

21世纪

高等学校本科电子电气专业系列实用教材

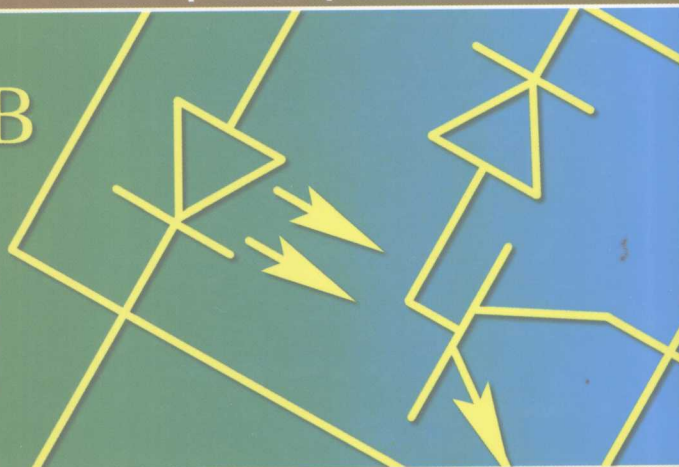
电力电子技术 应用教程

蒋渭忠 主编
徐 维 张永春 邵春声 副主编

<http://www.phei.com.cn>



B



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

21 世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

电力电子技术应用教程

蒋渭忠 主 编

徐 维 张永春 邵春声 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

全书共分8章。第1章介绍了电力电子技术中传统、现代技术,电力电子技术的展望和本书使用的相关说明。第2章介绍了电力电子技术中所用到的开关器件,分别从不控(二极管)、半控(晶闸管)和全控(MOS-FET、GTR、IGBT、GTO等)三大种类,介绍了这些器件在使用中的共性与个性特性。第3章介绍了AC/DC的变换,分别介绍了单相可控整流、三相可控整流,以及有源逆变知识。第4章介绍DC/DC变换的五种基本的变换器的拓扑结构,介绍了带隔离变压器的变换器,以及PWM波的产生。第5章介绍了几种典型的逆变器拓扑及工作原理。第6章介绍了软开关电路的工作原理。第7章介绍了电力公害的产生、危害及抑制措施。第8章介绍MATLAB软件,介绍了几种典型拓扑电路的仿真过程和方法。

本书每章后都配有一定量的思考题与习题,供读者学习。本书可供以实践性为主的学校学生使用,也可以作为工程技术人员的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术应用教程/蒋渭忠主编. —北京:电子工业出版社,2009.5
(21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材)
ISBN 978-7-121-08701-1

I. 电… II. 蒋… III. 电力电子学

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第062686号

策划编辑:柴 燕

责任编辑:刘真平

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:360.8千字

印 次:2009年5月第1次印刷

印 数:4000册 定价:25.00元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

电力电子技术是一种用大功率半导体开关器件完成能量变换、传输和控制的技术。基于这类器件和这种技术建立的各类电源装置，在技术和经济指标两方面都远优越于传统的旋转式变换装置，因而从 20 世纪 70 年代以来取得了惊人的发展，已在各种应用领域内全面取代旋转变流器。近年来，随着新型器件的开发与性能的提高，出现了更多高性能的电力变流装置。这不仅促进了电力电子学自身的发展，而且影响着半导体材料技术、大规模集成电路技术、自动控制技术、信息传递与处理技术及电路拓扑技术的进步。总之，电力电子技术是一门有着广阔应用前景，发展方兴未艾的技术。

电力电子技术的一个主要方面是应用各类电力电子开关器件来建立电能变换装置，因此，它应包含器件、主电路、控制及系统等内容。本教材将以建立系统为目标，介绍器件性能、主电路拓扑结构和分析方法，以及相应的控制电路设计思想。其中，包括传统的晶闸管及其变换装置，也包括近年来流行的全控器件和由它们构成的斩控式和谐振式变换装置。由于篇幅和学时所限，这部分内容在大学本科和专科教学中可适当删减，但可供有关科技人员自学时选用。

为便于多层次的学生和科技人员学习参考，本教材加强了电路工作物理过程的分析，删减了对电路方程的数学推导过程，同时增加了各类变流器系统设计的基本方法介绍。全书共分 8 章。第 1 章介绍用电力电子器件实现能量变换的基本物理机理，学科发展的历史、现状和前景，以及本教材的基本分析方法。第 2 章分不控、半控和全控等器件，介绍常用电力电子器件应用特性及使用过程中的共性技术。第 3 章～第 6 章按变换形式分类，依次介绍相控整流、直流电能转换、逆变和谐振软开关变换电路的基本电路拓扑和控制方法。各章并配有一定数量的思考题和习题。第 7 章介绍了电力公害的类型、产生的原因及抑制的措施。第 8 章简单介绍电力电子线路 MATLAB 仿真的基本概念和常用方法。

本教材由蒋渭忠负责全书的统稿与编撰工作，徐维、张永春、邵春声担任本书副主编，编写了相关章节，张兵参与了本书的编撰工作，在这里也对在本教材编写过程中提出宝贵意见的同志表示衷心的感谢！

限于编著者对本学科知识的了解深度和水平，书中内容难免有不当和谬误之处，请读者批评、指正。

目 录

第 1 章 绪论	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	3
1.4 电力电子技术展望	5
1.5 本教材的内容简介和使用说明	6
第 2 章 电力电子器件	7
2.1 功率二极管	7
2.1.1 PN 结与功率二极管工作原理	7
2.1.2 功率二极管的主要类型	11
2.2 可关断晶闸管	12
2.2.1 SCR 的原理与特性	12
2.2.2 晶闸管的伏安特性与主要参数	15
2.2.3 GTO 的工作原理	20
2.2.4 GTO 的特性	21
2.2.5 GTO 门极驱动电路	23
2.3 电力晶体管	24
2.3.1 工作原理	24
2.3.2 主要特性	26
2.3.3 主要参数	27
2.3.4 二次击穿和安全工作区	28
2.3.5 基极驱动电路	29
2.4 功率场效应晶体管	32
2.4.1 基本工作原理	32
2.4.2 主要特性	32
2.4.3 安全工作区	34
2.4.4 主要参数	35
2.4.5 应用技术	36
2.5 绝缘栅双极晶体管	37
2.5.1 工作原理	37
2.5.2 主要特性	38
2.5.3 主要参数	39

2.5.4 擎住效应与安全工作电压	40
2.5.5 栅极驱动电路	41
2.6 静电感应晶体管及其他新型器件	44
2.6.1 静电感应晶体管 SIT	44
2.6.2 静电感应晶闸管 SITH	45
2.6.3 MOS 控制晶闸管 (MCT)	47
2.6.4 功率集成电路	47
2.7 各类器件的共性应用技术	48
2.7.1 散热技术	48
2.7.2 器件的保护	50
2.7.3 电力电子器件的串联和并联使用	57
本章小结	58
思考题与习题	60
第 3 章 相位控制变换电路	61
3.1 相控整流电路的整流运行	61
3.1.1 单相半波 (Half-Wave) 相控整流电路	61
3.1.2 单相全控桥式相控整流电路	67
3.1.3 三相桥式全控整流电路	74
3.2 相控电路的逆变运行	78
3.2.1 有源逆变的基本工作原理	78
3.2.2 三相有源逆变电路	79
3.2.3 逆变失败原因及最小逆变角的确定	80
3.2.4 有源逆变电路的应用	83
3.3 相控电路的换相重叠角	84
3.3.1 换相期间的输出电压	84
3.3.2 相控整流电路的外特性	85
本章小结	86
思考题与习题	86
第 4 章 直流/直流变换电路	89
4.1 基本斩波器的工作原理及控制方式	89
4.1.1 基本斩波器的工作原理	89
4.1.2 斩波器的主要控制方式	93
4.2 Buck 电路	94
4.3 Boost 电路	96
4.4 Buck-Boost 电路	97
4.5 'Cuk 变换电路	99
4.6 全桥 DC/DC 变换电路	100
4.6.1 双极性电压开关 PWM 法	101
4.6.2 单极性电压开关 PWM 法	103

4.7 带隔离变压器的直流变换器	104
4.7.1 正激式 (Forward) 变换器	105
4.7.2 反激式 (Flyback) 变换器	106
4.7.3 推挽式变换器	109
4.7.4 半桥式变换器	110
4.7.5 全桥式变换器	111
4.8 脉宽控制电路	111
4.8.1 集成 PWM 控制器的组成和原理	112
4.8.2 SG1525/SG1527 系列集成 PWM 控制器	114
本章小结	118
思考题与习题	119
第 5 章 逆变电路	120
5.1 逆变器及其分类	120
5.2 负载性质对逆变开关器件换流的影响	121
5.3 晶闸管负载换流逆变器	123
5.3.1 单相桥式串联逆变器	123
5.3.2 单相桥式并联逆变器	127
5.3.3 串、并联逆变器的比较	130
5.3.4 负载换相逆变器控制电路的基本结构	130
5.4 硬开关逆变器	132
5.4.1 基本方波逆变器	132
5.4.2 脉宽调制型逆变器	140
5.5 谐振式逆变器	152
5.5.1 谐振式逆变器的结构组成及分类	152
5.5.2 串联负载型、并联负载型及混合型振荡电路特性	153
5.5.3 谐振逆变器的工作原理	156
5.5.4 三种常用谐振逆变器的比较	160
5.6 几种逆变器性能的比较	161
思考题与习题	161
第 6 章 软开关技术	163
6.1 软开关的基本概念	163
6.1.1 硬开关与软开关	163
6.1.2 零电压开关与零电流开关	164
6.2 软开关电路的分类	164
6.3 典型的软开关电路	166
6.3.1 零电压开关准谐振电路	166
6.3.2 谐振直流环	168
6.3.3 移相全桥型零电压开关 PWM 电路	169
6.3.4 零电压转换 PWM 电路	171

本章小结·····	172
思考题与习题·····	173
第7章 电力公害及其抑制对策 ·····	174
7.1 电力公害及其分类 ·····	174
7.1.1 电力公害的概念 ·····	174
7.1.2 电力公害的分类 ·····	174
7.2 谐波的产生及其抑制 ·····	176
7.2.1 谐波产生机理 ·····	176
7.2.2 谐波抑制对策 ·····	179
7.3 电力有源滤波器 ·····	182
7.3.1 基本原理 ·····	182
7.3.2 电压型和电流型有源滤波器 ·····	184
7.4 提高功率因数对策 ·····	185
7.4.1 功率因数 ·····	185
7.4.2 提高功率因数的原理及方法 ·····	187
7.5 电磁干扰及其抑制措施 ·····	190
7.5.1 电磁干扰的产生 ·····	190
7.5.2 电磁干扰的分类及其抑制措施 ·····	194
本章小结·····	198
思考题与习题·····	198
第8章 电力电子的 MATLAB 仿真 ·····	199
8.1 MATLAB Simulink/Power System 工具箱及应用简介·····	199
8.1.1 MATLAB 简介 ·····	199
8.1.2 MATLAB 的基本界面 ·····	199
8.1.3 Simulink 仿真工具简介 ·····	200
8.2 典型电力电子器件的仿真模型及仿真实例 ·····	204
8.2.1 电力电子器件模型和参数 ·····	204
8.2.2 桥式电路模块 ·····	206
8.3 电力电子变换器中典型环节的仿真模型 ·····	207
8.3.1 三相桥式整流电路的仿真 ·····	207
8.3.2 DC-DC BOOST 变换电路的仿真 ·····	209
本章小结·····	211
参考文献 ·····	212

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能进行变换和控制的技术。电能有交流电和直流电之分。电力变换是指电能的四大基本变换：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，如表 1-1 所示。电能变换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，亦即对电能形态变换的控制；②对电能传递流动方向的控制；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。

表 1-1 电力变换和种类

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

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或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；二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”。

电力电子学(Power Electronics)这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。1974 年，美国的 W. Newell 用图 1-1 所示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 1-1 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

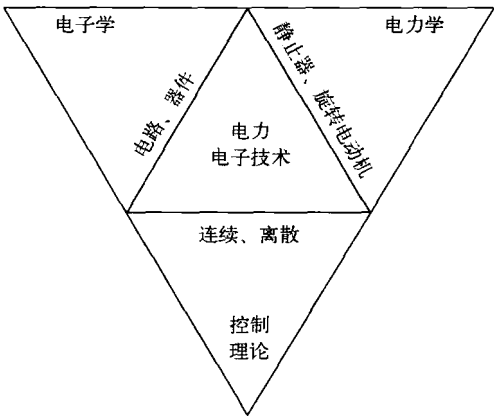


图 1-1 描述电力电子学的倒三角形

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,这说明两者同根同源。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,这就是电力电子学和电力学的主要关系。“电力学”这个术语在我国已不太应用,这里可用“电工科学”或“电气工程”取代之。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。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,是保持电气工程活力的重要源泉。

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这种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支撑技术。

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 20 世纪 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 MOSFET 和 SCR 的复合;门极换流晶闸管(IGCT)是 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 20 世纪 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，按其功能可分成如下四类。

(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)，在节能降耗方面也取得了令人振奋的成绩。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，使得整机体积大，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，以取代传统的电力电子技术。

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，20 世纪 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 with 电力电子技术各自发展的基础上相结合而成的新一代高频化、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的。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，还是混合型器件 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的。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,则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%~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 50Hz 交流电升频至 20kHz 后再给负载供电,可使电能变换设备成 10~20 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 48V 低压直流电源,现在广泛应用的交流电动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的。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，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) 向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 个数量级，频率提高 50 倍，导通压降降低一个数量级，最高结温可达 600℃。

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，都是一台电能变换装置——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。这部分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二极管、普通晶闸管、GTO、GTR、P-MOSFET和IGBT六种器件为主。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/DC、DC/AC、AC/AC)电路,包括第3~5章。这部分内容是全书的基础部分。第3章相位控制变换电路,包括整流与有源逆变两大内容,整流技术简要分析了单相整流与三相整流,有源逆变分析了有源逆变原理;第4章直流/直流变换电路,分析了DC/DC变换的拓扑结构,分析了带隔离的DC/DC变换电路,讲解了脉宽调制的原理;第5章交流逆变变换电路,分析了基本的交流逆变电路的原理。

第三部分是现代电力电子技术相关内容,包括第6~8章。这部分内容结合现代电力电子技术、工程实践和仿真技术。第6章谐振软开关变换电路,是现代电力技术的核心技术,分析了典型的软开关电路的工作原理;第7章电力公害及其抑制对策,现代电子产品对于电磁特性有了更明确的要求,本章讨论了公害的种类、起因,分析了对策;第8章电力电子MATLAB仿真,从器件级、典型环节和变换器级进行了讨论,给出具体的使用实例,对于学生学习与实践具有指导意义。

为了便于读者学习,在每章的最后给出小结,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、宜于教学的原则,内容丰富完整,便于自学。

第 2 章 电力电子器件

2.1 功率二极管

功率二极管(Power Diode)自 20 世纪 50 年代初期就获得应用,当时也被称为半导体整流器(Semiconductor Rectifier,SR),并已开始逐步取代汞弧整流器。虽然是不可控器件,但其结构和原理简单,工作可靠,所以,直到现在电力二极管仍然大量应用于许多电气设备当中,特别是快恢复二极管和肖特基二极管,仍分别在中、高频整流和逆变,以及低压高频整流的场合,具有不可替代的地位。图 2-1 给出了功率二极管的外形、结构和电气图形符号。

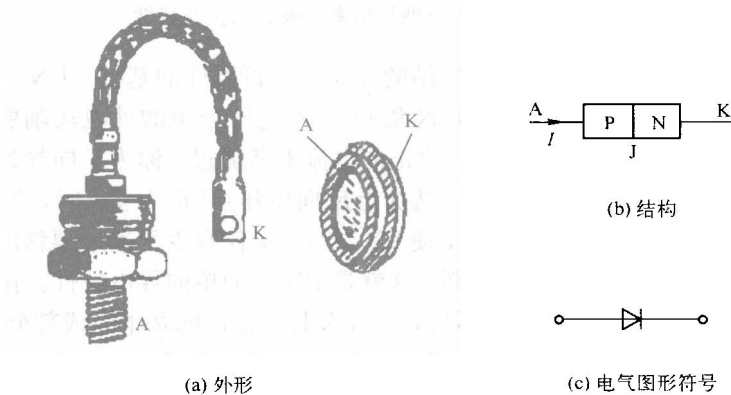


图 2-1 功率二极管的外形、结构和电气图形符号

2.1.1 PN 结与功率二极管工作原理

完全纯净的半导体在常温下可以激发出少量自由电子和相应数量的空穴,这两种不同极性的带电粒子统称为载流子,空穴的出现是半导体区别于导体的一个显著特点。

在纯净半导体内掺入微量杂质如五价元素后,在晶体中出现多余电子使自由电子数远大于空穴数,此类材料称为 N 型半导体;同样,在半导体中掺入三价元素后,晶体中出现多余空穴,此类材料称为 P 型半导体。N 型半导体中的电子与 P 型半导体中的空穴称为多数载流子,简称多子,另一类称为少数载流子,简称少子。这种有不同极性载流子参与导电的器件统称为双极型器件。根据掺入杂质的多少可控制多子的浓度。但不管掺入多少杂质,半导体中正、负电荷总量均相等且保持电中性。

现将一种半导体基片(N 型或 P 型)通过扩散或合金工艺,在其上形成相反导电类型,这两部分即形成 PN 结。PN 结在交界面处由于空穴与电子浓度的差异,使载流子从高浓度向低浓度扩散。图 2-2(a)所示即为 PN 结形成原理,P 区的空穴扩散到 N 区,N 区中的电子扩

散到 P 区, 在交界面出现空间电荷区, 形成由 N 区指向 P 区的内电场。内电场在阻止多子继续扩散的同时又帮助少子向各自的对方漂移。在一定温度下, 扩散与漂移达到动态平衡, 空间电荷达到稳定值。

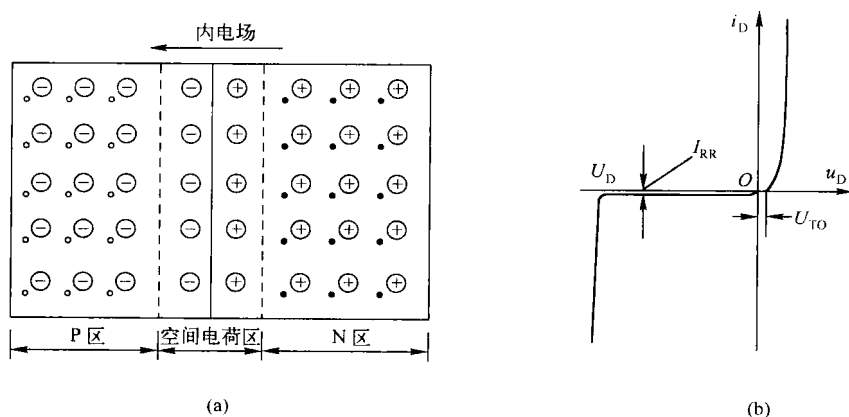


图 2-2 PN 结形成原理与功率二极管的伏安特性

PN 结是半导体器件的核心, 掌握 PN 结的性质是分析器件的基础。PN 结的主要特性是单向导电性, 当 PN 结外加正向电压(P 正 N 负)时, 外电压产生的外电场削弱内电场, 使扩散大于漂移, 空间电荷减少, PN 结变窄, 使正向电流不断流过, 称为正向导通。此时 PN 结表现为低阻, 其电压降只有 1V 左右。PN 结加上反向电压(P 负 N 正)时, 外电压加强内电场, 从而强烈阻止 PN 结两边的多子扩散, 使 PN 结变宽, 仅有少子通过漂移形成极小的反向漏电流, PN 结表现为高阻, 称为反向阻断, 这就是 PN 结的单向导电特性。由 PN 结组成的二极管是结构最简单, 应用最广的电子器件, 是许多其他器件的基本组成部分。

功率二极管是允许流过的电流较大, 承受电压较高的二极管, 为缩小体积和减少连线, 除单管结构外已有模块结构, 即把几个管子集成为一个器件。由于流过电流较大, 故其引线及焊接电阻的影响较明显。为了提高反向耐压, 必须降低掺杂浓度, 导致正向压降增大。任何电子器件耐压性能的提高都是牺牲其他性能指标来达到的。

功率二极管本身消耗功率, 发热多, 使用时必须十分重视管子的散热, 应安装传热良好的散热器。目前功率电子器件常用的散热器冷却方式有自冷、风冷、液冷和沸腾冷(热管)四种。功率二极管的正常运行, 在很大程度上取决于散热器的合理选配, 以及器件与散热器之间的装配质量。

功率二极管的伏安特性如图 2-2(b)所示, 当外加正向电压大于 U_{TO} (门槛电压), 即克服 PN 结内电场后管子才开始导通, 正向导通后其压降基本不随电流变化。反向工作时, 当反向电压增大到 U_D (击穿电压), 使 PN 结内电场达到雪崩击穿强度时, 反向漏电流 I_{RR} 剧增, 导致二极管击穿损坏。用于工频整流的功率二极管也称为整流管, 国产型号为 ZP, 主要参数说明如下。

(1) 额定正向平均电流 I_F (额定电流): 管子长期运行在规定散热条件下, 允许流过工频正弦半波时的最大平均电流, 将此电流值称为规定二极管系列的电流等级, 即为管子的额定电流。 I_F 受发热限制, 因此在使用中按有效值相等来选取管子电流定额。对应额定电流 I_F ,

其有效值为 $1.57I_F$ 。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} (额定电压)：管子反向能重复施加的最高峰值电压，此值通常为击穿电压 U_B 的 $2/3$ 。

(3) 正向平均电压 U_F ：在规定条件下，管子流过额定正弦半波电流时，管子两端的正向平均电压，也称为管压降，此值比直流压降小。

(4) 反向漏电流 I_{RR} ：对应于反向重复峰值电压时的漏电流。

ZP 系列参数列于表 2-1 中。由于工作于工频，故动态参数不标出。

表 2-1 部分功率二极管主要性能参数

型 号	额定正向平均 电流 I_F/A	反向重复峰值 电压 U_{RRM}/V	反向电流 I_R/mA	正向平均电压 U_F/V	反向恢复时间 t_{RR}	备 注
ZP1~4000	1~4 000	50~5 000	1~40	0.4~1		
ZK3~2 000	3~2 000	100~4 000	1~40	0.4~1	$<10\mu s$	
10DF4	1	400		1.2	$<100ns$	
31DF2	3	200		0.98	$<35ns$	
30BF80	3	800		1.7	$<100ns$	
50WF40F	5.5	400		1.1	$<40ns$	
10CTF30	10	300		1.25	$<45ns$	
25JPF40	25	400		1.25	$<60ns$	
HFA90NH40	90	400		1.3	$<140ns$	模块结构
HFA180MD60D	180	600		1.5	$<140ns$	模块结构
HFA75MC40C	75	400		1.3	$<100ns$	模块结构
HFA280NJ60C	280	600		1.6	$<140ns$	模块结构
MR876 快恢复功率 二 极 管 (美 国 MO- TOROLA 公司)	50	600	$50\mu A$	1.5	$<400ns$	
MUR10020CT 快恢 复功率二极管 (美国 MOTOROLA 公司)	50	200	$25\mu A$	1.1	$<50ns$	
MBR30045CT 快恢 复功率二极管 (美国 MOTOROLA 公司)	150(单支)	45	0.8	0.78	≈ 0	

功率二极管在电力电子交流电路中起着不同的作用，在交直流变换中作为整流器件，在电感滤波及具有电感元件的电路中作为续流器件，在逆变电路中用于反向充电和能量传输，在各类交流器中用于隔离、钳位、保护和高频整流。随着高频全控型电力电子器件的大量应用，功率二极管的工作频率可高达几百 kHz，要求二极管能快速地在导通与阻断之间转换。用在高频场合的二极管称为快恢复二极管，也称开关二极管，对此类二极管的要求是：正向瞬态压降小，反向恢复时间短，反向恢复电荷少以及具有软恢复特性。

开关二极管可分四种工作状态：静态为正向导通和反向阻断，动态为开通过程和关断过程。二极管工作状态转换的特性称为开关特性，现将关断特性与开通特性分析如下。

(1) 关断特性。图 2-3(a)所示为开关二极管转换电路。当 S 从“1”位置立即倒向“2”时，