



普通高等教育“九五”国家级重点教材



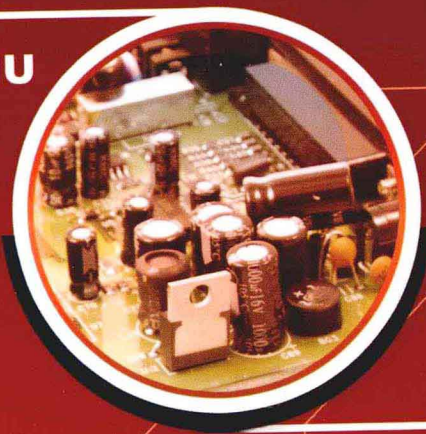
普通高等教育“十二五”规划教材

电力电子 应用技术

第4版

DIANLI DIANZI YINGYONG JISHU

王楠 沈倪勇 莫正康 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“九五”国家级重点教材
普通高等教育“十二五”规划教材

电力电子技术

第4版

王 楠 沈倪勇 莫正康 编



机械工业出版社

本书是在普通高等教育“九五”国家级重点教材《电力电子应用技术》(第3版)(莫正康主编)的基础上修订的。修订后的教材对原教材内容做了适当的调整,补充了最新的内容,使其更好地适合当前高等教育发展的需要以及教学和课时的安排。

本书从应用的角度出发,以定性分析为主,介绍了典型的电力电子器件的工作特点,分析了整流电路、直流-直流变换电路、交流-交流变换电路和逆变电路的工作原理及特点,并给出了相应的实验。在文字方面力求通俗易懂,深入浅出。

本书可作为电气工程及其自动化专业、自动化专业及相关专业的教学用书,也可供从事电气、自动化方面的工程技术人员和高技能应用人才参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子应用技术/王楠,沈倪勇,莫正康编. —4版. —北京:机械工业出版社,2013.12

普通高等教育“九五”国家级重点教材 普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-53795-6

I. ①电… II. ①王…②沈…③莫… III. ①电力电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 200584 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 王保家

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 4 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.75 印张·366 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-53795-6

定价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

第 4 版 前 言

电力电子技术是一门发展非常迅速的技术，也是电气工程及其自动化、自动化专业的一门非常重要的专业基础课。本书是在 2000 年编写的《电力电子应用技术》第 3 版的基础上修订的。本书结合本课程的发展，删去了第 3 版中第 8 章典型电力电子装置介绍及一些章节中较繁琐的数学公式的推导等。为了适合教学的需要，对教材体系结构进行了调整，对内容进行了充实，介绍了典型的电力电子器件的工作特点，分析了整流电路、直流-直流变换电路、交流-交流变换电路和逆变电路的工作原理及特点。教学实验在电力电子技术中占有重要地位，本书专设一章实验，以供选用，同时增加了更多的思考题和习题，帮助读者提高认识，强化记忆。

本书在编写中围绕电力电子器件的工程应用，力求将较深的理论与复杂的数学分析归纳和简化，将定量分析转化为定性说明并将其工程实用化。内容上力求精选，充分考虑教材的先进性。秉承莫正康老师的风格，叙述尽量深入浅出，在文字方面力求通俗易懂。

本书由上海理工大学光电及计算机工程学院的王楠、沈倪勇、莫正康共同编写。其中，第 1、3、5 章由王楠编写，绪论和 2.4、2.5、2.6、2.7 节和第 4、6 章由沈倪勇编写，2.1、2.2、2.3 节由莫正康编写，全书由王楠统稿。

从第 3 版到第 4 版经历了十多年，在这期间，优秀的教材辈出，给本书的编写提供了许多参考，在此深表感谢。

由于时间的限制和编者学识的局限，书中难免有疏漏与错误，敬请广大读者在使用过程中提出宝贵意见。

编 者

第 3 版 前 言

本书是在 1992 年编写的“半导体变流技术”教材（该教材获 1996 年机械工业部优秀教材二等奖，1999 年机械工业部科技进步二等奖）的基础上，根据近几年电力电子技术的发展状况，内容作较大更新而重新编写的，书名改为《电力电子应用技术》。本书作为教育部批准立项的“九五”国家级重点教材，获得教育部、机械工业部、机械工业出版社资助。

本书主要内容有：常用电力电子器件（功率二极管、晶闸管、可关断晶闸管、大功率晶体管、功率场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管）的工作原理与使用特性，上述器件组成的相控整流电路、有源逆变电路、交流调压、直流斩波电路以及逆变和变频电路的工作原理与用途，并附有典型的电力电子应用实例。

本书在编写中紧紧围绕电力电子器件的工程应用，力求将较深的理论与复杂的数学分析归纳和简化，将定量分析转化为定性说明并将其工程实用化，将器件、电路与应用有机结合。编写时力求在保证必需的基础理论与常规技术的同时，充分考虑教材的先进性，以满足 21 世纪经济技术发展的需要。在编写内容上力求精选内容，叙述尽量深入浅出，每章后附有启发思路的思考题和习题，书后还附有实验指导，以期符合教学要求，做到“学生易学、教师好教”。文中打“*”的为选学内容。

本书可用作高等工程院校“工业电气自动化”、“电气技术”等相关专业的教学用书，为培养生产第一线高级应用型人才服务，也可供从事电力电子技术的工程技术人员参考。

本书由上海理工大学电气工程学院莫正康任主编，钱新宇任副主编，王楠、陈子颖为协编，编写分工为：莫正康编写绪论、第一、二、三章及第八章第一、三节，钱新宇编写第五、六、七章及实验，王楠编写第四章，第八章二节由上海复华公司陈子颖编写。本书由上海理工大学张明毫研究员任主审，北京机械工业学院栗书贤教授、上海理工大学杨正堂副教授审阅了书稿，并提出许多宝贵意见。本书得到成都电焊机研究所纪根强高工、张家港市电源设备厂郭建中厂长、杭州临安新达通信设备厂童健儿厂长、上海电机技术高等专科学校申鸿光副教授等同行专家的热忱帮助，谨此表示深切感谢。

由于编者水平和资料收集所限，疏漏与错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

第4版前言	
第3版前言	
绪论	1
0.1 电力电子技术概述	1
0.2 电力电子技术的发展	2
0.3 电力电子技术的应用	4
0.4 课程性质与学习方法	6
第1章 电力电子器件	7
1.1 电力电子器件概述	7
1.2 不可控器件——电力二极管	9
1.3 半控型器件——晶闸管	14
1.4 全控型电力电子器件	23
1.5 其他新型电力电子器件和 功率模块	36
1.6 电力电子器件的驱动电路	39
1.7 电力电子器件的保护、缓冲 电路和串并联使用	45
思考题和习题	52
第2章 整流电路	54
2.1 概述	54
2.2 单相可控整流电路	57
2.3 三相可控整流电路	72
2.4 整流电路的有源逆变 工作状态	96
2.5 整流电路的换相压降、外特性 和直流电动机的机械特性	106
2.6 晶闸管触发电路	111
2.7 整流电路的谐波和功率因数	140
思考题和习题	149
第3章 直流-直流变换电路	153
3.1 斩波电路的工作原理	153
3.2 基本直流斩波电路	154
3.3 其他直流斩波电路	161
3.4 隔离型直流-直流变换电路	164
思考题和习题	171
第4章 交流-交流变换电路	173
4.1 交流调压电路	173
4.2 交流调功电路	179
4.3 交流斩波调压电路	180
4.4 交流电力电子开关	181
4.5 交-交变频电路	185
思考题和习题	190
第5章 无源逆变电路	192
5.1 逆变技术概述	192
5.2 无源逆变电路的工作原理	194
5.3 电压型逆变电路	197
5.4 电流型逆变电路	205
5.5 多重逆变电路和多电平逆变电路	210
5.6 PWM控制技术	214
思考题和习题	225
第6章 电力电子技术教学实验	227
6.1 电力电子技术实验概述	227
6.2 电力电子技术实验装置简介	228
6.3 三相桥式全控整流电路的研究	234
6.4 直流斩波电路的研究	237
6.5 有源逆变电路的研究	239
6.6 单相交-直-交变频电路的研究	241
参考文献	244

绪 论

0.1 电力电子技术概述

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于信息电子技术，所谓电力电子技术就是应用于电力领域的电子技术，即使用电力电子器件（如晶闸管、GTO、IGBT 等）对电能进行变换和控制的技术。电力电子技术所变换的“电力”功率可大到数百 MW 甚至 GW，也可以小到数瓦甚至 1W 以下，与以信息处理为主的信息电子技术不同的是，电力电子技术主要用于电力变换。通常所用的电力有交流和直流两种，在实际使用中，往往需要进行电力变换。电力变换通常可分为 4 大类，即交流变直流（整流）、直流变交流（逆变）、直流变直流（斩波）、交流变交流（交流电力控制），进行上述电力变换的技术称为变流技术。电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础，其理论基础是半导体物理，而变流技术是用电力电子器件构成电力变换电路和对其进行控制的技术，它是电力电子技术的核心，其理论基础是电路理论。

电力电子学（Power Electronics）这一名词是 20 世纪 60 年代出现的，“电力电子学”和“电力电子技术”在内容上并没有很大的不同，只是分别从学术和工程技术这两个不同角度来称呼。1974 年，美国的 W. Newell 用图 0-1 的倒三角形对电力电子学进行了描述，认为电力电子学是由电力学、电子学和控制理论这三个学科交叉而形成的，这一观点被全世界普遍接受。

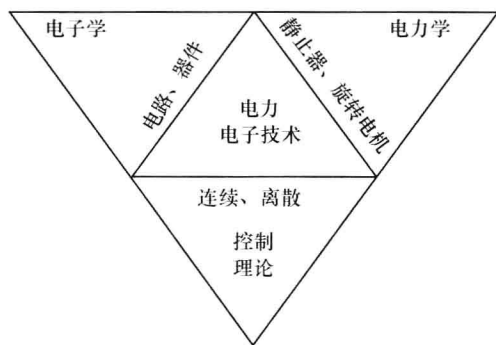


图 0-1 描述电力电子学的倒三角形

电力电子技术与电子学的关系是显而易见的。电子学可分为电子器件和电子电路两大部分，它们分别与电力电子器件和电力电子电路相对应。从电子和电力电子的器件制造技术上讲两者同根同源，从两种电路的分析方法上讲也是一致的，只是两者应用的目的不同，前者用于电力变换，后者用于信息处理。

电力电子技术广泛应用于电气工程中，这就是电力电子学和电力学的主要关系。电力学就是电工科学或电气工程，各种电力电子装置广泛应用于高压直流输电以及高性能交、直流电源等电力系统和电气工程中，因此，把电力电子技术归于电气工程学科。电力电子技术是

电气工程学科中最为活跃的一个分支。电力电子技术的不断进步大大地推动了电气工程实现现代化的进程。

控制理论广泛用于电力电子技术中，使电力电子装置和系统的性能日益优化和完善，可以满足人们的各种需求。电力电子技术可以看作弱电控制强电的技术，是弱电和强电之间的接口。而控制理论则是实现这种接口的强有力的纽带。此外，控制理论和自动化技术是密不可分的，而电力电子装置又是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

在我国，电力电子与电力传动是电气工程的一个二级学科。图 0-2 用两个三角形对电气工程进行了描述。其中大三角形描述了电气工程一级学科和其他学科的关系，小三角形则描述了电气工程一级学科内各二级学科的关系。

有人预言，电力电子技术和运动控制一起，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脑，那么，可以把电力电子技术比做人的消化系统和循环系统，电力电子技术连同运动控制一起，相当于人的肌肉和四肢，使人能够运动和从事劳动。电力电子技术是电能变换技术，是把粗电变为精电的技术。能源是人类社会的永恒话题，电能是最优质的能源，因此，电力电子技术作为一门崭新的技术，在 21 世纪仍将以迅猛的速度发展。

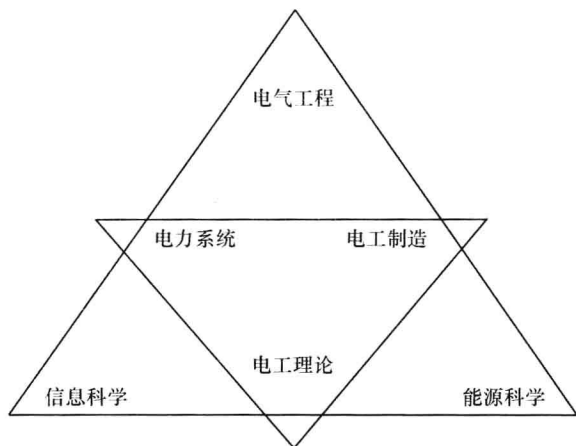


图 0-2 电气工程的双三角形描述

0.2 电力电子技术的发展

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，因此，电力电子技术的发展是以电力电子器件的发展为基础的。电力电子技术的发展史如图 0-3 所示。

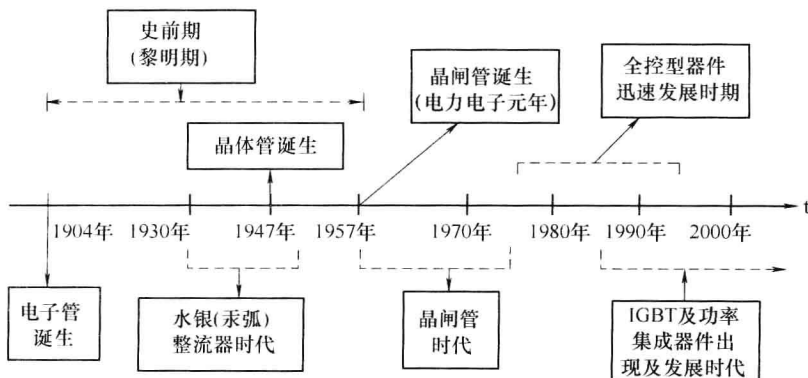


图 0-3 电力电子技术的发展史

一般认为,电力电子技术的开始是以1957年第一个晶闸管的诞生为标志的。但在晶闸管出现之前,电力电子技术就已经用于电力变换了。因此,晶闸管出现前的时期称为电力电子技术的史前期或黎明期。

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,从而开启了电子技术用于电力领域的先河。20世纪30年代到50年代,水银整流器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,甚至用于直流输电。这一时期,各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。在这一时期,也应用直流发电机组来变流。

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。晶闸管出现后,由于其优越的电气性能和控制性能,很快就取代了水银整流器和旋转变流机组,并且其应用范围也迅速扩大。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。在晶闸管诞生以后的20年内,随着晶闸管特性不断提高,晶闸管已经形成了从低电压、小电流到高电压、大电流的系列产品。同时研制出一系列晶闸管的派生器件,如快速晶闸管(FST)、逆导晶闸管(RCT)、双向晶闸管(TRIAC)、光控晶闸管(LTT)等器件,大大地推动各种电力变换器在冶金、电化学、电力工业、交通及矿山等行业中的应用,促进了工业技术的进步,形成了以晶闸管为核心的第一代电力电子器件,也称为传统电力电子技术阶段。

晶闸管是通过对其门极的控制能够使其导通而不能使其关断的器件,属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式,简称相控方式。晶闸管的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现。这就使得晶闸管的应用受到了很大的局限。

20世纪70年代末,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极型晶体管(BJT)和电力场效应晶体管(Power-MOSFET)为代表的第二代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)的控制既可开通又可关断。另外,这些器件的开关速度普遍高于一般晶闸管,可以用于开关频率较高的电路。全控型器件优越的特性使其逐渐取代了变流装置中的晶闸管,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(PWM)方式,即为斩波控制方式,简称斩控方式。PWM控制技术在电力电子变流技术中占有十分重要的地位。它使电路的控制性能大大改善,使以前难以实现的功能得以实现,对电力电子技术的发展产生了深远的影响。

20世纪80年代,出现了以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的第三代复合型场控半导体器件,IGBT是MOSFET和BJT的复合,综合了两者的优点。另外还有静电感应式晶体管(SIT)、静电感应式晶闸管(SITH)、MOS控制晶闸管(MCT)等。这些器件不仅有很高的开关频率(一般为几十到几百千赫兹),而且有更高的耐压性,电流容量大,可以构成大功率、高频的电力电子电路。

20世纪80年代末,电力半导体器件的发展趋势是模块化、集成化,按照电力电子电路的各种拓扑结构,将多个相同的电力半导体器件或不同的电力半导体器件封装在一个模块中,这样可以缩小器件体积、降低成本、提高可靠性。现在已经出现了第四代电力电子器

件——集成功率半导体器件（PIC），它将电力电子器件与驱动电路、控制电路及保护电路集成在一块芯片上，开辟了电力电子器件智能化的方向，应用前景广阔。目前经常使用的智能化功率模块（IPM），除了集成功率器件和驱动电路以外，还集成了过电压、过电流和过热等故障检测电路，并可监测信号传送到 CPU，以保证 IPM 自身不受损害。

新型电力电子器件呈现出许多优势，它使得电力电子技术发生了突变，进入了现代电力电子技术阶段。现代电力电子技术的主要特点是：全控化、集成化、高频化、高效率化、变换器小型化、电源变换绿色化、改善和提高供电电网的供电质量和电力电子器件的容量和性能的优化。

0.3 电力电子技术的应用

电力电子技术是以功率处理和变换为主要对象的现代工业电子技术，当代工、农业等各个领域都离不开电能，离不开表征电能的电压、电流、频率、波形和相位等基本参数的控制和转换，而电力电子技术可以对这些参数进行精确的控制与高效的处理，所以电力电子技术是实现电气工程现代化的重要基础。

电力电子技术应用范围十分广泛，国防军事、工业、能源、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统以及家用电器等无不渗透着电力电子技术的新成果。图 0-4 所示为电力电子技术的应用实例。

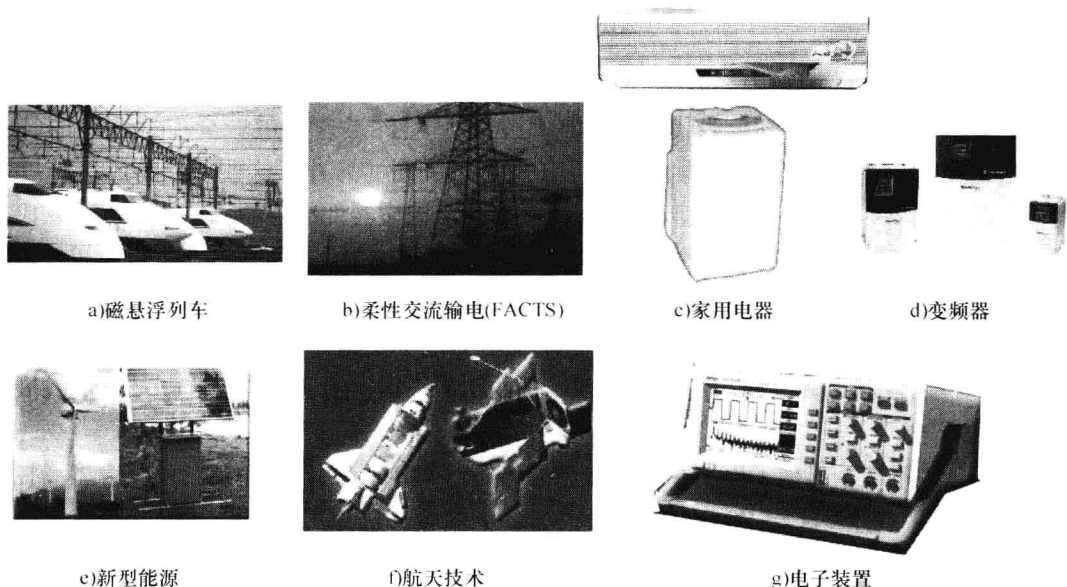


图 0-4 电力电子技术的应用实例

1. 一般工业电机调速

工业中大量应用各种交、直流电动机。直流电动机具有良好的调速性能，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。近年来,由于电力电子变频技术的迅速发展,使得交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美,因此,交流调速技术得到了广泛应用,并且占据主导地位。作为节能控制主要采用交流电动机的变频调速,它带来了巨大的节能效益。在各行各业中,风机、水泵多用异步电动机拖动,其用电量占我国工业用电的50%以上,全国用电量的30%。控制风量或水流量,过去是靠控制风门或节流阀的作用,而电动机的转速不变。由于风门或节流阀转角的减小,却增大了流体的阻力,因此功率消耗变化甚小,结果造成在小风量或小水流时电能的浪费。我国的风机、水泵,全面采用变频调速后,每年节电可达数百亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (度)。家用电器的空调,采用变频调速技术,可节电30%以上。

2. 交通运输

电气化铁道中广泛采用电力电子技术,电力机车中的直流机车采用整流装置供电,交流机车采用变频装置供电。如直流斩波器广泛应用于铁道车辆,磁悬浮列车中电力电子技术更是一项关键的技术。新型环保绿色电动汽车和混合动力电动汽车(EV/HEV)正在积极发展中。汽车是靠汽油发动机运行而发展起来的机械,它排出大量二氧化碳和其他废气,严重的污染了环境。绿色电动车的电机是以蓄电池为能源,靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制,其蓄电池的充电也离不开电力电子技术。显而易见,未来电动车将取代燃油汽车。飞机、船舶需要各种不同要求的电源,因此航空、航海都离不开电力电子技术。

3. 电力系统

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。直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,其送电端的整流和受电端的逆变都采用晶闸管变流装置,而轻型直流输电则主要采用全控型的IGBT器件。近年发展起来的柔性交流输电(FACTS)也是依靠电力电子装置才得以实现的。晶闸管控制电抗器(TCR)、静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等电力电子装置大量用于电力系统的无功补偿或谐波抑制。在配电网系统,电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电时电压跌落、闪变等,以进行电能质量控制,改善供电质量。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。

4. 电子装置所用电源

各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源以前用晶闸管整流电源,现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在大型计算机等场合,常常需要不间断电源(Uninterruptible Power Supply, UPS)供电,不间断电源实际就是典型的电力电子装置。

5. 家用电器

电力电子照明电源体积小、发光效率高,可节省大量能源,正在逐步取代传统的白炽灯和荧光灯。空调、电视机、音响设备、家用计算机、洗衣机、电冰箱、微波炉等电器也应用了电力电子技术。

6. 其他

航天飞行器中的各种电子仪器需要电源,载人航天器也离不开各种电源,这些都必须采用电力电子技术。

抽水储能发电站的大型电动机需要用电力电子技术来起动和调速。超导储能是未来的一种储能方式,它需要强大的直流电源供电,这也离不开电力电子技术。

新能源、可再生能源发电,例如风力发电、太阳能发电,需要用电力电子技术来缓冲能量和改善电能质量。当需要和电力系统联网时,更离不开电力电子技术。

核聚变反应堆在产生强大磁场和注入能量时,需要大容量的脉冲电源,这种电源就是电力电子装置。科学实验或某些特殊场合,常常需要一些特种电源,这也是电力电子技术的用武之地。

总之,电力电子技术是目前发展较为迅速的一门学科,是高新技术产业发展的主要基础技术之一,是传统产业改造的重要手段。可以预言,随着各学科新理论、新技术的发展,电力电子技术的应用具有十分广泛的前景。

0.4 课程性质与学习方法

电力电子技术是一门专业基础性质很强且与生产实际应用紧密联系的课程,在高等学校电气工程类、自动化类专业中均被确定为主干课程。

学习本课程时,要着重物理概念与基本分析方法的学习,理论要结合实际,尽量做到器件、电路、应用三者结合。在学习方法上要特别注意电路的波形与相位分析,抓住电力电子器件在电路中导通与截止的变化过程,从波形分析中进一步理解电路的工作情况,同时要注意培养读图与分析能力,掌握器件计算、测量、调整以及故障分析等方面的实践能力。

本课程涉及高等数学、电路、电子技术、电机与电力拖动等方面的相关知识,学习时需要复习相关课程并综合运用所学知识。

第1章

电力电子器件

电力电子技术的发展基于各种电力电子器件产生和发展,电力电子器件是电力电子电路的基础。掌握各种常用电力电子器件的特性和正确使用方法是学习电力电子技术的基础。本章分别介绍各种常用电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题。

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 电力电子器件的分类和特点

电力电子器件一般指电力半导体器件。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是硅。

由于电力电子器件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,一般具有如下特征:

1) 电力电子器件所能处理电功率较大,其承受电压和电流的能力是其最重要的参数。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。因为电力电子器件处理的电功率较大,开关工作状态可减小器件本身的损耗,提高电能变换的效率。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。

3) 电力电子器件需要由信息电子电路来控制 and 驱动。在实际应用中,由于电力电子器件所处理的电功率较大,因此必须采用信息电子电路来实现弱电控制强电。

4) 电力电子器件必须安装散热器。电力电子器件尽管工作在开关状态,但是电力电子器件自身的功率损耗通常仍远大于信息电子器件,因而为了保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上比较讲究散热设计,而且在其工作时一般都还需要安装散热器。

1.1.2 电力电子器件的损耗

电力电子器件的损耗主要包括:通态损耗、断态损耗和开关损耗。

电力电子器件在导通或者阻断状态下,并不是理想的短路或者断路。导通时器件上有一定的通态降压,阻断时器件上有微小的断态漏电流流过。尽管其数值都很小,但分别与数值

较大的通态电流和断态电压相作用，就形成了电力电子器件的通态损耗和断态损耗。

在电力电子器件由断态转为通态（开通过程）或者由通态转为断态（关断过程）的转换过程中产生的损耗，分别称为开通损耗和关断损耗，总称开关损耗。对某些器件来讲，驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。除一些特殊的器件外，电力电子器件的断态漏电流都极其微小，因而通态损耗是电力电子器件功率损耗的主要原因。当电力电子器件的开关频率较高时，开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。

1.1.3 电力电子控制系统的组成

电力电子控制系统的组成如图 1-1 所示，电力电子器件在实际应用中，一般是由控制单元、驱动电路、检测电路和以电力电子器件为核心的主电路组成一个系统。

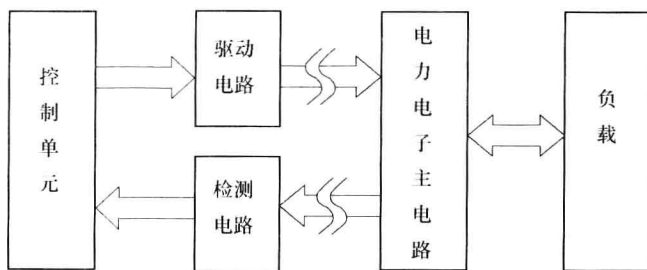


图 1-1 电力电子控制系统的组成

控制单元可由计算机、单片机、PLC 等和信息电子电路组成，控制电路按照系统的工作要求形成控制信号，通过驱动电路去控制主电路中电力电子器件的通断，来实现整个系统的功能。

检测电路由传感器和信息电子电路组成，由传感器检测主电路或者现场的信号，这些信号经过信息电子电路处理后，提供给控制单元并按照系统的工作要求来形成闭环控制信号。

驱动电路一般由信息电子电路组成，在某些需要大功率驱动和关断的场合，驱动电路也可由功率电力电子器件组成。

人们往往将检测电路和驱动电路这些主电路以外的电路都归为控制电路，于是电力电子系统由主电路和控制电路组成。主电路中的电压和电流一般都较大，而控制电路的元器件只能承受较小的电压和电流，因此，在主电路和控制电路连接部分，如驱动电路与主电路的连接处，或者驱动电路与控制信号的连接处，以及主电路与检测电路的连接处，需要进行电气隔离，一般通过光耦合器或变压器来传递光、磁等信号，以实现电气隔离。此外，基于半导体材料的电力电子器件耐电压和电流过冲的能力很差，因此，在主电路和控制电路中需附加一些保护电路，以保证电力电子器件和整个电力电子系统正常可靠运行。

1.1.4 电力电子器件的分类

电力电子器件种类繁多，按其开关控制性能可分为不控型器件、半控型器件和全控型器件。

1) 不控型器件为无控制端的二端器件。如电力二极管,器件的导通和关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的,本身不具备可控开关能力。

2) 半控型器件为具有控制端的三端器件。但其控制端只能控制其导通而不能控制其关断,器件的关断完全是由其在电路中承受的电压和电流决定的。晶闸管和大部分派生器件都属于这类器件。

3) 全控型器件为具有控制端的三端器件。通过控制信号既可以控制其导通,又可以控制其关断,因此又称为自关断器件。目前最常用的绝缘栅双极型晶体管、电力场效应晶体管和可关断晶闸管等都属于这类器件。

按照驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间信号的性质,可以将电力电子器件(电力二极管除外)分为电流驱动型和电压驱动型两类。如果是通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断控制,这类电力电子器件被称为电流驱动型电力电子器件,或者电流控制型电力电子器件。如果是通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号来实现导通或者关断的控制,这类电力电子器件则被称为电压驱动型电力电子器件,或者电压控制型电力电子器件。

此外,电力电子器件还可以按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况分为单极型器件、双极型器件和复合型器件。由一种载流子参与导电的器件称为单极型器件;由电子和空穴两种载流子参与导电的器件称为双极性器件;由单极型器件和双极性器件集成混合而成的器件则称为复合型器件。

下面从应用的角度来分析这些器件。

1.2 不可控器件——电力二极管

电力二极管被称为半导体整流器,其结构和原理简单,工作可靠,是电力电子电路最基本的组成单元,其单向导电性可用于电路来实现整流、钳位、续流等功能。在采用全控型器件的电力电子电路中电力二极管往往是不可缺少的器件,特别是开通和关断速度很快的快恢复二极管和肖特基二极管,具有不可替代的作用及地位。

1.2.1 电力二极管的工作特性

电力二极管的基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管是一样的,都是以半导体PN结为基础的。由于电力二极管的工作特点,其是由一个面积较大的PN结、两端引线以及封装组成的,图1-2给出了电力二极管的外形、基本结构和电气图形符号。从外形上看,电力二极管可以有螺栓型、平板型和模块等多种封装。电气图形符号如图1-2d所示,A为阳极,K为阴极。

1. 电力二极管的静态特性

电力二极管的静态特性主要指伏安特性,即电力二极管的阳极电压和流过二极管阳极电流的关系。如图1-3所示,第Ⅰ象限为正向特性区,从第Ⅰ象限的曲线看,当外加正向电压

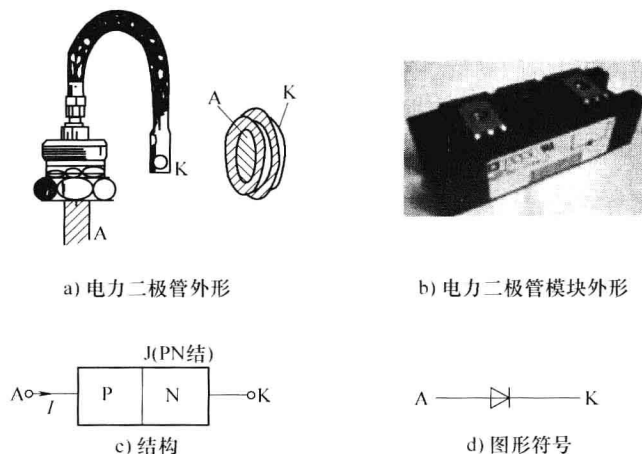


图 1-2 电力二极管的外形、结构和图形符号

(阳极 A 的电位高于阴极 K) 小于 U_{TO} (门槛电压) 时, 只有很小的正向漏电流流过器件; 当外加正向电压大于 U_{TO} (门槛电压) 时, 器件开始导通, 正向导通后, 其电流的大小由负载决定, 器件压降 $U_F = 0.4 \sim 1.2V$ 。第Ⅲ象限为反向阻断状态, 当电力二极管外加反向电压 (阳极 A 的电位低于阴极 K) 时, 开始只有极小的反向漏电流, 当反向电压增大到 U_B (击穿电压) 时, 反向电流将会急剧增大, 破坏 PN 结反向偏置为截止的工作状态, 这就叫反向击穿。反向击穿按照机理不同有雪崩击穿和齐纳击穿两种形式。反向击穿发生时, 只要外电路中采取了措施, 将反向电流限制在一定范围内, 则当反向电压降低后 PN 结仍可恢复原来的状态。但如果反向电流未被限制住, 使得反向电流和反向电压的乘积超过了 PN 结允许的消耗功率, 就会因热量散发不出去而导致 PN 结温度上升, 直至过热而烧毁, 这就是热击穿。

综上所述, 我们得出如下结论:

- 1) 电力二极管具有单向导电性。
- 2) 电力二极管正向导通后, 流过器件的电流大小由负载决定。
- 3) 电力二极管通态压降和反向漏电流数值很小, 在电路分析时通常忽略不计。

2. 电力二极管的动态特性

PN 结中的电荷量随外电压而变化, 呈现电容效应, 称为结电容 C_j , 又称微分电容。结电容按其产生机制和作用的差别分为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。势垒电容只在外加电压变化时才起作用, 外加电压频率越高, 势垒电容作用越明显。势垒电容的大小和 PN 结截面积成正比, 与阻挡层厚度成反比; 而扩

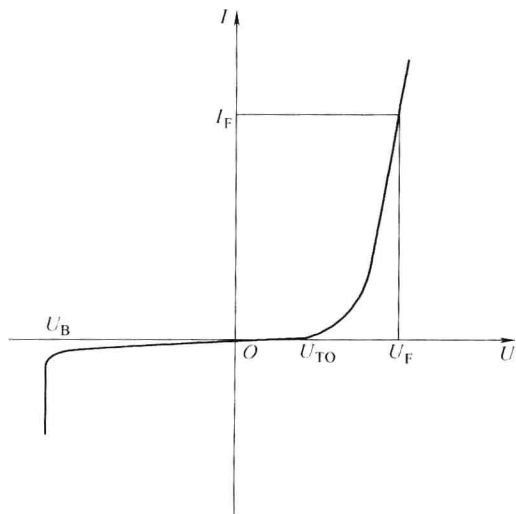


图 1-3 电力二极管伏安特性

散电容仅在正向偏置时起作用。在正向偏置时，当正向电压较低时，势垒电容为主；正向电压较高时，扩散电容为结电容的主要成分。

因为结电容的存在，电力二极管在零偏置（外加电压为零）、正向偏置和反向偏置这3种状态之间转换的时候，必须经历一个过渡过程。于是采用电压、电流随时间变化的特性来描述这个过渡过程，这就是电力二极管的动态特性，即开通和关断特性，简称为开关特性。

（1）开通特性

图1-4a给出了电力二极管由零偏置转换为正向偏置时，其开通过程中的电流和电压波形随时间变化的波形。可以看出，这一动态过程中，电力二极管的正向压降也会出现一个过冲 U_{FP} ，经过一段时间才趋于接近稳态压降的某个值（图1-4a中2V）。这一动态过程时间被称为正向恢复时间 t_{fr} 。

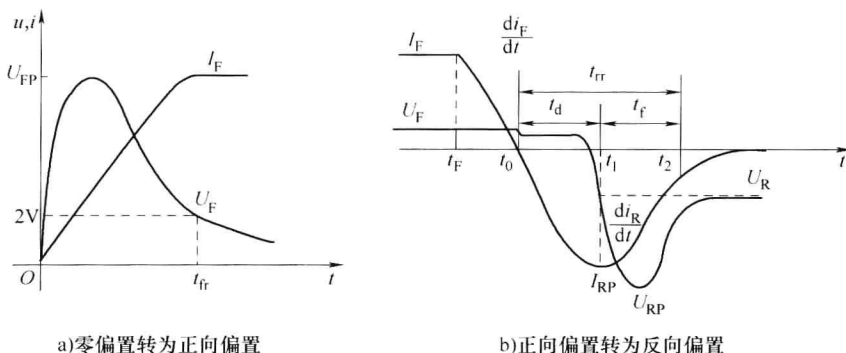


图 1-4 电力二极管的动态特性

电力二极管开通过程中呈现电流滞后电压的现象，也称电感现象，该现象的出现除了内部结构原因外，还与引线长度、器材封装采用磁性材料等因素有关，因此，开通时电力二极管电流上升率越大，峰值电压 U_{FP} 就越高，正向恢复时间 t_{fr} 也越长。另外，结温升高时 U_{FP} 、 t_{fr} 值也会增大。

当电力二极管由反向偏置转换为正向偏置时，除上述时间外，势垒电容电荷的调整也需要更多时间来完成。

在电力电子电路中，当电力二极管作为快速开关器件使用时，应考虑其正向恢复时间的影响。

（2）关断特性

图1-4b所示为电力二极管由正向偏置转换为反向偏置时，其断态过程中电压和电流随时间变化的波形。从图1-4b可见，在 t_F 时刻，原来处于正向导通状态的电力二极管的外加电压从正向变为反向，电力二极管不能立即关断，其正向电流 I_F 开始下降，下降的速率由反向电压的大小和电路中的电感决定。到 t_0 时刻，电力二极管的电流虽降为零，但此时 PN 结两侧仍存有大量的少子，电力二极管并没有恢复阻断能力。直到 t_1 时刻，PN 结内储存的少子被抽尽时，反向电流达到最大值 I_{RP} ，电力二极管开始恢复阻断能力，反向恢复电流开始减少。如果外电路中电感感应较高的电动势，会使器件承受很高的反向电压 U_{RP} 。