



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力电子技术

徐德鸿 马 皓 汪樾生 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力电子技术

徐德鸿 马 皓 汪樾生 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书主要内容包括：电力电子器件基本特性与使用方法，隔离与非隔离的直流-直流变换电路的原理和分析方法、动态模型及其控制，直流-交流变换技术，交流-直流变换技术，交流-交流变换技术，软开关谐振变换技术，磁芯元件及其应用基础，电力电子技术的应用等。

本书可作为电气工程与自动化专业、电子信息工程专业的本科生以及相关专业的研究生教材，也可供从事电力电子装置、变频器、电源等开发设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/徐德鸿,马皓,汪樾生主编. —北京:科学出版社,2006
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 7-03-016873-9

I. 电… II. ①徐…②马…③汪… 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 009888 号

责任编辑:马长芳 潘继敏 / 责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽 源 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 8 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 8 月 第 一 次 印 刷 印张: 25 1/4

印数: 1—3 000 字数: 475 000

定 价: 32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

20 世纪人类最伟大的 20 项科技成果是电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料,所有这些科技成果几乎都不同程度地应用了电力电子技术,电力电子技术在推动科学技术的发展中发挥了重要作用。电力电子器件经历从结型控制器件(如晶闸管、功率 GTR、GTO)到场控器件(如功率 MOSFET、IGBT、IGCT)的发展历程。90 年代又出现了智能功率模块,智能功率模块是将一个或多个功率器件与驱动、保护、电隔离等电路集成在一个硅片或一个基板上,形成了电力电子集成化的概念。大功率、高频化、高效率、驱动场控化成为功率器件发展的重要特征。电力电子电路功率变换技术是和电力电子器件同步发展的,除了众多功率变换的电路拓扑发明外,还产生了吸收、多重化、谐振开关、多电平等技术;在控制技术方面出现了相控、PWM 控制和以状态空间平均法为代表的动态建模理论;在仿真手段方面出现了多种商用软件,如 Pspice、SABER、SIMPLIS 等。电力电子技术广泛地应用于工业、交通、IT、通信、国防以及家电等领域,全球 600 亿美元的电力电子产品市场已经形成,支撑着 5700 亿美元的电器电子硬件产品。据美国国家电力科学研究院预测,到 2010 年,80% 的电能将通过电力电子变流器来处理。

1. 什么是电力电子技术?

电力电子技术是电气工程、电子科学与技术、控制理论三大学科的交叉科学,诞生于 20 世纪 50~60 年代。1948 年美国贝尔实验室的肖克莱等人发明了能够放大信号的晶体三极管(transistor),开创了半导体电子学的新时代。晶体三极管不仅可以放大信号,也可以放大功率。如果使晶体三极管工作在开关工作方式,并控制晶体三极管导通状态或关断状态在一个周期中的持续时间,就可以实现输出功率的控制。目前广泛采用的功率器件如 IGBT、MOSFET 都发展自晶体三极管。因此,晶体三极管的诞生标志着电力电子技术学科发展的基础已经建立。在历史上曾有人认为对电力电子技术学科的形成起主要作用的是晶闸管(thyristor)的出现。1957 年美国通用电气公司在晶体三极管的基础上发明了晶闸管,晶闸管是一个可控的固态单向开关,因此很快被应用在整流电路,实现交流到直流的变换。后来,晶闸管又被应用到直流到交流的变换和交流到交流的变换,应用晶闸管的变流装置得到迅速地推广。60 年代出现了电力电子学(Power Electronics)这一

名称,1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子学的定义,并用倒三角形对电力电子学做了描述(图 1),表明电力电子学是由电气工程与技术、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉形成的,这一观点已被学术界普遍接受。

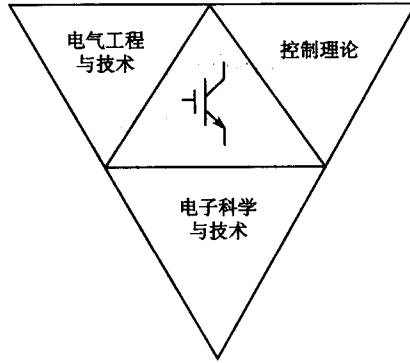


图 1 电力电子学的定义示意图

电力电子技术是依靠电力电子器件实现电能的高效率变换与控制的一门学科。电力电子技术的主要服务对象为电气工程,但设计一个电力电子装置除需要有电气工程的知识外,还需要电力电子器件、模拟电子技术、数字电子技术、通信等知识。电力电子装置本身又是一个自动控制系统,为了获得良好的静、动态性能,还需要控制理论的知识。

2. 电力电子技术的展望

1) 功率器件的发展

功率器件的发展是电力电子技术发展的基础。功率 MOSFET 至今仍是最快速的功率器件,MOSFET 没有二次击穿,可谓最易使用的功率开关器件。减少其通态电阻是功率 MOSFET 的主要研究方向,长期以来没有太大的突破,直到 1998 年 INFINEON 公司提出了超级结(super-junction)的概念,通过引入等效漂移区,在保持阻断电压能力的前提下,有效地减少了 MOSFET 的导通电阻,这种 MOSFET 被称为 CoolMOS,如图 2 所示,600V 耐压的 CoolMOS 的通态电阻仅为普通 MOSFET 的 1/5。与其他器件相比,功率 MOSFET 在低电压中小功率电源、固体开关等场合得到了广泛的应用。

IGBT 综合了场控器件的快速性和双极型器件的低通态压降两方面的优点。提高 IGBT 的阻断电压、增大其容量是长期以来的研究目标。事实上,IGBT 器件阻断电压的上限不断刷新,1985 年人们曾认为 IGBT 的极限耐压为 2kV,而目前已达到 6.5kV。日本采用 IGBT 改造了输入 3.3kV 的 8MV·A GTO 变频装置,

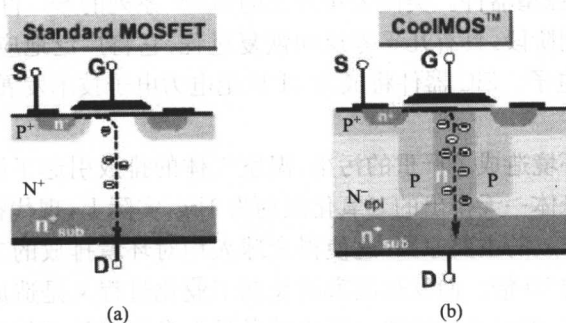


图2 CoolMOS与普通MOSFET结构的比较
(a) 传统结构 (b) 采用超级结的结构

采用IGBT后装置的体积减少了一半,效率从96.5%提高到98.5%,节省电能160kW。IGBT阻断电压的提高使它能覆盖更大的功率应用领域,正不断地蚕食着晶闸管、GTO的传统领地,在大功率应用场合极具渗透力,如用IGBT替代GTO改造原有电气化电力机车的变频器等。提高应用于市电的电力电子装置的低压IGBT器件的性能,其主要目标是降低通态压降和提高开关速度。下一代耐压600V的IGBT通态压降的目标是1V,耐压1200V的IGBT通态压降的目标是1.5V。采用压接工艺等措施以提高IGBT器件的可靠性也是今后的重要课题。

面临IGBT的追赶,ABB与三菱公司合作开发了GTO的更新换代产品:集成门极换流晶闸管IGCT(GCT),如图3所示。IGCT通过分布集成门极驱动、浅层发射极等技术,减少了门极驱动功率,提高了开关速度,方便了应用。IGCT应用的出路是高压、大容量装置,如未来的FACTS等。

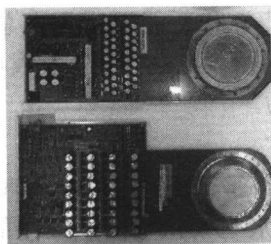


图3 三菱与ABB开发的4.5kV/4kA IGCT

碳化硅(SiC)是21世纪最有发展潜力的电力电子器件的材料。SiC材料的耐压是硅材料的10倍,导热率是硅材料的3倍,结温可达200℃。SiC功率开关器件的开关频率将显著提高,通态损耗和开关损耗减至1/10。由于导热率和结温的提高,散热器的设计比较容易,所构成的装置体积更小。由于SiC的禁带宽,结电压

高,较适于制造场控型器件。美国公司开发的 600V 系列的 SiC 肖特基(Schottky)二极管已进入实用阶段,具有几乎零反向恢复过程,它将广泛地应用于开关电源、PFC 电路和汽车电子。SiC 器件将成为 21 世纪电力电子技术发展的重大推动力。

2) 环境保护

现代社会对环境造成了严重的污染,温室气体的排放引起了国际社会的普遍关注。一个人的身体一天排出的二氧化碳约为 1kg,实际上,现代社会大量的能源消耗是温室气体排放的主要原因,这使得全球人均对环境排放的二氧化碳是人身体排放二氧化碳的 10 倍。而发达国家的长期工业化过程又是造成温室气体问题的重要因素。例如,美国人均排放二氧化碳量是人身体排放二氧化碳量的 56 倍;日本人均排放二氧化碳量是人身体排放二氧化碳量的 25 倍。改革开放以来,我国的能源消费量急剧上升,二氧化碳排放量也有较大增加。1995 年我国由能源活动引起的二氧化碳排放量约为 28 亿吨,在全球温室气体排放总量中位居第二,约占 12%。按照我国目前以煤为主的能源方案,预计到 2020 年,我国的二氧化碳排放量就可能超过美国,成为世界上第一大排放国。

1997 年在日本京都召开的“联合国气候变化框架公约”会议上,通过了著名的《京都议定书 COP3》,即温室气体排放限制议定书。通过国际社会的努力,2005 年京都议定书正式生效。京都议定书将对中国经济和世界经济的发展产生深远的影响。扩大再生能源的应用比例和大力采用节能技术是实现京都议定书目标的十分关键和有效的措施。日本、欧洲、澳大利亚都在积极推广再生能源和节能技术,减少温室气体排放。日本资源能源机构 2001 年制定了十年能源发展规划,大力采用新能源发电技术,光伏发电装机容量将从 1999 年的 209MW 增加到 2010 年的 4820MW,增至 23 倍;风力发电装机容量将从 1999 年的 83MW 增加到 2010 年的 3000MW,增至 36 倍;垃圾发电增加 5 倍;生物发电增加 5 倍;太阳能热利用也将增加 4 倍。到 2010 年,再生能源和新能源应用占总能源的比例将从 1999 年的 1.2% 增加到 3%。光伏、风力、燃料电池等新能源发电都需要电力电子技术,这将形成电力电子技术的巨大市场。

3) 电动汽车

根据美国国家电力科学研究院的报告,纯电动汽车与汽油汽车的一次能源利用率之比为 1 : 0.6。因此,发展电动汽车可以提高能源的利用率,同时减少温室气体和有害气体的排放。电动汽车的关键技术是电池技术和电力电子技术。铅酸电池价格低,但能量密度低,体积大,一次充电的持续里程低,可充电次数少。目前国际上正在开展新型电池如锂电池、镍氢电池等的研发工作。将汽油驱动和电动驱动相结合的混合动力汽车已在日本问世,如丰田 Prius 和本田 Insight,其结构如图 4 所示,据称可减少油耗 50%,将排放量减至 1/10。混合动力汽车的产业化前景已引起美国汽车行业的注意,美国正在探讨混合动力汽车的开发,以免失去混合

动力汽车的市场。近年来,燃料电池汽车成为理想环保交通工具的远景,其结构如图 5 所示,燃料电池的开发也成为国内外的热点。高能量密度燃料电池的低成本化、高可靠性是主要的突破目标。日本将大力发展低排放汽车,包括纯电动汽车、混合型汽车、燃料电池汽车、天然气或液化气汽车等。低排放汽车数量将从 1999 年的 65 000 辆增至 2010 年的 3 480 000 辆,即增加至 53.5 倍。应用的燃料电池将从 1999 年的 12MW 增加到 2010 年的 2200MW,增至 183 倍。

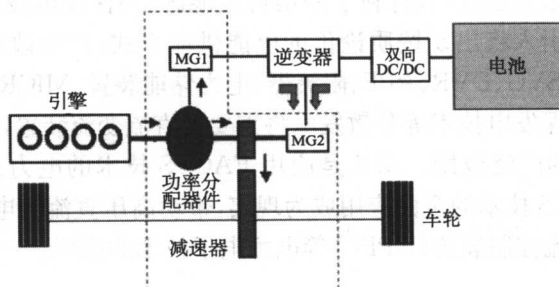


图 4 混合型电动汽车的结构

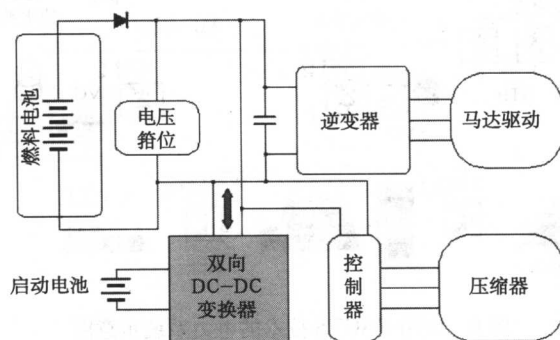


图 5 燃料电池电动汽车的结构

我国设立了“十五”国家 863 计划电动汽车重大专项。该专项的任务是建立燃料电池汽车产品技术平台,实现混合动力电动汽车的批量生产,推动纯电动汽车在特定区域的商业化运作,支持北京绿色奥运车辆的研发和应用示范,为我国在 5~10 年内实现电动汽车的产业化奠定技术基础。电动汽车产业将带动电机驱动逆变器、能量管理双向 DC/DC 变换器、辅助电源、充电器等电力电子产品的需求,而电动汽车应用的电力电子产品在技术层面上尚需突破功率密度、电磁兼容、可靠性等关键技术。

4) 电力市场

目前在国际上正在进行一场解放电力系统的革命。英国已成功地实现了电力市场,我国与美国、日本及欧洲的一些国家正在推进这一变革。电力市场的概念是将发电方与供电方相分离,发电方与供电方从垄断走向社会化。通过引入竞争,促进供电质量和服务水平提高,降低电价。电力市场将促进分散供电系统的发展,可大幅度地减少电力输送的能耗,同时提高电力系统的安全性。这将有利于能源多样化的实施,对国家安全有利;有利于采用再生能源、环保发电技术。从技术层面来讲,电力市场的引入将出现按质论价的电能供应方式,产生改善电力品质的装置,如 UPS、SVC、SVG、DVR、APF、限流器、电力储能装置、MICRO GAS TURBO 等。再生能源、环保发电技术等分散发电将需要交直流变流装置,实现柔性交流输电(FACTS)技术的广泛应用。图 6 是应用 FACTS 技术的电力系统示意图。电力市场将使 FACTS 技术的全面应用成为现实,带动高压直流输电(HVDC)、背靠背(BTB)、统一潮流控制装置(UPFC)等电力电子技术的应用。

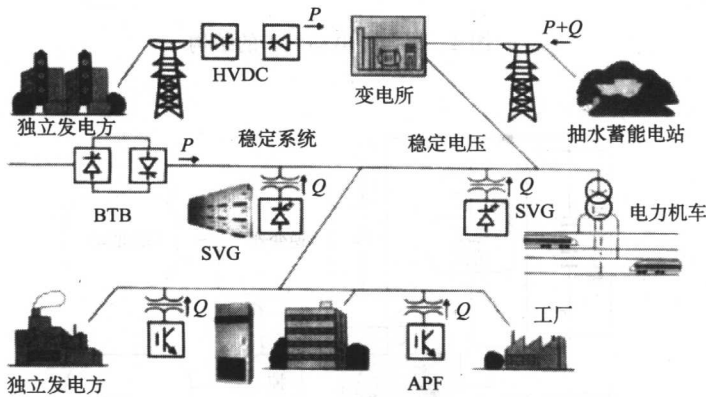


图 6 应用 FACTS 技术的电力系统示意图

21 世纪我国的轨道交通将取得长足发展。由于电力机车具有高速、高效、环保等突出优点,电气化铁路将被大量采用。轻轨、地铁等将在发达城市得到更广泛的应用。电力机车预计将大量采用交流电力电子传动技术。

5) IT 产业

根据日本的资料预测,到 2010 年,由于 IT 技术的应用,办公设备的电力消耗剧增,汽车、家电的电能消耗也将显著增加,而工业用电变化不大,如图 7 所示。因此,开发为 IT 设备供电的高效率电源前量良好。

INTEL、Compaq 先后提出了下一代 PC 机分布式供电的方案(DPS),如图 8 所示。INTEL、Compaq 方案的基本结构相同,均由 PFC、DC/DC、分散式安排的

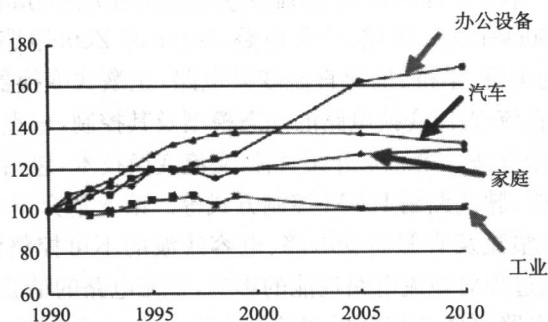


图 7 能源消耗逐年增加的预测(以 1990 年=100 作为标准)

DC/DC 模块组成。这种结构提高了供电的质量和效率,克服了目前 PC 电源对电网的谐波和电磁兼容问题,同时也适应 VLSI 芯片的低压大电流的需要。根据集成电路制造技术的发展趋势,在未来 5 年中芯片集成的晶体管数目将更多,而供电直流电压将降到 $0.5 \sim 0.8\text{V}$,功耗为 $80 \sim 140\text{W}$,电流峰值达 150A , $di/dt = 1000\text{A}/\mu\text{s}$ 。这将对供电电源提出严峻的挑战。

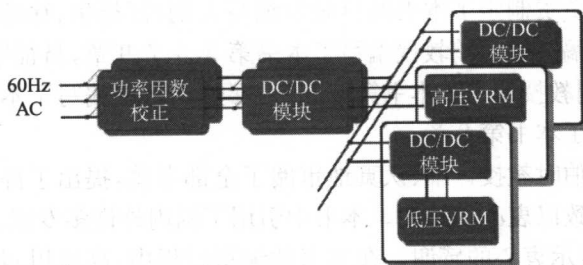


图 8 分布式供电的方案

随着 3G 的采用,手机的功能大量增加,如 MP3 player、PDA、照相等,电能消耗也增加,手机电能的管理控制芯片的研究开发也有很好的前景。

电力电子技术在推进 20 世纪人类科技发展中发挥了重要的作用。21 世纪电力电子技术将在建设一个更环保、更美丽、适合人类生活的地球中发挥不可替代的作用,对电力电子科技工作者提供了难得的机遇和挑战!

3. 本书介绍

本书共分 9 章。第 1 章介绍电力电子器件分类、基本特性与使用方法,所介绍的电力电子器件包括 PN 结功率二极管、肖特基二极管、电力晶体管、功率 MOSFET、功率复合器件 IGBT、普通晶闸管 SCR、可关断晶闸管 GTO、集成门极

换流晶闸管 IGCT。第 2 章介绍直流-直流变换电路的原理和分析方法,包括 Buck 电路,Boost 电路,Buck-Boost 电路,Cuk 电路,Sepic 和 Zeta 电路,双向直流-直流变换电路,带隔离的全桥、半桥、推挽直流变换电路,正激式变换器,FLYBACK 变换器。第 3 章介绍直流-直流变换电路的动态模型及其控制,重点介绍基于平均开关网络法的动态模型方法。第 4 章介绍直流-交流变换技术,包括单相逆变电路和三相逆变电路的分析,脉宽调制 PWM 控制方式等。第 5 章介绍交流-直流变换技术,包括晶闸管可控整流及有源逆变电路、电容滤波的不可控整流电路原理与分析,负载性质和换流过程对整流电路性能的影响,整流电路的谐波和功率因数。还介绍了 PWM 整流电路原理及其分析和控制方法。第 6 章介绍交流-交流变换技术,包括间接交流-交流变换电路、直接交流-交流变换电路、交流调压电路。第 7 章介绍软开关谐振功率变换技术,包括软开关的概念和典型的软开关变换器电路、谐振变换器、准谐振变换器、全桥移相 ZVS PWM 变换器、谐振直流环节逆变器。第 8 章介绍磁芯元件及其应用基础,包括高频电感、高频变压器的设计及特种磁芯元件结构。第 9 章介绍电力电子技术的应用,包括开关直流电源、UPS、电机传动、感应加热、高压直流输电、静态无功补偿、电力有源滤波器和再生能源等方面的应用,还介绍了电磁兼容的概念。

汪槩生院士负责制定了本书的目录和编写大纲,汪槩生、徐德鸿撰写了前言,并负责全书的统稿。徐德鸿教授编写了本书第 3、6、7、9 章,吕征宇教授编写了本书第 1 章,马皓副教授编写了本书第 2、5 章,邓焰副教授编写了本书第 4 章,石健将副研究员编写了本书第 8 章。

上海大学陈伯时教授详细、认真地审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的建议。在此对陈教授谨致以衷心的感谢。本书中引用了国内外许多专家、学者的著作、论文等文献,在此表示衷心的感谢。在本书的编写过程中,高凤川、张涛、韩思亮、毛兴云、祁峰、胡磊等同志参与了本书大量插图绘制和文字录入工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,所见资料有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

二〇〇六年五月二十日

目 录

前言

第 1 章 电力电子器件	1
1.1 电力电子器件概述	1
1.2 基本特性与工作环境	5
1.3 功率二极管	9
1.4 电力晶体管.....	21
1.5 功率 MOSFET	28
1.6 功率复合器件 IGBT	35
1.7 晶闸管.....	40
1.8 电力电子器件的应用问题.....	51
1.9 电力电子器件的新发展.....	58
习题与思考题	70
第 2 章 直流-直流变换技术	72
2.1 概述.....	72
2.2 直流降压变换电路(Buck 电路)	73
2.3 直流升压变换电路(Boost 电路)	86
2.4 降压-升压式变换电路(Buck-Boost 电路)	95
2.5 升压-降压式变换电路(Cuk 电路)	97
2.6 Sepic 电路和 Zeta 电路	100
2.7 双向直流-直流变换电路	101
2.8 变压器隔离型直流变换电路	102
习题与思考题.....	117
第 3 章 直流-直流变换电路的动态模型与控制	119
3.1 开关周期平均与小信号线性化动态模型	119
3.2 统一电路模型	125
3.3 调制器的模型	127
3.4 闭环控制与稳定性	129
习题与思考题.....	132
第 4 章 直流-交流变换技术	134
4.1 概述	134

4.2	逆变电路的基本拓扑形式	135
4.3	单相方波逆变电路	137
4.4	单相 SPWM 逆变电路	144
4.5	三相方波逆变电路	157
4.6	三相 SPWM 逆变电路	162
4.7	死区时间对互补开关的逆变桥臂电路输出电压的影响	168
4.8	逆变器 PWM 技术的优化	170
4.9	逆变器的控制	175
4.10	逆变器输出滤波器的设计	187
4.11	逆变器的多重化	191
4.12	多电平逆变器	194
	习题与思考题	199
第 5 章	交流-直流变换技术	200
5.1	电感滤波的不控整流电路	201
5.2	电感滤波的晶闸管可控整流和有源逆变电路	207
5.3	电容滤波的不控整流电路	228
5.4	整流电路的谐波和功率因数	232
5.5	PWM 整流电路及其控制方法	237
	习题与思考题	250
第 6 章	交流-交流变换技术	252
6.1	间接交流-交流变换电路	252
6.2	直接交流-交流变换电路	255
6.3	交流调压电路	263
	习题与思考题	268
第 7 章	软开关谐振功率变换技术	270
7.1	软开关的概念	270
7.2	串联谐振逆变器	276
7.3	串联谐振 DC-DC 变换器	278
7.4	并联谐振 DC-DC 变换器	283
7.5	准谐振变换器	285
7.6	有源箝位零电压开关技术	300
7.7	全桥移相控制(FB)PWM 变换技术	306
7.8	直流(DC)环节谐振型逆变器	314
	习题与思考题	317
第 8 章	电力电子电路中磁芯元件应用基础	318

8.1 概述	318
8.2 磁性材料的基本知识	318
8.3 高频变压器与电感器的设计	325
习题与思考题	337
第9章 电力电子应用技术	338
9.1 电源	338
9.2 变频调速系统	351
9.3 照明电子技术	355
9.4 感应加热与电焊	357
9.5 电力电子技术在电力系统中的应用	361
9.6 新能源发电	369
9.7 谐波抑制和电能质量控制	372
9.8 电磁兼容	381
习题与思考题	385
参考文献	386

第 1 章 电力电子器件

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 概述

电力电子技术于 20 世纪 70 年代形成,至今已经过 30 余年的发展历程,其应用装置大到三峡船闸启闭、电气化机车运行,小到移动电话、心脏起搏装置,处处可见其踪影。铁路电气化牵引、工业生产中电力传动、再生能源发电、柔性输电系统、不停电电源、通信电源、电子照明、计算机电源、打印机电源、充电器、变频空调等各种家用电器电源等,这些电力电子产品已经应用到社会生产和生活的方方面面。电力电子对于节能、减小环境污染、改善工作条件、节省原材料、降低成本和提高产量等方面均起着十分重要的作用。电力电子技术的应用领域几乎涉及国民经济的各个工业部门,日益渗透到工业、交通、国防、商业、家庭等各领域。

电力电子技术学科是涉及电力、电子、电机驱动、计算机和自动控制等重要学科领域的多学科交叉的新兴学科,是 21 世纪应用最广泛的技术,是当今高新科学技术的重要组成部分和发展基础之一,毫无疑问,它将成为新世纪发展的重要支撑技术之一。作为电能产业与用电终端间的中间环节,电力电子技术对电能实施高效变换和优质控制;作为信息、计算机控制技术和传感技术与用电终端间的接口,它为各类自动化系统提供高效的执行机构和高质量的优化控制的功率源。因此,电力电子技术已成为改造传统产业(电力、机械、矿冶、交通、化工、轻纺等),发展高新技术(航天、激光、通信、高速铁路技术、机器人、磁悬浮等)和高效利用能源(节能、减少环境污染等)的一项关键技术,同时也是实行科技创新、增强综合国力的重要技术手段之一。

电力电子技术的基础是由电力电子器件、电力电子电路和电力电子系统控制三个层次构成的。电力电子器件技术部分包括电力电子器件制造与电力电子器件应用技术,又是整个电力电子学的基础。现代电力电子器件虽然有时也包括介电材料和磁性材料等构成的电容、电感元件,但一般特指电力电子器件。

从历史上看,电力电子器件是推动电力电子技术发展的火车头。一代新型电力电子器件的出现,总是带来一场电力电子技术的革命。因为电力电子器件处于现代电力电子装置的心脏地位,它对装置的总价值、尺寸、重量和技术性能,起着十分重要的作用。因此,新型电力电子器件及其相关新型半导体材料的研究,一直是电力电子技术领域极为活跃的主题之一。

电力电子器件主要是利用其非线性特性(如整流)和控制特性。控制特性包括可控电阻(器件工作于线性状态)与开关特性,前者用于模拟电路,后者用于开关电路。目前电力电子装置基本上是利用电力电子器件的开关特性,开关状态工作效率远高于线性状态。

一个理想的功率器件,应当具有下列理想的静态和动态特性:在阻断状态时能承受高电压;在导通状态时,具有高电流密度和低导通压降;在开关状态转换时,具有快的开、关速度,能承受高的 di/dt 和 dv/dt ;控制器件需要的功率尽可能低,抗干扰能力强等。

与电感、电容等无源元件不同,电力电子器件工作时基本上不依靠储存能量来工作,它的工作特性取决于器件的半导体材料结构与其中的载流子状态。相对而言,半导体的工作原理比电感、电容复杂。了解电力电子器件的基本工作原理,理解半导体工作时内部发生的物理现象,弄清各种电力电子器件的外部工作特性,对于合理、可靠地使用电力电子器件至关重要。

自从 50 年代硅晶闸管(silicon controlled rectifier, SCR)问世以后,电力电子器件的研究者作出了不懈的努力,并取得了世人瞩目的成就。60 年代后期,可关断晶闸管(gate turnoff thyristor, GTO)实现了门极可关断功能,并使斩波工作频率扩展到 1kHz 以上。70 年代中期,高功率晶体管(giant transistor, GTR)和功率场效应器件(metal oxygen silicon field effect transistor, 或称功率 MOSFET)问世,功率器件实现了场控功能,打开了高频应用的大门。80 年代,绝缘栅门控双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)问世,它综合了功率 MOSFET 和双极型功率晶体管两者的优点。它的迅速发展,又激励了人们对综合功率 MOSFET 和晶闸管两者功能的新型功率器件——MOS 门控晶闸管的研究。因此,当前功率器件研究工作的重点主要集中在研究现有功率器件的性能改进、MOS 门控类晶闸管,以及采用新型半导体材料制造新型的功率器件等方面。图 1.1 描述了电力电子器件及其市场。

1.1.2 用途与分类

与 30 年前电力电子学刚创立时不同,现在电力电子器件种类繁多,特性各异,要比较全面地掌握器件的应用技术,首先应该了解半导体器件的分类与用途。

(1) 根据控制特性,电力电子器件习惯上分为不控型、半控型与全控型几种。

属于不控型的器件有各种二极管,包括整流二极管、高功率稳压二极管、瞬态尖峰电压抑制二极管等。

不控型器件的主要用途是其非线性特性应用。整流器件的正向导通与反向阻断特性十分显著,因此被用来控制电流方向。稳压器件主要用来控制电压的幅度。

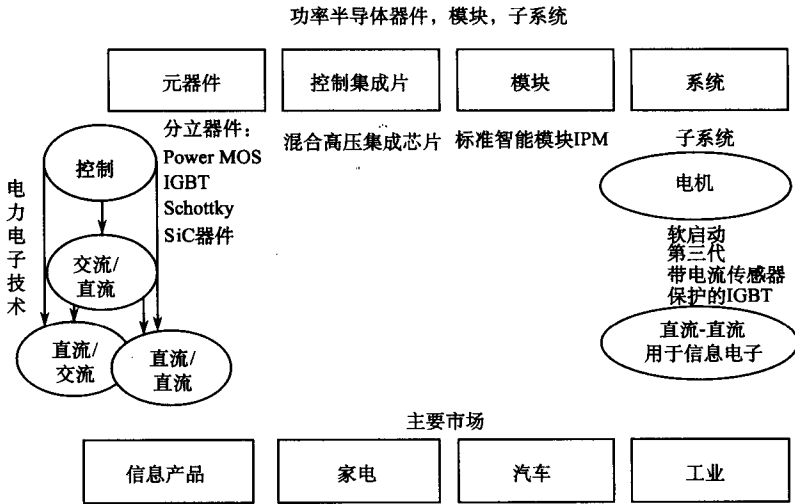


图 1.1 电力电子器件及其市场鸟瞰

各种整流二极管被广泛用于交流-直流的变换电路,是最基本的电力电子器件之一。稳压二极管与瞬态尖峰电压抑制二极管等被用于线路中主开关元器件的保护。

各种普通晶闸管,如 SCR、双向 SCR 均属于半控型器件。其特点是器件可以用脉冲控制其开通,而一旦开通,就不能通过控制极来实现关断。SCR 制造工艺简单,目前还被大量用于交流回路的调相功率控制。晶闸管型触发管也是 SCR 的变种,它虽然只有两个电极而没有触发极,但根据其电压阈值触发导通工作原理来归类,还是属于 SCR 一类的器件。

普通晶闸管是最早生产的电力电子开关器件,被大量用于工业电力的控制装置中,由于价格低廉、可靠性高,目前还得到广泛使用。普通晶闸管的容量比较容易做大,在许多大功率和超大功率的电力系统的无功补偿、直流电机调速、电解装置电源、冶炼电炉电源、工业感应加热电源等设备中均有采用。

目前品种最为丰富的器件是全控型的,它们不仅可以控制导通,也可以控制关断。与半控型器件相比,其性能比较完善,应用上也更灵活,但其器件制造工艺相对复杂。目前应用的有 GTR、功率 MOSFET、IGBT、GTO、IGCT(integrated gate commutated thyristor,又称为换流关断晶闸管)等。

为实现同样的电路功能,全控型器件的拓扑和控制均比半控型简单,可以方便地实现斩波调压、脉冲宽度控制调节(pulse width modulation, PWM)等功能,正在逐渐取代半控型器件,被广泛用于各种现代电力电子装置中,如交流电机变频调