

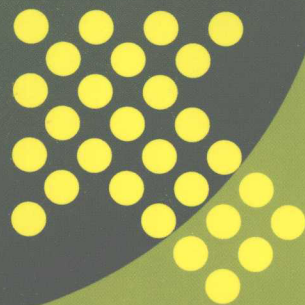
21世纪高等学校规划教材



AI DIANLI DIANZI JISHU

现代电力电子技术

王兴贵 陈伟 张巍 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

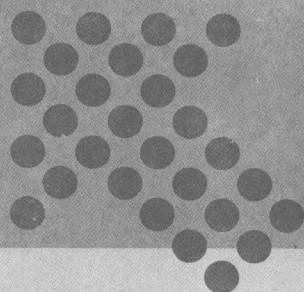
21世纪高等学校规划教材



本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事该领域工作的工程技术人员参考。

XIANDAI DIANLI DIANZI JISHU

现代电力电子技术



本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事该领域工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事该领域工作的工程技术人员参考。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事该领域工作的工程技术人员参考。

内容新颖 质量可靠



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分为 9 章，由电力电子器件、基本电力变换电路、电力电子系统设计、电力电子电路仿真四大部分组成。分别介绍了典型的电力电子器件及其应用；常见四类电力电子变换电路、一些新型的电路拓扑；以 8 个实际应用系统为例，讲述了电力电子系统的技术指标、要求和基本设计方法；然后介绍了电力电子电路仿真基础。

本书可作为普通高等学校电气信息类和其它相关专业的教材，也可作为广大从事电气自动化工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电力电子技术/王兴贵, 陈伟, 张巍编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 8

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5123-0717-9

I. ①现… II. ①王… ②陈… ③张… III. ①电力电子学—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 147308 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13 印张 316 千字

定价 21.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书的宗旨是注重电力电子技术的实际应用,并力求简练。电力电子实际应用一节中的大部分实例来自于工程应用项目。为了减小读者对电力电子器件内容的枯燥无味感,提高对电力电子技术的学习兴趣,本书将器件内容分散在各章分别讲述。

全书共分为9章,第1章讲述电力二极管和晶闸管,在该章中首先对电力电子器件进行了简要概述,以使读者对电力电子器件有一个初步的认识。本章的主要内容放在电力二极管、晶闸管、晶闸管派生器件和晶闸管的触发方面。该部分是第2章和第3章的基础。第2章是相控整流电路,主要讲述由电力二极管和晶闸管组成的整流电路。该章主要介绍了常用的单相、三相、大容量相控整流典型电路的结构和工作原理,介绍了各种整流电路在不同性质负载时的分析方法、特点和应用范围。第3章为晶闸管交—交变换电路,主要讲述由晶闸管组成的各种交流调压、调功和交—交变频电路的结构和工作原理,介绍了各种交—交变换电路在不同性质负载时的分析方法、特点和应用范围。第4章为全控型电力电子器件,主要讲述门极可关断晶闸管(GTO)、功率晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(MOSFET)和绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)等全控型器件,以及它们的驱动电路。第4章对其它一些全控型器件也作了简要的介绍。第5章是逆变电路,主要讲述电压型和电流型逆变电路的工作原理、PWM控制的基本原理和PWM逆变电路的控制方式等内容。第6章为DC—DC变换电路,主要内容有降压变换电路(Buck chopper)、升压变换电路(Boost chopper)、升降压变换电路(Buck-Boost chopper)、丘克变换电路(Cuk chopper)和隔离式DC—DC变换器。第7章为其它电力电子变换电路,主要讲述PWM整流电路、斩控式调压电路、矩阵式变频电路和谐振开关型变换器。第8章为电力电子系统,其内容有电力电子系统的保护、电力电子器件的串并联、电力电子实际应用系统和电力电子器件的散热。在实际应用一节中,讲述了8个实际应用系统,并以这些应用系统为基础,讲述了电力电子系统的技术指标、要求和基本设计方法。第9章为电力电子电路的计算机仿真基础,主要介绍了常用的电力电子电路仿真软件。

本书由王兴贵、陈伟和张巍共同编写。王兴贵编写了绪论、第1章、第4章的4.6节和第8章;陈伟编写了第2章、第3章、第5章和第9章;张巍编写了第4章中的4.1~4.5节、第6章和第7章。全书由王兴贵统稿。书中的大部分插图和文字校对工作由李晓英、赵玲霞等研究生完成。

本书由天水电气传动研究所张建成教授级高工主审,他在审阅过程中提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。在本书的编写过程中得到了兰州理工大学电信学院电力电子课程组全体教师的支持和帮助;本书在出版之前已在电气工程及其自动化专业07、08两级学生中试用,他们也提出了一些宝贵的意见。在此一并表示衷心的感谢。

本书引用了国内外许多专家、学者的著作、论文等文献，大部分在书末所附的参考文献中已标出，在此都表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和错误之处，希望广大读者予以批评指正。意见请寄兰州理工大学电气工程与信息工程学院（邮编：730050），也可发送电子邮件至 chenlin@lut.cn。

编者

2010年6月

目 录

前言	1
绪论	1
第1章 电力二极管和晶闸管	9
1.1 电力二极管	9
1.2 晶闸管及其派生器件	12
1.3 晶闸管的触发电路	17
习题与思考题	18
第2章 相控整流电路	19
2.1 不可控整流电路	19
2.2 单相可控整流电路	25
2.3 三相可控整流电路	36
2.4 交流侧电感对整流电路的影响	45
2.5 整流电路的谐波分析和功率因数	47
2.6 相控整流电路的多重化	51
2.7 相控有源逆变电路	54
2.8 相控整流电路中晶闸管的移相控制	59
习题与思考题	61
第3章 晶闸管交—交变换电路	63
3.1 交—交变换电路的分类	63
3.2 晶闸管交流调压电路	64
3.3 晶闸管交流调功电路和交流电力电子开关	69
3.4 晶闸管交—交变频电路	70
习题与思考题	74
第4章 全控型电力电子器件	75
4.1 门极可关断晶闸管 GTO	75
4.2 电力晶体管 GTR	77
4.3 电力场效应晶体管 MOSFET	80
4.4 绝缘栅双极型晶体管 IGBT	84
4.5 其它全控型电力电子器件介绍	87
4.6 全控型电力电子器件驱动	91
习题与思考题	94
第5章 逆变电路	96
5.1 逆变电路的分类和换流方式	96

5.2	电压型方波逆变电路	97
5.3	电流型逆变电路	102
5.4	PWM 逆变电路	104
5.5	多重化逆变电路	118
5.6	多电平逆变电路	120
	习题与思考题	125
第 6 章	DC—DC 变换电路	126
6.1	降压变换器	126
6.2	升压变换器	130
6.3	升—降压变换器	132
6.4	丘克变换器	134
6.5	多相多重 DC—DC 变换器	135
6.6	带隔离变压器的 DC—DC 变换器	136
	习题与思考题	140
第 7 章	其它电力电子变换电路	141
7.1	PWM 整流电路	141
7.2	斩控式交流调压	147
7.3	矩阵式变频电路	149
7.4	谐振开关型变换器	152
	习题与思考题	155
第 8 章	电力电子系统	156
8.1	电力电子系统的保护	156
8.2	电力电子器件的串并联	166
8.3	电力电子器件的散热	168
8.4	电力电子实际应用系统	169
	习题与思考题	193
第 9 章	电力电子电路的计算机仿真基础	195
9.1	概述	195
9.2	常用仿真软件介绍	196
	参考文献	201

绪 论

电力电子学科是如何形成的, 电力电子技术的概念、发展及应用领域等, 这些问题是在学习这门课时首先需要了解的。

1. 电力电子技术

要知道电力电子技术就必须先了解电力技术和电子技术。

电力技术是一门涉及发电、输电及电力应用的科学技术。发电、输电及电力应用技术的理论基础是电磁学(电路、磁路、电场、磁场), 利用电磁学基本原理处理发电、输配电及电力应用的技术称为电力技术。

电子技术是与电子器件、电子电路以及由各种电子电路所组成的电子设备和系统有关的科学技术, 它的理论基础也是电磁学。电子技术又称为电子学, 它是研究电子器件以及利用电子器件来处理信息电路中电信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收等问题的技术, 把研究这些问题的电子技术又称为信息电子技术。

电力电子技术是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术, 也就是应用于电力领域的电子技术。它是由电力技术、电子技术和控制技术综合而成的一门新兴学科。

2. 电力电子技术的发展

电力电子技术是伴随着电力电子器件的出现和发展而发展的。目前广泛应用的电力电子器件大都从晶体三极管发展而来, 1948年美国贝尔实验室的肖克莱等人发明了能够放大信号和功率的晶体三极管, 开创了半导体电子学的新时代。晶体三极管的诞生也标志着电力电子技术学科发展基础已经建立。一般认为, 电力电子技术学科的诞生是以1957年美国通用电气公司在晶体三极管的基础上研制出的第一个晶闸管为标志的。可以将电力电子技术的发展划分为三个时期。

20世纪50和60年代为形成期, 在这一时期, 电力电子技术的关键技术几乎全部得以完善, 电力电子技术学科就是在这一时期建立起来的。采用的电力电子器件主要是晶闸管及其派生器件, 由于其优越的电气和控制性能得以广泛应用, 主要应用于直传动、各类大容量电源等方面。晶闸管为半控型器件, 即只能通过门极控制其导通, 而不能控制其关断。因此, 对电力电子电路的控制采用相控技术, 这种控制方式使得电力电子装置对电网的谐波污染严重, 并且装置体积庞大。

20世纪70和80年代为发展期, 门极可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor, GTO)、电力双极晶体管(Bipolar Transistor, BJT)、电力场效应晶体管(MOS Field-effect Transistor, MOSFET)、绝缘栅极双极型晶体管(Insulated-gate Bipolar Transistor, IGBT)等全控型器件迅速发展, 电力变换的各种形式都得以很好地实现。由于这些器件既可以通过控制极控制其导通, 也可以控制其关断。因此, 它们的应用将电力电子技术推向了一个崭新的阶段。控制方式不再全是相控方式, 而主要是以全控型器件为电力电子电路基础的脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)方式。PWM控制技术的应用, 使电路的控制性能得以改善, 使过去一些难以实现的功能也得以实现。

20世纪90年代以后为繁荣期,在这一时期各种全控型器件有了极大发展,各种结构的全控型器件大量涌现,种类繁多,如IGBT、场控晶闸管(MOS-Controlled Thyristor, MCT)、集成门极换流晶闸管(Integrated Gate-Commutated Thyristor, IGCT)等代表了新一代全控型器件的复合型器件,它们综合了其它器件的优点,在电压、电流容量上有了大的突破。特别是IGBT,它的电压可达6.5kV、电流可达1500A。由全控型器件构成的电力电子装置的容量大大提高,在中小功率领域已基本取代了晶闸管。整个装置呈现出了全控化、集成化和高频化的特点。一些集驱动、控制、保护电路和功率器件为一身的功率集成电路也相继产生,并应用于小功率装置。随着电力电子器件和其它相关学科的进一步发展,电力电子技术将会进入一个更加辉煌的时代。

3. 电力电子技术的应用前景

电力电子技术经过50多年的发展,已广泛应用于电气传动、电力系统、各类电源、家用电器等领域。它对改造传统产业、发展高新技术产业都起着非常重要的作用。电力电子技术已成为当今高新技术系统中不可缺少的关键技术之一,它的应用领域几乎涉及国民经济的各个部门。

(1) 电气传动。电动机是广泛应用于工业、农业、国防、科技等行业的主要动力设备,电动机负荷约占总发电量的60%~70%,而应用于电动机调速的电气传动(直传动、交流传动)是电力电子技术最重要的应用领域。电力电子技术是电气传动的基石,也是现代电气传动装置的支柱。

1) 直传动。在直传动中,改变直流电动机的电枢电压调速是直传动的主要方法,要调节直流电动机的电枢电压就需要有专门的可控直流电源。在晶闸管发明之前,直传动系统由交流电动机、直流发电机和直流励磁发电机构成。交流电动机拖动直流发电机,直流发电机发出直流电供给需要调速的直流电动机,通过调节发电机的励磁电流就可改变其输出电压,从而调节电动机的转速。为了给直流发电机和电动机励磁,还需专门设置一台励磁发电机。这种系统设备多、体积大、费用高、效率低、噪声大,维护不便。自从1957年晶闸管问世以后,给变流技术带来了根本性的变革,可控直流电源可以从由晶闸管组成的各种整流器得到,通过控制晶闸管的移相角就能够改变直流电压的大小,从而实现直流电动机的平滑调速。由晶闸管组成的变流器是静止式的,它克服了旋转变流机组的缺点,并且使系统的动态性能大大提高。

晶闸管变流器的控制采用的是相控方式,20世纪70年代以后,随着全控型电力电子器件的出现,采用PWM控制方式的高性能直传动系统广泛用于中小功率系统。由于PWM调速系统的开关频率较高,仅靠电机的电枢电感就能起到很好的电流滤波作用,电枢电流容易连续,系统的调速范围宽、动态性能好、效率高。

2) 交流传动。直传动和交流传动在19世纪先后诞生,到20世纪上半叶,鉴于直传动具有优越的调速性能,所以高性能的可调速传动都采用直流电动机,交流调速系统的性能始终无法与直传动系统相匹敌。然而直流电动机本身也存在着明显的缺陷,由于直流电动机的电刷和换相器需要经常地检查和维修,换相火花使得直流电动机的应用环境受到限制,换相能力还限制了直流电动机的容量和转速等。但交流电动机,特别是鼠笼式异步电动机,具有结构简单、制造容易、价格便宜、坚固耐用、转动惯量小、运行可靠、维护方便和使用环境不受限制等特点。

由于电力电子技术以惊人的速度向前发展,随之带动了交流传动技术日新月异的进步。交流传动经过近 30 年的发展,目前它正成为电气传动的主流。

20 世纪 70 年代是交流传动发展的初级阶段,在这一期间,功率元器件主要以晶闸管为主。因此,基于半控型器件的交流传动主电路都需要有强迫换流环节,这样的主电路结构形式决定了交流传动控制技术只能停留在交一直一交 180° 和 120° 导电型的变频器,以及基于直流调速控制技术的串级调速,如串联电感式电流型变频器、带有辅助晶闸管换流的电压型变频器、绕线式异步电动机串级调速等。

从 20 世纪 70 年代末到 80 年代中期,在功率器件方面,产生了一代全控型高频化的功率器件,使交流传动主电路在结构、工作方式和性能方面都有了巨大的变化。在主电路结构上,整流部分用二极管整流器取代了晶闸管整流桥;在逆变部分,由 GTR 和 GTO 取代了晶闸管及其庞大的强迫换流器件,也使其控制方式由原来的相控方式,改为 PWM 控制方式,此控制技术的应用,大大改善了逆变器的性能。

从 20 世纪 80 年代中期到现在,各种全控型器件都有了突飞猛进的发展,特别是 IGBT 这种兼有 MOSFET 和 GTR 两者优点的复合型器件,它的发展非常迅速。由于这种器件具有较高的工作频率、宽而稳定的开关安全工作区以及简单的驱动电路,受到了交流传动研究者的青睐。在交流传动中 GTR 已基本让位于 IGBT,在通用变频器中基本上采用的是 IGBT 功率器件。同时,兼备了 GTO 和 IGBT 优点的 IGCT 也在中压大功率变频器中占有了一席之地。

近年来中压变频器也得到了迅速发展。以 IGBT、GTO 和 IGCT 为功率元器件基础,形成了目前几种形式的中压变频器:以 GTO 为功率器件的电流型中压变频器,以 IGCT 或高压 IGBT 为功率器件的三电平中压变频器和以低压 IGBT 为功率器件的单元串联多电平中压变频器。

在大功率交流传动中仍然使用由晶闸管组成的交—交交流电路。而随着全控型器件容量的不断增大,基于全控型器件的各类变频器的容量也在不断增大。目前采用 IGBT 的变频器,其功率可达 1000kW ;采用 GTO 的变频器,其功率可达 10000kW 。电气传动中应用较多的是晶闸管、GTO 和 IGBT。其它的如 IGCT、PIC、MOSFET 等器件也应用在不同功率等级的场合。

(2) 电力系统。在电力系统的发电、输电、用电等主要环节中,电力电子技术起着重要的作用,它对电力系统的现代化有着不可估量的促进作用。发电机的励磁系统要采用由电力电子器件构成的变流器。在长距离输电系统中,为了提高输电效率和确保系统稳定性采用高压直流输电。这就需要将发电站产生的交流电变为直流电,而用电设备大多数是交流电负载,这样经远距离传输后需再将直流电变成交流电。将交流电变为直流电和将直流电变成交流电,都需要由电力电子器件构成的变流器来实现。在用电端,大量的电能都要经电能变换和处理后才供给负载,在发达国家其比例已超过 60% ,这些电能的变换和处理都是以电力电子技术为主来进行的。并且随着用电设备种类的增多,这一比例还会继续增加。在改善电能质量、防止对电网污染等的装置中,所采用的大都为电力电子设备。

1) 柔性交流输电。电力输电系统已进入大系统、超高压远距离输电、跨区域联网的阶段,社会经济的发展促使现代输电网的管理和运营模式发生变革,对其安全、稳定、高效、灵活运行控制的要求日益提高,从而急需发展新的调节手段,提高其可控性;另一方面,大

功率电力电子、控制理论、计算机信息处理等技术的蓬勃发展又为输电控制手段的改善和升级换代不断提供新的可能。在这种情形下,美国 N. G. Hingorani 博士在 1986 年提出了柔性交流输电系统 (flexible AC transmission system, FACTS) 的概念。N. G. Hingorani 博士最早对 FACTS 的定义是:基于晶闸管控制器的集合,包括移相器、先进的静止无功补偿器、动态制动器、可控串联电容、带载调压器、故障电流限制器以及其它有待发明的控制器。随后大量的学者加入这一领域的研究,不断丰富 FACTS 概念的内涵和外延。

经过 20 多年的发展,现在通常认为 FACTS 的基本内涵是:基于采用现代大功率电力电子技术构成的各种 FACTS 控制器,结合先进的控制理论和计算机信息处理技术等,实现对交流电网运行参数和变量更加快速、连续和频繁的调节,即所谓柔性(或灵活)输电控制,进而达到提高输电系统运行效率、稳定性和可靠性的目的。因此,FACTS 的基石是大功率电力电子技术。

FACTS 基于高速大容量电力电子技术,因而与传统的解决方法相比具有更快的响应速度、更好的可控性和更强的控制功能。FACTS 技术使得对大型互联电网的控制能力更加快速、频繁、连续、综合和灵活,能实现对电网潮流的精确控制并大大提高电网的动态性能和稳定水平,从而将传统的纯粹依靠机械开关的交流输电系统提升到融合电力电子技术、信息处理技术和先进的控制技术的柔性交流输电系统。

DFACTS (Distribution FACTS) 技术又称为用户电力技术 (custom power) 或定制电力技术,是 FACTS 技术在配电领域的延伸,目前典型的 DFACTS 装置主要有电力有源滤波器、配电静止补偿器、动态电压调节器、固态切换开关、统一电能质量控制器等。

2) 高压直流输电。直流输电系统即是以直流电的方式实现电能传输的系统。目前电力系统中的发电和用电的绝大部分均为交流电,要采用直流输电必须进行换流。也就是说,在送端需要将交流电变换为直流电(整流)。经过直流输电线路将电能送往受端,而在受端又必须将直流电变换为交流电(逆变),然后才能送到受端的交流系统中去,供用户使用。送端进行整流变换的地方叫整流站,而受端进行逆变变换的地方叫逆变站。整流站和逆变站可统称为换流站。实现整流和逆变变换的装置分别称为整流器和逆变器,统称为换流器。直流输电技术的发展与电力电子技术的发展有着密切的关系。目前,绝大部分直流输电工程采用普通晶闸管变流器进行换流。

直流输电系统的系统结构可分为两端(或端对端)直流输电系统和多端直流输电系统两大类。两端直流输电系统是只有一个整流站(送端)和一个逆变站(受端)的直流输电系统,即只有一个送端和一个受端,它与交流系统只有两个连接端口,是结构最简单的直流输电系统。多端直流输电系统与交流系统有 3 个或 3 个以上的连接端口,它有 3 个或 3 个以上的换流站。目前世界上已运行的直流输电系统大多为两端直流输电系统。

两端直流输电系统的构成主要有整流站、逆变站和直流输电线路三部分。对于可进行功率反送的两端直流输电系统,其换流站既可以作为整流站运行,又可以作为逆变站运行。功率正送时的换流站在功率反送时为逆变站,而正送时的逆变站在反送时为整流站。整流站和逆变站的主接线和一次设备基本相同(有时交流侧滤波器配置和无功补偿有所不同),其主要差别在于控制和保护系统的功能不同。

多端直流输电系统可以解决多电源供电或多落点受电的输电问题,它还可以联系多个交流系统或者将交流系统分成多个孤立运行的电网。在多端直流输电系统中的换流站,可以作

为整流站运行,也可以作为逆变站运行,但作为整流站运行的换流站总功率与作为逆变站运行的总功率必须相等,即整个多端系统的输入和输出功率必须平衡。

多端直流输电系统比采用多个两端直流输电系统要经济。但其控制保护系统以及运行操作较复杂。今后随着全控型电力电子器件的应用以及在实际工程中对控制保护系统的改进和完善,采用多端直流输电的工程将会更多。

(3) 各类电源。电源的种类繁多,如电化学处理、电解、电镀所使用的大容量直流电源和脉冲电源,冶金工业中的高、中频感应电源,不间断电源(UPS),各种车辆中所使用的辅助电源,各类家用电器中的电源等。这些电源都是由电力电子器件构成的。

1) 高频感应电源。感应加热电源是利用电磁感应原理把电能转化为热能的设备。它与传统的加热设备相比,具有效率高、加热速度快、温度容易控制、作业环境好、无污染等优点,所以几十年来得到了迅速的发展。现在感应加热技术已广泛应用于金属熔炼、透热、热处理和焊接等过程。此外,随着电力电子技术的不断发展,其应用领域也随之扩大,应用范围越来越广,如微波炉、电磁炉、热水器等已进入人们的日常生活。

感应电源的发展是与电力电子技术的发展密切相关的。20世纪50年代以前,感应电源主要有工频感应炉、电磁倍频器、中频发电机组和电子管振荡器。这类传统电源装置效率较低、热惯性大、寿命短、工作频率可调范围小,不能满足不同工艺、负载的要求。20世纪50年代以后,随着电力电子技术的发展,以功率半导体器件为基础的固态感应加热电源技术不断成熟,产生了静止型晶闸管中频感应加热电源,并逐步取代了原有的中频发电机组。20世纪80年代以来相继出现了一大批全控型电力电子半导体器件,为新型高频感应电源的研制提供了坚实的基础。

随着电力电子技术的发展,感应加热电源的结构经过不断完善,已形成一种固定的AC/DC/AC变换形式,主要由整流器、滤波器、逆变器和控制电路组成。三相工频电经整流器后变换为直流电,直流电经滤波器后,由逆变器将直流电转变成高频交流电供给负载。为了使金属能加热到一定温度,在金属内必须有足够大的涡流,为此在金属内必须感应出足够大的电动势。感应电动势与磁通、频率有关。感应圈中流过的电流越大,其产生的磁通也就越大,因此提高感应线圈中的电流可以使工件中产生的涡流加大;同样的发热效果,频率越高,磁通及感应线圈中的电流就可以减小,目前高频感应电源的频率可达 $7 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6$ Hz,在高频感应电源中所使用的电力电子器件主要是电力MOSFET和IGBT。

2) 脉冲电源。脉冲电源主要应用于脉冲电镀、工业废气处理、污水处理、高频脉冲感应加热、材料处理、电火花加工、静电除尘、臭氧的制取和表面热处理等。在军事上,脉冲电源还用于电磁轨道炮、电磁脉冲模拟、粒子束武器、液电爆炸等场合。不同的应用场合,对电源的要求各不相同。根据输出特性的不同,脉冲电源基本上分为能量密度型、时间间隔型和组合型三类。

脉冲电源的发展在促进电力电子技术发展的同时受制于电力电子技术的发展。随着全控型电力电子器件的出现,产生了斩波型脉冲电源。斩波型脉冲电源的原理是将前级的直流电经过由大功率开关器件组成的变换器后,输出周期和占空比可控的大功率脉冲。

3) 开关稳压电源。电源是电子设备重要的组成部分,它的性能直接影响着电子设备的可靠性,而且电子设备的故障大多来自电源,因此,电源越来越受到人们的重视。现代电子设备所使用的电源有线性稳压电源和开关稳压电源两大类。在功率开关管问世以前,线性稳

压电源是最常用的稳压电源。线性稳压电源是指起电压调整作用的器件始终工作于线性放大区的一种稳压电源,是发展最早、应用最广泛的一种电源。它主要由工频变压器、整流器、滤波器、电压调整器组成。这种电源的主要缺点是体积大、变换效率低。开关电源的调整管工作在开关状态,它具有效率高、体积小、稳压范围宽等优点。

随着电力电子技术和大规模集成电路的快速发展,各种高性能的开关稳压电源得以迅速发展。决定开关电源体积的主要因素是电抗器、变压器等磁性器件和电容器。若提高开关电源的频率,这些器件的体积就会变小,电力电子开关器件的开关频率是制约开关电源频率提高的主要因素。在开关电源中使用最多的是 MOSFET。另外,软开关技术也广泛应用于开关电源,以减小开关器件的开关损耗。目前开关电源的工作频率高达几百千赫兹、甚至数兆赫兹。

(4) 可再生能源。一般将能源分为一次能源和二次能源。一次能源是指可以从自然界直接获取的能源,如煤炭、石油、天然气、水能、太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能等。二次能源是指无法从自然界直接获取,必须经过一次能源的消耗才能得到的能源,如电能。

一次能源又可分为可再生能源和非可再生能源两大类。可再生能源指那些取之不尽的能源,如太阳能、风能、水能、生物能、地热能和海洋能等,它们在自然界可以循环再生。非可再生能源是指经过千百万年形成的、短期内无法恢复的能源,如煤炭、石油和天然气等。

煤炭、石油和天然气是当今世界中一次能源的三大支柱,构成了全球能源结构的基本框架。但人类在开发利用能源的历史长河中,以石油、天然气和煤炭等化石能源为主的时期,仅是一个不太长的阶段,它们终将走向枯竭而被新的能源所取代。因此人类必须及早寻求新的替代能源。传统的非可再生能源所需的基础设施价格昂贵,成本不断提高,而且还会带来严重的环境污染。因此全世界都在积极寻求新的“清洁”发电方式。如今像光伏发电、风力发电、地热发电、生物质能等新能源得到了快速发展。这些新能源的利用都离不开由电力电子器件组成的变流装置。

1) 风力发电。风力发电是利用风能来发电,风力发电的运行方式主要有两种。一种是独立运行的风力发电系统,另一种是并网发电系统。独立运行的风力发电系统主要使用在无电网的偏远地区,这种系统的单机容量较小,一般为 100W~200kW;并网风力发电系统是作为常规电网的电源,与电网并联运行,它是大规模利用风能的最经济方式,该风力发电系统的单机容量一般在 200kW 以上。由众多并网风力发电系统可组成风力发电场。

现代风力发电系统一般分为两类,采用恒速恒频技术的风力发电系统和采用变速恒频技术的风力发电系统。恒速恒频风力发电系统采用的是普通异步发电机,发电机工作在超同步状态,且转差率的变化范围很小。这种系统的优点是结构简单,其缺点是无法进行最大功率点跟踪、在正常运行时无法对电压进行控制、发出的电能随风速而波动。

随着电力电子技术的发展,变速恒频风力发电系统克服了恒速恒频系统的众多缺点,已成为主流风力发电系统。变速恒频风力发电系统主要由风轮、发电机、电能变换单元和控制单元组成。变速恒频风力发电系统中使用的发电机主要有鼠笼式异步发电机、双馈异步发电机和同步发电机。由鼠笼式异步发电机和由同步发电机组成的变速恒频系统相似,都是由整流器将发电机定子绕组发出的交流电变换成直流电,再由逆变器将直流电变换成工频交流电。

双馈异步发电机由转子绕线式异步发电机和接于转子侧的交流励磁变频器组成,通过变频器调节励磁电流的幅值、频率和相位以控制发电机输出交流电的频率和电压。尽管发电机的转速是随风速而变化的,但通过控制转子电流的频率就可以将发电机输出电压的频率稳定在所需要的工频。在这种系统中,通过采用先进的控制技术,可以对发电机的有功功率和无功功率进行独立调节。调节有功功率可以调节风力机转速,实现最大风能的跟踪控制;调节无功功率可以调节电网的功率因数,提高发电系统的稳定性。该系统中的变频器仅流过转差功率,这样就减小变频器的容量,但变频器必须能够四象限运行。由此可见,电力电子技术 in 风力发电系统中起着重要作用,也是其中的关键技术。

2) 光伏发电。太阳能是人类可利用的最直接的清洁能源,它既是近期急需的能源补充,又是未来能源结构的基础,太阳能直接辐射地球的能量丰富、分布广泛、可以再生、不污染环境,是理想的替代能源。开发利用太阳能具有重大战略意义。其中,太阳能光伏发电是太阳能最重要的一个应用。光伏发电是将太阳光的光能直接转化为电能的一种发电形式。在1839年,法国物理学家贝克勒尔(Becquerel)发现,用两片金属浸入溶液构成的伏打电池,光照时会产生额外的伏打电势,他把这种现象称为“光生伏打效应”。1954年美国贝尔实验室开发出效率为6%的硅太阳电池。目前,光伏发电中的太阳电池仍然是以晶体硅太阳电池为主。光伏发电系统主要由光伏电池板、电力电子变换器、控制器和电能储存器组成。光伏电池板由若干光伏电池组经串、并联形成的光伏阵列构成。

太阳电池板所发出的电能是随天气、环境、负荷等变化而不断变化的直流电,这种电能的质量和性能都较差,很难直接供给负载使用。这就需要由电力电子器件组成的变换器将其变换成适合负载使用的电能。在光伏发电系统中所使用的变换器主要有DC—DC(直流变直流)和DC—AC(直流变交流)两种。它们主要应用于太阳能最大功率跟踪、蓄电池充电、直流升降压和交流逆变。变换器是光伏发电系统的重要设备,电力电子技术当然也是该发电系统的关键技术。

太阳电池的光电转换效率较低,一般多晶硅太阳电池的光电转换效率约为12%~14%。为了解决这一问题,一方面要靠能量转换效率高的光电材料,另一方面就是要通过控制实现太阳电池的最大功率输出。太阳电池的输出特性受光照强度和外界温度的影响较大,而在相同的光照强度和外界温度条件下,当太阳电池的工作电压不同时,输出功率也不相同。由于日照变化的不确定性、太阳电池阵列的温度变化和太阳电池 $U-I$ 曲线的非线性,致使太阳电池阵列的最大功率点是随着环境的变化而时刻变化的。太阳能最大功率跟踪是通过变换器调节负载功率,改变光伏电池板的输出电流和电压,使光伏电池工作在最大功率点处。

储能是光伏发电系统中的重要部分,特别是独立运行的光伏发电系统,储能环节是必不可少的组成部分。在光伏发电系统中应用最多的储能设备是蓄电池。在白天把太阳能转化成电能,通过充电器给蓄电池充电,将电能储存起来,晚上再把蓄电池中储存的电能释放出来使用。对蓄电池充电过程进行有效控制,有利于蓄电池充电效率和使用寿命的提高。蓄电池充电器一般采用的是DC—DC变换器,通过对变换器输出电流或电压的控制,实现对蓄电池不同方式的充电,如恒流充电、恒压充电、快速充电和智能充电等。

(5) 绿色照明。据统计,大约有10%的电能被消耗在照明上,并且随着经济的发展和人们生活水平的提高,照明用电量逐年大幅度增长,照明用电的迅速增加不仅增大了电能

的消耗，而且还会产生大量污染。在 1991 年，美国环保局就提出了节约能源、保护环境、提高照明质量的“绿色照明”概念。“绿色照明”是 20 世纪 90 年代初国际上对节约电能、保护环境照明系统的形象说法。许多发达国家和发展中国家先后制定了“绿色照明工程”计划，并取得了显著效果。电力电子技术广泛应用于绿色照明系统，光效更高的光源、高频发生器、电磁感应装置、整流器、调光器和控制器等均用到了电力电子技术。近年来所谓的智能照明控制系统，就是采用了先进的电力电子技术对灯具进行智能调光和控制，使照明系统工作在既节能又合理的状态。电力电子技术在这一领域的应用，对缓解能源压力 and 环境保护有着积极的促进作用。

以上列举了一些典型的电力电子技术的应用领域，随着科学技术的不断发展，电力电子技术将进一步渗透到航天、国防、工农业生产、文教卫生、办公室自动化乃至家庭的各个角落。在 21 世纪，电力电子技术将会更加快速地发展，并且它在国民经济各行各业中的作用将会更加重要。

第1章 电力二极管和晶闸管

电力电子器件是电力电子技术的基础，因此在学习各种电力变换电路之前必须先掌握各种常用电力电子器件的特性和正确使用方法。电力电子器件种类繁多，其结构、工作原理、应用范围也各不相同。为了减小读者对所有器件集中学习时枯燥无味的感觉，本书将各类电力电子器件根据其主要的應用范围，分别置于不同章节的变换电路之前进行分散讲解，以便读者提高学习兴趣，更好地理解和应用相关内容。

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，实现电能变换与控制的电子器件。它的主要特点是：电压高、电流大，有些器件的电压可达几千伏、电流可达几千安；工作于开关状态；自身的功率损耗较大。

电力电子器件的种类多而杂，根据器件的开关控制特性可以分为以下三类：

(1) 不可控器件：不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件。这类器件自身没有通断控制功能，它的通断完全由它在电路中所承受的电压和电流来决定，如电力二极管。

(2) 半控型器件：通过控制信号只能控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件，它的关断完全由它在电路中所承受的电压和电流来决定，如晶闸管。

(3) 全控型器件：通过控制信号既可以控制其导通，也可以控制其关断的电力电子器件，如绝缘栅双极晶体管 IGBT。

根据电力电子器件控制信号的性质不同又可分为两类：

(1) 电流驱动型（电流型）：通过电流信号来控制其导通或者关断的器件，如电力晶体管。

(2) 电压驱动型（电压型）：通过电压信号来控制其导通或者关断的器件，如 MOS-FET。

1.1 电力二极管

电力二极管 (Power Diode)，也称作功率二极管，是在电力电子装置中应用最多的电力电子器件之一，在各类电力电子电路中几乎都有它的影子。电力二极管是不可控器件，即不能用控制信号来控制器件的导通和关断，其通断状态仅取决于主电路。常用的封装形式如图 1-1 所示，有螺栓形、平板形和模块形三种。图 1-2 所示为电力二极管的电气图形符号。

1.1.1 电力二极管的结构与工作原理

电力二极管的结构（见图 1-3）与

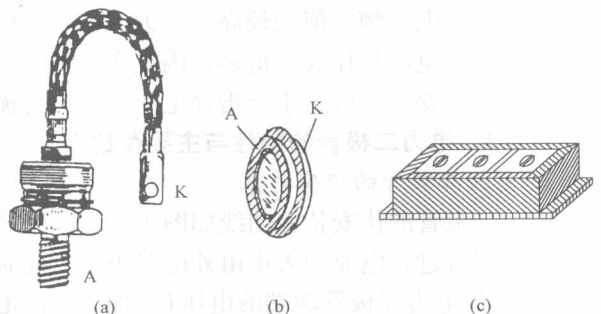


图 1-1 电力二极管常用的封装形式

(a) 螺栓形；(b) 平板形；(c) 模块形

基本原理是建立在 PN 结的基础上的, 这与信息电子中的二极管一样。从结构上看, 电力二极管 PN 结面积比信息电子中的二极管要大。



图 1-2 电力二极管的电气图形符号

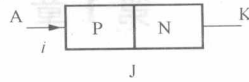


图 1-3 电力二极管的结构

将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一块硅片上, 就形成 PN 结。在 P 区和 N 区的交界面处, 两种载流子的浓度差很大, 因而产生多数载流子的扩散运动——P 区的空穴向 N 区扩散, N 区的自由电子向 P 区扩散。扩散到 N 区的空穴与 N 区的自由电子复合, 扩散到 P 区的自由电子与 P 区的空穴复合, 交界面两侧只有不能自由移动的正负离子, 称这一区域为空间电荷区。空间电荷区中, 一侧带正电, 另一侧带负电, 形成由 N 区指向 P 区的内电场 (或称自建场)。在内电场的作用下, 引起少数载流子的漂移运动, 同时阻止多数载流子向对方区域扩散。随着漂移运动的进行, 空间电荷区的宽度变窄, 内电场的场强减弱, 又使多子的扩散易于进行。扩散运动和漂移运动这一对既相互联系又相互矛盾的运动持续进行, 在温度一定且无外电场作用下, 扩散运动与漂移运动最终达到动态平衡, 空间电荷区宽度一定, 形成 PN 结。

PN 结具有单向导电性。当 PN 结外加正向电压时, 外电场将多数载流子推向空间电荷区, 使其变窄, 削弱了内电场, 原来的平衡被打破, 使扩散运动加强, 而漂移运动减弱。由于外加电源的作用使得扩散运动源源不断进行, 从而形成正向电流, 称此时的 PN 结处于导通状态。

当 PN 结外加反向电压时, 外电场与内电场的方向一致, 加强了内电场, 扩散运动减弱, 而漂移运动加强, 形成反向电流。由于参与漂移运动的少数载流子的数目极少, 故反向电流很小, 称此时的 PN 结处于截止状态。

当 PN 结上流过的正向电流较小时, 二极管的电阻主要是作为基片的低掺杂 N 区的欧姆电阻, 其阻值较高且为常量, 因而管压降随正向电流的上升而增加; 当 PN 结上流过的正向电流较大时, 注入并积累在低掺杂 N 区的少数空穴浓度将很大, 为了维持半导体电中性条件, 其多子浓度相应大幅度增加, 使得电阻率明显下降, 也就是电导率大大增加, 这就是电导调制效应。电导调制效应使得 PN 结在正向电流较大时压降仍然很低。

电力二极管的基本原理就是基于 PN 结的单向导电性。用于电力变换电路中的电力二极管, 其电压、电流额定值均较高。电力二极管正向导通时的电压降约为 $1\sim 2\text{V}$, 这与变换电路的额定工作电压相比要小得多, 因此在分析计算时常忽略其正向电压降。当二极管承受反向电压时, 只要反向电压小于击穿电压, 反向电流就很小, 一般可忽略不计。

1.1.2 电力二极管的特性与主要参数

1. 电力二极管的伏安特性

电力二极管的伏安特性曲线如图 1-4 所示。当它承受的正向电压大于门槛电压 U_{TO} 时, 有正向电流流过, 电流的大小由外电路决定, 此时电力二极管处于正向导通状态。与正向电流 I_F 对应的电力二极管两端的电压 U_F 即为正向电压降。当它承受反向电压时, 只有很小的反向漏电流, 电力二极管处于反向截止状态。如果增加反向电压, 当增至某一临界电压值 (反向击穿电压 U_{BR}) 时, 反向电流急剧增大, 电力二极管发生击穿。