



WUTP

普通高等学校  
自动化类专业新编系列教材

Power Electronics

电力电子技术

主编 林辉 王辉



武汉理工大学出版社

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

# Power Electronics

# 电力电子技术

主 编 林 辉 王 辉

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·



## 内容提要

本书分为器件和变换电路两大部分。在器件部分,除了传统的可控硅器件之外,大量的篇幅介绍可关断器件以及新型功率半导体器件如 IPM、PIC 等。在变换电路中按 AC/DC、DC/AC、DC/DC、AC/AC 分类介绍。在 AC/DC 中介绍了新型的 PWM 整流器,在 DC/AC 中介绍了 SPWM 技术阶叠合成逆变器,在 AC/AC 变换中介绍了新兴的矩阵式交-交变换技术。第七章谐振开关技术、第八章电力电子电路计算机仿真和第九章电力电子电路运行中的问题,都反映了电力电子学科当前的研究与发展的趋势。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/林辉,王辉主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2002. 3

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

ISBN 7-5629-1783-3

I. 电…

II. ①林… ②王…

III. 电力电子-高等学校-教材

IV. TN01

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市武昌珞狮路 122 号 邮编:430070

HTTP://www.whut.edu.cn/chuban1

E-mail:wutp@public.wh.hb.cn

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉理工大学出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:18.5

字 数:468 千字

版 次:2002 年 3 月第 1 版

印 次:2002 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1—5000 册

定 价:26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换

本社购书热线电话:(027)87397097 87394412

## 前 言

电力电子技术是当今发展较为迅速的一门学科,各种新型的电力电子器件的不断涌现也使得这门新兴的学科的内涵得到迅速更新。正如同目前高等学校面临着学科调整、教材更新的要求一样,电力电子技术教材也要求它能适应当今这门学科发展的需要,要求教材能反映最新的内容。本书就是基于这种思想编写的。

本书分为器件和变换电路两大部分。在器件部分,除了传统的可控硅器件之外,大量的篇幅介绍可关断器件以及新型功率半导体器件如 IPM、PIC 等。在变换电路中按 AC/DC, DC/AC, DC/DC, AC/AC 分类介绍。在 AC/DC 中介绍了新型的 PWM 整流器,在 DC/AC 中介绍了 SPWM 技术阶递合成逆变器,在 AC/AC 变换中介绍了新兴的矩阵式交-交变换技术。第七章谐振开关技术、第八章电力电子计算机辅助分析和第九章电力电子电路运行中的问题,都反映了电力电子学科当前的研究与发展的趋势。本书第一章的绪论对电力电子的发展、现状与趋势作了总结。教学时不要求一开始就要深入理解,建议系统地学完各章后再回过头来读一遍绪论,有助于对电力电子技术学科的理解。

本教材在使用过程中可根据大学本科和专科教学的需要作适当的删减。在作专科教材时可删减第 7、8、9 章的内容。本书也可以作为研究生和有关科技人员参考书。

本书的第 1、2、4、8 章由西北工业大学林辉编写,第 3 章、第 4.2 节、第 6.3 节由湖南大学王辉编写,第 5、6 章由湖北工学院廖冬初编写,第 2、9 章由南昌大学徐敏编写,第 7 章由西北工业大学周青苗编写。全书由西北工业大学林辉统稿,由林辉、王辉主编。在编写过程中,西北工业大学吴小华老师提出了宝贵意见,参加了审稿工作并编写了第 3 章的相控整流电路设计部分;武汉理工大学陈前平老师也提出了宝贵意见。

由于作者学识有限,编写仓促,本书一定有很多疏漏及错误之处,希望使用本教材的老师和同学批评指正。

编 者

2002 年 1 月

# 普通高等学校自动化类专业新编系列教材

## 出版说明

世纪之交,我国高等学校的人才培养工作正处在一个关键的历史时期。为了适应我国改革开放和社会主义现代化建设特别是社会主义市场经济体制对高等教育人才培养工作的新要求,为了适应世界科学技术发展的新趋势和新特点,原国家教育委员会组织对普通高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订,并于1998年7月由教育部正式颁布实施。修订后的专业目录中,自动化类专业的专业面大大拓宽,相应的专业培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。要适应新的专业培养目标和教学要求,组织一套新的自动化类专业系列教材就成了当务之急。为此,武汉理工大学出版社在广泛调研的基础上,组织国内近30所大学的近100位教授共同编写了这套系列教材。

本套教材定位于普通高等学校自动化类专业本科层次,遵照教育部颁发的《普通高等学校本科专业介绍》中所提出的培养目标和培养要求,依据2000年5月全国23所高等院校的70多位专家教授在武汉共同确定的指导思想和编写大纲进行编写,具有如下特点:

**观念新**——主动适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求;

**内容新**——自动化技术在近20年来进展巨大,并与计算机技术、航空航天技术、建筑工程、生物工程、社会科学(社会系统与经济系统)联系越来越紧密,这套教材尽可能反映了这些内容,以适应21世纪自动化与控制工程人才的培养要求;

**体系新**——在以前的基础上重构和重组,而非重建。各门课程及内容的组成、顺序、比例更加优化,避免遗漏和不必要的重复;

**与国际接轨**——自动化类专业教育要面向世界,面向未来,面向区域经济。在借鉴发达国家高等教育的专业模式和课程设置的同时,适当兼顾当前各地区经济文化发展不平衡的现状;

**教学手段现代化**——本套教材力求具有网络化、电子化、数字化的特色,大力推进电子讲稿和多媒体课件的出版工作。

本系列教材是在21世纪初推出的目前系统优化、品种较全、作者阵容最强的一套普通高等学校自动化类(本科)系列教材。我们将高度重视,兢兢业业,保证质量,恳请选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提意见和建议,以便我们不断修订、补充、完善全套教材。

21世纪已经到来,知识经济的曙光已经初现。面向新世纪的中国高等教育正在经历前所未有的变革和发展,人文与理工相通,科学与技术相融,教学与研究并重,知识与智慧同尊,以培养社会经济文化发展所需要的复合型人才,这是我国建立知识创新体系的重大挑战和空前机遇。我社愿与各位专家、读者真诚合作,共同努力,为新世纪的中国高等教育事业做出更大的贡献。

武汉理工大学出版社

2001年8月

# 普通高等学校自动化类专业新编系列教材

## 编审委员会

顾问:

郑大钟 熊有伦 戴冠中 萧德云 陈伯时 周祖德  
项国波 席裕庚 褚 健

主任委员:

萧蕴诗 张崇巍 陈大钦 吴 坚 陈福祥 高鸣涵

委员(按姓氏笔画顺序):

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 马建国 | 王 辉 | 王孝武 | 王明阳 | 王建华 | 王俊杰 |
| 文 方 | 方康玲 | 卢京潮 | 龙 伟 | 申功璋 | 叶春生 |
| 全书海 | 吕 锋 | 刘 泉 | 刘涤尘 | 刘京南 | 李汉强 |
| 李磊民 | 宋靖雁 | 林 都 | 林 辉 | 林锦国 | 杨 波 |
| 杨天怡 | 杨家本 | 周泽义 | 胡 超 | 赵英凯 | 赵曾贻 |
| 侯朝桢 | 钟 珞 | 须文波 | 翁维勤 | 夏承铨 | 郭圣权 |
| 徐科军 | 黄席樾 | 章卫国 | 彭容修 | 程耕国 | 温阳东 |
| 曾庆军 | 谢克明 | 熊前兴 | 黎明森 | 戴文进 |     |

编委会秘书:

黄 春

总责任编辑:

杨学忠 徐秋林





## 普通高等学校自动化类专业新编系列教材目录

- 自动化（专业）概论
- 工程电路分析
- 电路实验指导书
- 模拟电子技术基础
- 数字电子技术基础
- 电子技术实验
- 自动控制原理
- 自动控制原理实验
- 系统工程概论
- 过程控制系统
- 运动控制系统
- 微机原理及应用
- 计算机控制系统
- 软件技术基础
- 网络技术基础
- 检测技术与仪表
- 信号处理技术
- 电力电子技术
- 电气工程基础
- 自动化专业英语

责任编辑：徐秋林  
封面设计：杨 涛

ISBN 7-5629-1783-3



9 787562 917830 >

ISBN 7-5629-1783-3  
TP · 58 定价：26.00 元



## 目 录

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 1 绪论 .....                       | (1)  |
| 1.1 电力电子技术及特点 .....              | (1)  |
| 1.2 电力电子技术的发展概述 .....            | (1)  |
| 1.3 电力电子技术研究的内容 .....            | (5)  |
| 1.3.1 电力电子开关器件 .....             | (5)  |
| 1.3.2 电力电子变换器主电路 .....           | (6)  |
| 1.3.3 电力电子功率变换的基本类型 .....        | (6)  |
| 1.3.4 控制方式 .....                 | (8)  |
| 1.4 电力电子技术应用 .....               | (9)  |
| 1.5 教学要求 .....                   | (12) |
| 2 电力半导体器件特性与应用 .....             | (13) |
| 2.1 概述 .....                     | (13) |
| 2.2 晶闸管及其派生器件 .....              | (13) |
| 2.2.1 晶闸管的基本工作原理 .....           | (13) |
| 2.2.2 晶闸管静态伏安特性 .....            | (15) |
| 2.2.3 晶闸管基本特性参数 .....            | (16) |
| 2.2.4 晶闸管的门极驱动电路 .....           | (23) |
| 2.2.5 晶闸管的保护 .....               | (25) |
| 2.2.6 晶闸管的派生器件 .....             | (26) |
| 2.3 双极型晶体管 .....                 | (34) |
| 2.3.1 BJT 结构和基本工作原理 .....        | (34) |
| 2.3.2 特性与参数 .....                | (35) |
| 2.3.3 BJT 的驱动和保护 .....           | (41) |
| 2.4 功率场效应晶体管(Power MOSFET) ..... | (47) |
| 2.4.1 功率 MOSFET 的结构和基本工作原理 ..... | (47) |
| 2.4.2 静态特性与参数 .....              | (48) |
| 2.4.3 动态特性与参数 .....              | (50) |
| 2.4.4 安全工作区 .....                | (52) |
| 2.4.5 功率 MOSFET 的驱动和保护 .....     | (53) |
| 2.5 绝缘栅双极型晶体管(IGBT) .....        | (55) |
| 2.5.1 IGBT 的结构和基本工作原理 .....      | (56) |
| 2.5.2 IGBT 的基本特性 .....           | (57) |
| 2.5.3 门极驱动 .....                 | (60) |



|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| 2.5.4 IGBT 保护 .....        | (62)         |
| 2.6 其他功率半导体器件 .....        | (64)         |
| 2.6.1 静电感应晶体管(SIT) .....   | (64)         |
| 2.6.2 静电感应晶闸管(SITH) .....  | (66)         |
| 2.6.3 MOS 控制晶闸管 .....      | (68)         |
| 2.7 功率集成电路与 IPM .....      | (70)         |
| 2.7.1 功率集成电路 .....         | (70)         |
| 2.7.2 智能模块 IPM .....       | (74)         |
| 2.8 全控型开关器件的缓冲电路与串并联 ..... | (77)         |
| 2.8.1 缓冲电路 .....           | (77)         |
| 2.8.2 电力开关元件的串并联 .....     | (82)         |
| 习题 .....                   | (84)         |
| <b>3 AC/DC 变换技术 .....</b>  | <b>(86)</b>  |
| 3.1 概述 .....               | (86)         |
| 3.2 相控整流电路 .....           | (87)         |
| 3.2.1 工频相控整流的基本原理 .....    | (87)         |
| 3.2.2 单相可控整流电路 .....       | (89)         |
| 3.2.3 三相可控整流电路 .....       | (98)         |
| 3.2.4 变压器漏抗对整流电路的影响 .....  | (108)        |
| 3.3 相控整流电路设计方法 .....       | (110)        |
| 3.3.1 相控整流电路设计程序 .....     | (110)        |
| 3.3.2 设计举例 .....           | (111)        |
| 3.4 PWM 整流电路 .....         | (113)        |
| 3.4.1 单相电压型 PWM 整流电路 ..... | (113)        |
| 3.4.2 三相电压型 PWM 整流电路 ..... | (117)        |
| 3.4.3 三相电流型 PWM 整流电路 ..... | (119)        |
| 习题 .....                   | (120)        |
| <b>4 DC/AC 变换技术 .....</b>  | <b>(122)</b> |
| 4.1 概述 .....               | (122)        |
| 4.1.1 逆变器的分类 .....         | (122)        |
| 4.1.2 逆变电路原理与结构 .....      | (123)        |
| 4.2 有源逆变 .....             | (124)        |
| 4.2.1 单相桥式逆变电路 .....       | (125)        |
| 4.2.2 实现有源逆变的条件 .....      | (126)        |
| 4.2.3 三相桥式逆变电路 .....       | (127)        |
| 4.2.4 逆变失败与最小逆变角的限制 .....  | (128)        |
| 4.3 PWM 逆变器 .....          | (129)        |

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| 4.3.1 单相 PWM 逆变器 .....    | (129)        |
| 4.3.2 三相逆变器 .....         | (133)        |
| 4.3.3 SPWM 波形生成技术 .....   | (137)        |
| 4.4 阶梯波 .....             | (145)        |
| 4.5 PWM 逆变器设计 .....       | (148)        |
| 4.5.1 主回路元件选择 .....       | (148)        |
| 4.5.2 驱动与保护电路设计 .....     | (150)        |
| 4.5.3 缓冲电路计算 .....        | (150)        |
| 4.5.4 PWM 策略与滤波电路 .....   | (150)        |
| 4.5.5 热计算 .....           | (151)        |
| 4.5.6 逆变变压器设计 .....       | (151)        |
| 4.5.7 控制策略 .....          | (151)        |
| 习题 .....                  | (152)        |
| <b>5 DC/DC 变换技术 .....</b> | <b>(154)</b> |
| 5.1 概述 .....              | (154)        |
| 5.2 直流/直流变换电路 .....       | (154)        |
| 5.2.1 降压变换器 .....         | (154)        |
| 5.2.2 升压变换器 .....         | (160)        |
| 5.2.3 升降压变换器 .....        | (163)        |
| 5.2.4 库克变换器 .....         | (166)        |
| 5.3 变压器隔离的直流-直流变换器 .....  | (169)        |
| 5.3.1 正激变换器 .....         | (169)        |
| 5.3.2 反激变换器 .....         | (170)        |
| 5.3.3 半桥式隔离的降压变换器 .....   | (170)        |
| 5.3.4 全桥式隔离的降压变换器 .....   | (171)        |
| 5.4 开关电源设计原理 .....        | (173)        |
| 5.4.1 开关电源的性能指标 .....     | (174)        |
| 5.4.2 开关电源的设计原理 .....     | (174)        |
| 习题 .....                  | (180)        |
| <b>6 AC/AC 变换技术 .....</b> | <b>(181)</b> |
| 6.1 概述 .....              | (181)        |
| 6.2 单相交流调压 .....          | (181)        |
| 6.2.1 通断控制调压方法 .....      | (181)        |
| 6.2.2 相位控制调压方法 .....      | (182)        |
| 6.3 三相交流调压 .....          | (182)        |
| 6.4 矩阵变换器 .....           | (185)        |
| 6.4.1 矩阵变换器的拓扑结构 .....    | (185)        |

|       |                              |       |
|-------|------------------------------|-------|
| 6.4.2 | 矩阵变换器的功率开关 .....             | (186) |
| 6.4.3 | 矩阵变换器的换流 .....               | (186) |
| 6.4.4 | 矩阵变换器的控制原理 .....             | (187) |
| 6.5   | 交流-交流变频电路 .....              | (191) |
| 6.5.1 | 单相交-交变频电路 .....              | (191) |
| 6.5.2 | 三相交-交变频电路 .....              | (195) |
|       | 习题 .....                     | (198) |
| 7     | 谐振开关技术 .....                 | (199) |
| 7.1   | 概述 .....                     | (199) |
| 7.2   | 谐振电路基本工作原理 .....             | (200) |
| 7.2.1 | 串联谐振电路工作原理 .....             | (200) |
| 7.2.2 | 并联谐振电路工作原理 .....             | (200) |
| 7.3   | 软开关电路在开关电源中的分类 .....         | (201) |
| 7.3.1 | 准谐振变换器 .....                 | (201) |
| 7.3.2 | 软开关 PWM 技术 .....             | (205) |
| 7.4   | 直流环节谐振型逆变器 .....             | (210) |
| 7.4.1 | 有损耗 LC 谐振槽路 .....            | (210) |
| 7.4.2 | 开关 $S_r$ 的作用 .....           | (211) |
| 7.4.3 | RDCLI 的工作过程分析 .....          | (212) |
|       | 习题 .....                     | (213) |
| 8     | 电力电子电路计算机仿真 .....            | (214) |
| 8.1   | 概述 .....                     | (214) |
| 8.2   | 电力电子仿真分析基础 .....             | (215) |
| 8.2.1 | 仿真分析中常用的器件模型 .....           | (215) |
| 8.2.2 | 仿真分析基本方法 .....               | (216) |
| 8.3   | MATLAB 用于电力电子电路分析方法 .....    | (218) |
| 8.3.1 | MATLAB 语言简介 .....            | (218) |
| 8.3.2 | MATLAB 电气系统模块(PSB)仿真过程 ..... | (218) |
| 8.3.3 | PSB 提供的库和模块 .....            | (219) |
| 8.3.4 | PSB 中电力电子器件模型 .....          | (227) |
| 8.3.5 | 电子仿真举例 PSB 电力 .....          | (234) |
| 8.4   | Pspice 用于电力电子电路分析方法 .....    | (238) |
| 8.4.1 | Pspice 语言简介 .....            | (238) |
| 8.4.2 | Pspice 的电路及元器件描述 .....       | (239) |
| 8.4.3 | Pspice 通用语句与仿真分析 .....       | (253) |
| 8.4.4 | Pspice 仿真实例 .....            | (257) |
|       | 习题 .....                     | (258) |



---

|                                                    |       |
|----------------------------------------------------|-------|
| <b>9 电力电子电路运行中的问题</b> .....                        | (260) |
| 9.1 电力电子谐波与有源电力滤波器 .....                           | (260) |
| 9.1.1 有源滤波补偿原理 .....                               | (260) |
| 9.1.2 APF 主电路及其控制 .....                            | (261) |
| 9.2 功率因数提升技术 .....                                 | (262) |
| 9.2.1 电力电子装置功率因数的基本概念 .....                        | (262) |
| 9.2.2 整流电路的功率因数及其改善措施 .....                        | (264) |
| 9.2.3 采用无功补偿提高功率因数 .....                           | (267) |
| 9.2.4 减小谐波成分,提高电流畸变因数(谐波对 $\cos\varphi$ 的影响) ..... | (270) |
| 9.2.5 采用两组交流装置串联运行 .....                           | (271) |
| 9.2.6 功率因数校正整流电路 .....                             | (271) |
| 9.3 逆变器的并联运行 .....                                 | (272) |
| 9.3.1 自整步法 .....                                   | (273) |
| 9.3.2 外特性下垂法 .....                                 | (274) |
| 9.3.3 主从模块法 .....                                  | (275) |
| 9.3.4 热同步并机技术 .....                                | (275) |
| 9.3.5 无主从同步均流技术 .....                              | (276) |
| 9.4 电力电子器件的发热问题 .....                              | (276) |
| 9.4.1 半导体器件最高允许结温与结温减额 .....                       | (276) |
| 9.4.2 热路与温度计算 .....                                | (277) |
| 9.4.3 外部热阻确定方法和散热器设计 .....                         | (279) |
| 9.4.4 瞬态热阻 .....                                   | (281) |
| 习题 .....                                           | (283) |
| <b>参考文献</b> .....                                  | (284) |

# 1 绪 论

## 1.1 电力电子技术及特点

电力电子技术(Power Electronics Technology)是利用电力电子器件对电能进行控制和转换的新兴学科。国际电气和电子工程师协会(IEEE)的电力电子学会对电力电子技术的定义是:“有效地使用电力半导体器件,应用电路和设计理论以及分析开发工具,实现对电能的高效能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。”因而,电力电子技术的发展是以电力电子器件为核心,并伴随着变换技术和控制技术的发展而发展的。

电力电子技术从字面上可以理解为功率强大的,可供诸如电力系统那样大电流高电压场合应用的电子技术,它和传统的电子技术相比有什么特殊之处,仅仅是因为它能够通过大电流和承受高电压吗?问题并非这么简单。举个例子,如果一个电子器件处于放大方式运行,承受 1000V 的电压,流过 600A 的电流,当它的电压和电流都在最大值时,这个器件承受的瞬时功率是 600kW。可想而知这个器件的发热是多么严重,运行的效率是多么低!再者,目前的技术也无法制造出这样的器件来。因而,对于大功率的电子电路,器件的运行都采用开关方式。例如整流应用的电路,在负半周时器件关断不导通,在正半周时器件接通。这样,器件的功耗处于两种状态,即关断时高压但基本没电流;导通时大电流,但器件只有很小的导通电压,因而器件承受的功率很小。这种开关方式就是电力电子器件运行的特点。然而,对电路的应用要求各种各样,怎样使这些处于开关方式运行的电力电子器件能在大功率条件下满足各种应用电路功能的要求就形成了电力电子技术研究的主要内容。

## 1.2 电力电子技术的发展概述

早在 20 世纪三四十年代,人们就开始应用电机组、汞弧整流器、闸流管、电抗器、接触器等进行对电能的变换和控制,这样的变流装置存在着以下明显的缺点:如功率放大倍数低,响应慢,体积大,功耗大,效率低和噪声大。

20 世纪 50 年代初,普通的整流器 SR(semiconductor rectifier)开始使用,实际上已经开始取代汞弧整流器。但电力电子技术真正的开始是由于 1957~1958 年第一个反向阻断型可控硅 SCR(silicon controlled rectifier)的诞生,后称晶闸管(thyristor)。一方面由于其功率变换能力的突破,另一方面实现了弱电对以晶闸管为核心的强电变换电路的控制,使电子技术步入了功率领域,在工业上引起了一场技术革命。变流装置由旋转方式变为静止方式,具有提高效率、缩小体积、减轻重量、延长寿命、消除噪声、便于维修等优点。由于其器件以开关方式运行和控制方法的特殊性,进而形成了电力电子技术学科。在随后的 20 年内,随着晶闸管特性不断的改进及功率等级的提高,晶闸管已经形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。同时还研制出一系列晶闸管的派生器件,如不对称晶闸管 ASCR(asymmetrical

thyristor)、逆导晶闸管 RCT (reverse-conducting thyristor)、双向晶闸管 TRIAC (TRI thyristor)、门极辅助关断晶闸管 GATT (gate-assisted turn-off thyristor)、光控晶闸管 LASCR (light-activated silicon rectifier) 等器件,大大地推进了各种电力变换器在冶金、运输、化工、机车牵引、矿山、电力等行业的应用,促进了工业的技术进步,开创了传统的“晶闸管及其应用”的电力电子技术发展的第一阶段,即传统电力电子技术阶段。

尽管在电压、电流两方面,晶闸管系列器件仍有着一定的发展余地,但因下述几项缺点阻碍了它们的继续发展:①由于它是半控型器件,因此要想关断这些器件必须另用由电感、电容和辅助电源组成的强迫换相电路,结果使得电路复杂、整机体积增大、重量增加、效率降低、可靠性下降。②由于器件的开关速度难以提高,一般情况下低于 400Hz,大大限制了它的应用范围。③由于相控运行方式使电网及负载上产生严重的谐波,不但电路功率因数低,而且对电网产生“公害”。随着工业生产的发展,迫切要求新的器件和变换技术出现,以改进和取代传统的电力电子技术。

20 世纪 70 年代后期,尤其是 20 世纪 80 年代以后,各种高速、全控型的器件先后问世,并获得迅速发展。如可关断晶闸管 GTO (gate-turn-off thyristor)、大功率(巨型)晶体管 GTR (giant transistor)、功率场效应晶体管 Power MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor)、绝缘栅双极晶体管 IGBT (insulated gate bipolar transistor)、静电感应晶体管 SIT (static induction transistor)、静电感应晶闸管 SITH (static induction thyristor)、MOS 晶闸管 MCT (MOS controlled thyristor) 等。变流装置中的普通晶闸管逐渐被这些新型器件取代,新的结构紧凑的变流电路随之出现,它具有功率增益高、控制灵活、动态特性好、效率高等优点。

随着集成工艺的提高和突破,20 世纪 80 年代中期电力电子的另一个重要的进展是诞生了功率集成电路,也称 PIC (power IC) 和智能功率模块 IPM (intelligent power model)。这些器件实现了功率器件与电路的总体集成,它使微电子技术 with 电力电子技术相辅相成,把信息科学融入功率变换。器件实现了多功能化,不但具有开关功能,还增加了保护、检测、驱动等功能,有的器件还具有放大、调制、振荡及逻辑运算的功能,使强电与弱电达到了完美的结合,应用电路结构大为简化,电力电子应用范围进一步拓宽。功率集成电路又分为高压集成电路 HVIC 和智能功率集成电路 SPIC (smart power IC),而 IPM 则是 IGBT 的智能化模块。目前 PIC 和 IPM 器件的发展非常迅速。

新型电力半导体器件呈现出许多优势,这一切使电力电子技术具有了全新的面貌,被称之为现代电力电子技术。现代电力电子技术的主要特点是:

(1) 全控化 由半控型的普通晶闸管到全控型的各类自关断器件,是电力电子器件在功能上的重大突破。不管是双极型的 GTO、GTR、SITH,还是单极型的功率 MOSFET、SIT 以及混合型器件 IGBT、MCT 等都实现了全控化,避免了传统电力电子器件关断时所需要的强迫换相电路,使结构大为简化。

(2) 集成化 与传统电力电子器件基于分立的方式不同,几乎所有全控型器件都是由许多单元器件并联而成,例如一个 40A 的功率 MOSFET 大约由上万个单元器件并联而成,而一个 300A 的 SITH 则含有大约 5 万个单元器件。

(3) 高频化 随着器件集成化的实现,同时提高了器件的工作速度,例如高电压大电流的 GTO,其工作频率为 1~2kHz, GTR 可在 10kHz 频率以下工作, IGBT 的工作频率可达

几十千赫,功率 MOSFET 可达数百千赫,而 SIT 则可达 10MHz 以上。

(4)高效率 高效率体现在器件和变换技术两个方面。由于电力电子器件的导通压降在不断地改善,例如,IGBT 的发展经过了 5 代,其导通压降由 3.2V 降到 1.5V,降低了导通损耗。器件开关的上升和下降过程加快,也降低了开关损耗。同时由于驱动电力电子器件的专用集成电路已经产品化并在变换器中被广泛采用,因而可使电力电子器件处于合理的运行状态,进而提高了运行效率。变换器中采用的软开关技术也使运行效率得到提高。

(5)低谐波、高功率因数 现代电力电子技术中广泛采用脉宽调制 PWM(pulse width modulation)技术、正弦波脉宽调制 SPWM 和消除特定次谐波技术,使得变换器的谐波大为降低。提高功率因数的变换技术和专用集成电路的产生,使得变换器的功率因数得到提高。

(6)变换器小型化 随着器件的高频化,控制电路的高度集成化和微机化,使得滤波电路和控制器的体积大为减小。电力电子器件的模块化使多个器件集成在一个模块中,减小了主电路的体积;先进的三相变频调速控制器,全部器件包括功率半导体器件等,采用表面贴装技术,功率达 10kVA 而只有信用卡的大小。这给各种领域的应用提供了方便。

(7)控制技术数字化和微机化 目前,电力电子器件的发展水平见表 1.1。它正向着大容量、高频、易驱动和智能化发展。已商品化的全控型器件将朝着大功率、易驱动和高频率这三个方向继续发展。随着新器件(如 MCT、SIT 等)的成熟和实用化,IGBT 电压、电流容量的进一步提高,GTO 快速性能的改进等,普通晶闸管和电力晶体管的应用范围将被迫缩小。功率集成电路集电力半导体器件、驱动电路、传感器和诊断、保护、控制电路之大成,这些智能化的功率集成电路的诞生预示着电力电子技术即将进入智能化的时代。但是,当今电力电子器件无例外地以硅作为基础材料,其垄断地位在不远的将来也许仍将维持。近些年,新型半导体材料的研究正在不断地取得突破,碳化硅(SiC)、砷化镓(GaAs)和金刚石薄片等材料用于电力电子器件正显示出明显的优势,它预示着新一代器件将出现。新器件类似于 MOSFET,但有高得多的功率和开关频率、低导通压降、耐高温等优良性能。其中,最令人瞩目的材料是金刚石,有关资料表明,与硅器件相比,金刚石 Power MOSFET 器件的功率可提高到  $10^6$  数量级,频率提高 50 倍,导通压降降低一个数量级,最高结温可达 600℃。新材料的出现有取而代之传统硅材料的趋势。

电力半导体器件特性的每一步新发展都引起了变换电路和控制技术的相应突破。首先是在变换器主电路上,各种各样优化的主电路拓扑结构相继产生,如高功率因数 PWM 整流器、谐振逆变器、矩阵式交-交变换器,以满足高效、高可靠变换的要求。其次是器件的驱动和保护电路的日益完善,并逐渐模块化和集成化。最初的晶闸管其控制方法是调整器件的导通角,即控制触发信号与主电路之间的相移角,故称为相控技术。随着各种全控型电力半导体器件的问世,为减少输出波形中谐波分量,1964 年德国的 A·Schonung 和 H·Stemmler 首次把通讯工程中脉冲宽度调制理论 PWM 移植应用到电力变换装置中,它具有功率因数高、可同时实现变频变压及抑制谐波等优点,使得变流电路与控制技术发生了巨大的变化,从而成为功率变换的核心技术。由于 PWM 技术可以有效地进行谐波抑制,动态响应好,使变流电路的性能大大提高,其应用范围涉及斩波、整流、逆变、交-交变换等各种电路,目前仍占据主导地位,某些性能更好的调制方式正处于研究之中。还应该提及的是,在功率变换的控制方式中,脉冲幅度调制 PAM(pulse amplitude modulation)和脉冲频率调制 PFM(pulse-frequency modulation)也得到广泛的应用。近年来谐振式软开关变换器控制技术的发展非



常迅速,已经成为研究热点之一。

表 1.1 电力半导体器件的最新研制水平

| 器件名称                      | 国外研制水平                                                                             | 国内研制水平                            |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 普通整流管                     | 8kV/5kA ( $f=400\text{Hz}$ )                                                       | 6kV/3.5kA                         |
| 普通晶闸管 SCR                 | 12kV/1kA, 8kV/6kA                                                                  | 5.5kV/3kA                         |
| 快速晶闸管                     | 2.5kV/1.6kA<br>( $T_q=8\sim 50\mu\text{s}$ )                                       | 2kV/1.5kA ( $T_q=30\mu\text{s}$ ) |
| 光控晶闸管 LASCR               | 6kV/6kA, 8kV/4kA                                                                   | 4.5kV/2kA                         |
| 可关断晶闸管 GTO                | 9kV/2.5kA,<br>6kV/6kA ( $f=1\text{kHz}$ )                                          | 4.5kV/2.5kA                       |
| 集成门极换流晶闸管<br>IGCT         | 6kV/1.6kA                                                                          | 无                                 |
| 静电感应晶闸管 SITH              | 4kV/2.5kA ( $f=100\text{kHz}$ )                                                    | 1kV/150A                          |
| 电力晶体管 GTR                 | 模块:1.8kV/1kA ( $f=2\text{kHz}$ )                                                   | 模块:1.2kV/400A                     |
| 功率 MOSFET                 | 60A/200V(2MHz)<br>500V/50A(100MHz)                                                 | 1kV/35A                           |
| 绝缘栅双极晶体管<br>IGBT          | 单管:4.5kV/1kA<br>模块:3.5kV/1.2kA<br>( $U_F=1.5\sim 2.2\text{V}$ , $f=50\text{kHz}$ ) | 单管:1kV/50A<br>模块:1.2kV/200A       |
| 电子注入增强型栅极晶<br>体管 IEGT     | 4.5kV/1kA                                                                          | 无                                 |
| MOS 控制晶闸管 MCT             | 1kV/100A<br>( $U_F=1.1\text{V}$ , $T_q=1\mu\text{s}$ )                             | 1kV/75A                           |
| 智能功率模块 IPM<br>和功率集成电路 PIC | IPM:1.8kV/1.2kA                                                                    | 600V/75A                          |

随着微电子技术、计算机技术的发展,电力电子的计算机仿真及计算机辅助设计技术的发展也非常迅速,相应多种多样的专业软件成功地应用于电力电子电路参数、结构、控制策略的优化确定。高速的微处理器在电力电子系统中的应用使得复杂的控制和检测策略得以实现,使变流电路的效率和性能进一步提高。

总之,电力电子装置在减小体积和重量、提高效率、增加快速性以及增高电压、扩大电流、提高频率等方面均会有较大的进展。由于有性能优良的电力半导体开关器件、性能大为改善的磁性和绝缘材料、计算机、大规模集成电路技术、频率高达兆赫级的电能处理方法、新型电路拓扑结构及分析方法等方面的不断突破,使今天的电力电子技术具有全新面貌。随之而来的是应用领域日益广泛,推动了高新技术的发展,它为机电一体化设备、新能源技术、节能技术、超导和激光技术、空间与海洋技术、军事技术、生物技术、材料、机械加工和交通运输提供了高性能、高效率、轻量小型的电控设备,成为发展高新技术的基础之一。

## 1.3 电力电子技术研究的内容

电力电子技术研究的内容包括三个方面:电力电子器件、变流电路和控制电路。它与多种学科密不可分。总体上说,电力电子技术是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科,是一门多学科相互渗透的综合性技术学科。随着科学技术的发展,必将与现代控制理论、材料科学、微电子技术、计算机技术、电源技术以及电机工程等领域发生更加密切的关系。

作为一门学科,电力电子学所讨论的内容应包含器件与系统两大部分,但在电力电子工程应用中只需了解如何合理地选择和使用电力电子器件来构成各种变流装置,而深入了解器件制造工艺及载流子运动物理过程的细节则属于另外一门课程。因此,本书要探讨的主要内容侧重于器件的基本原理、特性和参数选择,以及由它们组成的变换器主电路拓扑、控制及保护措施。下面就有关基本概念作简单说明。

### 1.3.1 电力电子开关器件

用作能量变换与控制的大功率半导体器件与信息处理用器件不同。一方面它必须有高电压、大电流的承受能力,另一方面是以开关模式为运行特征的,因此通常被称为电力电子开关器件。根据器件所用半导体材料、制造工艺、工作机理及器件开通和关断的控制方式,电力电子器件有许多种类和不同的分类方式,一般按照开通、关断控制方式可分为三大类:

(1)不控型 这类器件的一端是阳极,另一端是阴极。其开关操作仅取决于施加于器件阳、阴极间的电压,正导通,负关断,流过其中的电流是单方向的。由于其开通和关断不能按需要控制,故这类器件称为不控型器件,常见的有大功率二极管、快速恢复二极管及肖特基二极管。

(2)半控型 这类器件是三端器件,除阳极和阴极外,还增加了一个控制门极。半控型器件也具有单向导电性,但开通不仅需在其阳、阴极间施加正向电压,而且还必须在门极和阴极间输入正向控制功率,因此开通可以被控制。然而这类器件一旦开通,就不能再通过门极控制关断,只能从外部改变加在阳、阴极间的电压极性或强制阳极电流变成零,所以把它们称为半控型。这类器件主要指晶闸管及其派生器件,如双向、逆导晶闸管等。

(3)全控型 这类器件也是带有控制端的三端器件,但控制端不仅可控制其开通,而且也能控制其关断,故称全控型。由于无需外部提供关断条件,仅靠自身控制即可关断,所以这类器件常被称为自关断器件。这类器件种类多,工作机理也不尽相同,在现代电力电子技术应用中起着越来越重要的作用,也是电力电子器件发展的主导方向。属于这类的代表器件有巨型晶体管 GTR、门极可关断晶闸管 GTO、双极型大功率晶体管 BJT、功率场效应晶体管 Power MOSFET 和绝缘栅双极型晶体管 IGBT 等。

按电力电子器件的驱动性质可以将器件分为电压型和电流型器件。电流型器件必须有足够的驱动电流才能使器件导通,因而一般情况下需要较大的驱动功率,这类器件有 SCR、GTR、GTO 等。电压型器件的导通只需要有足够的电压和很小的驱动电流就可以,因而电压型器件只需很小的驱动功率,这类器件有 IGBT、MOSFET、MCT 等。

从应用的角度选择电力电子器件一般主要考虑的是器件的容量,即额定电压和电流值、