

高等学校电工电子类系列教材



电力电子技术

POWER ELECTRONICS

主编/ 王旭光 房绪鹏

主审/ 张开如



中国石油大学出版社

高等学校电工电子类系列教材

电力电子技术

主 编 王旭光 房绪鹏

主 审 张开如

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/王旭光,房绪鹏主编. —东营:中国石
油大学出版社,2009.2

ISBN 978-7-5636-2821-6

I. 电… II. ①王…②房… III. 电力电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 017800 号

电力电子技术

主 编:王旭光 房绪鹏
责任编辑:刘 静

出 版 者:中国石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: cbs2006@163.com

印 刷 者:青岛星球印刷有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0546—8391810)

开 本:185×260 印张:13.25 字数:339 千字

版 次:2009年3月第1版第1次印刷

定 价:22.80 元

版权专有,翻印必究。举报电话:0546—8391810

本书封面覆有中国石油大学出版社标志的激光防伪膜。

本书封面贴有中国石油大学出版社标志的电码防伪标签,无标签者不得销售。

出版说明

电工电子技术作为当前信息技术的基础,在国民经济和社会发展中起着越来越直接和越来越重要的作用。在高校中,由于广阔的技术应用和良好的就业前景,使电工电子类专业成为近年来发展势头最强劲的专业之一。在学生人数激增、学科应用拓展、学科发展加速的现实背景下,要使高校的专业教学跟上发展的步伐,适应社会的需求,则必须进行课程体系和课程内容的改革。这是摆在我们电工电子类专业从教者面前的一项重要而紧迫的任务。

正是在这种共同认识的驱动下,我们 20 多所高校——一些平时在教学改革方面颇多交流、在学科建设方面颇多借鉴的院校,走到了一起。我们这些院校各有所长,在一起切磋、比较、学习,搭建了一个很好的学习和交流的平台,共同推动了教育教学改革,促进了各自的发展。经验告诉我们,教改的核心是课程体系和课程内容的改革,但课程体系和课程内容改革的成果呈现在学生面前的最主要资源便是构架完备系统的教材。因此,课程改革与教材建设同步,编写出一套适合当前教学改革要求、结构体系完备、体现教学改革思路的好教材,成了我们共同的追求。

教材指导教学,教材体现教改。根据我们现实的教学需求和进一步的发展规划,我们把这套教材的建设构架为三个方面,也可以说是三个模块:

第一个方面是电工电子的基础理论与技术教材,主要针对工科类学生的通识课或者基础课,包括信号与系统、电路分析、电子线路、模拟电子技术、数字电子技术、单片机原理及应用、微机原理及应用、电气控制及 PLC 技术、计算机控制技术、电机与电气控制技术、传感器与检测技术、电机与拖动等,涵盖电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术等专业的基础知识。为确保教材的权威性、科学性,各书主编及主要撰写者,均由具有多年教学经验的教授和专家担任。教材的覆盖面广、知识面宽,以高校的精品课建设为基础,着重基本概念和基本物理过程的论述,注重教学内容的内拓和精选,突出先进性、针对性和实用性。

第二个方面是实验与实训类教材。实验教学是培养学生基本工程素质、提高工程实践能力的重要手段,是高校工科教育教学改革的核心课题。为此,我们这些高校都极其重视实验教学改革与教材建设,不断更新实训教育理念,注重学生创新能力和动手能力的综合发展。国家级实验教学示范中心是高等学校实验教学研究 and 改革的基地,引领全国高等学校实验教学改革的方向。我们的整套实训教材以山东科技大学和青岛大学“国家级电工电子



实验教学示范中心”为依托,将任务驱动与项目引领相结合,融基础实验与综合技能训练、系统设计与综合应用、工程训练和创新能力培养为一体,体系完整、内容丰富、工程实践性强,以期达到加强学生的系统综合设计能力和训练学生工程思维的目的。这一类教材主要包括电路实训教程、模拟电子技术实验教程、数字电路逻辑设计与实训教程、电子工艺与实训教程、PLC应用实训教程、电子工程实训教程、电气工程实训教程等。相信这部分教材对加强、规范和引导相关高校的实验教学会有有一定的借鉴作用。

第三个方面则是我们独具特色的电工电子类专业的双语教学教材。我们本着自编和引进并重的原则,打造适合我国高等教育发展的电工电子类双语教材体系。我们拥有具有东西方不同教学体系下丰富教学经验的外国专家和教授,他们以纯正的英语语言直接面向我们的大学生编写教材,这在国内恐属首创。比如这套教材中的双语教材之一《Introductory Microcontroller Theory and Applications》就是由英籍专家 Michael Collier 主编完成的英文版双语教材。该教材已在试用中得到了教师和学生的很高评价。在编写原创双语教材的同时,为了提供更丰富的双语教材资源,弥补原创双语教材在数量上的不足,各校将在共同讨论的基础上,引进相对适应性广泛的原版教材。另外,电工电子类双语教学网站也在同步建设中,为师生提供双语教学资源,打造师生互动平台。

诸事万物,见仁见智。对一套好教材的追求是我们的愿望。但当我们倾力追求教材对于我们学校现实的适用性时,我们真的惧怕它们或许已离另一些学校更远。站在不同的起点或角度进行教材构架时,这种差异有时会影响人们对教材的评判。这就时刻提醒我们参与教材编写的院校,在追求教材对于自身的适用性的同时,需要努力与其他院校做更多的沟通和了解,以使自身更好地融入全国教改的主流,同时使这套教材具有更好的普适性,有更广泛的代表意义和借鉴作用。

教材是教学之本。我们希望这套教材:不仅能符合专业培养要求,而且能顺应专业培养方向;不仅能符合教育教学规律,而且能符合学生的接受能力和知识水平;不仅能蕴含和体现丰富的教学经验和思想,而且能为学生呈现良好的学习方法,能指导学生学会自主学习,能调动学生的创造力和学习热情……我们将为此继续努力!

编委会

2008年8月

前言

PREFACE

电力电子技术诞生于 20 世纪中叶,至今已有 50 多年的历史。电力电子技术作为国内高校电工类专业的一门主干课程走进课堂也已经有 30 年的历史。半个多世纪中,电力电子技术作为一门应用技术,在自身不断发展和完善的同时也迅速向越来越多的领域渗透,现已成为工农业生产、交通运输、国防建设乃至人们的日常生活中不可缺少的技术。另外,电力电子技术也在不断地吸纳有关基础学科的新理论和新方法。该技术的内容日益丰富,包含电力电子器件,基本主电路,驱动、控制和保护电路,电力电子装备,电力电子技术的研究方法等各方面的内容。因此,要通过一门 50 学时左右的课程让学生了解该学科的主要内容、掌握其基本分析方法,教材内容的取舍是至关重要的。

自动化、电气工程及其自动化等专业的学生将来主要从事电力电子设备的维护与改造、工程设计等方面的工作,对于电力电子器件知识的要求限于了解其性能参数,能将其合理地应用于电路中。因此,本书对器件的介绍尽量简化,主要的篇幅用于对电力电子主电路的讨论。近年来,各种通用的、系列化的电力电子设备越来越多,作为工业现场的自动化和电气工程技术人员,对这些设备有一个整体的了解是完全有必要的。因此,本书将工业现场常用的电力电子设备做了整体的、简单的介绍。

在 20 世纪 70 年代末,电力电子技术刚出现在国内大学的课堂上时,其内容中晶闸管电路占了绝大部分。以后,全控型电力电子器件组成的电路在教材中从无到有,且所占的比例逐渐加大,这与各个时期电力电子技术的发展状况是一致的。本教材内容不仅介绍了目前全控型电力电子器件的应用技术,以保持与学科的发展同步,而且也保留了较多的晶闸管电路的内容,其理由有以下几个方面:首先,许多晶闸管电路的分析方法是最基础的,可以用于其他电路的分析,应该认真学习掌握。其次,晶闸管电路往往是其他电力电子系统的一个重要的部件或环节。另外,由于有相当一部分电类专业的毕业生将到工业现场从事设备运行的维护工作,而现场中许多由晶闸管构成的比较老的设备仍在使用。

与其他课程相比,电力电子技术的一个突出特点是波形分析的比重较大。这不仅是对本课程一些重要内容进行理解所必需的方法,也是学生将来对电力电子设备的性能进行正确的分析和研究,进而做好设备维护和工程设计等技术工作的一个重要的手段。因此,在编写过程中对波形分析给予了足够的重视,并使用 MATLAB 进行仿真,得出绝大部分波形图。

电力电子技术是后续专业课交流调速系统、运动控制系统、开关电源技术等课程的基

础,一般认为是一门专业基础课。但是本课程中的许多内容如整流、有源逆变、交流调压等又是可以直接应用于生产实践中的,应该说它又具有一定的专业课的性质。因此本教材的内容更注重了理论与实践的结合,内容与工程实际的联系。

全书由王旭光、房绪鹏主编,山东科技大学的张开如教授主审。本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化专业和相关专业的本科教材,也可作为研究生和科研设计人员的参考书。

由于作者水平和视角的局限,书中难免会出现疏漏、偏颇甚至谬误,真诚希望同行和广大读者提出宝贵意见。

作者

2009年2月

CONTENTS

目录

绪 论	(1)
第 1 章 电力电子器件	(5)
1.1 单向导电器件	(5)
1.2 晶闸管	(7)
1.2.1 晶闸管的结构和工作原理	(7)
1.2.2 晶闸管的特性	(8)
1.2.3 晶闸管的主要参数	(9)
1.2.4 国产品闸管的型号	(10)
1.3 全控型电力电子器件	(11)
1.3.1 可关断型晶闸管 GTO	(11)
1.3.2 功率晶体管 GTR	(12)
1.3.3 绝缘栅型功率场效应晶体管 MOSFET	(14)
1.3.4 绝缘栅双极型晶体管 IGBT	(17)
1.4 新型场控电力电子器件	(20)
1.4.1 静电感应晶体管 SIT	(20)
1.4.2 静电感应晶闸管 SITH	(21)
1.4.3 MOS 控制晶闸管 MCT	(22)
1.5 电力电子器件的驱动	(22)
1.5.1 晶闸管驱动电路	(23)
1.5.2 GTO 的驱动电路	(24)
1.5.3 GTR 的驱动	(25)
1.5.4 场控器件的驱动	(27)
1.6 电力电子器件的保护	(28)
1.6.1 过电压的保护	(28)
1.6.2 过电流的保护	(30)
1.6.3 MOSFET 的栅极保护	(31)
1.7 电力电子器件的缓冲电路	(31)
1.7.1 晶闸管的缓冲电路	(31)



1.7.2 全控型器件的缓冲电路	(32)
1.8 习题与思考题	(34)
第2章 晶闸管相控电路	(36)
2.1 晶闸管单相可控整流电路	(36)
2.1.1 单相半波整流电路	(36)
2.1.2 单相桥式全控整流电路	(40)
2.1.3 单相桥式半控整流电路	(43)
2.2 晶闸管三相可控整流电路	(45)
2.2.1 三相半波可控整流电路	(45)
2.2.2 三相桥式全控整流电路	(49)
2.2.3 三相桥式半控整流电路	(54)
2.3 电动势负载和有源逆变	(56)
2.3.1 电动势负载	(56)
2.3.2 逆变的概念	(57)
2.3.3 三相有源逆变电路	(59)
2.4 相控式交流调压电路	(61)
2.4.1 单相交流调压电路	(61)
2.4.2 三相交流调压电路的典型电路	(64)
2.4.3 三相6晶闸管无中线交流调压电路	(64)
2.4.4 星形中点三相交流调压电路	(69)
2.5 晶闸管相控电路的同步问题	(73)
2.5.1 单结晶体管触发电路	(73)
2.5.2 锯齿波移相晶闸管触发电路	(76)
2.6 习题与思考题	(78)
第3章 无源逆变与变频	(82)
3.1 无源逆变的概念及应用	(82)
3.1.1 无源逆变的概念	(82)
3.1.2 无源逆变的应用	(82)
3.2 用于开关电源的逆变电路	(83)
3.2.1 全桥式逆变电路	(83)
3.2.2 半桥式逆变电路	(84)
3.2.3 三相无源逆变电路	(85)
3.3 交-直-交变频器的构成和控制模式	(86)
3.3.1 无源逆变电路的拓扑结构	(86)
3.3.2 无源逆变电路的控制模式	(93)
3.4 晶闸管三相逆变电路	(100)

3.4.1	晶闸管电压型逆变器	(100)
3.4.2	晶闸管电流型逆变器	(108)
3.5	习题与思考题	(113)
第4章 斩波电路		(114)
4.1	直流斩波器的基本电路	(114)
4.1.1	降压型斩波电路	(114)
4.1.2	升压型斩波电路	(117)
4.1.3	升-降压型斩波电路	(121)
4.1.4	丘克电路	(123)
4.2	带输出变压器的直流变换电路	(125)
4.2.1	单端正激直流变换器	(125)
4.2.2	回扫式直流变换器	(126)
4.2.3	双管正激式直流变换器	(127)
4.2.4	双管反激式直流变换器	(128)
4.3	直流斩波器在电力传动中的应用	(129)
4.3.1	降压型斩波器供电的直流电力拖动系统	(129)
4.3.2	由降压型和升压型斩波器组合供电的直流电力拖动系统	(130)
4.3.3	可以四象限运行的斩波器供电直流电力拖动系统	(132)
4.3.4	升压型斩波器在串级调速中的应用	(134)
4.4	用晶闸管作为电子开关的直流斩波器	(134)
4.4.1	晶闸管定宽调频型斩波器	(135)
4.4.2	脉宽可调的晶闸管斩波器	(138)
4.4.3	采用逆导型晶闸管的直流斩波器	(142)
4.5	斩控式交流调压器	(144)
4.5.1	斩控式交流调压器的工作原理	(144)
4.5.2	电源与负载端的电气隔离	(147)
4.5.3	双向电力电子开关	(148)
4.6	习题与思考题	(149)
第5章 电力电子技术中的磁问题		(152)
5.1	电磁学基本知识	(152)
5.2	电力电子设备中磁元件的工作情况	(154)
5.3	高频变压器的分析计算	(157)
5.3.1	单端正激式输出变压器的计算	(157)
5.3.2	单端反激式输出变压器的计算	(159)
5.3.3	纯交流磁场的高频变压器的计算	(161)
5.4	滤波电感的分析计算	(162)

5.5	整流变压器的参数计算	(164)
5.6	晶闸管变流设备中电抗器参数的计算	(167)
5.7	习题与思考题	(170)
第 6 章 电力电子设备		(172)
6.1	通用变频器	(172)
6.1.1	变频器中的整流电路	(173)
6.1.2	变频器中的中间环节	(174)
6.1.3	变频器的逆变电路	(176)
6.2	软启动器	(178)
6.2.1	软启动器的结构	(178)
6.2.2	软启动器的控制方式	(179)
6.2.3	软启动器的停车控制	(181)
6.2.4	软启动器的各种保护功能	(181)
6.3	晶闸管交流调功器	(182)
6.4	不间断电源 UPS	(184)
6.4.1	不间断电源的类型	(184)
6.4.2	UPS 主要单元电路的构成	(186)
6.5	开关电源	(191)
6.5.1	开关电源的结构	(191)
6.5.2	开关电源的整流电路	(192)
6.5.3	开关电源的逆变电路	(195)
6.6	习题与思考题	(197)
参考文献		(199)

绪 论

INTRODUCTION

电力电子技术(Power Electronics)是利用电子器件对电能的形式进行变换的技术。比如,把直流电能变为交流电能,把工频交流电能变为高频交流电能,等等。

1956年,美国科学家 John Mell 研制成功第一只晶闸管(Thyristor),标志着电力电子器件的诞生。1957年,晶闸管被商业化生产,并应用于电能变换领域,所以一般认为电力电子技术作为一门独立的学科是从1957年开始的。

作为完成电能形式转换任务的电力电子器件,有许多种类(如功率二极管、三极管),但与传统的在信息处理领域应用的同类器件在原理和结构上都有相似之处,只是前者能够承受更大的电压和通过更大的电流,并且有更高的转换效率。也有一些电力电子器件的原理和结构在信息处理领域是没有的,它们专门用于电力电子领域,如可关断晶闸管 GTO、绝缘栅双极型晶体管 IGBT。

绝大多数电力电子装置和系统在电路结构上都分为主电路和与之相配合的控制电路两大部分。主电路直接对电能进行变换、处理,工作时有很大的能量流,其器件必须具有较高的耐压和较大的电流通过能力,但电路的拓扑结构一般相对简单。在分析研究主电路时,要把转换效率、功率容量、电能转换质量作为主要技术指标。控制电路的作用是对主电路及其器件进行控制,对主电路的工作状态进行监测,因此一般由小功率电子元器件、通用或专用的集成电路以及微处理器、传感器等组成,但是电路的结构较之主电路要复杂得多。由此可见,一个完整的电力电子装置或系统,具有强、弱电电路结合,以弱电电路控制强电电路的特点。

控制电路服务于主电路,而在许多情况下,主电路又作为自动控制系统中的一个重要环节出现,如在电力传动控制系统中电力电子主电路作为电机的驱动环节。为了使电力电子主电路能够有效地、可靠地服务于系统,控制电路必须要采用相应的控制措施,电力电子技术就必须研究自动控制的理论和方法。所以,电力电子技术是横跨电力技术、电子技术、自动控制三大领域的边缘学科。

电力电子技术的主要内容包括两大部分:其一是电力电子器件,包括电力电子器件的基本理论、设计方法和制造技术及工艺。作为电气信息类专业的技术人员学习这部分内容的目的是为了了解器件的结构、工作原理、主要参数、适合于在哪些工程领域应用,以及保证器件能够正常地工作必须配置哪些驱动、保护和检测电路,为运用这些器件组成电力电子电路和系统打下基础。另一部分内容是电力电子电路,即怎样运用电力电子器件构成电能转换主电路和与之相适应的控制电路。对于电气信息类的专业技术人员,这部分内容是学习和研究电力电子技术的重点。

电力电子技术的作用是对电能的形式进行变换。目前,人类的生产活动中对电能的利



用极其广泛。工农业生产、交通运输、科学研究、医疗卫生、文化娱乐,乃至人们的日常生活中无不把电能作为主要能源或者作为能源利用的中间环节。因此,对电能形式变换的要求也是千差万别的。尽管如此,还是可以把电能形式的变换分为以下几个大类。

交流电能转换成直流电能,叫做整流。整流技术的应用非常广泛,是电力电子技术最早的内容。现在世界上绝大部分地区的电力系统供出的电能都是 50 Hz 或 60 Hz 的工频交流电,而有许多用电设备需要直流供电,如一些对调速性能要求比较高的电力传动系统大量采用直流电动机。另外,许多电子设备也需要直流电源供电。为了满足这些要求,用电力电子器件构成的整流器被大量地采用。

直流电能转换成交流电能,这是整流的逆过程,称之为逆变。在不同的应用领域,逆变的目的是有很大区别的。例如,直流电力拖动系统中直流电动机制动时通常工作在发电状态,将生产设备中储存的机械能转换成直流电能。如果在直流电动机和交流电网之间接入逆变器,将这部分电能变成与交流电网电压相符、频率相等的交流电能,则可以把能量回馈到电网,达到节能的目的,同时减少系统的发热。再如,许多可再生能源的能量输出为直流电的形式(如太阳能电池),而多数通用用电设备都需要工频交流电,这样在直流电源和用电设备之间必须经逆变器连接。这又是逆变电路的应用场合之一。

逆变器不仅可以把直流电能变成工频交流电能,而且还可以变换出其他频率和电压等级的交流电能。这一类逆变器在交流电动机的调速、制造工业生产中的热加工等领域得到了广泛的应用。

对直流电压的调节也是电力电子技术的重要内容之一。说到直流调压,初学者自然会联想到线性直流调压的方式,即在直流电源与负载之间串联一个可调的等效电阻,使其与负载串联形成分压,改变电阻的数值,负载电压也会发生变化,从而达到调压的目的。这种方式在一些小功率供电的场合有不少应用,如传统的线性稳压电源就是采用这种方式,但在功率很大的情况下,这种调压方式具有非常严重的缺陷。首先是与负载串联的电阻流过与负载相同的电流,会产生很大的功率损耗,不仅浪费了能量,还会产生很大的热量。为了散热,整个设备的体积、重量和制造成本就会加大。另一方面,在这种方式下负载得到的电压总是小于或等于电源电压,即只能降压不能升压。

电力电子技术中的直流-直流变换装置即斩波器可以较好地解决上述问题。在电源电压一定时,采用斩波器与负载串联可以得到高于或低于电源电压的电压;当电源电压不稳定而负载又需要一个稳定的直流电压时,直流斩波器可以使负载电压恒定。另外,从理论上讲,直流斩波器的功耗可以为零,而不管负载与电源之间有多大的电压差。

电力电子技术还可以把一种交流电转换成另一种交流电。直流电压源只有输出电压这一个参数,而描述一个交流电需要振幅值、频率、初相角这三个要素,所以对交流电进行变换时,改变其中一个参数,输出电压和输入电压就会出现差异。根据工业现场要求的不同,交流-交流变换电路调节的交流电的参数也不同。如果不改变交流电的频率,只对交流电的有效值进行调节,则称为交流调压。交流调压技术通常用于电加热系统的温度调节、灯光控制,以及交流异步电动机的软启动。

如果利用电力电子电路对交流电的频率进行调节(实际应用中往往在调节频率的同时也调节交流电的振幅值),则叫做变频。变频技术的应用领域很广,在交流电力拖动系统中,

采用变频技术可以使交流异步电动机得到很好的调速质量,这一类变频器的输出频率在 0 Hz 到几十 Hz 之间。还有一类变频器的输出频率很高,在几 kHz 到几十 kHz 之间,可以作为冶金、热处理等金属热加工领域的中频电源。

电力电子器件还可以作为电力开关来使用,叫做固体开关或无触点开关。这类开关与传统的机械触点式开关相比有着突出的优点。首先是没有机械动作,因此通断速度快,寿命长;另一个突出的优点是此类开关在通断过程中不产生火花,这对于那些处于易燃易爆环境中的电气设备是非常有用的。另外,无触点开关不产生噪声和振动,非常适合在文化娱乐、办公自动化、家用电器等设备中使用。

上面提及的各种电力电子技术的内容,如整流、逆变、变频等,都可以直接构成应用于生产现场的电力电子设备,也可以由多个电路、多个单元进行组合构成具有某种专门用途的电力电子装置和设备。如目前大量使用的开关型稳压电源就是由多个整流电路和逆变电路组成的。交流电力拖动系统中被广泛使用的交-直-交变频器的主电路,也是由整流和逆变电路组合而成。

随着电力电子技术自身的发展和国民经济各部门对电力电子设备的需求量的增大,各种通用和专用的电力电子设备的品种和数量也越来越多。本书的第 6 章将对其中通用的、比较常见的、具有代表性的设备做简单的介绍,如通用交-直-交变频器、交流异步电动机的软启动器、不间断电源(UPS)、开关电源等。作为从事应用型工作的电气工程技术人員,应该对这些设备的构成、原理、应用场合和选型等问题有一定的了解。因为事实上在一般工业部门从事有关电力电子技术工作的过程中,上述技术问题会越来越多,而自行设计和制造电力电子设备的工作量正在相对地减少。

在电力电子器件诞生之前,工业生产现场中对电能形式的变换的要求就已经出现,当时是用其他的方式来满足生产需求的。如把交流电变成直流电的过程,在功率较大的电力传动系统中,多采用交-直机组,交流电动机从交流电网上获取交流电能带动直流发电机旋转,直流发电机再把发出的直流电能供给负载。对于功率较小的直流用电装置,则多采用真空电子管组成的整流器。对交流电频率的变换,也有采用“变频机组”的,频率为工频的电动机从工频电网上获得能量驱动高频发电机运行,向负载供出高频交流电能。不难看出,上述设备体积庞大、效率低,并且工作时不可避免地伴随着噪声和振动。20 世纪 50 年代以后,晶闸管作为第一代电力电子器件,彻底解决了能量变换中的噪声和振动问题,大幅度地提高了效率,并且可以通过相位控制方便地调节输出电压。电力电子技术以弱控强的优点得以充分地发挥。但是,第一代电力电子器件(主要是晶闸管和功率二极管)也表现出其突出的弱点。由于晶闸管作为半控型器件,只能控制开通而不能控制关断,因此主电路电流总是滞后于电源电压,导致设备的功率因数变低。电源电流为非正弦波,明显地包含着大量的谐波成分。另外,由于晶闸管不能控制关断,设备的抗干扰性较差,降低了系统的可靠性。

到 20 世纪 70 年代,各种全控型电力电子器件逐步被应用到工业生产领域。全控型器件是指通过电信号可以控制器件开通,也可以控制器件关断的器件。如电力晶体管 GTR、可关断型晶闸管 GTO、功率场效应晶体管 MOSFET 等,都属于全控型电力电子器件。这些器件被称为第二代电力电子器件。它们不仅从根本上克服了第一代电力电子器件的弱点,而且其开关速度比后者要快得多,可以工作在更高的开关频率。开关频率的提高是减小设

备体积、降低制造成本的关键。全控型电力电子器件,也使得一些过去只能在理论上进行探讨而无法付诸实现的技术问题有了实现的可能。如用改变电源频率的方法对交流异步电动机进行调速可以得到优良的性能这个问题,早已在理论上被推导出来,但得到实践的验证是在电力电子技术得到发展以后。现在,变频调速技术和设备越来越广泛地被应用于生产,取得了良好的效果。近十几年来,随着微电子技术的发展,电力电子器件的制造技术得到了长足的发展。全控型器件不仅可以承受更高的电压、通过更大的电流、有更快的开关速度,而且可以制造成功能模块的形式。与之配套使用的控制电路、驱动电路、保护电路和检测电路也都被集成化,形成了系列的专用集成电路芯片,使得使用和开发电力电子电路和装置更加方便和可靠,也更加体现出电力电子技术是集电力技术、电子技术和自动控制为一体的新兴边缘学科的属性 and 强(电)弱(电)结合、以弱控强的特点。

电力电子技术是电气信息类专业的一门专业基础课,过去曾叫做半导体变流技术。在学习之前,应该掌握高等数学、大学物理、电路理论、模拟电子技术、数字电子技术的知识。上述课程中的许多内容是电力电子技术的基础。同时,电力电子技术与电机与拖动技术、自动控制理论等课程也有一定的联系。许多院校中这三门课程是并行开设的,这就要求学生在学习和教师在讲授时要注意它们彼此之间的联系。电力电子技术是多门专业课程的先行课,如必修课运动控制系统、交流调速系统,选修课开关电源等。由于课时有限,电力电子技术课程涉及的内容又很多,所以在本课程的内容安排上只能选用一些基本的、普遍的、有代表性的知识,而各门后续课程对内容的要求是不一样的,因此在各门后续课程中都有进一步深化和扩展电力电子技术知识的任务。

第1章

电力电子器件

1.1 单向导电器件

整流是电力电子技术中的一个重要内容。在电力电子技术尚未作为一个学科出现之前,为了解决生产中的具体问题,就已经有人研究整流,即如何把交流电能变为直流电能。要达到这个目的,就必须有单向导电的器件。在半导体二极管诞生之前的很长一段时间里,曾出现和应用过多种具有单向导电特性的其他器件,如真空的电子二极管、充有某种气体的离子管以及水银整流器;也出现过一些固体的单向导电器件,如用氧化铜、硒等制成的整流器件。这些器件在国内一直到20世纪70年代还没有完全被淘汰。在工业生产中为了取得较大功率的直流电能,还大量采用交-直机组,即用交流电动机带动直流发电机,直流发电机再向直流电动机供电。直到20世纪80年代,这种方式在电力传动系统中还有较大数量的应用。与现在大功率二极管组成的整流电路相比,上述器件都有很严重的缺陷:氧化铜和硒片制成的整流器件耐压很低,用其构成整流器都要用多个元件串联才能组成一个桥臂,因而增大了整机的体积。另外,它们的反向漏电流也较大。而真空和充气的电子管内有灯丝,寿命都比较短,体积也比同容量的半导体二极管大得多,并且大多为玻璃封装,易碎。水银整流器内含有毒的汞蒸汽,体积庞大,不易维护。交-直机组工作时伴随着机械运动,从而出现了噪声、振动、摩擦等问题,使得效率降低,维修量大。

电力电子电路中使用的大功率二极管,其结构和原理与普通的二极管没有根本的差别,都是一个PN结,其作用也都是单向导电。但是用于电力电子电路中的二极管功率都较大,工作电流在几安培到几百安培,反向电压在几十伏到几千伏以上,其体积也比普通的二极管大得多。因此,在使用时会出现一些特殊的问题,主要应注意以下几个方面。

1. 正确理解二极管的参数

大功率二极管有两个重要参数,使用时要正确理解其意义。其一是额定电压,表示二极管在加反向电压时对电压的耐受能力。这个电压指的是瞬时值。如某二极管的额定电压为800 V,则说明在任何瞬间反向电压都不可超过800 V。因此在设计电路选择二极管时,要考虑电路中可能出现的最大电压瞬时值。如某电路中二极管接在有效值为220 V的交流电路中,则可能出现的最大电压瞬时值为 $220\sqrt{2}=311$ V。应按311 V选择二极管的电压定额而不是220 V。另一个重要参数是通态平均电流。这个电流是二极管通以波形为正弦半波

的电流时,二极管所能耐受的最大电流平均值。值得注意的是,对电流限制的原因其实是器件的发热量,如果电流的波形不同,其发热量与电流的平均值没有直接关系,而与有效值有直接关系。也就是说,不同波形的电流如果有效值相同,流过二极管产生的热量是一样的,而即使平均值相同,产生的热量也不一定相同。因此,我们应该把正弦半波时允许通过的最大电流平均值(也就是手册上给出的通态平均电流值)折算成有效值 I_{eM} ,把 I_{eM} 作为选择二极管电流的依据。任何波形的电流只要其有效值不超过 I_{eM} ,二极管的使用就是安全的。关于二极管通态平均电流的计算选择方法,与晶闸管相同,在后续内容中将详细介绍。

2. 注意二极管的工作频率

用于电力电子电路的二极管的共同特点是功率大,但是,不同类型电路的工作频率有较大的差异。电力电子电路的种类很多,通常分为整流、逆变、变频、斩波等几大类。大功率二极管由于其 PN 结的接触面积比较大,其电容效应也比较明显,等效结电容比普通小功率二极管大得多,这使二极管应用时受到最高频率的限制。另外,由于功率二极管的工作电流很大,而形成电流的条件是二极管内部要有相应的载流子浓度并形成一定的浓度梯度,这个浓度在二极管加正电压时建立,加反压时消除,这需要时间,从而影响了二极管的工作频率。

整流电路一般工作在工频,即电源电压的频率是 50 Hz(或 60 Hz)。许多作为整流用的大功率二极管适合于工作在这个频率范围。但在变频器、开关电源等电力电子产品中的无源逆变电路中,工作频率则一般为几 kHz、几十 kHz 或更高,而应用现代电力电子技术的谐振开关电路,其工作频率则更高。有些仅适合在工频电路中使用的二极管就不能满足要求,要选用适合于高频的器件。所以在选用二极管时,不但要考虑额定电压、通态平均电流等参数,还要考虑电路的工作频率这一因素对二极管提出的要求。现在半导体二极管的产品就频率而言有普通型的、快速型的和超快速型的,分别适用于不同频率。

3. 功率二极管的动态特性

在模拟电子技术课程中对二极管的讲解中提到了几种二极管的电路模型。如理想的,即忽略导通压降的;认为正向导通压降是恒定的;把二极管正向导通时视为一个等效电阻的。但基本没有涉及二极管的开关过程,即认为二极管两端加正向电压则立刻导通,加反向电压则立刻关断,其间没有过渡。但实际上对于工作电压很高,电流很大的大功率二极管,在关断和开通这两个状态相互切换时是存在着一个过渡过程的。产生这个过程的原因是由于器件中载流子浓度的建立与释放。当二极管从截止状态转为导通状态时,两端的正向电压首先要使器件中的载流子浓度从小到大,而后形成一定的浓度梯度,这个过程需要一定的时间。这样从二极管两端施以正向电压,到电流的出现有一个滞后时间,而电流出现后也不是立即达到稳态电流值,存在一个电流上升的过程。关断时的情况是:当在二极管导通时突然在其两端施以反向电压,由于二极管内部有着较高的载流子浓度,这些载流子在反向电压的作用下会形成短暂的反向电流。电流反向过程中,载流子迅速复合,浓度迅速下降,最终转入阻断状态。对大功率二极管用示波器可以观察到开通和关断期间的过渡过程。这两个过渡过程尽管短暂,但有可能对电路的工作质量产生一定的影响,特别是在研究其快速响应性和产生电磁干扰时,这两个过程是不应忽略的。