



普通高等教育应用技术型“十三五”规划系列教材

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

◎ 主 编 陈 媛

◎ 主 审 陈三宝



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

普通高等教育应用技术型“十三五”规划系列教材

电力电子技术

主 编 陈 媛

副主编 刘新竹 丁稳房 徐江陵 高 攀

主 审 陈三宝

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书主要讲述了电力电子器件的结构、工作原理、特性和应用要求,分析了整流电路、逆变电路、直流—直流变换电路、交流—交流变换电路的组成、工作原理及应用要求,阐述了 PWM 控制技术和软开关技术的基本原理及其应用,最后介绍了电力电子器件的应用要求和电力电子技术在不同领域中的应用实例。本书每章安排有例题与习题,供读者学习和复习用。

本书可作为普通高等学校应用技术型电气工程及其自动化、自动化、机电一体化等专业学生的教材或参考书,也可供相关工程技术人员参考。

鉴于其编写特点,本书除适合全日制学生使用外,还适合各类成人高校和函授学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/陈媛主编. —武汉:华中科技大学出版社,2016.7

普通高等教育应用技术型“十三五”规划系列教材

ISBN 978-7-5680-1838-8

I. ①电… II. ①陈… III. ①电力电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 115866 号

电力电子技术

Dianli Dianzi Jishu

陈 媛 主 编

策划编辑:范 莹

责任编辑:熊 慧

封面设计:原色设计

责任校对:曾 婷

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:11.75

字 数:289 千字

版 次:2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:25.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换

全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务

版权所有 侵权必究

前 言

随着我国高等教育规模的不断扩大,高等教育由精英教育逐步向大众教育方向转变。教育对象的特点发生了较大的变化,应用型人才的培养已经成为一批院校的培养目标。为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展的需要,满足社会对高校应用型人才的需求,全面提高应用型人才培养的质量,编写适应应用型人才需要的专业教材是很有必要的,有其积极的意义和实用价值。

“电力电子技术”是自动化专业领域内各专业方向的一门重要的专业基础课程。为适应应用型人才培养的需要,专业理论课程的学时数大幅精简,课程内容与学时之间的矛盾更显突出,这就要求课程使用的教材在篇幅上做必要精简,内容上做合理调整。目前适用于应用型人才培养的本门课程的教材较少,大部分国家级教材面向普通高等院校,这类教材对于培养应用型人才的高校来说,起点较高、难度较大、内容较多,难以适应教学需要。

本书正是出于上述考虑而编写的一本新的电力电子技术教材。根据应用型人才培养目标和教学要求,基本理论应基本到位,重点突出对技术的分析和实际应用。在本书的编写过程中,对相关内容做了删减与调整,遵循“少而精”的原则,适当删减部分理论性强且较为抽象的内容,增强教学内容的针对性和实用性;结合“重实践”的要求,在变流技术基础部分重点突出电路结构的特点、负载的特点以及电路功能,在电力电子技术实际应用部分,通过实例加强对基本原理及其应用的分析。

本书由陈三宝教授主审,武汉科技大学城市学院陈媛老师主编,武昌工学院刘新竹老师,湖北工业大学工程技术学院丁稳房,武汉科技大学城市学院徐江陵老师、高攀老师任副主编。武汉理工大学、武汉科技大学电气工程及自动化专业的相关教师对本书的编写提出了富有建设性的建议,在此表示衷心的感谢!编写本书过程中参考了国内相关教材和部分专家的论著,在此谨向相关作者致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免存在错误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 4 月

目 录

第0章 绪论	(1)
第1章 电力电子器件	(7)
1.1 电力电子器件基础	(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 全控型器件	(22)
1.5 其他新型电力电子器件	(32)
1.6 集成电路和模块	(33)
本章小结	(33)
习题与思考题	(34)
第2章 整流电路	(35)
2.1 单相可控整流电路	(35)
2.2 三相可控整流电路	(46)
2.3 整流电路的换相压降	(55)
2.4 整流电路的谐波和功率因数	(56)
2.5 整流电路的有源工作状态	(62)
2.6 相控电路的驱动控制	(66)
本章小结	(71)
习题与思考题	(71)
第3章 逆变电路	(73)
3.1 变流电路的换流方式	(73)
3.2 基本逆变电路	(76)
3.3 复杂逆变电路	(87)
本章小结	(90)
习题与思考题	(91)
第4章 直流—直流变换电路	(92)
4.1 基本斩波电路	(92)
4.2 复合斩波电路	(104)
4.3 带隔离的直流—直流变换电路	(108)
本章小结	(110)

习题与思考题	(110)
第 5 章 交流—交流变换电路	(112)
5.1 交流调压电路	(112)
5.2 交流调功电路	(119)
5.3 交流电力电子开关	(120)
5.4 交—交变频电路	(121)
本章小结	(126)
习题与思考题	(126)
第 6 章 PWM 控制技术	(127)
6.1 PWM 控制的基本原理	(127)
6.2 直流变换电路中的 PWM 控制技术	(129)
6.3 逆变电路中的 SPWM 控制技术	(133)
6.4 PWM 跟踪控制技术	(137)
本章小结	(140)
习题与思考题	(140)
第 7 章 软开关技术	(141)
7.1 软开关的基本概念	(141)
7.2 软开关电路的分类	(143)
7.3 典型的软开关电路	(145)
7.4 软开关技术新进展	(151)
本章小结	(151)
习题与思考题	(151)
第 8 章 电力电子技术应用	(152)
8.1 电力电子器件应用的基本要求	(152)
8.2 电力电子技术应用	(163)
本章小结	(177)
习题与思考题	(178)
参考文献	(179)

第0章 绪论

当前,人类在电能的产生、传送和利用方面已经取得了巨大的成就,但是在研究更加科学、高效、方便地利用电能的过程中,还有不少问题亟待解决。电力电子技术作为研究电能变换与控制的专门技术,是解决这些问题的重要手段。

在国际上,已经把应用电力电子装置变换和调节的用电量占用电总量的比例作为衡量一个国家用电水平的重要指标。在发达工业国家,该指标目前在70%左右,预计不久的将来普遍达90%以上,我国作为发展中的大国,在这方面和发达工业国家相比仍然存在明显的差距。

电力电子技术广泛应用于电力工业、机械工业、冶金工业、化学工业、交通运输、航空航天、节能环保、家用电器等诸多领域。电力电子技术的发展及广泛应用必将促进电能更加科学合理地使用、大幅度节约电能、降低材料消耗和提高生产效率,必然对现代产业和现代生活带来深远影响。

1. 电力电子技术的基本概念

电子技术有两大分支:一是信息电子技术;二是电力电子技术。信息电子技术和电力电子技术在器件和电路分析等方面的基础理论是相同的,但在器件和电路的应用方向方面不同。信息电子技术主要应用于小微功率的信息提取、识别和处理,而电力电子技术主要应用于大功率电能的变换与控制,包括电压、电流、频率和相位等基本参数的转换、控制和处理。

电力电子技术是一门融合电力学、电子学和控制理论为一体的交叉学科,是应用电力电子器件、电路理论和控制技术对电能进行变换、控制和处理的技术,也是一种强电与弱电结合,用弱电控制强电的应用技术。

2. 电力电子器件及其发展

从20世纪50年代起,随着半导体物理技术和制造工艺的不断发展,迄今为止已经形成很多种类的电力电子器件。半个多世纪以来电力电子器件的发展通常可以分为三个时期。

第一个时期是传统器件发展期,从20世纪50年代起到20世纪70年代初,以功率二极管和晶闸管为代表的第一代电力电子器件以其体积小、功耗低等优势,在大功率整流电路中全面取代M-G旋转机组和水银整流器,并奠定了电力电子技术的基础。功率二极管最早出现在20世纪40年代,也称硅整流管,是电力电子器件中结构最简单、使用最广泛的一种器件。1957年美国GE公司开发了世界上第一个晶闸管,从此进入电力电子技术迅速发展和电力电子器件广泛应用时期。

第二个时期是全控器件发展期,从20世纪70年代后期开始,电力电子器件进入了全控器件发展期。可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等全控器件相继问世,不仅可靠实现了器件的开关控制,而且大大提高了器件开关的频率,使电力电子器件性能得到本质的提升。1980年后,传统的电力电子器件已由普通晶闸管衍生出了快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等,形成了一个晶闸管器件大家族。同时,各类器件的主要技术参数有很大提高,开关性能也有很大改

善。由电力电子器件构成的各种电能变换装置由于体积小、重量轻、噪声低、效率高、响应快、无磨损、易控制等优点,在工业生产中得到广泛的应用。

第三个时期是集成器件发展期,从 20 世纪 90 年代开始,电力电子器件的研究和开发进入高频化、模块化、集成化和智能化时期。功率集成电路(PIC)是将全控型电力电子器件与驱动电路、控制电路、检测电路、保护电路、执行电路等集成于一体,形成的高度智能化集成电路。这种电路体现了器件与电路的集成、功率流与信息流的集成,成为智能化接口,提高了器件应用的灵活性、可靠性。

3. 电力电子技术

电力电子技术主要研究电力电子器件、电力电子电路与控制、电力电子装置及应用。电力交流技术就是关于电力电子电路与控制的技术,就是实现电能变换的技术。

电能有直流、交流两种基本形式,因此实现电能变换的电力电子电路就有交流—直流变换(AC—DC 变换)、直流—交流变换(DC—AC 变换)、直流—直流变换(DC—DC 变换)和交流—交流变换(AC—AC 变换)四种基本形式,如图 0-1 所示。如何实现这些变换的电路结构、工作原理、性能指标是电力电子技术领域研究的重要内容。

AC—DC 变换是交流到直流的变换,称为整流,相应的电路和装置分别称为整流电路和整流器。整流电路广泛地用作电力电子系统的前级变换器。电力电子系统的前级变换器应与电力线路连接,这意味着整流器应具有高功率因数、低输入电流谐波畸变和低电磁干扰发射等特点。目前,在谐波治理的严峻形势下,各种高级 AC/DC 变换器已得到发展,如有源功率因数校正(power factor correction, PFC)整流器、三相脉宽调制(pulse width modulation, PWM)升压 PFC 整流器、三相降压 PFC 整流器等。

DC—AC 变换是直流到交流的变换,也是 AC—DC 变换的逆变换,称为逆变,相应的电路和装置分别称为逆变电路和逆变器。逆变器按直流中间环节的特点有电压型逆变器和电流型逆变器两种类型;按输出交流电的相数又分为单相逆变器和三相逆变器。三相逆变器是三个单相逆变器进行同步控制的组合,以便输出相位上互差 120° 的三相电。

DC—DC 变换是直流到直流的变换,称为斩波,相应的电路和装置分别称为斩波电路和斩波器。DC/DC 变换器常见的有 Buck 变换器(常称降压斩波器)、Boost 变换器(常称升压斩波器)、Buck/Boost 变换器(常称升/降压斩波器)、Cuk 变换器、隔离式的 Buck 变换器(正激变换器)、推挽变换器、桥式变换器,以及隔离式的 Buck/Boost 变换器(反激变换器)等。

AC—AC 变换是交流到交流的变换,对其电压有效值进行调节的称为交流调压,将工频交流电直接变换成其他频率交流电的称为交流—交流变换,相应的电路和装置分别称为交—交变频电路和周波变换器。AC/AC 变换器传统上用于只调电压的交流调压器和只调频率的周波变换器(也称循环变换器),现在发展比较快的矩阵变换器也是一种 AC/AC 变换器。

为了减小开关损耗和功率变换器的电磁干扰,达到重量轻、体积小且高效节能的目的,在上述四种基本形式变换器的基础上,新的电路拓扑和软开关技术及其应用得以迅速发展。

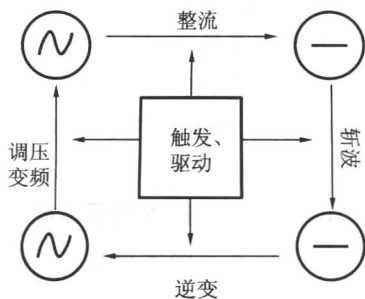


图 0-1 电能变换

4. 电力电子技术的应用发展方向

为了电力电子元器件更加广泛、高效、可靠地应用到电能变换电路系统中,电力电子技术的应用发展方向大致有以下几个方面。

1) 高压化

目前,电力电子器件的耐压等级与工业应用中实际需要的电压等级相比还有较大差距,使其应用受到限制。如晶闸管耐压等级为 8000 V,全控开关器件 IGBT 的只有 6500 V。为了使开关器件应用在高电压场合,一方面是在拓扑电路方面进行探索,目前的应用的技术主要有多电平变换器技术和多桥级联技术两种,另一方面是在器件本身方面进行探索,主要有器件直接串并联技术及器件材料和制造工艺的改进技术。

2) 高频化

一般情况下,电力电子装置中的磁性元件和电容器约占 1/3 体积或 1/3 以上的重量。为了减小电力电子系统的体积和重量、提高功率密度、改善动态性能,提高开关变换器工作频率是必然选择,但是高频化的结果又使器件的开关损耗及无源器件损耗增大、寄生参数影响增大、EMI 增加。因此,围绕着高频化应加强许多新技术的应用基础研究。一是改进器件本身的性能,如新型高频开关器件、新型高频磁元件的应用基础研究;二是采用新型软开关拓扑电路;三是采用多重化技术。

3) 集成化

近年来,电力电子电路的集成化迅猛发展,在有源器件的封装集成方面,通过改变器件内部的连线方式并把控制和保护功能单元一起封装,减小了器件内部连线电感和器件封装热阻,提高了内部连接可靠性,增加了器件功能。对无源器件,通过将磁性元件(电感或变压器)集成,或者将电感和电容集成,可以减少构成电力电子装置的元器件数量,提高系统可靠性,同时还能有效利用电感和电容的分布参数。在功率稍低的应用场合,可以把控制电路、驱动电路、保护电路和电力电子主电路集成在一起,即系统集成,这种系统集成的功率等级正在逐步提高。在功率等级较高,系统集成难以实现时,可采用模块组合化。通过开关器件的模块组合,可以减小体积、提高可靠性;将开关器件模块和散热器集成组合,可以减小从器件到散热介质之间的热阻;将变换器桥臂的器件与驱动电路、保护电路和散热器组合成为一个整体,以方便装卸和更换。

4) 智能化

开关器件的功能不断扩大,品种日益增多,通过数字芯片和通信网络等手段,可以使其不仅具有开关功能,还有控制、驱动、检测、通信和故障自诊断等智能化功能。随着集成工艺的提高和突破,有的器件还具有放大、调制、振荡及逻辑运算等功能,使其应用范围得到拓宽、线路结构得到相应的简化。

5) 高效化

合理选择电路、改进控制技术和提升器件性能是提高电力电子装置效率的根本措施。在低电压大电流的变换器中,采用同步整流技术可降低整流电路中器件的通态损耗。在高频变换器中采用软开关技术,有利于降低器件的开关损耗。SiC 材料器件是开关器件发展的一个方向。国外有实力的专业公司的试验结果表明,用 SiC 二极管取代 IGBT 模块中现有的 Si 材

料反并联二极管后,开关模块的开通损耗和关断损耗分别减小到原来的 $1/3$ 和 $1/5$,这是一项十分有价值的应用技术,值得重视。

5. 电力电子技术的应用

电力电子技术应用领域广泛,目前国内的应用情况主要有以下几个方面。

1) 电力系统

(1) 直流高压输电。

直流远距离、大容量输电,其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,直流高压输电时有很大优势,在电力系统高压输电中广泛应用。

(2) 无功补偿和谐波抑制。

晶闸管控制的电抗器、晶闸管控制的投切电容器都是常用的无功补偿装置,近年出现的静止无功发生器、有源电力滤波器具有更良好的无功功率和谐波补偿性能,无功补偿和谐波抑制对提高电力系统供电品质有重要意义。

(3) 发电机的励磁系统。

发电机的直流励磁和交流励磁系统采用电力电子装置控制,可以达到节能和提高电力系统稳定性的目的。

(4) 绿色能源的应用。

太阳能、风能等利用电力电子技术进行能量的变换和储存,有效改善电能质量。采用变速恒频控制技术,可实现利用再生能源与电力系统安全联网向用户供电。

2) 一般工业

(1) 电机的运动控制。

交直流运动控制系统在现代制造业中广泛应用,实现生产设备的速度、位置的精确控制,提高了产品的质量、生产的效率,降低了能量的消耗。

(2) 电解与电镀。

电化学工业中大量使用直流整流电源,如金属的电解、电镀设备,食盐水电解设备等都需要相应容量整流电源。

(3) 金属的冶炼与热处理。

金属的冶炼、金属的淬火中需要高频或中频感应加热电源。高频或中频电源需要将工频电源通过整流成为直流电源,再将直流电源逆变成需要的高频或中频交流电源。

3) 交通运输

(1) 电力机车。

电气化铁路中的直流和交流电力机车分别采用整流装置和变频装置,电力机车在启动、调速、稳速、制动中,都要对电力变流装置进行有效控制。磁悬浮列车需要高速运行控制,它对电力电子技术的要求就更高了。

(2) 电动汽车。

电动汽车的电动机依靠电力电子装置进行电力变换实现驱动控制,电动汽车蓄电池的充电也需要电力电子装置。性能良好的汽车中有相当数量的控制电动机,大多采用斩波或变频驱动和控制。

(3) 运载工具的电源。

飞机的电控系统、信号系统、通信系统,船舶的电力推进、机舱照明、通信导航、船舶机械,电车的电力驱动,电梯的交直流牵引等都需要不同要求的电源,电源通常都由变流装置提供,它的可靠性对运载工具而言是十分重要的。

4) 家用电器

(1) 照明灯具。

普通的调光灯具、高频荧光灯具、自动调光灯具、节能灯具等可以人为或自动调节灯具的照度。灯具内部都通过电力电子器件和控制电路来调节灯具电源。

(2) 常用电器。

家用的通风取暖设备、冰箱、洗衣机、微波炉等,为了实现自动运行和节能,大都采用电力电子技术进行驱动或控制。

5) 其他应用

(1) 不停电电源。

现代社会中不停电电源的应用更加广泛,计算机机房、医院、宾馆等重要用电场合都设置不停电电源。不停电电源是一种变流装置,在市电中断时,由不停电电源应急供电。

(2) 开关电源。

随着电力电子技术的发展,采用全控型器件的高频开关电源体积小、重量轻、效率高,已经取代了线性稳压电源,目前广泛应用于各种电子装置中。

应该指出的是,上述介绍的电力电子技术的应用仅仅是一部分,实际上电力电子技术应用范围远远不止这些,特别是伴随着新型电力电子器件的出现,电力电子技术突破,电力电子技术的应用必将更加广泛。

(3) 特种电源。

随着科学技术的发展,不少设备对电源有特殊的要求,超导储能设备、核聚变反应堆、舰载机弹射装置等都要求特殊大容量电源或者脉冲电源。

总之,电力电子技术的应用已经与各行各业密切联系在一起了,随着电力电子器件向大功率化、高频率化、集成化、智能化方向发展,电力电子技术应用领域将更加广泛。

6. 本课程的学习要求

“电力电子技术”课程既是高等工科院校自动化类专业的一门重要的专业基础课,又是专业核心课程,其主要任务是使学生全面了解和掌握各种变流装置的组成及其电磁过程、工作原理、控制方式、设计计算和技术指标等内容,为学生学习后续课程及今后从事自动控制方面的工作打下基础。

应用型本科作为高等教育的一个层次,必然有其自身的培养目标和教学特点。人才培养的目标定位不同,教学思路、教学方法以及对专业知识的要求就会有差异。专业教学的目的就是要求学生通过在校学习相关的专业知识和应用技术,成为应用型专业人才。

电力电子技术是电力、电子及控制技术领域间的交叉学科。课程有以下几个特点:

一是教材内容丰富。具体表现为概念多、公式多、波形多。随着新型电力电子器件的出现及控制技术的发展,课程内容将不断更新,教学内容将进一步扩展。

二是课程综合性强。它是“高等数学”“电路原理”“模拟电子技术”“数字电子技术”“电机拖动基础”等课程知识的综合应用,要求学生较好掌握前授课程的知识,在学习掌握本课程基本理论知识的基础上,既能对各种变换电路作定量的应用计算,又会对相关的波形作定性的分析。

三是课程实践性强。学生在掌握原理、熟悉计算的基础上,还应具有较强的实际动手能力,能完成电力电子装置组装、调试、运行、检测及诊断等实际操作。

“电力电子技术”课程学习的基本要求:

- (1)了解电力电子技术的发展趋势和动向;
- (2)掌握电力电子器件的基本结构、外部特性及其主要参数;
- (3)掌握常用变流电路的工作原理、波形分析,电路主要物理量的计算;
- (4)掌握晶闸管、IGBT、P-MOSFET 等器件的额定参数计算和器件的选择;
- (5)能合理选择器件的驱动电路和保护电路;
- (6)掌握变流电路安装、调试、运行、检测及诊断等实际操作。

本教材内容除绪论部分外,可分为四大部分。

第一部分是电力电子器件,即第1章。该章是全书的基础,主要介绍各种电力电子器件的基本结构、工作原理、主要参数和应用特性,以器件应用为目的,以半控器件晶闸管和全控器件功率场效应晶体管(P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等为重点进行分析。

第二部分是电力电子电路,包括第2~5章。该部分是全书的主体,分别介绍了交流一直流、直流—交流、直流—直流、交流—交流变换电路,在分析各种变流电路基本原理的基础上,重点介绍实际应用广泛的电路,以变流电路、输出波形和工作特性为要点,分析电路。

第三部分是变流电路的相关控制技术,包括第6章和第7章。该部分主要介绍脉宽调制技术和软开关技术,重点阐述脉宽调制技术和软开关技术的原理和实现,分析如何应用脉宽调制技术,如何改善电力电子电路性能,应用软开关技术如何提高工作频率、功率密度。

第四部分是电力电子技术的应用,即第8章。该章主要包括电力电子技术应用的基础和电力电子技术应用的实例。电力电子技术应用的基础是指电力电子器件的驱动、保护和组合运行,主要介绍器件的驱动、保护和组合运行的基本要求、基本原理及应用中应注意的问题。电力电子技术应用的实例是结合目前电力电子技术应用的领域和发展趋势,重点介绍典型的应用场合。

电力电子技术是一门工程性和实用性很强的应用技术,学习“电力电子技术”课程的最终目的就是要应用电力电子技术解决工程实际和生产实际问题。

第1章 电力电子器件

随着电力电子技术的发展、电力电子器件种类的增加及器件性能的完善,器件的应用范围在不断扩展。熟悉各种电力电子器件的结构、工作原理、基本特性和动态参数,并掌握器件参数选取的原则,对正确使用电力电子器件十分重要。本章在对器件的结构、工作原理介绍的基础上,着重器件的特性分析和参数选择。

1.1 电力电子器件基础

1.1.1 电力电子器件概述

电力电子器件是电力电子技术及其应用的基础,每一新器件的诞生或器件特性的新发展,都带动了电力电子技术应用的新突破。同时,电力电子技术应用的新发展又对电力电子器件提出了更新、更高的要求,推动了高性能器件的开发和研制。

主电路(main power circuit)是指在电气设备或电力系统中,直接承担电能变换或控制任务的电路。电力电子器件(power electronic device)是直接用于处理电能的主电路中,实现电能变换或控制的电子器件。

广义上电力电子器件可分为电真空器件(electron device)和半导体器件(semiconductor device)两类。对于电真空器件,自20世纪50年代以来,真空管(vacuum valve)仅在频率很高(如微波)的大功率高频电源中还在使用,而电力半导体器件已取代了汞弧整流器(mercury arc rectifier)、闸流管(thyratron)等电真空器件,成为绝对主力。因此,电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件(power semiconductor device)。电力半导体器件所采用的主要材料仍然是半导体硅。

由于电力电子器件直接用于处理电能的主电路中,故与处理信息的电子器件相比,电力电子器件的一般特征如下:

(1)能处理电功率的大小,即承受电压和电流的能力,小至毫瓦级,大至兆瓦级,大多都远高于处理信息的电子器件的。

(2)电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。电力电子器件所处理的电功率较大,在主电路和控制电路之间,需要一定的中间电路对控制电路的信号进行放大,这就是电力电子器件的驱动电路(driving circuit)。

(3)电力电子器件一般都工作在开关状态。导通时阻抗(impedance)很小,电路接近于短路,管压降(voltage across the tube)接近于零,而电流由外电路决定;阻断时阻抗很大,电路接近于断路,电流几乎为零,而管子两端电压由外电路决定。为保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上讲究散热设计,而且在其工作时一般都要安装散热器。

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。这是因为电力电子器件在导通或关断的状态下,并不是真正的短路或断路。导通时器件上有一定的通态电压降,形成通态损耗。阻断时器件上有微小的断态漏电流流过,形成断态损耗,尽管它们的数值很小,但分别与数值较大的通态电流或断态电压相作用,就形成了不可忽略的通态损耗和断态损耗。在器件开通或关断的转换过程中产生开通损耗和关断损耗,称之为开关损耗。通常电力电子器件的断态漏电流极小,因而通态损耗是器件功率损耗的主要原因。器件开关频率较高(10 kHz 以上)时,开关损耗可能成为器件功率损耗的主要因素。

1.1.2 应用电力电子器件的系统组成

电力电子系统由以电力电子器件为核心的主电路(main circuit)、器件的驱动电路(driving circuit)和系统的控制电路(control circuit)所组成。电力电子器件在实际应用中的系统组成如图 1-1 所示。

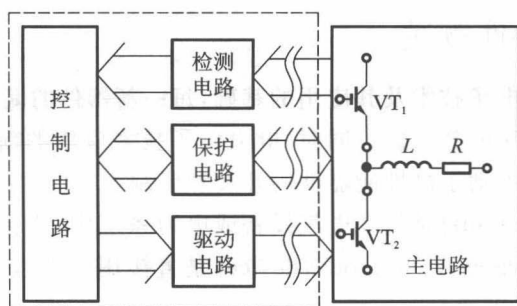


图 1-1 电力电子器件在实际应用中的系统组成

控制电路按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或断,来实现整个系统的功能。

有的电力电子系统中,还需要有检测电路。广义上往往把检测电路和驱动电路等主电路之外的电路都归为控制电路,从而也可粗略地说电力电子系统是由主电路和控制电路组成的。

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,因此主电路和控制电路连接的路径上,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,通常需要进行电气隔离(electrical isolation),通过其他手段如光、磁等来传递信号。

保护电路是在主电路和控制电路中附加的承担一些保护功能电路,以保证电力电子器件和整个系统正常可靠运行。由于主电路中往往有电压和电流的过冲,而电力电子器件一般比主电路中普通的元器件要贵,而承受过电压和过电流的能力却要差一些,因此,在主电路和控制电路中附加一些保护电路,以保证电力电子器件和整个电力电子系统能正常可靠地运行,显然是非常必要的。

1.1.3 电力电子器件的分类

电力电子器件按照被控制电路信号控制的程度不同,分为以下三类。

(1)不可控器件(uncontrolled device):不能用控制信号来控制其通断,因此也就不需要驱

动电路。这种器件只有两个端子,器件的通和断是由其主电路中承受的电压和电流决定的。其特性与信息电子电路中的普通二极管特性基本一致。

(2)半控型器件(semi-controlled device):通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断,器件的关断由其所在主电路中承受的电压和电流决定。

(3)全控型器件(full-controlled device):通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断,又称自关断器件。

根据驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质,电力电子器件可分为两类。

(1)电流驱动型(current driving type):通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断的控制,如图 1-2 所示。

(2)电压驱动型(voltage driving type):仅通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可实现导通或者关断的控制。电压驱动型器件实际上是通过加在控制端上的电压在器件的两个主电路端子之间产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态的,所以又称场控器件(field controlled device)或场效应器件,如图 1-3 所示。

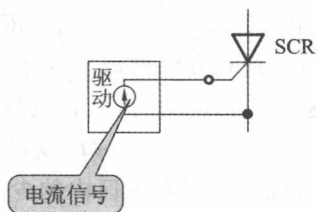


图 1-2 电流驱动型

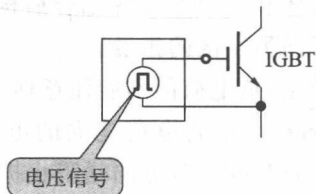


图 1-3 电压驱动型

按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况不同,电力电子器件可分为三类。

(1)单极型器件(unipolar device):由一种载流子参与导电的器件。

(2)双极型器件(bipolar device):由电子和空穴两种载流子参与导电的器件。

(3)复合型器件(complex device):由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件。

1.2 不可控器件——电力二极管

电力二极管(power diode)是不可控器件,它的结构和原理简单,工作可靠,自 20 世纪 50 年代初期就获得应用,直到现在电力二极管仍然大量应用于许多电气设备当中。快恢复二极管(fast recovery diode)和肖特基二极管(Schottky diode)是具体某种特性的二极管,分别应用中、高频整流和逆变,以及低压高频整流的场合,具有不可替代的地位。

1.2.1 PN 结与电力二极管的工作原理

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的类似,以半导体 PN 结为基础,由一个面积较大的 PN 结(PN junction)和两端引线经封装组成。从外形上看,主要有螺栓型和平板型两种封装,当然还有其他形式的封装。它的外形、结构和电气图形符号如图 1-4 所示。

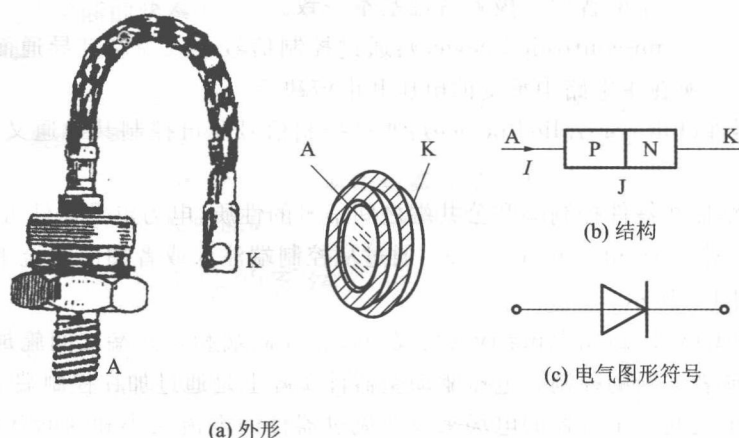


图 1-4 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

N 型半导体和 P 型半导体结合后构成 PN 结。PN 结交界处电子和空穴的浓度差别造成了各区的多子向另一区的扩散运动(pervasion movement),到对方区内成为少子,在界面两侧分别留下了带正、负电荷但不能任意移动的杂质离子,这些不能移动的正、负电荷称为空间电荷(space charge)。空间电荷建立的电场称为内电场(inside electric field)或自建电场(self building electric field),其方向是阻止扩散运动的,另一方面又吸引对方区内的少子(对本区而言则为多子)向本区运动,即漂移运动(excursion movement)。扩散运动和漂移运动既相互联系又是一对矛盾,最终达到动态平衡,正、负空间电荷量达到稳定值,形成了一个稳定的由空间电荷构成的范围,称为空间电荷区,按所强调的角度不同也称耗尽层(exhaust layer)、阻挡层(bar layer)或势垒区(barrier section)。PN 结的形成如图 1-5 所示。

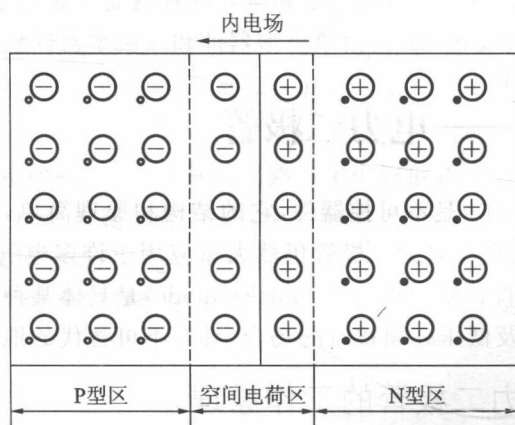


图 1-5 PN 结的形成

二极管的基本原理就在于 PN 结的单向导电性这一主要特征。PN 结处于正向导通状态,电导调制效应使得 PN 结在正向电流较大时压降仍然很低,维持在 1 V 左右,所以正向偏置的 PN 结表现为低阻态。PN 结处于反向截止状态,当给 PN 结施加反相电压(P 极加负电压,N 极加正电压)时,只有极小的反向漏电流流过 PN 结,PN 结表现为高阻态,几乎没有电流流过。

PN 结的反向击穿(reverse breakdown of PN junction)是指 PN 结具有一定的反向耐压能力,但当施加的反向电压过大时,反向电流将会急剧增加,破坏 PN 结的反向偏置为截止的工作状态。反向击穿按机理不同,分为雪崩击穿(avalanche breakdown)和齐纳击穿(punch through)两种形式。反向击穿发生时,只有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 PN 结允许的耗散功率,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。

PN 结的状态可以反映其单向导电性能,如表 1-1 所示。

表 1-1 PN 结的状态及单向导电性能

参数 状态	正向导通	反向截止	反向击穿
电流	大	几乎为零	大
电压	约 1 V	高	高
阻态	低阻态	高阻态	—

PN 结的电容效应是指 PN 结的电荷量随外加电压而变化,呈现电容效应,称为结电容(junction capacitance),又称微分电容(incremental capacitance)。结电容按其产生机制和作用的差别分为势垒电容(barrier capacitance)和扩散电容(diffuse capacitance)。

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。势垒电容的大小与 PN 结截面积成正比,与阻挡层厚度成反比。扩散电容仅在正向偏置时起作用。正向偏置状态下:当正向电压较低时,以势垒电容为主;正向电压较高时,扩散电容为结电容主要成分。结电容影响 PN 结的工作频率,特别是在高速开关的状态下,可能使其单向导电性变差,甚至不能工作,应用时应加以注意。

电力二极管和信息电子电路中普通二极管的区别在于其正向导通时要流过很大的电流,其电流密度较大,因而额外载流子(carrier)的注入水平较高,电导调制效应不能忽略;引线和焊接电阻的压降等都有明显的影响;承受的电流变化率 di/dt 较大,因而其引线 and 器件自身的电感效应也会有较大影响;为了提高反向耐压,其掺杂浓度低也造成正向压降(forward bias voltage)较大。

1.2.2 电力二极管的基本特性

电力二极管的基本特性分为静态特性和动态特性,电力二极管在不同场合应用时,对其特性是有着不同要求的。基本特性分析如下。

1. 静态特性

静态特性(static state characteristic)主要指其伏安特性(volt-ampere characteristic),当电力二极管承受的正向电压大到一定值(门槛电压 U_{T0})时,正向电流才开始明显增加,处于稳定导通状态。与正向电流 I_F 对应的电力二极管两端的电压 U_F 即为其正向电压降。当电力二极管承受反向电压时,只有少子引起的微小而数值恒定的反向漏电流(reverse leakage current),如图 1-6 所示。