



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

工业用电设备

王鲁杨 王禾兴 编 著



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

工业用电设备

编 著 王鲁杨 王禾兴
主 审 罗廷璇



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。

本书介绍了用电量、数量多、应用广泛的几种工业用电设备,包括电动机、泵类、风机、工业电炉、电焊机、制碱和制铝电解槽、电镀槽、照明电器、制冷与空调等。其中主要介绍各种工业用电设备的结构组成、工作原理、特性、用电情况以及节电技术,并针对各种工业用电设备的电源情况介绍了工业电源基础。全书共 7 章,每章后面均有复习思考题。

本书可作为高等院校供用电工程专业工业用电设备课程的教材,也可作为电力类专业技术人员的培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业用电设备/王鲁杨,王禾兴编著. —北京:中国
电力出版社,2006

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 7 - 5083 - 4629 - 7

I. 工... II. ①王... ②王... III. 工业用电—电气
设备—高等学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 093004 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 15.25 印张 373 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.00 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

“工业用电设备”课程是供用电工程专业的专业课,《工业用电设备》教材根据供用电技术专业的培养要求编写,主要介绍用电量大、数量多的电动机、泵类、风机、空气压缩机、工业电炉、电焊机、制铝和制碱电解槽、电镀槽、照明电器等,介绍这些工业用电设备的结构、工作原理、特性、用电情况和节电途径。

近年来,科学技术飞速发展,以电力电子技术为代表的各种新技术大量应用于工业用电设备,使上述各种工业用电设备的情况发生了很大的变化。

1. 电动机

由变频变压技术或调压技术实现的软起动应用于电动机的起动过程,克服了传统的 Y- Δ 换接起动、自耦降压起动等起动方式的各种缺点,是一种全新的起动方式。

变频调速的效率最高,性能最好,成为交流调速系统的主流;绕线转子异步电动机的串级调速替代了转子串接电阻调速;异步电动机的定子调压调速替代了自耦变压器调压、串联分段电抗器降压、串联饱和电抗器降压等调速方法。

2. 工业电炉

电阻炉的温度控制出现了计算机控制系统;交流调压电路广泛用于温度控制的执行器件。出现了新型电阻炉——电热流动粒子炉;直流电弧炉。

3. 电焊机

逆变技术广泛应用于电焊机,逆变电焊机具有更新换代的意义,应用愈来愈广泛。

弧焊电源不仅有机械调节型、电磁控制型,还有电子控制型。电子控制型焊接电源已完全取代了直流弧焊发电机。

激光焊机迅速发展,激光焊接成为当今先进的制造技术之一。

焊接机器人出现——1989年,我国以国产机器人为主的汽车焊接生产线投入生产。目前主要有弧焊机器人和点焊机器人在线使用。

出现了焊接专机——一种刚性或半刚性的自动化焊接设备。

4. 电解电镀

出现了新一代节能、高性能电解电源——IGBT 大功率逆变电解电源;出现了高频脉冲开关电镀电源用于镀金、银、镉、铜、锌等不同材料的电镀工艺。

阀控式密封铅酸蓄电池 VRLA, 又称为“免维护”蓄电池,已被广泛地应用到电力、邮电通信、船舶交通、应急照明等许多领域,逐渐取代了普通铅酸蓄电池。

5. 电气照明

T8 型直管荧光灯替代了 T12 型得到普及应用;电子镇流器于 20 世纪 80 年代引进我国后得到迅速发展,目前大量使用这种环保节能产品;T5、T4 细管径荧光灯、紧凑型荧光灯(电子节能灯)、高压钠灯、金属卤化物灯、高功率节能荧光灯等第三代电光源逐渐发展崛起;20 世纪末发展起来新一代大功率电光源——微波硫灯。

中国自 1996 年开始实施旨在节约能源、保护环境、提高人类照明质量的绿色照明工程。

6. 制冷与空调

变频技术应用于压缩机,出现了变频空调。

热泵技术应用于空调系统,节约了大量电能。

推广应用蓄冷、蓄热技术。在建筑物空调系统中,应用蓄冷技术已成为我国今后进行电力负荷需求侧管理、改善电力供需矛盾最主要的技术措施之一。

鉴于上述情况,在本次《工业用电设备》教材编写过程中,搜集了大量的资料,力图在教材中体现各种工业用电设备的最新状态。

为了更好地了解主要工业用电设备的用电情况、节电原理,以及新技术在工业用电设备中的应用,本教材还设置了一章“工业电源基础”,介绍各种工业电源的工作原理。

在每种工业用电设备中都重点地介绍了节电技术,体现了节约用电工作在建设可持续发展社会中的重要地位。

本书由王鲁杨担任主编,其中第1章、第3章、第5章、第7章由王禾兴编写;第2章、第4章、第6章由王鲁杨编写,并由王鲁杨编制了每一章的复习思考题,王鲁杨负责了全书的统稿工作。

罗廷璇先生任本书的主审。罗廷璇先生在审阅中提出了许多中肯的修改意见,在此谨致衷心的感谢。

在本书的编写过程中得到了上海电力学院有关部门和领导的支持,在此表示感谢。

在本书完稿之际,对书末所列各参考文献的作者也致以衷心的感谢。

由于编者学识有限,编写时间又很仓促,书中一定有很多疏漏和错误,恳请采用本教材的教师和同学批评指正。

作 者

2006年6月4日

于上海电力学院

目 录

前言

第 1 章 工业电源基础	1
1.1 工业电源的种类	1
1.2 工业电源中的电力电子器件	2
1.3 工业直流电源基础	7
1.4 工业交流调压电源基础	20
1.5 工业脉冲电源基础	23
1.6 工业变频电源基础	24
复习思考题	28
第 2 章 电力机械设备	30
2.1 三相异步电动机的构造和转动原理	30
2.2 三相异步电动机的机械特性	33
2.3 三相异步电动机的起动、反转和制动	39
2.4 三相异步电动机的调速	45
2.5 电动机的节电技术	51
2.6 泵与风机	60
2.7 泵与风机的节电方法	70
复习思考题	73
第 3 章 工业电炉	75
3.1 工业电炉及其应用	75
3.2 电阻炉	76
3.3 电弧炉	87
3.4 感应炉	98
复习思考题	107
第 4 章 电焊机	110
4.1 电弧焊机	111
4.2 电阻焊机	126
4.3 其他电焊机	132
4.4 焊接机器人及焊接专机	136
4.5 电焊机的节电技术	140
复习思考题	142

第 5 章 直流用电设备及直流电源	144
5.1 电解	144
5.2 电镀	157
5.3 蓄电池	163
复习思考题	169
第 6 章 电气照明	171
6.1 照明的基本概念和常用术语	171
6.2 照明电光源	175
6.3 照明器	191
6.4 照明供电	195
6.5 绿色照明	198
复习思考题	202
第 7 章 制冷与空调	204
7.1 蒸气压缩式制冷循环	205
7.2 制冷剂载冷剂及氟利昂的替代	209
7.3 蒸气压缩式制冷装置四大基本部件	210
7.4 空气调节系统	215
7.5 变频空调	221
7.6 空调的节电技术与管理	223
复习思考题	231
附录 节约用电管理办法	233
参考文献	237

第1章 工业电源基础

工业电源,或称特种电源,是位于市电(单相或三相)或电池与负载之间,向负载提供优质电能的供电设备,是工业的基础。其输入多为交流市电,输出有直流、交流或脉冲形式。

当代许多高新技术均与市电的电压、电流、频率、相位和波形等基本参数的变换和控制相关,电源技术能够实现对这些参数的精确控制和高效率的处理,特别是能够实现大功率电能的频率变换,从而为多项高新技术的发展提供有力的支持。

电源技术应用电力电子器件,综合电力变换技术、现代电子技术、自动控制技术,是一门多学科的边缘交叉技术。随着科学技术的发展,电源技术又与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关。目前电源技术已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科。它为现代通信、电子仪器、计算机、工业自动化、电力工程、国防及某些高新技术提供高质量、高效率、高可靠性的电源。

电源技术的精髓是电力电子技术,即利用电力电子技术,将市电或电池等一次电源变换成适用于各种用电对象的二次电源。

1.1 工业电源的种类

科学技术的发展,对电源技术的要求越来越高,规格品种越来越多。工业电源(或称特种电源)应用的对象具有多样性、新颖性和复杂性,要求特种电源设备不仅要保证内在性能的完美,而且要赋予其各式各样特定的外特性以及和外部的接口方式。工业电源的种类如下。

1. 交流变频调速器

交流变频调速器属于变频电源,该变频电源驱动交流异步电动机实现无级调速,已在电气传动中占据越来越重要的地位,并且已获得巨大的节能效果。应用于产业自动化,风机、水泵流量控制,细纱机、捻纱机程序控制,恒压供水和多泵并联,造纸机械同步控制,等等。最大功率达500kW。将交流变频调速技术应用于空调器中,具有舒适、节能等优点。

2. 电解、电镀电源

电解、电镀电源要求稳流、稳压。电解生产需要消耗巨大的直流电能,由大功率整流设备供给,采用晶闸管整流,有载调压加饱和电抗器稳流方式,最大输出容量:3~350V,5~150kA。大功率逆电解、电镀电源采用IGBT(绝缘栅双极晶体管)及高频谐振逆变控制技术,小型化,轻量化,节能,性能优异,对电网的干扰和谐波污染小,是新一代电解、电镀电源。脉冲电源用于电镀,可使镀层色泽均匀一致,亮度好,耐蚀性强;用于贵金属提纯时,贵金属的纯度更高。脉冲电源优于传统的电镀电源,是电镀电源的发展方向。

3. 高频逆变式整流焊机电源

高频逆变式整流焊机电源是一种高性能、高效率、省材料的新型焊机电源,代表了当今

焊机电源的发展方向。由于焊机电源的工作条件恶劣,频繁地处于短路、燃弧、开路交替变化之中,因此高频逆变式整流焊机电源的工作可靠性成为关键问题。额定焊接电流可达500A。多用等离子体切割焊机切割电流达20~90A,焊接电流为5~320A。

4. 中频感应加热电源

中频感应加热电源可广泛应用于各行业的金属熔炼、表面淬火处理以及透热弯管等领域。频率为500Hz~80kHz,功率为100~3000kW。

5. 电力操作电源

电力操作电源是为发电厂、水电站及500kV、220kV、110kV、35kV等各类变电站提供直流的电源设备,包括供给断路器分合闸及二次回路的仪器仪表、继电保护、控制、应急灯光照明等各类低压电器设备用电。最大输出电压315V,最大输出电流120A。

6. 正弦波逆变电源

正弦波逆变电源要求精度稳压、稳频,并要求高波形品质。400Hz中频正弦波逆变电源三相容量30~90kV·A,稳压精度2%,稳频精度0.1%,波形失真小于3%,能适应各种负载。同时发展了邮电通讯专用逆变电源,电力系统、发电厂及直流电池屏专用逆变电源,车车载逆变电源,太阳能及风力发电系统专用逆变电源等。

7. 大功率高频高压直流电源

大功率高频高压直流电源得到广泛的应用,如工业上用于环保的静电除尘、污水处理、激光器等。医学方面用于X光机、CT机等大型设备。科研上用于高能物理、等离子体物理。军事上用于雷达发射器。最高电压可达800kV。

8. 电子镇流器

电子镇流器用于为气体放电灯提供高频交流电。

电子镇流器的核心是一个高频电压发生器。当气体放电灯工作在几千赫~几十千赫的较高频率下,将灯和高频电路匹配,能够较大幅度地提高光效而达到节能目的。功率因数可提高到接近1的水平。

上述各种电源,可以归纳为四类:工业用直流电源、工业用脉冲电源、工业用变频电源、工业用交流调压电源。本章讨论这四类电源对电压、电流的控制和变换过程,包括主电路的拓扑结构、主电路的工作原理、各电量的工作波形、各电量的数量关系等。在讨论各类电源的主电路之前,先介绍各类电源中所用的电力电子器件及功率模块和功率集成电路。

1.2 工业电源中的电力电子器件

工业用电源,是利用以计算机为代表的控制技术,通过对电力电子器件的通断进行控制,对电能进行处理和变换,从而得到工业用电设备所需的不同频率、不同大小的交流电或直流电。

电力电子器件是电力变换的基础。按照器件能够被控制电路信号所控制的程度,电力电子器件分为三类:不可控器件、半控型器件和全控型器件。

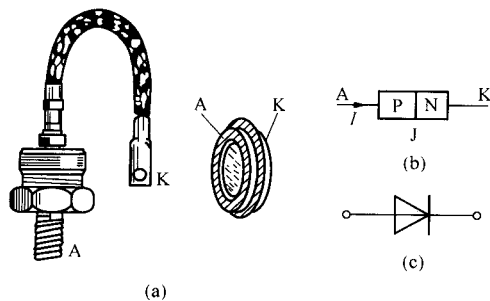
1.2.1 不可控器件

不可控器件即电力二极管(Power Diode)。

电力二极管自 20 世纪 50 年代初期就获得应用。电力二极管的基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管一样,是以半导体 PN 结为基础的。电力二极管由一个面积较大的 PN 结和两端引线以及封装组成,从外形上看,主要有螺栓型和平板型两种封装。电力二极管的外形、结构和电气图形符号如图 1.2.1 所示。

电力二极管具有单向导通特性。

当 PN 结外加正向电压(正向偏置),即外加电压的正端接 P 区、负端接 N 区时,形成自 P 区流入而从 N 区流出的电流,称之为正向电流 I_F ,这是 PN 结的正向导通状态,PN 结在正向导通时的压降维持在 1V 左右;当 PN 结外加反向电压时(反向偏置),形成自 N 区流入而从 P 区流出的电流,称之为反向电流 I_R ,反向电流一般仅为微安数量级,



因此反向偏置的 PN 结表现为高阻态,几乎没有电流流过,被称为反向截止状态。

故电力二极管是一种不可控型的电力电子器件。

电力二极管具有一定的反向耐压能力,但当施加的反向电压过大时,反向电流将会急剧增大,破坏 PN 结反向偏置为截止的工作状态,这就叫反向击穿。反向击穿按照机理不同有雪崩击穿和齐纳击穿两种形式。反向击穿发生时,只要外电路中采取了措施,将反向电流限制在一定范围内,则当反向电压降低后 PN 结仍可恢复原来的状态。但如果反向电流未被限制住,使得反向电流和反向电压的乘积超过了 PN 结容许的耗散功率,就会因热量散发不出去而导致 PN 结温度上升,直至过热而烧毁,这就是热击穿。

电力二极管在许多电力电子电路中都有着广泛的应用。它可以在交流-直流变换电路中作为整流元件,也可以在电感元件的电能需要适当释放的电路中作为续流元件,还可以在交流变流电路中作为电压隔离、箝位或保护元件。在应用时,应根据不同场合的不同要求,选择不同类型的电力二极管。常用的电力二极管有普通二极管(General Purpose Diode)又称整流二极管(Rectifier Diode)、肖特基二极管(Schottky Barrier Diode——SBD)、快恢复二极管(Fast Recovery Diode——FRD)。对此有兴趣的读者可以参考有关专门论述半导体物理和器件的文献。

1.2.2 半控型器件

半控型器件是指晶闸管(Thyristor)及其大部分派生器件。

晶闸管是在 1956 年由美国贝尔实验室(Bell Laboratories)发明的,到 1957 年美国通用电气公司(General Electric Company)开发出了世界上第一只晶闸管产品,并于 1958 年使其商业化,从此开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代。自 20 世纪 80 年代以来,晶闸管的地位开始被各种性能更好的全控型器件所取代,但是由于其能承受的电压和电流容量仍然是目前电力电子器件中最高的,而且工作可靠,因此在大容量的应用场合仍然具有比较重要的地位。

晶闸管的外形、结构和电气图形符号如图 1.2.2 所示。从外形上来看,晶闸管也主要有螺栓型和平板型两种封装结构,均引出阳极 A、阴极 K 和门极(控制端) G 三个连接端。

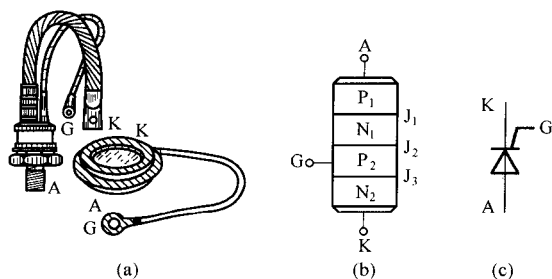


图 1.2.2 晶闸管的外形、结构和电气图形符号

(a) 外形; (b) 结构; (c) 电气图形符号

对于螺栓型封装,通常螺栓是其阳极,做成螺栓状是为了能与散热器紧密联接且安装方便。另一侧较粗的端子为阴极,细的为门极。平板型封装的晶闸管可由两个散热器将其夹在中间,其两个平面分别是阳极和阴极,引出的细长端子为门极。

晶闸管内部有四层半导体,分别称为 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 四个区,形成 J_1 、 J_2 、 J_3 三个 PN 结。和二极管一样,晶闸管具有单向导通特性,即当晶闸管加反向电压(即外加电压

的负端接阳极 A、正端接阴极 K) 时,器件处于阻断状态(反向阻断),仅有极小的反向漏电流通过,因为 J_1 和 J_3 反偏。此外晶闸管还具有受控导通特性,当正向电压(即外加电压的正端接阳极 A、负端接阴极 K)加到器件上时,如果不给门极加适当的控制信号,器件 A、K 两端之间依然处于阻断状态(正向阻断),只能流过很小的漏电流,因为 J_2 处于反向偏置状态。

晶闸管导通的条件:阳极加正向电压,门极加正向电压,即 $U_A > 0$, $U_G > 0$ 。

图 1.2.3 是测试晶闸管导通条件的实验电路。其中阳极和阴极构成主电路,门极和阴极构成控制电路。阳极电压 U_A , 阳极电流 I_A , 门极电压 U_G 如图 1.2.3 所示。

晶闸管导通后,其阳极电压约为 1V 左右,阳极电流由外电路决定。

晶闸管一旦导通,门极就失去控制作用,不论门极触发电压是否还存在,晶闸管都保持导通。门极信号只能控制晶闸管的导通,不能控制其关断,因而晶闸管被称为半控型电力电子器件。为了减小控制信号的功率,门极控制信号采用脉冲形式。

使已导通的晶闸管关断的条件:只能利用外加电压和外电路的作用使流过晶闸管的阳极电流 I_A 降到接近于零的某一数值 I_H 以下。 I_H 称为维持电流,一般为几十到几百毫安。

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;光直接照射硅片,即光触发。这些情况中只有光触发易于控制,并因其可以保证控制电路与主电路之间良好绝缘而应用于高压电力设备中,其他都因不易控制而难以应用于实践。只有门极触发是最精确、迅速而可靠的控制手段。光触发的晶闸管称为光控晶闸管(Light Triggered Thyristor-LTT)。

以上特点反映到晶闸管的伏安特性上则如图 1.2.4 所示。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仿。即使通过较大的阳极电流,晶闸管本身的压降也很小,在 1V 左右。导通期间,如果门极电流为零,并且

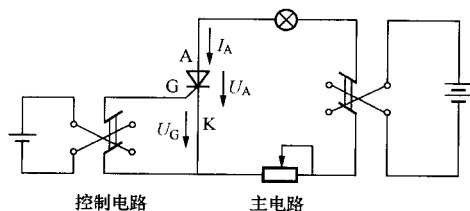


图 1.2.3 晶闸管电路

阳极电流降至维持电流 I_H 以下, 则晶闸管又回到正向阻断状态。

当在晶闸管上施加反向电压时, 其伏安特性类似二极管的反向特性。晶闸管处于反向阻断状态时, 只有极小的反向漏电流通过。当反向电压超过一定限度, 到反向击穿电压后, 外电路如无限制措施, 则反向漏电流急剧增大, 导致晶闸管发热损坏。

晶闸管额定电压、额定电流的选取: 晶闸管在实际应用时应注意参考器件参数和特性曲线的具体规定。晶闸管的两个重要参数是额定电压和额定电流。

额定电压 U_{TN} : 在门极断路而结温为额定值时, 允许重复加在晶闸管上的正向峰值电压和反向峰值电压中较小的标值规定为晶闸管的额定电压。

选用时, 额定电压要留有一定裕量。一般取额定电压为正常工作时晶闸管所承受正向和反向峰值电压中较大者 U_{AKM} 的 2~3 倍, 即

$$U_{TN} = (2 \sim 3)U_{AKM}$$

额定电流 $I_{T(AV)}$: 晶闸管的额定电流用通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 表示。国标规定通态平均电流为晶闸管在环境温度为 40°C 和规定的冷却状态下, 稳定结温不超过额定结温时所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

当流过晶闸管的电流不是工频正弦半波电流时, 晶闸管的额定电流按下式取:

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_T}{1.57}$$

式中, I_T 是流过晶闸管的实际电流的有效值。

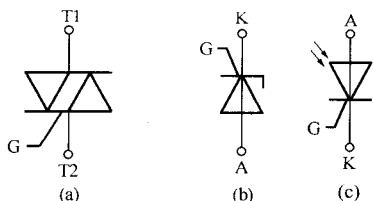


图 1.2.5 部分晶闸管派生器件的电气图形符号

- (a) 双向晶闸管; (b) 逆导晶闸管;
(c) 光控晶闸管

晶闸管的派生器件: 晶闸管的派生器件有快速晶闸管 (Fast Switching Thyristor—FST)、双向晶闸管 (Triode AC Switch—TRIAC 或 Bidirectional triode thyristor)、逆导晶闸管 (Reverse Conducting Thyristor—RCT) 和光控晶闸管 (Light Triggered Thyristor—LTT)。其中光控晶闸管又称光触发晶闸管, 在高压大功率的场合, 如高压直流输电和高压核聚变装置中, 占据重要的地位。部分晶闸管派生器件的电气图形符号如图 1.2.5 所示。

1.2.3 全控型器件

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, 又称自关断器件。

典型的全控型器件有下述 4 种。

1. 门极可关断晶闸管 (Gate-Turn-Off Thyristor—GTO)。

GTO 是晶闸管的一种派生器件, 可以通过在门极施加负的脉冲电流使其关断。GTO 的许多性能与 IGBT、Power MOSFET 相比要差, 但 GTO 的电压、电流容量较大, 与普通

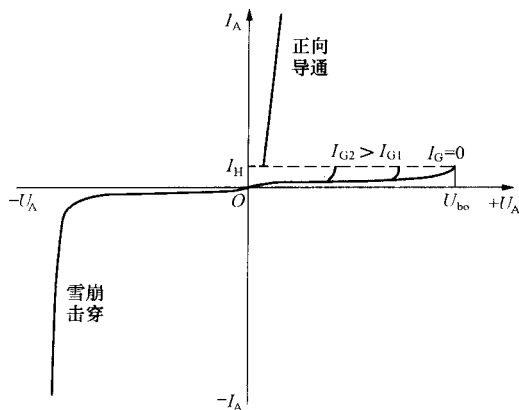


图 1.2.4 晶闸管的伏安特性

晶闸管接近，因而在兆瓦级以上的大功率场合仍有较多的应用。

2. 电力晶体管 (Giant Transistor——GTR, 直译为巨型晶体管)

GTR 是一种耐高电压、大电流的双极结型晶体管。电流驱动, 有电导调制效应, 通流能力很强, 但开关速度较低, 所需驱动功率大, 驱动电路复杂。自 20 世纪 80 年代以来, 在中、小功率范围内取代了晶闸管, 但目前又大多被 IGBT 和 Power MOSFET 取代。

3. 电力场效应晶体管 (Power Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor——Power MOSFET)

Power MOSFET 按导电沟道可分为 P 沟道和 N 沟道两种。Power MOSFET 用栅极电压来控制漏极电流, 驱动电路简单, 需要的驱动功率小, 开关速度快, 工作频率高, 热稳定性优于 GTR, 但其电流容量小, 耐压低, 一般只适用于功率不超过 10kW 的电力电子装置。

GTO、GTR、Power MOSFET 的电气图形符号如图 1.2.6 所示。其中 C 为集电极, E 为发射极, B 为基极, G 为栅极, D 为漏极, S 为源极。

4. 绝缘栅双极晶体管 (Insulated-Gate Bipolar Transistor——IGBT)

GTR 和 Power MOSFET 各具优缺点, IGBT 即是两类器件取长补短结合而成的复合器件。IGBT 综合了 GTR 和 Power MOSFET 的优点, 具有良好的特性, 自 1986 年投入市场后, 迅速扩展了应用领域, 目前已取代了 GTR 和部分 Power MOSFET 的市场, 成为中小功率电力电子设备的主导器件, 并在继续努力提高电压和电流容量, 以期再取代 GTO 的地位。

图 1.2.7 是 IGBT 的简化等效电路和电气图形符号, 其中 C 为集电极, E 为发射极, G 为栅极。可以看出 IGBT 相当于一个由 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 晶体管。图中电阻为晶体管基区内的调制电阻。因此, IGBT 的驱动原理与电力 MOSFET 基本相同, 它是一种场控器件。其开通和关断是由栅极和发射极间的电压 u_{GE} 决定的, 当 u_{GE} 为正且大于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时, MOSFET 内形成沟道, 并为晶体管提供基极电流进而使 IGBT 导通。当栅极与发射极间施加反向电压或不加信号时, MOSFET 内的沟道消失, 晶体管的基极电流被切断, 使得 IGBT 关断。

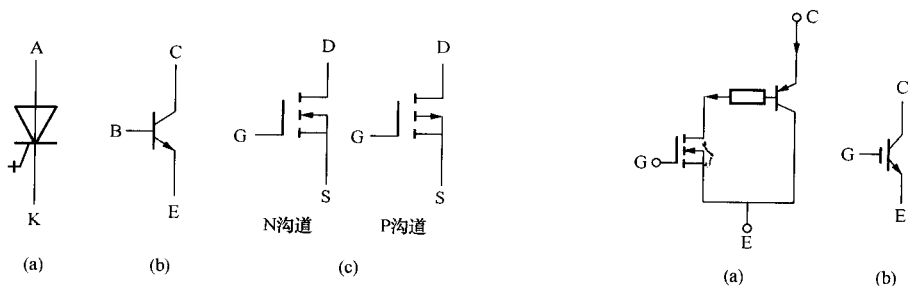


图 1.2.6 GTO、GTR、Power MOSFET 的电气图形符号 图 1.2.7 IGBT 的简化等效电路和电气图形符号
(a) GTO; (b) GTR; (c) Power MOSFET (a) 简化等效电路; (b) 电气图形符号

N 沟道 MOSFET 与 PNP 晶体管组合而成的 IGBT 称为 N 沟道 IGBT, 记为 N-IGBT, 图 1.2.7 (b) 即为 N-IGBT 的电气图形符号。相应的还有 P 沟道 IGBT, 记为 P-IGBT, 将图 1.2.7 (b) 中的箭头反向即为 P-IGBT 的电气图形符号。其中 N 沟道 IGBT 应用较多, 后文提及的 IGBT 都是指 N 沟道。

其他新型电力电子器件, 诸如 MOS 控制晶闸管 MCT、静电感应晶体管 SIT、静电感应晶闸管 SITH、集成门极换流晶闸管 IGCT 等等, 还有待于进一步发展, 此处不作介绍。

1.2.4 功率模块与功率集成电路

自 20 世纪 80 年代中后期开始, 在电力电子器件研制和开发中的一个共同趋势是模块化。

功率模块 (Power Module) 是按照典型电力电子电路所需要的拓扑结构, 将多个相同的电力电子器件或多个相互配合使用的不同电力电子器件封装在一个模块中。

功率模块可以缩小装置体积, 降低成本, 提高可靠性, 更重要的是, 对工作频率较高的电路, 这可以大大减小线路电感, 从而简化对保护和缓冲电路的要求。有的功率模块按照主要器件的名称命名, 如 IGBT 模块 (IGBT Module)。

更进一步, 如果将电力电子器件与逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断等信息电子电路制作在同一芯片上, 则称为功率集成电路 (Power Integrated Circuit-PIC)。与功率集成电路类似的还有许多名称, 但实际上各自有所侧重。高压集成电路 (High Voltage IC HVIC) 一般指横向高压器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成。智能功率集成电路 (Smart Power IC SPIC) 一般指纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成。而智能功率模块 (Intelligent Power Module-IPM) 则一般指 IGBT 及其辅助器件与其保护和驱动电路的封装集成, 也称智能 IGBT (Intelligent IGBT)。

高低压电路之间的绝缘问题以及温升和散热的有效处理, 一度是功率集成电路的主要技术难点。因此, 以前功率集成电路的开发和研究主要在中小功率应用场合, 如家用电器、办公设备电源、汽车电器等等。智能功率模块则在一定程度上回避了这两个难点, 只将保护和驱动电路与 IGBT 器件封装在一起, 因而最近几年获得了迅速发展。目前最新的智能功率模块产品已用于高速子弹列车牵引这样的大功率场合。

功率集成电路实现了电能和信息的集成, 成为机电一体化的理想接口, 具有广阔的应用前景。

1.3 工业直流电源基础

电解、电镀, 直流电焊机, 发电厂、水电站及 500kV、220kV、110kV、35kV 等各类变电站, 电力机车、无轨电车、地铁, 静电除尘、污水处理等都使用直流电。直流电是通过直流电源对市电进行变换得到的。根据对交流电进行变换的过程不同, 直流电源有两种类型, 一种是整流直流电源, 利用整流电路将交流电直接变换成直流电输出; 一种是高频逆变直流电源, 由整流电路 1、逆变电路、整流电路 2 等构成, 逆变电路将整流电路 1 输出的直流电逆变为高频交流电后再经整流输出直流电。

1.3.1 整流直流电源

一、单相桥式整流电路

小容量的直流用电设备, 采用单相桥式整流电路。图 1.3.1 所示电路, 是由晶闸管构成的单相桥式全控整流电路。

1. 电阻性负载

图 1.3.1 所示单相桥式全控整流电路的等效电路如图 1.3.2 所示。

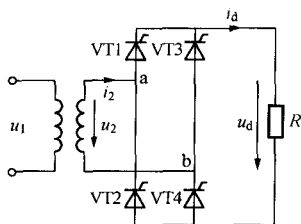


图 1.3.1 单相桥式全控整流电路（电阻性负载）

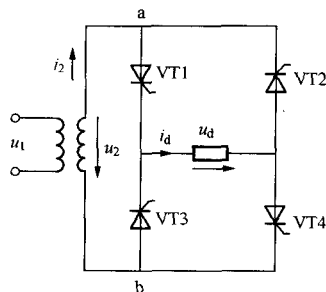


图 1.3.2 图 1.3.1 的等效电路

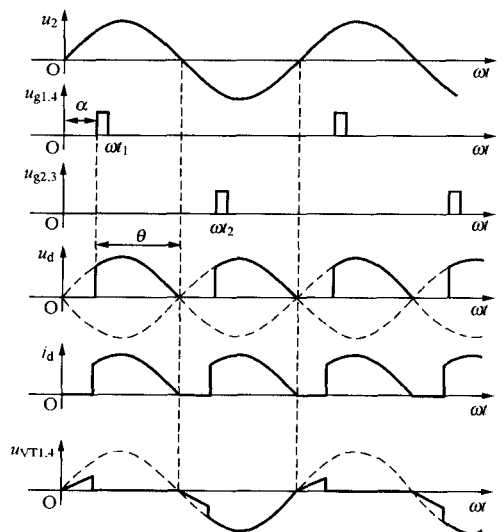


图 1.3.3 单相桥式全控整流电路（电阻性负载）工作波形

设 \$u_2\$ 为正弦电压，其有效值为 \$U_2\$，\$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t\$ V，如图 1.3.3 所示。

在 \$u_2\$ 的正半周，晶闸管 \$VT_1\$ 和 \$VT_4\$ 承受正向阳极电压，在此期间（如 \$\omega t_1\$ 时刻）给 \$VT_1\$ 和 \$VT_4\$ 的门极施加正向电压（触发脉冲 \$u_{g1}\$、\$u_{g4}\$），\$VT_1\$ 和 \$VT_4\$ 就会导通。忽略晶闸管的导通压降（1V 左右），负载上的输出电压 \$u_d = u_2\$。由于是电阻性负载，所以输出电流与输出电压成比例，

$$i_d = \frac{u_d}{R}$$

负载电流通过 \$VT_1\$ 和 \$VT_4\$ 与电源形成回路，当 \$u_2\$ 由正变负过零时，\$i_d = 0\$，流过 \$VT_1\$ 和 \$VT_4\$ 的电流也为零，故 \$VT_1\$ 和 \$VT_4\$ 关断。

在 \$u_2\$ 的负半周，晶闸管 \$VT_2\$ 和 \$VT_3\$ 承受正向阳极电压，在此期间（如 \$\omega t_2\$ 时刻）给 \$VT_2\$ 和 \$VT_3\$ 的门极施加正向电压（触发脉冲 \$u_{g2}\$、\$u_{g3}\$），

\$VT_2\$ 和 \$VT_3\$ 就会导通。忽略晶闸管的导通压降（1V 左右），负载上的输出电压 \$u_d = -u_2\$。负载电流通过 \$VT_2\$ 和 \$VT_3\$ 与电源形成回路，当 \$u_2\$ 由负变正过零时，\$i_d = 0\$，流过 \$VT_2\$ 和 \$VT_3\$ 的电流也为零，故 \$VT_2\$ 和 \$VT_3\$ 关断。

为了确定晶闸管的电压定额，需要确定晶闸管承受的阳极电压情况。以 \$VT_1\$ 为例。\$VT_1\$ 导通时，忽略其导通压降（1V 左右），认为是 0V；\$VT_2\$ 和 \$VT_3\$ 导通时，\$VT_1\$ 承受的阳极电压就是 \$u_2\$（忽略 \$VT_2\$ 和 \$VT_3\$ 的导通压降）；所有晶闸管都不导通时，\$VT_1\$ 承受的阳极电压是 \$\frac{u_2}{2}\$。

用数学表达式表示为

$$u_{VT1} = \begin{cases} 0, VT_1 \text{ 和 } VT_4 \text{ 导通} \\ u_2, VT_2 \text{ 和 } VT_3 \text{ 导通} \\ \frac{u_2}{2}, \text{ 都不导通} \end{cases} \quad (1.3.1)$$

VT4 的阳极电压与 VT1 的完全相同。

整流输出电压 u_d 、输出电流 i_d 、VT1 与 VT4 承受的阳极电压 $u_{VT1,4}$ 的波形如图 1.3.3 所示。

从晶闸管开始承受正向阳极电压到触发脉冲出现, 这段时间所对应的电角度称为控制角, 用 α 表示; 晶闸管在一个周期内导通的电角度称为导通角, 用 θ 表示。在电阻性负载单相桥式全控整流电路中, $\theta = \pi - \alpha$ 。

2. 电感性负载

电感不同于电阻。其不同之处在于:

(1) 电阻中的电流与其两端电压成比例, 而电感中的电流不与其两端电压成比例, 是一种微分关系: $i_L = L \frac{du_L}{dt}$;

(2) 电阻中的电流可以跃变, 而电感中的电流对应着磁场能量: $\frac{1}{2} Li_L^2$, 由于能量不能跃变, 故电感中的电流不能跃变。

因而当感性负载两端电压由正变负过零或由负变正过零时, 负载中的电流往往不为 0。

电感性负载的单相桥式全控整流电路如图 1.3.4 所示。

电路的工作状态与电阻性负载相似: 在 u_2 的正半周, 晶闸管 VT1 和 VT4 工作, 负载上的输出电压 $u_d = u_2$; 在 u_2 的负半周, 晶闸管 VT2 和 VT3 工作, 负载上的输出电压 $u_d = -u_2$ 。

不同之处: u_2 过零变负 (或变正) 时, $i_d \neq 0$, 由于通过晶闸管的电流也是 i_d , 故原先导通的晶闸管 VT1 和 VT4 (或 VT2 和 VT3) 不关断!

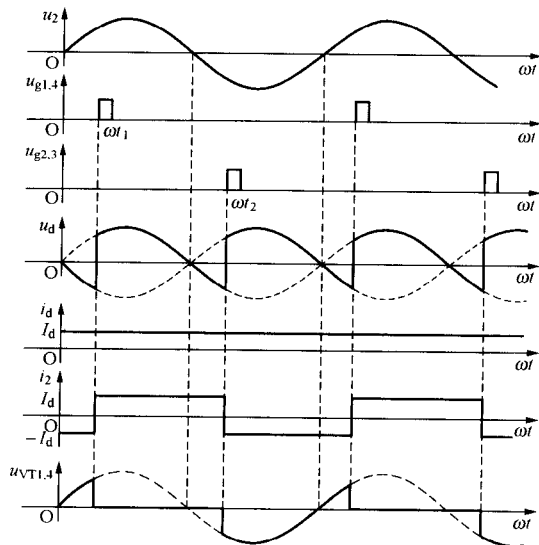


图 1.3.5 单相桥式全控整流电路 (电感性负载) 工作波形

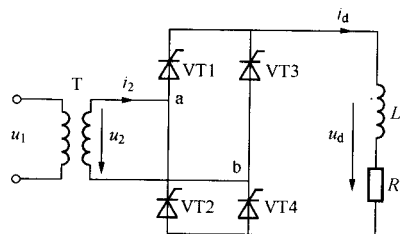


图 1.3.4 电感性负载单相桥式全控整流电路

这就使得输出 u_d 出现负值, 如图 1.3.5 所示。

在 ωt_2 时刻, VT2 和 VT3 承受的阳极电压为 $-u_2 > 0$, 给 VT2 和 VT3 的门极施加正向电压 (触发脉冲 u_{g2} 、 u_{g3}), VT2 和 VT3 就会导通。VT2 和 VT3 导通后, 施加在 VT1 和 VT4 的阳极电压为 $u_2 < 0$, 使 VT1 和 VT4 关断。负载电流从 VT1 和 VT4 换到 VT2 和 VT3, 这一过程称为换相, 亦称换流。

为便于讨论, 假设电路已工作于稳态。并假设负载电感很大, 负载电流 i_d 连续且波形近似为一水平线。

变压器二次侧电流 i_2 由通过 VT1 和 VT4、VT2 和 VT3 的电流组成, 是正负交替的矩形波。在电感性负载单相桥式全控整流电路中, 电感很大时, $\theta = \pi$ 。晶闸管承受的阳极

电压, 以 VT1 为例, 是

$$u_{VT1} = \begin{cases} 0, & \text{VT1 和 VT4 导通} \\ u_2, & \text{VT2 和 VT3 导通} \end{cases} \quad (1.3.2)$$

整流输出属于直流, 直流量的大小用平均值表示。输出电压的平均值, 对于电阻性负载为

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1.3.3)$$

对于电感性负载 ($\theta = \pi$) 为:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha = 0.9 U_2 \cos \alpha \quad (1.3.4)$$

无论是电阻性负载还是电感性负载, 下列电量与有关电量的关系式相同:
输出电流的平均值:

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (1.3.5)$$

流过晶闸管的电流平均值:

$$I_{dVT} = \frac{1}{2} I_d \quad (1.3.6)$$

晶闸管承受的最高阳极电压是:

$$U_{AKM} = \sqrt{2} U_2 \quad (1.3.7)$$

晶闸管的电流有效值:

$$I_{VT} = \frac{1}{\sqrt{2}} I \quad (1.3.8)$$

其中 I 是输出电流的有效值。

变压器二次电流的有效值:

$$I_2 = I \quad (1.3.9)$$

对于电阻性负载, 输出电流的有效值:

$$I = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1.3.10)$$

对于电感性负载, 输出电流的有效值:

$$I = I_d \quad (1.3.11)$$

3. 反电动势负载

当整流电路用于为蓄电池充电, 或为直流电动机做电源时, 蓄电池或直流电动机的电枢是整流电路的反电动势负载。单相桥式全控整流电路带反电动势负载的等效电路如图 1.3.6 所示。图中 E 即为蓄电池或直流电动机电枢的电动势, R 为回路的等效电阻, L 为串入的平波电抗器。串入平波电抗器的目的是使负载中的电流连续, 使电流连续的最小电感量为

$$L = \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi \omega I_{dmin}} = 2.87 \times 10^{-3} \frac{U_2}{I_{dmin}}$$

负载电流连续时, 反电动势负载整流电路的工作情况与电感性负载整流电路电流连续时相同, 工作波形也相同, 各电量的计算公式也基本相同, 只有输出电流的平均值不同。反电