分类	45
3.1.2	相控整流电路的一般结构	46
3.2	单相可控整流电路	46
3.2.1	单相半波可控整流电路	46
3.2.2	单相桥式全控整流电路	51
3.2.3	单相桥式半控整流电路	56
3.2.4	单相双半波可控整流电路	58
3.3	三相可控整流电路	59
3.3.1	三相半波可控整流电路	59
3.3.2	三相桥式全控整流电路	63
3.4	变压器漏感对整流电路的影响	69
3.5	整流电路的谐波和功率因数	72
3.5.1	谐波和无功功率分析	73
3.5.2	整流电路交流侧谐波和功率因数分析	75
3.5.3	整流输出电压和电流的谐波分析	76
3.6	大功率可控整流电路	78
3.6.1	带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	79
3.6.2	多重化整流电路	82
3.7	整流电路的有源逆变工作状态	85
3.7.1	逆变的概念	85
3.7.2	三相桥整流电路的有源逆变工作状态	87

3.7.3 逆变失败与最小逆变角的限制	88
本章小结	89
习题及思考题	90
第4章 直流-直流变换	92
4.1 非隔离 DC-DC 变换电路	92
4.1.1 降压(Buck)型电路	92
4.1.2 升压(Boost)型电路	97
4.1.3 升降压(Buck-Boost)型电路	102
4.1.4 库克(Cuk)型电路	104
4.1.5 Zeta 型电路	106
4.1.6 Spice 型电路	108
4.2 隔离 DC-DC 变换电路	110
4.2.1 正激(Forward)电路	111
4.2.2 反激(Flyback)电路	113
4.2.3 推挽(Push-Pull)电路	116
4.2.4 半桥(Half-Bridge)电路	118
4.2.5 全桥(Full-Bridge)电路	120
本章小结	123
习题及思考题	123
第5章 直流-交流变换	124
5.1 逆变电路概述	124
5.1.1 逆变器的基本结构	124
5.1.2 逆变电路的基本工作原理	125
5.1.3 逆变电路的换流方式	126
5.1.4 逆变电路分类	126
5.2 电压型逆变电路	127
5.2.1 单相电压型逆变电路	127
5.2.2 三相电压型逆变电路	129
5.3 电流型逆变电路	132
5.4 逆变电路的正弦脉宽控制技术	135
5.4.1 SPWM 控制的基本原理	136
5.4.2 SPWM 逆变电路及其控制方法	137
5.4.3 SPWM 调制方式	140
5.4.4 SPWM 波生成方法	142
5.4.5 SPWM 逆变电路的谐波分析	144
5.4.6 SPWM 逆变电路的多重化	146
5.4.7 SPWM 跟踪控制技术	147
本章小结	150
习题及思考题	151

第6章 交流-交流变换	152
6.1 相控交流调压电路	152
6.1.1 相控单相交流调压电路	153
6.1.2 相控三相交流调压电路	159
6.2 斩波控制交流调压电路	163
6.3 整周波通断控制的交流电力控制电路	166
6.4 交-交变频电路	168
6.4.1 单相交-交变频电路	168
6.4.2 三相交-交变频电路	173
6.5 矩阵变频电路	176
本章小结	180
习题及思考题	180
第7章 软开关技术	181
7.1 软开关的概念及分类	181
7.1.1 硬开关和软开关	181
7.1.2 零电压开关和零电流开关	182
7.1.3 软开关电路的分类	183
7.2 典型的软开关电路	185
7.2.1 零电压开关准谐振电路	185
7.2.2 移相全桥型零电压开关 PWM 电路	187
7.2.3 零电压转换 PWM 电路	189
7.2.4 谐振直流环	193
本章小结	194
习题及思考题	194
第8章 电力电子装置及应用	195
8.1 开关电源	195
8.1.1 直流稳压电源概述	195
8.1.2 开关电源的设计	196
8.2 不间断电源	200
8.3 静止无功补偿装置	204
8.3.1 晶闸管控制电抗器(TCR)	205
8.3.2 晶闸管投切电容器(TSC)	205
8.3.3 静止无功发生器(SVG)	206
8.4 电力储能系统	207
8.5 电力电子器件的发热与散热	211
8.5.1 电力电子器件的发热	211
8.5.2 电力电子器件的散热	213
8.6 电力电子技术在再生能源中的应用	216
8.6.1 电力电子技术在光电电力系统中的应用	217

8.6.2 电力电子技术在风力电力系统中的应用	220
8.7 柔性交流输电系统 FACTS	223
本章小结	224
习题及思考题	224
第9章 教学实验	225
实验一 闸管导通、关断条件	225
实验二 单结晶体管触发电路及单相半控桥式整流电路	226
实验三 晶闸管单相交流调压	227
实验四 晶闸管三相调压电路	227
实验五 三相桥式全控整流电路	228
实验六 三相桥式有源逆变电路	229
实验七 SPWM 三相逆变电路	230
附录一 TDM-1 型晶闸管电路学习机使用说明书	232
附录二 TDR-2 型三相桥式全控整流学习机使用说明书	234
附录三 KJ004 可控硅移相电路	237
附录四 KJ041 六路双脉冲形成器	239
附录五 KJ042 脉冲列调制形成器	241
附录六 TDZ-3 型 SPWM 变频调速学习机	243
参考文献	247

第1章 绪 论

什么是电力电子技术？它由哪些技术构成？它的发展经历了哪些阶段？目前主要应用在哪些领域？对这些问题的阐述将使读者对电力电子技术有一个大致的了解。本章的内容试图使读者对电力电子技术有一个初步了解。

1.1 电力电子技术的概念及特点

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术属于信息电子技术；电力电子技术是应用于电力领域的电子技术，它是利用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。目前所用的电力电子器件采用半导体制成，故称电力半导体器件。信息电子技术主要用于信息处理，而电力电子技术则主要用于电力变换。电力电子技术所变换的“电力”，功率可以达到 MW 甚至 GW，也可以小到数 W 甚至 1 W 以下。

电力电子技术可以理解为功率强大，可供电力系统那样大电流、高电压场合应用的电子技术，它传统的电子(信息电子)技术相比，其特殊之处不仅在于它能够通过大电流和承受高电压，而且要考虑在大功率情况下，器件发热、运行效率的问题。为了解决发热和效率问题，对于大功率的电子电路，器件的运行都采用开关方式。这种开关运行方式就是电力电子器件运行的特点。

通常所用的电力有交流和直流两种。从公用电网直接得到的电力是交流的，从蓄电池和干电池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(AC-DC)、直流变交流(DC-AC)、直流变直流(DC-DC)和交流变交流(AC-AC)。交流变直流称为整流；直流变交流称为逆变；直流变直流是指一种电压(或电流)的直流变为另一种电压(或电流)的直流，可用直流斩波电路实现；交流变交流可以是电压或电力变换，称为交流电力控制，也可以是频率或相数的变换。人们普遍认为整流和逆变较好理解，而直流变直流和交流变交流较难理解。实际上直流变直流并非电力种类(电能形式)上的变换，而是电压(或电流)的变换，即一种直流电压(或电流)变为另一种直流电压(或电流)；交流变交流除了电压(或电流)的变换外，还多了一些可能，即频率或相数的变换。进行上述变换的技术称为变流技术。

表 1.1 电力变换的种类

输出 输入	交流(AC)	直流(DC)
直流(DC)	整流	直流斩波
交流(AC)	交流电力控制变频、变相	逆变

通常把电力电子技术分为电力电子器件的制造技术和变流技术两个分支。变流技术也称为电力电子器件的应用技术，它包括用电力电子器件构成各种电力变换电路和对这些电路进行控制的技术，以及由这些电路构成电力电子装置和电力系统的技术。“变流”不只是交直流

之间的变换,也包括上述的直流变直流、交流变交流的变换。



图 1.1 描述电力电子学的倒三角形

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”在内容上并没有很大的不同,只是分别从学术和工程技术这两个不同角度来称呼。电力电子学可以用图 1.1 的倒三角形来描述,可以认为电力电子学由电力学、电子学和控制理论这 3 个学科交叉而形成的,这一观点被全世界普遍接受。

电力电子技术与电子学的关系是显而易见的。(信息)电子学可分为电子器件和电子电路两大部分,它们分别与电力电子器件和电力电子电路相对应。电力电子器件的制造技术和用于信息处理的电子器件制造技术的理论基础(都是半导体理论)是一样的,其大多数生

产工艺也是相同的。这说明信息电子和电力电子的器件制造技术是同根同源的。电力电子电路和信息电子电路的分析方法也是一致的,只是两者应用的目的不同,前者用于电力变换,后者用于信息处理。

电力电子技术广泛应用于电气工程中,这就是电力电子学和电力学的主要关系。电力学是电工科学或电气工程,各种电力电子装置广泛应用于高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动以及高性能交直流电源等之中,因此,通常把电力电子技术归于电气工程学科。电力电子技术是电气工程学科中非常活跃的一个分支。电力电子技术的不断进步大大地推动了电气工程实现现代化的进程。

控制理论广泛用于电力电子技术中,使电力电子装置和系统的性能日益优越和完善,可以满足人们的各种需求。电力电子技术可以看作弱电控制强电的技术,是弱电和强电之间的接口;而控制理论则是实现这种接口的强有力的纽带。此外,控制理论和自动化技术是密不可分的,而电力电子装置又是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

1.2 电力电子技术的发展历史

电力电子器件的发展对电力电子技术的发展起着决定性作用,因此,电力电子技术的发展是以电力电子器件的发展为基础的。电力电子技术的发展史,如图 1.2 所示。

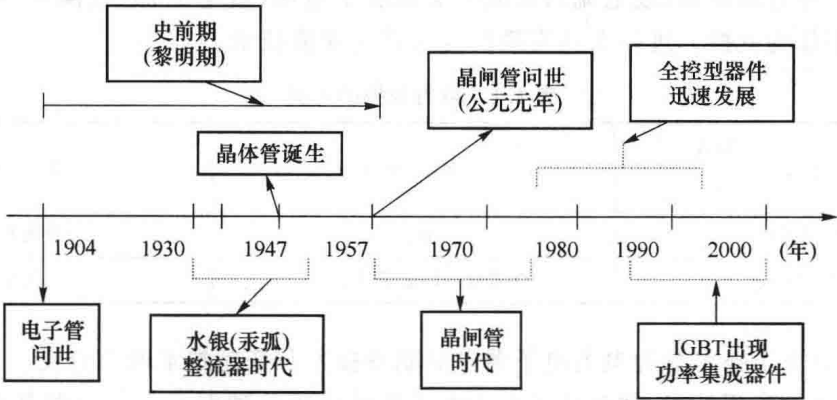


图 1.2 电力电子技术的发展史

一般认为,电力电子技术的诞生是以1957年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管为标志的。但在晶闸管出现之前,电力电子技术就已经用于电力变换了。因此,晶闸管出现前的时期称为电力电子技术的史前期或黎明期。

1876年出现了硒整流器。1904年出现了电子管,它能在真空中对电子流进行控制,并应用于通信和无线电,从而开创了电子技术之先河。1911年出现了金属封装的水银整流器,它把水银封于管内,利用对其蒸气的点弧可对大电流进行控制,其性能与晶闸管已经非常相似。20世纪30到50年代,是水银整流器发展迅速并广泛应用的时期,它广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动。然而,水银整流器所用水银对人体有害,水银整流器的电压降落也很高,很不理想。

1947年12月,美国贝尔实验室研制出锗晶体管,引发了电子技术的一场革命。1953年出现了锗功率二极管,1954年出现了硅二极管,是最先用于电力领域的半导体器件;1957年诞生了晶闸管,一方面由于其变换能力的突破,另一方面实现了弱电对以晶闸管为核心的强电变换电路的控制,使之很快取代了水银整流器和旋转变流机组,进而使电力电子技术步入了功率领域。变流装置由旋转方式变为静止方式,具有提高效率、缩小体积、减轻重量、延长寿命、消除噪声、便于维修等优点。因此,其优越的电气性能和控制性能,在工业上引起一场技术革命。

在以后的20年内,随着晶闸管特性不断提高,晶闸管已经形成了从低电压、小电流到高电压、大电流的系列产品。同时研制出一系列晶闸管的派生器件,如快速晶闸管(FST)、逆导晶闸管(RCT)、双向晶闸管(TRIAC)、光控晶闸管(LTT)等器件,大大地推动了各种电力变换器在冶金、电化学、电力工业、交通及矿山等行业中的应用,促进了工业技术的进步,形成了以晶闸管为核心的第一代电力电子器件,也称为传统电力电子技术阶段。

晶闸管通过对门极的控制可以使其导通,而不能使其关断,因此属于半控型器件。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等外部条件来实现。晶闸管器件在电流、电压定额这两个方面,在当时仍然有一定的发展余地,但下述原因阻碍了它们的继续发展:①由于它是半控器件,要想关断它必须用强迫换相电路,结果使得电路复杂、体积增大、重量增加、效率较低以及可靠性下降;②由于器件的开关频率难以提高,一般低于400 Hz,限制了它的应用范围;③由于相位运行方式使电网及负载上产生严重的谐波,不但电路功率因数降低,而且对电网产生“公害”。随着工业生产的发展,迫切要求新的器件和变流技术出现,以便改进或取代传统的电力电子技术。

20世纪70年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极型晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(Power MOSFET)为代表的第二代自关断全控型器件迅速发展。全控型器件的特点是,通过对门极(基极、栅极)的控制既可以使其开通,又可以使其关断。另外,这些器件的开关速度普遍高于晶闸管,可以用于开关频率较高的电路。这些器件优越的特性使电力电子技术的面貌焕然一新,把电力电子技术推进到一个新的发展阶段。

和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主要控制方式为脉冲宽度调制(PWM)方式。PWM控制技术在电力电子变流技术中占有十分重要的地位,它在逆变、直流斩波、整流、交流控制等电力电子电路均可应用。它使电路的控制性能大大改善,使以前难以实现的功能得以实现,对电力电子技术的发展产生了深远的影响。

20世纪80年代,出现了以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的第三代复合型场控半导体器件,它是MOSFET和BJT的复合。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,使之称为现

代电力电子技术的主导器件。另外还出现了静电感应式晶体管(SIT)、静电感应式晶闸管(SITH)、MOS控制晶闸管(MCT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)等器件。这些器件不仅有很高的开关频率,一般为几十赫兹到几百千赫兹,而且有更高的耐压性,电流容量大,可以构成大功率、高频的电力电子电路。

20世纪80年代后期,电力半导体器件的发展趋势是模块化、集成化,按照电力电子电路的各种拓扑结构,将多个相同的电力半导体器件或不同的电力半导体器件封装在一个模块中,这样可以缩小器件体积、降低成本、提高可靠性。已经出现了第四代电力电子器件——集成功率半导体器件(PIC),它将电力电子器件与驱动电路、控制电路及保护电路集成在一块芯片上,开辟了电力电子器件智能化的方向,应用前景广阔。目前经常使用的智能化功率模块(IPM),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CPU,以保证IPM自身不受损害。

1.3 电力电子技术的应用

电力电子技术是以功率处理和变换为主要对象的现代工业电子技术,当代工业、农业等领域都离不开电能,离不开表征电能的电压、电流、频率、波形和相位等基本参数的控制和转换,而电力电子技术可以对这些参数进行精确的控制与高效的处理,所以电力电子技术是实现电气工程现代化的重要基础。

电力电子技术的应用范围十分广泛,国防军事、工业、能源、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统以及家用电器等无不渗透着电力电子技术的新成果。

1. 一般工业

工业中大量应用各种交、直流电动机。直流电动机具有良好的调速性能,为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置。近年来,由于电力电子变频技术的迅速发展,交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美。因此,交流调速技术也得到了大量应用,并且占据主导地位。大到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电力电子交直流调速技术。对一些调速性能要求不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。作为节能控制主要采用交流电动机的变频调速,它带来了巨大的节能效益。在各行各业中,风机、水泵多用异步电动机拖动,其用电量占我国工业用电的50%以上,全国用电量的30%。我国的风机、水泵,全面采用变频调速后,每年节电可达数百亿度。家用电器的空调,采用变频调速技术可节电30%以上。

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场合。

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采用整流装置供电,交流机车采用变频装置供电。直流斩波器也广泛应用于铁道车辆,磁悬浮列车中电力电子技术更是一项关键的技术。

新型环保正在积极发展中,电动汽车的电机是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技术。一台高级汽车需要许多控制电机,它们也要靠变频

器和斩波器驱动并控制。

飞机、船舶需要各种不同要求的电源,因此航空、航海都离不开电力电子技术。

3. 电力系统

发达国家在用户最终使用的电能中,60%以上至少经过一次以上电力电子装置的处理。电力系统在通向现代化的进程中,是离不开电力电子技术的。

高压直流输电在长距离、大容量时有很大的优势,其送电端的整流阀和受电端的逆变阀都采用晶闸管变流装置,而轻型的直流输电主要采用全控型的 IGBT 器件。柔性交流输电系统 (FACTS),其作用是对发电输电系统的电压和相位进行控制,也是依靠电力电子装置才得以实现的。

无功补偿和谐波抑制对电力系统有重要意义。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。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更优越的无功和谐波补偿的性能。在配电网系统,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,以进行电能质量控制,改善供电质量。

4. 电源

电力电子技术的另一应用领域是各种各样的电源。电器和电子装置的电源需求是千变万化的,因而电源的需求和种类非常多。通信设备中程控交换机所用的直流电源以前是晶闸管整流电源,现已改为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也都采用高频开关电源。在各种电子装置中,以前大量采用线性稳压电源,但由于高频开关电源体积小、重量轻、效率高,在很多应用场合已逐渐取代了线性电源。因为各种信息技术的电子装置都需要电力电子装置提供电源,所以可以说信息电子技术离不开电力电子技术。在有大型计算机的场合,常常需要不间断电源 (UPS) 供电,不间断电源实际上就是典型的电力电子装置。

在军事应用中雷达脉冲、声呐及声发射系统、武器系统及电子对抗等系统需要电源,航天、航海、矿山及科学研究等各个领域都离不开电源,所以各行各业都离不开电力电子技术。

5. 照明

在各个国家,照明用电占发电量的比例也是比较大的,其中美国占 24%,中国占 12%。白炽灯发光效率低、热损耗大,故现在广泛使用日光灯。但日光灯必须有镇流器启辉,全部电流都要流过镇流器的线圈,因而无功电流较大。电子镇流器的出现,较好地解决了这个问题。在相同功率的情况下,电子镇流器比普通镇流器的体积小,可减少无功和有功损耗。采用电力电子技术还可实现照明的电子调光,也可节约能源,因此被称为节能灯。另外,通常采用电力电子装置的光源被称为“节能灯”,它正在逐步取代传统的白炽灯和荧光灯。

6. 新能源的开发和利用

传统的发电方式是火力、水力以及后来兴起的核能发电。能源危机后,各种新能源、可再生能源及新型发电方式越来越受到重视,其中太阳能发电、风能发电的发展较快,燃料电池更受关注。太阳能、风能发电受环境条件的制约,发出的电能质量较差。利用电力电子技术可以进行能量储存和缓冲,改善电能质量。同时,采用变速恒频发电技术,可以将新能源发电与电力系统联网,这些新能源开发和利用都离不开电力电子技术。

7. 环境保护

随着工业、农业的迅速发展,特别是火力发电和水泥业的发展对自然环境的污染越来越严重。为了净化环境,提高人们的生活质量,在某些行业采用高压静电除尘措施十分有效,其关

键也是微型计算机和电力电子技术。

总之,电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙和大自然的探索到国防,从军事到国民经济的各个领域,再到人们的衣食住行,无处不应用电力电子技术。这就是激发一代又一代专家、学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术的巨大魅力之处。

1.4 本教材的内容简介和使用说明

本教材内容除第1章绪论外,可分为四大部分。

第一部分是电力电子器件,即第2章。第2章是全书的基础,主要介绍各种电力电子器件的基本结构、工作原理、主要参数、应用特性,该章内容是以器件的应用为目的而展开的,基本上不涉及器件的制造工艺。在各种器件中,以晶闸管、IGBT、电力 MOSFET 这三种目前应用最为广泛的器件为重点;另外还介绍了电力电子器件应用的共性问题,包括电力电子器件的保护缓冲及串并联等问题。

第二部分是各种基本的电力电子电路,包括第3~6章。这部分内容是全书的主体,其内容是按表1.1的分类展开的。电力电子电路的种类繁多,本教材力求避免对各种电路的机械罗列,科学的分类对正确把握各种电路的共性和个性有很大的帮助。另外,在内容的介绍中,突出共同的分析方法对理解电路的工作原理十分有益。例如,电力电子电路是非线性的,但当电路中各开关器件通断状态一定时,又可按线性电路来分析。这一基本分析方法对各种电力电子电路都是适用的。

第三部分由第7章构成,主要介绍了软开关技术。软开关技术是近年出现的一种新技术,它对提高工作频率、提高功率密度、提高效率都有重要意义。软开关电路一般不改变原来的基本电路,而是在其基础上附加了一些电路,从而实现软开关。软开关技术也适用于各种电力电子电路,第7章将介绍这一技术的基本内容。

第四部分主要为第8章,介绍了电力电子装置的应用。电力电子技术既是一门技术基础课程,也是实用性和工程性很强的一门技术。因此,专门有一章介绍应用是很有必要的,希望读者对电力电子技术的应用予以足够的重视。

为了便于读者学习,在大部分章的最后都有小结,对全章的要点和重点进行总结,有助于读者从总体上把握全章内容。各章前言说明了本章的地位及概要,相信对读者理解本章的内容大有裨益。

电力电子技术有很强的实践性,因此实验在教学中占据着十分重要的位置。本教材正文后附有“教学实验”部分,精选了七个最基本、有较高实用价值的实验。最好让学生做完实验,以使学生对电力电子装置有一定的感性认识,并锻炼学生的动手能力。

在学习本课程前,学生应学过“电路”和“电子技术基础”两门课程,最好也学过“自动控制理论”,并能熟练掌握示波器等电子仪器的使用方法。“电力拖动自动控制系统”是本课程的后续课程之一,对电力传动有兴趣的同学可以选学这门课程。

在教材使用时,可根据课程设置需要进行删减学时和内容。

第2章 电力电子器件

电力电子器件是电力电子技术的基础,是构成电力电子电路的核心,因此必须掌握它的特性和使用方法。本章将在对电力电子器件的概念、特点和分类等问题作简要概述之后,分别介绍各种常用电力电子器件的结构、工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的问题。

2.1 电力电子器件概述

2.1.1 电力电子器件的概念和特征

在电气设备或电力系统中,直接承担电能的变换或控制任务的电路被称为主电路(Main Power Circuit)。电力电子器件(Power Electronic Device)是指可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。同学习电子技术基础时处理信息的电子器件一样,广义上电力电子器件也可分为电真空器件和半导体器件两类。但是,自20世纪50年代以来,除了在频率很高(如微波)的大功率高频电源中还在使用真空管外,基于半导体材料的电力电子器件已逐步取代了以前的汞弧整流器(Mercury Arc Rectifier)、闸流管(Thyratron)等电真空器件,成为电能变换和控制领域的绝对主力。因此,电力电子器件也往往专指电力半导体器件,与普通半导体器件一样,目前电力半导体器件所采用的主要材料仍然是硅。

由于电力电子器件直接用于处理电能的主电路,因而同处理信息的电子器件相比,它一般具有如下特征。

(1) 电力电子器件所能处理电功率的大小,也就是其承受电压和电流的能力,是其最重要的参数。其处理电功率的能力小至毫瓦级,大至兆瓦级,一般都远大于处理信息的电子器件。

(2) 因为处理的电功率较大,为了减小本身的损耗、提高效率,电力电子器件一般都工作在开关状态。导通时(通态)阻抗很小,接近于短路,管压降接近于零,而电流由外电路决定;阻断时(断态)阻抗很大,接近于断路,电流几乎为零,而管子两端电压由外电路决定;就像普通晶体管的饱和与截止状态一样。因而,电力电子器件的动态特性(也就是开关特性)和参数,也是电力电子器件特性很重要的方面,有些时候甚至上升为第一位。而在模拟电子电路中,电子器件一般都工作在线性放大状态,数字电子电路中的电子器件虽然一般也工作在开关状态,但其目的是利用开关状态表示不同的信息。正因为如此,也常常将一个电力电子器件或者外特性像一个开关的几个电力电子器件的组合称为电力电子开关,或者电力半导体开关。电力电子器件在电力电子技术中作为开关元件使用,要求它具有开关速度快、承受电流和电压能力大以及开关损耗小等特点。理想的电力电子器件应在断态时能承受高电压且漏电流很小,在通态时能通过大电流且压降非常低,通断转换时间很短。做电路分析时,为简单起见也往往用理想开关来代替。

(3) 在实际应用当中,电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。由于电力电子器

件所处理的电功率较大,因此普通的信息电子电路信号一般不能直接控制电力电子器件的导通或关断,需要一定的中间电路对这些信号进行适当的放大,这就是所谓的电力电子器件的驱动电路。

(4) 尽管工作在开关状态,但是电力电子器件自身的功率损耗通常仍远大于信息电子器件,因而为了保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上比较讲究散热设计,而且在其工作时一般都需要安装散热器。这是因为电力电子器件在导通或者阻断状态下,并不是理想的短路或者断路。导通时器件上有一定的通态压降,阻断时器件上有微小的断态漏电流流过。尽管其数值都很小,但分别与数值较大的通态电流和断态电压相作用,就形成了电力电子器件的通态损耗和断态损耗。此外,还有在电力电子器件由断态转为通态(开通过程)或者由通态转为断态(关断过程)的转换过程中产生的损耗,分别称为开通损耗和关断损耗,总称开关损耗。对某些器件来讲,驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。通常来讲,除一些特殊的器件外,电力电子器件的断态漏电流都极其微小,因而通态损耗是电力电子器件功率损耗的主要成因。当器件的开关频率较高时,开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。

2.1.2 电力电子器件的分类

按照能够被控制信号所控制的程度,可以将电力电子器件分为不可控型器件、半控型器件、全控型器件。

① 不可控器件是不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件,因此也不需要驱动电路。电力二极管属于不可控器件,在阳极加正向电压时,二极管导通;反之,二极管关断。器件的导通和关断完全由其在主电路中承受的电压和电流决定。

② 半控型器件是通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件。这类器件主要指晶闸管及其大部分派生器件,器件的关断完全由其在主电路中承受的电压和电流决定。

③ 全控型器件是通过控制信号既可以控制其导通又可以控制其关断的电力电子器件。由于与半控型器件相比,可以由控制信号控制其关断,因此又称为自关断器件。这类器件品种很多,目前比较常用的有门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(Power MOSFET,又称电力 MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等,都属于全控型器件。

按照驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间信号的性质,可以将电力电子器件(不可控型器件除外)分为电流驱动型和电压驱动型两类。如果是通过从控制端注入或抽出来实现导通或者关断的控制,这类电力电子器件则被称为电流驱动型,或者电流控制型电力电子器件;如果是仅通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可实现导通或者关断的控制,这类电力电子器件则被称为电压驱动型或者电压控制型电力电子器件,电压控制型电力电子器件也可以称为场控器件,或者场效应器件。

此外,同信息电子器件类似,电力电子器件还可以按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电情况分为单极型器件、双极型器件和复合型器件三类。只有一种载流子参与导电的电力电子器件称为单极型器件;由电子和空穴两种载流子都参与导电的电力电子器件称为双极型器件;由单极型和双极型器件集成混合而成的器件则被称为复合型器件,也称为混合型器件。