

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI DIANZI
JISHU

电力电子技术

石新春 杨京燕 王 毅 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI

DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

石新春 杨京燕 王 毅 编
朱 凌 主审



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书由电力电子器件、基本电力变换电路和电力电子技术在电力系统中的应用三大部分组成，共分为9章。其主要内容包括电力电子器件、相控整流电路、直流斩波电路与交流电力控制电路、无源逆变电路、PWM控制技术、高压直流输电、静止无功补偿装置、有源电力滤波器、电力电子技术在同步电机中的应用等。本书在讲述电力电子学基本理论的基础上，突出了应用技术所占的比重。

本书既可作为电气工程、自动化、电力电子等专业的本科教材，也可作为相关专业研究生的参考教材，同时可作为相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 石新春, 杨京燕, 王毅编. —北京: 中国电力出版社, 2006

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 7-5083-4082-5

I. 电… II. ①石…②杨…③王… 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(2006)第007179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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年3月第一版 2006年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13印张 317千字

印数0001—3000册 定价19.80元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

电力电子技术又称为功率电子技术,它是用于电能变换和功率控制的电子技术。电力电子技术是弱电控制强电的方法和手段,是当代高新技术发展的重要内容,也是支持电力系统技术革新和技术革命发展的重要基础,并成为节能降耗、增产节约、提高生产效能的重要手段。微电子技术、计算机技术以及大功率电力电子技术的快速发展,极大地推动了电工技术、电气工程和电力系统的技术发展和进步。

电力电子器件是电力电子技术发展的基础。正是大功率晶闸管的发明,使得半导体变流技术从电子学中分离出来,发展成为电力电子技术这一专门的学科。而 20 世纪 90 年代各种全控型大功率半导体器件的发明,进一步拓展了电力电子技术应用和覆盖的领域和范围。电力电子技术的应用领域已经深入到国民经济的各个部门,包括钢铁、冶金、化工、电力、石油、汽车、运输以及人们的日常生活。功率范围大到几千兆瓦的高压直流输电,小到不足 1W 的手机电池充电器,电力电子技术的应用随处可见。据统计,在发达的工业化国家,电厂发出的电能有 60% 以上要经过各种电力电子装置变换以后才最终使用。电力电子技术提高了用电效率,降低了能源的消耗,方便了人们的生活,提高了劳动生产率。各个电力电子设备的生产厂家形成了相关的产业群体,是国民经济的重要组成部分。

电力电子技术在电力系统中的应用也有长足的发展,例如高压直流输电(HVDC)、静止无功补偿(SVC)、大型发电机静止励磁、抽水蓄能机组的软启动、超高压交流输电线的可控串联补偿(TCSC)等等。电力电子技术是电力系统中发展最快、最具活力的组成部分。电力电子装置与传统的以机械式开关操作的设备相比,具有动态响应快,控制方便、灵活的特点,能够显著地改善电力系统的特性,在提高系统稳定、降低运行风险、节约运行成本方面具有很大的潜力。最近,电力系统的研究发展的热点——灵活交流输电系统就是以电力电子技术在电力系统的应用为主要的技术手段,以改进和提高电力系统的可控性和灵活性为主要目的。各种用户的特制电力供电方式也离不开电力电子技术。

本书由电力电子器件、基本电力变换电路和电力电子技术在电力系统中的应用三大部分组成。第 1 章系统介绍了电力电子器件的发展概貌,各种典型电力电子器件的原理、结构、特性和参数;第 2~5 章讲述了四种基本电力变换电路的原理及其控制方法;第 6~9 章以电力系统为背景,介绍了各种电力变换电路的典型应用,即高压直流输电、静止无功补偿、有

源电力滤波、同步电机控制。相对于其他电力电子教材，本书突出了应用技术所占的比重，体现了作为一门工程技术，基础理论与应用技术并重的特点。

本书力求概念清晰、结构严谨、深入浅出、内容新颖，并结合电力系统的特点，做到理论联系实际，照顾到行业特点和实用性。本书适合电气工程专业、自动化专业的本科学生学习，也适合从事相关工作的技术人员阅读和参考。

本书由华北电力大学石新春教授、杨京燕教授和王毅博士合作编写，由朱凌副教授审阅。在编写过程中得到了许多同仁们的关怀和支持，并参阅了许多同行专家的论著和文献，在此一并表示感谢。

由于时间仓促、作者水平所限，书中错误在所难免，敬请同行和广大读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月于华北电力大学

目 录

前言

绪论	1
第1章 电力电子器件	6
1.1 概述	6
1.2 电力二极管	9
1.3 晶闸管及其派生器件	13
1.4 门极可关断晶闸管	20
1.5 电力晶体管	22
1.6 功率场效应晶体管	25
1.7 绝缘栅双极晶体管	28
1.8 其他新型电力电子器件	32
习题	35
第2章 相控整流电路	37
2.1 单相可控整流电路	37
2.2 三相可控整流电路	46
2.3 变压器漏抗对整流电路的影响	53
2.4 有源逆变电路	56
2.5 电容滤波的不可控整流电路	59
2.6 整流电路的谐波与功率因数	64
2.7 其他可控整流电路	69
习题	71
第3章 直流斩波电路与交流电力控制电路	73
3.1 DC-DC 变换电路概述	73
3.2 非隔离型 DC-DC 变换电路	74
3.3 隔离型 DC-DC 变换电路	79
3.4 交流电力控制器	86
习题二	91
第4章 无源逆变电路	93
4.1 概述	93
4.2 电压型逆变电路	95
4.3 电流型逆变电路	99
4.4 谐振型逆变电路	101
习题四	106

第 5 章 PWM 控制技术	108
5.1 概述	108
5.2 逆变电路的 SPWM 控制方法	109
5.3 逆变电路的其他 PWM 控制方法	119
5.4 多电平逆变器的 PWM 控制	125
习题五	127
第 6 章 高压直流输电	128
6.1 高压直流输电概述	128
6.2 换流器的工作原理	132
6.3 高压直流输电系统的谐波抑制及无功补偿	135
6.4 高压直流输电的基本控制原理	140
习题六	143
第 7 章 静止无功补偿装置	144
7.1 概述	144
7.2 晶闸管控制电抗器 (TCR)	148
7.3 晶闸管投切电容器 (TSC)	154
7.4 静止同步补偿器 (STATCOM)	158
习题七	163
第 8 章 有源电力滤波器	164
8.1 有源电力滤波器概述	164
8.2 瞬时无功功率理论与谐波电流检测	171
8.3 并联型有源电力滤波器	177
习题八	184
第 9 章 电力电子技术在同步电机中的应用	185
9.1 同步发电机励磁系统	185
9.2 同步电动机励磁用整流器	188
9.3 无换向器电动机	191
习题九	200
参考文献	201

绪 论

1. 电力电子技术的概念

电力电子技术是以电力变换为主要研究内容的一门工程技术。对电能进行变换和控制的目的是为了更方便、更为有效地使用电能,使电能更好地为人们服务。按照美国 IEEE 电力电子学会的定义,电力电子技术是有效地使用功率半导体器件,应用电路和控制理论以及分析开发工具,实现对电能高效的变换和控制的一门技术,它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。国际电工委员会认为,电力电子技术就是应用于电力领域的电子技术,它是电气工程三大领域:电力、电子和控制之间的边缘学科。被学术界普遍承认的倒三角(见图 0-1)即形象地描述了这一特征。

电力电子技术通常分为器件的制造技术和电力电子电路的应用技术即变流技术。器件制造技术包括各种功率半导体器件的设计、测试、模型分析、工艺及数字仿真等。电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础。变流技术包括用电力电子器件构成各种电力变换电路和对这些电路进行控制的技术,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。器件制造技术和变流技术是相互支持、相互促进的两个领域。

电能分为直流(Direct Current—DC)和交流(Alternating Current—AC)两种类型,电力变换(Power Conversion, 也称作功率变换)的基本类型就是这两种电能之间的四种变换形式,如图 0-2 所示。

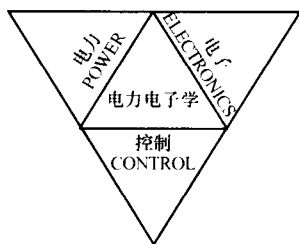


图 0-1 描述电力电子学的倒三角形

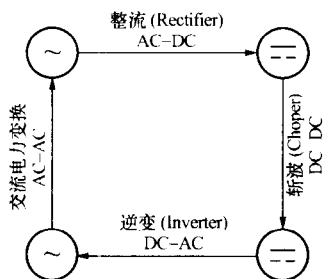


图 0-2 电力变换的基本类型

电力电子技术用于电力变换,而信息电子技术用于信息处理,但二者的关系非常密切。首先,在器件的制造技术上,它们的理论基础相同、工艺方法相似。其次,在电路分析方法上也有许多相通之处,例如数字仿真方法等。在信息电子技术中,半导体器件可处于放大状态也可处于开关状态;而在电力电子技术中,为了避免功率损耗过大,电力电子器件总是工作在开关状态,这是它们的一个显著区别。

电力电子技术具有以下特点:

(1) 以小信号输入控制很大的功率输出,使电力电子设备成为强弱电之间接口。这样,电子技术和计算机的新成果可以通过这一接口移植到传统工业产品,可以促进传统工业产品的更新换代。通常把计算机比作是现代化生产设备的大脑,电动机和各种电磁执行元件是手足,

而电力电子装置就是支配手足动作的肌肉和神经。

(2)在电力电子装置中,半导体器件工作在开关状态,保证了各类电力电子设备的节能性能。我国缺电严重,但另一方面用电严重浪费,矛盾十分尖锐。电力电子技术的应用正是解决这一矛盾的有力措施。

(3)作为一种应用技术,电力电子技术的特点是综合性强、应用涉及面广以及与工程实践联系密切。

2. 电力电子技术的发展

(1)电力电子器件的发展。

电力电子器件是电力电子技术的基础,也是电力电子技术发展的“龙头”。从1958年美国通用电气(GE)公司研制出世界上第一个工业用普通晶闸管开始,电能的变换和控制从旋转的变流机组和静止的离子变流器进入由电力电子器件构成的变流器时代,这标志着电力电子技术的诞生。到了20世纪70年代,晶闸管开始形成由低压小电流到高压大电流的系列产品。同时,非对称晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等晶闸管派生器件相继问世,广泛应用于各种变流装置。由于它们具有体积小、质量轻、功耗小、效率高、响应快等优点,其研制及应用得到了飞速发展。

20世纪70年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极型晶体管(GTR)和电力场效应晶体管(Power MOSFET)为代表的全控型器件迅速发展。全控型器件的特点是:通过对门极(基极、栅极)的控制既可使其开通又可使其关断。此外,这些器件的开关速度普遍高于晶闸管,可用于开关频率较高的电路。这些优越的特性使电力电子技术的面貌焕然一新,把电力电子技术推进到一个新的发展阶段。

在20世纪80年代后期,以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的复合型器件异军突起。IGBT是MOSFET和GTR的复合。它把MOSFET的驱动功率小、开关速度快的优点和GTR通态压降小、载流能力大的优点集于一身,性能十分优越,使之成为现代电力电子技术的主导器件。

为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小,常常把若干个电力电子器件及必要的辅助元件做成模块的形式,这给应用带来了很大的方便。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)。目前功率集成电路的功率都还较小,但这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

由于普通晶闸管不能自关断,属于半控型器件,因而被称作第一代电力电子器件。GTR、GTO、功率MOSFET等自关断、全控型器件被称为第二代电力电子器件。第二代器件都是按少数载流子导电或多数载流子导电的机理工作的,不可能同时满足各项高性能要求。因此电力电子器件的发展方向是多子导电与少子导电相结合形成双导电机理器件,或者功率混合集成器件,如IGBT、MCT、HVIC等就是其发展的产物,被称为第三代电力电子器件。

(2)电力变换电路的发展。

电力电子电路可以完成交一直、直一交、直一直、交一交等变换,其中整流电路和逆变电路应用最广。20世纪70年代以前,整流电路占主导地位;20世纪80年代后逆变电路的应用日益广泛,但是整流电路仍占重要地位。这除了因为整流器应用仍然很广外,还因为在逆变器和斩波器中,都需要直流电源,这些直流电源绝大多数都是通过交流电源整流得到的。在整流电源中,目前常用的几乎都是晶闸管相控整流电路或二极管整流电路。晶闸管相控整

流电路需要电网提供大量的无功功率,同时也给电网带来严重的谐波污染。二极管整流电路虽然输入电流的基波没有滞后,位移因数近似为 1,但谐波电流却很大,给电网造成了严重的污染。

电力电子装置对电网造成的污染类似现代大工业对地球的污染,也在经历先污染后治理的过程。目前这种污染仍日趋严重,但人们对防止和治理这种污染的意识已越来越强。治理电力电子装置污染的方法有两种,一种是设法补偿无功功率和谐波,另一种是使电力电子装置本身不消耗无功功率,不产生谐波。补偿无功功率和谐波的装置主要有静止无功功率补偿装置和电力有源滤波器。

与先产生谐波并消耗无功功率、再去进行补偿的方法相比较,更为积极的办法是让电力电子装置既具有所需要的功能,又不消耗无功功率,不产生谐波。为达到这个目的,最基本的方法就是在整流电路中采用自关断器件,即采用高功率因数整流装置,并对其进行 PWM 控制。这样既可使输入电流无谐波,又可使其功率因数为 1。在电力电子装置中,随着开关频率的提高,开关损耗也将成比例地增加,开关损耗成了制约开关频率提高的重要原因,同时也成为器件能量损耗的主要部分,使变流器效率降低。另外,随着变流器的高频化,电磁干扰(EMI)问题也日益突出。除无功功率和谐波问题外,电磁干扰问题是电力电子装置所产生的又一公害。

20 世纪 80 年代后期出现的软开关(Soft Switching)电路利用谐振原理,可使开关器件在零电压或零电流的条件下动作,因而在理论上可以把开关损耗降为零。零电压开关电路直流侧电压较高,需要采用耐压高的器件,而零电流开关电路的负载电流和谐振电流重叠流过器件,使器件需要的电流容量较大。用这种软开关电路可以使开关损耗降到很低,因而可以使电路的工作频率大大提高。同时,这种电路也可有效地防止电磁干扰。因此,近年来对软开关电路的研究很受关注。

电力电子电路最基本的拓扑形式,如各种最基本的整流电路、逆变电路及周波变换电路等在水银整流器时代就已经确立。晶闸管出现以后,并没有立即产生一些新的电路拓扑形式,直到 20 世纪 80 年代以来,随着自关断器件的普遍应用,电力电子电路向高频化方向发展,有关电力电子电路拓扑的研究才又活跃起来。近年来一些新的电路拓扑形式如谐振型逆变电路、矩阵式变频电路等不断涌现。人们也期待着通过对电力电子电路拓扑的不断研究,发现一些更新的拓扑形式,使电力电子装置的性能更为优良。

(3) 控制技术的发展。

20 世纪 80 年代以来,在电力电子技术的发展过程中,就控制技术而言,一些控制方式占有重要地位。例如: PWM 控制方式;应用静止/旋转坐标变换的矢量控制及瞬时无功功率控制;现代控制理论,如自适应控制、采用状态观测器的控制及无差拍控制、无传感器控制;各种非线性控制,如模糊控制、神经元网络控制等。

晶闸管电路的控制主要采用相位控制方式,这使其在可控整流和有源逆变电路中有比较低的功率因数,同时有比较大的高次谐波电流,对电网产生“污染”,造成了负面影响。与晶闸管电路的相位控制方式相对应,采用全控型器件的电路的主要控制方式为脉冲宽度调制(PWM)方式。PWM 控制对推动电力电子技术的发展起了历史性的作用,其应用范围遍及斩波、逆变、整流、变频及交流调压等各种电路。现在各种新的控制方式仍不断出现,矢量控制使交流调速的控制性能可以与直流调速相媲美,使电气传动技术面目一新。由于电力电子

电路良好的控制特性及现代微电子技术的不断进步,使得几乎所有新的控制理论、控制方式都得以在电力电子装置上应用或尝试。因此,近年来电力电子装置控制技术研究十分活跃,各种现代控制理论、专家系统、模糊控制及神经元控制都是研究热点,这使得电力电子系统的控制技术发展到一个崭新的阶段。

电力电子系统控制技术的进步在很大程度上依赖于微处理器。微处理器性能的迅速提高使许多原来无法实现的控制方式得以实现。特别是 20 世纪 80 年代后期出现的具有浮点小数运算能力的 32 位 DSP 芯片,其运算速度快、功能强,已广泛运用于各种电力电子装置。目前基于微处理器的数字控制技术应用范围越来越广,在许多范围已取代了原有的模拟控制。

3. 电力电子技术的主要应用领域

进入 21 世纪,随着新理论、新器件、新技术的不断涌现,特别是与微电子(计算机与信息)技术的日益融合,电力电子技术的应用领域也必将不断地得以拓展。目前,电力电子技术的应用已从机械、石化、纺织、冶金、电力、铁路、航空、航海等领域,进一步扩展到汽车、现代通信、家用电器、医疗设备、灯光照明等领域。以下分几个应用领域简要介绍。

(1) 一般工业。

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太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启动时的电流冲击而采用了软启动装置,这种软启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应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领域。

(2) 交通运输。

电气化铁道中广泛采用电力电子技术。电气机车中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。

电梯的驱动控制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。

(3) 电力系统。

电力电子技术在电力系统有着非常广泛的应用。据统计,发达国家在用户最终使用的电能中,有 60% 以上的电能经过一次以上电力电子变流装置的处理。电力系统在通向现代化的进程中,电力电子技术是关键技术之一。可以毫不夸张地说,如果离开电力电子技术,电力系统的现代化是不可想象的。

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。近年发展起来的柔性交流输电(FACTS)也是依靠电力电子装置才得以实现的。

无功补偿和谐波抑制对电力系统有重要的意义。晶闸管控制电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止同步补偿器(STATCOM)、有源电力滤波器(APF)等新型电力电子装置具有更为优越的无功功率和谐波补偿的性能。直流电源和不间断电源(UPS)还用作发电厂和变电所的保护电源、事故电源和备用电源。

(4) 计算机与家用电器。

计算机和各种电子装置都需要不同电压等级的直流电源供电。过去都是采用线性稳压电源或整流电源。现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。由于高频开关电源体积小、重量轻、效率高,现在已逐渐取代了线性电源。采用晶体管镇流器的照明灯发光效率高,节省电能显著,通常被称为“节能灯”,正逐步取代传统的白炽灯和日光灯。电视机、变频空调、洗衣机、微波炉等也都采用了电力电子技术。电力电子技术的广泛应用使我们的生活变得越来越方便。

(5) 新能源。

传统的发电方式是火力发电、水力发电和核能发电,为了环保和建立循环性经济,各种可再生能源和新型发电方式越来越受到重视。其中风力发电、太阳能发电和氢燃料电池较受重视。这些新型的发电方式都需要电力电子技术参与调节与控制,当这些发电方式发出来的电能参与储能和联网时亦离不开电力电子技术。

总之,电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙的探索到国民经济各个环节和部门以及人们的衣食住行都有电力电子技术的参与和贡献。现代化的社会和生活几乎每时每刻都离不开电力,而电力电子技术则是人们高效、方便地使用电能的方法和手段。电力电子技术研究的是各种电能的变换方式,也可称之为电源技术;它又十分重视变换过程中的节能与效率,因此,电力电子技术又是一种重要的节能技术。

第1章 电力电子器件

半导体器件不仅用于信息及信号处理,而且也用于电气与电子电路中电流与功率的控制。用于电能的变换与控制时,这些器件必须承受相当大的电流与电压,通常被称为功率半导体器件或电力电子器件,电力电子器件是电力电子技术的基础。本章首先简述电力电子器件的基本类型与特点,然后重点介绍几种应用比较广泛的电力电子器件的工作原理、特性、参数、应用情况及发展趋势等。

1.1 概 述

1.1.1 电力电子器件的概念与特征

电力电子器件与普通半导体器件一样,目前它所采用的主要材料仍然是单晶硅,但由于电压等级和功率要求不一样,制造工艺也有所不同。以开关方式应用于主电路之中,对电能进行变换和控制的半导体器件称为电力电子器件。其主要特点为:

(1) 电力电子器件具有体积小、质量轻、寿命长、耗电省、耐振性好等优点。

(2) 与用于电子电路的半导体器件相比,由于电力电子器件直接用于电力电路,所以承受电压、电流的能力是它的重要参数,提高它所能处理电功率的能力是电力电子器件制造和应用的首要问题。

(3) 电力电子器件一般都工作在开关状态,目的是为了减小本身的损耗,高效地完成对电能的变换与控制。

(4) 实际应用中,电力电子器件还需要控制电路、驱动电路以及必要的散热措施等,才能构成一个完整的电力电子系统。

1.1.2 电力电子器件的基本类型

近 50 年来,电力电子器件经历了非常迅猛的发展,从大功率电力二极管、半控型器件晶闸管到导通关断都可控的全控型器件,从驱动功率较大的电流控制器件到驱动功率很小的电压控制器件,从低频开关到高频开关,从低压小功率到高压大功率,各种电力电子器件如表 1-1 所示,对其可从以下三个角度进行分类。

表 1-1

各种类型的电力电子器件

类 型			名 称	
			中文名称	英文名称
分立器件	不可控器件		电力二极管	Power Diode
	半控型器件		晶闸管(可控硅)	Thyristor (SCR)
	全控型器件	电流控制器件	电力晶体管(双极型晶体管)	GTR (BJT)
			门极可关断晶闸管	GTO

续表

类 型			名 称	
			中文名称	英文名称
分立器件	全控型器件	电压控制器件	电力场效应晶体管	Power MOSFET
			绝缘栅双极型晶体管	IGBT
			场控晶闸管	MCT
			静电感应晶体管	SIT
			静电感应晶闸管	SITH
集成模块			功率模块	Power Module
			单片集成模块	System on a Chip
			智能功率模块	IPM

(1) 根据电力电子器件的可控程度可分为:

1) 不可控器件: 具有整流的作用而无可控的功能, 主要是电力二极管(Power Diode), 包括普通整流二极管和肖特基二极管等。

2) 半控型器件: 通过控制信号只能控制其开通而不能控制其关断, 所以称其为半控型器件, 主要是晶闸管及其派生器件(如逆导晶闸管、不对称晶闸管和双向晶闸管等)。

3) 全控型器件: 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, 主要有门极可关断晶闸管(Gate-Turn-Off Thyristor—GTO)、电力晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(Power MOSFET)和绝缘栅双极晶体管(Insulated-Gate Bipolar Transistor—IGBT)等。

(2) 根据器件参与导电的载流子情况可分为:

1) 单极型器件: 由一种载流子参与导电的称为单极型器件, 又称为多子型器件, 如功率MOSFET、静电感应晶体管(SIT)等。

2) 双极型器件: 由电子和空穴两种载流子参与导电的称为双极型器件, 又称为少子型器件, 包括电力二极管、达林顿管、GTR、晶闸管、GTO、静电感应晶闸管(SITH)等。

3) 复合型器件: 由单极型器件和双极型器件组成的器件称为复合型器件, 如IGBT和MOS控制晶闸管MCT。

(3) 根据驱动信号的不同可分为:

1) 电流驱动型器件: 电流驱动型器件使用电流控制其开关, 它们都是双极性器件, 如电力二极管、电力晶体管、晶闸管及其派生器件。

2) 电压驱动型器件: 通过控制端施加一定的电压信号来实现开通和关断的器件被称为电压驱动型器件。由于它是用场控原理进行控制的电力电子器件, 因此, 它也称为场控电力电子器件, 如功率MOSFET、IGBT、SIT、SITH、MCT等。

以上各种类型器件的特点为:

(1) 对于单极型器件, 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。对于复合型器件, 工作频率也远高于双极型器件, 如IGBT的工作频率可达20kHz以上。

(2)对于双极型器件,由于具有电导调制效应,使其导通压降很低,导通损耗较小,这一点优于单极型器件。

(3)对于电流驱动型器件,控制极输入阻抗低,驱动电流和驱动功率较大,电路也比较复杂。

(4)对于电压驱动型器件,因为输入信号是加在门极的反偏结或者是绝缘介质上的电压,输入阻抗很高,所以驱动功率小,驱动电路简单;另外,电压驱动型器件工作温度高,抗辐射能力强。所以这类器件的发展前景十分广阔。

1.1.3 电力电子器件的模块化与集成化

最初的电力电子器件都是单管结构,电力电子设备由分立器件组成。功率器件安装在散热器上,附近安装驱动、检测、保护等印刷电路板。用分立元器件制造电力电子产品,设计周期长、可靠性差、成本高。因此电力电子产品逐步向模块化、集成化方向发展,其目的是使设备尺寸紧凑、实现电力电子装置的小型化。集成化还可缩短设计周期,并减小互连导线的寄生参数等。

电力电子器件的模块化和集成化,先后经历了功率模块、单片集成式模块、智能功率模块(Intelligent Power Module—IPM)等发展阶段。其中单片集成和IPM中的功率器件与驱动、保护、控制等功能集成为一体,又被称为功率集成模块(Power Integrated Circuit—PIC)。

将若干功率开关器件和快速二极管组合成标准的功率模块,是集成电力电子技术发展进程中最初步的集成化、模块化。因为这种功率模块没有驱动、控制、保护、检测、通信等功能。现在国内外已经开发出MOS管、晶闸管(SCR)、IGBT等器件的功率模块,以及用于变频器、功率因数校正电路专用的主电路功率模块。

随着半导体集成电路技术的进步和发展,使功率器件、驱动、控制、保护等电路集成在一个硅片上成为可能,形成所谓单片集成(System on a chip—SOC)模块。单片集成模块结构简单,应用方便,但由于传热、隔离等问题还没有很好解决,因而用单片集成技术将高电压、大电流功率器件和控制电路集成在一起的难度较大,目前这种集成方法只适用于小功率电力电子电路中。

智能功率模块IPM是一种混合集成方法,将具有驱动、控制、自保护、自诊断功能的IC与电力电子器件集成,封装在一个绝缘外壳中,形成相对独立、有一定功能的模块。功率半导体器件和IC安装在同一基片上,用引线键合互连,并应用了表面贴装技术。目前IPM在逆变器控制的电机驱动系统已获得了广泛应用,并正在向高性能、多功能、高集成化、大功率方面发展。

1.1.4 电力电子器件的应用领域

电力电子器件的飞速发展大大拓宽了电力电子技术的应用范围。进入20世纪90年代后,随着我国黄河小浪底和长江三峡水电站工程的建设,损耗较低的高压直流输电已成为重要的大容量远距离输电方式和联网手段。随着我国铁路电气化率的提高,高速电力机车的应用已不遥远。此外,感应加热和高频热处理、动态无功补偿、大型电解电镀、UPS电源、家用电器、办公设备、电机拖动等领域都离不开电力半导体器件。各种电力电子器件的功率等级和开关速度各不相同,应用范围也不尽相同。图1-1列出了常用电力电子器件的容量、频率及应用的范围。

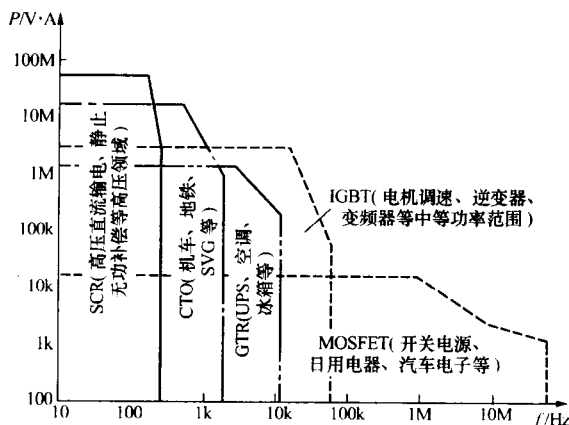


图 1-1 电力电子器件允许的开关频率与允许功率范围及主要应用领域

1.2 电力二极管

电力二极管 (Power Diode) 通常也被称为半导体整流管 (Semiconductor Rectifier—SR) 或电力整流管 (Power Rectifier)，在 20 世纪 50 年代初期获得应用，成为出现最早、结构最简单的电力电子器件，至今仍广泛应用于各种电力电子设备中。1947 年 PN 结理论被提出，成为电子技术发展的一个重要里程碑。电力二极管实际上就是由 PN 结加上电极引线和管壳封装构成，而其他种类繁多的半导体器件也是由最基本的结构 PN 结组成，所以首先回顾一下 PN 结的基本原理，然后再介绍电力二极管的工作特性和参数等。

1.2.1 PN 结的工作原理

1. PN 结的形成

制作电力电子器件的半导体材料有硅和锗 (还有碳单晶)，锗和碳现在应用较少，主要的电力电子器件都是由半导体材料单晶硅制成的。单晶硅的结构是排列非常整齐的硅原子构成的，每个硅原子最外层有 4 个电子，它和四周相邻的硅原子共用电子形成电子对，成为化学上稳定的最外层 8 个电子结构，这样硅原子就以共价键形成晶体结构。硅原子对最外层电子约束较强，所以单晶硅的导电能力不强。但在一定的温度下，单晶硅外层共有的电子，由于热运动转化为电子的动能，其中少数电子就可能挣脱束缚而成为自由电子，使得在原来的共价键的位置上留下了空位，即空穴。由于含有空穴的原子带正电，它将吸引相邻原子的价电子，使它挣脱原来的共价键的束缚去填补前者的空穴，从而在自己的位置上形成新的空穴。这样，当电子按某一方向填补空穴时，就像带正电的空穴按相反的方向移动。所以说空穴也是一种载流子，并且在半导体里是与电子成对出现的。挣脱束缚的电子可以碰撞另一个电子，占据它的位置，使被碰离的电子成为新的自由电子，从而形成电子的传递运动，这就是另一种载流子。单晶硅材料在常温条件下两种载流子都不多，即导电能力较差，所以叫半导体。

半导体的基本类型有：① 本征半导体：纯净不掺杂的半导体。在本征半导体中的电子—空穴对数量是不大的，导电能力很差。但是如果在在本征半导体中掺入了少量其他元素，它的导电特性就会发生很大的变化，因而获得重要的用途。② P 型半导体：如果在硅单晶体中掺

入少量的硼元素(或铟、镓等三价元素), 硼元素与硅元素形成的共价键时, 由于硼元素外层只有 3 个电子, 所以自然形成了一个空穴。这样掺入硼杂质后, 空穴的浓度比电子的浓度大得多, 这种半导体称为 P 型半导体。在这种半导体中, 空穴是多数, 称为多数载流子, 而电子相对的称为少数载流子。③ N 型半导体: 如果在硅单晶体中掺入少量的磷元素等五价元素, 磷元素外层五个电子和相邻的 4 个硅原子形成共价键时, 还多出 1 个电子, 这个电子不受束缚, 很容易变成自由电子。这样掺入磷杂质后, 电子的浓度比空穴的浓度大得多, 这种半导体称为 N 型半导体。在这种半导体中, 多数载流子是电子, 而空穴相对的称为少数载流子。P 型半导体和 N 型半导体虽然两种载流子浓度不等, 但整个晶体仍是电中性的, 并不带电。

如果把一块单晶硅一半制作成 N 型半导体, 另一半制作成 P 型半导体, 在 P 型半导体和 N 型半导体的交界处, 载流子因受浓度差作用会产生由高浓度区向低浓度区的扩散运动。一些电子会从 N 区向 P 区扩散, 留下了不能移动的带正电荷的离子(带正电的原子); 同理, 一些空穴从 P 区向 N 区扩散, 留下了不能移动的带负电荷的离子。这些不能移动的正负电荷叫做空间电荷, 由其形成了由 N 区指向 P 区的内电场。载流子因受内电场作用而产生漂移运动, 即 N 区会有空穴载流子受内电场吸引沿内电场方向漂移回 P 区, P 区也有电子逆内电场方向漂移回 N 区。随着扩散运动的进行, 空间电荷区不断加宽, 内电场逐渐增强, 漂移运动也会增强, 直到漂移运动增强到与扩散运动处于动态平衡时, 空间电荷区即相对稳定, PN 结也就形成了(如图 1-2 所示)。

2. PN 结的单向导电性

若给 PN 结外加正向电压(P 区接外加电压的正端、N 区接负端)时, 则外加电压建立的外部电场与 PN 结内部电场方向相反, 大大削减了内部电场。这时扩散运动占优, P 区和 N 区的多数载流子又将通过交界面进行扩散运动, 在外电路中形成较大的正向电流(电流大小主要由电源电压和外电路的电阻决定), PN 结表现为正向低阻态, 这种状态称为 PN 结的导通。

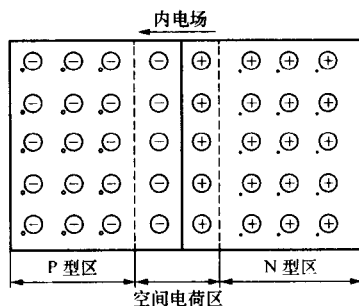


图 1-2 PN 结的形成

若给 PN 结外加反向电压(P 区接外加电压的负端, N 区接正端)时, 外加电压加强了内电场, 空间电荷区变宽, 强烈阻止多子向对方扩散, 虽有利于少子的漂移, 但因少数数目少, 漂移电流很小, 称为反向漏电流。PN 结表现为反向高阻态。

PN 结的反向耐压能力是有限制的, 当施加的反向电压过大时, 会造成 PN 结的反向击穿。按照机理的不同, 有雪崩击穿和齐纳击穿两种形式。如果反向电流未被限制住, 继续增加, 就可能会导致热击穿, 造成永久性损坏。

以上说明了 PN 结的单向导电性, 即正向导通, 反向截止。但为什么当 PN 结正向导通时, 电流很大, 压降却很低(只有 1V 左右)呢? 这是因为通过正向大电流时注入基区(通常是 N 型材料)的空穴浓度(称为少子)大幅度的增加, 这些载流子来不及与电子中和就到达了二极管的负极。为了维持半导体电中性的条件, 多子的浓度也要大幅度的增加。这就意味着, 在大注入的条件下原始基片的电阻率实际上大大地下降了, 也就是电导率大大增加了。这种现象被称为基区的电导调制效应。

3. PN 结的电容效应

PN 结中的电荷随外加电压而变化, 呈现电容效应, 称为结电容。PN 结高频工作时需考