

© 张加胜 张磊 编著

电力电子技术



中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

电力电子技术

张加胜 张 磊 编著

中国石油大学出版社

内容简介

本书是中国石油大学“十五”规划立项教材。内容主要包括:各种电力电子器件及驱动与保护;整流电路及谐波与功率因数问题;交流调压电路;有源逆变电路;无源逆变及PWM控制技术;直流变换电路;四象限变流器等。为了便于教学和复习,各章均有要点小结,同时编排了适当的例题和大量的习题。

全书层次分明,条理清楚,立足于工程技术观点,着重于物理概念的分析,是对作者长期从事电力电子技术教学与科研工作和研究论文的集中总结。

本书可用作高等院校电气信息类、机电类和焊接等本科专业教材,也可供研究生和有关工程技术人员作为学习和技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/张加胜编著. —东营:中国石油大学出版社,2004.6(2008.7重印)

高校教材

ISBN 978-7-5636-1961-0

I. 电... II. 张... 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 058378 号

书 名: 电力电子技术
作 者: 张加胜 张磊

责任编辑: 周洁韶 林日亿
封面设计: 九天设计

出版者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)
网 址: <http://www.uppbook.com.cn>
电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com
排版者: 中国石油大学出版社排版中心
印刷者: 青岛锦华信包装有限公司
发行者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791,8391797)
开 本: 185×260 印张: 14.875 字数: 381 千字
版 次: 2008 年 7 月第 1 版第 4 次印刷
定 价: 21.00 元

前言

Foreword

随着微电子技术、半导体器件工艺和计算机控制技术的全面进步,电力电子技术已经得到了迅速发展,在交流变频调速、机电一体化、电力系统、自动控制、各种电机控制、焊接、电解、电镀、通讯等技术领域都获得了广泛的应用。从工业生产到社会生活,各行各业的工业自动化水平的不断提高,都需要多种多样的特种电源装置,需要运用电力电子技术进行多种电力变换与处理。可以说电力电子技术已发展为一种无所不在的技术。

电力电子技术是指利用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。就学科观点而言,它是一门交叉于电气信息类学科的三大领域(电力、电子和控制)之间的边缘学科,主要研究如何将弱电控制信号转换为对强电对象的控制作用,从而实现电力的变换、传送和控制。可以说电力电子技术是以弱电控制强电的一门接口技术。随着我国经济建设事业的高速发展,我国的电力电子技术正在蓬勃兴起、发展和不断完善。电力电子作为一门强弱电结合的新兴技术已经成为电气、电子、自动化、机电、焊接等学科新技术的生长点。为此,进一步普及电力电子技术知识和研究电力电子技术的发展动向是十分必要的。尤其是目前电力电子技术已成为高等工科院校在电气工程及其自动化、电子信息、自动化、机械设计及其自动化、机电、焊接等许多专业,面向 21 世纪培养目标所开设的一门专业基础课程,加之编者在多年的教学与科研实践中,对于许多电力电子技术问题,积累了很多想法和切身体会,从知识内容体系和教学方法上进行过多方面的探讨与尝试,本书正是基于这些考虑而编写的,并且力图使本教材内容全面丰富,知识先进实用,新旧知识结合,知识体系新颖。

本书是中国石油大学“十五”规划立项教材。在内容编排、材料取舍、阐述方法、新技术介绍以及理论联系实际等方面,本书与现行通用的同类教科书有所不同,尤其是编者在不少问题的阐述方法上进行了较大改进,特别注重结合尽可能简捷的数学理论重点阐述物理概念,避免在分析中过于数学化,反倒把物理概念冲淡的问题,具有一定的独特性和新颖性。本书是编者总结多年来从事有关电力电子与交流电动机变频调速的教学、科研、应用技术培训和工矿企业设备维修的经验基础上编写而成的。

本书可用作高等院校电气、自动化、电子、焊接和机电类专业及其他相关专业的本科教材,也可供研究生和有关工程技术人员作为学习和技术参考书。

本书由张加胜教授担任主编。各章的编写分工为:绪论和第 4,5,7,8,9,10 章由张加胜编写,第 1,2,3,6 章由张磊编写。本书由北京交通大学郝荣泰教授主审。全书在编写过程中,北京交通大学电气工程学院的张全柱博士、梁晖博士、郑琼林院长和刘志刚博士分别提供了许多内容素材,并提出过不少宝贵的意见和建议。部分插图绘制和文稿录入工作由硕士研究生冯兴田、刘静等完成。此外,本书的编写出版还得到了中国石油大学教务处、中国石油大学出版

社、中国石油大学信控学院及电气工程系的许多领导和老师的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

近年来电力电子技术的发展速度几乎达到日新月异的地步,笔者学识有限,很难把所有的新技术都全面完整地反映出来,遗漏和错误亦在所难免,殷切期望读者批评指正。

编 者

2004 年 5 月

于中国石油大学(华东)

目 录

Contents

绪论	1
第 1 章 电力二极管和晶闸管	8
1.1 电力电子器件概述	8
1.1.1 电力电子器件的特征	8
1.1.2 电力电子器件的分类	10
1.2 不可控器件——电力二极管	11
1.2.1 PN 结与电力二极管的工作原理	11
1.2.2 电力二极管的基本特性	13
1.2.3 电力二极管的主要参数	15
1.2.4 电力二极管的主要类型	16
1.3 半控型器件——晶闸管	17
1.3.1 晶闸管的结构与工作原理	17
1.3.2 晶闸管的基本特性	19
1.3.3 晶闸管的主要参数	21
1.3.4 晶闸管的派生器件	23
本章要点小结	25
习题及思考题	26
第 2 章 单相可控整流电路	28
2.1 单相半波可控整流电路	28
2.2 单相桥式全控整流电路	32
2.3 单相全波可控整流电路	36
2.4 单相桥式半控整流电路	37
本章要点小结	39
习题及思考题	39
第 3 章 三相可控整流电路	41
3.1 三相半波可控整流电路	41
3.2 三相桥式全控整流电路	45
3.3 变压器漏感对整流电路的影响	53
3.4 晶闸管的相控触发电路	56
3.4.1 锯齿波同步型触发电路	57

3.4.2 集成触发器	61
3.4.3 触发电路的定相	63
本章要点小结	65
习题及思考题	67
第4章 有源逆变电路	70
4.1 有源逆变的概念	70
4.2 三相有源逆变电路	72
4.3 逆变失败与逆变角的限制	74
4.4 晶闸管直流电动机系统	76
4.4.1 整流状态时的工作情况	76
4.4.2 有源逆变状态时的工作情况	80
4.5 直流可逆电力拖动系统	83
本章要点小结	85
习题及思考题	85
第5章 整流电路的谐波和功率因数问题	87
5.1 电容滤波的不可控整流电路	87
5.1.1 电容滤波的单相不可控整流电路	87
5.1.2 电容滤波的三相不可控整流电路	89
5.2 整流电路的谐波和功率因数	93
5.2.1 谐波和功率因数的关系	93
5.2.2 整流电路交流侧的谐波和功率因数	94
5.2.3 整流输出电压和电流的谐波	96
5.3 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	99
5.4 多重化整流电路	102
5.4.1 移相多重联结	103
5.4.2 多重联结电路的顺序控制	104
本章要点小结	105
习题及思考题	106
第6章 交流电力控制电路	107
6.1 单相交流调压电路	107
6.2 三相交流调压电路	114
6.3 斩波式交流调压电路	120
6.4 交流调功电路	122
6.5 电力电容器的投切控制	123
本章要点小结	125
习题及思考题	126
第7章 全控型电力电子器件及驱动与保护	127
7.1 门极可关断晶闸管	127
7.2 电力晶体管	129
7.3 电力场效应晶体管	133

7.4 绝缘栅极晶体管	137
7.5 其他新型电力电子器件	140
7.6 电力电子器件的驱动	142
7.6.1 驱动电路概述	142
7.6.2 晶闸管的触发驱动电路	143
7.6.3 全控型器件的驱动电路	146
7.7 电力电子器件的保护	149
7.7.1 过电压的产生及过压保护	149
7.7.2 过电流保护	151
7.7.3 缓冲电路	152
7.8 电力电子器件的串联和并联使用	154
7.8.1 晶闸管的串联	154
7.8.2 晶闸管的并联	155
7.8.3 电力 MOSFET 和 IGBT 并联运行的特点	155
本章要点小结	156
习题及思考题	158
第 8 章 无源逆变电路及 PWM 控制技术	159
8.1 换流方式	159
8.1.1 逆变电路的基本工作原理	159
8.1.2 换流方式分类	160
8.2 电压型逆变电路	163
8.2.1 单相半桥逆变电路	163
8.2.2 单相全桥逆变电路	164
8.2.3 带中心抽头变压器的逆变电路	166
8.2.4 三相电压型逆变电路	167
8.3 电流型逆变电路	170
8.3.1 单相电流型逆变电路	170
8.3.2 三相电流型逆变电路	173
8.4 PWM 控制的基本原理	177
8.5 PWM 逆变电路及其控制方法	180
8.5.1 单相半桥逆变电路的 PWM 控制	180
8.5.2 单相全桥逆变电路的 PWM 控制	181
8.5.3 三相桥式逆变电路的 PWM 控制	182
8.5.4 PWM 的协调控制方式	185
8.6 逆变电路的多重化和多电平逆变电路	187
8.6.1 逆变电路的串联多重化	187
8.6.2 逆变电路的并联多重化	189
8.6.3 多电平逆变电路	190
本章要点小结	191
习题及思考题	193

第 9 章 直流变换电路	195
9.1 基本斩波电路	195
9.1.1 降压式直流斩波电路	195
9.1.2 升压式直流斩波电路	200
9.1.3 降压—升压斩波电路和 Cuk 斩波电路	202
9.2 复合斩波电路	205
9.2.1 两象限直流斩波电路	205
9.2.2 四象限直流斩波电路	206
9.3 单端间接式直流变换电路	206
9.3.1 单端正激式直流变换电路	207
9.3.2 单端反激式直流变换电路	210
9.4 双端间接式直流变换电路	212
9.4.1 半桥直流变换电路	212
9.4.2 全桥直流变换电路	214
9.4.3 全桥直流变换电路的移相控制	215
9.4.4 推挽式直流变换电路	216
本章要点小结	218
习题及思考题	218
第 10 章 四象限变流器及 PWM 控制系统	221
10.1 四象限变流器的基本原理	221
10.2 四象限变流器的 PWM 控制系统	224
本章要点小结	228
习题及思考题	229
参考文献	230

绪 论

所谓电力电子技术,简单地讲是指以电力为处理对象的电子技术,它是一门利用各种电力电子器件对电能进行电压、电流、频率和波形等变换与控制的学科。

随着电子科学技术的发展,半导体电子技术迄今已形成两大技术领域,即以集成电路为基础的微电子技术和以电力半导体器件(亦称功率半导体器件)为基础的电力电子技术。因此,电子技术包括两大分支,即信息电子技术和电力电子技术。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术均属于信息电子技术,或称微电子技术,主要用于信息处理。而电力电子技术是应用于电力领域的电子技术,主要用于电力变换。电力电子技术所变换的“电力”,可以大到数百 MW 甚至 GW,也可以小到数 W 甚至 1W 以下。

1. 电力电子技术的研究内容

通常把电力电子技术分为电力电子器件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拓扑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电子系统的技术。

电力变换通常可分为四大类:1)交流变直流(AC/DC),称为整流;2)直流变交流(DC/AC),称为逆变;3)直流变直流(DC/DC),指一种电压(或电流)的直流变为另一种电压(或电流)的直流,可用直流斩波等多种电路实现;4)交流变交流(AC/AC),可以是电压或电力的变换,称为交流电力控制,也可以是频率或相数的变换。进行上述电力变换的技术称为变流技术。“变流”不仅指交直流之间的变换,也包括上述的直流变直流和交流变交流的变换。

如果没有晶闸管、电力晶体管等电力电子器件,也就没有电力电子技术,而电力电子技术主要用于电力变换。因此可以认为,电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础,而变流技术则是电力技术的核心。电力电子器件制造技术的理论基础是半导体物理,而变流技术的理论基础是电路理论。

2. 电力电子技术的学科地位及特点

电力电子学(Power Electronics,简称 PE),又称功率电子学,这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。1974 年,美国的 W. Newell 提出了一种观点,认为电力电子学是由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的。这一观点被全世界普遍接受。“电力电子学”和“电力电子技术”是分别从学术和工程技术两个不同的角度来称谓的,其实际内容并没有太大的不同。

PE 和电子学 二者都分为器件制造和电子电路两大分支,同根同源。电力电子器件与电子器件制造技术的理论基础是一样的,其大多数工艺也是相同的。特别是现代电力电子器件的制造大都使用集成电路制造工艺,采用微电子制造技术。电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一致的,只是二者应用目的不同,前者用于电力变换和控制,后者用于信息处理。当今,随着学科的发展和相互渗透,电力电子与信息电子的界限变得越来越模糊了。广义而言,电子电路中的功率放大和功率输出部分也可算做电力电子电路。许多新型的功率放大器为了提高功率等级和效率,也借鉴了电力电子技术的开关工作模式和控制方式。此外,电力电子电路广泛用于包括电视机、计算机在内的各种电子装置中,其电源部分和扫描部分都是电力

电子电路。在信息电子技术中,半导体器件既可处于放大状态,也可处于开关状态;而在电力电子技术中为避免功率损耗过大,电力电子器件总是工作在开关状态,这是电力电子技术的一个重要特征。

PE 和电力学 PE 是弱电控制强电的技术,可以说是强弱电之间的接口。它所控制的对象往往都和电力有关,比如交流电机、直流电机、伺服控制电机等电力传动或机电系统,以及电力系统的无功补偿、励磁、电加热等。电力电子技术是电气工程学科中的一个最为活跃的分支。本来电气工程(电力技术)领域(包括电力传动和电力系统)以及机械类学科领域发展的历史很久远,传统的东西很多,也很成熟,然而单靠这些传统技术已经无法适应时代发展的要求,电力电子技术的不断迅速进步给电气工程、机械类学科的现代化以巨大的推动力,是保持电气工程、机电工程活力的重要源泉。

PE 与控制理论 要使各种各样的设备和装置的性能满足人们日益增长的各种需要,离不开完善的自动控制技术。各种先进的控制方法、计算机控制技术(弱电系统)正是通过 PE 这一接口,与强电系统或机械系统(控制对象)融为一体,实现高性能的控制效果的。只靠强电系统或机械系统本身实现复杂的自动控制是很困难的,而且其体大笨拙。因此近年来强弱电结合、机电结合的技术一直在迅猛发展。随着计算机技术和自动控制理论不断发展,大量的新型高性能控制方法在电力电子系统中获得了广泛应用,比如自适应控制、模糊控制、滑模变结构控制等。

当代许多高新技术均与电源的功率、电流、电压、频率和相位等基本参数的转换与控制有关。电力电子技术能够实现对这些参数的精确控制和高效率的处理,特别是能够实现大功率电能的频率变换,为多项高新技术学科的发展提供了有力的支持。因此,不但现代电力电子技术本身是一项高新技术,而且还是其他多项高新技术发展的基础。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,并为现代生产和现代生活带来深远的影响。

电力电子技术是 20 世纪后半叶诞生和发展的一门崭新的技术。可以预见,在 21 世纪电力电子技术仍将以迅猛的速度发展。以计算机为核心的信息科学将是 21 世纪起主导作用的科学技术之一,这是毫无疑问的。有人预言,电力电子技术将和计算机技术共同成为未来科学技术的两大支柱。通常把计算机的作用比做人的大脑,电力电子技术连同运动控制一起,可比做人的肌肉和四肢,使人能够运动和从事劳动。只有聪明的大脑,没有灵巧的四肢甚至不能运动的人是难以从事工作的。肌肉和四肢正是大脑思维与外界运动事物之间的接口,人的感官是检测反馈系统。可见,电力电子技术在 21 世纪中将会起着十分重要的作用,有着十分光明的未来。

3. 电力电子技术的应用

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 50 Hz 工频交流电,从蓄电池和干电池得到的电力是直流电。从这些电源得到的电力往往不能直接满足要求,尤其是随着时代的发展和技术的进步,各种各样的应用场合对供电电源的性能要求越来越高,所要求的种类花样也越来越多。普通的白炽灯照明需要 220 V(或 110 V)50 Hz(或 60 Hz)单相交流电,而机械工业中的感应加热设备必须由中频或高频交流电源供电;化学工业中的电解、电镀由低压直流电源供电;城市地铁要求由可控的高压直流电源对机车供电;通信设备如程控交换机需要 48 V 低压直流电源;而要求调速的直流电动机则需要由可变直流电压源供电;许多高技术设备要由恒频、恒压的正弦波交流不间断电源 UPS(Uninterruptible Power Supply)供电;而

现在已得到广泛应用的交流电机变频调速则应由三相交流变压、变频电源供电;有的设备要求电源是非常好的正弦波,而发射机、快速充电设备等则要求具有大功率的脉冲电源。为了满足一定的生产工艺和流程的要求,确保产品质量、提高劳动生产率、降低能源消耗、提高经济效益,供电电源的电压、频率、甚至波形都必须满足各种用电设备的不同要求。凡此种种,都要求将发电厂生产的单一频率和电压的电能变换为各个用电设备最佳工况所需要的另一种特性和参数(频率、电压、相位和波形)的电,再供负载使用。公用电网的恒频、恒压电能经过适当的变换、控制和处理后再供给负载使用,可以获得更好的技术特性和更大的经济效益。

以下是几个典型应用事例:

(1) 据统计,带风机水泵类生产机械的三相交流异步电动机,每年的耗电量占全国工业用电总量的一半左右。如果直接由交流公用电网供电,风机调风量通过调节挡板,液体调排量仅靠调阀门,电机供出的压力大部分都降在挡板、阀门上,电能的利用率将低于 50%。如果采用电力变换装置将 50 Hz 恒压、恒频交流电源变换为变压、变频电源后再对风机水泵类驱动电机供电,通过调节电机转速来改变风机风量和液体排量,则电能的利用率仍能维持在 90% 左右,这将节省大量的能源。如风机水泵类生产机械的电动机全都采用这种先进的变频调速技术,每年节省的能源将超过几千万吨煤燃料,或者可以少兴建几千万千瓦的发电站,经济效益极为可观。

(2) 电力电子技术广泛用于各种家用电器等装置使得它和我们的生活变得十分贴近。变频空调器是家用电器中应用电力电子技术的典型例子。目前采用“变频”技术的空调器、洗衣机、电冰箱等已成为家用电器的一种高新技术时尚。实际上,当你开车、乘电梯、欣赏灯光绚丽的舞台演出和城市五彩缤纷的霓虹灯、看电视、听音响,使用电脑、打印机、空调、洗衣机、微波炉、电冰箱、录音机、VCD 机、手机、电话时,你都在与电力电子技术打交道,电力电子技术已发展为一种无所不在的技术。

(3) 电厂发电总量的 10% ~ 15% 消耗在电气照明上。带有电感式镇流器的荧光灯,其发光效率比普通的白炽灯高得多,在同样的光通量下其耗电减小到白炽灯的 1/3。如果采用高频电力变换器(又称电子镇流器)对荧光灯供电,不仅电—光转换效率进一步提高、光质显著改善、灯管寿命延长 3 ~ 5 倍、可节电 50%,而且其重量仅为电感式镇流器的 10%。电子镇流器的技术关键就是高频电力电子变换器,若获得广泛应用,则节能节电效益十分显著。

(4) 将工频 50 Hz 交流电升频后再给某些负载供电,由于频率的升高,用电设备及变压器、电抗器的重量、体积将大大减小。例如频率为 20 kHz 的变压器,其重量、体积比普通 50 Hz 的变压器小 10 ~ 20 倍,钢、铜原材料的消耗量也大大减小。

(5) 精密机械加工以及造纸机、高速高性能轧钢机、高速电力机车等电力传动,由变频器或高性能直流斩波器等供电时,产品精度、质量、运行快速性、稳定性都能得到保证,劳动生产率也可大幅度提高,效益十分突出。

(6) 在幅员辽阔的国家里大功率远距离输电是不可避免的,为了提高输电效率和确保系统稳定性,现今各国广泛采用远距离直流输电。发电站的发电机是三相交流同步发电机,产生频率固定为 50 Hz 或 60 Hz 的交流电,而用电设备也大多是交流电负载。这就需要在发电站处先将交流电变换为直流电,经远距离传输后再将直流电变换成 50 Hz 或 60 Hz 的交流电。电力经过交流变直流、又经过直流变交流当然要增加变流设备投资,但采用高压直流输电时,输电线路造价低,线路只有较小的电阻压降而无电抗压降,同时直流输电又不存在电力系统的稳定问题,所以尽管增加了电力变换环节,但高压直流输电在长距离、大容量输电时仍有很大的优

势,在技术经济上仍是当今远距离输电的最佳方案。高压直流输电系统的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。近年发展起来的柔性交流输电系统(FACTS)也是依靠电力电子装置才得以实现的。

在现代工业、交通、国防、生活等领域中,除变比固定的交流变压器以外,大量需要其他各种类型的电力变换装置和变换系统,将一种频率、电压、波形的电能变换为另一种频率、电压、波形的电能,使用电设备处于各自理想的最佳工作状况,或满足用电负载的特殊工况要求,以获得最大的技术经济效益。经过变换处理后再供用户使用的电能占全国总发电量的百分比值的高低,已成为衡量一个国家技术进步的主要标志之一。据估计,发达国家在用户最终使用的电能中,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。2000 年末,美国发电站生产的 40% 以上的电能都要经过变换和处理后再供负载使用,预计到 21 世纪二三十年代,美国发电站生产的全部电能都将经变换和处理后再供负载使用。

电力电子技术在电力系统有着非常广泛的应用。如果在电力系统的适当位置设置电力变换器或电力补偿控制器,并进行实时、适式的控制,就可以改变电力系统中节点电压的大小和相位,补偿电力网路的阻抗,减小甚至消除电力系统中的谐波,改变电力系统中的有功、无功潮流,并对正常运行和故障时电力系统的功率平衡要求予以快速补偿,这将能显著提高输电系统的极限传输功率能力,改善电力系统的运行特性。在变电所中,给操作系统提供可靠的交、直流操作电源,给蓄电池充电等都需要电力电子装置。

无功补偿和谐波抑制对电力系统具有重要意义。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。近年来出现的静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等新型电力电子装置具有更为优越的无功功率和谐波补偿的性能。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。

此外,各种电力电子脉冲电源还广泛用于焊接、数控机床伺服电机驱动、多种电化学应用(电解、电镀、防腐、污水处理等)以及雷达、超导、核能、超声、激光控制等等,涉及许多高新科技应用领域,其中包括航空航天、军事设施、核聚变反应堆、船舶、电力机车、地铁、磁悬浮列车、石油石化、冶金、机器人、科学实验等等。从工业生产到社会生活,各行各业的电气自动化、机电一体化水平的不断提高,都需要各式各样的特种电源装置,需要运用电力电子技术进行多种电力变换与控制。

4. 电力电子技术的发展概况

电力电子器件的发展对电力电子技术的发展起着决定性的作用。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只晶闸管(Thyristor)为标志的。但在晶闸管问世以前,用于电力变换的电子技术就已经存在了,主要应用的是几种电真空器件。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,从而开辟了电子技术之先河。后来出现了汞弧整流器(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开关控制,其性能和晶闸管很相似。此外还有闸流管,它是利用弧光放电原理做成的具有控制栅极的热阴极离子管,亦属于电真空器件,其栅极控制作用也和晶闸管很相似。上个世纪的 30 到 50 年代,是汞弧整流器等迅速发展并大量应用的时期。它们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。

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。最先用于电力领域的半导体器件是硅二极管。尤其是继电力二极管之后出现的晶体闸流管(简称晶闸

管),由于其优越的电气性能和控制性能,很快就取代了汞弧整流器和闸流管,并且其应用范围也迅速扩大。工业技术的迅速发展也有力地推动了晶闸管的进步。电力电子技术的概念和基础就是由于晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。同时也确立了电力电子学的学科地位,晶闸管为电力电子学科的建立立下了汗马功劳。

通常把第一只晶闸管正式问世以来电力电子技术发展的 40 多年,大致划分为两个阶段:1957 年至 1980 年称为传统电力电子技术阶段;1980 年至今称为现代电力电子技术阶段。

(1) 传统电力电子技术

在传统电力电子技术阶段主要使用的电力半导体器件是电力二极管和晶闸管(亦称可控硅)。随着器件的发展和应用的需要,晶闸管的派生器件越来越多,容量越来越大,性能也越来越好。截至 1980 年,传统的电力电子器件已由普通晶闸管衍生出快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等品种,从而形成了一个晶闸管大家族。与此同时,各类晶闸管的电压、电流、 du/dt 、 di/dt 等参数的定额均有很大提高,单只普通晶闸管的容量已达 8 000 V、6 000 A,开关特性也有很大改善,传统的电力电子器件已发展到相当成熟的地步。从理论上讲,这类器件在电压、电流两个方面仍有很大的自由度,但是实际上却存在着两个制约其继续发展的重要因素,一是控制功能有缺欠,因为通过门极只能控制其开通,而不能控制其关断,所以晶闸管通常称为半控型器件;二是它立足于分立元件结构,工作频率一般难以高于 400 Hz,因而大大限制了其应用范围。晶闸管变流电路的控制方式主要还是沿用了过去汞弧整流器的相位控制方式。晶闸管的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现。这些都使得晶闸管的应用受到局限。但是晶闸管器件价格相对低廉、耐冲击能力强,在大电流、高电压的发展空间依然较大,目前以晶闸管为核心的设备仍然在许多场合使用,晶闸管及其相关知识目前仍是初学者的基础。

综上所述,传统的相控变流电路几乎已经使用了半个世纪,至今没有多大改进,以晶闸管及其变流电路为主体的传统电力电子技术经过几十年的发展已处于停滞阶段,这就要求新一代电力电子器件及其变流电路尽快取代旧的传统电力电子技术。

(2) 现代电力电子技术

20 世纪 80 年代以来,微电子技术 with 电力电子技术在各自发展的基础上相结合而产生了一代高频化、全控型的功率集成器件,从而使电力电子技术由传统电力电子技术跨入现代电力电子技术时代。

70 年代后期出现了全控型器件,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR,亦称电力双极型晶体管 BJT)和电力场效应晶体管(Power-MOSFET)为代表的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)的控制既可使其开通又可使其关断。此外,这些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。这些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的主要控制方式为脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation — 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位置,它在电力变换所含盖的四大类变流系统中均得到广泛应用。PWM 控制技术使电路的控制性能大为改善,使以前难以实现的功能也得以实现,对电力电子技术的发展产生了深远的影响。

在 80 年代后期,以绝缘栅极晶体管(IGBT)为代表的复合型器件异军突起。IGBT 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 通态压降小、载流

能力大的优点集于一身,性能十分优越,使之成为现代电力电子技术的主导器件。与 IGBT 相对应,MOS 控制晶闸管(MCT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)都是 MOSFET 和 GTO 的复合,它们也综合了 MOSFET 和 GTO 两种器件的优点。

为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小,常常把若干个电力电子器件及必要的辅助元件做成模块化的形式,比如把驱动、逻辑、控制、检测、保护电路和功率器件集成在一起,构成功率集成电路(PIC)。目前功率集成电路的功率都还较小,着重于中小功率应用,但这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

随着全控型电力电子器件的迅速发展,电力电子电路的工作频率也不断提高。同时,电力电子器件的开关损耗也随之增大。为了减小开关损耗,软开关技术便应运而生,零电压开关(ZVS)和零电流开关(ZCS)就是软开关的最基本形式。理论上而言采用软开关技术可使开关损耗降为零,从而提高效率。另外,它也可以使开关频率进一步提高,从而提高电力电子装置的功率密度。

现代电力电子技术在器件、电路拓扑及其控制技术方面与传统电力电子技术相比有如下特点:

① 集成化 几乎所有全控型器件都是由许多微小的器件单元胞并联而成的,即一个器件由许多子器件所集成。例如一个 1 000 A 的 GTO 含有近千个 GTO 单元胞;一个 40 A 的功率 MOSFET 由上万个单元并联而成。

② 高频化 80 年代初期,在电力电子界人们为了使全控型器件的开关频率突破 20 kHz 这一人耳听觉的极限,曾经掀起所谓 20 kHz 的革命。现在这一界限已经远远地跨过了,比如目前新一代的 Power-MOSFET 和 IGBT 的开关工作频率可达上 MHz,另一种新型电力电子器件 SIT(静电感应晶体管)则可达 10 MHz 以上。这标志着电力电子技术已进入高频化时代,为电力电子装置减小体积、降低噪声污染和提高功率密度提供了基本保证。

③ 全控化 电力电子器件实现全控化,是现代电力电子器件在功能上的重大突破,从而避免了传统电力电子器件关断时所需要的强迫关断换流电路,既简化了电路结构又提高了系统的可靠性。

④ 电路形式弱电化和控制技术数字化 全控型器件的高频化促进了电力电子电路拓扑形式的弱电化。PWM 电路、谐振变换和高频斩波等电路这些本来用于弱电领域的电路而今又成为电力电子电路的主要拓扑形式。伴随着微电子技术的迅猛发展,电力电子电路的控制技术也正在逐步实现全方位的数字化和集成化。

5. 本书的内容简介

本书的内容可分为两大部分。

第一部分是电力电子器件,即第 1 章和第 7 章。这部分内容是全书的基础,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,以及驱动、缓冲、保护、串并联等器件应用的共性和基础性问题。这两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 三种目前应用最为广泛的器件作为本书的重点。

第二部分是各种电力电子电路,包括第 2~6 章和第 8~10 章。这部分内容是全书的主体,其中第 2~6 章是晶闸管器件的基本应用电路。第 8~10 章主要是由全控器件构成的各种基本应用电路。电力电子电路的种类十分繁多,但本书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。

为了便于读者学习,在每章的末尾都附有小结,对全章的学习要点和重点进行总结。仔细阅读小结内容,有助于读者从总体上把握全章内容及学习要点。本教材在编写时力求体现科学性、先进性、系统性、实用性,并且循序渐进,宜于教学。

电力电子技术既是一门技术基础课程,也是实用性很强的一门课程。因此,电力电子装置的应用是十分重要的。由于篇幅所限,本教材没有把电力电子技术的应用专门列为一章或几章,而是将其渗透在各章之中。读者在学习时应在掌握各种电路基本原理的基础上,对其应用予以足够的重视。学习本课程时,要着重于物理概念与基本分析方法的学习,理论联系实际。在学习方法上要特别注意基本概念和基本波形的定性分析,从而进一步理解电路的工作原理,培养读图和分析能力。

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。通过做实验,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。

本教材的课内教学学时为 32~68 学时(包含实验学时),若本课程设置学时较少时,课堂教学内容可适当删减。

在学习本课程之前,学生应学过“电路”(或“电工技术”)和“电子技术基础”两门课程,最好也具有一定的电机拖动方面的知识,并已能较熟练地掌握示波器等电子仪器的使用方法。

第1章 电力二极管和晶闸管

在学习电子技术基础时,晶体管和集成电路等电子器件是模拟和数字电子电路的基础,电力电子器件则是电力电子电路的基础。因而掌握各种常用电力电子器件的特性和正确使用方法是我们学好电力电子技术的基础。本章将在对电力电子器件的概念、特点和分类等问题进行简要概述之后,分别介绍不可控器件——电力二极管和半控器件——晶闸管的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题。至于各种全控型电力电子器件将在第7章介绍。

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 电力电子器件的特征

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。同我们在学习电子技术基础时广泛接触的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,电力电子器件目前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,电力电子器件一般具有如下特征:

(1) 电力电子器件所能处理的电压电流较大。其所能控制与处理的电功率大小,也就是其承受电压和电流的能力,是最重要的参数。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) 电力电子器件一般都工作在开关状态。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;就象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的重要问题。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,进行电路分析时,为简单起见也往往用理想开关来代替。广义上讲,电力电子开关有时候也指由电力电子器件组成的在电力系统中起开关作用