



21 世纪教改系列教材

D I A N L I D I A N Z I J I S H U

电力电子技术

第 2 版

郭世明 主编



西南交通大学出版社

[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪高等院校系列教材

电力电子技术

第2版

王兆安 主编

机械工业出版社

21 世纪教改系列教材

电力电子技术

(第二版)

郭世明 主编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书主要论述电力电子技术的基础理论、应用技术以及电力变换电路的结构、参数计算和分析方法。内容包括：电力电子器件、相控整流电路、有源逆变电路与 PWM 整流电路、直直变换器、交流调压电路和相控交—交变频电路、无源逆变电路、电力电子器件的门（栅）极控制电路、电力变换电路参数的计算和设计。全书的内容结构科学合理，适合教学，重点介绍了电力电子器件和电力电子电路的基本工作原理、电路结构、电气性能和参数计算，并适当体现了电力电子技术的最新发展和应用。

本书可作为电气工程及其自动化专业、自动化专业以及其他相关电类专业本科生的教材，对于成人教育、高职高专、职工培训，如开设电力电子技术课程，也可选用作为教材，本书也可供电类工程技术人员及研究生阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

电力电子技术 / 郭世明主编. —2 版. —成都：西南交通大学出版社，2008.6

（21 世纪教改系列教材）

ISBN 978-7-81104-858-2

I. 电… II. 郭… 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（2008）第 075420 号

21 世纪教改系列教材

电 力 电 子 技 术

（第二版）

郭世明 主编

*

责任编辑 张华敏

特邀编辑 高青松 李科亮

封面设计 跨克创意

西南交通大学出版社出版发行

（成都二环路北一段 111 号 邮政编码：610031 发行部电话：028-87600564）

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸：185 mm×260 mm 印张：17.375

字数：432 千字 印数：13 001—20 000 册

2002 年 8 月第 1 版

2008 年 6 月第 2 版 2008 年 6 月第 6 次印刷

ISBN 978-7-81104-858-2

定价：28.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

第二版前言

随着电力电子技术的应用范围不断扩大,电力电子技术已从一门专业技术逐渐变为一门基础性技术,它和信息电子技术一起,成为国民经济的重要支撑性技术。电力电子技术的迅猛发展,给电力工业、制造工业、交通运输、信息产业乃至家电产业带来了深刻的变化,并且越来越对人们的日常生活产生巨大的影响。电力电子技术作为 21 世纪解决能源危机的必备技术之一而备受重视。因此,对于高等院校电气工程及其自动化、自动化和相关专业的大学生来说,必须要求了解和掌握电力电子器件及变换器的工作原理,并且要求具有设计新型变换器的能力。为此,我们本着教材必须适应电力电子技术发展的原则,对教材的内容进行了更新和改进。

本书是在新世纪教改系列教材《电力电子技术》(郭世明主编,西南交通大学出版社,2002 年)的基础上,进行了大幅度修订后完成的第二版。由于电力电子技术发展十分迅速,第一版教材已显陈旧,第二版教材删除了第一版中陈旧的内容,增加了自关断器件、直流直流变换电路和 PWM 整流电路等新内容。本次修订在保持原书循序渐进、适于教学等优点的同时,对教材的体系结构和内容进行了大幅度的更新。其中,将原书第 8 章“开关电源”的内容合并到第 5 章,其他章节的内容全部重新进行了组织和编写。

本书着重介绍了电力电子器件的特性及参数、各种电力变换电路的基本工作原理、电路结构、电气性能、波形分析方法和参数计算等。通过本课程的学习,使学生理解并掌握电力电子学领域的相关基础知识,培养其分析问题、解决问题的能力,了解电力电子学科领域的发展方向。

本书由西南交通大学郭世明教授主编。具体编写工作分工如下:第 1 章、第 5 章、第 8 章、第 9 章由郭世明编写;第 2 章由沈霞编写;第 3 章由王光宇编写;第 4 章、第 6 章由吴松荣编写;第 7 章由郭小舟编写。全书由郭世明统稿。

在本书编写的过程中,编者参考和引用了部分国内外同行的资料和文献,在此不一一详述,谨向这些资料和文献的作者表示衷心的感谢!

由于编者水平所限,本书中错误及不妥之处在所难免,敬请广大同行和读者给予宝贵意见,使我们将来编写的教材更加完善。

编者

2008 年 5 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 电力电子技术概述	1
1.2 电力电子技术的发展轨迹	1
1.3 电力电子技术的应用	2
1.4 电力电子技术应用的新领域	3
1.5 电力电子技术的发展趋势	5
1.6 学习电力电子技术课程的基本要求	6
第 2 章 电力电子器件的原理与特性	7
2.1 概 述	7
2.2 功率二极管	9
2.3 晶闸管 (SCR)	12
2.4 门极可关断晶闸管 (GTO)	24
2.5 电力场效应晶体管 (电力 MOSFET)	29
2.6 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	35
2.7 集成门极换向晶闸管 (IGCT)	40
2.8 其他电力电子器件简介	43
习 题	44
第 3 章 相控整流电路	45
3.1 概 述	45
3.2 单相半波可控整流电路	46
3.3 单相桥式全控整流电路	53
3.4 单相桥式半控整流电路	60
3.5 三相半波可控整流电路	65
3.6 三相桥式全控整流电路	72
3.7 三相桥式半控整流电路	79
3.8 整流变压器漏抗对整流电路的影响	82
3.9 整流电路的谐波和功率因数	86
习 题	91
第 4 章 有源逆变电路与 PWM 整流电路	93
4.1 有源逆变电路	93
4.2 有源逆变的应用	102
4.3 晶闸管直流电动机系统	106

4.4 PWM 整流器	110
习题	120
第 5 章 直直变换器	121
5.1 概 述	121
5.2 非隔离型直直变换器	122
5.3 隔离型直直变换器	137
5.4 直流斩波器	153
习题	163
第 6 章 交流调压电路和相控交—交变频电路	165
6.1 单相交流调压电路	165
6.2 三相交流调压电路	169
6.3 相控交—交变频电路概述	172
6.4 单相相控交—交变频电路	175
6.5 三相相控交—交变频电路	177
习题	178
第 7 章 无源逆变电路	179
7.1 概 述	179
7.2 单相电压型逆变电路	182
7.3 三相电压型逆变电路	187
7.4 电流型逆变电路	191
7.5 逆变电路的多重化和三电平逆变电路	196
7.6 脉冲宽度调制 (PWM 控制)	201
7.7 电压型脉宽调制逆变电路的控制	208
7.8 其他脉宽调制方法	217
习题	222
第 8 章 电力电子器件的门(栅)极控制电路	224
8.1 晶闸管的门极触发电路	224
8.2 可关断晶闸管 (GTO) 的门控电路	234
8.3 GTR 的基极驱动电路	237
8.4 电力 MOSFET 的栅极驱动电路	240
8.5 IGBT 的栅控电路	243
习题	250
第 9 章 电力变换电路参数的计算与设计	251
9.1 相控整流器主电路参数的计算与设计	251
9.2 直直变换器主电路参数的计算与设计	263
9.3 无源逆变器主电路参数的计算与设计	268
参考文献	271

第1章 绪 论

1.1 电力电子技术概述

电力电子技术是一种应用半导体器件进行电能变换的技术,是一种通过半导体器件把“粗电”加工成“精电”的技术。

电力电子技术是弱电和强电之间的接口,是弱电控制强电的技术,它与电气技术、电子技术、控制技术、控制理论等学科有着密切的联系。

不同负载对电源有着不同的要求,而从电网获得的交流电和从蓄电池获得的直流电往往不能满足实际要求,这就需要电能的变换。电能变换的类型可分为:交流变直流、直流变交流、直流变直流和交流变交流。交流变直流称为整流。直流变交流称为逆变。直流变直流是指将一种直流电压变为另一种直流电压,可用直流斩波电路实现。交流变交流可以是电压的变换,称为交流电压控制,也可以是频率或相数的变换。

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。在当今21世纪,电力电子技术仍将以迅猛的速度发展。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。

1.2 电力电子技术的发展轨迹

自20世纪50年代末开始,在应用需求的推动下,电力电子技术沿着“整流器→逆变器→变频器”的轨迹成功地发展起来。

1. 整流器时代

大功率的工业用电是靠工频交流发电机提供的,但是,大约20%的电能是以直流形式消耗的,其中最典型的是电解(铜、铝、镍等有色金属和氯、碱等化工原料都离不开大功率直流电解)、电力牵引(电力机车、电传动的内燃机车、地铁机车、城市无轨电车等)和直流传动(轧钢、造纸、铝材轧制等)三大领域。因此,能高效率地把工频交流电转换为直流电的大功率整流器应运而生,20世纪60年代~70年代,大功率硅整流管和硅晶闸管的开发得到广泛应用。

2. 逆变器时代

20世纪70年代出现了世界范围内的“能源危机”。交流电机变频调速具有显著节能效果,其中关键的技术在于“交一直一交”变换中的“直一交”变换,即把直流电逆变为0~100 Hz左右的交流电。于是,20世纪70年代~80年代,能胜任这种情况的大功率逆变用晶闸管、电力晶体管(GTR)和可关断晶闸管(GTO)得到大力发展和应用。类似的应用还有高压直流输电(HVDC),静止式无功功率动态补偿等。于是,电力电子技术既可完成整流,又可实

现逆变。但是，它们的工作领域还是局限于较低的频率。

3. 变频器时代

20 世纪 80 年代，大规模、超大规模集成电路（VLSI）得到突飞猛进的发展，这为电力电子器件的生产提供了很好的借鉴，将大规模、超大规模集成电路生产中的成熟的微细加工技术和高电压大电流的设计制造方法有机地结合起来，促使 20 世纪 80 年代后期和 20 世纪 90 年代初期生产出一批功率场控器件，其中，尤以绝缘栅双极型晶体管（IGBT）和电力场效应晶体管（Power MOSFET）为代表的电力 MOSFET 系列器件得到急速发展。这一代器件的发展不仅为交流电机的调速提供了较高的频率，使其性能更加完善可靠，而且开拓了使电力电子技术向高频化进军的发展方向。用电设备的高频化和高频设备的固态化，引来了高效、节能、节材的效果，并为实现电气设备的小型轻量化、机电一体化和智能化提供了重要的技术基础。

当前，作为电气设备节能、节材、自动化、智能化、机电一体化的基础，电力电子技术正在实现：硬件结构的模块化、控制系统的数字化、产品性能的绿色化。新一代电力电子产品的技术含量将大大提高，使以此为基础的电气设备更加可靠、成熟、经济、实用。

1.3 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。它不仅用于一般工业，也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等，在照明、空调等家用电器及其他领域中也有广泛的应用。

① 直流传动。由于直流电动机具有良好的调速性能，因此，电力电子技术在工业电气传动系统及牵引调速系统中得到了广泛应用。

② 交流传动。近年来，由于电力电子变频技术的迅速发展，使得交流调速性能可与直流电动机相媲美，交流调速技术被大量应用并占据主导地位。大至数千千瓦的各种轧钢机，小到几百瓦的数控机床的伺服电动机，均采用交流调速技术。

③ 电解、电镀等电化学工业用直流电源。

④ 冶金工业中广泛应用的中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源。

⑤ 高压直流输电。直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势，其送电端的整流阀和受电端的逆变阀都采用晶闸管变流装置。

⑥ 电力系统中的无功补偿和谐波抑制。过去的无功补偿装置主要有晶闸管控制电抗器和晶闸管投切电容器等。近年来出现的静止无功发生器和有源电力滤波器等，具有更为优越的无功功率和谐波补偿的性能。

⑦ 电子装置用电源。各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电，现在这种电源已采用高频开关电源。

⑧ 家用电器。照明领域的“节能灯”和变频空调器等是家用电器中应用电力电子技术的典型例子。

1.4 电力电子技术应用的新领域

电力电子技术的发展,反过来又促进了一系列新应用领域的不断开拓。

1. 风力发电机的变速恒频励磁

风力发电机的有效功率与风速的二次方成正比。风车捕捉最大风能的转速随风速而变化。为了获得最大有效功率,可使机组变速运行,通过调整转子励磁电流的频率,使其与转子转速叠加后保持定子频率,即输出频率恒定。此项应用的技术核心是变频电源。

2. 太阳能发电控制系统

开发利用无穷尽的洁净新能源——太阳能,是调整未来能源结构的一项重要战略措施。大功率太阳能发电,无论是独立系统还是并网系统,通常需要将太阳能电池阵列发出的直流电转换为交流电,所以,具有最大功率跟踪功能的逆变器成为这类系统的核心。例如,日本实施的阳光计划以 3 kW~4 kW 的户用并网发电系统为主,我国实施的送电到乡工程则以 10 kW~15 kW 的独立系统居多,而大型系统有美国加州的西门子太阳能发电厂 (7.2 MW) 等。

3. 柔性交流输电技术 (FACTS)

柔性的交流输电技术是 20 世纪 80 年代后期出现的新技术,近年来发展迅速。柔性交流输电技术是电力电子技术与现代控制技术的结合,以实现电力系统电压、参数(如线路阻抗)、相位角、功率潮流的连续调节控制,从而大幅度提高输电线路的输送能力和电力系统的稳定水平,降低输电损耗。传统的调节电力潮流的措施,如机械控制的移相器、带负荷调变压器抽头、开关投切电容和电感、固定串联补偿装置等,只能实现部分稳态潮流的调节功能,而且,由于机械开关的动作时间长、响应慢,无法适应在暂态过程中快速柔性地连续调节电力潮流、阻尼系统振荡的要求。因此,电网发展的需求促进了柔性交流输电这项新技术的发展和应用。到目前为止,FACTS 控制器已有数十种,按其安装位置可分为发电型、输电线型和供电型三大类,但共同的功能都是通过快速、精确、有效地控制电力系统中一个或几个变量(如电压、功率、阻抗、短路电流、励磁电流等),从而增强交流输电或电网的运行性能。已应用的 FACTS 控制器有静止无功补偿器(SVC)、静止调相器(STATCON)、静止快速励磁器(PSS)、串联补偿器(SSSC)等。近年来,柔性交流输电技术已经在美国、日本、瑞典、巴西等国家的重要的超高压输电工程中得到应用。我国也对 FACTS 进行了深入的研究和开发,每年都有数篇论文发表,但是具有自主知识产权的 FACTS 设备目前只有清华大学和河南省电力公司联合研发的 ± 20 Mvar 新型静止无功发生器(ASVG)。

4. 定质电力技术

定质电力(Custom Power)技术是应用现代电力电子技术和现代控制技术,为实现电能质量控制、为用户提供特定要求的电力供应的技术。

现代工业的发展对提高供电的可靠性、改善电能质量提出了越来越高的要求。在现代企业中,由于变频调速驱动器、机器人、自动生产线、精密的加工工具、可编程控制器、计算机信息系统的日益广泛使用,对电能质量的控制提出了日益严格的要求。这些设备对电源的波动和各种干扰十分敏感,任何供电质量的恶化可能会造成产品质量的下降,产生重大损失。

重要用户为保证优质的不间断供电,往往自己采取措施,如安装不间断电源(UPS),但这并不是经济合理的解决办法,根本的出路在于供电部门能够根据用户的需要,提供可靠和优质的电能供应。因此,便产生了以电力电子技术和现代控制技术为基础的定质电力技术(Custom Power Technology)。

为提高配电网无功调节的质量,已开发出用于配电网的静止无功发生器(D-STATCOM),它由储能电路、变换电路和变压器组成,它的功能是快速调节电压、发生和吸收电网的无功功率,同时可以抑制电压闪变,这是“定质电力”的关键设备之一。此外,静止无功发生器和固态开关配合,可在电网发生故障的暂态过程中保持电压恒定。“定质电力”的另一关键设备是动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer),它由直流储能电路、变换器和次级串联在供电线路中的变压器构成,其中变换器根据检测到的线路电压的波形情况产生补偿电压,使合成的电压保持动态恒定,即无论是短时的电压降低还是过电压,通过DVR可以使负载上的电压保持动态恒定。

5. 同步开断技术

同步开断(Synchronized Switching)是指在电压或电流的指定相位完成电路的断开或闭合。在理论上,应用同步开断技术可以完全避免电力系统的操作过电压,这样,由操作过电压决定的电力设备绝缘水平可大幅度降低,由于操作引起设备(包括断路器本身)的损坏也可大大减少。

目前,高压开关属于机械开关,开断的时间长、分散性大,难以实现准确的定相开断。而同步开断设备是应用一套复杂的电子控制装置,实时测量各种影响开断时间分散性的参量变化,对开断时刻的提前量进行修正。然而,即便是采取了这种代价昂贵的措施,由于机械开关特性决定,还不能做到准确的定相开断,设计人员还不敢贸然降低电气设备的绝缘水平,以免同步开断失败造成设备损毁。因此,同步开断的优势目前还没有发挥出来。

实现同步开断的根本出路在于用电子开关取代机械开关。美国西屋公司已制造出13 kV/600 A、由GTO元件组成的固态开关,安装在新泽西州的变电站中使用。GTO开断时间可缩短到1/3 ms,这是一般机械开关无法比拟的。现在,由固态开关构成的电容器组的配电系统“软开关”已问世。

6. 全固态化交流电源

全固态化交流电源是一种工业上需要的变频电源。在20世纪80年代末,我国约有20万台60 kW~200 kW的高频设备,而现在,晶闸管中频感应加热装置已完全取代了中频发电机,在我国已形成了200 Hz~8 000 Hz、功率为100 kW~3 000 kW的系列产品。在高频电源方面,采用电力MOSFET制造出的1 000 kW/15~600 kHz(比利时)的感应加热装置,采用SIT(静电感应晶闸管)制造出的1 000 kW/200 kHz和400 kW/400 kHz(日本)的感应加热装置,效率都在90%以上。我国已研制出75 kW/200 kHz的SIT感应加热装置。采用全固态高频感应加热装置可大大节能。

7. 电力有源滤波器

传统的交流/直流(AC/DC)变换器在投入运行时,将向电网注入大量的谐波电流,引起谐波损耗和干扰,同时还可能出现装置网侧功率因数恶化的现象,即所谓“电力公害”。例如,不可控整流电路加电容滤波时,网侧三次谐波含量可达70%~80%,网侧功率因数仅有0.5~

0.6。为解决电力电子装置和其他谐波源的谐波污染问题,可以采用两种方式:一种是装设谐波补偿装置对谐波进行补偿,可以解决各种谐波源的谐波问题;二是对电力电子装置本身进行改造,使其不产生谐波,主要用于作为主要谐波源的电力电子装置。目前,谐波抑制的一个重要趋势是采用电力有源滤波器。电力有源滤波器是一种电力电子装置,其基本原理是从补偿对象中检测出谐波电流,由补偿装置产生一个与该谐波电流大小相等而极性相反的补偿电流,从而使电网电流只含基波分量。电力有源滤波器能对频率和幅值都变化的谐波进行补偿,且补偿特性不受电网阻抗的影响,目前已逐渐开始在国内使用。

8. 中压大容量变频器

中压是指等级为 2.3 kV~10 kV,中、大功率是指 300 kW 以上。有关中压容量的交流调速系统的研究与开发实践已有 20 多年了,目前逐步走上了实际应用阶段,尤其是高压全控型器件产生以来,中压变频器的应用趋势迅速加快了,其中应用较多的是采用 IGBT、IGCT 三电平中压变频器及级联式多电平中压变频器。当今,多电平中压变频器已成为交流调速研究的新领域。

1.5 电力电子技术的发展趋势

1. 高频化

理论分析和实践经验表明,电气产品的体积重量随其供电频率的平方根成反比地减小。所以,当我们把频率从工频 50 Hz 提高到 20 kHz,提高 400 倍的话,用电设备的体积大体上将降至工频设计的 5%~10%,这正是开关电源新技术得以实现功率变频而带来明显效益的基本原因。逆变或整流焊机也好,通讯电源用的开关式整流器也好,都是基于这一原理。那么,依同样原理对传统的电镀、电解、电加工、充电、浮充电、电力合闸等使用的各种直流电源类整机加以类似的改造,使之得以更新换代为“开关变换类”电源,其主要材料可以节约 90% 或更高,还可节电 30% 或更多。随着电力电子器件的工作上限频率逐步提高,将促使许多原来采用电子管的传统高频设备固态化,从而带来显著的节能、节水、节材的经济效益,更能体现电力电子技术的价值。

2. 模块化

模块化有两方面的含义,其一是指电力电子器件的模块化,其二是指电源单元的模块化。我们常见的电力电子器件模块,含有一单元、二单元…六单元直至七单元,包括开关器件和与之反并联的续流二极管,实质上都属于“标准”电力电子模块。近年来,有些制造商把开关器件的功率保护电路也安装到电力电子模块中去,构成了“智能化”的电力电子模块(IPM),这样一来缩小了电气装置整机的体积,方便了整机设计和制造。为了进一步提高系统的可靠性,有些制造商开发了“用户专用”电力电子模块(ASPM),他们把一台电气装置整机的几乎所有硬件都以芯片的形式安装到一个模块中,使元器件之间不再有传统的引线连接,这样的模块经过严格合理的热、电、机械方面的设计,达到了优化完美的境地,这类似于微电子中的用户专用集成电路(ASIC),只要把控制软件写入该模块中的微处理器芯片,再把整个模块固定在相应的型材散热器上,就构成了一台新型的开关电源装置。由此可知,模块化的目的不仅在于使用方便,缩小整机体积,更重要的是取消了传统连线,把寄生参数降到最小,从

而把电力电子器件承受的电应力降至最低,提高了系统的可靠性。另外,对于大功率开关电源,处于器件容量的限制和增加冗余、提高可靠性方面的考虑,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。

3. 数字化

在传统的电力电子技术中,控制部分是按模拟信号来设计和工作的。在 20 世纪六七十年代,电力电子技术完全是建立在模拟电路基础上的。如今,数字信号、数字电路显得越来越重要,数字信号处理技术日臻完善和成熟,显示出越来越多的优点,例如,便于计算机处理的控制,避免了模拟信号的传递畸变失真,减小了杂散信号的干扰(提高抗干扰能力),便于软件调试和遥感、遥测、遥控,也便于自诊断、容错等技术的值入。

4. 绿色化

“绿色化”来源于“没有污染”的意思,未受污染的食品被称为绿色食品,未被污染的环境被称为绿色环境。绿色照明、绿色电器则有两层意义:首先是显著节电,这意味着发电容量的节约,而发电是造成环境污染的重要原因,节电就可以减少对环境的污染;其次,电器还应满足不对(或少对)电网产生污染,国际电工委员会(IEC)对此制定了一系列标准,如 IEC555、IEC917、IEC1000 等。事实上,许多电力电子节电设备,往往会变成对电网的污染源,向电网注入严重的高次谐波电流,使总功率因数(包括基波位移无功功率,特别是谐波的畸变无功功率)下降,使电网电压耦合出许多毛刺尖峰,甚至出现缺角和畸变。20 世纪末,各种有源滤波器和有源补偿方案的诞生,有了多种修正功率因素的方法,这为 21 世纪批量生产各种绿色开关电源产品奠定了基础。

1.6 学习电力电子技术课程的基本要求

- ① 了解电力电子技术的应用领域和发展动态,以及电力电子技术与其他相关课程的关系。
- ② 了解与熟悉以 SCR 为代表的半控型器件和以 GTO 及 IGBT 为代表的全控型器件的工作原理、电气特性和主要参数。
- ③ 熟悉并掌握单相、三相整流电路的工作原理、电路结构、电气性能,并能进行初步设计。
- ④ 熟悉并掌握直直变换器、交流调压电路和相控交—交变频电路的工作原理、电路结构、电气性能,并能进行初步设计。
- ⑤ 熟悉并掌握有源逆变电路和无源逆变电路的工作原理、电路结构、电气性能,并能进行初步设计。
- ⑥ 了解主要电力电子器件(如 SCR、GTO、IGBT)的门(栅)极控制要求和门(栅)极驱动模块的基本性能。
- ⑦ 对整流电路、逆变电路、直直变换器电路等具有一定的科学实验能力。
- ⑧ 学习这门课程的时候,重在物理概念的理解,在掌握其概念和本质的前提下,学会分析、计算、实验和初步设计。

第2章 电力电子器件的原理与特性

2.1 概 述

2.1.1 电力电子器件的发展概况

自从20世纪50年代硅晶闸管问世以后,电力电子器件的研究者经过不懈的努力,取得了令世人瞩目的成就。60年代后期,可关断晶闸管GTO实现了门极可关断功能,并使斩波工作频率扩展到1 kHz以上。70年代中期,电力晶体管和电力MOSFET问世,使电力电子器件实现了场控功能,开始应用于高频场合。80年代,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)问世,它综合了电力MOSFET和双极型电力晶体管两者的功能。IGBT的迅速发展,又激励了人们对综合了电力MOSFET和晶闸管两者功能的新型电力电子器件——MOSFET门控晶闸管的研究。

总的来说,电力电子器件的发展概况大致如下。

1. 超大功率晶闸管

晶闸管(SCR)自问世以来至今,其功率容量提高了近3 000倍。现在许多国家已经能生产稳定的8 kV/4 kA晶闸管,例如,日本生产的8 kV/4 kA和6 kV/6 kA光触发晶闸管(LTT),美国和欧洲生产的电触发晶闸管。近十几年来,由于自关断器件的飞速发展,晶闸管的应用领域有所缩小,但是,由于它的高电压、大电流特性,它在高压直流输电(HVDC)、静止无功补偿(SVC)、大功率直流电源及超大功率和高压变频调速应用方面仍占有十分重要的地位。预计在以后若干年内,晶闸管仍将在高电压、大电流的场合得到应用。

2. 高压大电流 GTO

现在,许多生产厂商能够生产额定开关功率 $36\text{ MV}\cdot\text{A}$ (6 kV/6 kA)用的高压大电流GTO。GTO具有较高的导通电流密度、较高的阻断电压、阻断状态下较高的 du/dt 值等优点,目前它在电力牵引领域、工业和电力逆变器中得到广泛应用。

3. 新型 GTO 器件——集成门极换向晶闸管 IGCT

IGCT晶闸管是一种新型的电力电子器件,与常规GTO晶闸管相比,它具有许多优良的特性,例如,不用缓冲电路就能实现可靠关断,存储时间短,开通能力强,关断门极电荷少,以及应用系统(包括所有器件和外围部件,如阳极电抗器和缓冲电容器等)总的功率损耗低等。

4. 高功率沟槽栅结构 IGBT (Trench IGBT) 模块

当今高功率IGBT模块中的IGBT元胞大多采用沟槽栅结构的IGBT。与平面栅结构相比,沟槽栅结构通常采用 $1\text{ }\mu\text{m}$ 加工精度,从而大大提高了元胞密度;由于沟槽栅结构中门极沟的存在,消除了平面栅结构器件中相邻元胞之间形成的结型场效应晶体管效应,同时引入

了一定的电子注入效应,使得导通电阻下降,为增加长基区厚度、提高器件耐压创造了条件。所以,近几年来出现的高耐压大电流 IGBT 器件均采用沟槽栅结构。

5. 新型大功率 IGBT 模块——电子注入增强栅晶体管 IEGT

近年来,日本东芝公司开发了 IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor, 简称 IEGT), 与 IGBT 一样,它也分平面栅和沟槽栅两种结构,前者的产品已问世,后者尚在研制中。IEGT 兼有 IGBT 和 GTO 的一些优点: 较低的饱和压降,较宽的安全工作区(吸收回路容量仅为 GTO 的 1/10 左右),较低的栅极驱动功率(比 GTO 低 2 个数量级)和较高的工作频率。

6. MOS 门控晶闸管

MOS 门极控制晶闸管(简称 MOS 门控晶闸管)充分利用了晶闸管良好的通态特性、优良的开通和关断特性,它具有优良的自关断动态特性、非常低的通态电压降并且耐高压,成为未来在电力装置和电力系统中很有发展前途的高压大功率器件。

2.1.2 电力电子器件的分类

1. 按照电力电子器件的开关控制能力来分

按照电力电子器件的开关控制能力,电力电子器件可分为三类:不可控器件、半控型器件、全控型器件。

(1) 不可控器件

这是一类不能用控制信号来控制其通、断的电力电子器件,因此也就不需要驱动电路。这类器件的典型代表是功率二极管。功率二极管的通断完全由它的主电路中承受的电压决定,它具有单向导电性。

(2) 半控型器件

这是一类可以通过控制端来控制器件的开通,但不能控制其关断的电力电子器件。这类器件的典型代表是晶闸管及其派生器件。这类器件的特点是:其控制端在器件导通后即失去控制能力,即无法通过控制端来关断器件,这类器件的关断完全取决于外部条件,即器件在主电路中承受的电压和电流。

(3) 全控型器件

这是一类既可以控制其开通,又可以控制其关断的电力电子器件。与半控型器件相比,这类器件可以通过控制端实现器件的关断,因此又称为自关断器件。属于这类器件的有:电力场效应晶体管(电力 MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、门极可关断晶闸管(GTO)、集成门极换向晶闸管(IGCT)、电子注入增强栅晶体管(IEGT)等。

2. 按照电力电子器件的驱动信号性质来分

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不同,又可以将电力电子器件(半控型和全控型)分为电流控制型和电压控制型。如果通过向控制端注入或从控制端抽出电流来实现电力电子器件的开通、关断,这类电力电子器件称为电流控制型器件。如果电力电子器件的开通、关断控制是通过加在控制端与公共端之间的电压来实现的,则称之为电压控制型器件。与电流控制型器件相比,电压控制型器件需要的控制极驱动功率要小得多。属于电流控制型的电

力电子器件有普通晶闸管、GTO等,属于电压控制型的电力电子器件有电力MOSFET、IGBT、IGCT、IEGT等。

3. 按照电力电子器件的内部载流子类型来分

根据电力电子器件内部载流子的类型,可将电力电子器件分为单极型、双极型和复合型三类。由一种载流子参与导电的电力电子器件,称为单极型器件,例如电力MOSFET、静电感应晶体管(SIT);由电子和空穴两种载流子参与导电的电力电子器件,称为双极型器件,例如普通晶闸管、GTO等;由单极型器件和双极型器件组合而成的复合电力电子器件,称为复合型器件,例如IGBT。

单极型器件只有多数载流子导电,没有少数载流子的存储效应,因而开通、关断时间短,典型值为20 ns。这类器件的另一优点是输入阻抗很高,通常大于40 M Ω ,故属于电压控制型器件。此外,单极型器件的电流具有负的温度系数,即温度上升则电流下降,因而不易产生局部热点,二次击穿的可能性极小。单极型器件的不足之处是通态压降高,电压和电流额定值比双极型器件小。单极型器件适用于功率较小、工作频率高的电力电子设备。

双极型器件的特点是,通态压降较低,阻断电压较高,电压和电流额定值较高,因此适用于大中容量的变流设备。

复合型器件既有晶闸管、GTO等双极型器件的电流密度高、导通压降低等优点,又具有电力场效应管等单极型器件的输入阻抗高、响应速度快的特点,复合型器件是一类综合性能较好、具有发展前途的电力电子器件。

2.2 功率二极管

功率二极管是P型半导体和N型半导体相结合(称为PN结)的两层结构器件,其中在P型半导体上设置正极端,在N型半导体上设置负极端,用外壳加以密封,如图2.1(a)所示。

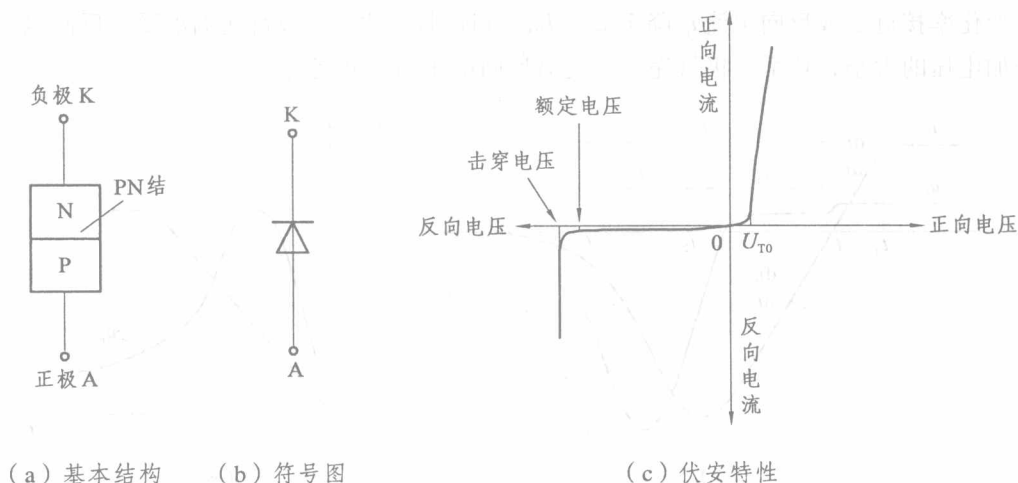


图 2.1 功率二极管的基本结构、符号图和伏安特性

2.2.1 功率二极管的基本特性

1. 静态特性

功率二极管的静态特性主要是指其伏安特性,如图 2.1 (c) 所示。

当功率二极管承受的正向电压达到一定值,例如 $0.6\text{ V} \sim 0.7\text{ V}$ 时,正向电流开始明显增加,这时功率二极管处于导通状态,这个临界电压被称为门槛电压 U_{T0} 。当功率二极管承受反向电压时,只有由少数载流子引起的微小而数值稳定的反向漏电流,然而,当反向电压超过某一数值时,反向电流会急剧增加,这种现象被称为击穿现象,这时的反向电压值称为击穿电压。

正常使用功率二极管时,加在其正、负极间的电压(交流电压的峰值)不能超过击穿电压。

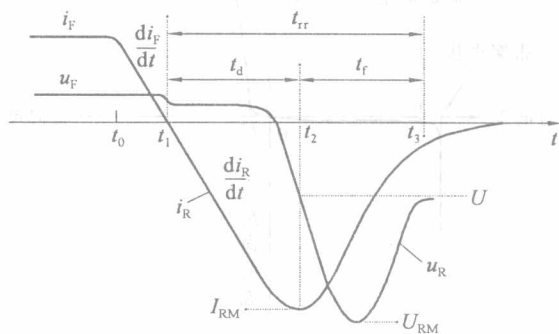
2. 动态特性

由半导体知识可知,功率二极管存在结电容,若该结电容用 C_j 表示,则 $C_j = C_B + C_D$, 其中,势垒电容 C_B 的大小与 PN 结截面面积成正比(功率二极管的截面面积比普通二极管大,所以具有更大的势垒电容);扩散电容 C_D 的大小与通过 PN 结的正向电流有关。

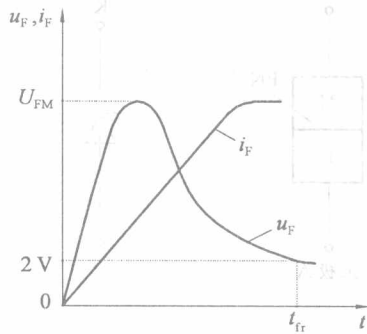
因为结电容的存在,功率二极管在零偏置(外加电压为零)、正向偏置和反向偏置三种状态之间转换的时候,必然会经历一个过渡过程。在过渡过程中,PN 结的一些区域需要一定时间来调整其带电状态,因而其伏安特性是随时间变化的,这就是功率二极管的动态特性。通常功率二极管的动态特性专指反映通态和断态之间转换过程的开关特性。

当功率二极管外加正向电压时,正向电流对结电容充电;若功率二极管外加电压反向,正向电流并不能立即截止下降到零,因为结电容上的电荷需要一定的时间来恢复,此时功率二极管仍处于导通状态直至全部电荷被复合,功率二极管才能完全恢复阻断状态。

假设在 t_0 时刻,功率二极管的外加电压突然由正向变为负向,如图 2.2 (a) 所示,正向电流在反向电压作用下的下降速率取决于电路中电感和反向电压的大小。在 t_1 时刻正向电流降低到零,在 t_2 时刻反向电流达到最大值 I_{RM} ,之后功率二极管开始恢复对反向电压的阻断能力,反向电流迅速下降,在外电路电感的作用下会在功率二极管两端产生比外加反向电压 U 大得多的反向电压 u_R , u_R 逐渐达到最大值 U_{RM} ,随着电流变化率下降, u_R 逐渐减小,在电流变化率接近零或反向电流 i_R 降至 $25\% I_{RM}$ 的时刻 t_3 ,功率二极管两端承受的反向电压才降至外加电压的大小,功率二极管完全恢复对反向电压的阻断能力。



(a)



(b)

图 2.2 二极管的动态特性