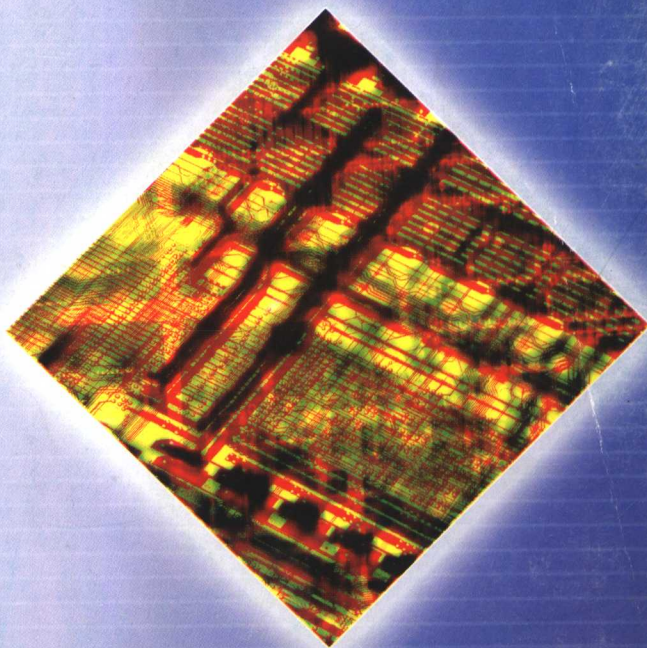




教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电力电子技术

浣喜明 姚为正 编著



高等教育出版社

TM1
142

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电力电子技术

浣喜明 姚为正 编著

高等教育出版社

内容提要

全书内容按照“电力电子器件、电力电子电路及其控制技术和电力电子装置”的编写思路分为三部分。

第一部分内容包括常用电力电子器件(如 SCR、GTO、VDMOS、IGBT、SIT、SITH、MCT、PIC 等)的工作原理、特性、参数、驱动电路及保护方法;第二部分包括直流变换电路、逆变电路、整流电路和交流变换电路在内的常用电力电子电路的工作原理、参数计算方法和应用范围,还介绍了软开关技术的内容、相控技术和 PWM 控制技术在上述各种电路中的应用;第三部分从应用的角度出发,介绍了多种典型电力电子装置的组成、工作原理和实际应用,同时还介绍了先进控制技术在电力电子装置中的应用以及电力电子装置的可靠性与抗电磁干扰技术。

本书适用于高等工科院校应用型本科电气工程及其自动化、自动化以及机电一体化等电类专业,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/浣喜明,姚为正编著. -北京:高等教育出版社,2004.8(2005 重印)

ISBN 7-04-014559-6

I. 电... II. ①浣... ②姚... III. 电力电子学-高等学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 054765 号

策划编辑 韩 颖 责任编辑 王莉莉 封面设计 张 楠
责任绘图 朱 静 版式设计 王艳红 责任校对 王效珍
责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000
经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市白帆印务有限公司

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>

开 本 787×960 1/16
印 张 18.5
字 数 340 000

版 次 2004 年 8 月第 1 版
印 次 2005 年 6 月第 2 次印刷
定 价 22.90 元

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 14559-00

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所以培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组的严格把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和 In 研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才培养工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用型本科人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

II 总 序

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

前 言

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果。根据教育部提出“以应用为目的”的高等技术工程应用型人才的培养目标,本书以“控制篇幅、精选内容、突出重点、便于教学”的指导思想为编写原则,在保证本学科知识内容体系完整的前提下,既紧跟电力电子技术发展的脉搏,反映本学科的先进技术,又遵循高等技术工程应用型人才的培养模式,使教材内容更具有实用性,符合培养应用型本科人才的要求。

全书内容按照电力电子器件、电力电子电路及其控制技术和电力电子装置分为三部分。

第一部分内容包括常用电力电子器件(如 SCR、GTO、VDMOS、IGBT、SIT、SITH、MCT、PIC 等)的工作原理、特性、参数、驱动电路及保护方法,在此用较多的篇幅叙述了全控型电力电子器件,体现了技术的先进性。

第二部分是本书的主干部分,内容安排体现了教材的基础性、科学性和知识的系统性。它包括直流变换电路、逆变电路、整流电路和交流变换电路在内的常用电力电子电路的工作原理、参数计算方法 and 应用范围。为了反映本学科的先进技术,书中还介绍了软开关技术的内容。

要让电力电子电路完成各种工作任务,必须配以相应的依赖于特定控制策略和控制算法的控制电路,本书较详细地介绍了相控技术和 PWM 控制技术在上述各种电路中的应用。

第三部分从应用的角度出发,用较多的篇幅介绍了多种典型电力电子装置的组成、工作原理和实际应用,同时还介绍了先进控制技术在电力电子装置中的应用以及电力电子装置的可靠性与抗电磁干扰技术。

另外,书中编排了适当的例题和大量的思考题与习题,可帮助学生提高认识、强化记忆。在书的附录中还列出了常用电力电子器件型号及参数,供学生课程设计和工程技术人员参考。为了便于学生学习,作者编写了复习资料;为了方便教师教学,作者提供多媒体教学课件和本书习题解答。如果需要这些教学辅助资料,请读者与作者联系。

本书第 6 章、第 8 章由姚为正编写,浣喜明负责第 1 章~第 5 章、第 7 章、附录的编写和全书的统稿工作。

在本书编写过程中,许继集团电源公司提供了大量的应用技术资料和产品

II 前 言

样本,在此表示衷心的感谢。

本书由西安交通大学王兆安教授主审。王兆安教授在审稿中提出了许多宝贵的意见,在此谨致衷心的感谢。

由于作者学识水平有限,时间仓促,书中难免有错漏之处,恳请读者批评指正。

编者

2004 年 3 月于湖南工程学院

E-mail: hxm@hnie.edu.cn

目 录

第1章 概述	1
1.1 电力电子技术的发展	1
1.1.1 电力电子器件的发展	1
1.1.2 电力电子电路及其控制技术的发展	5
1.2 电力电子技术的应用领域	8
1.3 课程性质与学习方法	12
第2章 电力电子器件	13
2.1 电力电子器件的基本模型	13
2.1.1 电力电子器件的基本模型与特性	13
2.1.2 电力电子器件的种类	14
2.2 电力二极管	15
2.2.1 电力二极管及其工作原理	15
2.2.2 电力二极管的特性与参数	17
2.3 晶闸管	20
2.3.1 晶闸管及其工作原理	20
2.3.2 晶闸管的特性与主要参数	23
2.3.3 晶闸管的派生器件	30
2.4 可关断晶闸管	33
2.4.1 可关断晶闸管及其工作原理	33
2.4.2 可关断晶闸管的特性与主要参数	34
2.5 电力晶体管	36
2.5.1 电力晶体管及其工作原理	36
2.5.2 电力晶体管的特性与主要参数	38
2.6 电力场效晶体管	41
2.6.1 电力场效晶体管及其工作原理	42
2.6.2 电力场效晶体管的特性与主要参数	43
2.7 绝缘栅双极型晶体管	47
2.7.1 绝缘栅双极型晶体管及其工作原理	47
2.7.2 绝缘栅双极型晶体管的特性与主要参数	48
2.8 其他新型电力电子器件	51

II 目 录

2.8.1 静电感应晶体管	51
2.8.2 静电感应晶闸管	53
2.8.3 MOS 控制晶闸管	54
2.8.4 集成门极换流晶闸管	56
2.8.5 功率模块与功率集成电路	57
2.9 电力电子器件的驱动与保护	61
2.9.1 驱动电路	62
2.9.2 保护电路	70
2.9.3 缓冲电路	72
2.9.4 散热系统	74
思考题与习题	75
第3章 直流变换电路	78
3.1 直流变换电路的工作原理	78
3.2 降压变换电路	79
3.3 升压变换电路	83
3.4 升降压变换电路	87
3.5 库克变换电路	89
3.6 带隔离变压器的直流变换器	92
3.6.1 反激式变换器	92
3.6.2 正激式变换器	93
3.6.3 推挽式变换器	94
3.6.4 半桥式变换器	95
3.6.5 全桥变换电路	96
3.7 直流变换电路的 PWM 控制技术	97
3.7.1 直流 PWM 控制的基本原理	98
3.7.2 直流变换电路的 PWM 控制技术	98
思考题与习题	101
第4章 逆变电路	102
4.1 逆变器的性能指标与分类	102
4.1.1 逆变器的性能指标	102
4.1.2 逆变电路的分类	103
4.2 电力器件的换流方式与逆变电路的工作原理	104
4.2.1 电力器件的换流方式	104
4.2.2 逆变电路的工作原理	105
4.3 电压型逆变电路	106

4.3.1 电压型单相半桥逆变电路	106
4.3.2 电压型单相全桥逆变电路	108
4.3.3 电压型三相桥式逆变电路	110
4.3.4 电压型逆变电路的特点	113
4.4 电流型逆变电路	114
4.4.1 电流型单相桥式逆变电路	114
4.4.2 电流型三相桥式逆变电路	115
4.4.3 电流型逆变电路的特点	116
4.5 逆变器的 SPWM 控制技术	116
4.5.1 SPWM 控制的基本原理	116
4.5.2 单极性 SPWM 控制方式	118
4.5.3 双极性 SPWM 控制方式	119
4.5.4 三相桥式逆变电路的 SPWM 控制	120
4.5.5 SPWM 控制的逆变电路的优点	121
4.6 负载换流式逆变电路	122
4.6.1 并联谐振式逆变电路	122
4.6.2 串联谐振式逆变电路	124
思考题与习题	125
第 5 章 整流电路	127
5.1 整流器的性能指标	128
5.2 单相相控整流电路	129
5.2.1 单相半波相控整流电路	129
5.2.2 单相桥式相控整流电路	135
5.2.3 单相桥式半控整流电路	143
5.3 三相相控整流电路	145
5.3.1 三相半波相控整流电路	146
5.3.2 三相桥式相控整流电路	150
5.4 大容量相控整流电路	158
5.5 相控整流电路的换相压降	162
5.6 整流电路的谐波分析	165
5.6.1 m 脉波相控整流输出电压通用公式	165
5.6.2 单相和三相桥式相控整流电压的谐波分析	167
5.7 有源逆变电路	170
5.7.1 有源逆变的工作原理	170
5.7.2 三相半波有源逆变电路	172
5.7.3 三相桥式有源逆变电路	173

IV 目 录

5.7.4 有源逆变最小逆变角 $\beta_{\min}$ 的限制	173
5.8 晶闸管相控电路的驱动控制	174
5.8.1 对触发电路的要求	175
5.8.2 晶闸管触发电路	176
5.8.3 触发脉冲与主电路电压的同步	185
5.9 PWM 整流电路	188
5.9.1 PWM 整流电路的工作原理	189
5.9.2 PWM 整流电路的控制方法	192
思考题与习题	194
第 6 章 交流变换电路	197
6.1 交流调压电路	197
6.1.1 单相交流调压电路	198
6.1.2 三相交流调压电路	203
6.2 交流调功电路	206
6.3 交流电力电子开关	207
6.4 交-交变频电路	209
6.4.1 单相输出交-交变频电路	209
6.4.2 三相输出交-交变频电路	212
6.4.3 交-交变频电路输出频率上限的限制	213
6.4.4 交-交变频器的优缺点	214
思考题与习题	214
第 7 章 软开关技术	215
7.1 软开关的基本概念	216
7.1.1 软开关及其特点	216
7.1.2 软开关的分类	217
7.2 基本的软开关电路	218
7.2.1 准谐振变换电路	218
7.2.2 零开关 PWM 变换电路	224
7.2.3 零转换 PWM 变换电路	229
思考题与习题	233
第 8 章 电力电子装置	234
8.1 开关电源	235
8.1.1 开关电源的工作原理	235
8.1.2 开关电源的应用	237

8.2 有源功率因数校正	240
8.2.1 有源功率因数校正的工作原理	241
8.2.2 PFC 集成控制电路 UC3854 及其应用	242
8.3 不间断电源	244
8.3.1 UPS 的分类	244
8.3.2 UPS 电源中的整流器	245
8.3.3 UPS 电源中的逆变器	247
8.3.4 UPS 的静态开关	248
8.4 静止无功补偿装置	249
8.4.1 晶闸管控制电抗器(TCR)	250
8.4.2 晶闸管投切电容(TSC)	251
8.4.3 静止无功发生器(SVG)	255
8.5 变频调速装置	256
8.5.1 变频调速的基本控制方式	257
8.5.2 变频调速装置的分类	257
8.5.3 SPWM 变频调速装置	259
8.6 电力电子系统可靠性概述	260
8.6.1 可靠性的基本概念	260
8.6.2 常用的可靠性指标	261
8.6.3 电磁兼容性概述	263
思考题与习题	265
 部分习题参考答案	 266
附录 常用电力电子器件型号及参数	268
参考文献	280

第1章

概 述

将电子技术和控制技术引入传统的电力技术领域,利用半导体电力开关器件组成各种电力变换电路实现电能的变换和控制,构成了一门完整的学科,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。它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。图 1.1.1 形象地描述了电力电子技术这一学科的构成及与其他学科的关系。

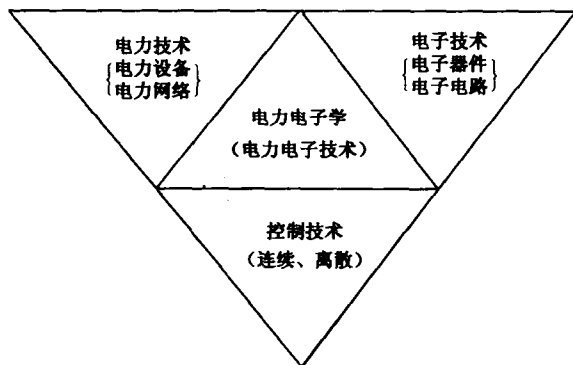


图 1.1.1 电力电子技术学科的构成

电力电子技术包括电力电子器件、电力电子电路和控制技术三个部分,它的研究任务是电力电子器件的应用、电力电子电路的电能量变换原理、控制技术以及电力电子装置的开发与应用。

1.1 电力电子技术的发展

1.1.1 电力电子器件的发展

电力电子技术的发展取决于电力电子器件的研制与应用。电力电子器件是

2 第1章 概述

电力电子技术的基础,也是电力电子技术发展的动力,电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。

1. 半导体整流管(SR)

自 20 世纪初 Gratz 发明汞弧整流管单相桥式整流器以来,用于功率变换的主要器件是汞弧整流管和硒整流器。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。以此为基础,美国在 1956 年研制出了最先用于电力领域的半导体器件——硅整流二极管(Semiconductor Rectifier,简称 SR),又称为电力二极管(Power Diodes,简称 PD)。普通的电力二极管因其正向通态压降(1 V 左右)远比汞弧整流器(10 ~ 20 V)小而取代汞弧整流器,大大提高了整流电路的效率。普通整流管通常应用于 400 Hz 以下的不可控整流电路。随着工艺上以缩短整流管的正反向恢复时间来降低整流管的开关损耗为目的的研究取得成功,人们开发出快恢复整流管和肖特基整流管,并应用于中频(10 kHz 以下)和高频(10 kHz 以上)整流的场合。20 世纪 80 年代中后期,为了进一步减少低压高频开关电源中电力半导体器件的损耗,同步整流管也应运而生。

2. 晶闸管(SCR)及其派生器件

1957 年美国通用电气公司(GE)发明了普通反向阻断型可控硅(Sillicon Controlled Rectifier,简称 SCR),以后称晶闸管(Thyristor)。它标志着电力电子技术的诞生。经过工艺完善和应用开发,到了 20 世纪 70 年代,晶闸管已形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。以晶闸管为主要器件的电力电子技术很快在电化学工业、铁道电气机车、钢铁工业(感应加热)、电力工业(直流输电、无功补偿)中获得了广泛的应用。

晶闸管(SCR)自问世以来,到目前为止其功率容量提高了近 3 000 倍,现在许多国家已能生产 8 kV/4 kA 的晶闸管。近十几年来,由于自关断器件的飞速发展,晶闸管的应用领域有所缩小,但是,由于它的高电压、大电流特性,在 HVDC、静止无功补偿(SVG)、大功率直流电源及超大功率和高压变频调速应用方面仍占有十分重要的地位。预计在今后若干年内,晶闸管仍将在高电压、大电流应用场合得到继续发展。然而,由于晶闸管是只能通过门极电压控制其开通,不能控制其关断的半控型器件,这就使它的应用范围受到了极大的限制。

从 20 世纪 70 年代开始,在其以后的近 30 年时间里,世界各国相继开发出如图 1.1.2 所列的一系列晶闸管的派生器件。

在这些派生器件中,MOS 栅控晶闸管(MCT)是由美国 HARRIS 公司发明的,原希望能够取代 GTO 和 IGBT 器件用于电力系统,后来因其结构及工艺复杂,合格率偏低,成本太高,又没能达到期望的 4 500 V/2 000 A 水平,已经停止了开发投入,这表明 MCT 器件已经被正式淘汰了。集成门极换流晶闸管(IGCT)是由瑞士 ABB 公司和日本三菱公司合作开发的,其容量可达 4 500 V/4 000 A,工作频率



图 1.1.2 晶闸管的派生器件

可达数千赫,已成功应用于中压变频器、电力机车牵引驱动和高压直流输电等领域,这是一种极具发展潜力的高压、大电流的电力半导体器件。而可关断晶闸管(GTO),容量可达 6 000 V/6 000 A,工作频率在 500 Hz 以下,则在低频、高压、大电流应用领域具有优势。可以说,GTO 和 IGCT 两种自关断器件,加上高压、大电流的晶闸管器件就成为今天“灵活交流输电系统”(FACTS)中关键的应用器件。晶闸管的其余派生器件随着高频 PWM 变流技术的迅猛发展已有逐步被淘汰的趋势。尽管如此,人们还是称晶闸管为电力半导体器件发展过程中的第一代发展平台。所谓发展平台,是指这种器件具有渗透性(应用领域广泛)、长期性(生命周期长)及派生性(其派生的器件之多)等方面的特点。

由晶闸管及其派生器件构成的各种电力电子系统在工业应用中主要解决了传统的电能变换装置中所存在的能耗大和装置笨重的问题,因而大大地提高了电能的利用率,同时也使工业噪声得到了一定程度的控制。

3. 功率晶体管(GTR)

1947 年美国贝尔实验室发明了晶体管,经过 20 多年的努力,用于电力变换的功率晶体管(Giant Transistor,简称 GTR)才进入到工业应用领域。到 20 世纪 80、90 年代,GTR 已被广泛应用于中小功率的电路中。GTR 是全控型器件,驱动信号可控制其开通也可控制其关断,它的工作频率比晶闸管高,可达到 10 ~ 20 kHz。尤其是脉冲宽度调制(PWM)技术在 GTR 变换电路中的应用,使得直流线性电源迅速被高频开关电源所取代。GTR 也曾被应用于中小功率电机变频调速(目前已被 MOSFET 或 IGBT 所取代)、不间断电源(UPS)(已被 IGBT 管所替代)等工业领域。但是因为 GTR 存在着二次击穿、不易并联以及开关频率偏低等问题,它的应用范围受到了限制。

4. 功率场效晶体管(MOSFET)

20 世纪 70 年代后期,功率场效晶体管(Power MOSFET)开始进入实用阶段,进入 80 年代人们又在降低器件的导通电阻、消除寄生效应、扩大电压和电流容量以及驱动电路集成化等方面进行了大量的研究,取得了很大的进展。功率场

效晶体管中应用最广的是电流垂直导电结构的器件(VDMOS)。VDMOS 是一种场控可关断器件,具有工作频率高、开关损耗小、安全工作区宽、输入阻抗高、易并联等优点。目前广泛应用于高频开关电源、计算机电源、航空电源、小功率 UPS 以及小功率(单相)变频器等领域。

5. 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)

20 多年前,电力半导体器件较为引人注目的成就之一就是开发出双极型复合器件。目前被认为最具有发展前途的是 1983 年由美国 GE 公司发明的绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor,简称 IGBT)。IGBT 实现了器件高压、大电流参数同其动态参数之间最合理的折中,因而兼有 MOS 器件和双极型器件的突出优点,目前 IGBT 容量可达 4 500 V/1 200 A,3 300 V/1 500 A。十年前人们预测 IGBT 会取代功率晶体管(GTR),现在早已成为事实,目前 IGBT 正成为高电压、大电流应用领域中 GTO 和 IGCT 的潜在竞争者,却是当年未曾预料的。值得关注的是,美国 IR 公司开发了 WAPP 系列 IGBT,美国 APT 公司开发了 GT 系列“霹雳(Thunderbolt)型”IGBT,目前已有 600 V/100 A 以下的此类 IGBT 商品,其硬开关工作频率已高达 150 kHz,而软开关工作频率可达 300 kHz,它的电流密度是相同电压等级的功率 MOSFET 管的 2.5 倍。这种 IGBT 器件的体积比 MOSFET 管小,成本低,所以正在成为高频开关电源中广泛使用的 MOSFET 管强有力的竞争者。另外,逆导型 IGBT 和双向型 IGBT 也正在研制中。

总之,20 年前 IGBT 出现在电力电子技术舞台的时候,尽管它表现出了很好的综合性能,许多人仍难以相信这种器件在大功率领域中的生命力。现在 IGBT 器件显示了巨大的发展前途,它集 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快和 GTR (或 GTO)载流能力大的优点于一身,在大容量、高频率的电力电子电路中表现出非凡的性能,形成了一个新的器件应用发展平台。

6. 功率集成电路(PIC)和智能功率模块(IPM)

多年来,为了提高电力电子装置的功率密度以减小体积,把多个大功率器件组成的各种单元与驱动、保护电路集成一体,构成了功率集成电路(PIC)。制造具有各种不同功能的功率集成电路的最大优势是减少引线,提高可靠性,其经济效益也明显增加。PIC 的应用方便、可靠,代表着电力电子器件的发展方向。

另外,高电压功率集成电路(HVIC)都已形成各种实用系列,但是功率都不是很大。它们实际上是一种微型化的功率变换装置,应用起来可靠而方便。

随着微电子技术的发展,20 世纪 80 年代诞生了智能功率模块(Intelligent Power Module,简称 IPM),将具有驱动、保护、诊断功能的 IC 与电力半导体器件集成在一个模块中,并可用于 10 ~ 100 kW 功率等级的电力电子系统中。由于不同的元器件、电路、集成片的封装或相互连接产生的寄生参数已成为影响电力电子系统性能的关键问题,所以采用 IPM 可以减少设计工作量,使生产自动化,提高

系统品质、可靠性和可维护性,设计周期短,成本低。目前,三相六管封装的 IPM 模块容量可达到 1 200 V/600 A,单相桥臂两管封装的 IPM 容量可达到 1 200 V/2 400 A。大功率 IPM 已成为电力电子技术领域的一个研究重点。

由于分布式电源系统(DPS)的发展,美国海军研究所提出了集成电力电子模块(PEBB)的开发计划来设计舰艇的 DPS。PEBB 计划是把一台电力电子系统的所有硬件都以芯片形式封装在一个模块内,从而使系统的体积达到最小,所有引线减至最少,寄生电感、电容降到最低,可靠性大为提高。IPM 是单层单片集成;而 PEBB 电压高、电流大,属于多层多片集成,结构更复杂,多方向散热,热设计也更复杂。可以预计,到 2010 年可做出单元功率达 1 000 kW 等级的电力电子集成系统。

在电力电子技术走向智能化、高频化、大功率化、模块化、绿色化的进程中,作为其基础的电力半导体器件已经发展到功率集成的新阶段,它为人民的生产、生活、科技发展的现代化提供了一种物质基础。电力半导体器件制造方面的新材料、新技术、新工艺、新品种、新应用的涌现将为人类在新世纪克服能源危机、资源危机和环境危机而做出新的贡献。先进的电力电子器件与计算机控制技术相结合,在各行各业发挥了重要作用,给电力电子技术注入了强大的生命力。

综上所述,电力半导体器件经过了 50 多年的发展,在器件制造技术上不断提高,已经历了以硅整流管(SR)、晶闸管(SCR)、可关断晶闸管(GTO)、功率晶体管(GTR)、功率场效晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的分立器件,以功率集成器件为代表的 PIC 和以智能化功率集成模块为代表的 IPM 发展时期。按照其控制特性,电力半导体器件可分为硅整流管(SR)为代表的不可控器件,晶闸管(SCR)为代表的只能通过门极电压控制其开通不能控制其关断的半可控器件和以可关断晶闸管(GTO)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的既能控制其开通又能控制其关断的全控型器件三大类。在器件的控制模式上,从电流型控制模式发展到电压型控制模式,不仅大大降低了门极(栅极)的控制功率,而且大大提高了器件导通与关断的转换速度,从而使器件的工作频率由工频→中频→高频不断提高。在器件结构上,从分立器件,发展到由驱动电路、控制电路、传感电路、保护电路、逻辑电路等集成在一起的高度智能化的功率集成模块,继而将功率变换电路与触发控制电路、缓冲电路、检测电路等组合在一起的复杂模块。它实现了器件与电路的集成,强电与弱电、功率流与信息流的集成,成为机和电之间的智能化接口,是机电一体化的基础单元,预计 IPM 的发展将会使电力电子技术实现第二次革命,进入全新的智能化时代。

1.1.2 电力电子电路及其控制技术的发展

电力电子电路的根本任务是实现电能变换和控制。完成电能变换和控制的