

铁路职业教育铁道部规划教材

机车电力电子技术

JICHEDIANLIDIANZIJISHU

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

李瑞荣 主编

高职

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

(高职)

机车电力电子技术

李瑞荣 主 编
李瑛琦 主 审

中国铁道出版社

2008·北 京

内 容 简 介

本教材立足于培养应用型人才,以能力培养为目标,本着理论适度够用为止的原则,力求反映电力电子技术器件、电路、应用方面的新技术,注重实用电路及其应用的介绍。在文字叙述和配备图例方面上尽量结合目前职业学院学生的文化程度,力求通俗易懂,深入浅出。每一章内容后附有复习思考题,供读者进行学后自测。书末附录中提供有实验指导书供各学校在使用本教材时参考。

本书可作为高职铁道机车车辆(电力机车)专业、城市轨道交通车辆专业教材,也可供相关专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

机车电力电子技术/李瑞荣主编. —北京:中国铁道出版社,2008.1

铁路职业教育铁道部规划教材. 高职

ISBN 978-7-113-08572-8

I. 机… II. 李… III. ①机车-电力系统-高等学校:技术学校-教材②机车-电子设备-高等学校:技术学校-教材 IV. U270.38

书 名: 机车电力电子技术

作 者: 李瑞荣 主编

责任编辑: 赵 静

电话: 010-51873133

电子信箱: td73133@sina.com

封面设计: 陈东山

责任校对: 张玉华

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号 100054)

印 刷: 河北新华印刷二厂

版 次: 2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 12.25 字数: 304千

书 号: ISBN 978-7-113-08572-8/U·2174

定 价: 24.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话: 市电(010) 51873170 路电(021) 73170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010) 63549504 路电(021) 73187

前 言

本书为铁路职业教育铁道部规划教材,是根据铁路高职教育电力机车驾驶与检修专业教学计划“机车电力电子技术”课程教学大纲编写的。机车电力电子技术是高职铁道机车车辆(电力机车)专业的一门重要专业基础课。本教材立足于培养应用型技术人才,以能力培养为目标,本着理论适度够用为止的原则,力求反映电力电子技术器件、电路、应用方面的新技术,注重实用电路及其应用的介绍。

本教材由三大部分构成。第一部分包括第一章、第二章和第七章第一节,以电力电子器件为核心,介绍了功率二极管、晶闸管、GTR、GTO、功率 MOSFET、IGBT 等器件的工作原理、参数、驱动与保护,另外,对 IGCT、SITH 等新型器件也作了介绍;第二部分是各种电力电子电路,包括第三至第六章与第七章第二、三节,分别详细介绍可控整流、有源逆变、无源逆变、直流斩波、交流变换等典型电力电子应用电路的工作原理、简要计算和应用范围;第八章、第九章从应用的角度出发,介绍了可控整流、开关电源电路在国产电力机车上的实际应用。

本书在文字叙述和配备图例方面上力求通俗易懂,深入浅出,在每一章内容后附有复习思考题,供读者进行学后自测。

本书由广州铁路职业技术学院李瑞荣担任主编,李瑛琦主审。本书的第一章、第二章、第四章、第六章及第七章由李瑞荣编写,第三章及附录由西安铁路职业技术学院陈静编写,第五章由北京铁路电气化学校赵立恒编写,第八章由广州铁路职业技术学院钟耀军编写,第九章由郑州铁路职业技术学院金光编写。

本课程是一门实践性很强的课程,但考虑到各校的实验设备均不相同,本书附录中给出的实验指导书仅供各学校在使用本教材时参考,以配合本课程的教学。

本书可作为高职铁道机车车辆(电力机车)专业、城市轨道交通车辆专业教材,也可供相关专业的工程技术人员参考使用。

在编写过程中,参阅了许多同行专家的论著文献,在此一并真诚致谢。

由于编者的水平所限,书中难免存在缺点和谬误,诚恳欢迎读者提出宝贵意见。

编 者

2007 年 12 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 电力电子技术的应用	2
第三节 电力电子技术的发展趋势	3
第二章 电力电子器件	5
第一节 电力电子器件概述	5
第二节 电力二极管	7
第三节 晶闸管	11
第四节 门极可关断晶闸管(GTO)	20
第五节 电力晶体管(GTR)	23
第六节 电力场效应晶体管	27
第七节 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	29
第八节 新型电力电子器件简介	32
本章小结	37
复习思考题	38
第三章 相控整流电路	40
第一节 单相可控整流电路	40
第二节 三相可控整流电路	48
第三节 有源逆变电路	56
第四节 整流电路的功率因数	61
第五节 晶闸管直流电动机系统	64
本章小结	68
复习思考题	68
第四章 直流斩波电路	70
第一节 直流斩波电路的原理及控制方式	70
第二节 基本斩波电路	71
第三节 复合斩波电路	76
本章小结	79
复习思考题	80
第五章 交流调压电路和交交变频电路	81
第一节 单相交流调压电路	81
第二节 相控交交变频电路概述	84

第三节 单相相控交交变频电路	85
本章小结	87
复习思考题	88
第六章 无源逆变电路	89
第一节 无源逆变电路的工作原理	89
第二节 电压型逆变电路	92
第三节 电流型逆变电路	97
第四节 脉宽调制(PWM)控制电路	101
本章小结	106
复习思考题	106
第七章 电力电子器件的驱动与保护电路	107
第一节 晶闸管门极触发电路	107
第二节 典型全控型电力电子器件的驱动电路	118
第三节 电力电子器件的保护	120
本章小结	124
复习思考题	124
第八章 相控整流电路在电力机车上的应用	127
第一节 电力机车相控整流主电路	127
第二节 整流变压器参数的计算	153
第三节 晶闸管的串联与并联	156
第四节 电抗器参数的计算	160
本章小结	162
复习思考题	163
第九章 开关电源及其在电力机车上应用	165
第一节 开关电源的基本原理	165
第二节 单端反激型直流稳压电源	167
第三节 开关电源在电力机车上的应用(SS _{7E} 机车控制电源)	174
本章小结	178
复习思考题	179
附录 实验指导书	180
实验一 锯齿波同步移相触发电路实验	180
实验二 单相桥式半控整流电路实验	181
实验三 三相桥式全控整流及有源逆变电路实验	184
实验四 直流斩波电路原理实验	186
实验五 SCR、GTO、MOSFET、GTR、IGBT 特性实验	188
参考文献	190

第一章

绪论

第一节 概述

电子技术包括信息电子技术与电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术与数字电子技术都属于信息电子技术。电力电子技术是电力、电子、控制三大电气工程技术的综合应用技术,它利用电力电子器件组成各种电力变换电路,使来自工频电网或直流电网的电能最终变换成不同频率、性质和用途的电能,以适应不同的用电装置的需要。国际电气和电子工程师协会(IEEE)的电力电子学会曾对电力电子技术有如下的阐述:“有效地使用电力半导体器件,应用电路和设计理论及分析开发工具;实现对电能的高效能变换和控制的一门技术,它包括对电压、电流、频率和波形等方面的变换。”

电力电子技术的内容主要包括电力电子器件、电力电子变流技术和控制技术三个方面,它是在电气工程相关学科发展的基础上发展起来的。今后,随着科学技术的进步,它必将与现代控制理论、材料科学、微电子技术、计算机技术及电机工程等领域发生更加密切的关系。

电力电子器件是电力电子技术的基础,如果没有晶闸管、电力晶体管等电力电子器件,就没有电力电子技术。变流技术是电力技术的核心,电力电子技术的最终用途,是通过电力电子变流电路,实现电能的高效变换,驱动不同用途的负载。控制技术是实现变流功能的弱电控制手段,是电子技术、现代控制技术与电力技术的结合。

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转换,为多项高新技术的发展提供了有力的支持。因此,现代电力电子技术不但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。

电力电子技术的根本任务是实现电力变换。电力变换通常可分为四大类:

1. AC-DC 变换,即将交流电变换为直流电,一般称为整流。可由二极管整流器(不可控整流)或晶闸管整流器(可控整流)实现。
2. DC-AC 变换,一般称为逆变。是将直流电变换为交流电,根据其负载性质的不同,可分成有源逆变和无源逆变两种。
3. DC-DC 变换,指一种电压的直流变为另一种电压的直流,可用直流斩波器实现。
4. AC-AC 变换,即把交流电的参数(幅值、频率)加以转换,又称交流变换。

另外,利用高压、大电流电力电子器件可以组成无触点开关,可以实现电路在高频率条件

下的通断,而且具有无磨损、无噪声、寿命长、易控制的特点。

电力电子技术与微电子技术的整合将造成许多相关产业的革命,例如电动汽车、电力机车、磁悬浮列车、变频器、伺服驱动器、智能型 UPS、小型智能能源处理系统、太阳能智能房屋、电池储能系统、电子变压器、高压直流输电系统等等,这些新技术均与我们的日常生活息息相关,因此欧美等先进国家均视之为主要科技发展目标。

与电气工程领域的其他技术一样,社会广泛且大量的需求成为电力电子技术发展的牵引力,有力地拉动了电力电子技术的迅速成长;而现代科学与技术又为电力电子技术的发展提供了巨大的推动力,极大地促进了电力电子技术的迅速发展。目前,美国等发达国家均设有国家电力电子研究中心;我国也成立了相关的国家电力电子工程及研究中心,而且国内各著名大学均设有相关的专业方向。可以预料在今后的发展中,随着我国及世界经济的发展,电力电子技术必将在电气工程领域中占据越来越重要的地位。

第二节 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用领域十分广泛。它不仅用于一般工业生产,也广泛用于交通运输、电力系统、新能源系统等,以及用于通信系统、计算机系统和医疗设备的高品质供电。在照明、空调、楼宇等民用领域也有着广泛的使用。

1. 一般工业

电力电子装置广泛应用于电力拖动的交、直流调速系统上,如各种机床、轧钢机等。一些调速要求不高的设备,如大型风机、水泵、压缩机等,为了实现节能降耗,也使用了变频装置。电解、电镀等电化学工业都大量使用整流电源。

2. 交通运输

电气化铁道中广泛采用电力电子技术。直流传动电力机车采用整流或斩波装置,交流传动电力机车采用变频调速装置;部分城市电车也采用了斩波或变频装置,作为驱动电机的调速装置。一些大型舰艇的推进系统也采用了电力电子装置。

3. 电力系统

在一些发达国家,电能的 60% 要经过电力电子技术的处理。直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,直流输电不存在运行稳定性问题,适合于大功率远距离输电;直流输电每根导线传输的功率是交流输电的 1.5 倍;而送电端的整流站和受电端的逆变站都采用晶闸管变流装置。晶闸管控制电抗器、晶闸管投切电容器都是重要的无功补偿器,可以取代旋转式的同步补偿机。近年来出现的静止无功发生器、有源电力滤波器等新型电力电子装置具有更为优越的无功补偿和谐波抑制性能。

4. 新能源利用

电力电子装置还将用于太阳能发电及风力发电装置与电力系统的连接。在近期内风能是最有大规模开发利用前景的可再生能源,20 年来风力发电从实验研究迅速发展成为一项专门的技术,发电成本已接近常规能源发电的成本。这使风电及太阳能、生物质能和海洋能等可再生能源发电脱颖而出,形成一个新兴的产业。

5. UPS 与开关稳压电源

通信系统、自动控制系统、计算机等需要高精度直流源的系统,现在都广泛使用体积小、重量轻、效率高的高频开关电源,已经取代了旧式的线性电源。UPS 在这些系统中也被广泛

使用。

6. 工业以及医疗器械用激光、超声波机

以发射高频放射线为主要应用的激光、超声波机、断层扫描机广泛采用电力电子器件做高压电源。

7. 家用电器

变频空调、电子节能灯是家用电器应用电力电子技术的典型例子,在一些微波炉、洗衣机、电冰箱等家用电器中,也应用了电力电子技术。

第三节 电力电子技术的发展趋势

早期的电力电子器件主要追求高电压、大电流,也就是大功率器件,以适应大功率场合需要。今后的发展将主要在以下方面:

1. 由半控型器件向全控型器件转移

由于全控型器件组成装置后的综合性能明显优于半控型器件,同时,在全控型器件生产成本降低以后,由于组成装置的成本也会有很大降低,因此,无论在电性能方面,还是价格方面,都将显示出优势。这就迫使器件使用逐渐由半控型器件转向全控型器件。

2. 向高频快速方向发展

第一,有些用电设备要求变流装置输出高频,如快速压缩机、储能飞轮、机床主轴、研磨机等等的调速和高频感应加热以及超声波发生装置等,都需要高频输出,一般可达几兆至几十兆赫。这就要求开关频率大大提高。

第二,有些装置虽然要求输出频率不高,如变频调速装置等设备,但要求内部高频,一般内部调制频率可达几十千赫到几百千赫。装置内部高频有利于改善输出波形,降低电机的运行噪声,减小电机的脉动转矩和改善系统性能。这也要求器件具有较高的开关频率。

第三,可以大大缩小用电设备的体积和重量。

理论分析和实践经验表明,电气产品的变压器、电感和电容的体积重量与供电频率的平方根成反比。所以,当我们把频率从工频 50 Hz 提高到 20 kHz(提高 400 倍)时,用电设备的体积和重量大体下降至工频设计的 5%~10%,其主要材料可以节约 90%或更高,还可节电 30%或更多。由于电力电子器件工作频率上限的逐步提高,促使许多原来采用电子管的传统高频设备改用电力电子器件进行改造,取得显著节能、节水、节约材料的经济效益,更可体现技术含量的价值。

3. 大功率电力电子器件采用模块化封装

由于频率的不断提高,致使引线寄生电感、寄生电容的影响愈加严重,对器件造成更大的电应力(表现为过电压、过电流毛刺)。模块化的目的不仅在于使用方便,缩小整机体积,更重要的是取消传统连线,把寄生参数降到最小,从而把器件承受的电应力降至最低,提高系统的可靠性。另外,由于器件容量的限制和增加冗余、提高可靠性方面的考虑,大功率的开关电源一般采用多个独立的模块单元并联工作,采用均流技术,所有模块共同分担负载电流,一旦其中某个模块失效,其他模块再平均分担负载电流。这样,不但提高了功率容量,在有限的器件容量的情况下满足了大电流输出的要求,而且通过增加相对整个系统来说功率很小的冗余电源模块,极大地提高了系统可靠性,即使万一出现单模块故障,也不会影响系统的正常工作,而且为修复提供了充分的时间。

4. 采用数字化控制方式

先进的控制技术对改进变流电路的效率和性能是必不可少的关键技术之一。随着信息技术的发展,数字信号、数字电路显得越来越重要,数字信号处理技术日趋完善成熟,显示出越来越多的优点:便于计算机处理控制,控制精度高,避免模拟信号的畸变失真,减小杂散信号的干扰(提高抗干扰能力),便于软件包调试和遥感遥测遥调,也便于自诊断、容错等技术的植入。因此,用数字控制代替传统功率电子技术中的模拟控制是一个必然发展趋势。

5. 采用新型半导体材料制造新型功率器件

至今,硅材料功率器件已发展得相当成熟。为了进一步实现人们对理想功率器件特性的追求,越来越多的功率器件研究工作转向了对新型半导体材料制作新型功率器件的探求。研究表明,砷化镓 FET 和肖特基整流器可以获得十分优越的技术性能;SiC 功率器件非常接近于理想的功率器件, SiC 材料和功率器件的研究工作十分活跃,各种 SiC 器件的研究与开发,必将成为功率器件研究领域的主要潮流之一。

第二章

电力电子器件

现代的变流电路均由电力电子器件构成。从控制方式上来说,电力电子器件可分为不能自由控制开通和关断的不可控型电力电子器件;可由控制信号控制开通,但不能由控制信号控制关断的半控型电力电子器件;和可完全由控制信号控制开通和关断的全控型电力电子器件。本章主要介绍目前应用范围较广的典型电力电子器件,为后面的学习打下基础。

第一节 电力电子器件概述

一、电力电子器件的发展概况

电力电子技术的物理基础是电力电子器件。如果没有晶闸管、电力晶体管、电力场效应管等电力电子器件,也就没有电力电子技术。电力电子技术的发展历史可追溯到 19 世纪初,但革命性的发展,始自晶体管发明以后。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。半导体器件首先应用于小功率领域,如通信、信息处理的计算机,半导体固态电子学从此诞生。最先应用于电力变换领域的半导体器件则是硅二极管,它在 20 世纪 50 年代出现后,在大功率的电力变换领域,很快取代了汞弧整流器(引燃管),以硅二极管为代表的电力半导体器件及其相应的变流装置在世界范围内很快发展起来。1957 年美国通用电气公司研制出第一只可控型的电力电子器件——晶闸管(SCR),由于其优越的电气性能和控制性能,使之很快在电化学工业、钢铁工业(轧钢用电气传动、感应加热等)、电力工业(直流输电、无功补偿等)以及轨道交通(电传动机车、地铁列车等)等领域得到应用,开创了电力电子技术的新时代。半导体固态电子学此后就向两个方向发展,一支是以晶体管集成电路为核心,形成对信息处理的微电子技术;另一支是以晶闸管为核心,形成对电能变换与控制的电力电子技术。

晶闸管是一种半控型器件,通过对晶闸管门极的控制能够使其导通,但不能通过对门极的控制使其关断,属于第一代电力电子器件。至今晶闸管及其派生器件仍广泛应用于各种变流器,并且还在发展中。由于包括晶闸管在内的电力电子器件具有体积小、重量轻、功耗小、效率高、响应快等特点,用它构成的变流装置具有可靠性高、寿命长、容易维护等优点,特别是它可以节约能源,几十年来得到飞速发展。

由于晶闸管的关断通常依靠电网电压过零来实现,或者需添加复杂的辅助电路才能使晶闸管强制关断,这就使晶闸管的应用受到了局限。20 世纪 70 年代后期,在 SCR 基础上研制成功的可关断晶闸管(GTO)及在晶体管基础上研制成功的电力晶体管(GTR)及其模块相继进入实用化。这些通过对控制极控制既可使其开通又可使其关断的全控型电力电子器件自身具有可关断性能,且具有较高的开关速度,使其可用于开关频率较高的电路,在整流、逆变、斩

波、变频电路中得到广泛应用。尤其是采用 PWM 控制技术的变频调速装置,实现了对大功率交流电机的大范围无级调速控制,为电力电子技术的应用开辟了广阔的前景。

在 20 世纪 80 年代后期,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、MOS 控制晶闸管(MCT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)等全控型电力电子器件相继问世。它们的共同特点是由前述器件的电流型控制改变为电压型控制,集 MOSFET 的驱动功率低、开关速度快的优点和 GTO、GTR 通态压降小、载流能力大的优点于一身,性能十分优越,成为现代电力电子技术的主导器件。另一方面,又出现了一批多功能的控制模块,诸如各种 PWM(脉冲宽度调制)模块以及新型全控型器件模块(如 IGBT)的栅极驱动与保护模块等。

从 20 世纪 90 年代起,电力电子技术与微电子技术的进一步结合,使电力电子器件朝着大容量、智能化方向迅速发展,其代表是智能电力功率模块(IPM),如国产蓝箭列车的主变流器采用了单个容量为 4 500 V/1 500 A 的 IPM 模块。目前,在 GTO、IGBT 的基础上发展起来的新型大功率电力电子器件,如集成门极换流晶闸管(IGCT)、发射极关断晶闸管(ETO)、电子注入增强型门极晶体管(IEGT)等,容量普遍达到 4 500 V/3 000 A 的水平,有的已可达到 6 000 V/6 000 A。

二、电力电子器件的分类

1. 根据不同的开关特性,电力电子器件可分为如下三大类型:

(1) 不可控器件。这种器件通常为两端器件,它具有整流的作用而无可控的功能,如 PN 结整流管和肖特基势垒二极管等。

(2) 半控型器件。这种器件通常为三端器件,通过控制信号只能控制其开通而不能控制关断,半控型的称呼即由此而得。普通晶闸管(SCR)及其大部分派生器件如快速晶闸管、双向晶闸管、逆导型晶闸管、光控晶闸管均属这一类。

(3) 全控型器件。这种器件也为三端器件。通过控制信号,既可以控制其开通,又可以控制其关断,故称之为全控型器件。目前,主要有可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)和各种三端场控器件,如约绝缘栅双极晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)等。

2. 根据器件体内电子和空穴两种载流子参与导电的情况,众多电力电子器件又可分为双极型、单极型和混合型三种类型。

(1) 凡由一种载流子参与导电的器件称为单极型器件,如功率 MOSFET、静电感应晶体管等。

(2) 凡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 PN 结整流管、普通晶闸管、电力晶体管等。

(3) 由单极型和双极型两种器件组成的复合型器件称为混合型器件,如绝缘栅双极晶体管(IGBT)和 MOS 控制晶闸管(MCT)等。

3. 根据控制信号的不同,电力电子器件还可以分为如下两种:

(1) 电流控制型电力电子器件

功率硅整流二极管是最简单的电力电子器件,它只包含一个 PN 结,是一种两端器件。电力晶体管和各类晶闸管则是两个、三个或更多 PN 结组成的电力电子器件。在这些器件体内,电子和空穴都参与导电,故有双极之称,以区别于只有一种载流子导电的场效应晶体管。为了控制这类器件的开通与关断,必须给器件体内注入电流或从体内抽出电流才能实现,为此又有电流控制型器件的称谓。

应用比较广泛的电流控制型器件可分为两大类:一类是晶体管类,如电力晶体管及其模块等,这类器件适应于 500 kW 以下、380 V 交流供电的领域;另一类是晶闸管类,如普通晶闸管、可关断晶闸管等,这类器件适用于电压更高、电流更大的应用领域。

电流控制型器件的共同特点是:①在器件体内有电子和空穴两种载流子导电。由导通转向阻断时,两种载流子在复合过程中产生热量,使器件结温升高。过高的结温限制了工作频率的提高,因此电流控制型器件比电压控制型器件的工作频率要低。②电流控制型器件具有电导调制效应,使其导通压降很低,导通损耗较小,这一点优于只有一种载流子导电的电压控制型器件。③电流控制型器件的控制极输入阻抗低,控制电流和控制功率较大,电路也比较复杂。

(2) 电压控制型电力电子器件

电压控制型器件泛指一切用场控原理进行控制的电力电子器件,因此,电压控制型器件也称为场效应电力电子器件。

所谓场控的含义是这样的:器件内主电极(漏极、源极或阳极、阴极)传导的工作电流是通过加在第三极(栅极或门极)上的电压在主电极间产生可控电场来改变其大小和通断状态的。因为加在第三极上是电压信号。所以称为电压控制型器件;又因为主电极间产生的电场控制工作电流,所以也称为场控器件或场效应器件。

根据可控电场存在的环境,可将场控电力电子器件分成两大类:一类是结型场效应器件,如静电感应晶体管、静电感应晶闸管(SITH)等,这类器件多为常开型器件,目前多用于高频感应加热系统;另一类是绝缘栅场效应器件,如绝缘栅双极晶体管、功率 MOSFET 以及 MOS 控制晶闸管等,其中功率 MOSFET 多用在小于 10 kW 的高频设备中,IGBT 有取代 GTR 之势,用于 GTR 所用的一切领域。MOS 控制晶闸管则是集高电压、大电流和高频化于一体的电压控制型器件,是未来与 SCR、GTO 相竞争的新型器件。

应该指出,所有电压控制型器件都是用场控原理对其通断状态进行控制的,但是它们不一定是单极型器件,其中静电感应晶体管和功率 MOSFET 只有一种载流子导电,属单极型器件;静电感应晶闸管具有电导调制效应,属双极型器件;IGBT 和 MOS 控制晶闸管则属于混合型器件。

电压控制型器件的共同特点是:①作为电压控制型器件,因为输入信号是加在门极的反偏结或是绝缘介质上的电压,输入阻抗很高,所以控制功率小,控制电路比较简单。②对于单极型器件来说,因为只有一种载流子导电,没有少数载流子的注入和存储,开关过程中不存在像双极型器件中的两种载流子的复合问题,因而工作频率很高,可达几百千赫,甚至更高。对于混合型器件来说,工作频率也远高于双极型器件,比如 IGBT 的工作频率可达 20 kHz 以上。由此可知,工作频率高是电压控制型器件的另一共同特点。③电压控制型器件的工作温度高,抗辐射能力也强。因此,这类器件的发展前景十分诱人。

第二节 电力二极管

电力二极管(Power Diode)是最早获得应用的电力电子器件。虽然是不可控器件,但其结构和原理简单,工作可靠,目前仍广泛应用于从交流到直流的不可控整流电路,以及在斩波器、逆变器中用作反馈、续流电路。

一、电力二极管的工作原理

制造电力二极管的基本材料是硅半导体,它是单个 PN 结的结构,一般用扩散工艺制造。

电力二极管实际上是由一个面积较大的 PN 结和两端引线及封装组成,它的外形、结构和电气符号见图 2-1。图中,A 极又称为阳极,K 极又称为阴极。电力二极管主要有螺栓型和平板型两种封装方式。

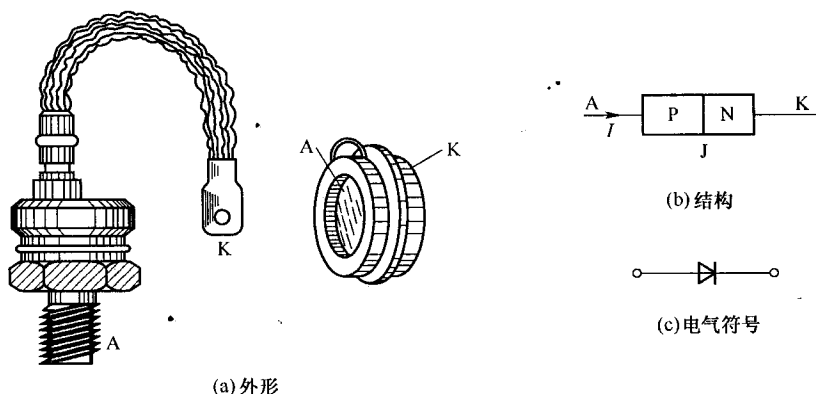


图 2-1 电力二极管的外形、结构和电气符号

PN 结具有单向导电性。当电力二极管外加正向电压,即阳极(A 极)加正电压、阴极(K 极)加负电压时,PN 结处于正向偏置状态,此时有从 P 向 N 的正向电流流过,PN 结呈现为低电阻,这种状态被称为正向导通状态,此时电力二极管两端只有 1 V 左右的电压降。当电力二极管外加反向电压,即阳极加负电压,阴极加正电压时,PN 结处于反向偏置状态,PN 结呈现为高电阻,这种状态被称为反向截止状态,此时只有极小的反向漏电流流过 PN 结。

PN 结具有一定的反向耐压能力,但当施加的反向电压过大,PN 结反向截止的状态被破坏,反向电流将会急剧增大,发生反向击穿。反向击穿发生时,若外电路采取了保护措施,将反向电流限制在一定的范围内,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,使得反向电流发热超过 PN 结容许的耗散功率,就会因热量散发不出去而导致 PN 结温度上升,直至过热而被烧毁,这种情况称为热击穿。

电力二极管一般都工作在大电流、高电压的场合。因此二极管本身耗散功率大、发热多,使用时必须配备合适的散热器,并采用合适的冷却措施,以使器件的温度不超过规定值,确保器件安全运行。

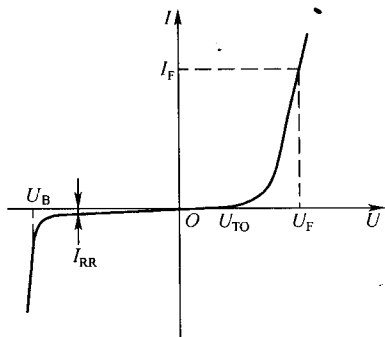


图 2-2 电力二极管的伏安特性

二、电力二极管的特性与参数

1. 电力二极管的伏安特性

电力二极管的伏安特性如图 2-2 所示。当外加电压大于门槛电压 U_{TO} 时,正向电流开始明显增加,进入稳定导通状态。图中 I_F 为二极管的正向电流,与之对应的二极管两端的正向压降 U_F 即为二极管的正向电压降。稳定导通时,电力二极管的管压降一般为 1 V 左右,并且,这个值基本上不随电流大小变化,在应用计算时,可以认为它是一个固定值。

当电力二极管承受反向电压时,只有很小的反向漏电流 I_{RR} 流过,器件处于反向截止状态。但当反向电压增大到 U_B 时,PN 结内产生雪崩击穿,反向电流急剧增大。

2. 电力二极管的开关特性

电力二极管的开关特性指电力二极管在零偏置、正向偏置和反向偏置这三种工作状态转换时呈现的动态特性。

(1) 关断特性

关断特性指电力二极管由正向偏置的通态转换为反向偏置的断态过程中电压、电流随时间变化的关系,其波形如图 2-3(a)所示。

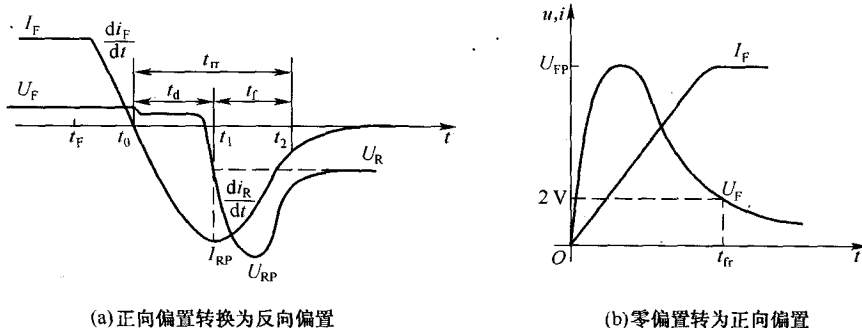


图 2-3 电力二极管的开关过程

当原来处于正向导通的电力二极管外加电压在 t_F 时刻突然从正向变为反向时,在此反向电压作用下,正向电流 I_F 开始下降,下降速率由反向电压的大小和电路中的电感决定,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数载流子(少子),器件并没有恢复反向阻断能力,这些少子在反向电压作用下被抽出电力二极管,形成较大的反向电流,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} 。 t_1 时刻后二极管开始恢复反向阻断,反向恢复电流迅速下降,在外电路电感的作用下会在器件两端产生比外加反向电压大得多的反向过冲电压 U_{RP} 。当电流降到基本为零的 t_2 时刻,二极管两端的反向电压才降到等于外加电压的 U_R ,电力二极管完全恢复反向阻断能力。

图 2-3 中,时间 $t_d = t_1 - t_0$ 称为延迟时间, $t_f = t_2 - t_1$ 称为电流下降时间,而 $t_{rr} = t_d + t_f$ 称为电力二极管的反向恢复时间。

(2) 开通特性

开通特性为电力二极管由零偏置转换为正向偏置的通态过程的电压、电流随时间变化的关系,其波形如图 2-3(b)所示。开通过程中电力二极管两端也会出现一个过冲电压 U_{FP} 。经过一段时间才接近稳态压降值。这个过程的时间 t_{tr} 称为正向开通时间。

3. 电力二极管的主要参数

(1) 额定正向平均电流 $I_{F(AV)}$

器件长期运行时,在规定的管壳温度和散热条件下允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值定义为额定正向平均电流,用 $I_{F(AV)}$ 表示。正向平均电流是按照电流的发热效应来定义的,应用中应按照流过电力二极管实际波形电流与工频正弦半波平均电流的热效应相等(即有效值相等)的原则,来选取电力二极管的电流定额,并应留有一定的裕量。通过对正弦半波电流的换算可知,正向平均电流 $I_{F(AV)}$ 对应的有效值为 $1.57 I_{F(AV)}$ (注:电力二极管与晶闸管的电流定额换算方法相同,具体见本章第三节)。

(2) 正向压降 U_F

正向压降指器件在指定温度下,流过某一指定的稳态正向电流时对应的管子两端正向压降(习惯称为管压降)。有时候,其参数表中也给出在指定温度下流过某一瞬态正向大电流时

电力二极管的最大瞬时正向压降。

(3) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

反向重复峰值电压指对器件能重复施加的反向最高峰值电压。此电压通常为其雪崩击穿电压 U_B 的 $2/3$ 。

(4) 反向漏电流 I_{RR}

反向漏电流指器件对应于反向重复峰值电压时流过器件的反向电流。

(5) 最高工作结温 T_{JM}

最高工作结温指在 PN 结不至于损坏的前提下所能承受的最高平均温度,用 T_{JM} 表示。 T_{JM} 通常在 $125 \sim 175^\circ\text{C}$ 范围内。

(6) 浪涌电流 I_{FSM}

浪涌电流指器件所能承受的最大一个或连续几个工频周期的过电流。

4. 电力二极管的主要类型

电力二极管在许多电力电子电路中有着广泛的应用。电力二极管可在整流电路中做整流元件,可在感性负载电路中做续流元件,还可在各种变流电路中做电压隔离、箝位或保护元件。下面按照电力二极管的正向压降、反向耐压、反向电流、反向恢复特性的不同,介绍几种常用的电力二极管。

(1) 普通二极管

普通二极管又称整流管(Rectifier Diode),多用于开关频率在 1 kHz 以下的整流电路中。其反向恢复时间较长,一般在 $5\text{ }\mu\text{s}$ 以上。正向电流定额和反向电压定额可以达到很高,分别可达数千安和数千伏以上。

(2) 快恢复二极管

恢复过程很短,特别是反向恢复过程很短(反向恢复时间在 $5\text{ }\mu\text{s}$ 以下)的二极管称为快恢复二极管(Fast Recovery Diode,简称 FRD),简称快速二极管。快恢复二极管从性能上可分为快速恢复和超快速恢复二极管。前者反向恢复时间为数百纳秒或以上,后者则在 100 ns 以下,甚至达 $20 \sim 30\text{ ns}$,多用于高频整流和逆变电路中。

(3) 肖特基二极管

以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管称为肖特基二极管。肖特基二极管的优点在于其反向恢复时间很短,为 $10 \sim 40\text{ ns}$,正向恢复过程中不会有明显的电压过冲,正向压降也很小,但当其反向耐压提高时正向压降会提高而不能满足要求,因此多用于 200 V 以下低压场合,另外,其反向漏电流较大且对温度敏感,必须严格限制其工作温度。

表 1-1 列出了常见电力二极管的主要性能参数。

表 2-1 部分电力二极管主要性能参数

型 号	额定正向平均 电流 I_F/A	反向重复峰值 电压 U_{RRM}/V	反向电流 I_R	正向平均电 压 U_F/V	反向恢复时间 t_{rr}	备注
ZP1~ZP4000	1~4 000	50~5 000	1~40 mA	0.4~1		
ZK3~ZK2000	3~2 000	100~400	1~40 mA	0.4~1	$<10\text{ }\mu\text{s}$	
10DF4	1	400		1.2	$<100\text{ ns}$	
31DF2	3	200		0.98	$<35\text{ ns}$	
30BF80	3	800		1.7	$<100\text{ ns}$	
50WF40F	5.5	400		1.1	$<40\text{ ns}$	

续上表

型 号	额定正向平均 电流 I_F /A	反向重复峰值 电压 U_{RRM} /V	反向电流 I_R	正向平均电 压 U_F /V	反向恢复时间 t_{rr}	备注
10CTF30	10	300		1.25	<45 ns	
25JPF40	25	400		1.25	<60 ns	
HFA90NH40	90	400		1.3	<140 ns	模块结构
HFA180MD60D	180	600		1.5	<140 ns	模块结构
HFA75MC40C	75	400		1.3	<100 ns	模块结构
MR876 快恢复功率二 极管(美国 MOROROLA 公司)	50	600	$50\ \mu\text{A}$	1.4	<400 ns	
MUR10020CT 超快 恢复功率二极管(美国 MOROROLA 公司)	50	200	$25\ \mu\text{A}$	1.1	<50 ns	
MBR30045CT 肖特 基功率二极管(美国 MOROROLA 公司)	150(单支)	45	$0.8\ \text{mA}$	0.78	≈ 0	

第三节 晶 闸 管

晶闸管(Thyristor)是硅晶体闸流管的简称,俗称可控硅(SCR)。它是一种开通时刻可以控制的半控型电力电子器件,它所能承受的电压和电流容量是目前电力电子器件中最高的(目前可达 $4\ 500\ \text{A}/6\ 500\ \text{V}$ 的水平)。从 1957 年诞生以来到现在,晶闸管一直广泛应用于各种低频大功率的电力变流装置上。

晶闸管有多种派生类型,但由于普通晶闸管历史最长,应用最广,晶闸管一词通常专指普通晶闸管。

一、晶闸管的结构与工作原理

晶闸管是一种大功率 PNP 四层半导体元件,其外形和电气符号如图 2-4 所示。从外形

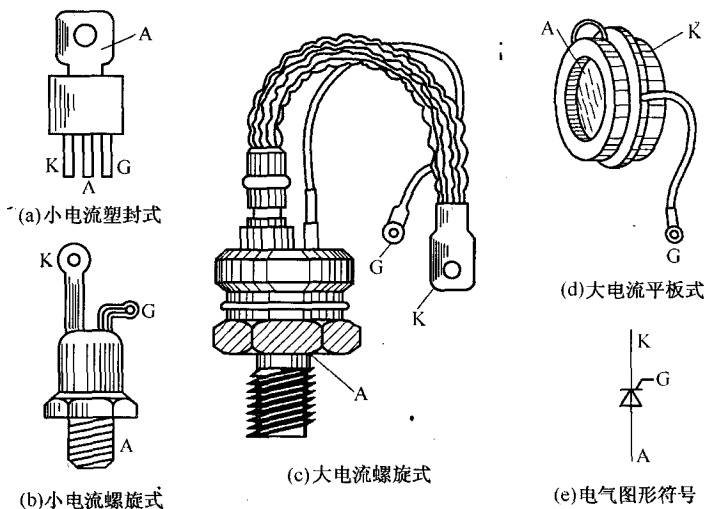


图 2-4. 晶闸管的外形和电气图形符号