



应用型本科电气工程与自动化专业“十三五”规划精品教材

电力电子技术



主编 徐春燕





应用型本科电气工程与自动化专业“十三五”规划精品教材

电力电子技术

DIANLI DIANZIJISHU



主 编 徐春燕

副主编 雷 丹

参 编 曹建平 郭 磊



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

全书共分9章:第0章为绪论;第1章介绍了电力电子器件的工作原理、特性及驱动和保护;第2、3、4、5章分别在此基础上重点讨论了AC—DC、DC—DC、DC—AC、AC—AC四种电力变换电路的工作原理及相关计算,且每章加入了典型实训案例;第6章介绍了软开关技术;第7章介绍了电力电子技术应用;第8章介绍了基于Matlab的电力电子电路仿真。在结构上,教材主体章节每章都有本章小结和课外练习,有利于学生巩固本章学习内容。

本书可作为应用技术型高等院校电气工程类、自动化类本科生教材,也可供从事电力电子技术和相关研究的工程技术人员参考及阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/徐春燕主编. —武汉:华中科技大学出版社,2018.7
ISBN 978-7-5680-4033-4

I. ①电… II. ①徐… III. ①电力电子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 143243 号

电力电子技术

徐春燕 主编

Dianli Dianzi Jishu

策划编辑:袁 冲

责任编辑:狄宝珠

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:14.75

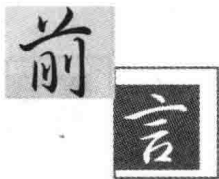
字 数:365千字

版 次:2018年7月第1版第1次印刷

定 价:38.00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



近年来,电力电子技术得到了突飞猛进的发展,电力电子技术应用范围十分广泛,电力系统、交通运输、国防军事、能源开采、通信系统、计算机系统、新能源系统以及变频节能、家用电器等都有电力电子技术的应用。电力电子技术是一门发展非常迅速的技术,“电力电子技术”课程已经成为电气工程及其自动化、自动化专业的核心专业基础课程,同时它也是多门后续专业课程的基础。

本教材立足于应用型人才培养,在编写上以启发学生思考能力为本,注重培养学生分析电路的能力,通过实训案例等引导学生应用电力电子技术解决工程实际问题。教材内容在编写上具有以下特点。

特点一:教材在编写上精选内容,注重实例讲解、实训引导,紧密围绕电力电子器件及电力变换技术,将器件、电路与应用有机结合在一起。

特点二:教材中专门安排了典型电力电子电路的 Matlab 仿真,这是本教材的一大特点。仿真调试可以验证设计方案的可行性,同时可以缩短开发周期、减少元器件损耗,尤其在硬件平台不够或硬件投入跟不上的情况下。因此,引导学生学习并掌握电力电子电路的 Matlab 仿真非常有价值。

特点三:教材立足于应用型人才培养,吸取了多本精品教材的精华,同时注入了课程组一线教师积累多年的教改与教研经验。

教材共分 9 章:第 0 章为绪论;第 1 章主要介绍了电力电子器件的工作原理、特性及驱动和保护;第 2、3、4、5 章分别在此基础上介绍了 AC—DC、DC—DC、DC—AC、AC—AC 四种电力变换电路的工作原理及相关计算和应用;第 6 章介绍了软开关技术;第 7 章介绍了电力电子技术应用;第 8 章介绍了基于 Matlab 的电力电子电路仿真。在结构上,教材主体章节每章都有本章小结和课外练习,有利于学生巩固本章学习内容。

本书可作为应用技术型高等院校电气工程类、自动化类本科生教材,也可供从事电力电子技术和相关研究的工程技术人员参考及阅读。

本书由徐春燕老师担任主编,并编写了绪论及第 1、2、5、7 章的内容,雷丹老师编写了第 3 章的内容,曹建平老师编写了第 4、6 章的内容,郭磊老师编写了第 8 章的内容。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2018 年 4 月

第0章 绪论	(1)
0.1 什么是电力电子技术	(1)
0.2 电力电子技术的发展	(2)
0.3 电力电子技术的应用	(3)
0.4 电力电子电路的仿真	(4)
0.5 课程性质与学习方法	(5)
第1章 电力电子器件	(6)
1.1 概述	(6)
1.2 电力二极管	(9)
1.3 半控型器件——晶闸管	(13)
1.4 典型全控器件	(22)
1.5 其他电力电子器件	(33)
1.6 电力电子器件的驱动、保护及串并联使用	(35)
本章小结	(42)
课外练习	(42)
第2章 整流电路及有源逆变	(43)
2.1 单相可控整流电路	(43)
2.2 三相可控整流电路	(57)
2.3 变压器漏感对整流电路的影响	(67)
2.4 大功率可控整流电路	(70)
2.5 电容滤波的不可控整流电路	(73)
2.6 整流电路的有源逆变工作状态	(78)
2.7 整流电路应用中要注意的几个问题	(83)
实训一 10 kW 直流电动机不可逆调速系统	(93)
本章小结	(98)
课外练习	(98)
第3章 直流斩波电路	(100)
3.1 基本斩波电路	(100)
3.2 复合斩波电路	(106)



实训二 36 V 开关电源设计	(107)
本章小结	(112)
课外练习	(112)
第 4 章 无源逆变电路	(114)
4.1 逆变电路的概述	(114)
4.2 电压型逆变电路	(117)
4.3 电流型逆变电路	(123)
4.4 多重逆变电路和多电平逆变电路	(127)
4.5 PWM 逆变电路	(129)
实训三 基于 DSP 数字逆变器的采样电路的设计	(138)
本章小结	(141)
课外练习	(142)
第 5 章 交流-交流变换电路	(143)
5.1 交流调压电路	(143)
5.2 交流调功电路	(150)
5.3 交-交变频电路	(150)
5.4 交流变换电路的应用	(155)
5.5 案例分析	(157)
本章小结	(161)
课外练习	(162)
第 6 章 软开关技术	(163)
6.1 软开关的基本概念	(163)
6.2 软开关电路的分类	(164)
6.3 典型的软开关电路	(166)
本章小结	(171)
课外练习	(171)
第 7 章 电力电子技术应用	(173)
7.1 柔性交流输电技术	(173)
7.2 电力系统的谐波抑制	(176)
7.3 开关电源	(179)
7.4 不间断电源	(183)
7.5 变频器和交直流调速系统	(184)
7.6 光伏发电并网装置	(189)
本章小结	(194)
课外练习	(194)
第 8 章 基于 Matlab 的电力电子电路仿真	(195)
8.1 整流电路	(195)
8.2 直流斩波电路	(211)
8.3 交流-交流变换电路	(216)



8.4 逆变电路	(220)
本章小结	(226)
课外练习	(226)
参考文献	(227)

第 0 章 绪论

0.1 什么是电力电子技术

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,那么电力电子技术呢?

电力电子技术(power electronics)是以电力电子器件(power electronic Device)为基础,利用电路和控制理论对电能进行变换和控制的技术,它是应用于电力领域的电子技术。电力电子技术也称为电力电子学,由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉形成,是目前较为活跃的应用型学科。

电力电子技术通常分为电力电子器件的制造技术和电力电子器件的应用技术(即变流技术)两大分支。电力电子器件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。它包括各种电力电子器件的设计、制造、参数测试、模型分析等,目前所用的电力电子器件基本都采用半导体材料制成;而电力电子器件的应用技术(即变流技术)则是电力电子技术的核心,其理论基础是电路理论。那么,电力电子变流技术又包括哪些呢?

众所周知,电能有交流(alternating current,简称为 AC)和直流(direct current,简称为 DC)两大类。交流电能有大小、相位、频率和相数的差别,直流电能有大小和极性的差别。在电能的实际应用中,常常需要在两种电能之间,或是对同一种电能的一个或多个参数(如电压、电流、频率等)进行变换,因此电能存在着下列四种变换类型。

- (1) 交流-直流(AC-DC)变换——整流,将交流电能变为直流电能。
- (2) 直流-交流(DC-AC)变换——逆变,将直流电能变为交流电能,是整流的逆过程。
- (3) 交流-交流(AC-AC)变换——包括交流调压和交流变频,即改变交流电能的参数。
- (4) 直流-直流(DC-DC)变换——直流斩波,是对直流电能的参数进行变换。

进行上述电能变换的技术称为变流技术。虽然电能变换只有这四种类型,但一个具体的电力电子装置中可能涉及其中的一种或几种变换类型,如交-直-交变频器中就包括了整流和逆变两种变换类型,开关电源中也包括整流和逆变变换。

1974 年美国学者 W. Newell 用倒三角形描述了电力电子技术与相关学科关系,如图 0-1 所示,与相关学科的关系见表 0-1 所示。电力电子技术已经成为现代工业社会中的重要支撑技术之一。

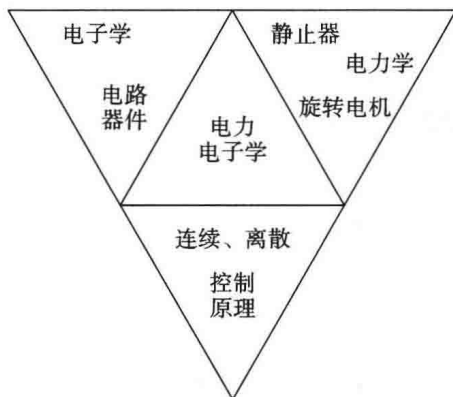


图 0-1 描述电力电子技术的倒三角形

表 0-1 电力电子技术与相关学科的关系

与电子学的关系	与电力学的关系	与控制理论/自动化技术的关系
(1) 都分为器件和应用两个分支; (2) 电力电子器件工作在开关状态; 电子学器件工作在开关、放大状态	(1) 电力电子广泛应用于电力系统; (2) 电力电子是电气工程学科中最为活跃的一个分支	(1) 控制理论广泛用于电力电子系统中; (2) 电力电子技术是弱电控制强电的技术, 是弱电和强电的接口。控制理论是这种接口的有力纽带。电力电子装置是自动化技术的基础元件和重要支撑技术

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, 电力电子技术的发展史是以电力电子器件的发展史为纲的。自 20 世纪 50 年代末开始, 电力电子器件沿着“半控型、全控型、复合型、集成化、高电压、大电流、高频化”等轨迹在发展, 在应用需求的推动下, 电力电子装置沿着“集成化、控制系统数字化、绿色化”的轨迹在发展。

1957 年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管, 标志着电力电子技术的诞生。当时, 应用晶闸管能把工频交流电转换为直流电, 由于其优越的电气性能和控制性能, 很快就把汞整流器和庞大的直流发电机-电动机控制逐出了历史舞台。20 世纪 60 年代开始到 70 年代, 晶闸管得到了飞速发展, 从低压小电流到高压大电流的各系列晶闸管产品广泛应用于各种变流装置, 同时, 逆导晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等晶闸管派生器件也相继问世, 电力电子技术的发展进入了晶闸管时代。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。晶闸管的关断依靠外部条件(如电网电压)来实现。这使得晶闸管的应用受到了很大的局限。

20 世纪 70 年代中后期, 以门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)和电力场效应晶体管(Power-MOSFET)为代表的全控型器件得到迅速发展。全控型器件的诞生和发



展,将电力电子技术推进到一个新的发展阶段。全控型器件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,它在逆变、斩波、整流、交流-交流控制等所有电力电子电路中均可应用。它使电路的控制性能大大改善,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。

到了 20 世纪 80 年代后期,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、集成门极换流晶闸管(IGCT)等复合型器件相继问世,它们综合了 MOSFET+GTR 以及 MOSFET+GTO 等器件的优点,性能更加优越,可以构成大功率、高频的电力电子电路。

为了使电力电子装置的结构更加紧凑、体积进一步减小,出现了将若干个电力电子器件及其控制、保护、驱动电路等功能集成的功率模块器件(PIC)。因电压隔离(主电路为高压,而控制电路为低压)、热隔离(主电路发热严重)、电磁干扰(开关器件通断高压大电流,而它和控制电路处于同一芯片)等几大难题存在,因此目前电力电子集成电路的功率都还较小,电压也较低。这也代表了电力电子技术发展的一个重要方向。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。

随着全控型电力电子器件的不断进步,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。为了减少开关损耗,软开关技术便应运而生。采用软开关技术理论上可以使开关损耗降为零,可以提高效率,另外,它也使得开关频率得以进一步提高,从而提高了电力电子装置的功率密度。

20 世纪末期和 21 世纪初期,新材料、新工艺的电力电子器件的研究和开发也如火如荼。其中,碳化硅(SiC)以其优良的物理化学特性和电特性成为制造大功率电子器件重要的半导体材料。除了碳化硅器件的开发和研究外,其他各种新材料器件的研究也在广泛开展中。

此外,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:如全控化、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等等。

0.3 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用十分广泛,国防军事、工业、能源、交通运输、电力系统、通信系统、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。

1. 电气节能中的应用

电力电子技术在电气节能方面的应用主要采用变频调速、提高电能质量、进行有源滤波等,其中,以变频调速为主要应用。近年来,由于电力电子变频技术得到了广泛应用,并且占据主导地位,作为节能控制,交流电动机主要采用变频调速技术,它带来了巨大的节能效益。据不完全统计,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度。家用电器的空调,冰箱等采用变频调速技术,可节电 30% 以上。

2. 交通运输中的应用

高铁、地铁、城市轻轨、电动汽车等正成为世界各国交通发展的重点,它们的电力牵引装



置核心部分是牵引变流装置,其主要组成部分包含有 AC-DC 整流器、控制器、DC-DC 直流变换器和 DC-AC 逆变器等多个电力电子变换环节。如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。此外,飞机、船舶需要多种不同性能的电源,也是离不开电力电子技术。

3. 电力系统中的应用

电力电子技术在电力系统中的应用也非常广泛。直流输电具有输电距离远、调节性能好、过电压水平低、线路损耗小的优点,近年来得到迅速发展,我国也已投建了多条高压直流输电线路。直流输电送电端和受电端的换流阀都采用晶闸管变流装置;近年来发展起来的柔性交流输电技术(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)、晶闸管投切电容器(TSC)、静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等电力电子装置也大量用于电力系统的无功补偿或谐波抑制。

4. 新能源中的应用

近年来,新能源的应用正受到世界各国的普遍关注。风力发电、太阳能发电、生物质能发电潮汐发电等各种可再生能源的应用越来越受到重视,这些新型发电方式都需要电力电子技术参与调节和控制。同时,这些发电方式发出的电能联网和储能时也离不开电力电子装置的控制和处理。

5. 其他

电解、电镀等电化学工业采用的直流电源、冶金工业中广泛应用的中频感应加热电源、直流开关稳压电源等都是电力电子技术的典型应用。

电力电子新技术的发展,反过来又促进了一系列新应用领域的不断开拓。电力电子技术已经渗透到现代社会的各个方面,未来 90% 的电能均需通过电力电子技术处理后再加以利用,以便提高能源利用的效率、提高工业生产的效率、实现再生能源的最大利用。总之,电力电子技术在国民经济各行各业和人们的日常生活中都必不可少。是目前发展较为迅速的一门学科,电力电子技术的应用具有十分广泛的前景。

0.4 电力电子电路的仿真

由于电力电子电路中的电力电子器件具有非线性特性,给电力电子电路讨论和分析带来了一定的困难,使电路计算的复杂程度增加。对于电力电子电路的分析,一般采用波形分析和分段线性化的处理方法。现代计算机仿真技术为电力电子电路和系统的分析提供了崭新的方法,使复杂的电力电子电路分析和设计变得更加容易和简单。

所谓仿真,指的是在计算机平台上虚拟实际的物理系统,用数学模型代替实际的物理器件和电路,从而实现对实际电路的工作过程的研究和讨论。随着数值算法的不断完善,已经出现了大量的通用数字仿真语言和软件。现代仿真软件已经模块化,更适合工程上的应用,各种仿真软件已经成为科研、设计及学生学习的必备工具和好助手。

电力电子电路的仿真软件有很多,目前最常用的主要有 PSPICE 软件和 MATLAB 的 Simulink 平台。通过仿真软件的使用,电力电子电路设计人员可以在进行电路实验前,先进行电路仿真分析,确定合理应用的主电路和控制方式,大大减小了电力电子装置开发和设



计的工作量,缩短了设计和开发时间。所以,电力电子电路仿真对于从事电力电子装置开发和应用的工程技术人员来说是非常重要的。

0.5 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,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,要特别注意电路的相位与波形分析,掌握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,重视 PWM 控制技术、软开关技术以及电力电子应用技术的学习。

第 1 章 电力电子器件

电力电子器件(power electronic device)是电力电子技术的基础,是电力电子装置的核心部件,因此,了解和掌握常用电力电子器件是非常重要的。目前,常用的电力电子器件有电力二极管、晶闸管、电力晶体管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管等。本章先对电力电子器件的概念、特点和分类等进行简介,然后对常用器件的结构、基本工作原理、基本工作特性和主要技术参数及选用进行介绍。

1.1 概述

1.1.1 电力电子器件定义

电力电子器件是指在电能变换与控制的电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。电力电子器件有电真空器件和半导体器件两大类。目前,除了在频率很高的大功率高频(微波)电源中还有用电真空管外,其他电能变换和控制领域中几乎全部是用半导体材料器件。所以,人们常说的电力电子器件指的是电力半导体器件。目前,电力半导体器件所用主要材料是单晶硅。

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,它一般具有如下特征。

1. 处理电功率的能力大

电力电子器件能够承受高电压和大电流,其处理电功率的能力可以小至毫瓦级,大至兆瓦级,一般都远大于处理信息的电子器件。

2. 工作在开关状态

电力电子器件一般处理的电功率较大,所以为减少损耗,提高效率,电力电子元件在工作时只处于开关状态。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. 需要由信息电子电路来控制

在实际应用中,由于电力电子器件处理的电功率较大,因此必须采用信息电子电路来实现弱电控制强电。



4. 需要安装散热器

电力电子器件虽然工作在开关状态,但其在导通或阻断状态下,并不是处于理想的短路或开路状态。加在电力电子器件上的电压和流过它的电流较大,所以,导通时器件上有一定的通态压降,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。开通损耗和关断损耗,统称为开关损耗。通常来讲,通态损耗是电力电子器件功率损耗的主要成因。当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。为了使电力电子器件不至于因损耗导致器件温度过高而损坏,不仅器件在封装时要安装散热器,而且还要考虑器件在工作时散热器的安装问题。

1.1.2 电力电子器件理想模型

电力电子电路是非线性和时变电路,对其分析和计算都很复杂和烦琐,为了简化分析和计算,常常认为电力电子器件是理想开关器件,其模型如图 1-1 所示。

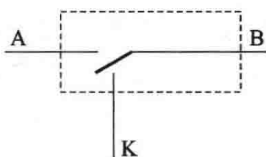


图 1-1 电力电子器件的理想开关模型

理想模型的特点如下。

- (1) 它有三个电极,其中 A 和 B 代表开关的两个主电极,K 是控制开关通断的控制极。
- (2) 它只工作在“通态”和“断态”两种状态,通态时其导通电阻为零,断态时其电阻无穷大。
- (3) 器件的开通和关断是瞬时完成的,即器件的开关时间为零。

实际的电力电子器件不可能达到以上理想工作状态,但也要求其在通态时能承受很高的电流密度而通态压降很低,断态时能承受很高的电压而漏电流很小,开关时间短。此外,对电力电子器件还要求应用时电路有限制器件电流和电压上升率的能力。总之,电力电子器件应具备工作损耗小、承受电流和电压能力大、开关速度快等特点。

1.1.3 电力电子器件的分类

电力电子器件的种类很多,分类方式也各不相同。一般可根据器件的可控性、驱动信号的种类和驱动信号的波形形状以及器件参与导电的载流子的情况进行分类。

1. 按被控制信号所控制的程度分类

1) 不可控器件

这类器件一般只有两个主电极:一端是阳极,另一端是阴极,具有单向导电性。不可控器件不能用控制信号来控制通断,因此也不需要驱动电路。这类器件就是功率二极管,也称为电力二极管。器件阳极在电路中承受正向电压时导通,承受反向电压时关断。

2) 半控型器件

这类器件除了两个主电极,还有一个控制极,也具有单向导电性。该类器件通过控制信

号可以控制其导通但不能控制其关断,故称为半控型器件。半控型器件是指晶闸管及其大部分派生器件。器件的关断由其在电路中承受的电压和电流决定。

3) 全控型器件

这类器件除了有两个主电极,还有一个控制极,具有单向导电性。该类器件通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断,故器件称为全控型器件,又称为自关断器件。这类器件很多,包括门极关断晶闸管(GTO)、功率晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅晶体管(IGBT)。目前常用的是功率 MOSFET 和 IGBT。

2. 按控制信号的类型分类

(1) 电流驱动型器件——通过从控制极注入或者抽出电流来实现导通或者关断的控制。例如晶闸管、GTO、GTR。

(2) 电压驱动型器件——仅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。例如 IGBT、MOSFET。

3. 按控制信号的波形分类

(1) 脉冲触发型——不需要持续施加控制端信号维持开通或关断(如:晶闸管)。

(2) 电平控制型——需要持续施加控制端信号开通或关断(如:MOSFET、IGBT)。

4. 按参与导电的载流子的情况分类

按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况,电力电子元器件可分为三类:

①由一种载流子参与导电的器件称为单极型器件,如电力二极管、晶闸管、GTR、GTO;②由电子和空穴两种载流子参与导电的器件称为双极型器件,如电力 MOSFET;③由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件称为复合型器件,如 IGBT、MCT(MOS 控制晶闸管)。

1.1.4 电力电子应用系统组成

电力电子应用系统的组成如图 1-2 所示,电力电子器件在实际应用中,一般由控制单元、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。

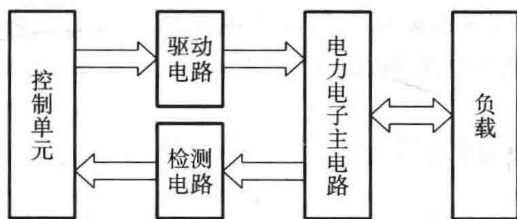


图 1-2 电力电子应用系统的组成

控制单元可以由计算机、单片机、PLC 等和信息电子电路组成,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,来实现整个系统功能。

检测电路由传感器和信息电子电路组成,驱动电路一般由信息电子电路组成。

广义上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。因此也可以说电力电子应用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,因此在驱动电路与主电路连接处,或驱动电路与控制电路连接处,或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,还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。

1.2 电力二极管

电力电子装置中,常常要用到不可控器件电力二极管。电力二极管的结构和原理简单、工作可靠,自20世纪50年代初期就获得广泛应用。常用的电力二极管有整流二极管、快恢复二极管和肖特基二极管。整流二极管常在电力电子电路中作整流、续流和隔离用;快恢复二极管和肖特基二极管开通和关断速度很快,分别在中、高频整流和逆变电路以及低压高频整流的场合使用。

1.2.1 电力二极管结构和工作原理

1. 电力二极管结构

电力二极管的基本结构与信息电路中的普通二极管相似,都是由P型半导体和N型半导体构成,具有一个PN结的两端器件,所不同的是电力二极管的PN结面积比较大。其外形、结构和图形符号如图1-3所示。

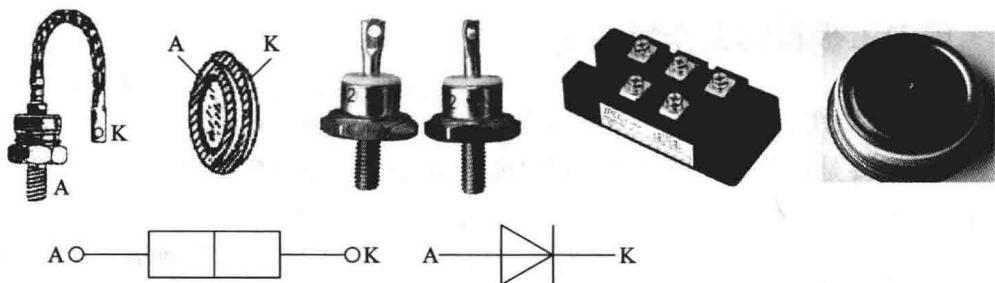


图 1-3 电力二极管及模块的外形、结构和图形符号

电力二极管的外形主要有螺栓型封装、平板型封装和模块型封装等几种,其中电力二极管模块是将2个或4个或6个二极管组合在一起制造,方便用户使用。螺栓型结构安装方便,但散热差,一般200 A以下的小容量管子采用螺栓型。平板型结构能够两面散热,一般用于200 A以上容量较大的管子。

2. 电力二极管的工作原理

电力二极管主要是由一个面积较大的PN结封装后,引出两个端子的半导体器件,因此其工作原理同PN结的特性一致。而PN结的工作特性回顾如下。

1) 具有正向导通、反向截止的单向导电特性

当PN结外加正向电压(正向偏置)时,在外电路上形成自P区流入而从N区流出的电流,称之为正向电流 I_F ,PN结表现为低阻状态,这就是PN结的正向导通状态。

当PN结外加反向电压(反向偏置)时,在外电路上形成自N区流入而从P区流出的电流,称之为反向电流 I_R ,一般仅为微安数量级,几乎是没有电流流过,这就是PN结的反向截

止状态。

需要注意的是:当施加的反向电压过大时,反向电流 I_R 会急剧增大造成 PN 结的反向击穿。反向击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种形式。当 PN 结发生反向击穿时,只要外电路采取一定措施,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。如果反向电流未被限制,继续增加,将使 PN 结因温度急剧上升导致过热而烧毁,会造成器件永久性损坏。

2) 具有电容效应

PN 结的空间电荷区就是一个平板电容器,其电荷量随外加电压变化而变化,呈现电容效应,称为结电容。结电容影响 PN 结的工作频率,特别是高速开关状态时,结电容可能与电路的杂散电感共同引起高频振荡,影响电路正常工作。另一方面,高频状态下,结电容呈现低阻抗特征,使 PN 结的单向导电性变差,降低其反向阻断能力,使用时一定要注意。

3) 具有电导调制效应

当 PN 结上流过的正向电流较大时,注入并积累在低掺杂 N 区的少子空穴浓度将很大,为了维持半导体中性条件,其多子浓度也相应大幅度增加,使得其电阻率明显下降,也就是电导率大大增加,这就是电导调制效应。

正是由于 PN 结具有电导调制效应,所以电力二极管在正向导通通过大电流时,能保持较低的电压降。但为了提高电力二极管的反向耐压,其掺杂浓度一般较低,使其正向压降较普通二极管稍高。

1.2.2 电力二极管的工作特性

1. 静态工作特性

静态特性主要是指电力二极管阳极和阴极之间电压 U 与阳极电流 I 之间的关系,也称为伏安特性,如图 1-4 所示。

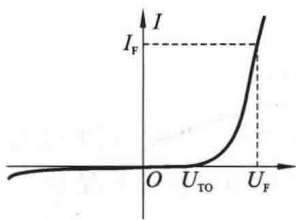


图 1-4 电力二极管的伏安特性

当电力二极管承受的正向电压大到某一值(门槛电压 U_{TO})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 称为其正向电压降,因电导调制效应,一般为 1 V 左右,当电力二极管承受反向电压时,只有微小的反向漏电流。

2. 动态工作特性

动态工作特性是指二极管在导通和截止两种状态之间转换的特性,也称为开关特性,如图 1-5 所示。由于电力二极管结电容的存在,故开通和关断需要一定的时间,该时间影响电力二极管的工作频率。

电力二极管的关断特性如图 1-5(a)所示。当原来处于正向导通的电力二极管在 t_F 时刻,外加电压突然从正向变为反向时,正向电流 I_F 开始下降,到 t_0 时刻,二极管电流降为零,此时 PN 结两侧存有大量的少子,器件并没有恢复反向阻断能力,直到 t_1 时 PN 结内储存的少子被抽尽时,反向电流达到最大值 I_{RP} 。在 t_1 时刻后,二极管开始恢复反向阻断,反向恢复电流迅速减小。外电路中电感产生的高感应电动势使器件承受很高的反向电压 U_{RP} 。当电流降到基本为零的 t_2 时刻(即反向电流降为 $10\% I_{RP}$ 的时刻),二极管两端的反向