



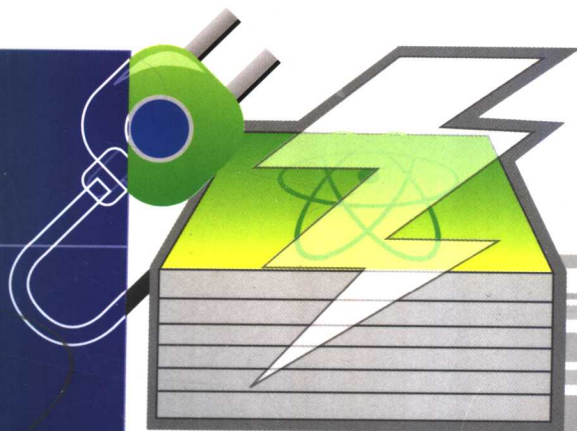
21st CENTURY

十一五规划教材

21世纪全国高等院校

自动化系列

实用规划教材



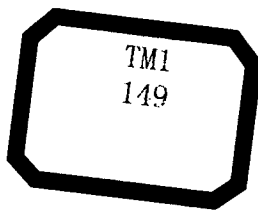
电力电子技术

主 编 樊立萍 王忠庆
副主编 张绍忠

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

电力电子技术

主 编	樊立萍	王忠庆
副主编	张绍忠	
参 编	侯云海	虞菊英
	张建军	陈 霞

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是一本面向自动化及电气自动化专业的电力电子技术教材。全书分为 10 章,深入浅出地介绍了常用电力电子器件的结构、原理、特性及驱动与保护方法;论述了各种典型电力电子电路的工作原理、波形分析、参数计算及应用情况;同时还就电力公害及其抑制问题进行了探讨。本书依据应用型人才培养目标,遵循“面向就业,突出应用”的原则,力求做到学科体系完整、理论联系实际、夯实基础知识、突出时代气息。

本书可作为电气工程及自动化专业本科教材,也可以作为电气工程领域及工业自动化领域研究生及广大科技人员和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/樊立萍,王忠庆主编. —北京:中国林业出版社;北京大学出版社,2006.7

(21世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4411-6

I. 电… II. ①樊… ②王… 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(2006)第072811号

书 名: 电力电子技术

著作责任者: 樊立萍 王忠庆 主编

策划编辑: 李 虎

责任编辑: 李娉婷 曹 岚

标准书号: ISBN 7-5038-4411-6

出 版 者: 中国林业出版社(地址:北京市西城区德内大街刘海胡同7号 邮编:100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 总编室 66180373 营销中心: 66187711

北京大学出版社(地址:北京市海淀区成府路205号 邮编:100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 17.5印张 398千字

2006年7月第1版 2006年7月第1次印刷

定 价: 25.00元

《21世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

专家编审委员会

主任委员 张德江

副主任委员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈 静 丁坚勇 侯媛彬

纪志成 任庆昌 吴 斌

秘书长 于微波

委 员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈志新 戴文进 段晨旭 樊立萍

范立南 公茂法 关根志 嵇启春

蒋 中 雷 霞 刘德辉 刘永信

刘 原 马永翔 孟祥萍 孟彦京

聂诗良 王忠庆 吴旭云 燕庆明

杨新华 尤 文 张桂青 张井岗

总 序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学与技术的迅速发展和广泛应用，深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学与技术的发展。自动化科学与技术涉及到信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面，是信息科学与技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中，工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标，党和国家提出走新型工业化道路的战略决策，这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化，就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中，自动化科学与技术起着不可替代的重要作用，高等学校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣的历史使命。

我国高等教育中工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%~40%，其中自动化类的学生是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天，人才培养模式多样化已成为必然的趋势，其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养，发挥院校之间相互合作的优势，北京大学出版社组织了“21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材”。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者，由此确定了教材的使用范围，也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点：

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养规格大多定位在高级应用型，对这一大类人才的培养要注重面向工程实践，培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发，本系列教材注重实用性，注意引用工程中的实例，培养学生的工程意识和工程应用能力，因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容，跟进时代，加入一些新的先进实用的知识，同时淘汰一些陈旧过时的内容。

(3) 院校间合作交流的果。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北大出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会，来自各院校的教师比较充分地交流了情况，在相互借鉴、取长补短的基础上，形成了编写大纲，确定了编写原则。因此，这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和作法。

(4) 这一系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程，到目前为止，列入计划的已有 30 多门，教材门数多，参与的院校多，参加编写人员多。

II

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学之用，将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性，在审纲会上强调了“质量第一，明确责任，统筹兼顾，严格把关”的原则，要求各位主编加强协调，认真负责，努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责，密切合作，努力使自己的作品受到读者的认可和欢迎。尽管如此，由于院校之间、编者之间的差异性，教材中还是难免会出现一些问题和不足，欢迎选用本系列教材的教师、学生提出批评和建议。

张德江

2006年1月

前 言

电力电子技术是电气工程学科的基础课程,由电力电子器件、电力电子电路、电力电子系统及其控制三部分组成,是电力电子装置、开关电源技术、自动控制系统、变频调速应用、柔性输电系统等课程的先行课程。同时,也是电气信息类其他相关专业的重要基础课之一。电力电子技术作为 21 世纪解决能源危机的必备技术之一而受到重视。本书依据应用型人才培养目标,遵循“面向就业,突出应用”的原则,注重教材的“科学性、实用性、通用性、新颖性”,力求做到学科体系完整、理论联系实际、夯实基础知识、突出时代气息,具备科学性及新颖性,并强调知识的渐进性,兼顾知识的系统性,注重培养学生的实践能力。本书着重讲授各种电能变换电路的基本工作原理、电路结构、电气性能、波形分析方法和参数计算等。通过对本课程的学习,学生能理解并掌握电力电子技术领域的相关基础知识,培养其分析问题、解决问题的能力,了解电力电子学科领域的发展方向。

本书对教学内容及所编章节顺序进行了合理调整与规划,删减了传统教材中过时的内容,增加了电力电子技术领域的最新成果。本书内容包括三部分。第一部分系统介绍常用电力电子器件的工作原理和特性。第二部分介绍了相控整流电路、直流斩波电路、电力电子电路、交流变换电路、逆变电路、软开关电路等典型电力电子电路的工作原理及参数计算。第三部分介绍电力电子装置的典型应用,并对电力电子装置应用过程中所引起的电力公害及其抑制方法做了介绍。为便于教师讲授与学生学习,本书的编写内容中还融入了适当的例题和大量的思考题与习题。

本书由沈阳化工学院樊立萍、中北大学王忠庆任主编,平顶山工学院张绍忠任副主编,长春工业大学侯云海、南昌工程学院虞菊英、西安石油大学张建军、山东科技大学陈霞参编。全书共分 10 章,其中,第 1、3 章(单相部分)由樊立萍编写;第 2、7 章由张绍忠编写;第 3 章(三相部分)、第 9 章由张建军编写;第 4 章由侯云海编写;第 5 章由陈霞编写;第 6 章由虞菊英编写;第 8、10 章由王忠庆编写。樊立萍最后统稿并定稿。

本书可作为电气工程及自动化专业本科教材,也可以作为电气工程领域及工业自动化领域研究生的参考书,对该领域的工程技术人员也有较高的参考价值。

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

编 者
2006 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 本课程教学要求	1
1.1.1 本课程任务.....	1
1.1.2 本课程的基本要求.....	1
1.2 电力电子技术发展概况	1
1.2.1 电力电子技术内涵.....	1
1.2.2 电力电子器件的发展.....	2
1.2.3 变流电路的发展.....	4
1.2.4 控制技术的发展.....	5
1.3 变流电路分类与功能	6
1.4 电力电子技术应用	6
1.4.1 电源.....	6
1.4.2 电气传动.....	8
1.4.3 电力系统.....	8
习题	10
第 2 章 电力电子器件	11
2.1 电力电子器件分类	11
2.1.1 按受控方式分.....	12
2.1.2 按载流子类型分.....	12
2.1.3 按控制信号性质分.....	13
2.2 晶闸管原理与特性	13
2.2.1 晶闸管基本结构.....	13
2.2.2 晶闸管工作原理.....	14
2.2.3 晶闸管基本特性.....	16
2.2.4 晶闸管主要参数.....	20
2.3 特殊用途晶闸管	23
2.3.1 快速晶闸管.....	23
2.3.2 逆导晶闸管.....	24
2.3.3 双向晶闸管.....	24
2.3.4 光控晶闸管.....	25
2.4 常用全控型器件	26
2.4.1 功率晶体管 GTR.....	26
2.4.2 门极可关断晶闸管 GTO	31
2.4.3 功率场效应晶体管 (P-MOSFET)	34
2.4.4 绝缘栅双极型晶体管 IGBT	37
2.4.5 功率集成电路 PIC	40
习题	45
第 3 章 相控整流电路	47
3.1 单相相控整流电路	47
3.1.1 单相半波相控整流电路	47
3.1.2 单相桥式半控整流电路	51
3.1.3 单相桥式全控整流电路	54
3.2 三相相控整流电路	58
3.2.1 三相半波相控整流电路	58
3.2.2 三相桥式全控整流电路	67
3.2.3 三相桥式半控整流电路	74
3.3 整流电路的谐波分析	78
3.3.1 m 脉波相控整流电压 通用公式	78
3.3.2 单相和三相桥式相控 整流谐波特性	80
3.4 有源逆变原理	81
3.4.1 电网与直流电动机间的 能量转换	81
3.4.2 有源逆变的工作原理	82
3.5 三相有源逆变电路	83
3.5.1 三相半波有源逆变电路	84
3.5.2 三相桥式逆变电路	86
3.6 逆变失败及最小逆变角的确定	87
3.6.1 逆变失败的原因	87
3.6.2 换相重叠角	88
3.6.3 最小逆变角的确定及 常用方法	92

3.7 晶闸管直流可逆拖动系统的 工作原理..... 93	5.5 Cuk 斩波电路..... 143
3.7.1 用接触器控制直流电 动机正反转的电路..... 93	5.5.1 电路结构..... 144
3.7.2 采用两组晶闸管反 并联的可逆电路..... 94	5.5.2 连续导电模式..... 144
习题..... 96	5.5.3 断续导电模式..... 145
第 4 章 电力电子器件的 驱动与保护..... 99	5.6 其他形式斩波电路..... 145
4.1 电力电子器件的驱动..... 99	5.6.1 Sepic 斩波电路..... 145
4.1.1 晶闸管触发电路..... 99	5.6.2 Zeta 斩波电路..... 146
4.1.2 GTO 驱动电路..... 109	习题..... 146
4.1.3 GTR 驱动电路..... 111	第 6 章 交流变换电路..... 148
4.1.4 IGBT 驱动电路..... 115	6.1 交流变换器类型..... 148
4.2 电力电子器件的保护..... 120	6.2 晶闸管交流开关..... 149
4.2.1 电力电子器件的 散热技术..... 120	6.2.1 简单交流开关及应用..... 149
4.2.2 电力电子器件的保护..... 123	6.2.2 由过零触发开关电路 组成的单相交流调功器..... 151
4.2.3 缓冲电路..... 128	6.2.3 固态开关..... 154
习题..... 132	6.3 交流调压电路..... 155
第 5 章 直流斩波电路..... 133	6.3.1 单相交流调压电路..... 155
5.1 斩波电路的基本原理..... 133	6.3.2 三相交流调压电路..... 163
5.2 降压斩波电路(Buck 电路)..... 134	6.4 交-交变频电路..... 168
5.2.1 电路结构与基本原理..... 134	6.4.1 交-交变频电路的用途..... 168
5.2.2 连续导电模式..... 134	6.4.2 单相交-交变频电路..... 170
5.2.3 断续导电模式..... 136	6.4.3 三相交-交变频电路..... 175
5.2.4 输出电压纹波..... 137	习题..... 179
5.3 升压斩波电路(Boost 电路)..... 137	第 7 章 逆变电路..... 180
5.3.1 电路结构与基本原理..... 138	7.1 无源逆变原理..... 180
5.3.2 连续导电模式..... 138	7.1.1 器件换流方式..... 181
5.3.3 断续导电模式..... 139	7.1.2 逆变器的工作原理..... 182
5.3.4 输出电压纹波..... 141	7.2 单相逆变电路..... 183
5.4 升降压斩波电路 (Buck-Boost 电路)..... 141	7.2.1 单相半桥逆变电路..... 183
5.4.1 电路结构..... 141	7.2.2 单相全桥逆变电路..... 184
5.4.2 连续导电模式..... 141	7.3 三相逆变电路..... 187
5.4.3 断续导电模式..... 143	7.3.1 电压型三相桥 式逆变电路..... 188
	7.3.2 电流型三相桥 式逆变电路..... 192
	7.4 逆变器的 PWM 控制技术..... 194
	7.4.1 PWM 控制的基本原理..... 195

7.4.2 PWM 逆变电路的 控制方式.....	197	9.3.1 电磁干扰的产生	242
7.4.3 PWM 跟踪控制技术.....	201	9.3.2 电磁干扰抑制	243
7.4.4 SPWM 生成方法.....	206	9.4 提高功率因数的对策	246
7.4.5 PWM 逆变电路的 谐波抑制.....	209	9.4.1 变流装置的功率因数	246
习题	217	9.4.2 提高功率因数的 原理与方法	247
第 8 章 软开关技术	219	习题	250
8.1 软开关的基本概念	219	第 10 章 电力电子技术的应用	251
8.1.1 硬开关的局限性.....	219	10.1 直流电源	251
8.1.2 软开关及其特点.....	220	10.1.1 直流电源系统	251
8.1.3 软开关的分类.....	222	10.1.2 开关模直流电源的控制	252
8.2 基本软开关电路	223	10.1.3 直流电源的保护	253
8.2.1 ZVS 准谐振变换电路	224	10.1.4 电气隔离	254
8.2.2 ZCS 准谐振变换电路	226	10.1.5 多路输出电源的 交叉调节	255
8.2.3 ZVS PWM 变换电路	229	10.2 不间断电源(UPS)	255
8.2.4 ZCS PWM 变换电路.....	230	10.2.1 整流电路	256
习题	234	10.2.2 逆变器	257
第 9 章 电力公害及其抑制	235	10.3 电子镇流器	257
9.1 电力公害及其分类	235	10.4 感应加热	257
9.1.1 什么是电力公害.....	235	10.5 开关模焊接	258
9.1.2 电力公害分类.....	235	10.6 电动机驱动	259
9.2 谐波产生及其抑制	236	10.6.1 直流电动机的驱动	259
9.2.1 谐波产生机理.....	236	10.6.2 感应电动机的驱动	262
9.2.2 谐波抑制对策.....	239	10.6.3 同步电动机的驱动	264
9.3 电磁干扰及其抑制	242	习题	265
		参考文献	266

第1章 绪 论

电力电子技术是利用电力电子器件对电能进行变换及控制的一种现代技术。本章主要介绍电力电子技术的发展概况、应用领域及其在本专业学科领域中的地位和作用等。

本章要求掌握电力电子技术的基本概念、发展轨迹、应用领域、发展前景，以及学习本课程的基本要求。

1.1 本课程教学要求

1.1.1 本课程任务

本课程属于自动化、电气工程及其自动化、机械电子工程等本科专业的专业基础课，是一门理论与应用相结合的课程，具有很强的实践性。

本课程的目的和任务是使学生通过学习后，获得电力电子技术必要的基本理论、基本分析方法以及基本技能的培养和训练，为学习后续课程以及从事与电气工程及其自动化专业有关的技术工作和科学研究打下一定的基础。

1.1.2 本课程的基本要求

- ① 了解电力电子技术的应用范围和发展动向。
- ② 熟悉和掌握晶闸管、功率 MOSFET、IGBT 等电力电子器件的结构、工作原理、特性和使用方法。
- ③ 熟练掌握单相、三相整流电路的基本原理、波形分析和各种负载对电路工作的影响，并能对上述电路进行设计计算。
- ④ 熟练掌握无源逆变电路的工作原理、波形分析和参数计算。
- ⑤ 掌握直流斩波器 DC-DC 变换电路。
- ⑥ 掌握脉宽调制(PWM)技术的工作原理和控制特性，了解软开关技术的基本原理与控制方式。
- ⑦ 掌握基本变流装置的调试试验方法，具有一定的研究和实际工作能力。

1.2 电力电子技术发展概况

1.2.1 电力电子技术内涵

电力电子技术是与电能处理相关的技术学科。将电子技术与控制技术应用到电力领域，通过电力电子器件组成各种电力变换电路，实现电能的转换与控制，称为电力电子技术，或电力电子学。

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,包括电力电子器件、电力电子电路(变流电路)和控制技术三个主要组成部分。其中,电力电子器件是电力电子技术的基础,变流电路是电力技术的核心,而控制技术是电力电子技术发展的纽带。电力电子技术的研究任务包括电力电子器件的应用、变流电路的基本原理、控制技术,以及电力电子装置的开发与应用等。

自 20 世纪 50 年代末第一只晶闸管问世以来,电力电子技术开始登上现代电气传动技术舞台,以此为基础开发的可控硅整流装置,是电气传动领域的一次革命,使电能的变换和控制从旋转变流机组和静止离子变流器进入由电力电子器件构成的变流器时代,这标志着电力电子技术的诞生。在随后的 40 余年里,电力电子技术在器件、变流电路、控制技术等方面都发生了日新月异的变化,在国际上,电力电子技术是竞争最激烈的高新技术领域。

现代电力电子技术无论是对改造传统工业(电力、机械、矿冶、交通、化工、轻纺等),还是对高新技术产业(航天、激光、通信、机器人等)都至关重要,它已迅速发展成为一门与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等多学科互相渗透的综合性技术学科。它的应用领域几乎涉及国民经济的各个工业部门,在太阳能、风能等清洁能源发电,直流输电、电力机车、城市轻轨交通、船舶推进、电机节能应用、交直流供电电源、电梯控制、机器人控制等领域,乃至社会日常生活等诸多方面的应用不断延伸,是 21 世纪重要关键技术之一。电力电子技术及其产业的进一步发展必将为大幅度节约电能、降低材料消耗以及提高生产效率提供重要的手段,并为现代化生产和现代化生活的发展进程带来深远的影响。

1.2.2 电力电子器件的发展

电力电子器件是电力电子技术发展的基础,也是电力电子技术发展的动力。从 1957 年美国通用电气(GE)公司发明了半导体开关器件——晶闸管以来,电力电子器件已经走过了 50 年的概念更新、性能换代的发展历程。

1. 第一代电力电子器件

以硅整流管和晶闸管(SCR)为代表的第一代电力电子器件,以其体积小、功耗低等优势首先在大功率整流电路中迅速取代老式的汞弧整流器,取得了明显的节能效果,并奠定了现代电力电子技术的基础。

硅整流管又称电力二极管,产生于 20 世纪 40 年代,是电力电子器件中结构最简单、使用最广泛的一种器件。目前,硅整流管已形成普通整流管、快恢复整流管和肖特基整流管三种主要类型。普通整流管具有漏电流小、通态压降较高(10~18V)、反向恢复时间较长(几十微秒)、可获得很高的电压和电流定额等特点,多用于牵引、充电、电镀等对转换速度要求不高的装置中。较快的反向恢复时间(几百纳秒至几微秒)是快恢复整流管的显著特点,但是它的通态压降却很高(16~40V),其主要用于斩波、逆变等电路中充当旁路二极管或阻塞二极管。肖特基整流管兼有快的反向恢复时间(几乎为零)和低的通态压降(0.3~0.6V)的优点,不过其漏电流较大、耐压能力低,常用于高频低压仪表和开关电源。

电力二极管对改善各种电力电子电路的性能、降低电路损耗和提高电源使用效率等方面都具有非常重要的作用。随着各种高性能电力电子器件的出现,开发具有良好高频性能

的电力整流管显得非常必要。目前,人们已通过新颖结构的设计和大规模集成电路制作工艺的运用,研制出一些新型高压快恢复整流管。

晶闸管诞生后,其结构的改进和工艺的改革,为新器件的不断出现提供了条件。1964年,双向晶闸管在 GE 公司开发成功,应用于调光和电动机控制;1965年,小功率光触发晶闸管出现,为其后出现的光耦合器打下了基础;20世纪60年代后期,大功率逆变晶闸管问世,成为当时逆变电路的基本元件;1974年,逆导晶闸管和非对称晶闸管研制完成。经过工艺完善和应用开发,到20世纪70年代,晶闸管已经形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。

普通晶闸管广泛应用于交直流调速、调光、调温等低频(400Hz以下)领域,运用由它所构成的电路对电网进行控制和变换是一种简便而经济的办法。不过,这种装置的运行会产生波形畸变和降低功率因数,影响电网的质量。目前的技术水平为12000V/1000A和6500V/4000A。

双向晶闸管可视为一对反并联的普通晶闸管的集成,常用于交流调压和调功电路中。正、负脉冲都可触发导通,因而其控制电路比较简单。其缺点是换向能力差、触发灵敏度低、关断时间较长,其水平已超过2000V/500A。

光控晶闸管是通过光信号控制晶闸管触发导通的器件,它具有很强的抗干扰能力、良好的高压绝缘性能和较高的瞬时过电压承受能力,因而被应用于高压直流输电(HVDC)、静止无功功率补偿(SVC)等领域。其研制水平大约为8000V/3600A。

逆变晶闸管因具有较短的关断时间(10~15s)而主要用于中频感应加热。在逆变电路中,它已让位于GTR、GTO、IGBT等新器件。目前,其最大容量介于2500V/1600A/1kHz和800V/50A/20kHz的范围之间。

非对称晶闸管是一种正、反向电压耐量不对称的晶闸管。而逆导晶闸管不过是非对称晶闸管的一种特例,是将晶闸管反并联一个二极管制作在同一管心上的功率集成器件。与普通晶闸管相比,逆导晶闸管具有关断时间短、正向压降小、额定结温高、高温特性好等优点,主要用于逆变器和整流器中。

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等问题,因而大大提高电能的利用率,同时也使工业噪声得到一定程度的控制。

2. 第二代电力电子器件

伴随着关键技术的突破以及需求的发展,早期的小功率、半控型、低频器件发展到现在的超大功率、高频全控器件。由于全控型器件可以控制开通和关断,大大提高了开关控制的灵活性。自20世纪70年代中期起,电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、电力场控晶体管(功率MOSFET)、静电感应晶体管(SIT)、MOS控制晶闸管(MCT)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)等通断两态双可控器件相继问世,电力电子器件日趋成熟。一般将这类具有自关断能力的器件称为第二代电力电子器件。全控型器件的开关速度普遍高于晶闸管,可用于开关频率较高的电路。

功率MOSFET是低压范围内最好的功率开关器件,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以及小功率变频器等领域。

IGBT 器件是一种 N 沟道增强型场控(电压)复合器件。它兼有功率 MOSFET 和双极性器件的开关速度快、安全工作区宽,饱和压降比较低、耐压高、电流大等优点。因此,IGBT 器件将是促进高频电力电子技术发展的一种比较理想的基础元件。

3. 第三代电力电子器件

进入 20 世纪 90 年代以后,电力电子器件的研究和开发已进入高频化、标准模块化、集成化和智能化时代。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电力电子器件发展的必然趋势。功率集成电路(PIC)是指将高压功率器件与信号处理系统及外围接口电路、保护电路、检测诊断电路等集成在同一芯片的集成电路,一般将其分为智能功率集成电路(SPIC)和高压集成电路(HVIC)两类。但随着 PIC 的不断发展,SPIC 与 HVIC 在工作电压和器件结构上(垂直或横向)都难以严格区分,已习惯于将它们统称为智能功率集成电路或功率 IC。SPIC 是机电一体化的关键接口电路,是 SoC 的核心技术,它将信息采集、处理与功率控制合一,是引发第二次电子革命的关键技术。以 SPIC、HVIC 等功率集成电路为代表的发展阶段,使电力电子技术与微电子技术更紧密地结合在了一起,是将全控型电力电子器件与驱动电路、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电路。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。SPIC 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。

1.2.3 变流电路的发展

电力电子技术的发展先后经历了整流器时代、逆变器时代和变频器时代,并促进了电力电子技术在许多新领域的应用。20 世纪 80 年代末期和 90 年代初期发展起来的、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表明传统电力电子技术已经进入现代电力电子时代。

1. 整流器时代

大功率的工业用电由工频(50Hz)交流发电机提供,但是大约 20%的电能是以直流形式消费的,其中最典型的是电解(有色金属和化工原料需要直流电解)、牵引(电气机车、电传动的内燃机车、地铁机车、城市无轨电车等)和直传动(轧钢、造纸等)三大领域。大功率硅整流器能够高效率地把工频交流电转变为直流电,因此在 20 世纪 60 年代和 70 年代,大功率硅整流管和晶闸管的开发与应用得以很大发展。当时国内曾经掀起了一股争办硅整流器厂的热潮,目前国内大大小小的硅整流器半导体厂家就是那个年代的产物。

2. 逆变器时代

20 世纪 70 年代出现了世界范围的能源危机,交流电动机变频调速因节能效果显著而迅速发展。变频调速的关键技术是将直流电逆变为 0~100Hz 的交流电。在 20 世纪 70 年代到 80 年代,随着变频调速装置的普及,大功率逆变用的晶闸管、巨型功率晶体管和门极可关断晶闸管成为当时电力电子器件的主角。类似的应用还包括高压直流输出,静止式无功功率动态补偿等。这时的电力电子技术已经能够实现整流和逆变,但工作频率较低,仅局限在中低频范围内。

3. 变频器时代

进入 20 世纪 80 年代, 大规模和超大规模集成电路技术的迅猛发展, 为现代电力电子技术的发展奠定了基础。将集成电路技术的精细加工技术和高压大电流技术有机结合, 出现了一批全新的全控型功率器件、首先是功率 MOSFET 的问世, 导致了中小功率电源向高频化发展, 而后绝缘栅双极晶体管(IGBT)的出现, 又为大中型功率电源向高频发展带来机遇。MOSFET 和 IGBT 的相继问世, 是传统的电力电子向现代电力电子转化的标志。新型器件的发展不仅为交流电机变频调速提供了较高的频率, 使其性能更加完善可靠, 而且使现代电力电子技术不断向高频化发展, 为用电设备的高效节材节能、实现小型轻量化、机电一体化和智能化提供了重要的技术基础。

1.2.4 控制技术的发展

电力电子器件经历了工频、低频、中频到高频的发展历程, 与此相对应, 电力电子电路的控制也从最初以相位控制为手段的由分立元件组成的控制电路发展到集成控制器, 再到如今的旨在实现高频开关的计算机控制, 并向着更高频率、更低损耗和全数字化的方向发展。模拟控制电路存在控制精度低、动态响应慢、参数整定不方便, 以及温度漂移严重、容易老化等缺点。专用模拟集成控制芯片的出现大大简化了电力电子电路的控制线路, 提高了控制信号的开关频率, 只需外接若干阻容元件即可直接构成具有校正环节的模拟调节器, 提高了电路的可靠性。但是, 也正是由于阻容元件的存在, 模拟控制电路的固有缺陷, 如元件参数的精度和一致性、元件老化等问题仍然存在。此外, 模拟集成控制芯片还存在功耗较大、集成度低、控制不够灵活、通用性不强等问题。

用数字化控制代替模拟控制, 可以消除温度漂移等常规模拟调节器难以克服的缺点, 有利于参数整定和变参数调节, 便于通过程序软件的改变方便地调整控制方案和实现多种新型控制策略, 同时可减少元器件的数目、简化硬件结构, 从而提高系统的可靠性。此外, 还可以实现运行数据的自动储存和故障自我诊断, 有助于实现电力电子装置运行的智能化。

近年来, 许多应用场合对电力电子电路的动态性能与稳态精度提出了更高的要求, 在这种情况下, 各种自动控制技术和现代控制理论日益渗透到功率变换电路, 控制技术得到进一步发展。

综上所述, 电力电子技术的发展是从低频技术处理问题为传统的电力电子技术向以高频技术处理问题为主的现代电力电子技术方向发展。利用 20 世纪 50 年代发展起来的晶闸管及其派生器件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, 电力电子器件以半控型晶闸管为主, 变流电路一般为相控型, 控制技术多采用模拟控制方式。由半控型器件组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、进一步提高电能的利用率、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。

20 世纪 80 年代以后, 以 IGBT 为代表的集高频、高压和大电流于一体的功率半导体复合器件得到迅速发展与应用, 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, 电力电子技术进入现代电力电子技术时代。这一时期, 电力电子器件以全控型器件为主, 变流电路采用脉宽调制型, 控制技术采用 PWM 数字控制技术。目前, 电力电子技术

作为节能、环保、自动化、智能化、机电一体化的基础，正朝着应用技术高频化、硬件结构模块化、产品性能绿色化的方向发展。

1.3 变流电路分类与功能

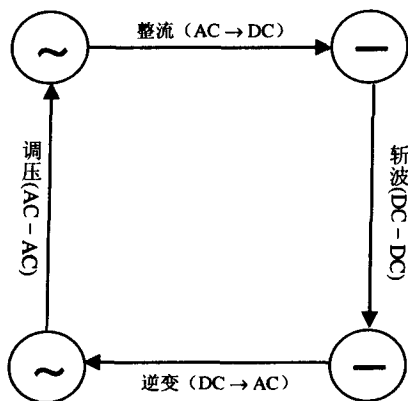


图 1.1 变流电路基本形式

变流电路的基本功能是实现电能形式的转换。其基本形式有四种：整流电路、逆变电路、调压电路、斩波电路，如图 1.1 所示。

将交流电能转换为直流电能的电路，称为整流电路。由电力二极管可组成不可控整流电路，用晶闸管或其他全控型器件可组成可控整流电路。以往使用最方便的整流电路为晶闸管相控整流电路，其具有网侧功率因数低、谐波严重等缺点。由全控型器件组成的 PWM 整流电路具有高功率因数等优点，近年来得到进一步发展与推广，应用前景广泛。

将直流电能转换为交流电能的电路，称为逆变电路。逆变电路不但能使直流变成可调的交流，而且可输出连续可调的工作频率。

将一种直流电能转换成另一固定电压或可调电压的直流电的电路，称为斩波电路或 DC-DC 变换电路。斩波电路大都采用 PWM 控制技术。

将固定大小和频率的交流电能转换为大小和频率可调的交流电能的电路，称为调压电路或交流变换电路。交流变换电路可分为交流调压电路和交-交变频电路。交流调压电路在维持电能频率不变的情况下改变输出电压幅值。交-交变频电路亦称周波变换器，它把电网频率的交流电直接变换成不同频率的交流电。

1.4 电力电子技术应用

电力电子技术作为一门新兴的高技术学科，已被广泛地应用于高品质交直流电源、电力系统、变频调速、新能源发电及各种工业与民用电器等领域，成为现代高科技领域的支撑技术。

1.4.1 电源

1. 计算机高效绿色电源

高速发展的计算机技术带领人类进入了信息社会，同时也促进了电源技术的迅速发展。20 世纪 80 年代，计算机全面采用了开关电源，率先完成计算机电源换代。接着开关电源技术相继进入了电子、电气设备领域。随着计算机技术的发展，提出了绿色计算机和绿色电源的要求。绿色计算机泛指对环境无害的个人计算机和相关产品，绿色电源是指与绿色计算机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,桌上型个人计算机或相关的外围设备在睡眠状态下的耗电量若小于 30 瓦,就符合绿色计算机的要求。提高电源效率是降低电源消耗的根本途径。

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及其技术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 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变换成标称值为 48V 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 50~100kHz 范围内,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 48V/12.5A、48V/20A 扩大到 48V/200A、48V/400A。

因通信设备中所用集成电路的种类繁多,其电源电压也各不相同,在通信供电系统中采用高功率密度的高频 DC-DC 隔离电源模块,从中间母线电压(一般为 48V 直流)变换成所需的各种直流电压,这样可大大减小损耗、方便维护,且安装非常方便。因通信容量的不断增加,通信电源容量也将不断增加。

3. 斩波器(DC-DC 变换器)

DC-DC 变换器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中,同时使上述控制获得加速平稳、快速响应的性能,并同时达到节约电能的效果。斩波器不仅能起直流调压的作用(开关电源),同时还能起到有效地抑制电网侧谐波电流噪声的作用。

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 500kHz 左右。随着大规模集成电路的发展,要求电源模块实现小型化,因此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。

4. 不间断电源(UPS)

不间断电源是计算机、通信系统,以及要求提供不能中断电能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 PWM 技术和功率 MOSFET、IGBT 等现代电力电子器件,使电源噪声得以降低,而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。

5. 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性能、高效、省材的新型焊机电源,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,这种电源更有着广阔的应用前景。

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。50Hz 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 20kHz 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。