

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

李先允 主编
姜宁秋 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

主 编 李先允
副主编 姜宁秋
编 写 王 琦 许 峰
主 审 郑建勇



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书是一本从工程应用的角度介绍电力电子技术的教材，主要介绍 AC—DC 变换电路（可控整流电路）、DC—DC 变换电路（直流斩波电路）、DC—AC 变换电路（逆变电路）、AC—AC 变换电路（交流调压和变频电路）、电力电子保护电路以及晶闸管触发电路的基本原理及应用举例，并结合教材内容举例介绍了基于 Matlab 的电力电子仿真技术。为方便学生理解掌握教材内容，本书配套编写了习题集和多媒体课件。

本教材主要作为电气信息类专业的本科教材，也可作为相关专业高职高专院校教材，同时还可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/李先允主编. —北京：中国电力出版社，
2006

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 7 - 5083 - 4632 - 7

I. 电... II. 李... 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 (2006) 第 106461 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 9 月第一版 2006 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9 印张 212 千字

印数 0001—3000 册 定价 13.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合的原则。本书为新编教材。

目前,电力电子技术已成为电气工程学科中重要的分支。其主要任务是实现电能的变换与控制,是电气工程学科强弱电之间联系的桥梁。随着新型器件的诞生,电力电子技术的应用领域越来越广,对高等院校教学的内容和方法提出了新的挑战,为此,作者编写了这本适用于工程应用教学要求的教材。

本书主要由三部分组成。第一部分是电力电子器件,是本课程的基础部分,重点介绍器件的选择和使用。第二部分是电路分析方法,是本课程的核心部分,主要介绍 AC—DC、DC—AC、DC—DC 和 AC—AC 四种电路的分析方法和定量计算方法。第三部分是仿真技术,主要介绍常用的 Matlab 软件在电力电子技术中的基础应用。同时,在本教材中也介绍了 PWM 控制技术和软开关技术,帮助学生了解电力电子技术的发展过程及发展趋势。本教材每章第一节前均介绍了教学的目的和要求,供教师和学生参考。为方便学生理解掌握教材内容,本书配套编写了习题集和多媒体课件,教学需要者可与出版社联系。

本书绪论、第七章和 Matlab 仿真部分由南京工程学院李先允老师编写,第二章由南京师范大学王琦老师编写,第三章由南京工程学院许峰老师编写,其余各章由南京师范大学姜宁秋老师编写。南京师范大学硕士生王书征为本书提供了仿真计算。全书由李先允统稿。

东南大学郑建勇教授主审了本书,并提出了许多宝贵的意见,使编者受益匪浅。本书的编写也得到了南京工程学院陆丹红老师的帮助。同时,本书也参考了许多同行及前辈编写的专著和教材。对此一并表示感谢。

由于编者学识有限,编写仓促,书中的疏漏和错误之处在所难免,敬请使用本教材的老师和同学批评指正。

编 者

2006 年 7 月

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第二章 电力电子器件	8
第一节 功率二极管.....	8
第二节 晶闸管及其派生器件.....	10
第三节 可关断晶闸管.....	15
第四节 双极型功率晶体管.....	16
第五节 功率场效应管.....	18
第六节 绝缘栅双极型功率晶体管.....	20
第七节 集成门极换流晶闸管 IGCT.....	22
第八节 功率集成电路.....	24
第九节 电力电子器件的串并联.....	25
第十节 电力电子器件的保护驱动电路.....	26
第三章 整流电路	30
第一节 概述.....	30
第二节 单相可控整流电路.....	32
第三节 三相可控整流电路.....	41
第四节 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路.....	52
第五节 变压器漏感对整流电路的影响.....	56
第六节 整流电路的谐波和功率因数.....	58
第七节 单相桥式整流电路仿真.....	64
第四章 DC—DC 变换电路	67
第一节 直流斩波电路的工作原理.....	67
第二节 降压斩波电路.....	68
第三节 升压斩波电路.....	71
第四节 升降压斩波电路.....	73
第五节 Cuk 斩波电路.....	76
第六节 降压式变换器 SIMULINK 仿真.....	79
第五章 DC—AC 变换电路	81
第一节 有源逆变的基本原理.....	81
第二节 有源逆变应用电路.....	83

第三节	无源逆变电路	86
第四节	电压型和电流型逆变器	88
第五节	脉宽调制 (PWM) 型逆变电路	94
第六节	三相电压源型 SPWM 逆变器的仿真	98
第六章	AC—AC 变换电路	102
第一节	交流开关及应用	102
第二节	单相交流调压电路	103
第三节	三相交流调压电路	107
第四节	交—交变频电路	109
第五节	矩阵变换器	113
第六节	单相交流调压电路的仿真	116
第七章	谐振开关技术	119
第一节	概述	119
第二节	谐振电路工作原理和开关损耗	120
第三节	软开关电路的分类	124
第四节	降压式准谐振变换器的原理分析	128
第五节	软开关中的 PWM 技术	130
参考文献	135

第一章 绪 论

一、电力电子技术及特点

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”。因此电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制电路三个部分，其中电力电子器件是电力电子技术发展的基础和关键。图 1-1 给出了电力电子变换系统框图。1974 年美国的 W. Newell 用图 1-2 的倒三角形对电力电子学进行了描述。

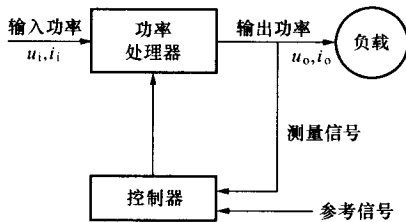


图 1-1 电力电子变换系统框图

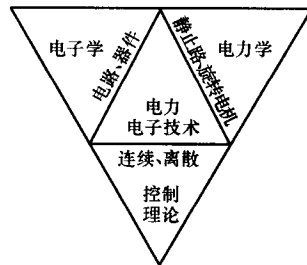


图 1-2 电力电子技术倒三角关系图

电力电子技术广泛用于电力系统中，如高压直流输电、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。控制理论用于电力电子技术，使电力电子装置和系统的性能可以满足各种需求。电力电子技术可看成“弱电控制强电”的技术，是“弱电和强电的接口”，控制理论则是实现该接口的强有力纽带。

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。电力电子技术的发展集中体现在电力电子器件的发展上，其重要特征是电力电子器件一般均工作在开关状态。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。

二、电力电子技术的发展概述

早在 20 世纪 30、40 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 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 的诞生，后称晶闸管。它的问世，开创了传统的电力电子技术阶段，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，在工业界引起了一场技术革命，中大功率的各种变流装置和电动机传动系统得到了快速发展。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、逆导晶闸管 RCT、双向晶闸管 TRIAC、门极辅助关断晶闸管 GATT、光控晶闸 LASCN 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。

20 世纪 70 年代后期，高速、全控型、大电流、集成化和多功能的电力电子器件先后问世，开创了现代电力电子集成器件的新阶段。现代电力电子器件包括有双极型、单极型和混合型等类型的电力电子器件。如可关断晶闸管 GTO、大功率晶体管 GTR、功率场效应晶体管 PowerMOSFET、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 晶闸管 MCT 等。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。

20 世纪 80 年代中期，随着集成工艺的提高和突破，电力电子技术的另一个重要的进展是诞生了功率集成电路，也称 PIC 和智能功率模块 IPM。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，甚至有的器件具有放大、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，电力电子技术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，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器件实现了全控化、集成化、高频化，变换装置实现了高效率、低谐波、高功率因数，控制技术实现了数字化和微机化。

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。

电力电子器件发展的目标是大容量、高频率、易驱动、低损耗、小体积（高芯片利用率）、模块化。新型控制技术的使用，减小了电力电子器件的开关损耗，使得电力电子应用系统向着高效、节能、小型化和智能化的方向发展。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。

三、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。

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。其一般特征表现在以下几个方面：

(1) 电力电子器件所能处理电功率的大小，即承受电压电流的能力远大于处理信息的电子器件。

(2) 电力电子器件一般工作于开关状态。

(3) 电力电子器件需要由信息电子电路来控制。

(4) 由于耗散功率大, 在器件封装时需考虑散热设计及工作时外部需安装散热器。

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: 其开通和关断不能按需要控制, 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: 可以控制其开通, 但不能通过门极控制关断, 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。

(3) 全控型: 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。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 PowerMOSFET 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, 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。

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三类:

(1) 双极型电力电子器件: 是指器件内部电子和空穴两种载流子都参与导电过程的半导体器件。这类器件具有通态压降低、阻断电压高、电流容量大等优点, 适用于中大容量的变流装置和电动机的驱动控制, 这类器件有巨型晶体管 (GTR)、可关断晶闸管 (GTO)、静电感应晶闸管 (SITH) 等。

(2) 单极型电力电子器件: 是指器件内只有多数载流子参与导电过程的半导体器件。这类器件具有驱动功率小、工作速度快、无二次击穿问题、安全工作区宽、电流负温度系数、良好的电流自动调节能力和热稳定性以及较高的抗干扰能力等优点, 适用于中小功率、开关频率高的变流装置和电动机的驱动控制, 如高保真度的音频放大, 多种通信设备和宇航空间技术等领域。这类器件包括有功率场效应晶体管 (MOSFET) 和静电感应晶体管 (SIT) 等。

(3) 混合型电力电子器件: 是由双极型和单极型两种器件混合集成的器件。利用耐高压、电流容量大的双极型器件 (如 SCR、GTR、GTO) 作为输出级; 而利用输入阻抗高、频率响应快的单极型器件 (如 MOSFET) 作为输入级, 从而具备双极和单极器件的优点, 这类器件有绝缘栅双极晶体管 (IGBT)、MOS 晶体管 (MCT)、功率集成电路 (PIC) 等, 其中功率集成电路 PIC 分为高压集成电路 (HVIC) 和智能功率集成电路 (SPIC)。

2. 电力电子应用系统组成

以电力半导体器件为核心, 通过不同的电路拓扑和控制方式来实现对电能的转换和控制, 这就是电力电子应用系统或变流电路, 如图 1-3 所示。由控制电路、驱动电路和以电力电子器件为核心的主电路组成。

控制电路通过检测电路按系统的工作要求形成控制信号, 通过驱动电路去控制主电路中电力电子器件的通

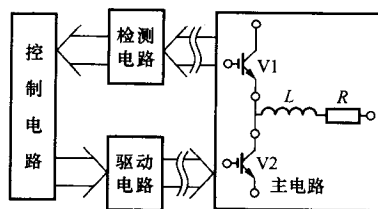


图 1-3 电力电子应用系统或变流电路

或断,来完成整个系统的功能。电力电子应用系统一般是由主电路和控制电路组成的。主电路中的电压和电流一般都较大,而控制电路的元器件只能承受较小的电压和电流,因此在主电路和控制电路连接的路径上,一般需要进行电气隔离,通过其他手段如光、磁等来传递信号。由于主电路中往往有电压和电流的过冲,而电力电子器件一般比主电路中普通的元器件要昂贵,但承受过电压和过电流的能力却要差一些,因此,在主电路和控制电路中附加一些保护电路,以保证电力电子器件和整个电力电子系统正常可靠运行。

确定变换主电路结构的基本方法被称为电力电子电路拓扑研究和综合分析。变换器拓扑可以理解为变换器主回路所有元器件的平面布置。概括地说,变换器拓扑实质上是按一定规则连接的一组半导体器件阵列,其中包括无源及有源功率元件。现代电力电子工程的主要研究方向之一是寻求变换主电路的拓扑优化,即在功率变换主回路设计中,按照经济指标和变换性能指标为约束条件,优化网络中各元件的物理位置。

电力电子变换器工作时,各开关器件轮流导通向负载传递电源能量,因此流向负载的电能一定要从一个或一组元件向另一个或另一组元件转移,这个过程叫做换流或换相。换流过程总是在一个开关被开通的同时关断原来导通着的开关,按照导通元件在下一个元件开通时的关断的方式,电力电子电路有以下四种换流方式。

(1) 电源换流:由电源电压极性改变向导通元件提供反向封锁电压使其关断。这种换流方式只适用于交流电源供电,以不控或半控开关器件组成的变流电路,如整流器等。

(2) 负载换流:由负载电压或电流极性改变向导通元件施加反向封锁电压使其关断。它用于直流供电、负载可振荡的直流—交流变换电路。

(3) 强迫换流:由外部电路向导通元件强行提供反向封锁电压或从导通元件控制极施加关断信号迫使其关断。这种方式常见于晶闸管直流—直流变换电路和所有斩控式变换电路。

(4) 无换相方式:负载电流因方向改变过零使原来导通元件自行关断。这种方式见于晶闸管交流电压控制器。

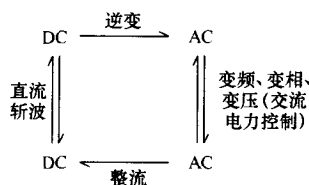


图 1-4 电力电子变流电路分类

3. 电力电子功率变换的基本类型

应用电力电子技术构成的变流装置,按其功能可分为:AC—DC 变换、DC—AC 变换、AC—AC 变换和 DC—DC 变换。电力电子变流电路分类如图 1-4 所示。

(1) AC—DC 变换。把交流电压变换成固定或可调的直流电压,即为 AC—DC 变换。传统的 AC—DC 变换是利用晶闸管和相控技术,依靠电网电压换流实现的。其主要特点是控制简单,运行可靠,适宜超大功率应用。存在的问题是产生低次谐波,对电网是滞后功率因数的负载,这种非线性负载的迅速增多对电网产生了严重影响。20 世纪 80 年代后期,开始采用 PWM 技术和静电感应晶闸管构成有源电网调节器,它同时具有滤波和无功补偿的功能。高功率因数整流器克服了相控整流的缺点,可以使电网电压和电流同相位,还能够调节电容电压以抵消电网电压波动使输出稳定。

在直流电机调速应用中,近年来直接用自关断功率器件构成 PWM 整流器,不仅控制直流电流,而且使交流侧线电流成为正弦波并保持功率因数为 1。

(2) DC—AC 变换。把直流电变换成频率固定或可调的交流电通常被称为逆变器 DC—AC。按电源性质可分为电压型和电流型。按控制方式可分为六拍(六阶梯)方波逆变器、

PWM 逆变器和谐振直流环节（软性开关）逆变器。按换流性质可分为依靠电网换流的有源逆变和自关断元件构成的无源逆变。逆变装置主要被用于机车牵引、电动车辆和其他交流电机调速、不间断电源（UPS）系统、APLC 系统和感应加热。

(3) AC—AC 变换。把固定或变化的交流频率、电压变换成可调或固定的交流频率、电压即为 AC—AC 变换，通常称为变频器。传统的交—交变频采用晶闸管相控技术，可运行于有环流模式，通过对环流大小进行控制，可以使输入端的无功功率不随负载而变化。因而，用固定容量的电容器便可使输入端功率因数恢复到 1，也可将有源滤波器用于这种变换装置吸收有害谐波。交—交变频器的新发展是基于 PWM 变换理论的矩阵式变换器。采用 9 只交流开关（由具有反向阻断能力的自关断器件反并联构成）组成一个半导体阵列，其优点是在所有工作范围内总可以保持功率因数为 1。困难之处是高频 PWM 开关的阻断能力往往不对称。矩阵式变换器构成调压器可获得调幅正弦波电源；矩阵式交—交变频器可获得高达 0~200Hz 的调频调幅交流电源。

(4) DC—DC 变换。把固定或变化的直流电压变换成可调或恒定的直流电压即为 DC—DC 变换器。按变换电压体制可分为降压式、升压式和升降压式。按线路拓扑可分为单端、双端及桥式电路。通常以直流 PWM 方式控制。DC—DC 变换器广泛地用于计算机电源、各类仪器仪表、直流电机调速及金属焊接等。

谐振型开关技术是 DC—DC 变换的新发展，可减小变换器体积、重量并提高可靠性。这种变换器有效地解决了开关损耗和器件应力问题。其中性能优良的是谐振直流环节变换器。在软性开关变换器中，谐振开关频率可高达 10MHz 级，从而可设计出结构紧凑的电源，甚至可以使电源分布在电路板上。在带有谐振环节的 DC—DC 变换器中，直流电流首先由谐振逆变电路变成高频交流，然后再经过高频整流和滤波得到直流。这类变换原理是 DC—DC 变换的主要发展方向。

4. 控制方式

控制电路的主要功能是为变换器拓扑中功率器件提供门极（控制极）驱动信号，主要由时序控制、各种保护电路、电位隔离及驱动功率放大等部分组成，完成输入电能对负载的接通和断开，从而实现所需的能量控制与形式变换。电力电子电路控制方式一般都按器件开关信号与控制信号间的关系分类。

1) 相控型：器件开通信号相位，即导通时刻的相位，受控于控制信号幅度的变化。晶闸管相控整流和交流调压电路均采用这种方式。通过改变导通相位角以改变输出电压的大小。

2) 频控型：用控制电压的幅值变化来改变器件开关信号的频率，以实现器件开关工作频率的控制。这种控制方式多用于直流—交流变换电路中。

3) 斩控型：器件以远高于输入、输出电压工作频率的开关频率运行，利用控制电压（即调制电压）的幅值来改变一个开关周期中器件导通占空比，如 PWM，从而实现电能的变换与控制。采用自关断器件，通过这种控制方式可完成各种形式的电能变换与控制，并获得比移相控制、频率控制更好的整体性能。

5. 电力电子技术应用

电力电子技术应用非常广泛，涉及国防军事、工业、交通、农业、商业、文体、医药等，甚至连家用电器都渗透着电力电子技术。

1) 电机调速: 电力电子技术在交、直流电机调速中的应用可归纳为两个目的: 一是运动控制, 为了满足自动化生产线、特殊生产工艺及某些品质要求对电机进行调速控制; 第二个目的是节约电能。

在运动控制中的主要应用领域有: 电动汽车及各种电瓶车、地铁、轻轨车以及机车牵引、超导磁悬浮铁道系统; 石油工业中钻井机械、管线输油、石油精炼及采油机械; 轧钢工业中可逆热轧机、热连轧机、带钢冷连轧机、可逆冷轧机、飞剪机控制、压下螺丝位置控制及活套支持器自动控制等; 港口机械中翻车机、输送机、码头起重机、堆料机、取料机、装船机、码头管理和装卸自动化; 各类起重机械及矿井提升机、机床及各种自动化生产线、高炉控制系统、调速电梯、供水系统、造纸、印染及化工工业、纺织工业、船舶推进系统等。

在节能运行控制中主要应用于交流电动机的变频调速。随着电力电子技术的飞速发展, SFC 技术已进入与直流调速相媲美和相竞争的阶段, 并有取而代之的趋势。SFC 技术在电力系统的应用主要有两个方面: ①发电厂的风机、水泵使用变频调速控制, 会具有非常大的节电效益。②抽水蓄能机组采用 SFC 技术, 可减小机组起动过程对电网的冲击, 并且机组在低水头运行时, 还可提高机组的效益。近年来电力电子变频技术的迅速发展, 使交流电机的调速性能可与直流电机媲美, 交流调速技术大量应用并占据主导地位, 几百瓦到数千千瓦的变频调速装置, 软起动装置等用电效率明显提高, 使节电达到 30% 以上。

2) 电源: 电力电子应用的另一个重要的领域是在各种各样的电源中。根据工业过程的需要, 电源通常需要变换成各种各样的波形和功率等级, 而在各个领域的需求又是千差万别的, 因而电源的需求和品种非常之多, 如弧焊电源、通信用电源、小型化开关电源、不间断电源 (UPS) 感应加热电源、超声波发生器、微波炉等设备电源, 在军事应用中主要是雷达脉冲电源、声纳及声发射系统、武器系统、电子对抗、军用电子系统和通信系统电源、飞机变速恒频 (VSCF) 电源。

3) 电源电网净化技术: 解决电力电子设备谐波污染的主要途径有两条: 对电网实施谐波补偿及对电力电子设备自身进行改进。

4) 电力控制和电能传输: 作为供电系统调节负载的方法, 发电厂广泛采用变速抽水蓄能发电进行功率调节, 在夜里利用多余的能量驱动涡轮 (泵), 将水储备到处于较高位置的水库中, 在白天重载时, 利用储存的水力发电。在抽水蓄能发电设备中, 水泵—水轮机的转速是通过其转子上的交流励磁来控制的, 采用交—交变换器励磁, 可根据负载要求灵活控制发电量。这种功率调节也可由蓄电池及变频系统构成。

柔性交流输电系统的作用是对发电—输电系统的电压和相位进行控制。其技术实质类似于弹性补偿技术。

高压直流输电 (HVDC) 为了从根本上解决输电系统的稳定性问题, 减少线路无功损耗, 研究发展了远距离、大功率高压直流输电系统, 它需在线路两端设置整流、逆变及无功补偿装置。这些新技术当前在日本、欧洲和北美应用得比较广泛。功率器件主要采用 SCR、GTO 和 SITH。

静止无功补偿器 (SVC)。SVC 是用以晶闸管为基本元件的固态开关替代了电气开关, 实现快速、频繁地以控制电抗器和电容器的方式改变输电系统的导纳。SVC 可以有不同的回路结构, 按控制的对象及控制的方式不同分别称之为晶闸管投切电容器 (TSC)、晶闸管投切电抗器 (TSR) 或晶闸管控制电抗器 (TCR)。

用户电力技术。其中，CP 技术和 FACTS 技术是快速发展的姊妹型新式电力电子技术。采用 FACTS 的核心是加强交流输电系统的可控性和增大其电力传输能力；而发展 CP 的目的是在配电系统中加强供电的可靠性和提高供电质量。CP 和 FACTS 共同基础技术是电力电子技术，各自的控制器在结构和功能上也相同，其差别仅是额定电气值不同，二者的融合是一种趋势。具有代表性的用户电力技术产品有：动态电压恢复器（DVR），固态断路器（SSCB），故障电流限制器（FCL），统一电能质量调节器（PQC）等。

5) 照明：照明用电占美国总发电量的 24%，在我国占 12%。白炽灯发光效率低、热损耗大，现在广泛采用了日光灯。但是，日光灯必须要有扼流圈（电感）启辉，全部电流要流过扼流圈，无功电流较大，不能达到有效节能。近年来，电子镇流器的出现，较好地解决了这个问题。电子镇流器就是一个 AC—DC—AC 变换器。如用于 20~40W 的日光灯，其体积要比相应功率的扼流圈要小，可以减少无功电流和有功损耗。据美国统计，每盏灯每年可节电 30~70 美元，可见其节能效益。

6) 新能源开发及新蓄能系统：太阳电池和燃料电池等新直流发电系统、电池蓄能和超导蓄能等新型直流蓄能系统正在迅速发展，需要采用逆变技术与电力系统连网或直接变换为负载要求的体制。风力、潮汐发电变换都需要采用电力电子装置。

四、教学要求

本教材是为电气信息类专业的电力电子技术课程而编写的，内容包含器件、电路、应用三个方面，以电路为主。讲解器件主要讨论常用器件的基本工作机理、特性、参数及它们的驱动和保护方法，目的是为了理解应用器件组成电路，故应注意掌握器件外部特性及极限额定参数的应用。本课程主要研究由不同电力半导体器件所构成的各种典型功率变换电路的工作原理，主电路拓扑结构，分析方法，设计计算的基本手段，主电路开关元件的选择方法，各种典型触发、控制、驱动以及必要的辅助电路的工作原理和特点等。针对电力电子器件当前发展的情况，增加了可关断器件的篇幅。注意到近年来电力电子线路及系统计算机仿真已得到了全面的开发及应用，本教材介绍了几种常用的仿真方法。本教材还对当前电力电子最新应用如矩阵式交—交变换器、电网谐波抑制等内容作了简要介绍。

第二章 电力电子器件

内容提要与目的要求

了解电力电子器件的发展、分类与应用；理解和掌握晶闸管（SCR）、可关断晶闸管（GTO）、电力晶体管（GTR 或 BJT）、电力场效应晶体管（电力 MOSFET）和绝缘栅双极晶体管（IGBT）、IGCT 等常用的电力电子器件的工作机理、电气特性和主要参数，驱动电路的基本任务与电气隔离方法，电力电子器件的保护措施。重点：各种电力电子器件原理、性能上的不同点，各自应用的场合。

电力半导体器件是现代电力电子设备的核心。它们以开关阵列的形式应用于电力变流器中，把相同频率或不同频率的电能进行交一直（整流器）、直一直（斩波器）、直—交（逆变器）和交—交变换。这种开关模式的电力电子变换具有较高的效率，不足之处是由于开关的非线性而同时在电源端和负载端产生谐波。这些开关不是理想的，它们都具有导通和开关损耗。变流器广泛用于加热和照明控制、交直流电源、电化学处理、直流和交流传动、静态无功功率（VAR）产生、有源滤波等方面。虽然电力电子设备中的电力半导体器件的价格几乎不超过总价的 20%~30%，但是整台设备的价格和性能在很大程度上受到这些器件特性的影响。要设计出高效、可靠、性价比高的系统，设计师必须对这些器件及其特性有深入的了解。其实，现代电力电子技术基本上随着电力半导体器件的发展而发展起来的。微电子领域的发展对电力半导体器件的材料加工、制造、封装、建模和仿真等方面产生了巨大的影响。

今天的电力半导体器件几乎完全建立在半导体材料的基础上，它们可以归纳为以下几类：①二极管；②晶闸管（SCR）及派生器件；③电力晶体管（GTR）；④门极关断晶闸管（GTO）；⑤电力 MOSFET；⑥绝缘栅双极型晶体管（IGBT）；⑦集成门极换流晶闸管（IGCT）以及其他功率半导体器件等。

第一节 功率二极管

功率二极管（Power diode）从 20 世纪 50 年代初期开始就获得了应用。虽然功率二极管是不可控器件，但其结构简单、工作可靠，因而直到现在仍然大量用于电气设备当中。目前功率二极管已形成普通整流管、快恢复整流管和肖特基整流管三种主要类型。其中，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。

一、功率二极管的工作原理和静态伏安特性

图 2-1 (a) 和 (b) 所示为功率二极管的电路符号和静态伏安特性。典型的正向导通压降是 1.0V，该压降会引起导通损耗，因此必须用适当的散热片对器件进行冷却以限制结温。如果反向电压超过一个阈值，器件就会发生雪崩式的击穿，这时反向电流变大，二极管由于结内的大量功率损耗而过热毁坏，这个阈值称为击穿电压。比较其工作时的电压和电流的变

化，我们可以得到它的理想伏安特性，如图 2-1 (c) 所示。由于功率二极管的导通速度相对电力电路的暂态变化过程来说要快得多，因此，可把功率二极管看成理想开关。

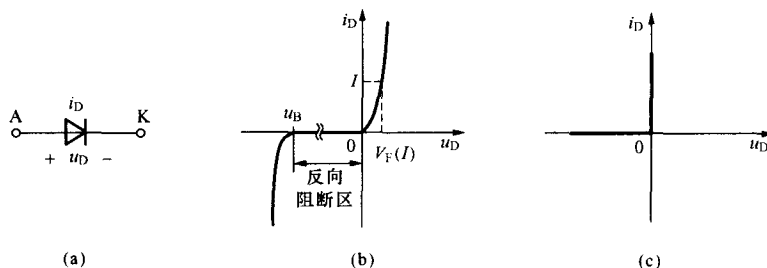


图 2-1 功率二极管的符号、伏安特性及理想特性

(a) 功率二极管符号；(b) 伏安特性；(c) 理想特性

二、功率二极管的动态特性

功率二极管的动态特性指反映通态和断态之间转换过程的开关特性。图 2-2 (a) 给出了电力二极管由零偏置转为正向偏置时动态过程的波形。可以看出，在这一动态过程中，电力二极管的正向压降会出现一个电压过冲 U_{FP} ，经过一段 t_{FR} 时间才出现趋于接近稳态压降值。

图 2-2 (b) 给出了电力二极管由正向偏置转为反向偏置时动态过程的波形。当原处于正向导通的电力二极管的外加电压突然从正向变为反向时，该电力二极管需经过一段短暂的时间才能进入截止状态。

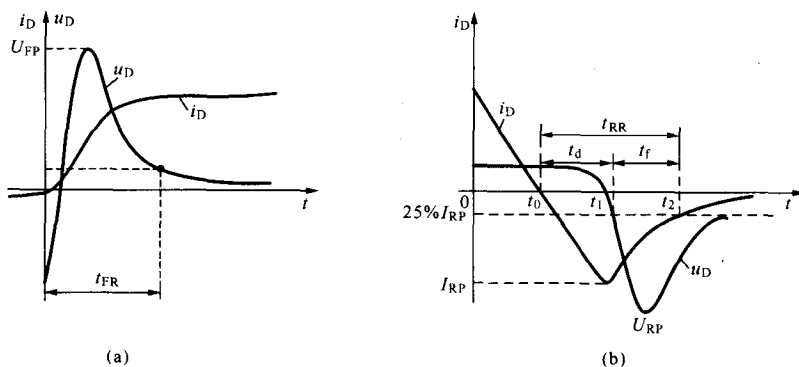


图 2-2 功率二极管的动态过程波形

(a) 开通过程波形；(b) 关断过程波形

设坐标原点时刻外加电压突然由正向变为反向，正向电流在此反向电压作用下开始下降，下降速率由反向电压大小和电路中的电感决定，而管压降由于电导调制效应的作用基本不变，直到正向电流降为零的时刻 t_0 。因而在管压降极性改变的 t_1 时刻反向电流从其最大值 I_{RP} 开始下降。在 t_1 时刻以后，由于反向电流迅速下降，在外电路电感的作用下，在电流二极管的两端产生比外加电压大得多的反向电压过冲 U_{RP} ，在电流下降到 $25\% I_{RP}$ 的 t_2 时刻，电力二极管两端承受的反向电压才降到外加电压的大小，电力二极管完全恢复对反向电压的阻断能力。

三、功率二极管的参数

(1) 正向平均电流 (I_F): 指功率二极管长期运行时, 在指定壳温和耗散条件下, 其允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

(2) 稳态平均压降 (U_F): 在指定温度下, 流过某一指定的稳态正向电流时对应的正向压降。

(3) 反向重复峰值电压 (U_{RRM}): 对功率二极管所能重复施加的反向最高峰值电压。使用时, 应当留有两倍的裕量。

(4) 反向恢复时间 (t_{RR}) 如图 2-2 所示, 为 $t_{RR} = t_d + t_f$ 。

(5) 最高工作结温 (T_{JM}): 在 PN 结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度, 通常在 $125 \sim 175^\circ\text{C}$ 范围之内。

(6) 浪涌电流 (I_{sur}): 功率二极管所能承受最大的连续一个或几个工频周期的过电流。

四、功率二极管的主要类型

功率二极管广泛应用在电力电子电路中。在后面的章节中我们将会看到, 功率二极管可以在交流一直流变换电路中作为整流元件, 也可以在直流—交流逆变电路中作为续流元件, 还可以在各种变流电路中作为电压隔离、嵌位或保护元件。在应用时, 按照实际应用的要求, 可选择以下不同类型的功率二极管。下面按正向压降、反向耐压、反向漏电流等性能, 特别是反向恢复特性的不同, 把功率二极管分为以下几类: ①标准或慢速恢复二极管; ②快速恢复二极管; ③肖特基二极管。

慢速和快速恢复二极管都具有 PN 结构, 如前所述。在快速恢复二极管中, 顾名思义, 恢复时间 T_r 和恢复电荷 Q_r 分别缩短和减少了, 这是通过加强复合过程控制少数载流子的寿命来实现的。其副作用是带来了更高的导通压降。例如, CS340602 型 POWEREX 快速恢复二极管, 额定直流电流 [$I_F(\text{DC})$] 为 20A, 额定截止电压 (U_{rm}) 为 600V, 并具有下列额定值, 即 $U_{FM} = 1.5\text{V}$ 、 $I_{rm} = 5.0\text{mA}$ 、 $T_r = 0.8\mu\text{s}$ 、 $Q_r = 15\mu\text{C}$ 。标准慢恢复二极管用于工频 (50/60Hz) 大功率整流。它们具有较低的导通压降和较高的 T_r 。这些二极管可以达到数千伏、数千安的额定值。肖特基二极管基本上是一种多数载流子二极管, 它由一个金属半导体结组成。因此, 它具有较低的导通压降 (通常为 0.5V) 和较短的开关时间, 其不足之处是截止电压较低 (通常最高为 200V)、漏电流较大。例如, International Rectifier 公司的 6TQ045 型肖特基二极管额定值为 $U_{rm} = 45\text{V}$ 、 $I_{F(\text{AV})} = 6\text{A}$ 、 $U_F = 0.51\text{V}$ 、反向漏电流 $I_{rm} = 0.8\text{mA}$ (25°C 时)。这些二极管可用在高频电路中。

二极管的电、热特性和下面将要讨论的晶闸管有些相似。不同种类二极管的特殊应用将在后续章节中讨论。

第二节 晶闸管及其派生器件

晶闸管 (Thyristor) 或硅可控整流器 (SCR) 一直都是工业上广泛用于大功率变换和控制的传统器件。这种在 20 世纪 50 年代晚期出现的器件使得固态电力电子器件进入了一个新纪元。

晶闸管这个名称往往专指晶闸管的一种基本类型——普通晶闸管。但从广义上讲, 晶闸管还包括许多类型的派生器件。本节将主要介绍普通晶闸管的工作原理、基本特性和主要参

数，然后简要介绍一种派生器件——双向晶闸管。

一、晶闸管的工作原理和静态伏安特性

图 2-3 (a)、(b) 所示为晶闸管的电路符号和伏安特性。由图可见，在其导通时，主电流由阳极 (A) 流向阴极 (K)。晶闸管的门极触发电流是从门极流入晶闸管，从阴极流出的。从图 2-3 (b) 晶闸管的伏安特性上看到，位于第 I 象限的是正向特性，位于第 III 象限的是反向特性。当 $I_G = 0$ 时，如果在器件两端施加正向电压，则晶闸管处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流流过。如果正向电压超过临界极限即正向转折电压 U_{bo} ，则漏电流急剧增大，器件开通（由高阻区经虚线负阻区到低阻区）。随着门极电流幅值的增大，正向转折电压降低。导通后的晶闸管特性和二极管的正向特性相似。导通期间，如果门极电流为零，并且阳极电流降至接近于零的某一数值 I_H 以下，则晶闸管又回到正向阻断状态。当晶闸管上施加反向电压时，其伏安特性类似于二极管的反向特性。与讨论二极管的方法相同，在分析换流器的工作原理时也可将晶闸管理想化，图 2-3 (c) 给出了它的理想特性。

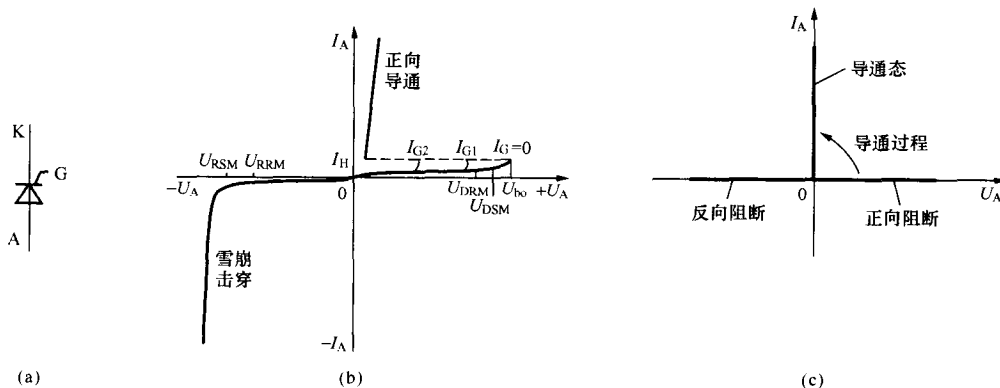


图 2-3 晶闸管的电路符号及伏安特性

(a) 晶闸管符号；(b) 伏安特性；(c) 理想特性

晶闸管在以下几种情况也可能被触发导通：阳极电压升高至相当高的数值造成雪崩效应；阳极电压上升率 du/dt 过高；结温较高；光触发。除了光触发可以保证控制电路与主电路之间的良好绝缘而应用于高压电力设备之外，其他都因不好控制而难以应用于实践。只有门极触发是最精确、迅速而且可靠的控制手段。

二、晶闸管的动态特性

图 2-4 给出了晶闸管开通和关断的波形，其开通过程描述的是使门极在坐标原点时刻开始受到理想阶跃电流触发的情况；而关断过程描述的是对已导通的晶闸管，外电路所加电压在某一时刻突然由正向变为反向（如图中点划线波形）的情况。

(1) 开通过程。晶闸管受到触发后，其阳极电流的增长不会瞬时完成。从门极电流的阶跃时刻开始，到阳极电流上升到稳态值的 10%，这段时间称为延迟时间 t_d （普通晶闸管为 $0.5 \sim 1.5 \mu s$ ）。阳极电

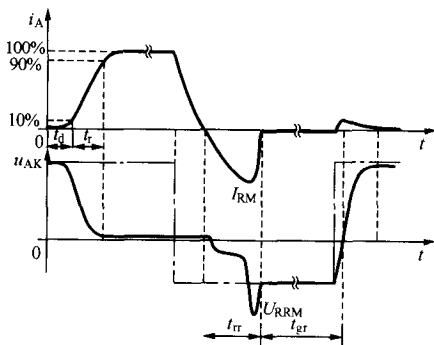


图 2-4 晶闸管的开通和关断的波形