

自动化

专业本科系列教材

Dianli Dianzi Jishu

电力电子技术

0101001000100001

苏玉刚 陈渝光 主编

重庆大学出版社

电力电子技术

苏玉刚 陈渝光 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

电力电子技术是一门迅速发展的交叉于电力、电子和控制之间的边缘学科技术,是国民经济各部门、国防建设和人民生活中一项重要的基础技术。本书是阐述电力电子技术基础的一本教材。全书分7章,从电力电子器件、电力电子变换电路和电力电子装置控制与保护电路3个方面介绍了电力电子器件的原理、特性和应用技术;阐述了电力电子4种类型变换电路的基本原理及分析方法和设计方法;介绍了电力电子装置控制和保护电路的基本要求和设计方法。

本书适用于自动化专业、电气工程及自动化专业及其他相关专业的本科生作教材,亦可作为有关院校师生及工程技术人员和社会各界科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/苏玉刚,陈渝光主编. —重庆:重庆大学出版社,2003.4

自动化专业本科系列教材

ISBN 7-5624-2849-2

I. 电... II. ①苏...②陈... 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(2003)第 011304 号

电力电子技术

苏玉刚 陈渝光 主 编

责任编辑:谭 敏 版式设计:谭 敏

责任校对:何建云 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400044

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:14 字数:349千

2003年4月第1版 2003年4月第1次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2849-2/TN·63 定价:18.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

电力电子技术是研究采用电力电子器件实现对电能的变换和控制的科学,是20世纪50年代诞生,70年代迅速发展起来的一门多学科互相渗透的综合性技术学科。电力电子技术是近年来最活跃的研究领域之一,其本身不仅是一项高新技术,而且还是其他多项高新技术发展的基础。这些新技术包括以节约能源、提高照明质量为目的的绿色照明技术;以节约能源、提高运行可靠性并更好地满足生产要求为目的的交流变频调速技术;以提高电力系统运行的稳定性、可控制性为目的,并可有效节能的灵活(柔性)交流输电技术等等。目前正在研究的各种新能源,如太阳能光电池发电、风力发电等,采用电力电子装置与电力系统连接也是较为理想的方式。随着电力半导体制造技术、微电子技术、计算机技术,以及控制理论的不断进步,电力电子技术向着大功率、高频化及智能化方向发展,应用的领域将更加广阔。因此,电力电子技术不仅是自动化专业,电气工程及自动化专业,而且是所有电类专业本科学生和工程技术人员必须掌握的专业技术基础知识。

本教材针对高等院校本科生的教学实际,确定了与本科学生知识、能力结构相适应的编写原则:注重培养学生理论联系实际的能力,强化学生的工程意识。作者根据自己多年的科研成果和教学经验,在参考国内外大量文献的基础上,总结和吸收了很多院校教学和教学改革的有益经验,编写了本书。书中重点介绍了电力电子器件的选择和应用技术;电力电子变流装置实现不同变换的电路拓扑结构、基本工作原理、分析方法和计算方法;怎样为电力电子变流装置选择或设计合理的控制和保护电路。希望本书能够成为一本电力电子技术的入门书,能对从事电力电子技术应用领域的科研工作者、高等院校的本科生和研究生,了解、掌握电力电子技术的原理及应用知识有所帮助。

本教材由重庆大学苏玉刚担任主编,由重庆工学院陈渝光任副主编。全书由苏玉刚、陈渝光负责统稿工作。本书绪论、第1章、第7章由苏玉刚编写;第2章由重庆工商大学刘宵惠编写;第3章和第4章由重庆工学院陈渝光编写;第5章和第6章由重庆工学院张莲编写。全书由重庆大学王明渝教授担任主审。在编写过程中,得到了重庆大学王学勤教授的悉心指导。昆明理工大学、广西大学、桂林电子工业学院、四川工业学院等高等院校的教师们对本教材的编写提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在编写过程中作者对书后所列文献进行了借鉴和参考。在此,编者对文献的作者及提供资料的单位和个人,致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2002年9月于重庆

目 录

绪论	1
第 1 章 电力电子器件	8
1.1 电力电子器件概述	8
1.2 晶闸管及其派生器件	13
1.3 电力二极管	21
1.4 电力晶体管	24
1.5 电力场效应晶体管	26
1.6 绝缘栅双极晶体管	29
1.7 其他全控型电力电子器件简介	32
1.8 功率模块与功率集成电路简介	34
1.9 电力电子器件的串联与并联运行	35
本章小结	37
习题与思考题	39
第 2 章 晶闸管相控整流电路	41
2.1 概述	41
2.2 单相可控整流电路	42
2.3 三相可控整流电路	52
2.4 大功率可控整流主电路接线形式及特点	62
2.5 变压器漏感对整流电路的影响	67
2.6 整流电路的谐波分析	70
2.7 电力公害及其抑制措施	73
本章小结	76
习题与思考题	78
第 3 章 有源逆变电路	80
3.1 有源逆变的基本原理	80
3.2 三相有源逆变电路	83
3.3 逆变失败与最小逆变角的限制	85
3.4 晶闸管直流电动机系统机械特性	88
3.5 有源逆变电路应用举例	92
3.6 变流装置的功能指标	96
本章小结	99
习题与思考题	100

第 4 章 无源逆变电路	101
4.1 换流方式	103
4.2 电压型逆变电路	105
4.3 电流型逆变电路	110
4.4 多重逆变电路和多电平逆变电路	116
4.5 PWM 控制的基本原理	118
4.6 PWM 逆变电路及其控制方法	120
4.7 PWM 逆变电路的多重化	129
4.8 PWM 跟踪控制技术	130
4.9 无源逆变电路应用举例	132
本章小结	137
习题与思考题	137
第 5 章 直流斩波电路	139
5.1 斩波电路的基本工作原理与控制方式	139
5.2 Buck 斩波电路	142
5.3 Boost 斩波电路	144
5.4 Buck - Boost 斩波电路和 Cuk 斩波电路	145
5.5 复合斩波电路	149
本章小结	150
习题与思考题	151
第 6 章 交流电力控制电路和交交变频电路	152
6.1 交流调压电路	152
6.2 交流调功电路	159
6.3 交交变频电路	161
本章小结	164
习题与思考题	165
第 7 章 电力电子变流装置的控制和保护电路	166
7.1 晶闸管变流装置的保护电路	166
7.2 晶闸管变流装置的触发电路	173
7.3 电力晶体管的驱动电路	185
7.4 IGBT 的驱动电路	189
7.5 电力电子变流装置的缓冲电路	192
本章小结	195
习题与思考题	197
附录	199
附录 A 符号说明	199
附录 B 常用术语中英文对照	206
附录 C 与电力电子技术有关的学术组织、学术会议和 期刊以及部分网站	211
参考文献	216

绪 论

对于一个电力电子技术的初学者,首先最关心的问题就是:什么是电力电子技术?它主要包括哪些内容?它与其他学科之间有什么关系?电力电子技术的过去、现状和发展趋势如何?目前主要应用在哪些领域?电力电子技术的学习首先应该掌握哪些内容?对这些问题的初步说明不仅可以使读者了解电力电子技术的概貌,更主要的是通过这些问题可以使读者了解电力电子技术学习的主要内容及目的和意义,有助于读者更好地学习这门课程。

(1) 电力电子技术的定义

电力电子学(Power Electronics)这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。1974 年,美国的 W. E. Newell 认为电力电子学是一门交叉于电气工程三大领域——电力学、电子学和控制理论之间的边缘学科技术。这一观点被全世界普遍接受。“电力电子学”和“电力电子技术”是分别从学术和工程技术两个不同的角度来称呼的,其实际内容并没有很大的不同。

电力电子技术(Power Electronics Technology)是应用于电力领域的电子技术。具体地说,电力电子技术是一门利用电力电子器件、电路理论和控制技术对电能进行处理、控制和变换的学科,是现代电子学的一个重要分支,也是电工技术的分支之一。

通常所用的电力有交流和直流两种。从公用电网直接得到的电力是交流的,从蓄电池和干电池得到的电力是直流的。从这些电源得到的电力往往不能直接满足要求,需要进行电力处理和变换。电力电子技术所变换的“电力”,功率可以大到数百 MW 甚至 GW,也可以小到数 W 甚至 1W 以下。

电力电子技术和微电子技术是现代电子技术的两个分支。微电子技术主要用于信息处理,其在处理小信号的通信、信息测量、控制等领域取得了显著进展。而电力电子技术则主要用于电力变换,是能源变换和控制的基础,是弱电控制强电的桥梁,它拓宽了微电子技术的应用领域,为现代通讯、电子仪器、计算机、工业自动化、电网优化、电力工程、新能源、航天、核能、超导、激光、海洋、生物等各种高新技术提供高性能、高精度、高效率 and 轻量小型的电控设备、电源设备,成为发展高新技术的基础和关键。

(2) 电力电子技术的主要组成部分

电力电子技术主要由三个部分组成:电力电子器件,变流技术和控制技术。其中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,也就没有电力电子技术。我国电力电子技术远远落后于发达国家,主要受制于电力电子器件。电力电子技术

主要用于电力变换,因此可以认为变流技术是电力电子技术的核心和主体。电力电子器件制造技术的理论基础是半导体物理,而变流技术的理论基础是电路理论。电力电子变流技术,它包括用电力电子器件构成各种电力变换电路以及由这些电路构成电力电子装置和电力电子系统的技术。“变流”不只指交直流之间的变换,也包括直流变直流和交流变交流等变换。

电力电子技术对电力的变换主要包括频率、电压、电流、相数和波形等。电力电子电路及装置通常被叫做变换器(Converter)。按照电能变换功能分类,电力变换通常可分为四大类,即交流变直流、直流变交流、直流变直流和交流变交流。

1) AC/DC 变换器:把交流电变换为固定的或可调的直流电,一般叫做整流器(Rectifier)。

2) DC/AC 变换器:把直流电变换为频率和电压为固定的或可调的交流电,一般叫做逆变器(Inverter)。

3) DC/DC 变换器:可改变电压幅值的大小,实现直流对直流的变换,一般叫做斩波器(Chopper)。

4) AC/AC 变换器:实现从交流到交流的变换,把交流电变换为频率和电压为固定的或可调的交流电。其包括交流调压器(AC Voltage Controller)和周波变换器(Cycloconverter)。

除了上述典型的变换器外,还有由这些变换器组合起来的电力电子变换器,其电力电子变换电路可将几种变换组合到一起,构成复合变换电路,对电能进行变换。实际应用的电力电子装置,如不停电电源(UPS)、开关电源和通用型变频器等采用的都是复合变换电路。

电力电子控制技术是控制理论、微电子技术和计算机技术与电力电子相结合的产物。电力电子控制技术包括电力电子器件的驱动电路、缓冲电路、保护电路和整个控制系统以及相关控制理论和控制技术,如 PWM 控制技术,软开关控制技术等。电力电子控制技术是目前电力电子技术研究领域最活跃的内容。同一电力电子电路,由于控制水平的提高,可以使电路达到更为完善的性能水平。脉冲宽度调制(即 PWM)技术对直流调速、交流调速、开关电源的影响便是一个明显的例子。而有源功率因数校正技术,采用电压电流波形跟踪、输出电压反馈和电压前馈控制,能使普通整流器的功率因数从 0.5 提高到 0.99 以上,变成了无谐波污染的“绿色”用电装置。所以新的控制方式的研究和新的控制工具的使用都是电力电子技术的重要内容。

(3) 电力电子技术与其他学科的关系

电力电子技术和电子学的关系是显而易见的。电子学可分为电子器件和电子电路两大分支,这分别与电力电子器件和电力电子电路相对应。电力电子器件的制造技术和电子器件制造技术的理论基础是一样的,其大多数工艺也是相同的。特别是现代电力电子器件的制造大都使用集成电路制造工艺,采用微电子制造技术,许多设备都和微电子器件制造设备通用,这说明两者同根同源。电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一致的,只是两者应用目的不同,前者用于电力变换和控制;后者用于信息处理。广而言之,电子电路中的功率放大和功率输出部分也可算做电力电子电路。此外,电力电子电路广泛用于包括电视机、计算机在内的各种电子装置中,其电源部分都是电力电子电路。在微电子学中,半导体器件既可处于放大状态,也可处于开关状态;而在电力电子技术中为避免功率损耗过大,电力电子器件总是工作在开关状态,这是电力电子技术的一个重要特征。

电力电子技术广泛用于电气工程中,这就是电力电子学和电力学的主要关系。“电力学”这个术语在我国已不太使用,这里可用“电工科学”或“电气工程”取代之。各种电力电子装置

广泛应用于高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电解、励磁、电加热、高性能交直流电源等电力系统和电气工程中,因此,通常把电力电子技术归属于电气工程学科。电力电子技术是电气工程学科中的一个最为活跃的分支。电力电子技术的不断进步给电气工程的现代化以巨大的推动力,是保持电气工程活力的重要源泉。

控制理论广泛用于电力电子技术中,它使电力电子装置和系统的性能不断满足人们日益增长的各种需求。电力电子技术可以看成是弱电控制强电的技术,是弱电和强电之间的接口。而控制理论则是实现这种接口的一条强有力的纽带。另外,控制理论和自动化技术密不可分,而电力电子装置则是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

随着科学技术的发展,电力电子技术又与电磁学、固态物理学、材料科学、电机工程、现代控制理论、仿真与计算、信号处理和计算机科学等许多学科密切相关。目前电力电子技术已逐步发展成为一门多学科相互渗透的综合性技术学科。

(4) 电力电子技术的发展简介

一般认为,电力电子技术的诞生是以 1958 年美国通用电气公司研制出第一个工业用的普通晶闸管为标志的。40 多年来,电力电子技术的发展大体可划分为两个阶段。1957—1980 年称为传统电力电子技术阶段。在这个阶段,电力电子器件以半控型的晶闸管为主,变流电路以相控电路为主,控制电路以模拟电路为主。1980 年之后至今称为现代电力电子技术阶段。目前全控型电力电子器件已大量使用,PWM 的变流电路已普及,数字控制已逐渐取代了模拟电路。

1) 传统电力电子技术

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。1956 年美国贝尔实验室又发明了晶闸管(SCR),1957 年美国通用电气公司开发出了世界上第一只晶闸管产品,并于 1958 年使其商业化,从此开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代,其标志就是以晶闸管为代表的电力电子器件的广泛应用,有人称之为继晶体管发明和应用之后的又一次电子技术革命。自 1958 年以后,电子技术则向两个分支发展。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,其发展的特点是集成度越来越高,集成规模越来越大,各种功能越来越全。1971 年第一台微处理器的问世使微电子技术发生了第二次革命。目前微电子技术几乎遍及到各种技术领域。另一支是以晶闸管为核心形成对电力处理的电力电子技术,其发展的特点是晶闸管的派生器件越来越多,功率越来越大,性能越来越好。截至 1980 年,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、双向晶闸管等等,从而形成了一个晶闸管大家族。与此同时,各类晶闸管的电压、电流等额定参数均有很大提高,开关特性也有很大改善。传统的电力电子器件已发展到相当成熟的地步。

2) 现代电力电子技术

20 世纪 80 年代以来,微电子技术与电力电子技术各自发展的基础上相结合而产生了新一代高频化、全控型的功率集成器件,从而使电力电子技术由传统的电力电子技术跨入现代电力电子技术的新时代。在 70 年代后期,可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)及其模块相继实用化。在中大容量的变流装置中,传统的晶闸管逐渐被这些新型器件取代。此后,各种高频化全控型器件如雨后春笋般地不断问世,并得到迅速发展。这些器件有:电力场效应晶体管(电力 MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)以及 MOS 控制晶闸管(MCT)等,这些器件的产生和发展已形成了一个新型的全控型

电力电子器件的大家族。新一代器件的问世,使得电力电子变流电路及其控制技术不断革新。例如,各种各样的 PWM 电路、零电流零电压开关谐振电路以及高频斩波电路等已成为现代电力电子技术的重要组成部分。这些新型电路的主要作用是使零频率的直流逆变成各种工作频率的交流,因此电力电子技术已由当年的整流时代进入今天的逆变时代。与新型电路相适应的新一代交流电动机调速装置、不间断电源以及其他电力电子装置随之相继出现。这些运行可靠的电力电子装置在机电一体化的载体上开始进入各个应用领域,电力电子设备已成为世界范围内的一项重要产品。

现代电力电子技术在器件、电路及其控制技术方面与传统电力电子技术相比主要有如下特点:

①集成化。绝大部分全控型器件由许多单元管子并联而成,即一个器件是由许多子器件所集成。例如,一个 1 000A 的 GTO 含有近千个单元 GTO,一个 40A 的电力 MOSFET 由上万个单元并联而成。集成化使电力电子器件单管容量越来越大。如日本三菱开发的 GTO 可达 6 000A/6 000V,光触发晶闸管可达 4 000A/8 000V。为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小,常常把由多个电力电子器件组成的变流电路集成为一个模块,其给装置的安装和维修也带来很大方便。后来,又把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起,构成功率集成电路 (PIC),这不仅大大简化了电力电子系统的设计,而且有利于提高系统的可靠性。功率集成电路是电力电子技术发展的一个重要方向。

②高频化。电力电子技术已进入高频化时代。目前,GTO 的工作频率可达 2kHz,GTR 可达 5kHz,IGBT 可达 100kHz,而电力 MOSFET 已可达上百兆赫。

③全控化。电力电子器件实现全控化,是现代电力电子器件在功能上的重大突破。电力电子器件全控化避免了传统电力电子器件关断时所需要的强迫换相电路。

④控制电路弱电化、控制技术数字化。全控型器件的高频化促进了电力电子控制电路的弱电化。PWM 电路、谐振变流电路以及高频斩波电路,这些本来用于弱电领域的电路而今又成为电力电子电路的主要形式。控制这些电路的技术也逐步数字化。采用计算机控制的全数字化智能型电力电子产品已得到广泛应用。

值得一提的是,在晶闸管出现以前,用于电力变换的电子技术就已经存在了。晶闸管出现前的时期可称为电力电子技术的史前期或黎明期。

1904 年出现了电子管,它能在真空中对电子流进行控制,并应用于通信和无线电,从而开辟了电子技术之先河。后来出现了汞弧整流器,它把汞封于管内,利用对其蒸气的点弧可对大电流进行控制,其性能和晶闸管很相似。从 30 年代到 50 年代,是汞弧整流器发展迅速并大量应用的时期。它广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动,甚至用于直流输电。这一时期,各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。在晶闸管出现以后的相当一段时期内,所使用的电路形式仍然是这些形式。在这一时期,把交流变为直流的方法除汞弧整流器外,还有发展更早的电动机-直流发电机组,即变流机组。和旋转变流机组相对应,静止变流器的称呼从汞弧整流器开始而沿用至今。

3) 电力电子技术的发展展望

在 21 世纪电力电子技术仍将以迅猛的速度发展。以计算机为核心的信息科学将是 21 世纪起主导作用的科学技术之一,这是毫无疑义的。有人预言,电力电子技术和运动控制一起,将和计算机技术共同成为未来科学技术的两大支柱。通常把计算机的作用比做人的大脑,那

么,可以把电力电子技术比做人的消化系统和循环系统。消化系统对能量进行转换(把电网或其他电源提供的“粗电”变成适合于使用的“精电”),再由以心脏为中心的循环系统把转换后的能量传送到大脑和全身。电力电子技术连同运动控制一起,还可比做人的肌肉和四肢,使人能够运动和从事劳动。只有聪明的大脑,没有灵巧的四肢甚至不能运动的人是难以从事工作的。可见,电力电子技术在 21 世纪将会起着十分重要的作用,有着十分光明的未来。

(5) 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、航空航天和现代军事系统,在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。以下分几个主要应用领域加以叙述。

1) 节约能源的应用领域

电能是人类活动的最主要的能源。要使电能的产生、传输和利用达到最佳状态,必须对电能的各项参数进行调节和控制。由于电能在当今社会的普遍应用和节能的紧迫要求,使电力电子技术在国民经济中的地位和作用越来越突出。电力电子技术被誉为节能冠军,具体体现如下:

①降低器件通态压降和采用软开关技术,提高电力电子装置效率而节能。在 20 世纪 80 年代人们就认识到,用硅整流二极管和晶闸管替代水银整流器时,将其导通压降降低可节约大量的电能。如,我国沈阳某铝厂改造后,整流效率从 93.5% 提高到 97.5%,功率因数也从 0.89 提高到 0.906,因而每天可节约电 21 万 kWh。又如,沈阳某冶炼厂经过改造后,年节电量为 950 万 kWh。在低压大电流整流中,目前国外的趋势是采用通态压降非常低的(约 0.3V)肖特基二极管,可进一步提高整流器的效率,节约电能。

②调速节能。采用变频器实现调速节能,对风机、水泵类负载节能潜力很大。目前我国的风机、水泵基本上采用电动机全额运行,通过挡板节流来调节流量与压力,这使能量损失在阀门上,浪费很大。如果改用电力电子变换器实现变频调速,即通过调节电动机的输入能量来调节流量与压力,则可以取得显著的节能效果。根据 1983 年国家经委组织的专家调查组的结论可知,节约电能达 30% 左右。目前我国风机约 700 万台,泵约 3 000 万台,大多数设备负荷率均低于 60%,如都采用调速电机,每年可节电约 145 亿 kWh,节煤约 570 万吨。

③照明节能。目前发达国家照明耗电占总发电量的 20% ~ 30%,我国占 10% ~ 12%。若推广使用采用了电力电子技术的节能灯,每年照明能耗可减少 20% 以上,节能效果非常可观。

2) 电力系统的应用领域

①自动化装置,最有代表性的是同步发电机的励磁调节系统。

②高压直流输电装置。

③静止无功补偿装置。

④新能源的开发和超导储能装置。

⑤固态断路器——切换用的电力电子断路器。

上述电力系统用的电力电子装置,除高压直流输电外,目前统称为柔性交流输电系统 FACTS(Flexible AC Transmission System),这些电力电子装置使交流输电的调节,控制更加可靠、更快和更灵活,大大提高了电力系统运行的可靠性。从这些 FACTS 中看出,电力电子技术在电力系统中的应用是全面的。FACTS 不仅是电力电子器件,它还需要辅以微型计算机、通信和测量手段,同时软件技术也是不可少的。因为需要快速地、完善地测知电网运行条件的

变化,并快速计算出应怎样操作、应有多大补偿及其变化等,然后又要能快速将这些操作信息送到相应设备中去,进行控制调节与操作。

3) 交通运输领域

铁道中广泛采用电力电子技术。电气机车的直流机车中采用整流装置,交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆。在磁悬浮列车中,电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电动机传动外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。

电动汽车的电机靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制,其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车中需要许多控制电机,它们也要靠变频器和斩波器驱动并控制。飞机、船舶需要很多不同要求的电源,因此航空和航海都离不开电力电子技术。如果把电梯也算做交通运输工具,那么它也需要电力电子技术。以前的电梯大都采用直流调速系统,而近年来交流变频调速已成为主流。

4) 工业自动化应用领域

工业中大量应用各种交直流电动机。直流电动机有良好的调速性能,为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置。近年来,由于电力电子变频技术的迅速发展,使得交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美,交流调速技术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,以及矿山牵引等场合都广泛采用电力电子交直流调速技术。一些对调速性能要求不高的大型鼓风机等近年来也采用了变频装置,以达到节能的目的。还有些不调速的电机为了避免起动时的电流冲击而采用了软起动装置,这种软起动装置也是电力电子装置。

电化学工业大量使用直流电源,电解铝、电解食盐水等都需要大容量整流电源。电镀装置也需要整流电源。电力电子技术还大量用于冶金工业中的高频或中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等场合。

5) 各类电源的应用领域

电源是所有电控装置、自动化系统、通信系统和计算机系统的心脏。如何提高电源的质量和可靠性,减小电源的体积,减轻电源的重量,一直是备受人们重视的研究课题。目前控制系统使用的电源,如 UPS 电源、开关电源、变频电源、交流稳压电源等,大多采用了电力电子技术。可以说,电力电子技术主要研究的也就是电源技术。

电力电子技术的发展,使各类稳压电源从线性放大发展到无工频变压器的各种开关电源,从而大大提高了电源效率,并且缩小了体积、减轻了重量,节省了有色金属材料。大功率的超声电源和交换机用的通信电源,采用电力电子技术后,从原来的庞然大物变为一个模块。在电源领域,当前的发展方向是采用有源功率因数校正技术,使之功率因数为 1,并成为对电网无谐波污染的“绿色”电源,同时采用软开关技术,提高电源的变换效率。航天飞行器中的各种电子仪器需要电源,载人航天器中为了人的生存和工作,也离不开各种电源,这些都离不开电力电子技术。

6) 家用电器的应用领域

家用电器的特点是电压比较低,功率一般都只有几十瓦到数百瓦,而又量大、面广。这刚好是小功率电力电子器件最适应的范围,因而促进了电力电子技术在这一应用领域的发展。从调光台灯到电子镇流器的节能灯,从变频空调到变频冰箱,无一不用到电力电子技术。

7) 新能源开发领域

传统的发电方式是火力发电、水力发电以及后来兴起的核能发电。能源危机后,各种新能源、可再生能源及新型发电方式越来越受到重视。其中太阳能发电、风力发电的发展较快。太阳能发电和风力发电受环境的制约,发出的电力质量较差,常需要储能装置缓冲,需要改善电能质量,这就需要电力电子技术。当需要和电力系统联网时,也离不开电力电子技术。

总之,从人类对宇宙和大自然的探索,到国民经济的各个领域,再到我们的衣食住行,到处都能感受到电力电子技术的存在和巨大魅力。这也激发了一代又一代的学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术并使其飞速发展。电力电子技术作为多学科交叉的边缘学科,具有很强的生命力。预计 21 世纪的主导工业第一是信息产业,第二是计算机与电力电子。

(6) 本门课的教学任务与要求

电力电子技术是自动化专业、电气工程及其自动化专业和机电一体化等专业学生必须掌握的一门重要的专业基础课程。电力电子技术的学习将为培养具有开拓性和创造性的人才打好基础、拓宽知识面。

通过本课程的学习,使学生掌握电力电子技术的基础理论和基本电路;熟悉典型电力电子器件的工作原理、外特性及功能,能够根据需要合理地选择和正确地使用电力电子器件;掌握电力电子变流装置实现不同变换的电路拓扑结构、基本工作原理、分析方法和基本计算方法;了解不同性质的负载对电路工作特性的影响;掌握如何为电力电子变流装置选择或设计合理的控制和保护电路;了解电力电子技术在工程技术领域中的应用。

在本门课的学习过程中,应注意以下几点:

1) 以电路为主线——本课程的主要篇幅在于阐述各类电力电子器件所组成的各种电力电子电路,讲解器件原理及特性的目的是为了能分析电路和应用典型电路。故应熟悉器件的外特性及其主要参数,掌握器件的应用技术,器件内部的结构不必多去了解;应着重掌握主电路的组成和工作原理,不同性质的负载对电路工作特性的影响以及主电路的参数计算与元件选择;熟悉典型触发、驱动和缓冲保护电路的组成、工作原理和特点。

2) 重视分析方法——波形分析是电力电子电路的基本分析方法,只有画出各种状态下一一些重要物理量的波形,才能加深对电路原理的定性理解,并在此基础上进行分析计算。因此,要把它作为主要学习内容,这样才能抓住各种电力电子电路分析方法的共性。

3) 注重实践——电力电子技术是一门理论性和实践性均较强的专业技术基础课,要加强实践,从实际应用的角度去分析和掌握各种典型电路。要求学生尽量争取参与一切可能的实验和科研课题等实践环节,以培养动手能力。

本课程的先修课程是电路原理、模拟电子技术和数字电子技术。学习本课程,必须具备电路的基本理论,掌握电路基本定律和分析计算方法;熟悉晶体管、MOS 管的工作原理、特性和典型数字集成电路的逻辑功能及外特性。

第 1 章

电力电子器件

电力电子器件是电力电子技术的基础。本章以常用的电力二极管、晶闸管、电力晶体管、电力 MOSFET 和绝缘栅双极晶体管作为不可控型、半控型和全控型器件的典型,分别介绍各器件的结构、工作原理、外特性、主要参数和使用注意事项,并简单介绍功率模块和功率集成电路以及电力电子器件的串联与并联运行时需要注意的问题。

本章总的要求:了解不可控型器件、半控型器件与全控型器件的特点;深刻理解和掌握电力二极管、晶闸管、电力 MOSFET 和 IGBT;了解其他电力电子器件和功率模块、功率集成电路;了解电力电子器件的串联与并联运行时需要注意的问题。

本章重点是晶闸管、电力二极管、电力 MOSFET 和 IGBT 的外特性、主要参数和使用注意事项。

1.1 电力电子器件概述

在电气设备或电力系统中,直接承担电能的变换或控制任务的电路被称为主电路(Power Circuit)。电力电子器件(Power Electronic Device)是指可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。同我们在学习电子技术基础时广泛接触的处理信息的电子器件一样,广义上电力电子器件也可分为电真空器件和半导体器件两类。但是,自 20 世纪 50 年代以来,除了在频率很高(如微波)的大功率高频电源中还在使用真空管外,基于半导体材料的电力电子器件已逐步取代了以前的汞弧整流器、闸流管等电真空器件,成为电能变换和控制领域的绝对主力。因此,电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件。

1.1.1 电力电子器件的分类

按照电力电子器件能够被控制电路信号所控制的程度,可以将电力电子器件分为以下 3 大类型:

1) 不可控型器件 不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件。这种器件只有两个端子,其基本特性与微电子电路中的二极管一样,器件的导通和关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的,如 PN 结整流管、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其关断,其半控型的称呼即由此而得。器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。普通晶闸管及其大部分派生器件属这一类。

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。这类器件品种很多,目前最常用的是 IGBT 和电力 MOSFET,在处理兆瓦级大功率电能的场合,门极可关断晶闸管 GTO 的应用也较多。

同微电子器件类似,根据电力电子器件内部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 3 种类型。凡由一种载流子参与导电的称为单极型器件,如电力 MOSFET、静电感应晶体管(SIT)等。凡由电子和空穴两种载流子参与导电的称为双极型器件,如 PN 结整流管、普通晶闸管、电力晶体管等。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

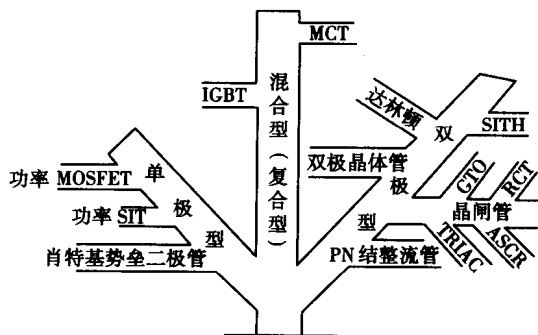


图 1.1 电力电子器件“树”

IGBT 和 MCT 等。图 1.1 所示为电力电子器件“树”。图中,除了普通晶闸管、逆导晶闸管 RCT、不对称晶闸管 ASCR 和双向晶闸管 TRIAC 等为半控型器件外,其余三端器件均为全控型器件。

除了上述分类法以外,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,又可以将电力电子器件(不可控型器件除外)分为电流驱动型和电压驱动型两类。

如果是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,这类电力电子器件被称为电流驱动型电力电子器件,或者电流控制型电力电子器件。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 500kW 以下、380V 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。

如果是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,这类电力电子器件则被称为电压驱动型电力电子器件,或者电压控制型电力电子器件。由于电压控制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,因此电压驱动型器件又被称为场控器件,或者场效应器件。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 SIT 和 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 IGBT、电力 MOSFET 以及 MCT 等,其中电力 MOSFET 多用于小于 10kW 的高频设备中,IGBT 有取代 GTR 之势,用于 GTR 所用的一切领域。

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,但是它们不一定全是单极型器件,其中 SIT 和电力 MOSFET 只有一种载流子导电,属单极型器件;SITH 具有电导调制效应,属双极型器件;而 IGBT 和 MCT 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 100kHz 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。未来的一段时期内,电压控制型器件是电力电子器件的主要代表者。

1.1.2 电力电子器件的使用特点

电力电子器件主要用于高电压、大电流的装置中,为避免过大的功率损耗,电力电子器件稳态时通常工作在饱和导通与截止两种工作状态。饱和导通时,器件压降很小,而截止时它的漏电流小得可以忽略。这样在饱和导通与截止两种工作状态下的损耗都很小,器件近似于理想的开关。但需要指出的是,电力电子器件在开关状态转换过程时并不是瞬时完成的(所需时间称开关时间),而是要经过一个转换过程(称开关过程),在开关过程中电力电子器件会进入放大区工作,使开关过程的功率损耗(称动态损耗或开关损耗)剧增,因此应尽量减少器件开关过程的时间或采用软开关技术降低器件开关损耗。

从使用角度出发,主要可从以下 5 个方面考查电力电子器件的性能特点。

1) 导通压降 电力电子器件工作在饱和导通时仍产生一定的管耗,管耗与器件导通压降成正比,所以应尽量选择低导通压降的电力半导体器件。

2) 运行频率 电力电子器件运行频率除了与器件的最小开、关时间有关外,还受到开关损耗和系统控制分辨率的限制,器件的开、关时间越短,器件可运行的频率越高。

3) 器件容量 器件容量包括输出功率、电压及电流等级、功率损耗等参数。高电压等级的电力 MOSFET,导通电阻大,通态功率损耗大,一般应用在中、小功率的高频装置中。近年来 IGBT 发展很快,IGBT 取代 GTR 已成为现实,甚至有取代 GTO 的趋势。

4) 耐冲击能力 主要是指器件短时间内承受过电流的能力。半可控器件的耐冲击能力远高于全可控器件。例如普通晶闸管在工频半个周期内(10ms)可承受 20 倍以上的额定电流冲击而不损坏。

5) 可靠性 主要是指器件防止误导通的能力。半控型器件一旦受到干扰信号产生了误导通,则无法通过控制信号将其关断,因此在主要承受正向阻断电压的有源逆变系统中,容易造成系统的颠覆。而全控型器件可以通过控制信号迅速关断误导通的器件,因此系统工作可靠性高。

此外,诸如控制功率、可串并联运行的难易程度、价格等也是选择电力半导体器件应考虑的因素。