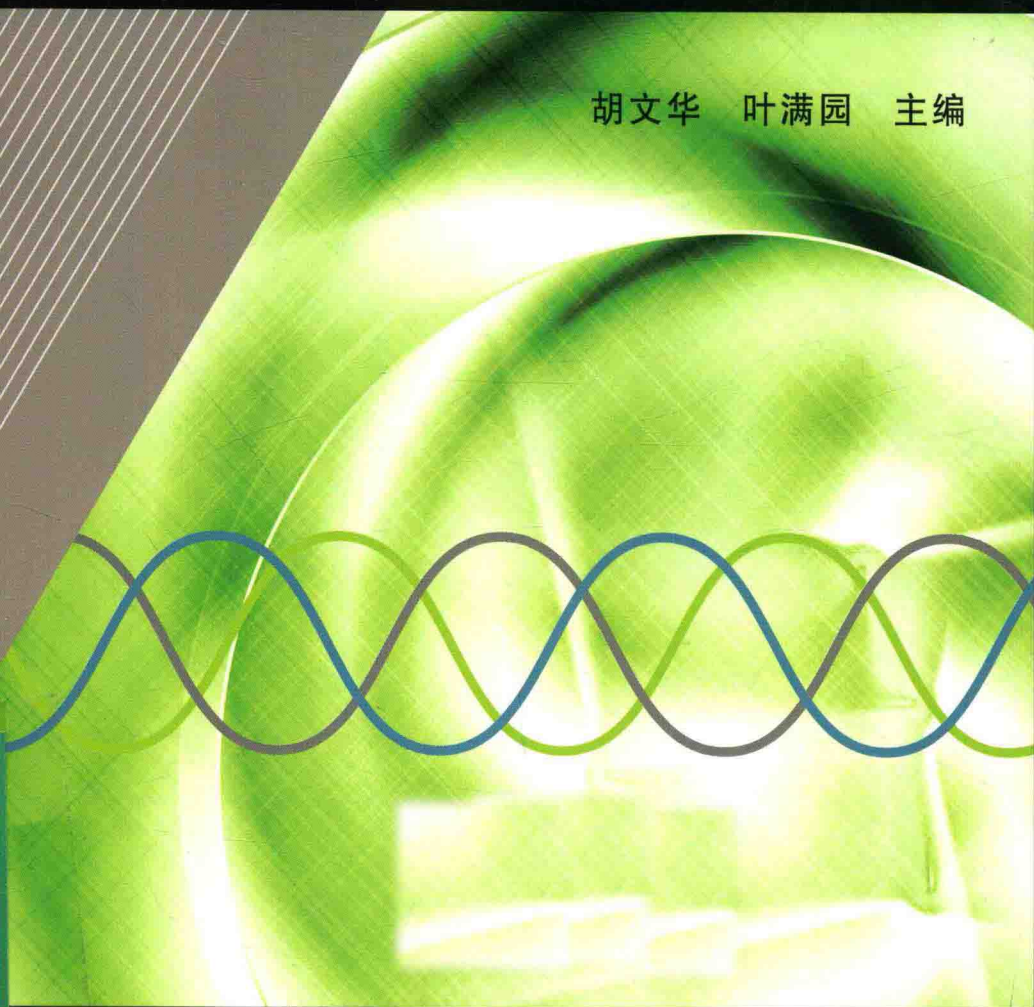


华东交通大学教材出版基金资助项目

# 电力电子技术

胡文华 叶满园 主编



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

华东交通大学教材出版基金资助项目

# 电力电子技术

胡文华 叶满园 主编

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要讲述电力电子技术的基本理论和基础知识,内容包括电力电子技术绪论、电力电子器件、交流-直流变流电路、直流-交流变流电路、直流-直流变流电路、交流-交流变流电路和开关电源等内容。

本书布局合理,层次清晰,删繁就简,重点突出,难点讲解透彻,便于自学。每章配有例题、小结并附有足够数量的习题及思考题。

本书可作为普通高等学校和成人高等学校电气工程及自动化、自动化等强电类专业“电力电子技术”、“开关电源”等课程的教材或参考书,也可供有关工程技术人员学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 胡文华, 叶满园主编. -- 北京 :  
北京航空航天大学出版社, 2017. 1  
ISBN 978-7-5124-0459-5

I. ①电… II. ①胡… ②叶… 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(2016)第 317725 号

版权所有,侵权必究。

## 电力电子技术

胡文华 叶满园 主编

责任编辑 杨 昕

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1 092 1/16 印张:16 字数:410 千字

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-0459-5 定价:36.00 元

# 编 委 会

主 编 胡文华 叶满园

参 编 宋平岗 杨丰萍

袁义生 许智榜

# 前 言

“电力电子技术”是电气工程及自动化、自动化等强电类专业重要的专业基础课程,该课程的特点是:理论性强,概念多,与工程实际联系密切。其教学目标是:通过本课程的学习,使学生获得电力电子技术系统的基本理论知识、基本分析方法、基本实验技能。这些基本内容和分析方法对分析其他电气设备也有普遍意义,因此,“电力电子技术”是强电类各专业的理论基础。本书正是以此为指导,全面阐述了电力电子技术系统的基本理论和基础知识。

本书共分7章:第1章是电力电子技术绪论部分,主要介绍了什么是电力电子技术,电力电子技术的发展历史和电力电子技术的应用领域;第2章着重阐述了电力电子器件的原理及其工作特性;第3章主要阐述了交流-直流变流电路,包括晶闸管整流电路、二极管整流电路和全控型器件的PWM整流电路;第4章阐述了直流-交流变流电路,包括单相电压源型逆变器及其调制、三相电压源型逆变电路及其调制、多电平逆变器、高压大容量逆变器复合结构、电流源型逆变器及其调制等内容;第5章阐述了直流-直流变流电路,即降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、Cuk斩波电路、Sepic斩波电路、Zeta斩波电路,复合斩波电路和多相多重斩波电路;第6章阐述了交流-交流变流电路,即交流调压电路、交流调功电路、交流电力电子开关及交-交变频电路;第7章阐述了反激变换器、正激变换器、推挽变换器、全桥和半桥隔离式降压变换器、带隔离的Sepic和Cuk变换器、Boost派生隔离变换器和软开关技术等内容。

本书的特点是:将电力电子技术的基本原理与开关电源两部分内容有机地结合为一个整体。以电力电子技术中应用最为广泛的四类基本变流电路为重点,侧重于基本原理和基本概念的阐述,并始终强调基本理论的实际应用。文字阐述方面层次清楚、概念准确、通俗易懂、深入浅出。内容阐述方面循序渐进、删繁就简、重点突出、难点讲解透彻、便于自学。每章开篇结合专业特点用楔子引入,每章结尾用小结高度概括本章的重点内容,便于复习巩固。另外,针对各章节的重点和难点,精心编写了例题和习题,题目具有典型性、启发性和实用性,能很好地引导学生掌握本课程的主要理论,培养学生解决工程实际问题的能力。

本书可作为普通高等学校和成人高等学校电气工程及自动化、自动化等强电类专业“电力电子技术”等课程的教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考使用。

本书由胡文华、叶满园主编并审定。参加编写工作的还有：宋平岗、杨丰萍、袁义生、许智榜、许莹莹、钟燕科、徐晓玲等。

在本书的编写过程中，编者参考了一些电力电子技术学界前辈的著作和兄弟院校的教材，在此谨对他们致以衷心的感谢。本书的出版还得到了华东交通大学教材出版基金的资助，在此深表谢意。本书的编写也得到研究生的支持，他们是刘源康、张海星、杨阳，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间比较仓促，难免会有错误或不当之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 10 月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论                | 1  |
| 1.1 什么是电力电子技术            | 1  |
| 1.2 电力电子技术的发展概况          | 3  |
| 1.3 电力电子技术的应用            | 6  |
| 本章小结                     | 8  |
| 习题及思考题                   | 8  |
| 第 2 章 电力电子器件             | 9  |
| 2.1 电力二极管                | 9  |
| 2.1.1 电力二极管的结构与基本原理      | 10 |
| 2.1.2 电力二极管的基本特性         | 10 |
| 2.1.3 电力二极管的主要参数         | 12 |
| 2.1.4 电力二极管的主要类型         | 13 |
| 2.2 晶闸管及其派生器件            | 13 |
| 2.2.1 晶闸管的结构与基本原理        | 14 |
| 2.2.2 晶闸管的基本特性           | 15 |
| 2.2.3 晶闸管的主要参数           | 17 |
| 2.2.4 晶闸管的派生器件           | 19 |
| 2.3 GTO                  | 21 |
| 2.3.1 GTO 的结构和工作原理       | 22 |
| 2.3.2 GTO 的基本特性          | 22 |
| 2.4 电力 MOSFET            | 24 |
| 2.4.1 电力 MOSFET 的结构和工作原理 | 24 |
| 2.4.2 电力 MOSFET 的基本特性    | 26 |
| 2.5 IGBT                 | 28 |
| 2.5.1 IGBT 的结构和工作原理      | 28 |
| 2.5.2 IGBT 的基本特性         | 29 |
| 2.6 IGCT                 | 32 |
| 2.7 半导体电力开关模块和功率集成电路     | 32 |
| 2.7.1 半导体电力开关模块          | 32 |
| 2.7.2 功率集成电路             | 33 |
| 2.8 宽禁带半导体材料的电力电子器件      | 33 |



|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 2.9 电力电子器件的驱动、保护和串、并联使用 ..... | 34        |
| 2.9.1 电力电子器件的驱动 .....         | 34        |
| 2.9.2 电力电子器件的保护 .....         | 37        |
| 2.9.3 电力电子器件的串、并联使用 .....     | 39        |
| 本章小结 .....                    | 40        |
| 习题及思考题 .....                  | 41        |
| <b>第3章 交流-直流变流电路</b> .....    | <b>43</b> |
| 3.1 晶闸管整流电路 .....             | 43        |
| 3.1.1 单相半波整流电路 .....          | 43        |
| 3.1.2 单相桥式全控整流电路 .....        | 46        |
| 3.1.3 三相半波可控整流电路 .....        | 51        |
| 3.1.4 三相桥式全控整流电路 .....        | 55        |
| 3.2 变压器漏感对整流电路的影响 .....       | 59        |
| 3.3 交流-直流变流电路的有源逆变工作状态 .....  | 62        |
| 3.3.1 有源逆变的概念 .....           | 62        |
| 3.3.2 三相整流电路的有源逆变工作状态 .....   | 65        |
| 3.3.3 逆变失败与最小逆变角的限制 .....     | 66        |
| 3.4 电容滤波不可控整流电路 .....         | 67        |
| 3.4.1 电容滤波的单相桥式不可控整流电路 .....  | 67        |
| 3.4.2 电容滤波的三相不可控整流电路 .....    | 70        |
| 3.4.3 多重联结电路 .....            | 71        |
| 3.5 PWM 整流技术 .....            | 74        |
| 3.5.1 PWM 控制的基本原理 .....       | 75        |
| 3.5.2 PWM 整流技术的基本原理 .....     | 77        |
| 3.5.3 PWM 电路的控制方法 .....       | 79        |
| 3.6 单相 PWM 整流电路 .....         | 85        |
| 3.7 三相 PWM 整流电路 .....         | 88        |
| 本章小结 .....                    | 91        |
| 习题及思考题 .....                  | 91        |
| <b>第4章 直流-交流变流电路</b> .....    | <b>93</b> |
| 4.1 逆变器的类型和性能指标 .....         | 93        |
| 4.1.1 逆变电路的工作原理 .....         | 93        |
| 4.1.2 逆变电源的发展概况与分类 .....      | 94        |
| 4.1.3 逆变器输出波形性能指标 .....       | 95        |
| 4.2 单相电压源型逆变器及其调制 .....       | 95        |
| 4.2.1 单脉冲调制 .....             | 95        |



|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 4.2.2 正弦脉冲宽度调制 SPWM 的基本原理 .....   | 97         |
| 4.2.3 单极性正弦脉冲宽度调制 SSPWM .....     | 99         |
| 4.2.4 双极性正弦脉冲宽度调制 BSPWM .....     | 101        |
| 4.2.5 单极倍频正弦脉冲宽度调制 .....          | 103        |
| 4.3 三相电压源型逆变器及其调制 .....           | 104        |
| 4.3.1 调制方法 .....                  | 105        |
| 4.3.2 SVPWM 调制 .....              | 108        |
| 4.4 多电平逆变器 .....                  | 115        |
| 4.5 高压大容量逆变器复合结构 .....            | 123        |
| 4.6 电流源型逆变器及其调制 .....             | 127        |
| 4.6.1 PWM 电流源型逆变器 .....           | 128        |
| 4.6.2 负载换向逆变器(LCI) .....          | 131        |
| 本章小结 .....                        | 132        |
| 习题及思考题 .....                      | 133        |
| <b>第 5 章 直流-直流变流电路 .....</b>      | <b>134</b> |
| 5.1 基本斩波电路 .....                  | 134        |
| 5.1.1 降压斩波电路 .....                | 134        |
| 5.1.2 升压斩波电路 .....                | 138        |
| 5.1.3 升降压斩波电路和 Cuk 电路 .....       | 139        |
| 5.1.4 Sepic 斩波电路和 Zeta 斩波电路 ..... | 142        |
| 5.2 复合斩波电路和多相多重斩波电路 .....         | 143        |
| 5.2.1 电流可逆斩波电路 .....              | 143        |
| 5.2.2 桥式可逆斩波电路 .....              | 144        |
| 5.2.3 多相多重斩波电路 .....              | 144        |
| 本章小结 .....                        | 146        |
| 习题及思考题 .....                      | 146        |
| <b>第 6 章 交流-交流变流电路 .....</b>      | <b>147</b> |
| 6.1 交流调压电路 .....                  | 147        |
| 6.1.1 单相交流调压电路 .....              | 148        |
| 6.1.2 三相交流调压电路 .....              | 155        |
| 6.2 其他交流电力控制电路 .....              | 158        |
| 6.2.1 交流调功电路 .....                | 158        |
| 6.2.2 交流电力电子开关 .....              | 159        |
| 6.3 交-交变频电路 .....                 | 160        |
| 本章小结 .....                        | 165        |
| 习题及思考题 .....                      | 166        |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第 7 章 开关电源                     | 167 |
| 7.1 反激变换器                      | 169 |
| 7.2 正激变换器                      | 173 |
| 7.3 推挽变换器                      | 177 |
| 7.4 全桥和半桥隔离式降压变换器              | 179 |
| 7.5 带隔离的 Sepic 和 Cuk 变换器       | 183 |
| 7.6 Boost 派生隔离变换器              | 186 |
| 7.7 软开关技术                      | 189 |
| 7.7.1 硬开关与软开关                  | 189 |
| 7.7.2 零电压开关与零电流开关              | 190 |
| 7.7.3 软开关电路的分类                 | 190 |
| 本章小结                           | 193 |
| 习题及思考题                         | 193 |
| 教学实验                           | 194 |
| 实验 1 单结晶体管同步移相触发电路性能研究         | 194 |
| 实验 2 正弦波同步移相触发电路性能研究           | 197 |
| 实验 3 锯齿波同步移相触发电路性能研究           | 199 |
| 实验 4 单相桥式全控整流电路性能研究            | 201 |
| 实验 5 单相桥式有源逆变电路实验              | 204 |
| 实验 6 电力 MOSFET、IGBT 的特性与驱动电路研究 | 206 |
| 实验 7 直流斩波电路性能研究(设计性)           | 211 |
| 实验 8 采用自关断器件的单相交流调压电路性能研究      | 214 |
| 实验 9 单相交-直-交变频电路性能研究           | 217 |
| 实验 10 全桥 DC-DC 变换电路实验          | 219 |
| 实验 11 移相控制全桥零电压开关 PWM 变换器研究    | 222 |
| 实验 12 整流电路的有源功率因数校正研究          | 227 |
| 附录 电力电子技术中英文词汇对照表              | 232 |
| 中文英文词汇对照(按汉语拼音排序)              | 232 |
| 英文中文词汇对照                       | 239 |
| 参考文献                           | 245 |

# 第 1 章 绪 论

对于电力电子技术尚不了解的人一开始会有这样一些问题:什么是电力电子技术?它的发展经历了哪些阶段?主要的应用领域有哪些?对这些问题的初步讲解将使读者对电力电子技术有一个大致的了解。

## 1.1 什么是电力电子技术

自 20 世纪 50 年代末第一只晶闸管问世以来,电力电子技术开始登上现代电气控制技术的舞台,它标志着电力电子技术的诞生。究竟什么是电力电子技术呢?美国电气与电子工程师协会(IEEE)下设的电力电子学会对“电力电子技术”的阐述是:有效地使用电力半导体器件,应用电路设计理论以及分析开发工具,实现对电能高效能变换和控制的一门技术。对电能的高效能变换和控制包括对电压、电流、频率或波形等方面的变换。

电力电子技术也叫功率电子技术。顾名思义,所谓电力电子技术就是应用于电力领域的电子技术。电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于信息电子技术。在电力电子技术中所变换的“电力”和“电力系统”它们所指的“电力”是有一定差别的。两者都指“电能”,但后者更具体,特指电力网的“电力”,前者则更具一般性。具体地说,电力电子技术就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。目前所用的电力电子器件均由半导体制成,故也称电力半导体器件。电力电子技术所变换的“电力”功率可以大到数百兆瓦甚至吉瓦,也可以小到数瓦甚至毫瓦。信息电子技术主要用于信息处理,而电力电子技术主要用于电力变换,这是两者的本质区别。

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 1-1 所列,电力变换通常可分为四大类,即交流变直流(AC-DC)、直流变交流(DC-AC)、直流变直流(DC-DC)和交流变交流(AC-AC)。进行上述电力变换的技术称为变流技术。

表 1-1 电力变换的种类

| 输入<br>输出                    | 交流<br>(Alternating Current) | 直流<br>(Direct Current) |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 直流<br>(Direct Current)      | 整流                          | 直流斩波                   |
| 交流<br>(Alternating Current) | 交流电力控制、<br>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,它包括电力电子器件构成各种电力变换的电路和对这些电路进行控制的技术,以及由这些电路构成的电力电子装置和电力电子系统的技术。“变流”不单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。其系统框图如图 1-1 所示。

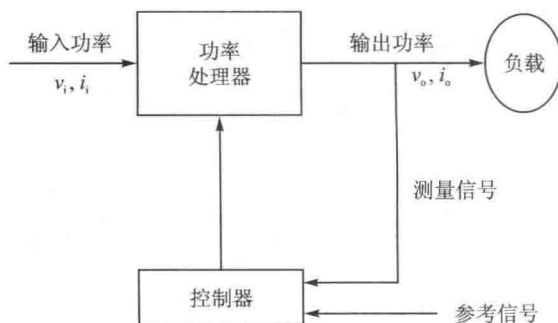


图 1-1 电力电子变换系统框图

如果没有晶闸管、电力场效应管、IGBT 等电力电子器件,也就没有电力电子技术,而电力电子技术主要用于电力变换。因此可以认为,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,美国学者 W. Newell 用图 1-2 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学、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的。这一观点现已被全世界普遍接受。

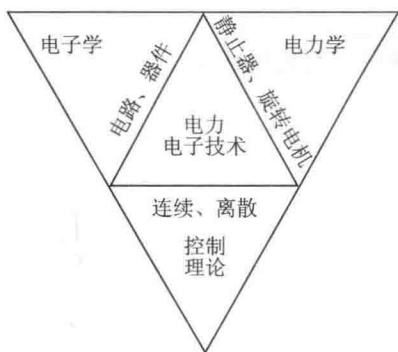


图 1-2 描述电力电子技术的倒三角形

“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,其实际内容没有太大的区别。

电力电子技术和电子学的关系是显而易见的,如图 1-2 所示。信息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用于信息处理的电子器件制造技术的理论基础(都是基于半导体理论)是一样的,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,这说明二者同根同源。电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一样的,只是二者的应用目的不同。前者用于电力变换和控制,后者用于信息处理。在信息电子技术中,电子器件既可工作于放大状态,也可工作于开关状态;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于开关状态,这成为电力电子技术区别于信息电子技术的一个重要特征。

电力电子技术广泛应用于电气工程中,这就是电力电子学与电力学(电气工程)的主要关系。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、开关电源等之中,因此,无论是在国内还是国外,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最活跃的分支。电力电子技术的不断进步给电气工程的现代化以巨大的推动力,是电气工程这一相对古老学科保持活力的重要源泉。

控制理论广泛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提高,以满足人们日益增长的生活水平的需求。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。而控制理论是实现这种接口的一条强有力的纽带。

另外,控制理论是自动化技术的理论基础,二者密不可分,而电力电子装置则是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

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。可以预见,在21世纪电力电子技术仍将迅猛发展。以计算机为核心的信息科学将是21世纪起主导作用的科学技术之一,这是毫无疑问的。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。如果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(把电网等电源提供的“粗电”变成适合人们使用的“精电”),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(基于电力电子技术的高压直流输电技术和柔性交流输电技术)。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世纪中将会起着十分重要的作用,有着十分光明的未来。

## 1.2 电力电子技术的发展概况

电力电子技术的发展包括电力电子器件的发展和电力电子变流电路的发展两个部分。这两个部分的发展是相辅相成、密不可分的。

电力电子技术始于20世纪50年代末60年代初的硅整流器件,其发展先后经历了整流器时代、逆变器时代和变频器时代,并促进了电力电子技术在许多新领域的应用。80年代末和90年代初,以功率MOSFET和IGBT为代表的,集高频、高压和大电流于一身的功率半导体复合器件的发展,表明传统电力电子技术已经进入现代电力电子时代。

电力电子器件的发展对电力电子技术的发展起着决定性的作用,因此,电力电子技术的发展史是以电力电子器件的发展史为纲的。图1-3给出了电力电子器件的发展史。

一般认为,电力电子技术的诞生是以1957年美国通用电气公司研制出第一只晶闸管为

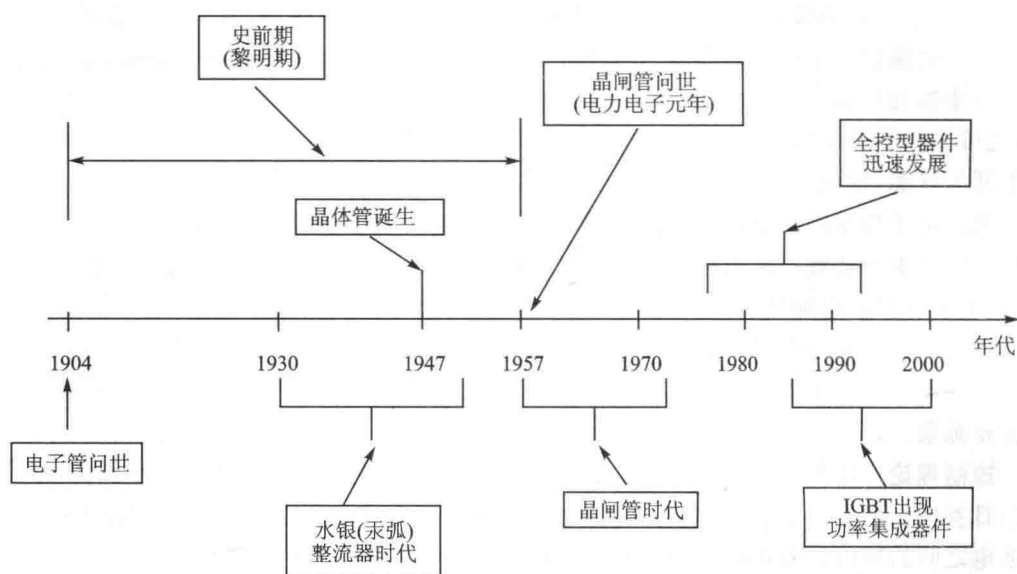


图 1-3 电力电子器件发展史

标志的。但在晶闸管出现以前,用于电力变换的电子技术就已经存在了。晶闸管出现前的时期可称为电力电子技术的史前期或黎明期。

1904年出现了电子管,它能在真空中对电子流进行控制,并应用于无线电和通信,从而开启了电子技术应用于电力领域的先河。后来出现了水银整流器,它是把水银密封于管内,利用对其蒸汽的点弧对大电流进行控制,其性能与晶闸管已经非常相似了。当然,水银整流器所用的水银对人体有害,另外,水银整流器的电压降落也很大,很不理想。20世纪30年代至50年代,是水银整流器发展迅速并大量应用的时期。在这一时期,水银整流器广泛应用于电化学工业、电气铁道直流变电所以及轧钢用直流电动机的传动,甚至用于直流输电。同时,各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。在晶闸管出现以后的相当一段时期内,所使用的电路形式依然是这些形式。

在这一时期,把交流变为直流的方法除水银整流器外,还有发展更早的电动机-直流发电机组,即变流机组。与旋转变流机组相对应,静止变流器的称呼从水银整流器开始沿用至今。

1947年,美国著名的贝尔实验室发明了晶体管,引发了电子技术的一场革命。最先用于电力领域的半导体器件是硅二极管。晶闸管出现后,由于其优越的电气性能和控制性能,使之很快就取代了水银整流器和旋转变流机组,并且应用范围迅速扩大。电化学工业、铁道电气机车、钢铁工业(轧钢用电气传动、感应加热等)、电力工业(直流输电、无功补偿等)的迅速发展也给晶闸管的发展提供了用武之地。电力电子技术的概念和基础就是由晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。

晶闸管是通过对门极的控制能够使其导通而不能使其关断的器件,属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式,简称相控方式。晶闸管的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现,这就使晶闸管的应用受到了很大的局限。

20 世纪 70 年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极性晶体管和电力场效应晶体管(Power MOSFET)为代表的全控型器件迅速发展。这些器件都属于全控型器件。全控型器件的特点是,通过对门极(基极、栅极)的控制既可使其导通,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。

与晶闸管电路的相位控制方式相对应,采用全控型器件电路的主要控制方式为脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)方式。相对于相位控制方式,可称之为斩波控制方式,简称斩控方式。PWM 控制技术在电力电子变流技术中占有十分重要的位置,它在逆变、直流斩波、整流、交流-交流控制等所有电力电子电路中均可应用。它使电路的控制性能大为改善,使以前难以实现的功能也得以实现,对电力电子技术的发展产生了深远的影响。

20 世纪 80 年代后期,以绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)为代表的复合型器件异军突起。IGBT 属于全控型器件,它是 MOSFET 和 BJT 的复合。它把 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快的优点和 BJT 的通态压降小、载流能力大、可承受高电压的优点集于一身,性能十分优越,使之成为现代电力电子技术的主导器件。与 IGBT 相对应, MOS 控制晶闸管(MCT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)都是 MOSFET 和 GTO 的复合,它们也综合了 MOSFET 和 GTO 两种器件的优点。其中 IGCT 已取得了相当的成功,现已获得大量的应用。

为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小,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、保护电路和电力电子器件集成在一起,构成电力电子集成电路(PIC)。目前,电力电子集成电路的功率还都较小,电压也较低,它面临着电压隔离(主电路为高压,而控制电路为低压)、热隔离(主电路发热严重)、电磁干扰(开关器件通断高压大电流,它和控制电路处于同一芯片上)等几大难点,但这也代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

目前,电力电子集成技术的发展十分迅速,除以 PIC 为代表的单片集成技术外,电力电子集成技术发展的焦点是混合集成技术,即把不同的单个芯片集成封装在一起。这样,虽然功率密度不如单片集成,但却为解决上述几大难题提供了很大的方便。这里,封装技术就成了关键技术。除单片集成和混合集成外,系统集成也是电力电子集成技术的一个重要方面,特别是对于超大功率集成技术更是如此。

随着全控型电力电子器件的不断进步,电力电子电路的工作频率也不断提高。同时,电力电子器件的开关损耗也随之增大。为了减小开关损耗,软开关技术便应运而生,零电压开关(ZVS)和零电流开关(ZCS)就是软开关的最基本形式。理论上采用软开关技术可使开关损耗降为零,提高效率。另外,它也使开关频率得以进一步提高,从而提高电力电子装置的功率密度。

目前,电力电子技术的主要发展方向如下:

- ① 集成化。高度的集成化能使体积更小、质量更轻、功率密度更高、性能更好。
- ② 智能化。电力传动系统的智能化,使其更具自动调节能力,从而获得更高的性能指标,包括高效率、高功率因数、宽调速范围、快速准确的动态性能和高故障容错能力等。
- ③ 通用化。更有效地扩大应用范围,从而降低生产制造成本。



④ 信息化。现代信息通信技术渗透到电力传动系统中,使其不但是转换、传送能量的装置,也成为传递和交换信息的通道。这就扩展了电力传动系统的内涵和外延,大大提高了电力传动系统的效用。

与此同时,在电力电子技术的发展过程中还应该解决其电路理论进展所遇到的问题:对于高电压、大电流的问题,关键是要生产出能耐受高电压、能承受大电流的电力电子器件及其串并联技术。

## 1.3 电力电子技术的应用

电力电子技术的应用大致可以归为两大类:电力电子变换电源和电力电子补偿控制器。电力电子技术不仅用于一般工业,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。以下分几个主要的应用领域加以叙述。

### 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。近年来,由于电力电子变频技术的迅速发展,使交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美,交流调速技术逐渐大量应用并占据了主导地位。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变频装置,以达到节能的目的。还有一些并不特别要求调速的电动机,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。由于电动机的应用十分广泛,其所消耗的电力甚至达到了发电厂所发电力的60%以上,以至于有人认为,电力传动是电力电子技术的“主战场”。

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。除牵引电动机传动外,车辆中的各种辅助电源也离不开电力电子技术。

电动汽车的电动机依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。一辆高级汽车中需要许多控制电动机,它们也要靠变频器和斩波器驱动并控制。

### 3. 电力系统

电力电子技术在电力系统中的应用非常广泛。其在发电、输电、用电和储能方面都有大量的应用。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。可以毫不夸张地

说,如果离开电力电子技术,那么电力系统的现代化是不可想象的。

各种新能源、可再生能源及新型发电方式越来越受到重视。其中风力发电、太阳能光伏发电的发展最为迅速,燃料电池更是备受关注。太阳能发电和风力发电受到环境的制约,发出的电能质量较差,常需要储能装置缓冲;为了改善电能质量,就需要电力电子技术。当这些新能源需要和电力系统联网时,更离不开电力电子技术。

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,而轻型直流输电则主要采用全控型的 IGBT。近年发展起来的柔性交流输电系统(FACTS)也是依靠电力电子装置才能得以实现的。

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。近年来出现的采用全控型器件的静止无功发生器(SVG)、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。在配电网系统,电力电子装置还可以防止电网瞬时停电、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需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的电源、大型计算机所需的工作电源、微型计算机内部的电源,现在都采用全控型器件的高频开关电源。

#### 5. 家用电器

照明在家用电器中占有十分突出的地位。由于电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源,故通常采用电力电子装置的光源被称为“节能灯”,它正在逐步取代传统的白炽灯和荧光灯。

变频空调、变频冰箱和变频洗衣机是家用电器中应用电力电子技术的典型例子。此外,电视机、音响设备的电源部分也都需要电力电子技术。

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

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,到国民经济的各个领域,再到我们的衣食住行,到处都能感受到电力电子技术的存在及其巨大魅力。

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

电力电子技术对节省电能有重要的意义。特别在大型风机、水泵采用变频调速方面,以及使用十分庞大的照明电源方面,电力电子技术的节能效果十分显著,因此它也被称为是节能技术。