

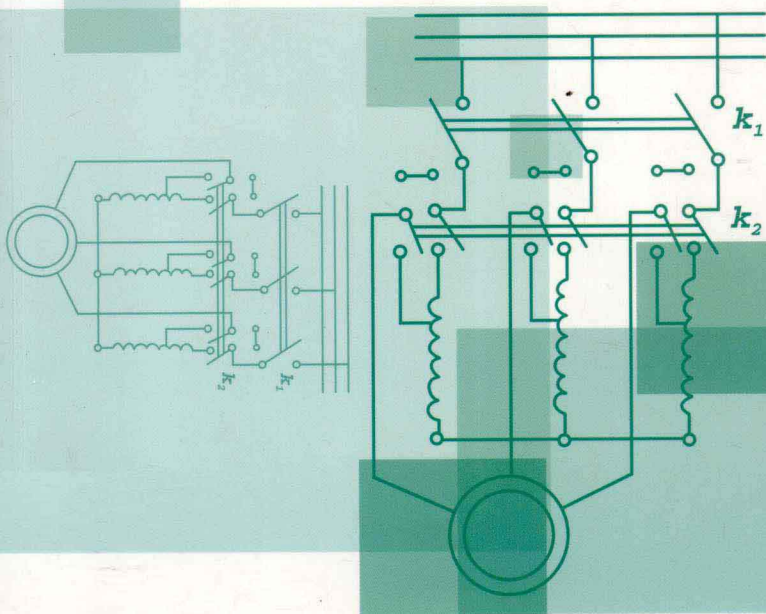
高职高专电气系列教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI XILIE JIAOCAI

# 电力电子技术

Dianli DianZi JiShu

■ 主 编 刘卫民 施金良  
■ 副主编 徐纯新 薛太林 段有艳



重庆大学出版社

# 电力电子技术

主 编 刘卫民 施金良  
副主编 徐纯新 薛太林 段有艳

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书是高职高专电气系列教材之一。

全书共分九章,主要包括:电力电子器件原理、晶闸管整流电路、晶闸管触发电路、主电路的保护、有源逆变电路等基本内容;并通过实例对晶闸管调功器、直流调速系统、交流调速系统、PWM、UPS 电路等电力电子技术应用系统进行分析和介绍。各章均附有小结、思考题与习题。

本书可作为高职高专电气、电子、电力、自动化和其他相近专业的《电力电子技术》课程教材,也可作为高校、电大、职大相同专业学生教材,亦可供从事电力电子技术工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/刘卫民,施金良主编. —重庆:重庆大学出版社,2004.6

(高职高专电气系列教材)

ISBN 7-5624-3178-7

I. 电... II. ①刘...②施. III. 电力电子学—高等学校:技术学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 049820 号

## 电力电子技术

主 编 刘卫民 施金良

副主编 徐纯新 薛太林 段有艳

责任编辑:彭 宁 姚正坤 版式设计:彭 宁

责任校对:蓝安梅 责任印制:张立全

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内

邮编:400030

电话:(023)65102378 65105781

传真:(023)65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆华林天美彩色报刊印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:12.75 字数:318 千

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-3178-7/TN·90

定价:18.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

## 前 言

为了适应培养应用型高级工程技术人才的要求,大力发展高等职业教育,2003年8月,重庆大学出版社组织有关院校召开了高职高专系列教材编审会。与会代表通过对当前高职高专教育的现状及发展的研究和讨论,对高职高专的教材编写原则形成了基本的共识,并在此基础上确定了相应的教材编写计划和编写大纲。

本书也正是基于这样的背景和原则而编写的,它遵循了高职高专教育的特点,适当降低理论深度,尽量避免繁琐的数学推导,力求深入浅出,循序渐进;重点放在基本概念的阐述、典型电路原理的分析及应用实例的介绍上;以应用为目的,通过理论与实践的结合,突出高职高专学校的教育特色;注重对学生自学能力的培养,以利于学生毕业后对知识的扩充;通过应用实例的分析,着重于对学生分析问题、解决问题的能力培养;力求保证书中列举的器件和介绍的应用实例,能反映电力电子技术的发展趋势并对目前的应用水平具有一定的代表意义。

本书包括有电力电子器件原理、晶闸管整流电路、晶闸管触发电路、主电路的保护、有源逆变电路等基本内容;并通过实例对晶闸管调功器、直流调速系统、交流调速系统、PWM、UPS电路等电力电子技术应用系统进行分析 and 介绍。

本书针对高职高专学生编写,在编写中注重了学习方法的介绍,并采用电路叠加原理对电力电子技术最基本的内容——晶闸管整流电路进行分析,使学生自学及复习较为直观和方便;尤其是本书应用部分均由具有丰富工作经验的高级工程师编写,有较强的实践指导性。本书不仅是作为高职高专学生的学习用书,也适合于本、专科学生、教师和现场工程技术人员教学和参考,同时也很适合于自学者使用。

参加本书编写工作的有:段有艳(第2章)、李之昂(第3章)、刘卫民(第1章、第4章)、徐纯新(第5章)、薛太林(第6章)、刘克勤(第7章)、何少佳(第8章)、施金良(第9章)。

全书由刘卫民、施金良任主编,徐纯新、薛太林、段有艳任副主编。

在本书编写过程中,也参考相关专业的著作和文献,在此谨对这些著作及文献的作者致以衷心的感谢。

由于编者的水平所限,加之编写时间仓促,错误和疏漏之处在所难免。在此,本书全体编者恳请使用本书的师生和读者批评指正。

编 者

2003年12月

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....            | 1  |
| 1.1 电力电子器件及其发展 .....      | 1  |
| 1.2 电力电子技术及其应用 .....      | 4  |
| 1.3 本课程的任务、要求及学习方法 .....  | 6  |
| 第 2 章 晶闸管 .....           | 9  |
| 2.1 晶闸管及其工作原理 .....       | 9  |
| 2.2 晶闸管的伏安特性 .....        | 11 |
| 2.3 晶闸管的主要参数 .....        | 14 |
| 本章小结 .....                | 19 |
| 习题与思考题 .....              | 20 |
| 第 3 章 单相可控整流电路 .....      | 22 |
| 3.1 单相半波可控整流电路 .....      | 23 |
| 3.2 单相全控桥式整流电路 .....      | 34 |
| 3.3 单相半控桥式整流电路 .....      | 45 |
| 本章小结 .....                | 50 |
| 习题与思考题 .....              | 52 |
| 第 4 章 三相可控整流电路 .....      | 54 |
| 4.1 三相半波可控整流电路 .....      | 54 |
| 4.2 三相全控桥式整流电路 .....      | 63 |
| 4.3 整流变压器漏抗对整流电路的影响 ..... | 69 |
| 4.4 可控整流供电的电动机系统 .....    | 72 |
| 4.5 大功率可控整流电路 .....       | 78 |
| 本章小结 .....                | 84 |
| 习题与思考题 .....              | 86 |
| 第 5 章 有源逆变电路 .....        | 88 |
| 5.1 逆变的概念 .....           | 88 |
| 5.2 三相半波有源逆变电路 .....      | 93 |
| 5.3 三相桥式有源逆变电路 .....      | 95 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 5.4   | 逆变失败和逆变角 $\beta$ 的限制 ..... | 99  |
| 5.5   | 逆变状态下电动机机械特性 .....         | 102 |
| 5.6   | 晶闸管可逆电路 .....              | 105 |
|       | 本章小结 .....                 | 116 |
|       | 习题与思考题 .....               | 116 |
| 第 6 章 | 晶闸管触发电路 .....              | 118 |
| 6.1   | 晶闸管对触发电路的基本要求 .....        | 118 |
| 6.2   | 单结晶体管触发电路 .....            | 120 |
| 6.3   | 同步信号为锯齿波的触发电路 .....        | 124 |
| 6.4   | 模拟集成触发电路 .....             | 132 |
| 6.5   | 数字集成触发电路 .....             | 137 |
| 6.6   | 集成触发电路应用实例 .....           | 143 |
|       | 本章小结 .....                 | 147 |
|       | 习题与思考题 .....               | 147 |
| 第 7 章 | 主电路元件选择与保护 .....           | 148 |
| 7.1   | 整流变压器额定参数计算 .....          | 148 |
| 7.2   | 晶闸管元件选择 .....              | 150 |
| 7.3   | 晶闸管的串并联 .....              | 151 |
| 7.4   | 晶闸管电路的保护 .....             | 153 |
|       | 本章小结 .....                 | 159 |
|       | 习题与思考题 .....               | 159 |
| 第 8 章 | 现代电力电子器件 .....             | 160 |
| 8.1   | 现代电力电子器件概述 .....           | 160 |
| 8.2   | 不可控器件——功率二极管 .....         | 161 |
| 8.3   | 半控型器件 .....                | 162 |
| 8.4   | 全控型器件 .....                | 164 |
| 8.5   | 功率模块与功率集成电路 .....          | 173 |
|       | 本章小结 .....                 | 173 |
|       | 习题与思考题 .....               | 174 |
| 第 9 章 | 电力电子应用实例 .....             | 175 |
| 9.1   | 晶闸管调功器 .....               | 175 |
| 9.2   | 直流调速系统 .....               | 189 |
| 9.3   | 交流变频调速系统 .....             | 191 |
| 9.4   | 不间断电源 .....                | 195 |
|       | 本章小结 .....                 | 196 |
|       | 习题与思考题 .....               | 196 |
|       | 参考文献 .....                 | 197 |

# 第 1 章

## 绪 论

随着科学技术的发展,能够进行精密控制的各种电能利用装置,已在日常生活及工业生产中得到越来越广泛的应用,而作为电力变换控制的理论基础——电力电子学在技术领域的重要作用也日益凸现出来。

电力电子学涉及电工学的电能和电子两个领域的知识,同时它又与控制系统相辅相成,因而也离不开控制理论的支撑,所以说电力电子学是跨学科的新技术领域。

电力电子技术,就是利用电力电子器件进行电能变换的一门技术。一般意义上的电力电子技术是指使用可控的大功率半导体开关器件在负载和电源之间实现可以控制的电能变换。其主要技术涉及“电力”、“电子”和“控制”三个领域。

电力电子技术与传统的电动机—发电机变流机组或离子变流器相比,具有体积小、质量轻、反应快、噪声低、能量损耗小、容易驱动、易于同微处理器结合实现高级自动控制(如模糊控制、自适应控制、最优控制和智能控制等)和可靠性高等优点。传统的电力电子技术主要应用于电化学、电冶炼、直流牵引、直流传动、交流传动、中频感应加热、高压静电除尘、直流输电和无功补偿等领域。目前,随着电力电子器件自身技术的不断发展和性能的日益提高,加之与最新控制技术的有效结合,其运用范围正在人们的生产、生活的各个领域迅速扩展。

### 1.1 电力电子器件及其发展

#### 1.1.1 电力电子器件发展概况

1948年,普通晶体管的发明引起了一场电子工业革命。最初的晶体管技术仅应用于小功率领域,如通讯、信息处理等。1956年,晶闸管的雏形在实验室诞生,1958年,第一只工业用普通晶闸管研制成功。从此,电子技术的应用开始迈入强电领域并得到了迅猛的发展,电能的变换和控制也从旋转变流机组、离子变流器时代进入电力电子变流时代。

晶闸管以其体积小、质量轻、功耗低、效率高、无噪声、响应快、易于驱动及组成变流系统后可靠性高、寿命长、易控制等优点,使它获得了强大的生命力,并在电能变换领域得到了迅猛的发展。尤其在超大功率电能变换领域中占有举足轻重的位置。



尽管晶闸管相对于老式整流装置有着很多优点,而且它的产生和发展,使电能变换技术的理论和应用水平都有了一个质的飞跃。但随着电能变换技术的不断发展和应用的日益广泛,晶闸管的应用在某些场合上受到一定限制。因此,新的电力电子器件也就应运而生,这些新器件填补了晶闸管的某些不足,使电力电子技术的应用更为方便、更为广泛。

### 1.1.2 电力电子器件的主要类型

#### (1) 半控型器件

1958年,世界上第一只真正可应用于工业生产的普通晶闸管由美国通用电气公司研制成功。由于它相对于老式整流装置而言,具有一系列不可比拟的优点。因此在电能变换领域迅速得到应用和推广,其技术也在应用中得到不断的改进和发展。由于控制信号只能控制普通晶闸管的导通,而不能控制其关断,因此被称为半控型器件。

近年来,虽然全控型器件的技术、性能得到了不断的发展和提高,并且在电能变换领域的应用范围也在逐步扩大。但晶闸管在电能变换领域,尤其是大功率电能变换领域中的应用,仍是其他类型电力电子器件无法替代的。因此,本书以晶闸管及其组成的各种电能变换电路作为重点,通过对晶闸管器件及其组成的各种电能变换电路的基本工作原理和分析方法的阐述,最终引导读者进入电力电子技术应用领域。

#### (2) 全控型器件

由于在某些应用领域,如交流变频调速、计算机不间断电源,尤其是在小型生产设备和家电产品的应用中,晶闸管的应用受到一定限制。因此,迫切需要一种不仅导通可控,而且关断也可控的器件,即全控型器件。根据这一需求,电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)和电力场效应管(MOSFET)等新的电力电子器件相继研制成功。这些新器件在交流变频调速、计算机不间断电源、家电产品等一些高性能电能变换场合取得了良好的应用效果。

但是上述电力电子器件仍存在着一些不足,如驱动功率大、导通压降大、关断困难和功耗大等。针对这些不足,更新的电力电子器件应运而生。如IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)是在GTR和MOSFET基础上,经过扬长避短、复合而成的新器件。它兼有了MOSFET输入阻抗高、驱动功率小和GTR导通压降低的双重优点。MCT(MOS Controlled Thyristor)则是MOSFET驱动晶闸管的复合型器件,它集场效应管和晶闸管的优点于一身,具有驱动电流小、器件电流大的特点。这一类新器件被称为复合型电力电子器件。复合型电力电子器件的问世,填补了传统电力电子器件的某些不足,使电力电子器件的性能得到较大的提高。由于这些复合型器件具有电流密度大、工作频率高、控制功率小、易于驱动和可以采用低成本集成驱动电路控制等优点。在某些范围内,有取代SCR, GTR, GTO和MOSFET的趋势。

随着电力电子技术的发展和应用领域的拓展,类似于电子技术中集成电路的模块化电力电子器件也进入了应用领域。这类模块化电力电子器件按照典型接线方式,将几只元件封装在一个模块内。如双管、单相桥和三相桥模块等。模块化使器件的体积缩小,安装接线简化,成本降低,且可靠性大大提高。

在模块化和复合化思路的基础上研制的功率集成电路PIC(Power Integrated Circuit),把主电路的器件和驱动电路、过压过流保护、电流检测、甚至温度保护等电路都集成到一起,形成一个整体。被称为“Smart”功率装置。它的应用不仅简化了设计,而且实现了设备的小型化,进一步提高了设备装置的可靠性。



### (3) 电力电子装置技术特征及目前技术水平

电力电子器件是静止型大功率电子元件,这种电力电子器件组成的电能变换系统(装置)与旋转式的机组电能变换系统相比,具有体积小、速度快、无噪音、无磨损等优点。因此,可靠性高,易于维护。又由于其是通过弱电控制强电输出,利用当今高度发展的电子技术和电气自动控制系统,能最大限度地满足现代生产工艺对自动控制系统的要求。

通过以下电力电子变流系统与机组变流系统的几种主要技术指标的比较,可对电力电子变流系统的优缺点有一个基本的认识:

1) 功率放大倍数。电力电子器件的放大倍数在  $10^4$  以上,比机组放大倍数 ( $10^1$ ) 高三个数量级。

2) 快速响应性。机组的响应速度是秒级,而电力电子器件的响应速度为毫秒级,比机组快三个数量级。

3) 功耗和效率。电力电子变流系统的空载损耗约 0.5%,满载损耗约 1%,效率较高;而机组变流系统的损耗通常为其几倍。

4) 安全性和可靠性。电力电子器件为静止式电子型器件,体积小,质量轻,可靠性高;和旋转型机组相比,由于取消了电刷、整流子,维护方便,无噪音。并且因其是无触点电子器件,不会产生电弧,适用于需防火、防爆的生产环境。

5) 经济技术指标。随着电子技术、电力电子技术及自动控制系统技术的不断发展,成套电力电子系统设备的成本不断降低。尽管电力电子系统设备的成本随着系统功率大小不同、电气性能要求不同而有很大差别。但总的看来,相同技术指标的电力电子系统的成本已低于机组系统。

6) 社会效益。电力电子器件主要为半导体材料构成,资源比较丰富,而机组系统需消耗大量的有色金属。

7) 目前存在的主要缺点。电力电子器件的主要缺点是过载能力小。因此,电力电子系统暂不适用容易发生堵转现象的生产设备,且在超大功率负载情况下,其可靠性还有待进一步提高。电力电子变流系统的另一个缺点是在生产设备要求降低输出功率时,系统将产生较大无功功率,致使系统的功率因素降低,并产生高次谐波,引起电网波形畸变。所以,电力电子变流系统必须采取相应的补偿措施,尽量克服这一缺点。

#### 1.1.3 电力电子器件的发展方向

电力电子器件将主要从以下几个方面发展:

1) 器件参数向高电压、大电流、大容量方向发展,以满足大功率电能变换的需求。随着电力电子器件性能的提高,尤其是额定电压、电流的提高,已基本不再需要采用电力电子器件串联或并联的方式来提高单套设备的输出电压、电流,从而大大降低了系统的成套成本,提高了系统的可靠性。

2) 不断提高全控型器件的技术性能并降低生产成本,以期在更多的应用范围代替半控型器件。虽然全控型器件构成的电能变换系统的技术性能优于半控型器件所构成的电能变换系统的性能,但目前全控型器件的生产成本高于半控型器件的生产成本,且其技术指标也远低于普通晶闸管,使其应用范围受到很大限制。因此,提高全控型器件的性价比,将会极大的推动电力电子技术的发展和应用。

3) 向高频快速方向发展,以满足某些高频生产设备的要求。由于某些生产设备需要电能变换系统提供高频甚至超高频电能,这就要求电力电子器件向这方面发展。

4) 向着易驱动、小型化、高速化、集成化、智能化、功能化和高可靠性的方向发展。

## 1.2 电力电子技术及其应用

电力电子技术就是利用电力电子器件组成相应的电路,并与控制技术相结合实现电能变换的一门技术。按其电能变换功能划分,主要有以下几种类型:

整流器——把交流电变为固定或可调的直流电。

逆变器——把直流电变为频率和幅值固定或可调的交流电。

斩波器——把固定的直流电压变为可调的直流电压。

交流调压器——把幅值固定的交流电压变为幅值可调的交流电压。

周波变换器——把幅值和频率固定的交流电压变为幅值和频率可调的交流电压。

由于晶闸管是静止型的电力电子器件,它自问世之日起,就在上述领域中得到了迅速推广,很快便淘汰了旋转变流机组和离子整流器,并将其应用迅速扩大到电力技术领域。目前,它在整流器、有源逆变器、交流调压和周波变换器中仍占有主导地位。

近年来,由于全控型器件技术的不断发展和性能的不断提高,其应用范围也在迅速扩展。它不仅在交流变频调速、不间断电源和一些对电能变换性能要求较高的场合得到广泛地采用,而且在许多领域不断替代晶闸管的应用。

随着电力电子器件及整机技术的不断发展,单只器件容量的不断提高,系统质量日趋改善,其应用范围愈来愈广,用量也愈来愈大。目前,电力电子技术已经在我国国民经济各部门,如冶金、机械、煤炭、石化、化工、轻纺、交通、水电、国防、农业、医疗卫生及日常生活等方面广泛应用。

电力电子技术的主要应用有以下几个方面:

### (1) 直流传动系统

由于直流电动机具有良好的起制动和调速性能,在对传动性能要求较高的生产设备中应用较为广泛。在直流电动机的几种调速方式中,采用调压方式对电动机进行调速时,其调速性能最佳;而使用电力电子变流系统对电动机供电,很容易满足电动机对供电系统的调压调速要求。随着使用微处理器对直流传动调速系统进行控制、计算、触发、保护和自诊断的全数字直流调速技术的发展,直流传动调速系统的控制灵活性、控制精度、可靠性和智能化程度等技术指标大大提高,其将逐步取代模拟控制直流调速系统。

电力电子直流传动调速系统所具有的优良特性,使其在冶金领域中的轧机和副传动、有色金属加工、机械加工和造纸、纺织等领域中获得了广泛的应用。

在轧机系统中,对电力拖动装置的动态特性和静态指标的要求都比较高,例如要求转速稳定、动态速降小、恢复时间短、起动惯量小等。20世纪80年代初,国内以攀钢为实验基地,对轧机系统大容量晶闸管直流传动装置进行了应用性研究。通过多年的努力,大容量晶闸管直流装置对轧机系统供电的技术研究取得了突破,并得以推广应用。而电力电子装置对轧机励磁系统进行调速控制的技术,则早已得到广泛应用。

## (2) 交流传动系统

由于交流电动机具有结构简单、价格便宜、易于维护和适合恶劣工作环境等优点,因此,在传动系统中,以交流电动机拖动系统较多。在许多情况下,要求对交流电动机拖动系统进行有效的控制,以满足生产工艺要求,或者节能降耗。在交流电动机的几种调速中,以变频调速性能为最佳。20世纪80年代以前,由于高性能、高效率的静止变频器无法实现,交流变频调速技术难以得到推广和应用。随着电力电子技术、自动控制理论以及计算机控制技术的发展,由电力电子器件组成的交流变频装置(也称变频器)对电动机供电,可获得与直流调速相媲美的调速性能,因此近年来得到了迅速的推广和应用。

以下介绍几种典型的交流传动应用系统:

1) 绕线式异步电动机串级调速。以往绕线式异步电动机的调速,是在电动机的转子回路中串入电阻来改变电动机转速。这种调速方式的转差功率以热的形式消耗在转子回路的电阻上,效率较低,且低速时机械特性很软;而串级调速是在转子回路中加入反电势来改变电动机的转速。其工作原理是经逆变器把转差能量送回电网,逆变器输入电压也就是转子回路中的反电势,通过改变逆变角可改变反电势进行调速。由于串级调速与转子串电阻调速相比,节能性好,机械特性也更好。其在大功率风机、水泵、球磨机、交流轧机及矿井提升机等生产设备中的已得到广泛应用。

2) 交流变频调速。交流变频调速装置可以实现直流电动机不能胜任的大容量、高速拖动。在多电机拖动中,它的精度高,易于协调速度。变频装置的主要功能是采用电力电子装置将一定频率的电能或者是直流电能转变成所需频率和电压的电能,并为负载电动机提供必要的能量通道(实现电动、再生),以实现所需性能的调速。

随着电力电子技术的发展,变频调速装置的性能和可靠程度不断提高,成本不断降低。目前,变频调速系统已在风机、水泵、空调、电梯、地铁、恒压供水、轧机、机床、大型生产设备的软启动以及家电等方面得到广泛应用。

3) 超同步串级调速。超同步串级调速是在绕线式异步电动机转子回路中串入一个三相可变频率的电源,其控制系统可使变频器输出电压的频率、相位和相序与电机转子转差电压一致,幅值可调。调节其幅值可使转子电流与转差电压同相或反相,这样电机就可以在同步速以上或以下按电动或制动方式运行。在反转时也可实现电动或制动。与一般串级调速相比,其调速范围较大,可进行再生制动,调节的快速性好。与调速范围和负载容量相同的电机相比,超同步串级调速系统的装置容量小,效率高,功率因数高,对电网的谐波影响小。超同步串级调速系统主要用于风机、水泵、压缩机、卷扬机、轧机,水泥窑及加速器等需要调速的拖动设备中。

## (3) 中频加热系统

电力电子中频加热系统是一种将三相工频电能变成单相中频电能(通常为400~1200 Hz)的装置。中频加热系统就是一个交流—直流—交流的变流器。它广泛应用于电加热和电工工艺领域。如有色金属、黑色金属、贵金属及合金的熔炼、铸造、焊接、加工及热处理,连铸连轧系统的恒温加热装置等。中频加热装置具有节约电能,提高产品质量和改善生产环境等优点。

## (4) 电解、电冶炼、化工用直流电源

电解、电冶炼和化工领域(如电解铝、电解铜、直流电弧炉、电解食盐等)用直流电源的共同特点是低电压、大电流。一般电压在1000 V以内,电流在几千到几十万安培。供电型式多

为高压交流—整流变压器—整流器,完成相应的交流—直流变换功能。整流器一般采用二极管或晶闸管整流方式。在这一领域,使用晶闸管整流器是晶闸管的最典型应用之一。

例如,电解铜的生产过程中,电解电压控制的稳定性,直接关系到企业的经济效益。只有对电解电压进行最优控制,才能生产出品质高、质量稳定的产品。另外,铜矿通常与多种稀有金属或贵金属共生,在电解铜的生产过程中,如果电解电压控制得当,这些稀有金属或贵金属就能完全与铜分离,成为铜冶炼过程的副产品。由于这些副产品价格较高,可为企业创造可观的经济效益。

### (5) 交流电子开关

交流电子开关就是利用电力电子器件的导通或关断来控制交流电路的通断,以对交流负载进行电压或功率的调节。交流电子开关可用于机场、摄影棚、舞台灯光,甚至家用台灯的调光,电阻性负载加热控制,自动温控系统等。

电力电子器件是无触点开关,快速性好,不会产生机械磨损,可在需频繁通断的电路或频繁正反转的交流电动机电路中替代传统的继电器、接触器。

无触点开关的另一个优点是在开断或闭合电路时不会产生电弧或火花,适用于纺织厂、面粉厂、化工厂、燃料厂及石化企业等易燃易爆的场合。

### (6) 直流输配电

直流输配电具有节约投资,降低传输损耗等优点。为了达到这一目的,通常采用电力电子装置将发电站发出的交流电变换为直流电,传输到目的地后,又通过电力电子装置将直流电变换为交流电。

### (7) 其他应用

电力电子技术除上述应用外,还有许多其他方面的应用。如直流牵引电源、电加工整流电源、高精度稳压电源、蓄电池充电电源、高压静电除尘、矿山机械和电瓶车的脉冲调速等。它的应用已经遍及工农业、交通、通信及社会生活的各个领域。

## 1.3 本课程的任务、要求及学习方法

电力电子技术是电气化、自动化、应用电子技术、电力输配电等专业的一门专业基础课。它主要研究各种电力电子器件的原理及其组成的各类电能变换装置(系统)的基本原理、工作过程、控制要求、分析方法以及经济技术指标。由于电力电子技术的应用涉及社会生产、生活的方方面面,且本课程阐述的内容是《自动控制原理》、《直流调速系统》、《交流调速系统》、《输配电系统》及《家电维修》等后续课程的基础。所以,学好本课程的意义是十分重要的。

按现行教学计划,本课程的教学时约数为48~60学时,各校可根据专业特色和发展方向对课时进行适当调整。

### 1.3.1 本课程的任务和要求

- 1) 了解本课程在本专业中的地位和作用;
- 2) 了解电力电子技术的发展、技术水平及应用概况;
- 3) 掌握各种电力电子器件的工作原理、特性及使用方法;

- 4) 熟练掌握典型晶闸管整流电路的工作原理及波形分析方法和计算方法;
- 5) 熟练掌握有源逆变电路的基本工作原理及波形分析方法和计算方法;
- 6) 掌握无源逆变电路、PWM 逆变电路的基本工作原理、换向过程、控制及波形分析方法;
- 7) 掌握交流调压、交流调功、交流无触点开关的基本原理、波形分析方法和应用;
- 8) 掌握电力电子技术的工程设计方法,能依据实际要求,完成器件电路选型及控制方法的确定,并能对电路的可靠性进行分析;
- 9) 对可控整流、逆变电路等具有一定的科学实验能力;
- 10) 掌握各种电能变换电路的测试手段和调整方法。

### 1.3.2 本课程的学习方法

“电力电子技术”作为专业基础课,以阐述基础理论为主,有关应用部分的内容,仅以应用实例加以介绍。而应用理论及方法,则由后续专业课来解决。

#### (1) 要求掌握的相关基础知识

熟练掌握以下基础课的相关内容,是顺利学好“电力电子技术”的基本保证。

##### 1) 《电路分析基础》:

熟练掌握欧姆定律、基尔霍夫定理在电路分析中的应用;

熟练掌握正弦交流电、三相交流电各参数的意义、各参数之间的关系及波形绘制方法;

掌握电路叠加原理及分析方法以及电压的矢量分析方法。

##### 2) 《模拟电子技术》、《数字电子技术》:

深刻理解半导体材料的特性及 PN 结的工作原理;

熟练分析常用晶体管线路、集成电路及其参数计算。

##### 3) 《电机及拖动》:

对直流电机的工作原理、四象限运行的能量传递有清晰的概念;

对直流电机电枢回路的各参数的含义有清晰的认识。

##### 4) 《微积分》:

理解积分的含义,并能应用积分进行一些简单的运算。

#### (2) 本课程的重点内容

虽然“电力电子技术”涉及晶闸管和其他多种电力电子器件及其构成的各种电能变换电路,但对晶闸管及其构成电路的分析方法,也普遍适用于对其他电力电子线路的分析。而晶闸管整流电路是晶闸管电路的基础,所以掌握晶闸管整流电路的分析方法,是学习晶闸管电路的基本要求,也是本课程学习的重点。

在熟练掌握晶闸管整流电路分析方法后,进一步学习其他电力电子电路,将可收到事半功倍的效果。

#### (3) 学习方法和基本要求

分析晶闸管整流电路的基本步骤是:

- ① 根据整流元件和负载的特性,分析电路中各整流元件导通和关断的物理过程,从而得出电路输出的电压和电流波形;
- ② 通过对波形的分析,能更清楚地了解整流电路的工作过程;
- ③ 在波形分析的基础上得出各参数之间的数量关系。

归纳以上基本步骤可以看出,学好晶闸管整流电路需注重三个方面的内容:整流电路工作原理分析,电流、电压波形分析和数量关系。

1) 整流电路工作原理分析。在对整流电路工作原理的分析过程中,并没有超出“要求掌握的相关基础知识”所列内容的范围。关键是灵活应用晶闸管导通条件,结合电路分析的基本方法,就可很容易地对电路进行分析。本书中采用“电路等效与叠加原理”对晶闸管整流电路进行分析,使初学者在学习过程中能够循序渐进,顺利过渡到分析难度较大的复杂电路。

2) 电流、电压波形分析。电流、电压波形分析是电力电子电路学习过程中的一个重要特征。在整流电路工作原理分析过程中,对电路的输出电流、电压波形的分析,是理解整流电路工作原理的关键。在晶闸管整流电路的理论与应用中,波形分析均是一个重要环节。

虽然波形分析并不是什么新内容,但由于在过去基础课程的学习过程中,并没有专门进行学习和练习。因此,在本课程的学习过程中,应逐步习惯和切实掌握波形分析的方法,并且通过电路调试,用示波器观察波形,分析波形特征,判断它们的正确与错误。只有通过不断分析总结,不断实践,理论联系实际,才能有效地、切实地掌握分析整流电路的方法,加深对电路工作原理的理解。

3) 数量关系。晶闸管整流电路的接线形式很多,数量关系也很复杂,但关键是要理解各参数的物理意义。这里应着重注意下面几个问题:

- ① 整流电路的输出直流平均电压  $U_d$  和交流输入电压有效值  $U_2$  之比与控制角  $\alpha$  的关系。
- ② 交流输入电流有效值  $I_2$  和直流输出电流平均值  $I_d$  之比与控制角  $\alpha$  的关系。
- ③ 流过晶闸管的电流有效值  $I_2$  和直流输出电流平均值  $I_d$  之比与控制角  $\alpha$  的关系。
- ④ 晶闸管、整流管二极管、续流二极管及负载上的电压、电流波形。
- ⑤ 触发信号的移相范围。
- ⑥ 直流负载的性质对整流电路的影响。

通过上述学习要求及方法与各章节的具体内容相结合,反复分析和练习,就一定能够牢固掌握本课程的基本内容 and 应用知识。



# 第 2 章

## 晶 闸 管

晶闸管也称可控硅,是硅晶体闸流管的简称。它包括普通、双向、可关断、逆导、快速和光控等类型。普通晶闸管(全名为普通反向阻断型硅晶闸管),常用 SCR(Siticon Controlled Rectifier)表示,应用较为普遍,本章重点介绍普通晶闸管,并约定如果没有特殊说明,本书中所提到的晶闸管就指普通晶闸管。

本章主要介绍晶闸管的结构、工作原理、导通条件、伏安特性和主要参数,至于晶闸管在可控整流等电路中的应用将在后续章节中详细讲解。

### 2.1 晶 闸 管 及 其 工 作 原 理

#### 2.1.1 晶 闸 管 的 结 构

晶闸管是在晶体管基础上发展起来的一种大功率半导体器件,具有三端( $A, K, G$ )四层(PNPN)的结构特点,其四层半导体的接触面构成三个 PN 节( $J_1, J_2, J_3$ ),如图 2.1(a)所示。图中, $P_1$ 引出端  $A$  称为阳极, $N_2$ 引出端  $K$  称为阴极, $P_2$ 引出端  $G$  称为门极,也称控制极。从外形上看普通晶闸管可分为螺栓形和平板形两种结构,而小功率晶闸管有多种外形,多类似于塑封三极管,如图 2.1(b)所示。因结构的原因,螺栓形晶闸管散热效果差,一般在额定电流 100 A 以下采用,额定电流大于 200 A 时均采用平板形。晶闸管的图形符号如图 2.1(c)所示,文字符号为 VT(部分资料里采用 T, KP, SCR 等表示晶闸管)。

大功率晶闸管工作时会产生较大的热量,必须安装散热器,以免过热损坏。所以晶闸管按冷却方式又可分为自然冷却式、风冷式、水冷式、油冷式等,如图 2.2 所示。

#### 2.1.2 晶 闸 管 的 工 作 原 理

为了弄清晶闸管的工作情况,通过实验来说明晶闸管的导电原理,实验电路如图 2.3 所示。

在图 2.3 所示电路中,阳极电源  $E_A$ (一般选 3 ~ 6 V)和门极电源  $E_G$ (一般选 1.5 ~ 3 V)通过双刀双掷开关  $S_1, S_2$  分别以正向或反向作用于晶闸管的相应电极,分析电路的工作状态,得



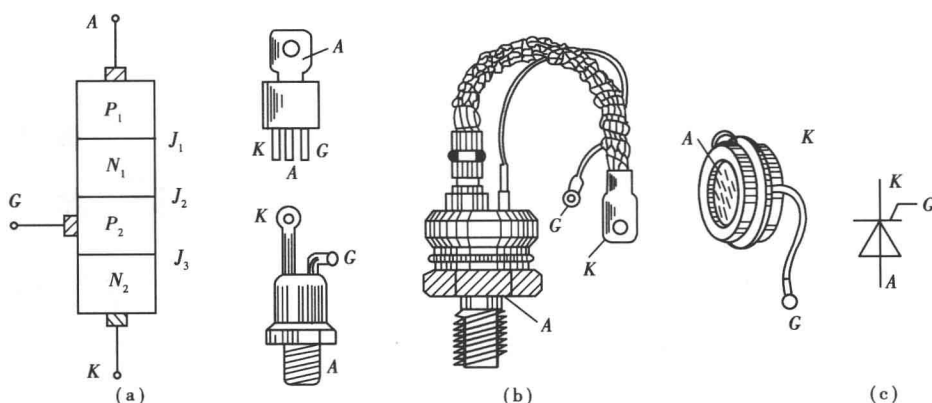


图 2.1 晶闸管的结构、外型及符号

(a)晶闸管的结构 (b)晶闸管的常见外型 (c)晶闸管的符号

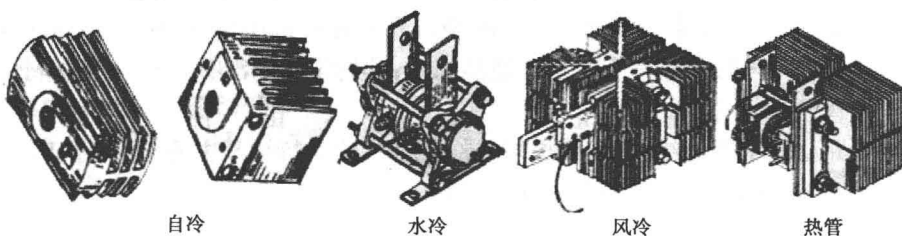


图 2.2 晶闸管的散热器

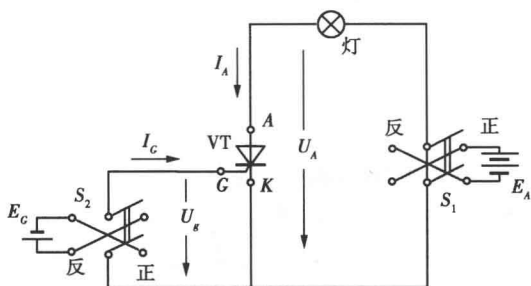


图 2.3 晶闸管工作实验电路

到结果如下：

①晶闸管阳极与阴极间加正向电压  $E_A$ , 控制极电压  $E_G$  不接入, 灯泡不亮, 说明晶闸管不导通(截止状态)。

②在  $E_A$  正向的情况下, 加入控制极正向电压  $E_G$ , 这时灯亮, 说明晶闸管导通, 导通后晶闸管的管压降约为 1 V。

③晶闸管导通后, 去掉控制极电压  $E_G$  (将图中的开关  $S_2$  断开), 灯仍然亮(导

通)。可见晶闸管一旦导通后, 控制极就失去了控制作用。

④在晶闸管的阳极与阴极间加反向电压时, 无论控制极加不加电压, 灯都不亮, 晶闸管处于关断状态(截止状态)。

⑤当控制极加反向电压时, 晶闸管阳极与阴极间无论加正向还是反向电压, 晶闸管都不导通。

通过上述实验可以总结出晶闸管导通必须同时具备的两个条件(充分必要条件):

①晶闸管阳极与阴极间加足够的正向电压;

②控制极加适当的正向电压, 作为晶闸管导通的触发信号(实际应用中, 控制极加触发脉冲信号)。

以上两个条件是分析晶闸管电路的重要依据, 需牢记并熟练应用。

## 2.2 晶闸管的伏安特性

### 2.2.1 晶闸管导通原理

为了进一步说明晶闸管的工作原理,可把晶闸管看成是由 PNP 和 NPN 型两只晶体管连接而成,每一个晶体管的基极与另一个晶体管的集电极相连。其等效过程如图 2.4 所示。

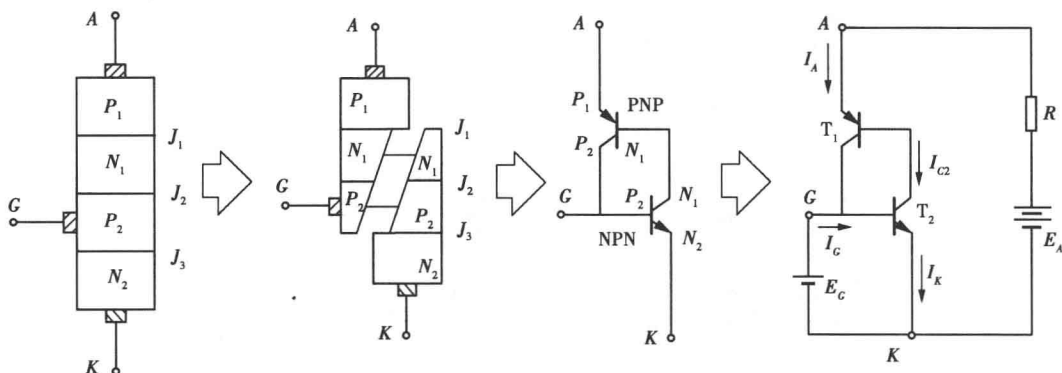


图 2.4 晶闸管的双晶体管模型

从图 2.4 的等效电路中可以看出,阳极 A 相当于 PNP 型晶体管  $T_1$  的发射极,阴极 K 相当于 NPN 型晶体管  $T_2$  的发射极。当晶闸管阳极、控制极均加正向电压时,晶体管  $T_2$  处于正向偏置, $E_G$  产生的门电流  $I_G$  即为  $T_2$  的基极电流  $I_{B2}$ ,  $T_2$  的集电极电流是  $I_{C2}$ ,也就是  $T_1$  管的基极电流  $I_{B1}$ ,  $T_1$  的集电极电流为  $I_{C1}$ 。则晶闸管的工作过程如下:

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

如果上述过程得以持续,晶闸管将会因为强烈的内部正反馈,而使两个晶体管很快达到饱和和导通。这就是晶闸管的导通过程。导通后,晶闸管的压降(电流在晶闸管半导体体电阻  $r$  上产生的压降)很小,电源电压几乎全部加在负载上,晶闸管中流过的电流就是负载电流。

晶闸管导通之后,其导通状态完全依靠管子本身的正反馈作用来维持,所以即使控制极电流信号消失,晶闸管仍然处于导通状态。可见,控制极的作用仅仅是触发晶闸管使其导通,导通之后,控制极的控制作用就消失了。此时若需关断晶闸管,可以采取减小阳极电流使之不能维持正反馈、断开阳极电源或者在晶闸管的阳极与阴极间加反向电压的方法。

上述的分析结果显示,在电路分析过程中,可以把晶闸管等效为一个可控的单向导电开关 S,即常说的“理想化”,如图 2.5 所示。该开关是闭合还是断开,由上节总结的晶闸管导通必须同时具备的两个条件决定。当晶闸管关断时,相当于开关 S 断开,如图 2.5(b) 所示;当晶闸管导通时,相当于开关 S 闭合,由于晶闸管内阻  $r$  较小,在定性分析系统原理时可以省略,如图 2.5(a) 所示。利用这一近似等效,可以将晶闸管整流电路等效为《电路分析》、《电工基础》等课程中介绍过的基本电路,从而利用已学过的基本电路分析方法,帮助初学者分析晶闸管整流电路(利用该等效对晶闸管电路进行分析时,需注意对 S 的限制——可控性及单向导电性)。