



面向21世纪机电及电气类专业高职高专规划教材



电力电子技术及应用

■ 主 编 刘雨棣 主 审 王廷才



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪机电及电气类专业高职高专规划教材

电力电子技术及应用

主 编 刘雨棣
副主编 郭海针 崔荣庭
参 编 杨亚萍 胡雪梅 王 瑾
主 审 王廷才

西安电子科技大学出版社

2006

内 容 简 介

本书从三个层面出发,系统地介绍了电力电子器件、电力电子电路和电力电子装置的应用。本书注重原理知识与实践应用的结合,注重新技术的介绍,特别对于一些应用广泛的电力电子装置进行了比较详细的分析。通过对本书内容的全面学习,能够帮助读者对电力电子设备的安装、调试及维护打下坚实的基础,同时也能获得一定的电力电子装置的设计能力。全书内容深入浅出,描述较细,具体教学时可根据学时安排选用。

本书是专为高职高专院校电类专业学生编写的教材,也可作为从事电力电子技术工作的工程技术人员的参考资料。

★本书配有电子教案,需要的老师可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术及应用/刘雨棣主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2006.8

面向 21 世纪机电及电气类专业高职高专规划教材

ISBN 7 - 5606 - 1717 - 4

I. 电… II. 刘… III. 电力电子学—高等学校:技术学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 087611 号

策 划 毛红兵

责任编辑 邵汉平 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安市高陵县印刷厂

版 次 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15.5 插页 1

字 数 360 千字

印 数 1~4000 册

定 价 20.00 元

ISBN 7 - 5606 - 1717 - 4/TM · 0032

XDUP 2009001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

面向 21 世纪

机电及电气类专业高职高专规划教材

编审专家委员会名单

主 任：李迈强

副主任：唐建生 李贵山

机电组

组 长：唐建生（兼）

成 员：（按姓氏笔画排列）

王春林	王周让	王明哲	田 坤	宋文学
陈淑惠	张 勤	肖 珑	吴振亭	李 鲤
徐创文	殷 铖	傅维亚	魏公际	

电气组

组 长：李贵山（兼）

成 员：（按姓氏笔画排列）

马应魁	卢庆林	冉 文	申凤琴	全卫强
张同怀	李益民	李 伟	杨柳春	汪宏武
柯志敏	赵虎利	戚新波	韩全立	解建军

项目策划：马乐惠

策 划：马武装 毛红兵 马晓娟

电子教案：马武装

前 言

电力电子技术是介于电力、电子及控制三大电气工程技术之间的交叉学科,其应用领域涵盖电化学、电镀、电加工、直传动、直流电力牵引、交流传动、交流电力牵引、电机励磁、电磁合闸、充电、中频感应加热、高频静电除尘、直流高压输电、无功功率补偿及家用电器等方面,是目前发展最快、应用最广、表现最为活跃的技术领域之一。

随着电力电子技术在国民经济各领域的广泛应用,生产第一线使用的电力电子设备的数量在不断增长,设备的复杂程度和科技含量也在不断提高。为此,迫切需要大批具有一定理论基础和实践技能的现场技术人员,用于满足电力电子装置的现场安装、使用、调试、维护及故障处理方面的需求。根据高职高专院校电类专业的定位,其培养目标是生产一线需求的应用技术人才。为此,本教材在内容的编写上特别注重了基础知识与应用实践的结合,以便适应目前的市场形势。

本教材共分为6章,按照从基础知识到实践应用的顺序,通过电力电子器件、电力电子电路及电力电子装置应用这三个层面,较为详细地介绍了电力电子技术所包含的相关内容。另外,考虑到学时的安排,其中部分章节可作为在校学生的选修内容或从事电力电子技术工作的工程技术人员的参考资料。

本教材的第一个层面主要介绍电力电子器件的种类、结构和工作原理,以第1章内容为主。本章内容包括常用半导体器件的基本结构、工作原理、基本特性、主要参数等,可以作为学习电力电子技术的基础。另外,这里还简要介绍了一些具有发展前途的晶闸管派生器件的结构和原理,用以拓宽学生的知识面。

第二个层面主要介绍电力电子电路的工作原理、参数计算及基本电路。这一方面的内容较多,所占篇幅较大,包括第2章整流电路、第3章逆变电路及应用、第4章晶闸管触发电路和第5章交流调压电路与直流变换电路,是本教材的主体。其中第2章内容包括整流电路的工作原理、特点、波形,主要参数的计算和器件的选择,及在不同负载条件下的工作分析和过流、过压等不同情况出现时的保护方法等。第3章内容包括有源和无源两种逆变电路,其中对于目前应用比较广泛的中、高频逆变电路及用于变频调速和UPS电源中的现代逆变技术做了描述。第4章内容包括基本晶闸管触发电路、以专用触发器件为核心的实用晶闸管触发电路和引入了单片微机控制的数字触发电路。第5章内容包括晶闸管单相、三相交流调压电路和三相交流调压应用实例,涉及降压式、升压式、升压降压式三种直流变换电路,以及直流斩波器中功率开关元件

的选取和软开关电力变换技术。

第三个层面由简至繁,有重点地分析了几种电力电子装置或设备的工作原理。这部分内容以第6章为主,包括小功率普通晶闸管和双向晶闸管的实用电路、中频感应加热电源实用电路及高压变频装置的工作原理。该章的核心部分的素材直接取自目前应用较为广泛的电力电子装置——晶闸管中频感应加热电源。通过这部分内容的学习,可以完整地了解一种典型的电力电子设备,为分析其他类型的电力电子设备打下基础,同时也可作为生产一线工程技术人员的参考资料。

本书由刘雨棣任主编,郭海针、崔荣庭任副主编。其中,绪论、第6章由刘雨棣、杨亚萍编写,第1章由胡雪梅编写,第2章由郭海针编写,第3章由杨亚萍编写,第4章由王瑾编写,第5章由崔荣庭编写。

在教材的统稿及整理过程中,杨亚萍老师做了大量的工作,在此深表感谢。西安科技大学韦力教授、武贵林工程师及西安科技大学电气研究所为本教材的编写提供了大量的应用技术资料,对此表示衷心感谢。另外,本教材在编写过程中还参考了许多专家、同行的论文、专著,在此一并表示感谢。

由于编者学识水平有限,书中难免有疏漏和错误,希望专家、同行及使用本教材的师生批评指正。

编 者
2006年4月

目 录

绪论	1
第 1 章 电力电子器件	7
1.1 整流器件的应用	7
1.1.1 功率二极管的基本特性	7
1.1.2 二极管的基本应用	8
1.2 晶闸管(SCR)	11
1.2.1 晶闸管的基本结构与工作原理	12
1.2.2 晶闸管的伏安特性	14
1.2.3 晶闸管主要参数	15
1.2.4 晶闸管的型号及简单测试方法	17
1.2.5 晶闸管的派生器件	18
1.3 电力晶体管和电力场效应晶体管	21
1.3.1 电力晶体管(GTR)	21
1.3.2 电力场效应晶体管(P-MOSFET)	23
1.4 绝缘栅双极型晶体管	28
1.4.1 IGBT 的结构和工作原理	28
1.4.2 IGBT 的特性	29
1.4.3 IGBT 的主要参数	30
1.4.4 IGBT 的擎住效应和安全工作区	30
1.4.5 IGBT 的栅极驱动电路	31
1.4.6 IGBT 的保护	32
1.5 其他电力电子器件	32
1.5.1 静电感应晶体管(SIT)	32
1.5.2 静电感应晶闸管(SITH)	33
1.5.3 MOS 控制晶闸管(MCT)	34
1.5.4 集成门极换流晶闸管(IGCT)	35
1.5.5 功率集成电路(PIC)和智能功率模块(IPM)	35
本章小结	37
习题与思考题	38
第 2 章 整流电路	40
2.1 单相可控整流电路	40
2.1.1 单相半波可控整流电路	40
2.1.2 单相桥式全控整流电路	46
2.1.3 单相桥式半控整流电路	51
2.2 三相可控整流电路	55
2.2.1 三相半波可控整流电路	55
2.2.2 三相桥式全控整流电路	62
2.2.3 三相桥式半控整流电路	68

2.3 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	71
2.4 整流电路的换相压降与外特性	75
2.4.1 换相期间的输出电压	75
2.4.2 换相重叠角 γ	77
2.4.3 可控整流电路的外特性	77
2.4.4 变压器漏抗对整流电路的其他影响	78
2.5 电容滤波的整流电路	78
2.5.1 电容滤波的单相不可控整流电路	78
2.5.2 电容滤波的三相不可控整流电路	80
2.6 整流主电路的计算与保护	83
2.6.1 整流变压器额定参数计算	83
2.6.2 晶闸管电压、电流额定参数的计算与选择	86
2.6.3 平波电抗器的电感值参数计算	87
2.6.4 晶闸管过电流的保护	90
2.6.5 晶闸管过电压的保护	93
2.7 晶闸管应用中应注意的问题	97
2.7.1 变压器漏感对整流电路的影响	97
2.7.2 整流电路的电压品质	98
2.7.3 整流电路的谐波抑制和功率因数	99
2.7.4 其他应注意的问题	101
本章小结	101
习题与思考题	102
第3章 逆变电路及应用	105
3.1 有源逆变	105
3.1.1 直流发电机-电动机系统电能的转换	105
3.1.2 逆变实现的条件	106
3.1.3 逆变角 β	108
3.1.4 三相半波逆变电路	109
3.1.5 三相桥式逆变电路	112
3.1.6 逆变失败与最小逆变角的限制	116
3.1.7 有源逆变的应用举例	119
3.2 无源逆变	122
3.2.1 变频器的分类和换流方式	122
3.2.2 电压型逆变电路	124
3.2.3 电流型逆变电路	127
3.2.4 电压型和电流型逆变电路的比较	129
3.2.5 PWM 控制技术	129
3.3 中频逆变电源的原理及应用	133
3.3.1 并联谐振逆变电路	134
3.3.2 串联谐振逆变电路	136
3.3.3 应用	137
3.4 现代逆变技术简介	138
3.4.1 现代逆变技术的概念及分类	138

3.4.2 现代逆变系统的基本结构	139
3.4.3 现代逆变系统的应用	140
3.4.4 逆变系统中的控制电路	141
本章小结	141
习题与思考题	142
第4章 晶闸管触发电路	143
4.1 对触发电路的要求	143
4.2 单结晶体管触发电路	145
4.2.1 单结晶体管的结构与工作原理	145
4.2.2 单结晶体管自激振荡电路	147
4.2.3 单结晶体管同步触发电路	148
4.3 锯齿波同步触发电路	150
4.3.1 叠加原理	150
4.3.2 锯齿波同步触发电路	152
4.4 集成触发电路的应用	156
4.4.1 KC04 集成移相触发器	156
4.4.2 KC41C 六路双脉冲形成器	157
4.4.3 TC787(788)集成移相触发器	159
4.5 基于 MCU 的触发电路及其应用	162
4.5.1 触发器的硬件设计	162
4.5.2 触发器的软件设计	164
4.6 集成数字式触发电路	166
4.6.1 集成数字式移相触发电路的工作原理	166
4.6.2 集成数字触发电路的应用	167
4.7 触发脉冲与主电路电压的同步	170
4.7.1 定相的概念	170
4.7.2 定相的原理及确定方法	171
4.7.3 具体电路中的应用	172
4.7.4 脉冲变压器的选择及注意事项	174
本章小结	176
习题与思考题	176
第5章 交流调压电路与直流变换电路	180
5.1 交流开关及应用	180
5.1.1 晶闸管交流开关	180
5.1.2 单相交流调功及控制	183
5.2 单相交流调压	185
5.3 三相交流调压	190
5.4 基本直流变换电路	195
5.5 直流变换应用举例	199
本章小结	202
习题与思考题	202

第 6 章 电力电子器件的实际应用及技术开发	204
6.1 小功率电力电子器件的应用	204
6.1.1 小功率白炽灯调光电路	204
6.1.2 固态交流开关	205
6.1.3 小功率电力电子器件的技术开发	206
6.2 电力电子器件的综合应用	207
6.2.1 整流触发工作原理	208
6.2.2 逆变控制电路工作原理	214
6.2.3 闭环控制调节器工作原理	217
6.2.4 保护电路工作原理	221
6.3 新型电力电子器件设计开发简介	224
6.3.1 单元串联多电平高压大功率变频器的结构	224
6.3.2 高压大功率变频器的组成	226
6.3.3 单元串联高压变频器移相 PWM 调制原理	231
6.3.4 单元串联高压变频器的性能分析	235
本章小结	236
习题与思考题	236
参考文献	237

绪 论

1. 电力电子技术概述

电力电子技术(Power Electronic Technology)是 20 世纪新兴的交叉学科技术,其主要理论基础由电子学、电力学及控制理论三者结合而成。电力电子技术具体完成的任务体现为:使用电力电子器件对电能进行变换和控制,最终将电能转换成不同的形式和用于不同的用途。电力电子器件对电能的变换范围可以从数瓦级至数百兆瓦级。

电力电子技术的物质基础是电力电子器件,可以说电力电子器件的迅速发展对电力电子技术的进步起着决定性的作用。目前所用的电力电子器件主要由半导体材料制成,是半导体固态电子学发展的产物。通常认为,半导体固态电子学的发展有两个分支:

一支是以晶体管集成电路为核心,形成信息处理微电子技术。其特点是在半导体材料上集成的电路密度不断提高,集成的电路规模越来越大,半导体器件的功能日臻完善。目前,计算机制造领域中的微电子技术就是其最瞩目的成果。

另一个分支就是以晶闸管为核心,形成对电能进行变换与控制的电力电子技术。其特点是由晶闸管或其它功率器件派生出的新型半导体电力电子器件越来越多,已逐渐形成了一个门类齐全的家族。这一分支的发展方向是不断增加器件输出功率、提高器件的变换速度和逐步完善器件性能。

对于电力电子技术的研究,可以从电力电子电路和电力电子器件两个层面考虑。由电力电子电路组成的电能变换系统或装置,用于完成具体的电能变换和控制;而电力电子器件则是电力电子电路中的执行部件,通常构成了电能变换的通道,或称为变换主回路。电力电子器件的动作体现了电力电子电路的操作要求和控制算法。现在,许多新型电力电子器件都采用微电子制造技术中集成电路的制造工艺,器件内部具有了检测和保护电路。伴随着集成密度的提高和智能化信息处理电路的引入,不仅大大简化了电力电子器件的控制电路,同时也使得电力电子电路的总体技术指标和可靠性得到了大幅提高。总之,随着电子科学技术的迅速发展,电力电子技术已不再局限于原有三种学科形式的组合,而是逐步进化为一门多学科交叉的综合技术。图 0-1 是对电力电子技术较新的描述。

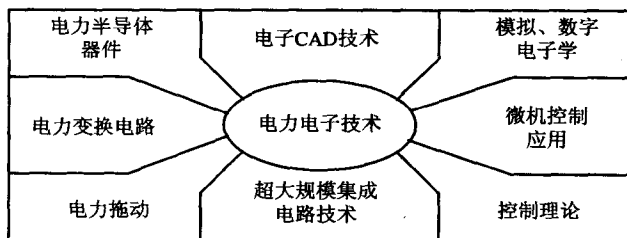


图 0-1 电力电子新技术

另外, 在开始学习电力电子技术时就应当注意到, 电力电子器件在实际使用中有一个明显的特征, 主要表现为器件总是工作在导通与截止两种开关状态。这一特征也体现出电力电子技术主要涉及大功率应用场合, 器件工作于开关状态是为避免自身功率过大的损耗和提高电能转换效率。

2. 电力电子电路及控制方法

电力电子技术的应用是通过电力电子电路付诸实施的。完成电能变换和控制的电路称为电力电子电路。从实现电能转换的形式考虑, 电力电子电路主要有以下几种形式:

(1) 整流电路(AC-DC): 完成由交流电能向直流电能转换的电路。根据直流输出电压是否可以调整, 通常分为不可控整流电路和可控整流电路。

(2) 逆变电路(DC-AC): 完成由直流电能向交流电能转换的电路。如果逆变电路的交流输出侧为频率、电压一定的交流电源时, 则称为有源逆变; 而逆变电路的交流输出侧为无源负载时, 则称为无源逆变。

(3) 斩波电路(DC-DC): 通过断续开关控制将直流电压调制成稳定或可调电压的变换电路。如果斩波电路的输出电压高于输入电压, 则称为升压斩波电路; 相反, 如果斩波电路的输出电压低于输入电压, 则称为降压斩波电路。

(4) 交流调压电路: 输入幅值固定的交流电压, 输出一般为频率相同但电压幅值可以调节的交流电压转换电路。

(5) 周波变换电路: 将电压、频率固定的交流电能转换为频率、电压可调的交流电压转换电路。

上述五种电路属于电能变换电路的基本形式, 实际使用的电力电子系统或装置可能是多种基本形式的电能转换电路的组合。例如: 利用整流-逆变(AC-DC-AC)两种形式组合即可实现对交流电机的变频调速。

电力电子电路中使用的电力电子器件一般均为开关元件, 根据其开关特性通常可划分为以下三种类型:

(1) 不可控器件: 主要为整流二极管, 属无控制端的二端器件, 在电力电子电路中体现为单向导电特性。

(2) 半控器件: 通常为具有三个连接端子的器件, 其中一个端子为控制端。这类器件目前使用最多的是晶闸管(SCR), 其特点是可通过控制使器件开通而单向导电, 但控制端无法控制器件的关断。

(3) 全控器件: 通常也具有三个连接端子, 与半控器件相比, 全控器件能够通过可控开通和可控关断实现器件的单向导电的开关特性。全控器件品种很多, 最具代表性的器件有可关断晶闸管(GTO)和绝缘栅晶体管(IGBT)等。

要让电力电子电路完成各种工作任务, 则必须为功率变换主电路中的电力电子器件提供门极驱动信号。门极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, 即采用门控脉冲延时控制功率器件导通的相位。它在半控型器件的整流、逆变、交流调压等电路中应用得最为广泛。对于由全控型器件组成的电力电子电路, 为了实现对输出电能的控制, 在电力变换装置中采用了脉冲宽度调制(PWM)理论, 即利用电力半导体器件的开通和关断时间的不同产生一定形状的电压脉冲序列, 经过平波处理来实现电能变换的一种技术。在电力电子技术中, 如果适当提高 PWM 波形的频率和按照特定的变化

规律产生 PWM 波形(例如符合正弦规律的 SPWM 波形),就可以有效地控制和消除谐波,提高装置的功率因数,同时能够实现变频变压。这种控制形式被称为功率变换电路中的核心控制技术,广泛地应用于斩波、逆变、交-交变换等电路中。另外,脉冲幅度调制(PAM)和脉冲频率调制(PFM)也在一些场合下得到了应用。

对于动态性能和稳态精度要求较高的场合,还必须采用自动控制技术和理论。例如:对于线性负载,常采用比例积分微分(PID)控制方法;对于非线性负载(如交流电机),常采用矢量控制方法等。

为了提高电力电子装置的功率密度,则必须提高功率器件的开关频率,同时器件的开关损耗也将随之加大。减小开关损耗和提高效率是电力电子技术的重要课题。如果在电力电子变换电路中采取一些措施,例如改变电路结构和控制策略,在开关器件端电压为零时施加驱动信号,而在开关器件通过的电流为零时撤除驱动信号,则可实现零电压开通和零电流关断。零电压开通和零电流关断是软开关的最理想的状态,理论上在开关转换过程中无器件开关损耗。实际使用中,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,则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应用。

此外,针对不同的实际问题,选择合适的电力电子电路,并配合传感技术、现代控制理论、微处理器,采用 CPLD、DSP 以及其它大规模集成电路实现特定的控制方式,也能组成完成特定任务的电力电子装置。

3. 电力电子技术的发展及现状

一般认为,自 1957 年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管起便诞生了现代电力电子技术,即半导体电力电子器件——晶闸管是电力电子技术发展史上的里程碑。我们现在研究的电力电子技术的概念和基础就是由晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。事实上,半导体器件的发展就代表着电力电子技术的发展。

在晶闸管诞生以后,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。其中:可实现交流半控的器件——双向晶闸管于 1964 年在 GE 公司开发成功;能够在控制电路与主回路之间实现电气隔离的小功率光触发晶闸管于 1965 年出现;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,完成了逆导晶闸管和非对称晶闸管的研制工作,并相继出现了许多各种类型的晶闸管派生器件。

普通晶闸管广泛应用于交直流调速、调光、调温等低频(数百赫兹以下)领域,运用由它所构成的电力电子电路对电网进行变换和控制是一种简便而经济的办法。不过,由于半控器件的相位控制特点,使得这类装置在运行中会产生波形畸变和降低功率因数,影响电网的质量。目前,普通晶闸管的制造水平为 12 kV/1 kA 和 6500 V/4000 A。

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。它的正、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。其制造水平已超过 2000 V/500 A。

光控晶闸管采用光电隔离的形式控制晶闸管触发导通,具有很强的抗干扰能力和良好的高压电气绝缘性能,被应用于高压直流输电(HVDC)和静止无功功率补偿(SVC)等领域。其研制水平大约为 8000 V/3600 A。

逆变晶闸管关断时间较短(数十微秒),主要用于 10 kHz 以下的中频感应加热。目前,

其最大容量介于 2500 V/1600 A/1 kHz 至 800 V/50 A/20 kHz 的范围之内。

由于晶闸管是一种只能够控制导通,而不能使其关断的半控器件,且晶闸管对电路的控制方式主要是相位控制方式,因而晶闸管的关断要依靠电网电压波形变化等外部条件来实现,这样就使得晶闸管的应用领域受到了限制。因此,为填补缺陷,全控型电力电子器件应运而生。

全控型电力电子器件的早期代表产品是门极可关断晶闸管(GTO),于 1964 年在美国研制成功,当时容量约为 500 V/10 A,并长期停留在较小容量水平。在 20 世纪 70 年代中期,GTO 的研制取得突破,目前已达到 9 kV/25 kA/800 Hz 及 6 Hz/6 kA/1 kHz 的水平。GTO 有对称、非对称和逆导三种类型。

大功率双极型晶体管(GTR)是另一种电流控制型双极双结全控电力电子器件,其额定值已达 1800 V/800 A/2 kHz、1400 V/600 A/5 kHz、600 V/3 A/100 kHz。它具备晶体三极管的固有特性,但增大了功率容量。也正是晶体三极管的缺点,使之正逐步被功率 MOSFET 和 IGBT 所代替。

功率 MOSFET 是一种电压控制型单极晶体管,它通过栅极电压来控制漏极电流,因而它的一个显著特点是驱动电路简单,驱动功率小,高频特性好,没有二次击穿问题,安全工作区广。功率 MOSFET 的主要缺点是电流容量小,耐压低,通态压降大,不宜运用于大功率装置。目前,其制造水平大概是 1 kV/2 A/2 MHz 和 60 V/200 A/2 MHz。

绝缘门极双极型晶体管(IGBT)是一种复合型电力电子器件,于 1983 年首先由美国 GE 公司和 RCA 公司研制成功,当时容量仅为 500 V/20 A,且存在一些技术问题。但是,经过多年的改进和完善,现已出现了智能型 IGBT。目前,IGBT 的研制水平已达 4500 V/1000 A。

其它全控型电力电子器件还包括静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)、MOS 控制晶闸管(MCT)、集成门极换流晶闸管(IGCT)以及集驱动、控制、保护电路和功率器件为一体的功率集成电路(PIC)等。详细介绍参见本书第 1 章相关内容。

4. 电力电子器件发展展望

近年来出现了很多性能优良的新型化合物半导体材料,由这些基础材料制成的电力电子器件将使电力电子器件的性能提高到一个新的水平。其中可能使用的材料如下所述:

(1) 砷化镓(GaAs)材料。与 Si 相比, GaAs 有一些独特的优点。例如:禁带宽度能量较高,允许在高温下工作; GaAs 材料的电子迁移率为 Si 材料的 5 倍,因而同等容量下的器件几何尺寸更小,开关频率更高。

(2) 碳化硅(SiC)材料。SiC 是目前发展最成熟的宽禁带半导体材料,作为 Si 和 GaAs 的重要补充,可制作出性能更加优异的高温(300~500℃)、高频、高功率、高速度、抗辐射器件。用 SiC 材料制成的高电压、高功率器件对于电力输送和电动汽车的节能具有重要意义。

(3) 磷化铟(InP)材料。InP 是一种化合物半导体材料,是继 Si 和 GaAs 之后的新一代电子功能材料,可作为高速、高频微波功率器件的材料,频率可达 340 GHz。

概括上述内容可以看出,电力电子器件的发展趋势是:集成化、高频化、标准模块化和智能化。与此同时,电力电子电路中主回路的拓扑结构及控制电路也将随之发展,特别是高频化、数字电路和电子计算机控制技术的引入已经改变了电力电子设备的传统外观特

征和内在的技术含量。

5. 电力电子技术的应用及前景

电力电子技术不仅广泛应用于工矿企业、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等领域，而且在照明、空调等家用电器中也随处可见。下面介绍电力电子技术的主要应用。

1) 在电机调速传动中的应用

工业生产中大量应用着各种交、直流电动机，特别是直流电动机有良好的调速性能，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。与传统的直流传动相比，交流变频调速具有控制性能好、可靠性高的优点。交流变频调速使用普通交流电机，其结构简单，重量轻，体积小，便于开发机电一体化产品，进而推动传统机械产业的产业革命。对于风机、水泵、压缩机之类的通用机械产品，用电动机变频调速替代原有的风挡、阀门、流量机械控制，节能效果显著。另外，由于不受电机整流子换向能力的限制，交流调速电机的最大功率可以达到几十兆瓦以上，最大转速可以达到上万转每分钟；同时，这种方法兼顾了软启动控制，是直流电机无可比拟的。

2) 在电力系统中的应用

电力电子技术在电力系统中的应用主要体现在：发电环节中发电机的直流励磁与交流励磁、电动机变频驱动等；输电系统中的高压直流输电(HVDV)、静止无功补偿器(SVC)、交流输电技术和有源电力滤波器等；配电系统中用户电力技术中的动态电压恢复器、配用电静止同步补偿器、固态开关等；储能系统中抽水蓄能电站的变频调速装置、飞轮机组蓄能系统的传动装置等。据估计，在发达国家最终用户使用的电能中有60%以上的电能至少经过一次以上电力电子变流装置的处理。

3) 在工业感应加热电源中的作用

电力电子技术在工业感应加热电源中的应用主要体现在：用于钢水精炼及电磁搅拌改进结晶状态，其工作频率通常为0.5~10 Hz；用于黑色及有色金属的坯料透热，其工作频率通常为200~8000 Hz；用于黑色及有色金属的感应熔炼，其工作频率通常为500~2500 Hz；用于金属表面的淬火热处理，其工作频率通常为8000~50 000 Hz。感应加热电源中同时包含整流电路和无源逆变电路。

4) 在大功率直流电源中的应用

电力电子技术在在大功率直流电源中的应用主要体现在：用于电解和电镀；用于冶炼优质钢材的直流电弧炉；为矿山机车、地铁机车提供直流电源；配用于计算机、通讯、医疗等设备中的不间断电源(UPS)以及科研仪器设备中使用的高精度稳压、稳流电源。

5) 在汽车工业中的应用

电力电子技术在汽车工业中的应用主要包括：利用电子开关替代传统的机械开关以及继电器；无触点点火，燃油电子喷射；电子动力转向，电子自动变速器；对原有的直流电源系统进行改造；对水泵、动力转向、悬架等进行电子监控。

未来最有可能大力发展的电动汽车是以电机驱动系统替代燃油发动机系统，它涉及到多门学科，包括动力学、汽车机械、电力电子、自动控制、电化学、材料学等。显然，如何驱动是核心问题，而采用电力电子技术是解决这一问题的主要途径。

6. 课程学习内容及教学要求

“电力电子技术及应用”是电气自动化技术专业的专业基础课程之一。本课程学习需要具备高等数学、电工学基础、电子技术基础、电机拖动等方面的知识及相关课程的综合运用能力。

“电力电子技术及应用”课程的主要学习内容包括：电力电子器件知识、整流电路、逆变电路及应用、晶闸管触发电路、交流调压电路与直流变换电路、电力电子器件的实际应用及技术开发等内容。本教材涵盖了常用电力电子器件和基本电力电子电路的结构、原理以及典型电力电子应用电路实例的工作原理和分析，并着重对应用较广的典型电力电子设备的工作原理进行了详细地描述，以求读者全面掌握较为复杂的电力电子设备的原理实质及分析方法，由此获得的经验可以推广到对其它电力电子设备原理的分析过程中去。

为适应高职高专的教学特点，在学习本课程时要求理论与实践相结合。预期达到的目标为：使学生获得电力电子设备安装、调试、维护和故障处理能力；具备一定的设计电力电子装置的基础。

通过本课程内容的学习，争取实现以下教学要求：

- (1) 了解电力电子技术的基本内容、发展过程及应用范围；
- (2) 掌握常用半导体器件的基本结构、工作原理、基本特性及主要参数；
- (3) 掌握基本整流电路的工作原理、波形特点、参数计算以及器件的选择；
- (4) 熟悉各类逆变电路的结构，能够通过电路波形分析工作过程和工作状态；
- (5) 掌握典型触发驱动控制电路的工作原理及应用方法；
- (6) 掌握交流调压的原理及输出调整的计算方法，了解典型直流变换电路；
- (7) 了解电力电子电路的综合应用，获得一些基本的分析、调试及故障排除能力；
- (8) 配合实训掌握一些电力电子技术的设计基础。

另外，电力电子技术有很强的实践性，学习中应注重实验、实训的配合。

第1章 电力电子器件

本章主要介绍各种电力电子器件的工作原理、基本特性和主要参数。其中包括不可控的功率二极管、半控的晶闸管和全控的自关断器件,如大功率双极型晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)及智能功率模块(IPM)等。

1.1 整流器件的应用

1.1.1 功率二极管的基本特性

功率二极管又称为电力二极管,可以承受高电压大电流且具有较大的耗散功率,是由一个面积较大的PN结和两端引线封装组成的,引出的两个电极分别称为阳极A和阴极K。功率二极管与中小功率二极管的结构、工作原理和伏安特性相似。图1-1所示为功率二极管的结构和图形符号。当二极管处于正向电压作用下,管子两端正偏压很小(约为1V左右)时,PN结导通,正向管压降(正向平均电压 U_F ,约为0.45~1V左右)很小;反之,若二极管处于反向电压作用下(应小于击穿电压),PN结反向,二极管处于阻断状态,仅有极小的可忽略的漏电流流过。由于二极管的导通速度和反向恢复时间相对于电力电路的暂态变化过程快得多,因此,可以把二极管看成是理想开关。

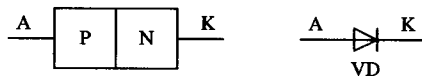


图1-1 功率二极管的结构和图形符号

功率二极管主要参数的选择原则与普通二极管有所不同。在规定的环境温度和标准散热条件下,元件允许长时间连续流过50 Hz正弦半波的电流平均值,将此电流值取规定系列的电流等级,作为元件的额定正向平均电流 I_F ,简称额定电流。其有效值应大于管子在工作中可能流过的最大电流有效值 I_{DM} 。考虑到元件的过载能力较小,一般应选择1.5~2倍的安全裕量,即按照

$$I_F = (1.5 \sim 2) \frac{I_{DM}}{1.57} \quad (1-1)$$

取相应标准系列值。

在额定结温条件下,取元件反向伏安特性不重复峰值电压值 U_{RSM} 的80%称为反向重复峰值电压 U_{RRM} ,将 U_{RRM} 值取规定的电压等级作为该元件的额定电压。反向重复峰值电压 U_{RRM} 的选择原则应为管子在工作中可能承受到的最大反向瞬时电压值 U_{DM} 的2~3倍,