



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

▼
……
(第2版)
……
▲



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电力电子技术

D i a n l i D i a n z i J i s h u

浣喜明 姚为正 编著

……(第2版)……



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

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四大类电力电子电路的工作原理、参数计算方法 and 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。

本书适用于高等学校电气工程及其自动化、自动化以及机电一体化等专业,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. —2 版. —北京:高等教育出版社,2011.7

ISBN 978 -7 -04 -032611 -6

I. ①电… II. ①浣…②姚… III. ①电力电子技术-教材

IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 124045 号

策划编辑 韩 颖

责任编辑 王勇莉

封面设计 赵 阳

版式设计 范晓红

插图绘制 尹 莉

责任校对 陈旭颖

责任印制 张福涛

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 100120
印 刷 北京市白帆印务有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 17.75
字 数 390 千字
购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2004 年 8 月第 1 版
2011 年 7 月第 2 版
印 次 2011 年 7 月第 1 次印刷
定 价 29.70 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 32611 - 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培养的教学内容、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。

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培养的需要。

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

第2版前言

本书的第1版于2004年由高等教育出版社出版,多年来受到国内众多高等学校相关专业的师生的关心和爱戴,将本书选作教材。本书有成功之处,得到广大读者的肯定,也有不足之处,谢谢读者提出了很多宝贵的修改意见。为了适应高等教育迅速发展的形势需要以及电气信息类专业人才培养方案和教学内容体系改革的需要,本书在第1版的基础上作了适当修改,主要变化有:

1. 第2版中“概述”不单独设为一章,精选内容后仍然命名为“概述”;
2. 在“电力电子器件”一章减少对器件微观特性的描述,加强对全控型器件的特性和驱动与保护电路介绍;
3. 在“软开关技术”一章中加入移相全桥型零电压软开关PWM变换电路的内容;
4. 在“无源逆变电路”一章中增加多重逆变电路和多电平逆变电路的内容;
5. 在“整流电路”一章中增加多重化整流电路的内容;
6. 在“电力电子装置”一章中增加应用实例的介绍,例如高频逆变焊接电源等;
7. 删去一些章节中较繁琐的数学公式的推导等。

与第1版相比,第2版增加了更多的例题、思考题和习题,可帮助读者提高认识、强化记忆。在附录中本书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。

本书既注重电力电子理论的完整性、严密性和先进性,又突出了应用技术。适用于本科学校电类各相关专业作为教材,也可供企、事业单位工程技术人员学习参考。

本书中应用了许多国内、外业内公司提供的大量的应用技术资料和产品样本,他们为本书的编写提供了重要帮助,作者表示衷心的感谢。

作者还对书末所列参考文献的作者表示衷心的感谢。

本书自第1版出版以来,已经重印了十多次,深受广大读者的爱戴,也得到了同行们的关心和支持,作者在此表示衷心的感谢。由于作者学识水平有限,书中的疏漏和错误之处,期望使用本书的师生批评指正。

编者

2010年12月

E-mail: hxm@hnie.edu.cn

huanxm@163.com

第1版前言

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、参数计算方法和应用范围。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

E-mail: hxm@hnie.edu.cn

目 录

概述	1	1.7 绝缘栅双极型晶体管	41
1 电力电子技术的发展	1	1.7.1 绝缘栅双极型晶体管及其工作原理	41
2 电力电子技术的应用领域	7	1.7.2 绝缘栅双极型晶体管的特性与主要参数	42
3 课程性质与学习方法	10	1.8 其他新型电力电子器件	45
第1章 电力电子器件	11	1.8.1 静电感应晶体管	45
1.1 电力电子器件的基本模型	11	1.8.2 静电感应晶闸管	46
1.1.1 电力电子器件的基本模型与特性	11	1.8.3 MOS 控制晶闸管	47
1.1.2 电力电子器件的种类	12	1.8.4 集成门极换流晶闸管	49
1.2 电力二极管	13	1.8.5 功率模块与功率集成电路	50
1.2.1 电力二极管及其工作原理	13	1.9 电力电子器件的驱动与保护	52
1.2.2 电力二极管的特性与主要参数	14	1.9.1 电力电子器件的换流方式	53
1.3 晶闸管	17	1.9.2 驱动电路	54
1.3.1 晶闸管及其工作原理	18	1.9.3 保护电路	61
1.3.2 晶闸管的特性与主要参数	19	1.9.4 缓冲电路	63
1.3.3 晶闸管的派生器件	26	1.9.5 散热系统	64
1.4 可关断晶闸管	29	思考题与习题	65
1.4.1 可关断晶闸管及其工作原理	29	第2章 直流变换电路	68
1.4.2 可关断晶闸管的特性与主要参数	30	2.1 直流变换电路的工作原理	69
1.5 电力晶体管	31	2.2 降压变换电路	70
1.5.1 电力晶体管及其工作原理	31	2.3 升压变换电路	74
1.5.2 电力晶体管的特性与主要参数	33	2.4 升降压变换电路	78
1.6 电力场效晶体管	36	2.5 库克变换电路	82
1.6.1 电力场效晶体管及其工作原理	36	2.6 带隔离变压器的直流变换器	85
1.6.2 电力场效晶体管的特性与主要参数	38	2.6.1 反激式变换器	85
		2.6.2 正激式变换器	86
		2.6.3 推挽式变换器	88
		2.6.4 半桥式变换器	89
		2.6.5 全桥变换电路	91

2.7 直流变换电路的 PWM 控制技术	93	4.2.1 单相半波相控整流电路	124
思考题与习题	94	4.2.2 单相桥式相控整流电路	129
第3章 无源逆变电路	96	4.2.3 单相桥式半控整流电路	136
3.1 逆变器的分类与性能指标	96	4.3 三相相控整流电路	138
3.1.1 逆变电路的分类	96	4.3.1 三相半波相控整流电路	138
3.1.2 逆变器的性能指标	97	4.3.2 三相桥式相控整流电路	143
3.2 逆变电路的工作原理	98	4.4 大容量相控整流电路	150
3.3 电压型逆变电路	98	4.4.1 带平衡电抗器的双反星形相控整流电路	151
3.3.1 电压型单相半桥逆变电路	98	4.4.2 多重化整流电路	154
3.3.2 电压型单相全桥逆变电路	100	4.5 相控整流电路的换相压降	157
3.3.3 电压型三相桥式逆变电路	103	4.6 整流电路的谐波分析	159
3.3.4 电压型逆变电路的特点	106	4.6.1 m 脉波相控整流输出电压通用公式	159
3.4 电流型逆变电路	106	4.6.2 单相和三相桥式相控整流电压的谐波分析	162
3.4.1 电流型单相桥式逆变电路	107	4.7 整流电路的有源逆变工作状态	164
3.4.2 电流型三相桥式逆变电路	107	4.7.1 有源逆变的工作原理	164
3.4.3 电流型逆变电路的特点	108	4.7.2 三相半波有源逆变电路	166
3.5 多重逆变电路和多电平逆变电路	108	4.7.3 三相桥式有源逆变电路	167
3.5.1 多重逆变电路	108	4.7.4 有源逆变最小逆变角 $\beta_{\min}$ 的限制	167
3.5.2 多电平逆变电路	112	4.8 晶闸管相控电路的驱动控制	168
3.6 逆变器的 SPWM 控制技术	113	4.8.1 对触发电路的要求	168
3.6.1 SPWM 控制的基本原理	113	4.8.2 晶闸管触发电路	169
3.6.2 单极性 SPWM 控制方式	115	4.8.3 触发脉冲与主电路电压的同步	176
3.6.3 双极性 SPWM 控制方式	116	4.9 PWM 整流电路	179
3.6.4 三相桥式逆变电路的 SPWM 控制	116	4.9.1 PWM 整流电路的工作原理	180
3.6.5 SPWM 控制的逆变电路的优点	117	4.9.2 PWM 整流电路的控制方法	182
3.7 负载换流式逆变电路	118	思考题与习题	184
3.7.1 并联谐振式逆变电路	118	第5章 交流变换电路	187
3.7.2 串联谐振式逆变电路	120	5.1 交流调压电路	187
思考题与习题	121	5.1.1 单相交流调压电路	188
第4章 整流电路	122		
4.1 整流器的性能指标	122		
4.2 单相相控整流电路	124		

5.1.2 三相交流调压电路	192	7.2.2 高频逆变弧焊电源	230
5.2 交流调功电路	195	7.3 有源功率因数校正	233
5.3 交流电力电子开关	195	7.3.1 有源功率因数校正的 工作原理	233
5.4 交-交变频电路	197	7.3.2 PFC 集成控制电路 UC3854 及其应用	234
5.4.1 单相输出交-交变频电路	197	7.4 不间断电源	236
5.4.2 三相输出交-交变频电路	200	7.4.1 UPS 的分类	236
5.4.3 交-交变频电路输出频率 上限的限制	201	7.4.2 UPS 电源中的整流器	237
5.4.4 交-交变频器的优缺点	201	7.4.3 UPS 电源中的逆变器	238
思考题与习题	202	7.4.4 UPS 的静态开关	239
第 6 章 软开关技术	203	7.5 静止无功补偿装置	240
6.1 软开关的基本概念	203	7.5.1 晶闸管控制电抗器(TCR)	241
6.1.1 软开关及其特点	203	7.5.2 晶闸管投切电容器(TSC)	241
6.1.2 软开关的分类	205	7.5.3 静止无功发生器(SVG)	245
6.2 基本的软开关电路	205	7.6 变频调速装置	246
6.2.1 谐振型变换电路	205	7.6.1 变频调速的基本控制方式	247
6.2.2 零开关 PWM 变换电路	211	7.6.2 变频调速装置的分类	247
6.2.3 移相全桥型零电压软开关 PWM 变换电路	215	7.6.3 SPWM 变频调速装置	249
6.2.4 零转换 PWM 变换电路	218	7.7 电力电子系统可靠性概述	250
思考题与习题	222	7.7.1 可靠性的基本概念	250
第 7 章 电力电子装置	223	7.7.2 常用的可靠性指标	250
7.1 开关电源	223	7.7.3 电磁兼容性概述	252
7.1.1 开关电源的工作原理	223	思考题与习题	254
7.1.2 开关电源的应用	225	部分习题参考答案	255
7.2 高频逆变焊接电源	228	附录 常用电力电子器件型号 及参数	257
7.2.1 电弧和弧焊电源的特性与 分类	229	参考文献	268

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。1976 年 Dr. Newell 用图 0.1.1 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。

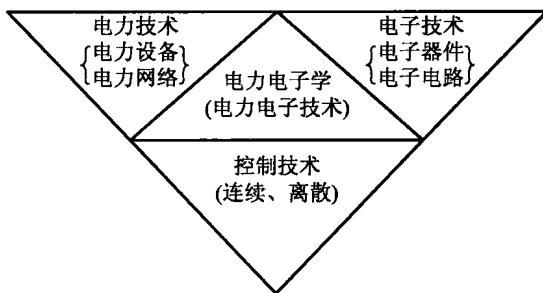


图 0.1.1 电力电子技术学科的构成

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变换原理、控制技术以及电力电子装置的开发与应用。

1 电力电子技术的发展

(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)

20 世纪初自从 Grzetz 发明汞弧整流管单相桥式整流器开始，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

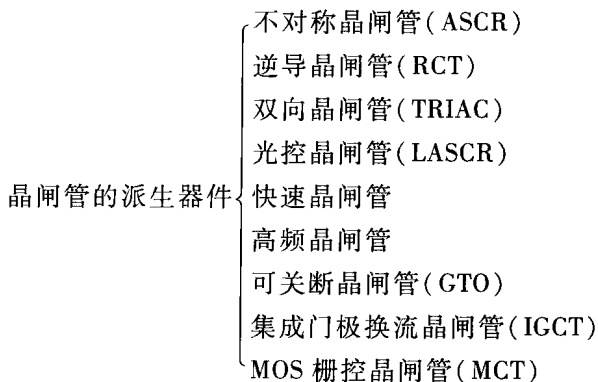
而取代汞弧整流器，大大提高了整流电路的效率。普通整流管通常应用于 400 Hz 以下的不可控整流电路。随着工艺上以缩短整流管的正反向恢复时间来降低整流管的开关损耗为目的的研究取得成功，人们开发出快恢复整流管和肖特基整流管，并应用于中频(10 kHz 以下)和高频(10 kHz 以上)整流的场合。20 世纪 80 年代中后期，为了进一步减小低压高频开关电源中整流器件的损耗，同步整流技术也应运而生。

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(Silicon 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，在高压直流输电(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。

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下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当今电力电子技术中高压、大电流领域的关键器件。

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相当程度的控制。

③ 功率晶体管(GTR)

自从 1947 年美国贝尔实验室发明了晶体管后,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。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)

1983 年由美国 GE 公司发明了绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor,简称 IGBT)。IGBT 是由 GTR 和 MOSFET 组成的复合全控型电压驱动式电力半导体器件,它兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降两方面的优点。GTR 饱和压降低,载流密度大,但驱动电流较大;MOSFET 驱动功率很小,开关速度快,但导通压降大,载流密度小。IGBT 综合了以上两种器件的优点,驱动功率小而饱和压降低,实现了器件高电压、大电流参数同其动态参数之间最合理的折中。由于 IGBT 为电压型驱动,具有驱动功率小、开关速度高、饱和压降低、可耐高电压和大电流等一系列优点,表现出很好的综合性能,已成为当前在工业领域应用最广泛的电力半导体器件。二十几年前当 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,在大容量、高频率的电力电子电路中表现出非凡的性能,其硬开关频率达 25 kHz,软开关频率可达 100 kHz。而新研制成的霹雳(Thunderbolt)型 IGBT,其硬开关频率可达 150 kHz,在谐振逆变软开关电

路中可达 300 kHz。形成了一个新的器件应用平台。

目前 IGBT 容量可达 4 500 V/1 800 A、3 300 V/1 500 A。二十多年前人们预测的 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。

⑥ 功率集成电路(PIC)和智能功率模块(IPM)

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、检测电路集成一体,构成了功率集成电路(Peripheral Interface Controller,简称 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都已形成各种实用系列,它们实际上是一种微型化的功率变换装置,应用起来既可靠又方便,但是其功率都不是很大。

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、集成芯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,提高系统品质、可靠性和可维护性。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。

综上所述,电力半导体器件经过了 60 多年的发展,制造技术水平不断提高,已经历了以硅整流管(SR)、晶闸管(SCR)、可关断晶闸管(GTO)、巨型晶体管(GTR)、功率 MOSFET、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的分立器件,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 PIC 和 IPM。按照其控制特性来说,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流控制其开通不能控制其关断的半控型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。在电力电子技术走向智能化、高频化、大功率化、模块化的进程中,作为其基础的新型电力半导体器件的不断涌现,为电力电子技术的发展做出新的贡献。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。

(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电路称为电力电子电路,这是电力电子技术的主要内容,其基本形式可分为如下四种:

① 直流变换电路

将直流电能转换为另一固定电压或可调电压的直流电能的电路称为直流变换电路。它

的基本原理是利用电力开关器件周期性的开通与关断来改变输出电压的大小,因此也称为开关型 DC/DC 变换电路或称直流斩波器。直流变换技术广泛地应用于无轨电车、地铁列车、蓄电池供电的机动车辆的无级变速电动汽车的控制,从而获得加速平稳、快速响应的性能。特别要提出的是,20 世纪 80 年代以来兴起的采用直流变换技术的高频开关电源的发展最为迅猛,它以体积小、重量轻、效率高等优点在民用工业、军事和日常生活中均有着广泛的应用,为计算机、通信、消费电子等类产品提供可靠的直流电源。

② 逆变电路

将直流电能变换为交流电能的电路称为逆变电路,也称为 DC/AC 变换电路。完成逆变的电力电子装置称为逆变器。如果将逆变电路的交流侧接到交流电网上,把直流电逆变成同频率的交流电反送到电网去,称为有源逆变。它用于直流电机的可逆调速、绕线转子异步电机的串级调速、高压直流输电和太阳能发电等方面;如果逆变器的交流侧直接接到负载,即将直流电逆变成某一频率或可变频率的交流电供给负载,则称为无源逆变,它在交流电机变频调速、感应加热、不间断电源等方面应用十分广泛,是构成电力电子技术的重要内容。

③ 整流电路

将交流电能转换为直流电能的电路称为整流电路,也称为 AC/DC 变换电路。完成整流任务的电力电子装置称为整流器。对晶闸管组成的整流器实施相移控制技术可将不变的交流电压变换为大小可控的直流电压,即实现相控整流。晶闸管相控整流能取代传统的直流发电机组实现直流电机的调速,广泛应用于机床、轧钢、造纸、纺织、电解、电镀等领域。但是,晶闸管相控整流电路的输入电流滞后于电压,其滞后角随着触发延迟角 α 的增大而增大,输入电流中谐波分量相当大,因此功率因数很低。把逆变电路中的 SPWM 控制技术用于整流电路,就构成了 PWM 整流电路。通过对 PWM 整流电路的适当控制,可以使其输入电流非常接近正弦波,且和输入电压同相位,功率因数近似为 1。这种整流电路也可以称为高功率因数整流器,其应用前景十分广泛。

④ 交流变换电路

把交流电能的参数(幅值,频率)加以转换的电路称为交流变换电路,也称为 AC/AC 变换电路。根据变换参数的不同,交流变换电路可以分为交流调压电路和交-交变频电路。交流调压电路是维持频率不变,仅改变输出电压的幅值。它广泛应用于电炉温度控制、灯光调节、异步电机的软启动和调速等场合。交-交变频电路也称直接变频电路(或周波变流器),是不通过中间直流环节而把电网频率的交流电直接变换成不同频率的交流电的变换电路,主要用于大功率交流电机调速系统。除此之外,还有采用全控型器件加 PWM 控制技术的交流变换器(又称交流斩波器),目前由于成本太高,一般很少使用。

⑤ 电力电子控制技术

要让电力电子电路完成各种工作任务,必须为功率变换主电路中的开关器件配以提供驱动信号的控制电路。驱动信号的产生依赖于特定的控制策略和控制算法。最常用的是相控方式,即采用延时脉冲控制功率器件导通的相位。它在半控型器件的整流、逆变、交流

调压等电路中获得了广泛的应用。除此之外,在大量采用全控型器件的电力电子电路中,为了减小输出电能中的谐波分量,把通信工程中脉冲宽度调制理论(PWM)应用到电力变换装置中。所谓 PWM 技术就是利用电力半导体器件的开通和关断产生一定形状的电压脉冲序列,经过低通滤波器后实现电能变换,并有效地控制和消除谐波的一种技术。在电力电子技术中,采用 PWM 控制技术可提高装置的功率因数,能同时实现变频变压,成为了功率变换电路中的核心控制技术,被广泛应用到整流、斩波、逆变、交流变换等电路。同时,脉冲幅度调制(PAM)和脉冲频率调制(PFM)也得到了较多的应用。

对于动态性能和稳态精度要求较高的场合,还必须广泛采用自动控制技术和理论。例如对线性负载常采用比例加积分加微分(PID)控制方法;对非线性负载(如交流电机)常常采用矢量控制方法。

为了提高电力电子装置的功率密度,必须提高功率器件的开关频率,同时器件的开关损耗也随之加大。减小开关损耗、提高效率是电力电子技术的重要问题。如果在电力电子变换电路中采取一些措施,如改变电路结构和控制策略,使开关器件被施加驱动信号而开通过程中其端电压为零,这种开通称为零电压开通;若使开关器件撤除其驱动信号后的关断过程中其承载的电流为零,这种关断称为零电流关断。零电压开通和零电流关断是最理想的软开关,其开关过程中无开关损耗。如果开关器件在开通过程中端电压很小,在关断过程中其电流也很小,这种开关过程的功率损耗不大,称为软开关。近年来软开关技术在电力电子系统设计中获得了广泛的应用。

针对生产、生活提出的实际问题,选择合适的电力电子电路,并采用传感技术、现代控制理论、微处理器、CPLD、DSP 以及大规模集成电路实现特定的控制方式,能组成多种完成特定任务的电力电子装置。

综上所述,利用 20 世纪 50 年代发展起来的晶闸管及其派生的 GTO 器件、功率整流管(SR)和 GTR 等为基础所形成的电力电子技术,可称为传统电力电子技术。这一发展时期比较典型的电路结构有不可控整流电路、相控整流电路、逆变电路以及交流变换电路等形式。由于上述器件的工作频率较低,控制不方便,因而均无法方便地实施高频 PWM 脉宽调制技术。另外,由上述器件(SCR、GTO、SR、GTR)构成的电力电子装置或系统,在消除电网侧的电流谐波、改善电网侧的功率因数、逆变器输出波形控制、减少环境噪声污染、进一步提高电能利用率、降低原材料消耗以及提高系统的动态性能等方面都遇到了困难,可以说,利用基于低频技术的传统电力电子技术处理电能变换问题不是一种理想的方法。

从 20 世纪 80 年代末期发展起来的以功率 MOSFET 和 IGBT 为代表的,集高频、高压和大电流于一身的功率半导体复合器件问世。它们的发展与应用改变了人们长期以来用低频技术处理电力电子技术问题的习惯,转入到以高频 PWM 脉宽调制技术处理电力电子技术问题的新阶段,表明传统电力电子技术已经进入现代电力电子技术时代。也就是说,以高频 PWM 技术处理问题的现代电力电子技术使人们进入到电能变换尤其是频率变换可以更加自如控制的年代,并有效地实现了绿色用电与高效、节能的电能变换,从而开创了人