

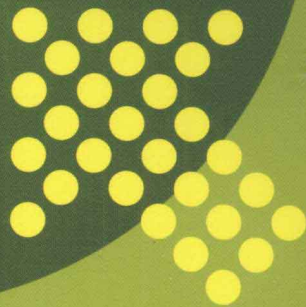
21世纪高等学校规划教材



DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

李彦梅 主 编
王 卓
吴文进 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

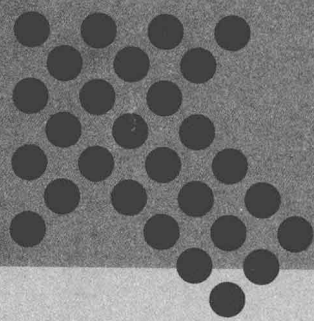
21世纪高等学校规划教材



DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

主 编 李彦梅
王 卓
副主编 吴文进
编 写 江善和 李爱传
主 审 王振和



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。

本书共分二篇十一章，主要内容包括：电力电子器件、交流—直流变换电路、直流—交流变换电路、交流—交流变换电路、PWM 控制技术、PWM 整流电路、PWM 无源逆变电路、PWM 变频电路、PWM 调压电路、软开关技术、电力电子技术应用。本书体系新颖、重点突出、实用性强，为便于读者学习，各章均附有思考与习题。

本书可作为电气工程及其自动化专业、电力工程、自动化专业教材，也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/李彦梅, 王卓主编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 8

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5123-1857-1

I. ①电… II. ①李…②王… III. ①电力电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 170005 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 399 千字

定价 29.00 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

普通高等教育正面临着课时少而课程内容多的矛盾，教师在授课的过程用要根据专业对课程内容进行取舍和调整。本书以能力培养为目标，在突出实际、实用和实践原则的基础上，尽量避免繁琐的数学推导，适当降低了理论深度，分两篇完整系统地讲述了电力电子变换和控制技术的基础知识和新技术的发展及应用前景。

为了体现科学性、先进性、系统性，本书分两篇，第1篇为相控变流电路，主要讲述以半控型晶闸管相位控制的 AC/DC、DC/AC、DC/DC、AC/AC 变换电路的工作原理及其参数关系。第2篇讲述了 PWM 控制的电力电子变换电路工作原理及其参数关系。这两篇可称姊妹篇。第1篇是基础，第2篇是发展方向。本书以器件应用为目的突显其实用性，以器件应用于上述四种变换电路的原理及参数关系为主要内容，并附有应用实例，力争理论紧密结合实际，达到学以致用，学思结合的目的。本书既是电力电子与电力传动学科的必修课，又是专业基础课和技术课，是实用性很强的课程。

本书第1~4章由安庆师范学院李彦梅编写，第5~9章由北华大学王卓编写，第10~11章由安庆师范学院吴文进编写，八一农垦大学李爱传参与编写了绪论和第3、9两章的部分内容，安庆师范学院的江善和参与编写了第3章部分内容。李彦梅、王卓任主编，并负责统稿。由北华大学王振和教授主审。

对书末所附参考文献的作者，表示衷心感谢。

由于作者学识有限，时间仓促，书中不妥之处一定存在，殷切希望指正。

编 者

2011年6月

符 号 说 明

- A—安培；晶闸管的阳极
 a —调制度
 b —晶体管基极
 BU_{cbo} —晶体管发射极开路时集电极和基极间反向击穿电压
 BU_{ceo} —晶体管基极开路时集电极和发射极间击穿电压
 BU_{cer} —晶体管发射极和基极间接电阻时集电极和发射极间击穿电压
 BU_{ces} —晶体管发射极和基极短路时集电极和发射极间击穿电压
 BU_{cex} —晶体管发射结反向偏置时集电极和发射极间击穿电压
 C —电容量
 C —电容器：IGBT 集电极
 c —晶体管集电极
 C_{in} —MOSFET 输入电容
 C_{iss} —MOSFET 漏源极短路时的输入电容
 C_{oss} —MOSFET 共源极输出电容
 C_{rfs} —MOSFET 反向转移电容
 D —MOSFET 漏极
 D —畸变功率
 di/dt —晶闸管通态电流临界上升率
 du/dt —晶闸管断态电压临界上升率
 E —直流电源电动势
 E —IGBT 发射极
 e —晶体管发射极
 e_L —电感的自感电动势
 E_M —电动机反电动势
 f —频率
 G —发电机；MOSFET 栅极；晶闸管门极；GTO 门极；IGBT 栅极
 G_{fs} —MOSFET 跨导
 h_{FE} —晶体管直流电流增益
 HRI_n — n 次谐波电流含有率
 I —整流后负载电流的有效值
 I_1 —变压器一次相电流有效值
 i_1 —变压器一次相电流瞬时值
 I_2 —变压器二次相电流有效值
 i_2 —变压器二次相电流瞬时值
 I_{ATO} —GTO 最大可关断阳极电流
 i_b —晶体管基极电流
 i_c —晶体管集电极电流
 I_c —IGBT 集电极电流
 I_{ceo} —晶体管集电极与发射极间漏电流
 I_{CM} —晶体管集电极最大允许电流
 I_{cs} —晶体管集电极饱和电流
 I_D —流过整流管的电流有效值；MOSFET 漏极电流
 I_d —整流电路的直流输出电流平均值
 i_D —流过整流管的电流瞬时值
 i_d —整流电路的直流输出电流瞬时值
 I_{dD} —流过整流管的电流平均值
 I_{DM} —MOSFET 漏极电流幅值
 I_{DR} —流过续流二极管的电流有效值
 i_{DR} —流过续流二极管的电流瞬时值
 I_{dT} —流过晶闸管的电力平均值
 i_e —晶体管发射极电流
 $I_{F(AV)}$ —电力二极管的正向平均电流
 I_{FSM} —电力二极管的浪涌电流
 I_G —晶闸管、GTO 的门极电流
 I_H —晶闸管的维持电流
 I_L —晶闸管的擎住电流
 i_o —输出电流
 i_p —两组整流桥之间的环流（平衡电流）瞬时值
 I_R —整流后输出电流中谐波电流有效值
 I_T —流过晶闸管的电流有效值
 i_T —流过晶闸管的电流瞬时值
 $I_{T(AV)}$ —晶闸管的通态平均电流
 I_{TSM} —晶闸管的浪涌电流
 i^* —指令电流
 K —晶闸管的阴极
 L —电感量

L —电感；电抗器符号
 L_B —从二次侧计算时变压器漏感
 L_P —平衡电抗器
 M —电动机
 m —相数；一个周期的脉波数
 n —电动机转速
 n_N —电动机额定转速
 N —线圈匝数
 N —负（组）、三相电源中性点
 P —功率；有功功率
 p —极对数
 P_{CM} —IGBT 集电极最大耗散功率
 P_{cm} —晶体管集电极最大耗散功率
 P_d —整流电路输出直流功率
 P_G —直流发电机功率
 P_M —直流电动机反电动势功率
 P_R —电阻上消耗的功率
 P_{SB} —晶体管二次击穿功率
 Q —无功功率
 R —电阻器；电阻
 R_B —从变压器二次侧计算的变压器等效电阻
 R_M —直流电动机电枢电阻
 S —视在功率；MOSFET 源极
 S —功率开关器件
 S_r —电力二极管的恢复系数
 t —时间
 t_d —晶体管、GTO 开通时的延迟时间；电力二极管关断延迟时间
 $t_{d(on)}$ —MOSFET、IGBT 开通时的延迟时间
 $t_{d(off)}$ —MOSFET、IGBT 关断时的延迟时间
 t_f —晶体管、GTO、MOSFET 关断时的下降时间；电力二极管电流下降时间
 t_{fr} —电力二极管正向恢复时间
 t_{gr} —晶闸管正向阻断恢复时间
 T_{HD} —电流谐波总畸变率
 T_{JM} —电流二极管、晶体的最高工作结温
 t_{off} —晶体管、GTO、MOSFET、IGBT 的关断时间
 t_{on} —晶体管、GTO、MOSFET、IGBT 的开通时间
 t_q —晶闸管的关断时间
 t_r —晶闸管、晶体管、GTO、MOSFET 开通时

的上升时间

t_{rr} —电力二极管反向恢复时间；晶闸管反向阻断恢复时间
 t_s —晶体管、GTO 关断时的储存时间
 t_t —GTO 关断时的尾部时间
 t_b —并联谐振逆变电路触发引前时间
 $U、V、W$ —逆变器输出端
 U —整流电路负载电压有效值
 U_1 —变压器一次相电压有效值
 u_1 —变压器一次相电压瞬时值
 U_{1L} —变压器一次线电压有效值
 U_2 —变压器二次相电压有效值
 U_{2L} —变压器二次线电压有效值
 u_c —载波电压
 U_{ces} —晶体管饱和集电极和发射极间的管压降
 U_{CES} —IGBT 最大集射极间电压
 u_{co} —控制电压
 U_d —整流电路输出电压平均值；逆变电路的直流侧电压
 u_D —整流管两端电压瞬时值
 u_d —整流电路输出电压瞬时值
 u_{DR} —续流二极管两端电压瞬时值
 U_{DRM} —晶闸管的断态重复峰值电压
 U_{DS} —MOSFET 漏极和源极间电压
 U_{da} —触发角为 α 时整流电压平均值
 U_{dq} —逆变角为 β 时逆变电压平均值
 U_F —电力二极管的正向电压
 U_{FP} —电力二极管的正向电压过冲
 u_g —晶闸管门极电压瞬时值
 u_{GE} —IGBT 的开启电压
 U_{GS} —MOSFET 栅极和源极间电压
 U_i —斩波电路输入电压
 u_k —整流变压器的阻抗电压
 u_L —电抗器两端电压瞬时值
 U_n —整流电路输出电压中的 n 次谐波电压有效值
 U_{nm} —整流电路输出电压中的 n 次谐波电压最大值
 U_o —斩波电路输出电压
 u_r —信号波电压
 U_R —整流电路输出电压中谐波电压有效值
 U_{RP} —电力二极管的反向电压过冲

U_{RRM} —电力二极管、晶闸管的反向重复峰值电压

u_s —同步电压

U_T —MOSFET 的开启电压

U_{TO} —电力二极管门槛电压

U_{TM} —晶闸管的通态（峰值）电压

U_{UN} —逆变电路负载 U 相相电压有效值

U_{UV} —逆变电路负载 U 相和 V 相间线电压有效值

V—晶体管；IGBT；功率 MOSFET

VD—整流管

VD_R—续流二极管

VS—硅稳压管

VT—晶闸管；GTO

X—电抗器的电抗值

X_B —从二次侧计算时的变压器漏抗

X_P —平衡电抗器的电抗

Z—复数阻抗

Z_1 —基波阻抗

Z_n — n 次谐波的阻抗

α —晶闸管的整流触发角；晶体管共基极电流放大系数；用于斩波电路表示器件导通占空比

β —晶闸管的逆变角；晶体管电流放大系数

β_{\min} —最小逆变角

β_{off} —GTO 电流关断增益

δ —晶闸管的停止导电角；并联谐振逆变电路触发引前角

γ —换相重叠角；纹波因数；输出电压比

θ —晶闸管的导通角

φ —位移因数角；相位滞后角

ω —角频率

ω_c —载波角频率

ω_r —信号波角频率

ν —基波因数

目 录

前言	
符号说明	
绪论	1
思考与习题	6

第 1 篇 相控交流电路

1 电力电子器件	7
1.1 电力电子器件概述	7
1.2 电力二极管	8
1.3 晶闸管	13
1.4 电力晶体管 GTR	20
1.5 功率场效应晶体管	23
1.6 功率复合器件	27
1.7 其他新型电力电子器件	30
1.8 电力电子器件辅助电路	32
思考与习题	39
2 交流—直流变换电路	40
2.1 可控整流电路	40
2.2 变压器漏感对整流电路的影响	56
2.3 相控有源逆变电路	58
2.4 晶闸管触发电路	63
思考与习题	70
3 直流—交流变换电路	71
3.1 概述	71
3.2 单相逆变电路	75
3.3 三相逆变电路	80
3.4 多重逆变电路	85
3.5 多电平逆变器	87
思考与习题	88
4 交流—交流变换电路	89
4.1 交流调压电路	89

4.2 晶闸管相控交流—交流直接变频器	95
思考与习题	102

第 2 篇 PWM 控制的电力电子变换电路

5 PWM 控制技术	103
5.1 PWM 控制的基本原理	103
5.2 调制法生成 SPWM 波形	105
5.3 软件生成 SPWM 波形	108
5.4 电压空间矢量 PWM 控制	112
5.5 PWM 波形的分类	116
思考与习题	117
6 PWM 整流电路	119
6.1 概述	119
6.2 PWM 整流主电路	121
6.3 桥式电压型 (VSR) PWM 整流电路	125
6.4 桥式电流型 (CSR) PWM 整流电路	144
思考与习题	153
7 PWM 无源逆变电路	155
7.1 电压型 PWM 无源逆变电路	155
7.2 电流型 PWM 无源逆变电路	164
7.3 PWM 逆变电路的控制	165
思考与习题	171
8 PWM 变频电路	172
8.1 SPWM 控制的变频电路	172
8.2 电压空间矢量 PWM 控制的变频电路	173
8.3 交—直—交电压型通用变频电路设计	179
8.4 双 PWM 变频电路设计	188
8.5 矩阵式变换电路简介	206
思考与习题	210
9 PWM 调压电路	211
9.1 直流 PWM 控制技术基础	211
9.2 PWM 直流调压电路	212
9.3 PWM 交流调压电路	226
思考与习题	229
10 软开关技术	231
10.1 软开关的基本概念和分类	231
10.2 谐振软开关变换	235

- 思考与习题..... 240
- 11 电力电子技术应用..... 241**
 - 11.1 在直流开关电源中的应用..... 241
 - 11.2 电力电子技术在电力系统中的应用..... 243
 - 11.3 在新能源发电方面的应用..... 249
 - 思考与习题..... 251
- 参考文献..... 252**

绪 论

1. 电力电子技术的概念

电子技术有两大分支：信息电子技术与电力电子技术。二者的理论基础相同，但应用方向不同。信息电子技术主要用于提取、识别、处理小功率电信号中包含的信息，如收音机、电视机中的调谐电路，信号测量中的滤波、放大电路，对输入信号进行逻辑处理、算术运算的数字电路等。通常所说的模拟电子技术、数字电子技术都属于信息电子技术范畴。电力电子技术处理的对象是电能，但它对电能的变换与控制是基于电力电子器件——电力半导体器件来完成的，因此电力电子技术是应用于电力技术领域的电子学，是利用电力半导体器件实现对电能的变换与控制的一门学科。

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，从蓄电池和干电池得到的电力是直流。从这些电源得到的电力往往不能直接满足要求，需要进行电力变换，如表 0-1 所示，电力变换通常可分为四大类，即交流→直流、直流→交流、直流→直流和交流→交流。进行上述电力变换的技术称为变流技术。

表 0-1 电力变换种类

输出 \ 输入	交流	直流
直流	整流	直流斩波
交流	交流电力控制变频、变相	逆变

通常把电力电子技术分为电力电子器件制造技术和变流技术两个分支。变流技术也称为电力电子器件的应用技术，它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。变流不只指交直流之间的变换，也包括上述的直流变直流和交流变交流的变换。电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础，而变流技术则是电力电子技术的核心。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。

电力电子学这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。1974 年，美国的 W. Newell 用图 0-1 的倒三角形对电力电子学进行了描述，认为电力电子学是由电力、电子和控制理论三个学科交叉而形成的。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。

电力电子技术和电子学的关系是显而易见的。如图 0-1 所示，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—

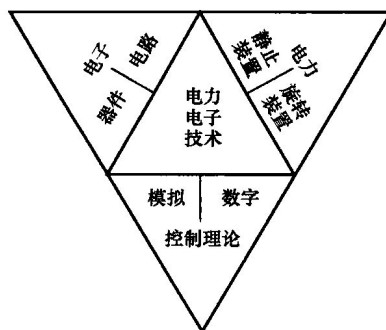


图 0-1 描述电力电子学的倒三角形

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。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。广义而言,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。在信息电子技术中,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,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。

控制理论广泛应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技术支撑。

电力电子技术是 20 世纪后半叶诞生和发展的一门崭新的技术。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作人的大脑,那么,可以把电力电子技术比作人的消化系统和循环系统。消化系统对能量进行转换,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,还可比作人的肌肉和四肢,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 世纪中将会起到十分重要的作用,有着十分光明的未来。

2. 电力电子技术的发展史

电力电子技术的发展和电力电子器件的发展密切相关,新器件的出现促进新装置的开发,并开拓新的应用领域。与电力电子器件发展相对应,电力电子技术发展经历了黎明期、晶闸管时代(1956 年到 20 世纪 70 年代初)、全控型器件大发展阶段(20 世纪 70 年代初到 21 世纪初)和功率集成电路的兴起(20 世纪 80 年代末到 21 世纪初)四个阶段,如图 0-2 所示。

在晶闸管整流电路广泛应用之前,实现交流电变为直流电的方法主要有两种:一是采用交流电动机一直流发电机组,即变流机组;二是水银整流器。和含有旋转部件的变流机组相对应,水银整流器不含旋转部件,因而称为静止变流器。

1956 年,美国发明了硅半导体器件——晶闸管(thyristor)。由于晶闸管具有可控的单向导电性,被首先用于整流电路,因此晶闸管也称为可控硅(Siliconcontrolled Rectifier, SCR)。与变流机组及水银整流器相比,晶闸管整流装置在体积、质量、动态响应特性、控制方便性等诸多指标方面具有明显的优势,因此很快得到推广应用。此后,晶闸管被用于 DC/AC 变换、AC/AC 变换、DC/DC 变换电路。到 20 世纪 70 年代末,晶闸管变流装置广泛应用于电力传动、电化学电源、感应加热电源等变流装置中。正是晶闸管变流装置的应用与发展奠定了现代电力电子技术的基础。由于晶闸管是一种半控型器件,即可在其门极加上

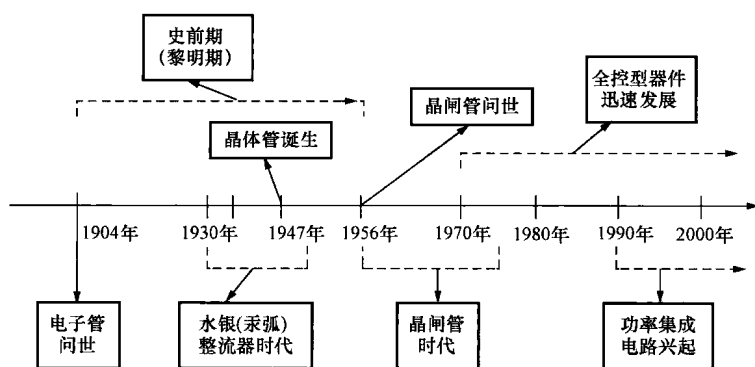


图 0-2 电力电子技术的发展史

合适的触发脉冲使其开通，但不能通过在门极加上控制信号而使其关断。虽然控制晶闸管的开通方便，但其关断通常需借助电网电压等外部条件来实现，因此其应用受到一定限制。

可关断晶闸管（Gate Turn Off thyristor, GTO）是在 SCR 基础上开发出来的全控型电力电子器件。所谓全控型器件是指能在器件的控制极加上符合要求的信号，实现器件的开通与关断。尽管 GTO 在 20 世纪 50 年代末即已问世，但一直应用于低电压、小功率的装置中，直到 20 世纪 70 年代末才得到较大发展。此后，GTO 被用于大功率电力传动、静止无功功率发生器、电力储能系统等装置中。

随着电子器件制造技术的不断进步，全控型电力电子器件得到迅猛发展，大功率晶体管（Giant Transistor, GTR）、功率场效应晶体管（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET）、绝缘栅极双极晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）、集成门极换流晶闸管（Integrated Gate Commuted Thyristor, IGCT）等新器件不断涌现，促进了现代电力电子技术的迅速发展。

1978 年，MOSFET 在美国问世。这是一种全控型（电压控制型）电力电子器件，具有开关频率高（50kHz 以上）、驱动功率小、热稳定性优良等特点，在高频、中小功率变流器，特别是小型开关电源中得到了广泛应用。由于 MOSFET 是电力电子器件中开关频率最高的器件，而高频化有利于减轻变压器、滤波电感乃至整个装置的体积与质量，因而 MOSFET 仍将在低电压、高频、中小功率场合继续广泛应用。

1983 年，IGBT 在美国问世。IGBT 是由 GTR 与 MOSFET 复合而成的电场控制型器件，只需在其栅源极之间建立、撤销电场即可使其开通、关断，因而易于控制。IGBT 的电压、电流容量覆盖了大、中、小功率范围，其开关工作频率可达 20kHz 以上，远高于 GTR、GTO。因此，IGBT 很快在几千瓦到几百千瓦功率范围内的各种变流装置中得到广泛应用，在许多场合已取代 GTO、GTR，迅速成为电力电子装置设计、制造中的首选器件。应用 IGBT 的交流变频调速装置、大功率逆变电源等系统在电力工程、化学工业、冶金工业、机械制造、家用电器等许多领域的成功普及与推广应用，充分展示了电力电子技术在节能、节材、提高系统性能等方面所具有的重要作用。

1996 年，IGCT 在瑞典问世。IGCT 是全控型器件，它将硬驱动的 GTO 及其驱动器做成一体，具有功率大、通态损耗小、驱动方便的特点。目前，市场化 IGCT 器件的容量已达到 6500V/4000A，展现了良好的发展态势。世界上第一套采用直接转矩控制策略的大功率

感应电动机传动系统 ACS1000 应用了 IGCT, 最大输出功率达到 5000kW; 超导同步电动机的轮船推进系统中也采用了 IGCT, 输出功率达到 25 000kW。

随着全控型器件的不断发展, 以往用于电子、通信工程等学科的 PWM 技术在电力电子技术中获得了广泛的应用。实际上, 全控型器件与 PWM 技术的结合成就了今天电力电子技术的重要地位。

功率集成电路 (Power Integrated Circuit, PIC) 是指将功率半导体器件及其驱动电路等组合在同一个芯片或同一个封装中的电路模块, 即把功率部分和驱动控制部分甚至保护电路都组合在一个器件中的电路。目前, 功率集成电路内部使用的功率器件通常为 MOSFET 或 IGBT。通常将由 IGBT、驱动电路、保护电路集成的 PIC 称为智能功率模块 (Intelligent Power Module, IPM)。采用 PIC 可以提高电路的功率密度、简化安装工艺、对器件过流和短路等保护更为可靠, 从而提高电力电子装置的使用性能。自 20 世纪 80 年代问世以来, PIC 制造技术的发展十分迅速, 已成为电力电子技术的重要发展方向。

PIC 的最新发展趋势是电力电子积木 (Power Electric Building Block, PEBB)。PEBB 并不是一种特定的半导体器件, 它是按一定功能组织起来的可处理电能的集成器件或模块, 是依照最优的电路结构和系统结构设计的不同器件和技术的集成。PEBB 不仅包括功率半导体器件, 还包括门极驱动电路、电平转换、传感器、保护电路、电源和无源器件。PEBB 有功率接口和通信接口, 通过这两种接口, 将多个 PEBB 模块组合在一起可以完成电压转换、能量的储存和转换、阻抗匹配等系统级功能。几个 PEBB 可以组成电力电子系统, 这些系统可以像小型的 DC/DC 转换器一样简单, 也可以像大型的分布式电力系统那样复杂。利用这种具有通用性的 PEBB 模块, 电力电子系统的构建可望像目前利用模块化的板卡构建计算机系统那样方便。

在应用方面, 电力电子技术应用领域将会进一步扩大, 随着计算机技术、PEBB 的发展及用户对用电要求的提高, 电力电子技术向数字化、模块化、绿色化发展的趋势更加明显。

在电力电子器件材料方面, 由于目前采用的硅基电子器件在耐高温、高压方面还不能满足应用需要, 在今后的发展空间已经相对窄小, 因此在未来一段时期, 基于新型材料的电力电子器件特别是碳化硅 (SiC) 器件的开发是推动电力电子技术发展的重要途径。与其他半导体材料相比, SiC 具有高禁带宽度、高饱和电子漂移速度、高击穿强度、低介电常数和高热导率等优异的物理特性, 这些特性决定了 SiC 在高温 (300~500℃)、高频率、高功率的应用场合是十分理想的材料。理论分析表明, SiC 功率器件非常接近于理想的功率器件。SiC 器件的研发将成为未来电力电子技术的一个主要方向, 并将极大地推动电力电子技术的进步。

3. 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、新能源系统等, 在照明、空调等家用电器及其他领域中也有着广泛的应用。以下对几个主要应用领域加以叙述。

(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。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。

(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。

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，其蓄电车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。

(3) 电力系统。电力电子技术在电力系统有着广泛的应用。据统计，发达国家用户最终使用的电能中，有 60% 以上至少经过一次以上电力电子变流装置的处理。

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。在配电网系统，电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等，以进行电能质量控制，改善供电质量。

在变电所中，给操作系统提供可靠的交直流操作电源，给蓄电池充电等都需要电力电子装置。

(4) 电子装置用电源。各种电子装置一般都是不同电压等级的直流电源供电。通信设备中程控交换机所用的直流电源以前用晶闸管整流电源，现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在各种电子装置中，以前大量采用线性稳压电源供电，由于高频开关电源体积小、质量轻、效率高，现在已逐渐取代了线性电源。因为各种信息技术装置都需要电力电子装置接通电源，所以说信息电子技术离不开电力电子技术。

(5) 家用电器。照明在家用电器中占有十分突出的地位，比如电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源，通常被称为“节能灯”，它正在逐步取代传统的白炽灯和日光灯。

变频空调是家用电器中应用电力电子技术的典型例子。电视机、音响设备、家用计算机等电子设备的电源部分也都需要电力电子技术。此外，有些洗衣机、电冰箱、微波炉等电器也应用了电力电子技术。

(6) 其他。不间断电源 (UPS) 在现代社会中的作用越来越重要，用量也越来越大。目前，UPS 在电力电子产品中已占有相当大的份额。

以前电力电子技术的应用偏重于中、大功率。现在，1kW 以下，甚至几十瓦以下的功率范围内，电力电子技术的应用也越来越广，其地位也越来越重要。这已成为一个重要的发展趋势，值得引起人们的注意。

总之，电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙和大自然的探索，到国民经济

的各领域，再到日常的衣食住行，到处都能感受到电力电子技术存在和巨大魅力。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。

电力电子装置提供给负载的是各种不同的直流电源、恒频交流电源和变频交流电源，因此也可以说，电力电子技术研究的是电源技术。

思考与习题

- 1-1 阐述电力技术、电子技术与电力电子技术三者在学习内容上的联系与差别。
- 1-2 为什么电力电子器件都工作在开关状态？
- 1-3 电力电子电路有哪几种基本类型？
- 1-4 电力电子技术在国民经济建设中有何重要作用？
- 1-5 试举例说明电力电子技术的应用。



第1篇 相控变流电路

1 电力电子器件

电力电子器件是电力电子电路的基础，掌握各种常用电力电子器件的特征和正确使用方法是学好电力电子技术的基础。本章将对电力电子器件的概念、特点和分类等问题作简要概述，并分别介绍各种常用电力电子器件的工作原理、基本特征、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题。

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 电力电子器件的概念

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。电力电子器件是实现电能的变换或控制的电子器件，直接用于处理电能的主电路中。同电子技术中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，因此，电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件。与普通半导体器件一样，目前电力半导体器件所采用的主要材料仍然是硅。

1.1.2 电力电子器件的基本特性

由于电力电子器件直接用于处理电力电能的主电路，因而同处理信息的电子器件相比，它一般具有以下特征。

(1) 电力电子器件所能处理电功率的大小，也就是其承受电压和电流的能力，是其最重要的参数。其处理电功率的能力小至毫瓦级，大至兆瓦级，一般都远大于处理信息的电子器件。

(2) 电力电子器件一般都工作在开关状态，其主要原因是因为处理的电功率较大，为了减小本身的损耗，提高效率。导通时（通态）阻抗很小，接近于短路，管压降接近于零，而电流由外电路决定；阻断时（断态）阻抗很大，接近于断路，电流几乎为零，而管子两端电压由外电路决定，因而，电力电子器件的动态特性（即开关特性）和参数，也是电力电子器件特性很重要的方面。正因为如此，常常将一个电力电子器件或几个电力电子器件组合成外特性像一个开关，故称电力电子开关，或称电力半导体开关。在分析电路时，为简单起见也往往用理想开关来代替。广义上讲，电力电子开关有时候也指由电力电子器件组成的在电力系统中起开关作用的电气装置。

(3) 在实际应用中，电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。由于电力电子器件所处理的电功率较大，因此需要一定的中间电路对普通的信息电子电路信号进行适当的放