

高等院校教材

# 现代电力电子技术

林忠岳 主编



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

## 内 容 简 介

本书共 10 章。第 1 章介绍了电力电子技术的现状及展望。第 2 章介绍电力电子器件。第 3 章~第 7 章依次介绍 AC/DC、DC/AC、DC/DC 和 AC/AC 四类基本电力电子变换电路。第 8 章介绍现代电力电子控制技术: PWM 控制技术、软开关技术、矢量控制技术和直接转矩控制技术。第 9 章介绍电力电子器件和系统的辅助电路。第 10 章现代电力电子应用技术, 包括 PWM 逆变电路和 PWM 整流电路、双 PWM 变频调速电路、交流和直流电源、有源电力滤波器、柔性交流输电系统和高压直流输电技术等内容。

本书适用于电气工程及其自动化专业及相关专业本、专科生, 其中现代电力电子技术部分内容可作为上述各专业研究生教学参考。本书也可供从事电力电子技术、运动控制(交流调速)技术、电力系统及自动化等领域的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子应用技术/林忠岳主编. —北京: 科学出版社, 2007  
(高等院校教材)

ISBN 978-7-03-019169-4

I. 现… II. 林… 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(2007)第 089647 号

责任编辑: 姚庆爽 潘继敏/责任校对: 鲁 素

责任印制: 刘士平/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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 6 月第一次印刷 印张: 24 3/4

印数: 1—4 000 字数: 496 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

## 序

1957年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管，标志着电力电子技术这门新兴学科的诞生。经过半个世纪的发展，这门学科给人类带来巨大的经济和社会效益，可以说，人们到处都能感受到它的存在和巨大的魅力。毫不夸张地说，离开电力电子技术，人类的生活、国民经济和国防各个领域、人类对大自然和宇宙的探索都是不可想象的。电力电子技术是电力、电子和控制三门学科的交叉学科，就其内容而言，包含器件、电路和控制三方面，应用范围非常广泛，在 21 世纪，电力电子技术及应用的发展前途将十分广阔。

三十多年来，林忠岳教授在电力电子技术及其应用领域进行了系统地研究，成果丰硕。20 世纪 80 年代末，受中国电工学会中南地区电力电子技术学会和交流技术情报网的委托，他主编了《电力电子变换技术》一书，围绕电能的 AC/DC、DC/AC、DC/DC 和 AC/AC 四大基本变换进行了系统和深入的探讨，并以应用为目标，紧紧扣住电能变换这个核心展现给读者。梁发强副教授从事电力电子技术与运动控制的教学和科研工作也有三十年的历史，他对电力电子技术在直流传动控制领域有较深入的研究。

《现代电力电子应用技术》一书突出“现代”和“应用”，体现在：①该书适应新的现实，即现代电力电子器件、电路和控制方法正在逐步取代传统的电力电子器件、电路和控制方法，其内容能很好地反映当代电力电子技术的发展；②该书弥补了当前出版的电力电子技术教材在应用方面稍有欠缺的不足，符合教学面向生产的需要；③内容取舍和讲授方法做到“广适应”和“方便”读者，所以其系统性、完整性好，深入浅出，适用大专、本科和研究生三种层次和不同类型学校教学的需要；④该书对电能的四种变换作了系统而深入的分析，明显地结合实际应用实例，所以其也可供在生产第一线上从事研究开发和生产的技术人员参考。

特此推荐，希望有更多读者和学校使用这本书，希望更多的年轻学者、教授像这本书作者一样，关心、投身教育事业，写出更多更好的教材，为教育事业贡献青春和智慧。

华南理工大学自动化科学与工程学院

毛宗原

2007 年 1 月 14 日于广州

## 前 言

电力电子技术这门新兴学科，在经历近 50 年的发展后已深入人心。现在，“电力”与电力电子技术已密不可分，其应用范围广泛，给人类带来了巨大的经济效益和社会效益，人们到处都能感受到电力电子技术的存在和其巨大魅力。可以毫不夸张地说，离开电力电子技术，我们的衣食住行、国民经济的各个领域、人类对大自然及宇宙的探索，都是不可想象的。

电力电子技术的重要性受到各国政府和科技工作者的普遍关注，其发展速度迅猛。时间将会证明：21 世纪，电力电子技术与运动控制将和计算机技术共同成为未来科学技术的两大支柱，其应用和作用将越来越大，发展前景十分广阔。

1989 年作者受中国电工学会中南地区电力电子学会和变流技术情报网的委托，主编了《电力电子变换技术》（重庆大学出版社，1991 年）一书。该书内容围绕电能的四大基本变换展开，即交流/直流（AC/DC）、直流/交流（DC/AC）、直流/直流（DC/DC）和交流/交流（AC/AC）的变换。以应用为目的，紧紧抓住电能变换这个核心内容展现给读者，这是当时作者的心声。

本书核心内容突出“现代”（即区别于传统电力电子技术的现代电力电子技术内容为主）和“应用”（现代电力电子技术的应用）。具体体现在：适应当前现代电力电子技术正在逐步取代传统电力电子技术的现实；弥补当前出版的教材在应用方面的内容稍有欠缺的不足，特别是现代电力电子技术的应用方面。作者力图实现“广适应”和“方便读者”的目的。

本书共有 10 章，其中第 4、6 章由梁发强副教授执笔，其余 8 章由林忠岳教授编写，并负责全书统稿。在本书长时间的编写过程中，得到广西大学很多老师的支持和帮助，如周永华老师、宋春宁老师等，在此表示衷心感谢！向为本书制图、书稿计算机录入和排版付出辛勤劳动的硕士研究生孙洪亮、冷海滨、陈小雨、孙筠、田茂、刘辽广、陈星宇以及我的妻子表示感谢！

本书由华南理工大学自动化科学与工程学院博士生导师毛宗源教授主审。毛教授提出了许多宝贵意见，并为本书作序。在此谨致衷心的感谢！

对本书编写中所参考的文献的所有作者，一并致以谢意！

限于作者水平，编写中的疏漏之处在所难免，殷切希望读者给予批评、指正。

林忠岳

2007 年 1 月于广西大学

# 目 录

序

前言

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                          | 1   |
| 1.1 概述 .....                                   | 1   |
| 1.2 传统电力电子技术 .....                             | 2   |
| 1.3 现代电力电子技术 .....                             | 2   |
| 1.4 电力电子技术展望 .....                             | 4   |
| 1.5 本教材的内容简介和使用说明 .....                        | 6   |
| <b>第 2 章 电力电子器件</b> .....                      | 8   |
| 2.1 电力电子器件的分类 .....                            | 8   |
| 2.2 不可控型器件——电力二极管 .....                        | 9   |
| 2.3 半控型器件——晶闸管及其派生器件.....                      | 14  |
| 2.4 典型全控型器件.....                               | 23  |
| 2.5 其他新型电力电子器件.....                            | 42  |
| 思考题与练习题 .....                                  | 46  |
| <b>第 3 章 AC/DC 的变换——相控整流电路</b> .....           | 49  |
| 3.1 概述.....                                    | 49  |
| 3.2 单相可控整流电路.....                              | 50  |
| 3.3 三相可控整流电路.....                              | 64  |
| 3.4 电容滤波的不可控整流电路.....                          | 80  |
| 3.5 整流电路的谐波和功率因数.....                          | 86  |
| 3.6 大功率可控整流电路.....                             | 95  |
| 思考题与练习题.....                                   | 103 |
| <b>第 4 章 直流/交流 (DC/AC) 的变换之一——有源逆变电路</b> ..... | 107 |
| 4.1 概述 .....                                   | 107 |
| 4.2 有源逆变的工作原理及其实现条件 .....                      | 109 |
| 4.3 三相有源逆变电路 .....                             | 113 |
| 4.4 有源逆变失败的原因及防止对策 .....                       | 116 |
| 4.5 晶闸管直流电动机系统 .....                           | 119 |
| 思考题与练习题.....                                   | 126 |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| <b>第 5 章 直流/交流 (DC/AC) 的变换之二——无源逆变电路</b> .....          | 128 |
| 5.1 概述 .....                                            | 128 |
| 5.2 换流方式 .....                                          | 129 |
| 5.3 负载换流逆变电路 .....                                      | 131 |
| 5.4 电压型逆变电路 .....                                       | 136 |
| 5.5 电流型逆变电路 .....                                       | 143 |
| 5.6 多重逆变电路和多电平逆变电路 .....                                | 150 |
| 5.7 PWM 型逆变电路 .....                                     | 155 |
| 思考题与练习题 .....                                           | 156 |
| <b>第 6 章 直流/直流 (DC/DC) 的变换——直流斩波电路</b> .....            | 157 |
| 6.1 斩波电路的工作原理和控制方式 .....                                | 157 |
| 6.2 基本斩波电路 .....                                        | 161 |
| 6.3 复合斩波电路 .....                                        | 169 |
| 思考题与练习题 .....                                           | 173 |
| <b>第 7 章 交流/交流 (AC/AC) 的变换——交流调压电路和交-交变频电路</b><br>..... | 175 |
| 7.1 晶闸管交流开关 .....                                       | 175 |
| 7.2 晶闸管移相控制的交流调压电路 .....                                | 178 |
| 7.3 晶闸管通断控制的交流调压(调功)电路 .....                            | 189 |
| 7.4 斩波控制的交流调压电路 .....                                   | 191 |
| 7.5 晶闸管相控式交-交直接变频电路 .....                               | 194 |
| 7.6 斩控式交-交变频电路 .....                                    | 205 |
| 思考题与练习题 .....                                           | 210 |
| <b>第 8 章 现代电力电子控制技术</b> .....                           | 211 |
| 8.1 现代电力电子控制技术的特征 .....                                 | 211 |
| 8.2 现代电力电子控制技术 .....                                    | 212 |
| 思考题与练习题 .....                                           | 267 |
| <b>第 9 章 电力电子器件的散热、驱动、保护和缓冲电路</b> .....                 | 269 |
| 9.1 电力电子器件的散热 .....                                     | 269 |
| 9.2 电力电子器件的驱动电路 .....                                   | 271 |
| 9.3 电力电子器件的保护 .....                                     | 297 |
| 9.4 电力电子器件的缓冲电路 .....                                   | 313 |
| 思考题与练习题 .....                                           | 320 |
| <b>第 10 章 现代电力电子应用技术</b> .....                          | 321 |
| 10.1 DC/AC 的变换——PWM 逆变电路 .....                          | 321 |

---

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 10.2 异步电动机变频调速系统·····                       | 322        |
| 10.3 AC/DC 的变换——PWM 整流电路·····               | 329        |
| 10.4 电压型双 PWM 变频调速电路·····                   | 332        |
| 10.5 AC/DC-DC/AC 恒压、恒频不间断电源 (CVCF-UPS)····· | 336        |
| 10.6 全桥型 DC/AC-AC/DC 直流电源·····              | 339        |
| 10.7 AC/DC-DC/AC-AC/DC 三级变换直流电源·····        | 340        |
| 10.8 有源电力滤波器·····                           | 341        |
| 10.9 灵活交流输电系统·····                          | 347        |
| 10.10 高压直流输电技术·····                         | 359        |
| 思考题与练习题·····                                | 382        |
| <b>参考文献</b> ·····                           | <b>384</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概 述

电力电子技术就是应用电力电子器件对电力进行变换和控制的技术。电力有交流电和直流电之分。电力变换是指电力的四大基本变换：交流/直流（AC/DC）、直流/交流（DC/AC）、直流/直流（DC/DC）和交流/交流（AC/AC）的变换。因而包含在两种电能之间，或对同一种电能的一个或多个参数（如电压、电流、频率、波形和相位等）进行变换。而控制则包括三个方面的内容：①对电力变换，亦即电能形态变换的控制；②对电能传送流动方向的控制；③对电能质量指标的控制，包括电量的大小、频率、波形和相位等。

电力电子技术这门新兴学科的诞生是以 1957 年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管为标志的。早期的电力变换是以晶闸管为核心组成的变流电路，沿用电力电子技术史前期的水银整流器所用的相控整流电路及周波变换电路，实现 AC/DC 整流变换和 AC/AC 交交频率变换。随后，就开创了“晶闸管及其应用”的传统电力电子技术时代。实现了两种电能之间和同一电能电气参数的变换，达到了电能“粗加工”需求（此时期对电能质量指标的要求还不是很严格）。然而晶闸管这类半控型器件，一则只能通过控制信号控制其导通而不能控制其关断，控制起来不尽如人意；再则开关速度难以提高，一般情况下低于 400Hz，大大限制了其应用范围；三则由于相控运行方式使电网和负载都产生严重的谐波，使电路功率因数下降，对电网产生“电力公害”。

20 世纪 70 年代后期，以门极可关断晶闸管（GTO）、电力晶体管（GTR）和电力场效应晶体管（P-MOSFET）为代表的全控型器件迅速发展。到 80 年代后期，以绝缘栅双极晶体管（IGBT）为代表的复合型器件相继出现：IGBT 是 MOSFET 和 GTR 的复合；MOS 控制晶闸管（MCT）是以 MOSFET 和 SCR 的复合；门极换流晶闸管（IGCT）是以 MOSFET 和 GTO 的复合……这些都是综合了两管的优点而研制出来的新型器件。全控型器件的出现和迅速发展，特别是 80 年代以后出现的场控自关断器件（IGBT、P-MOSFET、IGCT 等）集高频、高电压和大电流于一身的优良性能，使电力电子技术从低频（传统）电力电子技术进入高频（现代）电力电子技术的发展时期。

现代电力电子技术与传统电力电子技术相比，最令人鼓舞的是，现代电力电子技术的发展和推广应用，可以克服甚至消除由传统电力电子技术带来的负面影



响，服务于人类、造福于人类，给人类创造日益增长的社会效益和经济效益。

## 1.2 传统电力电子技术

1957~1980年，传统电力电子技术曾创造过一段辉煌的历史。首先以它的优良性能（历史观点）淘汰了水银整流器、旋转变流机组，接着是饱和电抗器，全球有关专业人员先后跨入晶闸管（又称可控硅）时代。那个年代，神奇的可控硅，优势突出：用晶闸管组成的装置与旋转式变流机组相比，无噪声，无磨损；与水银整流器相比，无毒，使用维护方便。由于晶闸管的导通可以控制，通过改变控制角的大小能够控制负载上的电压和电流，具备弱电控制强电输出的特点，于是使以晶闸管为核心的电力电子技术成为弱电控制强电的技术，横跨“电力”、“电子”和“控制”三大领域，用晶闸管作为功率开关器件组成的各种装置和设备按其功能可分成四类：

(1) 整流器：把交流电压变成固定或可调的直流电压。

(2) 逆变器：把固定的直流电压变成固定或可调的交流电压。

(3) 斩波器：把固定的直流电压变成可调的直流电压。

(4) 交流调压器或周波变换器：把固定的交流电压或频率变成可调压或可调频的交流电压。

从而实现了四大基本变换：AC/DC、DC/AC、DC/DC和AC/AC的变换。此外还开发了静止无功补偿器（SVC），还在节能降耗方面也取得令人振奋的成绩。然而正如前述，由于晶闸管自身的先天不足：半控型器件、工作频率低和采用移相控制方式，带来整机体积大、功率因数低、网侧及负载上的谐波严重，给电网和用电设备正常运行带来的危险不可忽视。由于上述的原因，由晶闸管及其变流电路形成的传统电力电子技术经过多年的发展已处于停滞阶段。随着工业生产的发展，迫切要求新一代电力电子器件和变换技术出现，以取代传统电力电子技术。

## 1.3 现代电力电子技术

从20世纪70年代后期，特别是80年代以后，各种高速、全控型器件先后问世，并获得高速发展。如可关断晶闸管（GTO）、电力晶体管（GTR）、功率场效应晶体管（P-MOSFET）、绝缘栅双极晶体管（IGBT）、静电感应晶体管（SIT）、静电感应晶闸管（SITH）、MOS控制晶闸管（MCT）和门极换流晶闸管（IGCT）等。变流装置中的晶闸管被这些新型全控型器件取代，结构先进紧凑的变流电路及其控制系统随之出现。新型的变流装置具有功率增益高、控制灵

活、动态特性好、效率高等优点。

随着集成工艺的提高,80年代中期开发出功率集成电路(power integrated circuit, PIC)和智能功率模块(intelligent power module, IPM),这是微电子技术与电力电子技术各自发展的基础上相结合而成就的新一代高频化、全控型的功率集成电路。从而使电力电子技术由传统的电力电子技术跨入现代电力电子技术的新时代。

现代电力电子技术的主要特点有:

(1) 集成化。与传统电力电子器件基于分立方式不同,几乎所有的全控型器件都是由许多单元胞器件并联而成。例如,一个40A的P-MOSFET由上万个单元并联而成。而一个300A的SITH含有约5万个单元。

(2) 高频化。随着器件集成化的实现,工作速度有了很大的提高。例如,高电压大电流的GTO,其工作频率为1~2kHz, GTR可达2~5kHz, IGBT的工作频率可达20kHz, P-MOSFET可达数百kHz,而SIT则可达10MHz以上。

(3) 全控化。由半控型的晶闸管到全控型的电力电子器件,是电力电子器件在功能上的重大突破。无论是双极型器件的GTO、GTR、SITH或单极型器件P-MOSFET、SIT以及混合型器件IGBT、MCT等都实现了全控化,从而避免了采用晶闸管关断时所需要的强迫换流电路。

(4) PWM控制方式。和晶闸管采用移相控制相对应,采用全控型器件组成的电路主要控制方式为PWM控制方式。现在PWM技术已成为电力变换的核心技术,在逆变、斩波、变频、整流以及交流电力控制中均可应用。

(5) 控制技术数字化与智能化。目前电力电子器件正向着大容量、高频、易驱动和智能化方向发展。功率集成电路PIC和智能模块IPM,集电力电子器件、驱动电路、传感器和诊断、保护、控制电路于一身。智能化的功率集成电路的应用预示着电力电子技术与计算机控制技术已密不可分,自然结合在一起,走向一体化的时机已逐步成熟。

(6) 高效率与软开关技术。高频全控型器件的应用带来开关频率大幅度提高,取得了装置小型化与轻量化的直接效果。然而开关频率的提高又带来了开关损耗和开关噪声的增加,电路效率严重下降,电磁干扰增大。针对这些问题,发明了软开关技术,主要解决电路中的开关损耗和开关噪声问题,使开关频率可以大幅度提高,变换器的运行效率也得到提高。

基于上述六大特点,现代电力电子技术应用领域将会有更大的延伸和扩展。现在经过变换处理后再供用户使用的电能占全国总发电量的百分比值的高低,已成为衡量一个国家技术进步的主要标志之一。据有关资料所述,1995年发达国家中有75%左右的电能是经过电力电子技术变换或控制后再使用。据预测,2000年以后,将有95%的电能须经变换处理后再使用。而美国预计

到 21 世纪二三十年代, 由发电站生产的全部电能都将经过变换处理后再供负载使用。

如此说来, 未来的电能都是要经过电力电子技术加工处理, 将“粗电”变成“精电”后才能使用了。为什么呢? 理由有三:

### 1. 节能的需要

带风机、水泵等负载的三相交流异步电动机, 每年耗电量为发电总量的  $1/3$  以上。如果直接由电网供电, 而用挡板、阀门调节风量、水量至  $50\%$  额定值, 电能的利用效率将低于  $50\%$ , 如果采用电力电子技术变压变频供电, 通过调节电动机的转速来改变风量、流量, 则电能的利用效率可维持在  $90\%$  左右, 这将节省大量的能源。

还有耗电量占发电量的  $10\% \sim 15\%$  的电气照明, 采用高频电力变换器(又称电子镇流器)对荧光灯供电, 在同样的光通量下, 其耗电量可减小到白炽灯的  $1/6$ 。

### 2. 节材的需要

高频变换装置的功率密度随频率的提高而提高。高频逆变装置将工频  $50\text{Hz}$  交流电升频至  $20\text{kHz}$  后再给负载供电, 可使电能变换设备成  $10 \sim 20$  倍地缩小体积和重量, 使钢、铜原材料的消耗量大大减小。

### 3. 使用电设备获得更大的经济效益的需要

在电力系统中, 公用电网提供的电源是频率固定的单相或三相交流电源。而用电设备的类型、功能千差万别, 对电能的电压、频率要求各不相同。比如说, 许多高新技术设备要由恒压恒频的正弦波交流不间断电源 UPS 供电, 而通信设备大都需要  $48\text{V}$  低压直流电源, 现在广泛应用的交流电机变频调速则由三相交流变压、变频电源供电。为了满足一定的生产工艺和流程的需求, 确保产品质量, 提高劳动效率, 降低能耗, 提高经济效益, 供电电源的电压、频率甚至波形、相位都必须严格满足各种用电设备的不同要求。因此, 由公用电源或其他电源提供的“粗电”, 必须经过适当的加工处理变成“精电”后再供负载使用, 使用电设备处于理想的最佳工况, 才能使用电设备获得更大的经济效益。

## 1.4 电力电子技术展望

电力电子技术是由电力、电子和控制三门学科交叉而形成。就其内容而言, 包含器件、电路与控制三个方面。电力电子技术的发展总是以器件的开发和性能

的改善为先导,对电力电子技术的发展起着决定性的作用。因此,在这里,我们先从电力电子器件谈起。

### 1. 电力电子器件

电力电子器件发展迅猛,推动电力电子技术从传统电力电子技术进入现代电力电子技术阶段,目前仍处在一个所谓“动态变革”之中。现在电力电子器件的发展趋势有三个方面:

(1) 已实用化的全控型器件在大功率、易驱动、高频率和高电流密度方向继续发展。

(2) 器件的模块化、集成化和智能化。在一个芯片上集成一个系统,包括器件、驱动电路、传感器和自诊断、检测、保护和控制电路,推动电力电子技术跃入功率集成电力电子技术新阶段。

(3) 器件材料的更新。当今电力电子器件都是以硅作为基础材料,其垄断地位目前仍在维持。但某些新型材料如碳化硅、金刚石等的采用,已预示着新一代器件将会出现。新器件类似于 MOSFET,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。有关资料说明,与硅器件相比,金刚石 P-MOSFET 器件的功率可提高  $10^6$  数量级,频率提高 50 倍,导通压降低一个数量级,最高结温可达  $600^{\circ}\text{C}$ 。

### 2. 变换电路

变换电路离不开四大基本变换,在电力电子装置中,可以是单一变换也可以是包含两种以上的变换。传统电力电子技术所用的相控电路适用于晶闸管,现代电力电子技术所用的 PWM 电路、软 PWM 电路适用于各种全控型器件和功率集成电路 PIC、智能功率模块 IPM。

### 3. 控制技术

微电子技术与电力电子技术的结合。信息电子技术已经融入电力电子技术领域形成一个整体,计算机控制技术已在电力电子技术中生根、开花、结果。现在电力电子装置的控制不仅依赖硬件电路,而且可以利用软件编程,既方便又灵活,使各种新颖、复杂的控制策略和方案得以实现。新的控制理论以及基于神经网络和模糊逻辑数字的智能控制技术都在变换电路的控制中得到应用。

电力电子技术的应用范围十分广泛,而且越来越广。相关行家认为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就是电源技术。这种提法在 20 世纪以前无可非议,因为电力电子装置不管用在哪里,都是一台电力变换装置——电源。

然而跨入 21 世纪后, 电力电子技术不仅在电源技术方面继续为人类创造巨大的经济效益, 还将在电力系统中作为电力电子补偿控制器, 控制电能的传送流动方向, 向电网输出所要求的补偿电压或电流, 或改变并联接入、串联接入交流电网的等效阻抗, 从而改善电力系统的运行特性和运行经济性。这类应用涉及高压、大功率开关电路和十分复杂的控制技术, 它将在今后几十年导致电力系统革命性变革并推动电力电子技术的继续发展和进步。

## 1.5 本教材的内容简介和使用说明

本教材的内容可分为三大部分:

第一部分是电力电子器件, 即第 2 章。主要介绍各种电力电子器件的基本结构、工作原理、主要参数、应用特性和有关选择使用知识。本章内容从应用角度出发, 基本上不涉及制造工艺。学习的重点是以普通晶闸管、GTO、GTR、P-MOSFET 和 IGBT 五种器件为主。要求掌握各种功率器件通、断控制原理和处于通、断状态的条件。

第二部分是传统电力电子技术为主的四大基本变换 (AC/DC、DC/AC、DC/DC、AC/AC) 电路, 包括第 3~7 章。这部分内容是全书的基础部分, 也是大专、本科学生学习的主要内容。其中第 3 章 AC/DC 变换——整流电路, 第 4 章 DC/AC 变换——有源逆变电路, 第 7 章 AC/AC 变换——交流调压和交-交变频电路。这三章由晶闸管组成的主电路都是采用移相控制脉冲触发的。晶闸管和二极管相同点是都具有单向导电性, 两者区别在结构上晶闸管比二极管多了一个门极, 因而还具有可控性。其可控性体现在: 晶闸管必须触发才能导通, 而二极管则不用触发, 只要在其两端加上符合要求的电源就能导通——自然导通。这是学习晶闸管电路时必须牢记的。再就是必须掌握电路的工作原理、各主要物理量的波形图和计算公式。还有电力电子电路是非线性的, 但当电路中各开关器件在通或断状态一定时, 可按线性电路来分析。对于第 5 章 DC/AC 无源逆变电路和第 6 章 DC/DC 直流斩波电路, 则非移相控制, 控制要求触发脉冲频率可调, 按一定要求的顺序触发。

第三部分是现代电力电子技术相关内容, 包括第 8~10 章。这是研究生学习的主要内容, 而其他章节则是他们自学、温故知新的基础知识。对于本科生而言, 教学大纲要与时俱进, 对这部分内容可作为本科生“现代电力电子技术”课程的授课内容; 如果某些专业电力电子技术只设一门课程时, 则根据教学大纲统筹安排“传统”和“现代”内容以及授课学时, 建议学时比例先按 2:1, 逐步过渡到 1:1。对大专生, 建议安排 2 或 3 个讲座, 介绍这部分内容。

为了便于读者学习, 在每章的最后有个小结, 对全章的重点和要点进行总

结。仔细阅读小结内容，有助于对全章内容的把握。

本教材在编写时力求做到科学性、先进性、系统性、完整性和实用性。遵循由浅入深、深入浅出、循序渐进、宜于教学原则。内容丰富完整，便于自学。

## 第 2 章 电力电子器件

### 2.1 电力电子器件的分类

电力电子器件可按可控性、驱动信号类型和内部载流子参与导电情况进行分类。

#### 2.1.1 按可控性分类

根据控制信号对器件控制程度可将电力电子器件分为不可控型器件、半控型器件、全控型器件三类：

(1) 不可控型器件。不能用控制信号来控制其导通、关断的电力电子器件，如电力二极管。此类器件的导通和关断完全由其在主电路中承受的电压、电流决定。这种器件只有两个端子，加上正向阳极电压时，二极管导通；加上反向阳极电压时，二极管关断。

(2) 半控型器件。能用控制信号控制其导通，但不能控制其关断的电力电子器件称为半控型器件。这类器件主要是晶闸管及其大部分派生器件（GTO 除外）。它们的导通由触发电路的触发脉冲来控制，而关断只能由其在主电路中承受的电压、电流或其他辅助换流电路来完成。

(3) 全控型器件。能用控制信号控制其导通，又能控制其关断的电力电子器件称为全控型器件，通常又称为自关断器件。这类器件品种很多，目前最常用的是绝缘栅双极晶体管（IGBT）和电力场效应晶体管（P-MOSFET）。在处理兆级大功率电能的场合，门极可关断晶闸管（GTO）应用也较多。除此之外，还有电力晶体管（GTR）、MOS 控制晶闸管（MCT）、静电感应晶体管（SIT）、静电感应晶闸管（SITH）和集成门极换流晶闸管（IGCT）等。

#### 2.1.2 按驱动信号类型分类

##### 1. 电流驱动型

通过从控制极注入或抽出电流来实现导通或关断控制的，这类器件称为电流驱动型电力电子器件。如 GTO、GTR 为电流驱动型电力电子器件。

##### 2. 电压驱动型

通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就能实现导通或关断控制

的,这类器件称为电压驱动型电力电子器件。如 P-MOSFET、IGBT 为电压驱动型电力电子器件。

### 2.1.3 按器件内部载流子参与导电情况分类

电力电子器件还可以按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况分为单极型器件、双极型器件和复合型器件三类。

(1) 单极型器件。由一种载流子参与导电的器件称为单极性器件。如 P-MOSFET、SIT 为单极型电力电子器件。

(2) 双极型器件。由电子和空穴两种载流子参与导电的器件称为双极型器件。如电力晶体管 GTR、静电感应晶闸管 SITH、门极可关断晶闸管 GTO 为双极型电力电子器件。

(3) 复合型器件。由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件称为复合型器件,也称混合型器件。如绝缘栅双极晶体管 IGBT、MOS 控制晶闸管 MCT 为复合型电力电子器件。

## 2.2 不可控型器件——电力二极管

在电力电子装置中,经常使用到不可控的电力二极管。这种器件常用的有整流二极管、快恢复二极管和肖特基二极管。电力二极管应用范围很广,早期的主要有不可控整流、电感性负载的续流回路、为电压源型逆变回路提供无功路径、电流源型逆变电路换流电容与反电势负载隔离等。近代的用于中、高频整流和逆变,以及低压高频整流的场合。

### 2.2.1 电力二极管的结构与工作原理

电力二极管的内部结构和工作原理与小功率二极管(信息电子电路中使用的二极管)是一样的,具有一个 PN 结和阳极 A、阴极 K 的两层两端半导体器件。图 2.1 示出了电力二极管的外形、结构和电气图形符号。从外部构成看,有管芯和散热器两部分。电力二极管工作时管芯通过强大的电流,而 PN 结具有一定的正向电阻,管芯会因损耗而发热。为了管芯的冷却,必须配备散热器。一般情况下,200A 以下的管芯外形采用螺栓型,200A 以上则用平板型(图 2.1(a)、(b))。

二极管的工作原理在于 PN 结的单向导电性。当 PN 结外加正向电压(正向偏置),即正端接 P 区,负端接 N 区时,PN 结处于正向导通状态,二极管导通。当 PN 结外加反向电压(反向偏置)时,PN 结表现为高阻状态,几乎没有电流流过,被称为反向截止状态,二极管关断。



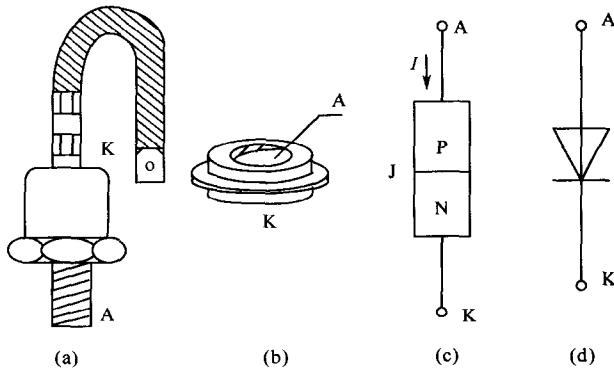


图 2.1 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

(a) 螺栓型 (b) 平板型 (c) 结构 (d) 电气图形符号

### 2.2.2 电力二极管的基本特性

#### 1. 静态特性 (伏安特性)

二极管阳极与阴极之间的电压  $U_{ak}$  与阳极电流  $I_a$  的关系称为伏安特性，如图 2.2 所示。第 I 象限为正向特性区，表现为正向导通状态。当加上的正向电压达到一定值 (门槛电压  $U_{T0}$ ) 时，正向电流开始明显增加，处于稳定的导通状态。流过的正向电流  $I_a$ ，大小完全由外电路决定，对应的电力二极管两端电压  $U_F$  即为其正向压降。

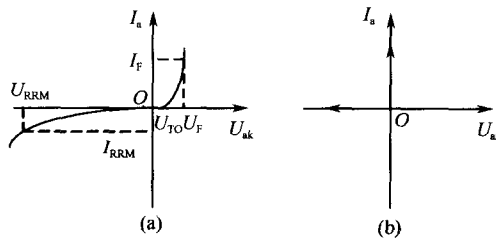


图 2.2 电力二极管的伏安特性

(a) 实际特性 (b) 理想特性

第 III 象限为反向特性区，表现为反向阻断状态。当二极管加上反向阳极电压时，开始只有极小的反向漏电流。随着反向电压增大，反向电流也有所增大。当反向电压增大到一定程度时，漏电流就开始急剧增加，此时必须对反向电压加以限制，否则二极管将被反向电压击穿损坏。电力二极管在忽略通态压降和反向漏电流后，其特性为理想伏安特性，如图 2.2(b) 所示。