



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电力电子技术

王宏伟 主 编
张 杰 副主编



中国电力出版社

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



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电力电子技术

主 编 王宏伟
副主编 张 杰
编 写 陈丽茹
主 审 何 瑞 齐云秋



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书共分七章, 主要内容包括晶闸管、单相相控整流电路、三相相控整流电路、晶闸管触发电路、逆变电路、变频电路、斩波器和交流调压器。本书围绕高等职业教育的培养目标, 详细介绍了电力电子技术在工业生产中的重要应用, 减少了理论和数学推导, 增加了电路和波形图, 力求将概念、理论、知识、技能融为一体, 深入浅出、循序渐进, 使本书更加生动、形象, 具有可操作性。

本书可作为高职高专院校电力技术类、自动化类等专业的电力电子技术课程的教材, 也可供相关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/王宏伟主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8161 - 9

I. 电… II. 王… III. 电力电子学-职业教育-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 039617 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 3 月第一版 2009 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 301 千字

定价 20.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

电力电子技术是利用电力电子器件组成各种电力电子电路,对电力进行变换和处理的技术,是电工领域中最活跃的技术之一,许多现代高新技术均与电力电子技术有关。电力电子技术及其产业的进一步发展必将给现代生产和生活带来深远的影响。

本书是根据教育部《关于“十一五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》精神编写,可供高等职业院校电力技术类、自动化类等专业的师生使用。高等职业教育的培养目标是技术应用性专门人才,本教材在编写过程中突出了以下四个特点:

- (1) 在重点保证基础理论、基本知识够用的前提下,注重实践和应用。
- (2) 书中引用很多实例,每章均有相关的练习,帮助学生了解自己和内容掌握的情况。
- (3) 深入浅出,着重阐述物理概念,适当降低理论分析的深度。
- (4) 详细介绍电力电子技术领域的最新发展。

本书由哈尔滨电力职业技术学院的教师执笔完成,其中王宏伟编写第一、二、五章,张杰编写第三、六章,陈丽茹编写第四、七章。全书由王宏伟统稿,由黄河水利职业技术学院自动化系何瑞副教授和东莞职业技术学院电子工程系的齐云秋副教授主审。

在教材编写过程中,黑龙江电力科学研究院的李连福高级工程师提供了不少资料及宝贵的修改意见,同时还参考了书末文献作者的有关著作。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在一些问题,希望读者批评指正。

编者

2008年10月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 晶闸管	9
第一节 晶闸管的结构与工作原理	9
第二节 晶闸管的特性	12
第三节 晶闸管的主要参数	13
第四节 晶闸管的派生器件	16
第五节 晶闸管的应用举例	18
本章小结	20
习题	21
第二章 单相相控整流电路	24
第一节 单相半波相控整流电路	24
第二节 单相桥式全控整流电路	31
第三节 单相桥式半控整流电路	37
本章小结	41
习题	41
第三章 三相相控整流电路	43
第一节 三相半波相控整流电路	43
第二节 三相全控桥式整流电路	53
第三节 三相半控桥式整流电路	59
第四节 整流电压的谐波分析	62
第五节 变压器漏抗对整流电路的影响	70
第六节 大功率供电可控整流主电路接线型式及其特点	72
第七节 整流装置的功能指标	81
本章小结	91
习题	91
第四章 晶闸管触发电路	93
第一节 概述	93
第二节 单结晶体管触发电路	94
第三节 同步信号为锯齿波的触发电路	98
第四节 同步信号为正弦波的触发电路	102
第五节 集成触发电路	106
第六节 触发脉冲与主电路电压的同步(定相)问题	111
第七节 防止晶闸管误触发的一般措施	117

第八节 电力电子器件的保护电路·····	118
本章小结·····	124
习题·····	124
第五章 逆变电路·····	127
第一节 逆变电路的概念·····	127
第二节 三相半波有源逆变电路·····	130
第三节 三相全控桥式逆变电路·····	131
第四节 逆变失败与逆变角的限制·····	132
第五节 有源逆变电路的应用·····	134
本章小结·····	141
习题·····	141
第六章 变频电路·····	143
第一节 变频电路的概念·····	143
第二节 单相无源逆变电路·····	145
第三节 三相无源逆变电路·····	148
第四节 脉宽调制(PWM)型逆变电路·····	154
第五节 交一直—交变频电路·····	159
第六节 交—交变频电路·····	163
本章小结·····	168
习题·····	169
第七章 斩波器和交流调压器·····	171
第一节 斩波器·····	171
第二节 交流调压器·····	180
本章小结·····	189
习题·····	189
参考文献·····	192

绪 论

电力电子技术是以电力为对象的电子技术，它将电子技术和控制技术引入传统的电力技术领域，利用半导体电力开关器件组成各种电力变换电路实现电能的变换和控制，构成了一门完整的学科，该学科被国际电工委员会命名为电力电子学（PowerElectronics）或称为电力电子技术。它是一门综合了电子技术、控制技术和电力技术的新兴交叉学科。图 0-1 所示为电力电子技术学科的构成，它形象地描述了电力电子技术这一学科的构成和它与其他学科的关系。

电力电子技术包括电力电子器件、电力电子电路和控制技术三个部分，它的研究任务是电力电子器件的应用、电力电子电路的电能变换原理、控制技术以及电力电子装置的开发与应用。

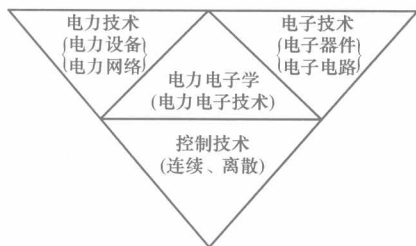


图 0-1 电力电子技术学科的构成

一、电力电子技术的发展

(一) 电力电子器件的发展

电力电子技术的发展取决于电力电子器件的研制与应用。电力电子器件是电力电子技术的基础，也是电力电子技术发展的动力，电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。

1. 半导体整流管

自从 20 世纪初 Grzetz 发明汞弧整流管单相桥式整流器以来，用于功率变换的主要器件是汞弧整流管和硒整流器。1947 年美国的贝尔实验室发明了晶体管，引发了电子技术的一场革命。以此为基础，美国在 1956 年研制出了最先用于电力领域的半导体器件——硅整流二极管（Semiconductor Rectifier, SR），又称为电力二极管（Power Diodes, PD）。普通的电力二极管因其正向通态压降（1V 左右）远小于汞弧整流器（10~20V）而将其取代，大大提高了整流电路的效率。普通整流管通常应用于 400Hz 以下的不可控整流电路。随着在生产工艺上以缩短整流管的正反向恢复时间来降低整流管的开关损耗为目的的研究取得成功，开发出了快恢复整流管和肖特基整流管，并应用于中频（10kHz 以下）和高频（10kHz 以上）整流的场合。20 世纪 80 年代中后期，为了进一步减少低压高频开关电源中电力半导体器件的管压降和损耗，同步整流管也应运而生。

2. 晶闸管及其派生器件

1957 年美国通用电气公司（GE）发明了普通反向阻断型可控硅整流管（Silicon Controlled Rectifier, SCR），以后称为晶闸管（Thyristor），它标志着电力电子技术的诞生。经过工艺完善和应用开发，到了 20 世纪 70 年代，晶闸管已形成从低压小电流到高压大电流的系列产品。以晶闸管为主要器件的电力电子技术很快在电化学工业、铁道电气机车、钢铁工业（感应加热）、电力工业（直流输电、无功补偿）中获得了广泛的应用。

晶闸管（SCR）到目前为止其功率容量提高了近 3000 倍，现在许多国家已能生产 8kV/

4kA 的晶闸管。近十几年来,随着自关断器件的飞速发展,晶闸管的应用领域有所缩小,但是,由于晶闸管具有高电压、大电流的特性,因此它在 HVDC、静止无功补偿(SVC)、大功率直流电源及超大功率和高压变频调速应用方面仍占有十分重要的地位。预计在今后若干年内,晶闸管仍将在高电压、大电流应用场合得到继续发展[然而由于晶闸管是只能通过门极(栅极)电流控制其导通而不能控制其关断的半控型器件,这就使它的应用范围受到了极大的限制]。

从 20 世纪 70 年代开始,在其后的近 40 年时间里,世界各国相继开发出下述晶闸管的派生器件。



在这些派生器件中, MOS 栅控晶闸管 (MCT) 是由美国 HARRIS 公司发明的。原本希望它能够取代 GTO 和 IGBT 器件用于电力系统,后来因其结构及工艺复杂、合格率偏低、成本太高,又没能达到期望的 4500V/2000A 水平,因此就停止了开发投产,这表明 MCT 器件已经被正式淘汰了。集成门极换流晶闸管 (IGCT) 是由瑞士 ABB 公司和日本三菱公司合作开发的,其容量可达 4500V/4000A,工作频率可达数千赫兹,已成功应用于中压变频器、电力机车牵引驱动和高压直流输电等领域,这是一种极具发展潜力的高电压、大电流的电力半导体器件。可关断晶闸管 (GTO) 的容量可达 6000V/6000A,工作频率在 500Hz 以下,因此它在低频、高电压、大电流应用领域具有优势。可以说, GTO 和 IGCT 两种自关断器件,加上高电压、大电流的晶闸管器件就成为今天电力电子技术中关键的应用器件。晶闸管的其余派生器件随着高频 PWM 变流技术的迅猛发展已有逐步被淘汰的趋势。尽管如此,晶闸管还是被称为电力半导体器件发展过程中的第一代发展平台。所谓发展平台,是指这种器件具有渗透性(应用领域广泛)、长期性(生命周期长)及派生性(派生的器件多)等特点。

由晶闸管及其派生器件构成的各种电力电子系统在工业应用中主要解决了传统的电能变换装置中所存在的能耗大和装置笨重的问题,因而大大地提高了电能的利用率,同时也使工业噪声得到了一定程度的控制。

3. 功率晶体管

1947 年美国贝尔实验室发明了晶体管,经过 20 多年的努力,用于电力变换的功率晶体管 (Giant Transistor, GTR) 才进入到工业应用领域。到 20 世纪 80、90 年代, GTR 已被广泛应用于中小功率的电路中。GTR 是全控型器件,驱动信号可控制其开通也可控制其关断,它的工作频率比晶闸管高,可达到 10~20kHz。脉冲宽度调制 (PWM) 技术在 GTR 变换电路中的应用使得直流线性电源迅速被高频开关电源取代。GTR 也曾被应用于中小功率电动机变频调速(目前已被 MOSFET 或 IGBT 取代)、不间断电源 (UPS) (已被 IGBT 管取

代)等工业领域。但是因为 GTR 存在着电压耐量不高、电流容量较小、存在二次击穿、不易并联以及开关频率偏低等问题,它的应用范围受到了限制。

4. 功率场效晶体管

在 20 世纪 70 年代后期,功率场效晶体管(Power MOSFET)开始进入实用阶段,进入 80 年代,在降低器件的导通电阻、消除寄生效应、扩大电压和电流容量以及驱动电路集成化等方面进行了大量的研究,取得了很大的进展。在功率场效晶体管中,应用最广泛的是电流垂直导电结构器件(VDMOS)。VDMOS 是一种场控可关断器件,具有工作频率高、开关损耗小、安全工作区宽、输入阻抗高、易并联等优点,目前广泛应用于高频开关电源、计算机电源、航空电源、小功率 UPS 以及小功率(单相)变频器等领域。

5. 绝缘栅双极型晶体管

在 20 多年前,电力半导体器件较为引人注目的成就之一就是开发出双极型复合器件。目前被认为最具有发展前途的是 1983 年由美国 GE 公司发明的绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)。IGBT 实现了器件高电压、大电流参数同其动态参数之间最合理的折中,因而兼有 MOS 器件和双极型器件的突出优点,目前 IGBT 容量可达 4500V/1200A、3300V/1500A。IGBT 取代功率晶体管(GTR)早已成为事实,目前 IGBT 正成为高电压、大电流应用领域中 GTO 和 IGCT 的潜在竞争者。值得关注的是,美国 IR 公司开发了 WAPP 系列 IGBT,美国 APT 公司开发了 GT 系列“霹雳(Thunderbolt)型”IGBT,目前已有 600V/100A 及其以下的此类 IGBT 商品,其硬开关工作频率已高达 150kHz,而软开关工作频率可达 300kHz,它的电流密度是相同电压等级的功率 MOSFET 管的 2.5 倍。这种 IGBT 器件的体积比 MOSFET 管小,成本也比较低,所以它正在越来越广泛地应用在高频开关电源中,越来越成为 MOSFET 管强有力的竞争者。另外,逆导型 IGBT 和双向型 IGBT 也正在研制中。

在 10 多年前,IGBT 出现在电力电子技术领域中,尽管当时它表现出了很好的综合性能,但是许多人仍难以相信这种器件在大功率领域的生命力。现在 IGBT 器件显示了巨大的发展前途,它集 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快和 GTR(或 GTO)载流能力大的优点于一身,在大容量、高频率的电力电子电路中表现出非凡的性能,形成了一个新的器件应用发展平台。

6. 功率集成电路和智能功率模块

多年来,为了提高电力电子装置的功率密度,一般把多个大功率器件组成的各种单元与驱动、保护、检测电路集成一体,构成功率集成电路(PIC)。制造具有各种不同功能的功率集成电路的最大优势是引线减少、可靠性提高、经济效益明显增加。PIC 的使用方便、性能可靠,代表着电力电子器件的发展方向。

另外,高电压功率集成电路(HVIC)都已形成各种实用系列,它们实际上都是一种微型化的功率变换装置,应用起来可靠方便,但是功率都不是很大。

随着微电子技术的发展,20 世纪 80 年代诞生了智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM),它将具有驱动、保护、诊断功能的 IC 与电力半导体器件集成在一个模块中,并可用于 10~100kW 功率等级的电力电子系统中。由于不同元器件、电路、集成芯片的封装或相互连接产生的寄生参数已成为影响电力电子系统性能的关键问题,所以采用 IPM 可以减少设计的工作量,使生产自动化,提高系统的品质、可靠性和可维护性;缩短设计周

期；降低成本。目前，三相六管封装的 IPM 容量可达到 1200V/600A，单相桥臂两管封装的 IPM 容量可达到 1200V/2400A。大功率 IPM 已成为电力电子技术领域的一个研究重点。

随着分布式电源系统 (DPS) 的发展，美国海军研究所提出了集成电力电子模块 (PEBB) 开发计划来设计舰艇的 DPS。PEBB 的功能是把一台电力电子系统的所有硬件都以芯片形式封装在一个模块内，从而使系统的体积达到最小，所有引线减至最少，寄生电感、电容降到最低，可靠性大为提高。IPM 是单层单片集成的，而 PEBB 具有高电压、电流大的特点，属于多层多片集成，它的结构更复杂，由于采用多方向散热，因此热设计也更复杂。可以预计，到 2010 年可做出单元功率达 1000kW 等级的电力电子集成系统。

综上所述，电力半导体器件经过了 50 多年的发展，器件制造水平不断提高，经历了以硅整流管 (SR)、晶闸管 (SCR)、可关断晶闸管 (GTO)、巨型晶体管 (GTR)、功率 MOSFET 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 为代表的分立器件时期，现在已发展到由驱动电路、控制电路、传感电路、保护电路和逻辑电路等集成在一起的高度智能化的 PIC 和 IPM 时期。电力半导体器件实现了器件与电路的集成，强电与弱电、功率流与信息流的集成，成为机和电之间的智能化接口，是机电一体化基础单元。按照控制特性来说，电力半导体器件可分为以硅整流管 (SR) 为代表的不可控器件，以晶闸管 (SCR) 为代表的半控型器件和以可关断晶闸管 (GTO)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 为代表的全控型器件三大类。在器件的控制模式上，电力半导体器件已经从电流型控制模式发展到电压型控制模式，这不仅大大降低了门极的控制功率，而且大大提高了器件导通与关断的转换速度，从而使器件的工作频率由工频→中频→高频不断提高。在电力电子技术走向智能化、高频化、大功率化、模块化、绿色化的进程中，作为其基础的新型电力半导体器件不断涌现，为电力电子技术的发展作出新的贡献。电力电子器件已经与计算机控制技术相结合，在各行各业发挥了重要作用，给电力电子技术注入了强大的生命力。

(二) 电力电子电路及其控制技术的发展

电力电子电路的根本任务是实现电能变换和控制。完成电能变换和控制的电路称为电力电子电路，这是电力电子技术的主要内容，其基本形式可分为整流电路、直流变换电路、逆变电路和变流变换电路四种。

1. 整流电路

将交流电能转换为直流电能的电路称为整流电路，也称为 AC/DC 变换电路。完成整流任务的电力电子装置称为整流器。对晶闸管组成的整流器实施相移控制技术可将不变交流电压变换为大小可控的直流电压，相控整流。晶闸管相控整流可取代传统的直流发电机组，实现直流电机的调速，广泛应用于机床、轧钢、造纸、纺织、电解、电镀等领域。但是，晶闸管相控整流电路的输入电流滞后于电压，其滞后角随着触发延迟角 α 的增大而增大，输入电流中谐波分量相当大，因此功率因数很低。把逆变电路中的 SPWM 控制技术用于整流电路，就形成 PWM 整流电路。通过对 PWM 整流电路的适当控制可以使其输入电流非常接近正弦波，且和输入电压同相位，功率因数近似为 1。这种整流电路也可以称为高功率因数整流器，其应用前景十分广泛。

2. 直流变换电路

将直流电能转换为另一固定电压或可调电压的直流电能的电路称为直流变换电路。它的基本原理是利用电力开关器件周期性的开通与关断来改变输出电压的大小，因此也称为开关

型 DC/AC 变换电路或称直流斩波器。直流变换技术广泛地应用于无轨电车、地铁列车、蓄电池供电的无级变速电动汽车的控制，从而获得加速平稳、快速响应的性能，同时得到节约电能的效果。特别要提出的是，20 世纪 80 年代以来兴起的采用直流变换技术的高频开关电源的发展最为迅猛，由于它具有体积小、质量轻、效率高等优点，因此它在工业、军事和日常生活中均有着广泛的应用，为计算机、通信、消费电子等类产品提供可靠的直流电源。

3. 逆变电路

将直流电能变换为交流电能的电路称为逆变电路，又称为 DC/AC 变换电路。完成逆变的电力电子装置称为逆变器。如果将逆变电路的交流侧接到交流电网上，把直流电逆变成同频率的交流电返送到电网去，称为有源逆变。它用于直流电机的可逆调速、绕线转子异步电动机的串级调速、高压直流输电和太阳能发电等方面。如果逆变器的交流侧直接接到负载，即将直流电逆变成某一频率或可变频率的交流电供给负载，则称为无源逆变，它在交流电动机变频调速、感应加热、不间断电源等方面应用十分广泛，是构成电力电子技术的重要内容。

4. 交流变换电路

把交流电能的参数（如幅值、频率）加以变换的电路称为交流变换电路，又称为 AC/AC 变换电路。根据变换参数的不同，交流变换电路可以分为交流调压电路和交—交变频电路。交流调压电路维持频率不变，仅改变输出电压的幅值，它广泛应用于电炉温度控制、灯光调节、异步电动机的软启动和调速等场合。交—交变频电路也称为直接变频电路（或周波变流器），是不通过中间直流环节而把电网频率的交流电直接变换成不同频率的交流电的变换电路，它只能降频、降压，主要用于大功率交流电动机调速系统。除此之外，还有采用全控型器件加 PWM 控制的交流变换器，又称为交流斩波器，目前，由于成本太高，一般很少使用。

5. 电力电子控制技术

要让电力电子电路完成各种工作任务，必须为功率变换主电路中的开关器件配备提供驱动信号的控制电路。驱动信号的产生依赖于特定的控制策略和控制算法。最常用的是相控方式，即采用延时脉冲控制功率器件导通的相位。它半控型器件的整流、逆变、交流调压等电路中获得了广泛的应用。除此之外，在大量采用全控型器件的电力电子电路中，为了减小输出电能中的谐波分量，还广泛采用通信工程中脉冲宽度调制（PMW）理论。所谓 PMW 技术就是利用电力半导体器件的开通和关断产生一定形状的电压脉冲序列，经过低通滤波器后来实现电能变换的一种技术。在电力电子技术中，采用 PWM 控制技术可有效地控制和消除谐波，提高装置的功率因数，能同时实现变频变压，它成为了功率变换电路中的核心控制技术，被广泛应用到整流、斩波、逆变、交—交变换等电路。值得一提的是，脉冲幅度调制（PAM）和脉冲频率调制（PFM）也得到了较多的应用。

对于动态性能和稳态精度要求较高的场合，还必须广泛采用自动控制技术和理论。例如，对线性负载常采用比例积分微分（PID）控制方法、对非线性负载（如交流电机）常常采用矢量控制方法。

为了提高电力电子装置的功率密度，必须提高功率器件的开关频率，同时器件的开关损耗也随之加大。减小开关损耗和提高效率是电力电子技术的重要问题。如果在电力电子变换电路中采取一些措施，例如，改变电路结构和控制策略，使开关器件被施加驱动信号，而在

开通过程中其端电压为零,这种开通称为零电压开通;如果使开关器件在撤除其驱动信号后的关断过程中其承载的电流为零,这种关断称为零电流关断。零电压开通和零电流关断是软开关的最理想的状态,其开关过程中无开关损耗。如果开关器件在开通过程中端电压很小,在关断过程中其电流也很小,这种开关过程的功率损耗不大,称为软开关。近年来软开关技术在电力电子系统设计中获得了广泛的使用。

针对生产生活提出的实际问题,人们可以选择合适的电力电子电路,并采用传感技术、现代控制理论、微处理器、CPLD、DSP以及大规模集成电路实现特定的控制方式,能组成完成特定任务的电力电子装置。

以20世纪50年代发展起来的晶闸管及其派生的GTO器件、功率整流管(SR)和GTR等为基础所形成的电力电子技术,称为传统电力电子技术。这一发展时期比较典型的电路结构有不可控整流电路、相控整流电路、逆变电路以及交流变换电路等形式。由于上述器件的工作频率较低,控制不方便。因而均无法方便地实施高频PWM技术。另外,由上述器件(SCR、GTO、SR、GTR)构成的电力电子装置或系统,在消除电网侧的电流谐波、改善电网侧的功率因数、逆变器输出波形控制、减少环境噪声污染、进一步提高电能利用率、降低原材料消耗以及提高系统的动态性能等方面都遇到了困难,可以说,利用基于传统低频技术的传统电力电子技术处理电能变换问题不是一种理想的办法。

从20世纪80年代末期发展起来的以功率场控自关断器件MOSFET和IGBT为代表的集高频、高电压和大电流于一身的功率半导体复合器件的问世,改变了人们长期以来用低频技术处理电能变换问题的习惯,转入到以高频处理电能变换问题的新阶段,这表明传统电力电子技术已经进入现代电力电子技术时代。也就是说,高频现代电力电子技术使电能转换尤其是频率变换能更加自如控制,并有效地实现了绿色用电与高效、节能的电能变换,从而开创了人类绿色供用电的美好明天。

二、电力电子技术应用领域

电力电子技术应用的市场需求与日俱增,其主要应用领域包括以下几个方面。

(1) 一般电源:包括不停电电源、电解电源、电镀电源、开关电源、机车辅助电源、微机及仪器仪表电源、航空电源和通信电源。

(2) 专用电源:包括电化学电源、微弧氧化电源、蓄电池充电放电、电子模拟负载、电解水电源、交流电子稳压电源、脉冲功率电源和电力测功机。

(3) 电力牵引及传动控制:包括电力机车、电传动内燃机车、矿井提升机和轧钢机传动。

(4) 电力系统应用:包括高压直流输电(HVDC)。在输电线路的送端将工频交流变为直流,在受端再将直流变回工频交流。

(5) 有源滤波器:由于电力电子装置的应用与普及,导致电网的谐波问题越来越严重。传统的无源滤波器由于其滤波性能较差,难于应付日益严重的电网“公害”。人们从电力电子学本身找到了解决的途径,这就是有源滤波器。它主要是由电压源型或电流源型PWM变流器和一个基准器构成的谐波发生器。目的是产生大范围动态谐波和无功功率,重新“修补”电网波形。因此,有源滤波器不但可用来滤波,还可作为功率补偿器、电压稳定器及不对称负载的电压调节器。

(6) 新能源利用:光电池,风力发电等;电力电子装置还将用于太阳能发电及风力发电

装置与电力系统的连接。在近期内风能是最有大规模开发利用前景的可再生能源, 20 年来风力发电从实验研究迅速发展成为一项专门的技术, 发电成本已接近常规能源发电的成本。这使风电及太阳能、生物质能和海洋能等可再生能源发电脱颖而出, 形成一个新兴的产业。与其他发电方式比较, 可再生能源发电不排放任何有害物质, 也不存在移民问题; 因此发展洁净能源是减少温室效应气体排放、保护生态环境、改善电力结构的重要措施。未来的能源结构应是一个持久的、可再生的、干净的体系。新能源和可再生能源既是近期的补充能源, 又是未来的能源基础。

(7) 节能: 采用电力电子装置实现电机调速可以达到很高的效率。根据负载需求进行调速的热泵和空调机是电力电子学应用的成功例子, 如工业上的泵、压缩机、鼓风机及风扇。

(8) 电气工艺应用: 包括在焊接设备及感应加热中的应用。

(9) 家用电器: 种类繁多的家用电器, 小至一台调光灯具、高频荧光灯具, 大至通风取暖设备、微波炉及众多的电动机驱动设备, 都离不开电力电子交流电路。各种 PWM 交流设备及专用功率集成电路将被广泛地应用于现代化家庭中, 如家用的电冰箱及冰柜、暖气空调机、电子装置(个人电脑、其他家用电器)。

(10) 静止无功补偿器 (STATCOM) (串联): 典型功率应用, 100MW; 用于电网的电压控制和无功补偿。

(11) 柔性输电技术: 柔性交流输电系统 (flexible AC transmission system, FACTS) 是指装有电力电子型或其他静止型控制器以加强系统可控性和增加功率传输能力的交流输电系统。FACTS 设备是 FACTS 家族中的具体成员, 指用于提供一个或多个控制交流输电系统的电力电子系统或其他静止设备。FACTS 技术是利用现代大功率电力电子学改造传统交流电力系统的一项重大措施, 被认为是 21 世纪初可以实施的技术改革措施, 已成为当今发达国家电力界研究的热点。FACTS 技术 (包括系统应用技术及控制器技术), 已被国内外的一些权威性的输电技术研究者和工作组称为“未来输电系统新时代的三项支撑技术 (FACTS 技术、先进的控制中心和综合自动化技术) 之一”, 或是“现代电力系统中的三项目具有变革性影响的前沿性课题 [柔性输电技术、智能控制、基于全球卫星定位系统 (GPS) 的新一代动态安全分析与监测系统] 之一”。

(12) 电动汽车和混合动力电动汽车 (EV/HEV)。

三、课程性质、教学要求与学习方法

电力电子技术是一门专业基础性质较强且与生产实际紧密结合的课程, 在高职高专的电气工程类专业、电子技术应用类专业中被确定为一门主干课。课程内容包括器件、电路和应用三大方面。三者中, 以电路为主, 讲解器件和应用的目的是为了应用器件组成电路, 故应注意掌握器件外部特性及极限额定参数。本课程的主要篇幅在于研究不同电力半导体器件所构成的各种典型功率变换电路。学生应掌握功率变换主电路的构成和工作原理、不同负载对电路工作特性的影响以及主电路的元件参数计算与选择; 同时学生应熟悉、了解各种典型触发、控制、驱动以及必要的辅助电路的工作原理和特点。

学习本课程时, 应着重物理概念与基本分析方法, 突出“管为路用”的基本原则, 重点放在电路上, 并在电路学习与分析中处理好器件、电路、应用三者关系。在学习方法上要特别注意电路的波形与相位的分析, 注意各种电力电子器件在不同变换电路中截止、导通的变化过程, 从波形的变化中分析电路的工作状态、性能指标。同时也要注意培养学生的读图能

力、工程估算能力、分析问题和解决问题的能力。

高职高专教育不同于本科教育，要在教学实践中大力倡导学生的技术实现能力和工程现场能力。故而在本课程的教学中也应突出理论与实践的结合，充分利用各种教学手段包括 Workbench 等仿真和虚拟实验，使学生能够身临其境地体会与实践电力电子技术中器件、电路中的各种电量波形及在不同外部工作条件下各种电量的变化过程。

晶 闸 管

晶闸管 (Thyristor) 是硅晶体闸流管的简称, 俗称可控硅 (Silicon Controlled Rectifier, SCR)。它是电力电子的主要器件。

电力电子器件种类很多, 并且各有特点。按器件的开关控制特性可以分为不可控器件、半控型器件和全控型器件三类。

(1) 不可控器件: 器件本身没有导通、关断控制功能, 而是需要根据外电路条件决定其导通、关断状态这类器件称为不可控器件。电力二极管 (PD) 就属于此类器件。

(2) 半控型器件: 通过控制信号只能控制其导通, 不能控制其关断的电力电子器件称为半控型器件。例如: 晶闸管 (SCR) 及其大部分派生器件等。

(3) 全控型器件: 通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断的器件称为全控型器件。例如: 门极可关断晶闸管 (GTO)、功率场效晶体管 (MOSFET) 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等。

电力电子器件按控制信号的性质不同又可分为电流控制型器件和电压控制型器件两种。

(1) 电流控制型器件: 此类器件采用电流信号来实现导通或关断控制, 代表性器件为晶闸管、门极可关断晶闸管、功率晶体管、IGCT 等。

(2) 电压控制型器件: 这类器件采用电压控制 (场控原理控制) 它的通、断、输入控制端基本上不流过电流信号, 用小功率信号就可驱动它工作。代表性器件为 MOSFET 和 IGBT。

电力电子器件种类多, 除了它们都具有良好的开关特性外, 不同的器件还具有特殊性。正是由于这种特殊性, 使得不同器件的应用范围不一样。

第一节 晶闸管的结构与工作原理

晶闸管作为大功率的半导体器件, 只需用几十至几百毫安的小电流, 就可以控制几百至几千安的大电流, 实现了弱电对强电的控制。

一、晶闸管的结构

晶闸管是四层 ($P_1N_1P_2N_2$) 三端 (阳极 A、阴极 K、门极 G) 器件, 其内部结构和等效电路如图 1-1 所示。

晶闸管的符号及外形如图 1-2 所示, 图 1-2 (a) 为晶闸管的符号。晶闸管的外形大致有塑封型、螺栓型和平板型三种。塑封型多见于额定电流 10A 以下; 图 1-2 (b) 所示为螺栓型, 额定电流一般为 10~200A; 图 1-2 (c) 所示为平

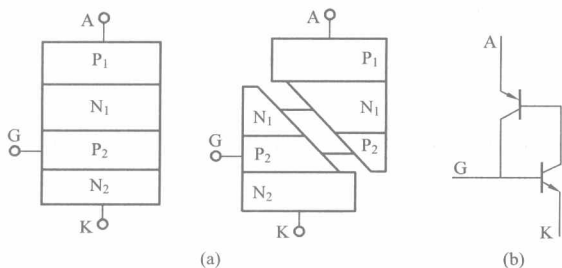


图 1-1 晶闸管的内部结构和等效电路
(a) 内部结构; (b) 互补晶体管等效

板型, 额定电流一般为 200A 以上。晶闸管工作时, 由于器件损耗而产生热量, 需要通过散热器降低管芯温度, 器件外形是为便于安装散热器而设计的。

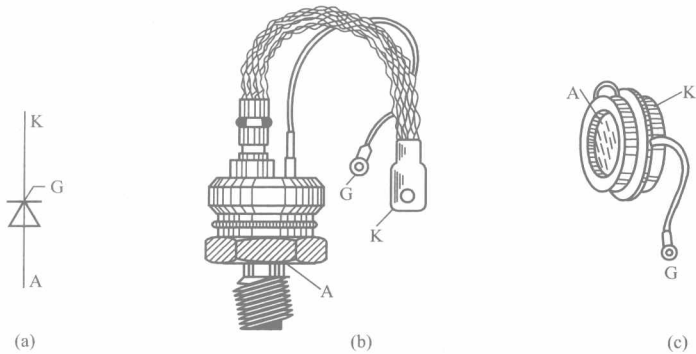


图 1-2 晶闸管的符号及外形

(a) 晶闸管的符号; (b) 螺栓型晶闸管的外形; (c) 平板型晶闸管的外形

二、晶闸管的导通与关断条件

晶闸管是单向可控的开关元件, 它的导通和关断条件可通过图 1-3 所示的实验线路来说明。

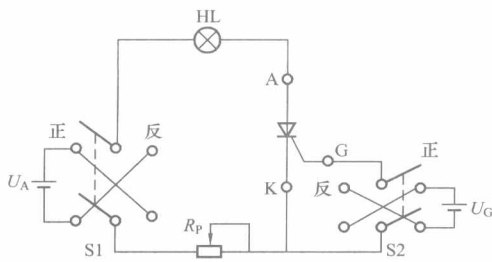


图 1-3 晶闸管的导通与关断实验电路

主电源 U_A 和门极电源 U_G 通过双刀双掷开关 S1 和 S2 正向或反向闭合接通晶闸管的相关电极, 用指示灯 HL 和电流表来观察晶闸管的通断情况。实验步骤如下:

(1) 当 S1 向右反方向闭合时, 晶闸管承受反向阳极电压, 不论门极承受何种电压, 指示灯都不亮, 说明晶闸管处于关断状态。

(2) 当 S1 向左正向闭合时, 晶闸管承受正向阳极电压, 仅当 S2 正向闭合即门极也承受正

向电压时指示灯才亮。

(3) 晶闸管一旦导通, S2 不论正接、反接或者断开, 晶闸管保持导通状态不变。说明门极失去了控制作用。

(4) 要使晶闸管关断, 可以去掉阳极电压, 或者给阳极加反向电压; 也可以降低正向阳极电压数值或增大回路电阻, 使流过晶闸管的电流小于一定数值。

由以上实验结果, 可得到如下结论:

(1) 晶闸管的导通条件: 在晶闸管的阳极和阴极两端加正向电压, 同时在它的门极和阴极两端也加正向电压, 两者缺一不可。

(2) 晶闸管一旦导通, 门极即失去控制作用, 因此门极所加的触发电压一般为脉冲电压。晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通。门极触发电流一般只有几十毫安到几百毫安, 而晶闸管导通后, 可以通过几百、几千安的电流。

(3) 晶闸管的关断条件: 使流过晶闸管的阳极电流小于维持电流 I_H 。维持电流 I_H 是保持晶闸管导通的最小电流。

三、晶闸管的工作原理

晶闸管 PNP 结构可以等效为两个互补连接的晶体管, 其中 N_1 和 P_2 区既是一个晶

体管的集电极同时又是另一个管子的基极，如图 1-4 所示。晶闸管的工作原理可依此解释。

当给晶闸管加正向阳极电压和足够的门极电压时，则有电流 I_G 从门极流入 NPN 管的基极，即 I_{B2} ，经 NPN 管放大后的集电极电流 I_{C2} 流入 PNP 管的基极，再经 PNP 管的放大，其集电极电流 I_{C1} 又流入 NPN 管的基极，如此循环，产生强烈的正反馈过程，即

$$I_G \rightarrow I_{B2} \uparrow \rightarrow I_{C2} (I_{B1}) \uparrow \rightarrow I_{B2} (I_{C1}) \uparrow$$

瞬时使两个晶体管很快饱和导通，晶闸管由阻断状态迅速地变为导通状态。流过晶闸管的电流取决于外加电源电压和主回路的阻抗的大小。

晶闸管一旦导通后，即使 $I_G=0$ ，但因 I_{C1} 的电流在内部直接流入 NPN 管的基极，晶闸管仍将保持导通状态。若要晶闸管关断，只有将阳极电压降低到零或对晶闸管加上反向阳极电压，使 I_{C1} 的电流减少至 NPN 管接近截止状态，即流过晶闸管的阳极电流小于维持电流，晶闸管才可恢复阻断状态。

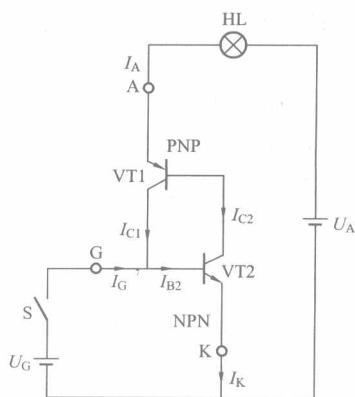


图 1-4 晶闸管的工作原理示意图

四、晶闸管的简单测试方法及使用常识

1. 晶闸管的测试简法

(1) 万用表测试法。在图 1-1 (a) 中可见晶闸管内部有三个 PN 结，根据 PN 结的单向导电原理，可按图 1-5 步骤，用万用表欧姆档测试晶闸管三个电极之间的电阻，就可以初步判断管子的好坏。好的管子，用万用表的 $R \times 1k$ 档测量阳极 A 与阴极 K 之间的正反向电阻都很大（接近无穷大）。用 $R \times 10$ 或 $R \times 100$ 档测量控制极 G 与阴极 K 之间的阻值，其正向电阻应略小于反向电阻，正向电阻一般为几到几百欧。

对于电极不明的管子，先用万用表 $R \times 10$ 档分别测量晶闸管的任意两个电极之间的正、反向电阻；找出有 PN 结正反电阻值差别的两个电极来，由于万用表的黑表笔接的是表内电池的正极，红表笔接的是负极，所以可以判定测量正向电阻时，和黑表笔相接的电极是控制极 G，和红表笔相接的是阴极 K。这样，最后剩下的那个电极就必然是阳极 A 了。

(2) 电珠测试法。图 1-6 所示电珠测试晶闸管的基本电路，图中电源 E 由 4 个 1.5V 干电池串联而成；指示灯 HL 选用 6.3V 电珠；V 是被测试的晶闸管。

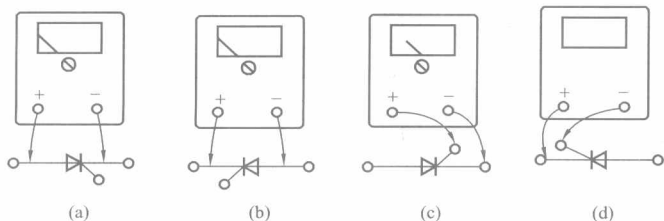


图 1-5 用万用表测试普通晶闸管的步骤

(a) R 值很大；(b) R 值很小；(c) R 反向；(d) R 正向

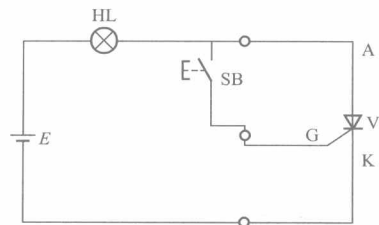


图 1-6 电珠测试晶闸管的基本电路