

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 高 宇
责任编辑 胡思佳
封面设计 刘文东

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

高等职业教育机电系列精品教材

电力电子技术

主编 张建国

高等职业教育机电系列精品教材

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主编 张建国

免费提供

★★★ 精品教学资料包

服务热线: 400-615-1233
www.huatengzy.com



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
官方微信

ISBN 978-7-313-31837-4



9 787313 318374 >

定价: 42.00元



上海交通大学出版社



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

高等职业教育机电系列精品教材

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主 编 张建国
副主编 张贤慧 李雪静 霍英杰



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书除绪论外共 7 章,内容包括晶闸管及单相可控整流电路的应用、三相可控整流电路的应用、有源逆变电路的应用、全控型电力电子器件的应用、直流-直流变换电路的应用、交流调压电路的应用、变频电路的应用。

本书既可作为高等职业教育电气自动化技术、电机与电器技术等专业的教材,也可作为从事电气、机电技术工作的技术人员的实用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 张建国主编. -- 上海 : 上海交通大学出版社, 2024. 12. -- ISBN 978 - 7 - 313 - 31837 - 4

I . TM1

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024UX4591 号

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主 编:张建国

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:大厂回族自治县聚鑫印刷有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1 / 16

字 数:314 千字

版 次:2024 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-31837-4

定 价:42.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:12

印 次:2024 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如您发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0316-8836866

为了适应智能制造技术飞速发展的需要,适应高职高专教育教学的要求,更好地培养应用型、技能型高级电气、机电技术人才,编者在多年教学改革与实践的基础上,以培养学生综合应用能力为出发点编写了本书。

电力电子技术主要解决智能制造系统中的电气设备和机电控制系统中有关电力、电气控制的技术问题,所以“电力电子技术”课程是高等职业院校电气、机电类专业的一门专业课程,它涵盖了电力电子、电气控制的主要内容,在电气、机电类专业中占有专业性的地位,同时也是一门工程性和实践性很强的专业课程。随着智能制造技术的发展,“电力电子技术”课程的教学内容不断充实、教学体系不断更新,越来越多地应用到其他学科领域。

本书根据高职高专学生的学习规律,在内容的编写上力求通俗易懂,在内容的处理上符合高职高专教学“以应用为目的,以必需、够用为度”的原则。本书共分7章。第1章晶闸管及单相可控整流电路的应用,主要介绍晶闸管工作机理,单相可控整流电路的电路结构、工作原理、电气性能、波形分析方法和参数计算。第2章三相可控整流电路的应用,主要介绍三相半波可控整流电路、三相桥式全控整流电路、集成触发电路的电路结构、工作原理和三相半波可控整流电路应用实例。第3章有源逆变电路的应用,主要介绍有源逆变电路工作过程,三相半波逆变电路、三相桥式逆变电路的电路结构、工作原理及逆变失败的原因及逆变角的限制、有源逆变电路应用实例。第4章全控型电力电子器件的应用,主要介绍可关断晶闸管、电力晶体管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管、其他新型电力电子器件的工作原理。第5章直流-直流变换电路的应用,主要介绍直流-直流变换电路、降压斩波电路、升压斩波电路、升降压斩波电路、库克斩波电路、带隔离变压器的直流变换器的电路结构、工作原理。第6章交流调压电路的应用,主要介绍双向晶闸管、单相交流调压电路、三相交流调压电路的电路结构、工作原理及三相交流调压电路应用实例。第7章变频电路的应用,主要介绍变频电路、谐振式变频电路、三相桥式变频电路、交-交变频电路、脉宽调制(PWM)型变频电路的电路结构、工作原理及变频电路应用实例。在内容选取和安排上,突出基本概念、基本理论和基本方法及基本技能,主要讲述分析和应用的方法。为便于读者学习,着重讲清思路,交代方法,每章都有思考练习题,以帮助复习和巩固所学知识。

本课程是一门实践性很强的专业课,应加强课程的实验与实训。为强化学生职业能力的培养和训练,本书配备了相应的应用实例和技能训练及技能综合训练内容。本课程的参考学时数为60学时(含技能训练)。

本书由漳州理工职业学院张建国任主编,漳州职业技术学院张贤慧、李雪静和漳州理工职业学院霍英杰任副主编,漳州职业技术学院李捷辉,漳州理工职业学院朱洪辉、陈少燕、陈杰和漳州技师学院翁锦华参编。为加强校企合作,编写校企“双元”合作特色教材,提高学生

的生产实践能力,福建珈玛电气有限公司总经理林义评参与编写。具体编写分工如下:张建国编写绪论、第三章、第六章、第七章,张贤慧编写第四章、第五章,李雪静编写第一章、第二章,霍英杰、李捷辉、朱洪辉、陈少燕、陈杰及翁锦华、林义评等参与本书大纲的策划,对编写内容,特别是技能训练部分提出建设性的意见。

本书全体编者对关心、帮助本书编写、出版、发行的各位同志一并表示谢意。

由于电力电子技术发展迅速,编者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

Contents

目录

绪论	1
第一章	晶闸管及单相可控整流电路的应用 6
1	第一节 晶闸管的应用 6
	第二节 单相可控整流电路的应用 13
	第三节 晶闸管的触发电路 28
	思考练习题 39
第二章	三相可控整流电路的应用 41
2	第一节 三相半波可控整流电路的应用 41
	第二节 三相桥式整流电路的应用 47
	第三节 集成触发电路的应用 54
	思考练习题 65
第三章	有源逆变电路的应用 68
3	第一节 有源逆变电路的工作过程 68
	第二节 三相半波逆变电路的应用 72
	第三节 三相桥式逆变电路的应用 73
	第四节 逆变失败的原因及逆变角的限制 75
	第五节 有源逆变电路应用实例 77
	思考练习题 81
第四章	全控型电力电子器件的应用 83
4	第一节 可关断晶闸管的应用 83
	第二节 电力晶体管的应用 86
	第三节 电力场效应晶体管的应用 89
	第四节 绝缘栅双极晶体管的应用 93
	第五节 其他新型电力电子器件的应用 97
	思考练习题 99

第五章

5

直流-直流变换电路的应用 100

第一节 直流-直流变换电路的工作过程 100

第二节 降压斩波电路的应用 102

第三节 升压斩波电路的应用 104

第四节 升降压斩波电路的应用 107

第五节 库克斩波电路的应用 109

第六节 带隔离变压器的直流变换器 110

思考练习题 127

第六章

6

交流调压电路的应用 128

第一节 双向晶闸管的应用 128

第二节 单相交流调压电路的应用 136

第三节 三相交流调压电路的应用 138

第四节 交流调压电路应用实例 143

第五节 晶闸管交流开关及交流调功器的应用 145

思考练习题 150

第七章

7

变频电路的应用 152

第一节 变频电路的工作过程 152

第二节 谐振式变频电路的应用 155

第三节 三相桥式变频电路的应用 157

第四节 交-交变频电路的应用 163

第五节 脉宽调制(PWM)型变频电路的应用 167

第六节 变频电路应用实例 174

思考练习题 184

参考文献 185

绪 论

一、电力电子技术的概念

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,国际电工委员会将其命名为电力电子学。电力电子技术与其他学科之间的关系如图 0-1 所示。

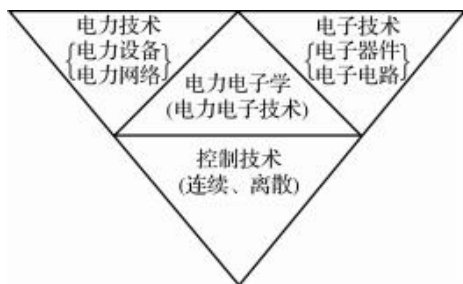


图 0-1 电力电子技术与其他学科之间的关系

电力电子学主要研究各种电力电子器件,以及由这些电力电子器件所构成的各式各样的电路或装置,以完成对电能的变换和控制。它既是电子学在强电(高电压、大电流)或电工领域的一个分支,又是电工学在弱电(低电压、小电流)或电子领域的一个分支,或者说是强弱电相结合的新科学。电力电子学是横跨“电子”“电力”和“控制”三个领域的一个工程技术学科。

1. 电力电子技术的组成

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。

2. 电力电子技术的研究任务

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) 电力电子器件的工作原理与应用。
- (2) 电力电子电路的电能量变换原理。
- (3) 控制技术以及电力电子装置的开发与应用。

电有直流(DC)和交流(AC)两大类。前者有电压幅值和极性的不同,后者除电压幅值和极性外,还有频率和相位的差别。实际应用中,常常需要在两种电能之间,或对同种电能的一个或多个参数(如电压、电流、频率和功率因数等)进行变换。

二、电力电子器件

电力电子器件是以开关模式工作的,可直接用于主电路中,通过一定规律的开通和关断控制来实现电能的变换或控制的电子器件。这里的主电路是指电气设备或电力系统中,直接承担电能的变换或控制任务的电路。

电力电子器件按照开通、关断控制方式可分为三大类。

(1)不可控型。为二端器件,一端是阳极,另一端是阴极。其开关操作仅取决于施加于器件阳、阴极间的电压。正向导通,负向关断,流过其中的电流是单方向的。其开通和关断不能按需要控制,是不控型器件。

(2)半控型。是三端器件,阳极、阴极和控制门极。也具有单向导电性,开通需在其阳、阴极间施加正向电压,而且必须在门极输入正向控制电压,开通可以被控制。然而这类器件一旦开通,就不能再通过门极控制关断,只能从外部改变加在阳、阴极间的电压极性 or 强制阳极电流变成零才能使其关断。

(3)全控型。这类器件也是带有控制端的三端器件,但控制端不仅可控制其开通,而且能控制其关断,故称全控型。

三、电力电子变流技术及其发展阶段

在有电力电子器件以前,电能转换是依靠旋转机组来实现的。与这些旋转式的交流机组比较,利用电力电子器件组成的静止的电能变换器,具有体积小、重量轻、无机械噪声和磨损、效率高、易于控制、响应快及使用方便等优点。

变流技术的发展已经历了以下三个阶段。

(1)第一阶段是电子管、离子管(闸流管、汞弧整流器)的发展与应用阶段。

(2)第二阶段是硅整流管、晶闸管的发展与应用阶段。1957年,第一只晶闸管(也称可控硅,SCR)问世,自20世纪60年代开始进入晶闸管时代。

(3)第三阶段是全控型电力半导体器件的发展与应用阶段,是电力变流器向高频化发展的阶段,也是变流装置的控制方式由移相控制向时间比率控制发展的阶段。20世纪70年代以后,出现了通和断或开和关都能控制的全控型电力电子器件(亦称自关断型器件),如门极可关断晶闸管(GTO)、双极型功率晶体管(BJT/GTR)、功率场效应晶体管(P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。

变流控制电路经历了由分立元件到集成电路的发展阶段。现在已有专为各种控制功能设计的专用集成电路,使变换器的控制电路大为简化。

微处理器和微型计算机的引入,特别是它们的位数成倍增加,运算速度不断提高,功能不断完善,使控制技术发生了根本的变化,使控制不仅依赖硬件电路,而且可利用软件编程,既方便又灵活。

各种新颖、复杂的控制策略和方案得到实现,并具有自诊断功能和智能化的功能。将新的控制理论和方法应用在变换器中。

综上所述可以看出,微电子技术、电力电子器件和控制理论是现代电力电子技术的发展动力。

四、变换器的分类

电力电子变流技术是电力电子技术的核心,研究如何利用电力电子器件构成电路进行电能的变换和控制。实现变流技术的电力电子电路称为变换器。

变换器共有四种类型。

(1)交流-直流(AC-DC)变换器:将交流电转换为直流电。

(2)直流-交流(DC-AC)变换器:将直流电转换为交流电。当输出接电网时,称之为有源逆变;当输出接负载时,称之为无源逆变。

(3)交流-交流(AC-AC)变换器:将交流电能的参数加以变换。其中,改变交流电压有效值称为交流调压,将工频交流电直接转换成其他频率的交流电称为交-交变频。

(4)直流-直流(DC-DC)变换器:将恒定直流变成断续脉冲输出,以改变其平均值。

五、电力电子变流技术控制方式

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)相控式: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。

(2)频控式: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。

(3)斩控式: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。

六、电力电子系统的组成

电力电子系统由控制系统、驱动电路、保护电路、检测电路和以电力电子器件为核心的主电路组成。各部分构成原理如图 0-2 所示。

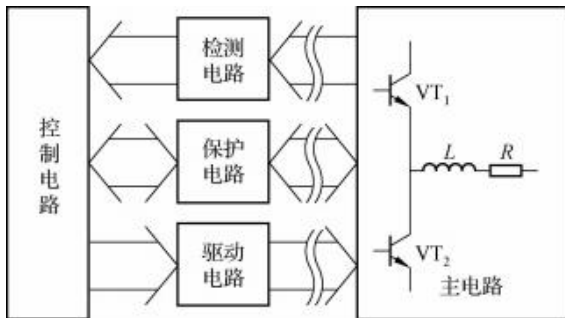


图 0-2 电力电子系统的组成

在实际电路中,电力电子系统电路用于完成电能变换。主电路中的电压和电流都比较大,为了实现特定的变换功能,主电路中的电力电子器件需要以一定的规律和速度来导通和关断。控制电路是给主电路中的电力电子器件提供触发信号的电路。控制电路提供特定规律的触发信号,因为控制电路中的电压电流都比较小,需经过驱动电路的电流和电压放大后,才能驱动主电路功率模块,主电路才能够实现特定电能变换功能。由于主电路有可能经受外部的电压冲击或发生短路故障,主电路中电力电子器件较昂贵且承受过电压和过电流

的能力低,因而在主电路中附加必要的保护电路来保护这些电力电子器件。保护电路包括过电流保护和过电压保护两种电路。

检测电路的作用在于检测主电路或应用现场的信号将采集到的信号与设定值进行比较后调节控制电路的输出,从而使电力电子系统的工作满足系统设定的工作要求。

七、电力电子技术的应用

电力电子技术的应用领域如图 0-3 所示。



电力电子技术的主要应用方向有新能源利用、节能、家用电器、电动汽车和电动自行车、照明等。

在各领域的具体作用如下。

(1)优化电能使用。通过电力电子技术对电能的处理,使电能的使用达到合理、高效和节约,实现了电能使用最佳化。例如,在节电方面,针对风机水泵、电力牵引、轧机冶炼、轻工造纸、工业窑炉、感应加热、电焊、化工、电解等 14 个方面的调查,其潜在节电总量相当于 2020 年全国发电量的 20%,所以推广应用电力电子技术是节能的一项战略措施,一般节能效果可达 10%~40%,我国已将许多装置列入节能的推广应用项目。

(2)改造传统产业和发展机电一体化等新兴产业。据预测,我国今后将有 95%的电能要经电力电子技术处理后再使用,即工业和民用的各种机电设备中,有 95%与电力电子产业有关,特别是,电力电子技术是弱电控制强电的媒体,是机电设备与计算机之间的重要接口,它为传统产业和新兴产业采用微电子技术创造了条件,成为发挥计算机作用的保证和基础。

(3)电力电子技术高频化和变频技术的发展,将使机电设备突破工频传统,向高频化方向发展。实现最佳工作效率,将使机电设备的体积减小到原来的几分之一、几十分之一,响应速度达到高速化,并能适应任何基准信号,实现无噪声且具有全新的功能和用途。

(4)电力电子智能化的进展,在一定程度上将信息处理与功率处理合一,使微电子技术与电力电子技术一体化,其发展有可能引起电子技术的重大改革。有人甚至提出,电子学的

下一项革命将发生在以工业设备和电网为对象的电子技术应用领域,电力电子技术将把人们带到第二次电子革命的边缘。

八、本课程的任务与要求及学习方法

1. 基本要求

- (1)熟悉和掌握常用电力电子器件的工作机理、特性和参数,能正确选择和使用它们。
- (2)熟悉和掌握各种基本变换器的工作原理,特别是各种基本电路中的电磁过程,掌握其分析方法、工作波形分析和变换器电路的初步设计计算。
- (3)了解各种开关元件的控制电路、缓冲电路和保护电路。
- (4)了解各种变换器的特点、性能指标和使用场合。
- (5)掌握基本实验方法、训练基本实验技能。
- (6)了解电力电子技术的应用范围和发展动向。

2. 学习方法

要着重物理概念与基本分析方法的学习,理论要结合实际,尽量做到器件、电路、系统(包括控制技术)应用三者结合。

要注意电路的波形与相位分析,抓住电力电子器件在电路中导通与截止的变化过程,从波形分析中进一步理解电路的工作原理。

要注意培养读图与分析、器件参数计算、电路参数测量、调整以及故障分析等方面的实践能力。

第一章 晶闸管及单相可控整流电路的应用



知识目标

- (1) 掌握晶闸管的工作原理、伏安特性和主要参数。
- (2) 理解和掌握单相可控整流电路的结构、工作原理、电气性能、波形分析方法和参数计算。
- (3) 掌握晶闸管的触发电路的结构、工作原理。



能力目标

- (1) 能对晶闸管电气特性和主要参数进行测试。
- (2) 能对单相可控整流电路进行调试和参数计算,会选择整流元件。
- (3) 能对晶闸管的触发电路进行调试和参数计算。



第一节 晶闸管的应用

晶闸管(thyristor)是晶体闸流管的简称,过去又被称为可控硅。1957年,美国通用电气公司开发出世界上第一款晶闸管产品,并于1958年将其商业化。晶闸管能在高电压、大电流的条件下工作,被广泛应用于可控整流、交流调压无触点开关、逆变及变频等电力电子电路中。

晶闸管技术在家用电器中具有非常广泛的应用,如采用变频技术的洗衣机、空调、调光灯(调光灯可以任意调整亮度)等。

目前主要有两种灯光亮度控制方法:一是机械加减法,即对有多个灯的灯具,通过控制亮灯数量,达到发光总强度的控制;二是电器控制,即用不同的调光器,改变灯具的工作电压或电流,从而调整灯具的发光强度。这两种方法各有特点,第一种方法不会影响色温,但调整不方便。第二种方法操作简单,且易于实现自动及程控操作,其缺点是在改变发光强度的同时,色温和显色性有较大变化。

例如,旋钮式调光灯是电气控制调光的典型应用实例,也是入门了解电力电子基本应用时便于理解的简单例子,如图1-1所示。

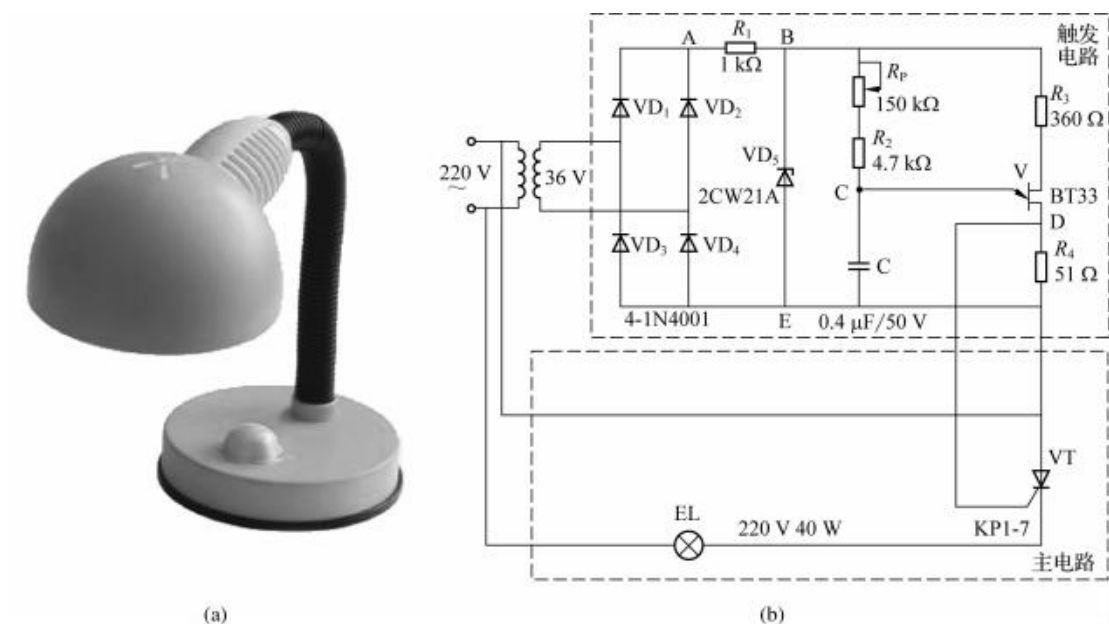


图 1-1 旋钮式调光台灯的实物图和电路原理图

(a)实物图；(b)电路原理图

调光灯电路由主电路和触发电路两部分构成。主电路由交流电源、灯泡及晶闸管组成，是电力电子整流电路中结构最简单的一种，称为单相半波可控整流电路；触发电路主要由电源(降压变压器)、二极管整流桥、稳压二极管、滑动变阻器、电容、单结晶体管等组成，主要用来控制主电路中晶闸管的导通和关断。

晶闸管是由三个 PN 结构成的一种大功率开关型半导体器件，能以较小的电流控制上千安的电流和数千伏的电压。

晶闸管包括普通晶闸管、双向晶闸管、快速晶闸管、门极关断晶闸管和逆导晶闸管等。下面着重介绍普通晶闸管，本书不特别说明，所说的晶闸管就是指普通晶闸管。

一、晶闸管的外形和结构

晶闸管的外形和结构如图 1-2 所示。晶闸管的外形大致有塑封型、螺旋型和平板型三种。图 1-2(a)为塑封型，其额定电流一般在 10 A 以下；图 1-2(b)(c)为螺旋型，其额定电流一般为 10~200 A；图 1-2(d)为平板型，其额定电流通常在 200 A 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，器件外形是为了便于安装散热器而设计的。

晶闸管的内部结构及电气符号如图 1-3 所示。晶闸管是具有三个 PN 结的四层(P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2)三端(A、K、G)半导体器件，由最外的 P_1 层和 N_2 层引出的两个电极分别为阳极 A 和阴极 K，由中间的 P_2 层引出的电极是门极 G。三个 PN 结即 J_1 、 J_2 、 J_3 ，它的 PNP 结构可以等效为三个二极管串联电路，如图 1-3(b)所示。

二、晶闸管的工作过程

晶闸管可以看作由 $P_1N_1P_2$ 和 $N_1P_2N_2$ 构成的两个晶体管 V_1 、 V_2 组合而成,如图 1-4(a) 所示。晶闸管导通的工作过程可以用双晶体管模型来解释,如图 1-4(b) 所示。如果外电路向门极注入电流 I_G ,也就是注入驱动电流,则 I_G 流入晶体管 V_2 的基极,即产生集电极电流 I_{C2} ,它构成晶体管 V_1 的基极电流,放大成集电极电流 I_{C1} ,又进一步增大 V_2 的基极电流,如此形成强烈的正反馈,最后 V_1 和 V_2 进入完全饱和状态,即晶闸管导通。此时如果撤掉外电路注入门极电流 I_G ,晶闸管由于内部已形成了强烈的正反馈,仍然维持导通状态。而若要使晶闸管关断,必须去掉阳极所加的正向电压,或者给阳极施加反向电压,或者设法使流过晶闸管的电流降低到接近零的某一数值以下。对晶闸管的驱动过程称为触发,产生注入门极的触发电流 I_G 的电路称为门极触发电路。由于通过晶闸管门极智能控制其开通,不能控制其关断,晶闸管是半控型器件。

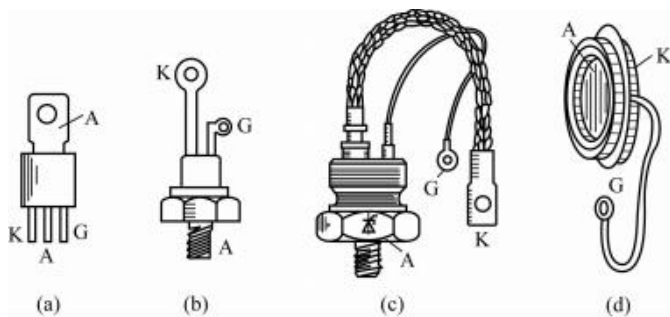


图 1-2 晶闸管的外形和结构

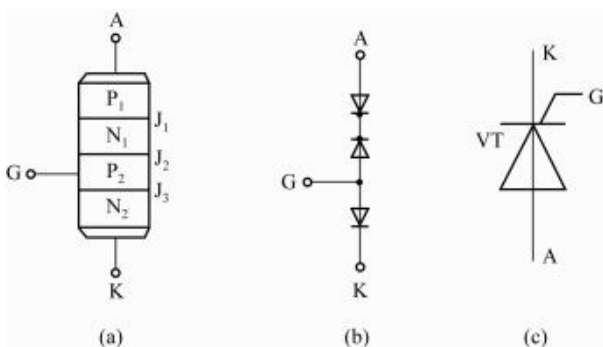


图 1-3 晶闸管的内部结构及电气符号

(a) 内部结构; (b) 二极管等效电路; (c) 电气符号

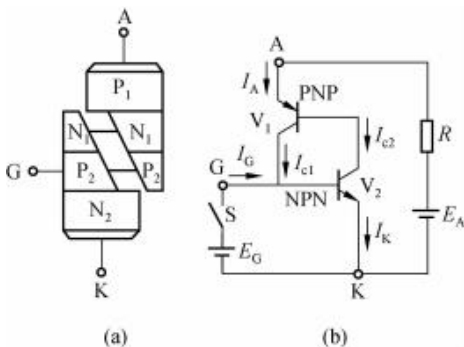


图 1-4 晶闸管的等效电路

使晶闸管导通或关断的条件,可以通过实验对其进行了解,现将晶闸管的工作原理总结如下。

(1) 当晶闸管接入反向电压时,不论门极是否有触发电流,晶闸管都不会导通,只有很小的反向漏电流流过管子,这种状态称为反向阻断状态。

(2) 当晶闸管接入正向阳极电压时,仅在门极有触发电流的情况下晶闸管才可能导通,即晶闸管要想导通,必须同时具备两个条件(充分必要条件)。

- ①给晶闸管的阳极与阴极之间施加足够的正向电压。
- ②给晶闸管的控制极施加适当的正向电压,作为晶闸管导通的触发信号(实际应用中,控制极通常加触发脉冲信号)。
- (3)晶闸管一旦导通,门极就失去控制作用,此时无论门极电流是否还在,晶闸管都保持导通。
- (4)若需要晶闸管关断,只能利用外加电压或者电路使晶闸管电流降到接近零的某一数值以下。

三、晶闸管的伏安特性

晶闸管的阳极与阴极间电压 U_A 和阳极电流 I_A 之间的关系,称为晶闸管的阳极伏安特性,简称伏安特性,其曲线如图 1-5 所示。

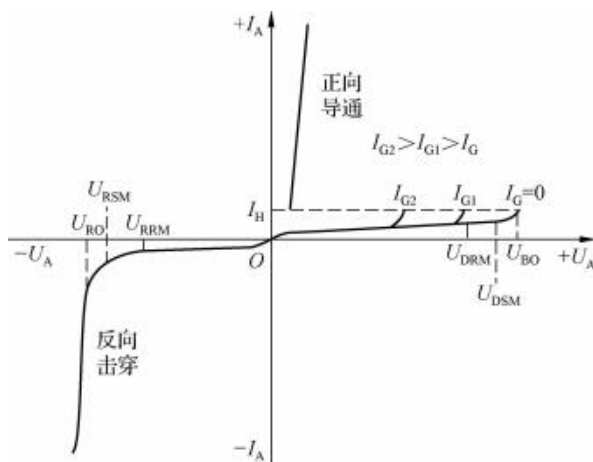


图 1-5 晶闸管阳极伏安特性曲线

第Ⅰ象限为晶闸管的正向特性,第Ⅲ象限为晶闸管的反向特性。当门极断开($I_G=0$)时,若在晶闸管两端施加正向阳极电压,由于 J_2 受反压阻挡,晶闸管处于正向阻断状态,正向漏电流很小。随着正向阳极电压 U_A 的增大,正向漏电流也相应增大。当 U_A 升高到正向转折电压 U_{BO} 时,正向漏电流急剧增大,特性由高阻区到达低阻区,晶闸管即由断态转入通态。通态时的晶闸管特性和二极管的正向特性相似,即通过较大的阳极电流,而器件本身的压降却很小。

在使用晶闸管时,先加上一定的正向阳极电压,然后在门极与阴极之间加上足够大的触发电压,使晶闸管导通。导通后的晶闸管的通态压降很小,为 1 V 左右。若导通期间的门极电流为零,则当阳极电流降至维持电流 I_H 以下时,晶闸管又回到正向阻断状态。

晶闸管加反向阳极电压时,晶闸管的反向特性与一般二极管的伏安特性相似。此时晶闸管的 J_1 、 J_3 均为反向偏置,因此只流过很小的反向漏电流,晶闸管处于反向阻断状态。但当反向电压升高到反向转折电压 U_{RO} 后,则会由于反向漏电流的急剧增大而导致器件发热损坏,即器件反向击穿。

四、晶闸管的主要参数

晶闸管的主要参数是其性能指标的反映,表明晶闸管所具有的性能和能力。在实际使用过程中,往往根据工作条件进行晶闸管的合理选择,所以必须掌握晶闸管主要参数,这样才能取得满意的技术效果和经济效果。

1. 晶闸管的电压定额

(1)断态重复峰值电压 U_{DRM} :当晶闸管门极断开,结温为额定值时,允许重复加在器件上的正向峰值电压,又称正向重复峰值电压。

(2)反向重复峰值电压 U_{RRM} :当晶闸管门极断开,结温为额定值时,允许重复加在器件上的反向峰值电压。

(3)额定电压 U_{TN} :晶闸管通以某一规定倍数的额定通态平均电流时的瞬态峰值电压。通常是指将 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中的较小值按百位取整后作为该晶闸管的额定电压值。通常标准电压等级规定为:电压在 1 000 V 以下时,每 100 V 为一级;电压为 1 000~3 000 V 时,每 200 V 为一级。用百位数或千位和百位数表示级数。例如,一晶闸管实测 $U_{\text{DRM}}=815\text{ V}$, $U_{\text{RRM}}=756\text{ V}$,两者较小的为 756 V,按表 1-1 中相应的电压等级标准为 700 V,该晶闸管的额定电压 U_{TN} 为 700 V,电压级别为 7 级。

表 1-1 晶闸管正反向重复电压等级

级 别	正、反向重复 峰值电压/V	级 别	正、反向重复 峰值电压/V	级 别	正、反向重复 峰值电压/V
1	100	8	800	20	2 000
2	200	9	900	22	2 200
3	300	10	1 000	24	2 400
4	400	12	1 200	26	2 600
5	500	14	1 400	28	2 800
6	600	16	1 600	30	3 000
7	700	18	1 800		

(4)通态平均电压 $U_{\text{T(AV)}}$:在规定环境温度、标准散热条件下,晶闸管通以额定电流时,阳极和阴极间电压降的平均值称为通态平均电压(也称管压降),其分组见表 1-2。从减小损耗和器件发热来看,应选择 $U_{\text{T(AV)}}$ 值较小的晶闸管。实际应用中,当晶闸管流过较大的恒定直流电流时,其通态平均电压比器件出厂时定义的值(见表 1-2)要大,约为 1.5 V。

表 1-2 晶闸管通态平均电压分组

组 别	A	B	C	D	E
通态平均电压/V	$U_{\text{T(AV)}} \leq 0.4$	$0.4 < U_{\text{T(AV)}} \leq 0.5$	$0.5 < U_{\text{T(AV)}} \leq 0.6$	$0.6 < U_{\text{T(AV)}} \leq 0.7$	$0.7 < U_{\text{T(AV)}} \leq 0.8$
组 别	F	G	H	I	
通态平均电压/V	$0.8 < U_{\text{T(AV)}} \leq 0.9$	$0.9 < U_{\text{T(AV)}} \leq 1.0$	$1.0 < U_{\text{T(AV)}} \leq 1.1$	$1.1 < U_{\text{T(AV)}} \leq 1.2$	

2. 晶闸管的电流定额

(1) 额定电流 $I_{T(AV)}$: 又称通态平均电流, 它是指在环境温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和标准散热条件下, 电阻性负载电路中晶闸管导通角不小于 170° 、结温不超过额定值且稳定时, 所允许通过工频正弦波电流的平均值。在标准散热条件下, 流过晶闸管的工频正弦半波电流波形如图 1-6 所示。

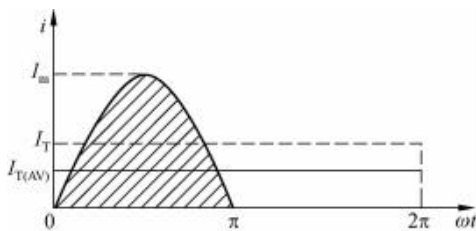


图 1-6 流过晶闸管的工频正弦半波电流波形

设该电流的峰值为 I_m , 则通态平均电流为

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-1)$$

该电流的有效值为

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m^2 (\sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (1-2)$$

正弦半波电流的有效值与平均值之比为

$$\frac{I_T}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 = K_f \quad (1-3)$$

K_f 称为正弦半波电流的波形系数。

由式(1-3)可知, 额定电流为 100 A 的晶闸管, 其允许通过的电流有效值为 157 A 。但由于晶闸管的过载能力差, 一般选用时取 $1.5 \sim 2$ 倍的安全裕量, 即

$$I_{T(AV)} = \frac{(1.5 \sim 2) I_T}{1.57} \quad (1-4)$$

由于电路不同、负载不同、导通角不同, 流过晶闸管的电流波形是不一样的, 从而它的平均电流值和有效值的关系也就不一样。因此在实际应用中, 要根据实际波形进行换算。

例 1-1 一晶闸管接在 220 V 交流电路中, 通过晶闸管电流的有效值为 50 A , 如何选择晶闸管的额定电压和额定电流?

解: (1) 晶闸管的额定电压为

$$U_{TN} \geq (2 \sim 3) U_{TM} = (2 \sim 3) \times \sqrt{2} \times 220\text{ V} = 622 \sim 933\text{ V} \quad (1-5)$$

可选额定电压范围为 700 V 、 800 V 、 900 V , 对应 7 级、8 级、9 级。

在此选择 800 V 额定电压, 对应晶闸管等级为 8 级。

(2) 晶闸管额定电流为

$$I_{T(AV)} = \frac{(1.5 \sim 2) I_{TM}}{1.57} = \frac{(1.5 \sim 2) \times 50\text{ A}}{1.57} = 48 \sim 64\text{ A} \quad (1-6)$$

额定电流可以在 $48 \sim 64\text{ A}$ 选择, 此处选择 50 A 为额定电流。

(2) 维持电流 I_H : 在室温下门极断开时, 晶闸管从较大的通态电流降到刚好能保持导通

的最小阳极电流称为维持电流。维持电流与元件容量、结温等因素有关,额定电流大的管子维持电流也大,同一管子结温低时维持电流增大,维持电流大的管子容易关断。同一型号的管子其维持电流也各不相同。

(3)擎住电流 I_L :在晶闸管加上触发电压,当晶闸管从阻断状态刚转为导通状态就去除触发电压,此时要保持元件持续导通所需要的最小阳极电流。对同一个晶闸管来说,通常擎住电流比维持电流大数倍。

3. 门极参数

(1)门极触发电流 I_{GT} :室温下,在晶闸管阳极与阴极之间加上 6 V 的正向阳极电压,管子由断态转为通态所必需的最小门极电流。

(2)门极触发电压 U_{GT} :产生门极触发电流 I_{GT} 所必需的最小门极电压。

对于晶闸管的使用者来说,为使触发电路适用于所有信号的晶闸管,触发电路送出的电压和电流要适当地大于型号规定的标准值,但不应超过门极可加信号的峰值,功率不能超过门极平均功率和门极峰值功率。

4. 动态参数

(1)断态电压临界上升率 du/dt : du/dt 指在额定结温和门极开路的情况下,从断态到通态转换的最大阳极电压上升率。实际使用时的电压上升率必须低于此规定值。

限制元件正向电压上升率的原因是:在正向阻断状态下,反偏的 J_2 相当于一个结电容,如果阳极电压突然增大,便会有一充电电流流过 J_2 ,相当于有触发电流。若 du/dt 过大,即充电电流过大,会造成晶闸管的误导通。所以在使用时,采取保护措施,使它不超过规定值。

(2)通态电流临界上升率 di/dt : di/dt 是在规定条件下,晶闸管能承受而无有害影响的最大通态电流上升率。

如果阳极电流上升太快,则晶闸管刚开通时,会有很大的电流集中在门极附近的小区域内,造成 J_2 局部过热而使晶闸管损坏。因此,在实际使用时要采取保护措施,使其被限制在允许值内。

五、晶闸管的型号

根据国家有关规定,普通晶闸管的型号及含义如图 1-7 所示。

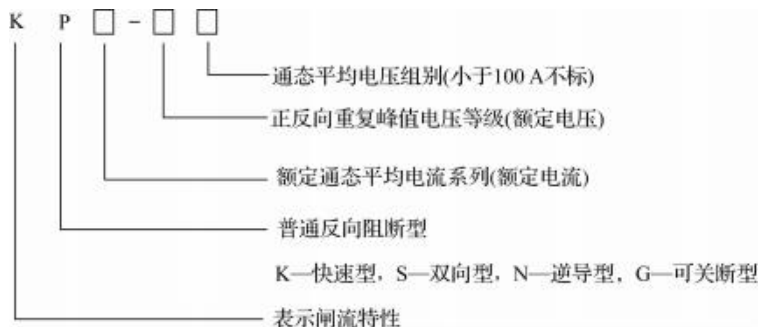


图 1-7 普通晶闸管的型号及含义

例如, KP5-7E 表示额定电流为 5 A、额定电压为 700 V 的普通晶闸管。

第二节

单相可控整流电路的应用

整流电路(rectifier)是电力电子电路中出现最早的一种,它将交流电变成直流电,应用十分广泛,电路形式多种多样,各具特色。

可控整流电路有多种形式,按照晶闸管整流器所使用的电源和电路结构不同,可以分为图 1-8 所示的几类。

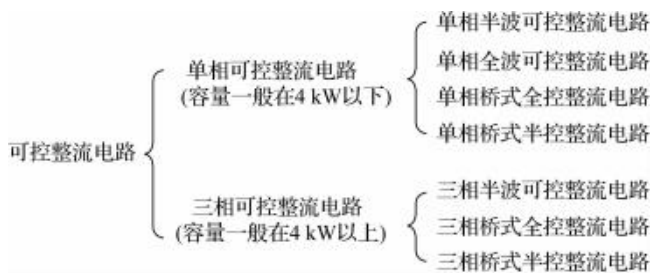


图 1-8 可控整流电路的分类图

一、单相半波可控整流电路

1. 电阻性负载

1) 负载特点

负载两端电压、电流波形相似(同相位),电压、电流均允许突变。

2) 电路组成及工作原理

图 1-9(a)为单相半波电阻性负载可控整流电路图。电路由晶闸管 VT、负载电阻 R_d 及单相整流变压器 TR 组成。TR 用来变换电压和隔离电网。 u_1 、 u_2 为一、二次侧正弦交流电压瞬时值; u_d 、 i_d 为整流输出电压和负载电流的瞬时值; u_T 为晶闸管两端电压的瞬时值。

图 1-9(b)为单相半波电阻性负载可控整流电路工作过程,其中 U_2 为二次电压有效值; u_g 为晶闸管门极触发电压; U_d 为负载上直流输出电压的平均值;交流正弦电压波形的横坐标为电角度 ωt 。在交流电压 u_2 的一个周期内,用 ωt 坐标将波形分为 $\omega t_0 \sim \omega t_1$ 、 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 、 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 三段,下面对波形进行逐段分析。

当 $\omega t = \omega t_0$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 = 0$,晶闸管 VT 门极触发电压 $u_g = 0$,所以晶闸管 VT 保持阻断状态且承受电压 $u_T = 0$;电阻 R_d 无电流通过,也无压降,即 $U_d = 0$, $i_d = 0$ 。

当 $\omega t_0 < \omega t < \omega t_1$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 > 0$,晶闸管 VT 承受正向阳极电压,但晶闸管 VT 门极仍无触发电压,即 $u_g = 0$,所以晶闸管 VT 仍保持阻断状态,其承受电压 $u_T = u_2 > 0$;电阻 R_d 无电流通过,也无压降,即 $U_d = 0$, $i_d = 0$ 。

当 $\omega t = \omega t_1$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 > 0$,晶闸管 VT 承受正向阳极电压,晶闸管 VT 门极有触发电压,即 $u_g > 0$,所以晶闸管 VT 导通,其管压降近似为零,即 $u_T = 0$;电阻 R_d 有电流通过且产生压降,即 $U_d > 0$, $i_d > 0$ 。

当 $\omega t_1 < \omega t < \omega t_2$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 > 0$,晶闸管 VT 承受正向阳极电压且保持导通状态,即 $u_T = 0$;电阻 R_d 保持有电流通过且产生压降,即 $U_d > 0$, $i_d > 0$ 。

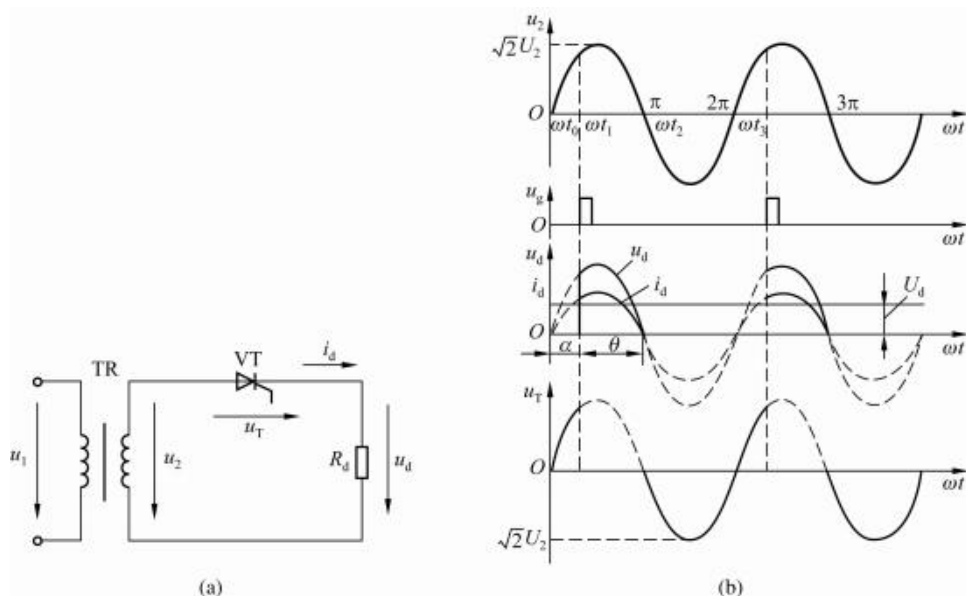


图 1-9 单相半波电阻性负载可控整流电路及工作过程图

(a) 电路图; (b) 工作过程图

当 $\omega t = \omega t_2$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 = 0$,晶闸管 VT 自然关断且承受电压 $u_T = 0$;电阻 R_d 无电流通过,也无压降,即 $U_d = 0, i_d = 0$ 。

当 $\omega t_2 < \omega t < \omega t_3$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 < 0$,晶闸管 VT 承受反向阳极电压,晶闸管 VT 保持阻断状态,其承受电压 $u_T = u_2 < 0$;电阻 R_d 无电流通过,也无压降,即 $U_d = 0, i_d = 0$ 。

3) 相关概念

(1) 控制角。从晶闸管开始承受正向阳极电压起到晶闸管触发导通,这段时间所对应的电角度称为控制角(也称移相角),用 α 表示。在图 1-9(b) 中对应 $\omega t_0 < \omega t < \omega t_1$ 段。

(2) 导通角。晶闸管在一个周期内导通的电角度称为导通角,用 θ 表示。在图 1-9 中对应 $\omega t_1 < \omega t < \omega t_2$ 段。在电阻性负载的单相半波可控整流电路中, $\alpha + \theta = \pi$ 。

(3) 移相。改变控制角 α 的大小,即改变触发脉冲在每个周期内出现的时刻称为移相。通过移相改变晶闸管的导通时间,就可以改变直流输出电压平均值 U_d 的大小,这种控制方式称为相控。

(4) 移相范围。在晶闸管承受正向阳极电压时,控制角 α 的变化范围称为移相范围。由图 1-9 可以看出,在电阻性负载的单相半波可控整流电路中,控制角 α 的移相范围为 $0 < \alpha < \pi$,其对应的导通角的变化范围为 $\pi < \theta < 0$ 。

4) 各电量的计算

(1) 负载上直流输出电压的平均值 U_d 与电流的平均值 I_d 分别为

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.45U_2 \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-7)$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-8)$$

(2) 负载上直流输出电压的有效值 U 与电流的有效值 I 分别为

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_2 \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} \quad (1-9)$$

$$I = \frac{U}{R_d} = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} \quad (1-10)$$

(3) 晶闸管的电流有效值 I_T 。在单相半波可控整流电路中,晶闸管与负载串联,所以负载电流的有效值也就是流过晶闸管电流的有效值,即

$$I_T = I = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} \quad (1-11)$$

(4) 晶闸管承受的最大正、反向电压为

$$U_{TM} = \sqrt{2}U_2 \quad (1-12)$$

(5) 电路的功率因数为

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI}{U_2 I} = \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} \quad (1-13)$$

由式(1-13)可以看出, $\cos \varphi$ 是 α 的函数, α 从 0 到 π 变化时, $\cos \varphi$ 从 0.707 到 0 变化。可见,电阻性负载的单相半波可控整流电路中,变压器的最大利用率仅有 70%。 α 越大, $\cos \varphi$ 越小,设备利用率就越差。

例 1-2 有一单相半波可控整流电路,负载电阻 R_d 为 10Ω ,直接接到交流电源 220 V 上,要求控制角从 180° 至 0° 可移相,如图 1-10 所示。

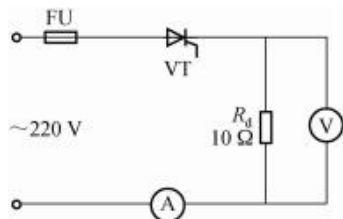


图 1-10 单相半波可控整流电路

(1) 控制角 $\alpha = 60^\circ$ 时,求电压表、电流表读数及此时的电路功率因数;

(2) 如导线电流密度取 $J = 6 \text{ A/mm}^2$,计算导线截面;

(3) 计算 R_d 的功率;

(4) 电压、电流考虑 2 倍裕量,试选择晶闸管。

解: (1) 当 $\alpha = 60^\circ$ 时,由式(1-7)、式(1-8)和式(1-13)计算得

$$U_d = 0.45U_2 \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.338U_2 = 0.338 \times 220 \approx 74.4 (\text{V})$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{74.4}{10} \text{ A} = 7.44 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = 0.635$$

(2) 计算导线截面、电阻功率、选择晶闸管额定电流时,应以电流最大值考虑。控制角 $\alpha = 0^\circ$ 时电压、电流最大,故以 $\alpha = 0^\circ$ 计算。

当 $\alpha = 0^\circ$ 时,有

$$U_{dM}=0.45U_2=0.45\times 220=99(\text{V})$$

$$I_{dM}=\frac{U_d}{R_d}=\frac{99}{10}\text{A}=9.9\text{ A}$$

所以电路中最大有效电流为

$$I_M=1.57I_{dM}=1.57\times 9.9\approx 15.5(\text{A})$$

导线截面积 S 为

$$S\geq \frac{I_M}{J}=\frac{15.5}{6}\text{mm}^2\approx 2.58\text{ mm}^2$$

(3) R_d 的功率为

$$P_M=I_M^2R_d=(15.5)^2\times 10\text{ W}=2\,402.5\text{ W}\approx 2.40\text{ kW}$$

(注意:不是 $P_d=I_d^2R_d$, P_d 是平均功率)

(4)元件承受的最大正反向电压和电流为

$$U_{Tn}=2U_{TM}=2\sqrt{2}\times U_2=2\sqrt{2}\times 220\approx 622(\text{V})$$

$$I_{T(AV)}\geq 2\times \frac{I_M}{1.57}=2\times \frac{15.5}{1.57}\approx 19.7(\text{A})$$

晶闸管的型号规格应为 KP20-7。

2. 电感性负载

1) 负载特点

在工业应用中,有很多负载既具有电阻性又具有电感性,如直流电机的励磁线圈、滑差电动机电磁离合器的励磁线圈以及串接平波电抗器的负载等。这些电感性负载实际上是电感和电阻性的统一体。

2) 电路组成及工作原理

图 1-11 为单相半波电感性负载可控整流电路及工作过程。电路由晶闸管 VT、电感性负载及单相整流变压器 TR 组成。在交流电压 u_2 的一个周期内,用 ωt 坐标将波形分为 $\omega t_0\sim\omega t_1$ 、 $\omega t_1\sim\omega t_2$ 、 $\omega t_2\sim\omega t_3$ 、 $\omega t_3\sim\omega t_4$ 、 $\omega t_4\sim\omega t_5$ 五段,下面对波形进行逐段分析。

当 $\omega t=\omega t_0$ 时,输入电压瞬时值 $u_2=0$,晶闸管 VT 门极触发电压 $u_g=0$,所以晶闸管 VT 保持阻断状态且承受电压 $u_T=0$;感性负载无电流通过,也无压降,即 $U_d=0$, $i_d=0$ 。

当 $\omega t_0<\omega t<\omega t_1$ 时,输入电压瞬时值 $u_2>0$,晶闸管 VT 承受正向阳极电压,但晶闸管 VT 门极仍无触发电压,即 $u_g=0$,所以晶闸管 VT 仍保持阻断状态,其承受电压 $u_T=u_2>0$;感性负载无电流通过,也无压降,即 $U_d=0$, $i_d=0$ 。

当 $\omega t=\omega t_1$ 时,输入电压瞬时值 $u_2>0$,晶闸管 VT 承受正向阳极电压,晶闸管 VT 门极有触发电压,即 $u_g>0$,所以晶闸管 VT 导通,其管压降近似为零,即 $u_T=0$;由于电感 L_d 阻止电流变化,所以 i_d 不能突变,只能从零开始逐渐增大,直流侧负载压降产生突变,即 $U_d>0$ 。

当 $\omega t_1<\omega t<\omega t_2$ 时,输入电压瞬时值 $u_2>0$,晶闸管 VT 承受正向阳极电压且保持导通状态,即 $u_T=0$;直流侧负载保持有电流通过且产生压降,即 $U_d>0$, $i_d>0\uparrow$ 。同时,电感储存磁场能量,整个电路处于“充磁”工作状态。

当 $\omega t=\omega t_2$ 时,输入电压瞬时值 $u_2>0$,晶闸管 VT 仍承受正向阳极电压且保持导通状态,即 $u_T=0$;直流侧负载保持有电流通过且产生压降,即 $U_d>0$, $i_d>0$ 。电感电流 i_d 不再增大,电流“充磁”过程结束。

当 $\omega t_2<\omega t<\omega t_3$ 时,输入电压瞬时值 $u_2>0$,晶闸管 VT 仍承受正向阳极电压且保持导

通状态,即 $u_T=0$;直流侧负载保持有电流通过且产生压降,即 $U_d>0, i_d>0 \downarrow$,但电感 L_d 产生感应电动势阻碍回路电流减小,整个电路处于“放磁”工作状态。

当 $\omega t=\omega t_3$ 时,输入电压瞬时值 $u_2=0$,直流侧负载电压为零,即 $u_d=0$,但此时电流 i_d 继续下降,电感 L_d 产生感应电动势,极性为下正上负,在其作用下,晶闸管 VT 仍承受正向阳极电压且保持导通状态,即 $u_T=0$;直流侧负载保持有电流通过,即 $i_d>0 \downarrow$,整个电路仍处于“放磁”工作状态。

当 $\omega t_3<\omega t<\omega t_4$ 时,输入电压瞬时值 $u_2<0$,直流侧负载电压 $U_d<0$;此时 u_2 数值较小,在数值上还小于电感 L_d 产生的感应电动势 u_L ,所以晶闸管 VT 继续承受正向阳极电压且保持导通状态,即 $u_T=0$;直流侧负载保持电流通过,即 $i_d>0 \downarrow$,整个电路仍处于“放磁”工作状态。

当 $\omega t=\omega t_4$ 时,输入电压瞬时值 $u_2<0$,但此时 u_2 数值上还等于电感 L_d 产生的感应电动势 u_L ,所以晶闸管 VT 不承受电压,即 $u_T=0$;晶闸管 VT 自然关断,整个电路处于“放磁”结束;直流侧负载无电流通过,也无电压降产生压降,即 $U_d=0, i_d=0$ 。

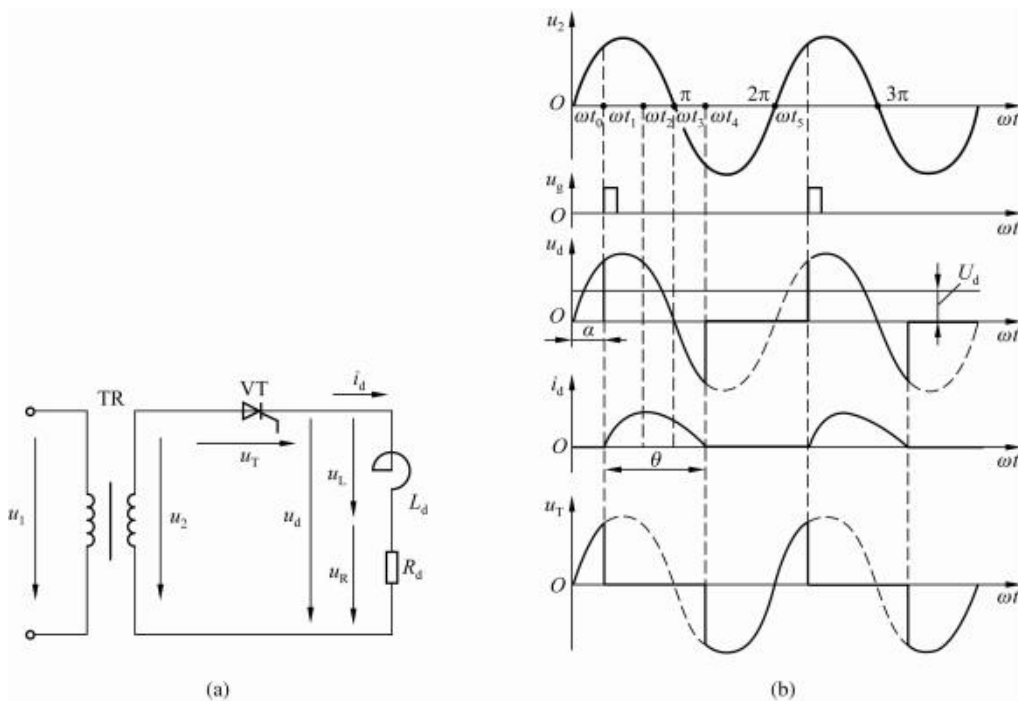


图 1-11 单相半波电感性负载可控整流电路及工作过程

(a) 电路图; (b) 工作过程

当 $\omega t_4<\omega t<\omega t_5$ 时,输入电压瞬时值 $u_2<0$,晶闸管 VT 承受反向阳极电压且保持不导通状态,即 $u_T<0$;直流侧负载无电流,也无压降,即 $U_d=0, i_d=0$ 。

3. 电感性负载并接续流二极管

1) 负载特点

在工业应用中,有很多负载既具有电阻性又具有电感性,如直流电机的励磁线圈、滑差电动机电磁离合器的励磁线圈以及串接平波电抗器的负载等。这些电感性负载实际上是感性和电阻性的统一体。

2) 电路组成及工作原理

为了使带有电感负载的单相半波可控整流电路正常工作,必须使负载端不出现负电压,因此要在电源电压 u_2 负半周期时,使晶闸管 VT 承受反向电压而关断。解决办法是在负载两端并联一个二极管,该二极管可为电感性负载在晶闸管关断时提供续流通路,所以该二极管称为续流二极管,简称续流管,整流电路及工作过程如图 1-12 所示。

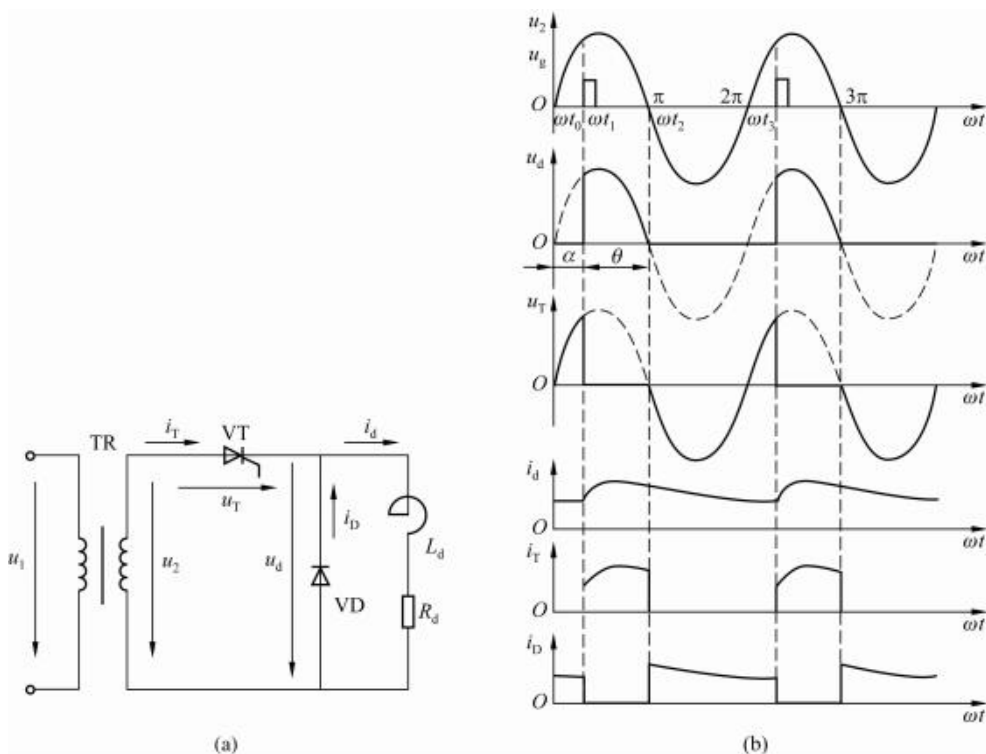


图 1-12 有续流二极管的单相半波大电感负载可控整流电路及工作过程

(a) 电路图; (b) 工作过程

当 $\omega t_1 < \omega t < \omega t_2$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 > 0$,晶闸管 VT 承受正向阳极电压且保持导通状态,即 $u_T = 0$ 。直流侧负载保持有电流通过且产生压降,即 $U_d > 0, i_d > 0$ 。续流二极管 VD 承受反压不导通,即 $i_D = 0$,此时负载上电压波形与不加二极管 VD 时相同。

当 $\omega t = \omega t_2$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 = 0$,此时,续流二极管 VD 和晶闸管 VT 同时导通,对电感 L_d 续流,即 $i_d = i_T + i_D$;晶闸管通态压降近似为零,即 $u_T = 0$;直流侧负载等于二极管压降,即 $u_d = 0$ 。

当 $\omega t_2 < \omega t < \omega t_3$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 < 0$,此时通过续流二极管 VD 给晶闸管 VT 施加反向阳极电压,即 $u_T = u_2 < 0$;晶闸管 VT 关断,即 $i_T = 0$;续流二极管 VD 对电感 L_d 续流导通,即 $i_d = i_D > 0$;直流侧负载电压等于二极管压降,即 $u_d = 0$ 。

3) 各电量的计算

(1) 输出端电压和电流的平均值。由于输出电压波形与电阻性负载波形相同,所以 U_d 与 I_d 计算式与电阻性负载时相同,即

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-14)$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-15)$$

(2) 负载、晶闸管及续流二极管电流值。当电感量足够大时, 流过负载的电流波形可以看成是一条平行于横轴的直线, 即标准直流, 晶闸管电流 i_T 与续流管电流 i_D 均为矩形波。

若负载电流的平均值为 I_d , 则流过晶闸管与续流管的电流平均值分别为

$$I_{dT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d = \frac{\theta_T}{2\pi} I_d \quad (1-16)$$

$$I_{dD} = \frac{\pi + \alpha}{2\pi} I_d = \frac{\theta_D}{2\pi} I_d \quad (1-17)$$

流过晶闸管与续流二极管的电流有效值分别为

$$I_T = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d = \sqrt{\frac{\theta_T}{2\pi}} I_d \quad (1-18)$$

$$I_D = \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}} I_d = \sqrt{\frac{\theta_D}{2\pi}} I_d \quad (1-19)$$

(3) 晶闸管和续流二极管承受的最大平均电压为 $\sqrt{2}U_2$, 移相范围为 $0 \sim \pi$, 与电阻性负载时相同。

二、单相桥式全控整流电路

1. 电阻性负载

1) 电路组成及工作过程

单相桥式全控整流电路如图 1-13(a) 所示, 晶闸管 VT_1 、 VT_2 采用共阴极接法, 晶闸管 VT_3 、 TV_4 采用共阳极接法。如果共阴极的两个晶闸管同时触发, 阳极电位高的晶闸管导通后是另一个晶闸管反向电压, 因此只有阳极电位高的晶闸管导通。同样共阳极的两个晶闸管同时触发时, 只有阴极电位低的晶闸管导通。电路中由 VT_1 、 VT_2 和 VT_3 、 TV_4 构成两个整流路径, 对应触发脉冲 u_{g1} 与 u_{g3} 、 u_{g2} 与 u_{g4} 必须成对出现, 且两组门极触发信号相位保持 180° 相差。

图 1-13(b) 为单相桥式全控整流电路带电阻性负载时的工作过程。在交流电压 u_2 的一个周期内, 用 ωt 坐标点将波形分为四段, 下面对波形进行逐段分析。

(1) 当 $\omega t_0 \leq \omega t < \omega t_1$ 时, 输入电压瞬时值 $u_2 \geq 0$, 所有晶闸管门极都没有触发电压, 即 $u_g = 0$, 所有晶闸管保持阻断状态, 其中晶闸管 VT_1 和 VT_3 承受的电压 $u_{T1} = u_{T3} = \frac{u_2}{2} \geq 0$; 电阻 R_d 无电流通过, 也无压降, 即 $U_d = 0, i_d = 0$ 。

(2) 当 $\omega t_1 \leq \omega t < \omega t_2$ 时, 输入电压瞬时值 $u_2 > 0$, 在 $\omega t = \omega t_1$ 时刻, 给晶闸管 VT_1 和 VT_3 门极施加触发电压 u_{g1} 、 u_{g3} , 即 $u_{g1} > 0, u_{g3} > 0$; 晶闸管 VT_1 、 VT_3 承受正向阳极电压导通, 即 $u_{T1} = u_{T3} = 0$; 直流侧负载有电流通过且产生压降, 即 $u_d = u_2 > 0, i_d > 0$ 。

(3) 当 $\omega t_2 \leq \omega t < \omega t_3$ 时, 输入电压瞬时值 $u_2 \leq 0$, 在 $\omega t = \omega t_2$ 时刻, 晶闸管 VT_1 、 VT_3 自然关断, 晶闸管 VT_2 、 TV_4 门极仍没有施加触发电压, 所以全部晶闸管保持阻断状态, 其中晶闸管 VT_1 和 VT_3 承受的电压 $u_{T1} = u_{T3} = \frac{u_2}{2} \leq 0$; 电阻 R_d 无电流通过, 也无压降, 即 $U_d = 0, i_d = 0$ 。

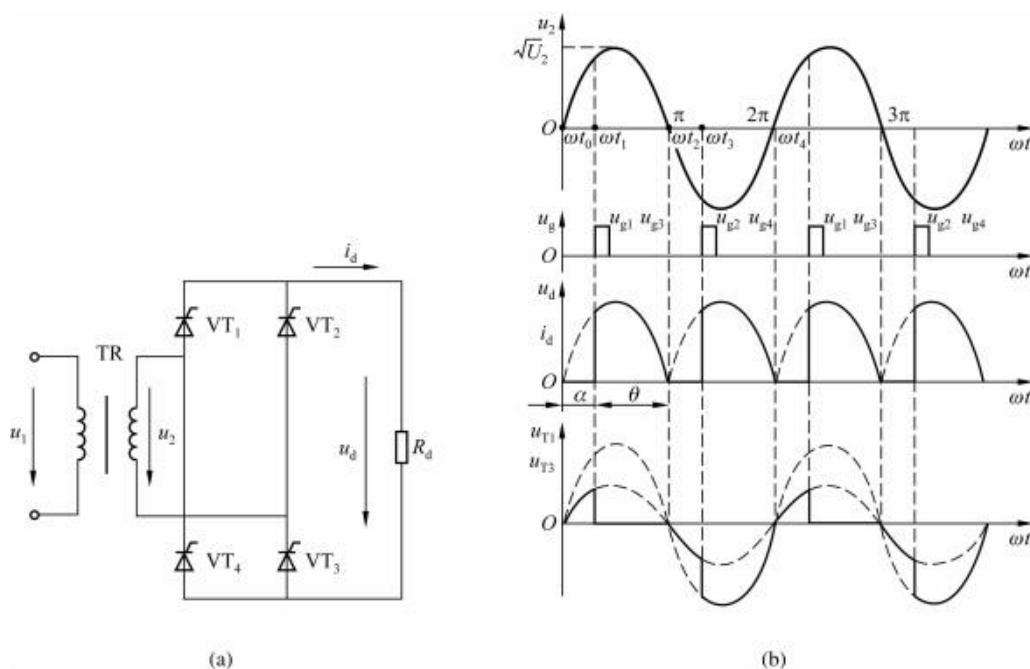


图 1-13 单相桥式全控整流电路及工作过程

(a) 电路图; (b) 工作过程

(4) 当 $\omega t_3 \leq \omega t < \omega t_4$ 时, 输入电压瞬时值 $u_2 < 0$; 在 $\omega t = \omega t_3$ 时刻, 晶闸管 VT_2 和 VT_4 门极施加触发电压 u_{g2} 、 u_{g4} , 即 $u_{g2} > 0, u_{g4} > 0$; 晶闸管 VT_2 、 VT_4 承受正向阳极电压导通, 即 $u_{T2} = u_{T4} = 0$; 而晶闸管 VT_1 、 VT_3 的压降 $u_{T1} = u_{T3} = u_2 < 0$; 直流侧负载有电流通过且产生压降, 即 $u_d = |u_2| > 0, i_d > 0$ 。

2) 各电量的计算

单相桥式全控整流电路带电阻性负载时有效移相范围为 $0 \sim \pi$, 在此区间负载上直流输出电压的平均值 U_d 为

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-20)$$

电流平均值为

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} \quad (1-21)$$

晶闸管可能承受的最大正、反向电压均为 $\sqrt{2} U_2$ 。

2. 电感性负载

1) 电路组成及工作过程

图 1-14 为单相桥式全控整流电路带电感性负载时的电路及工作过程。在交流电压 u_2 的一个周期内, 用 ωt 坐标点将波形分为四段, 下面对波形进行逐段分析。

(1) 当 $\omega t_1 \leq \omega t < \omega t_2$ 时, 输入电压瞬时值 $u_2 > 0$, 在 $\omega t = \omega t_1$ 时刻, 给晶闸管 VT_1 和 VT_3 门极施加触发电压 u_{g1} 、 u_{g3} , 即 $u_{g1} > 0, u_{g3} > 0$; 晶闸管 VT_1 、 VT_3 承受正向阳极电压导通, 即 $u_{T1} = u_{T3} = 0$; 直流侧负载有电流通过且产生压降, 即 $u_d = u_2 > 0, i_{T1} = i_{T3} = i_d > 0$ 。

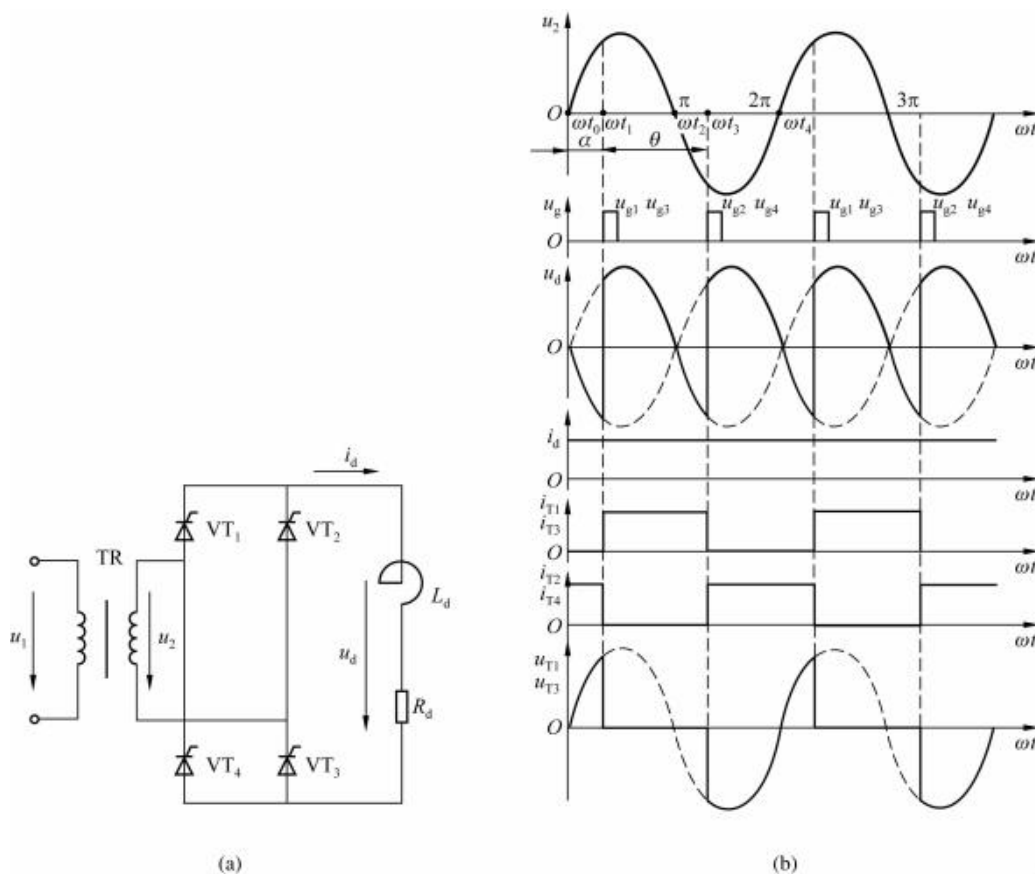


图 1-14 单相桥式全控整流电路带感性负载时的电路及工作过程

(a) 电路图; (b) 工作过程

(2) 当 $\omega t_2 \leq \omega t < \omega t_3$ 时, 输入电压瞬时值 $u_2 \leq 0$, 但数值很小, 在数值上小于电感 L_d 产生的感应电动势 u_L , 所以晶闸管 VT_1 、 VT_3 继续承受正向阳极电压且保持导通状态, 即 $u_{T1} = u_{T3} = 0$; 直流侧负载有电流通过且产生压降, 即 $u_d = u_2 \leq 0$, $i_{T1} = i_{T3} = i_d > 0$ 。

(3) 当 $\omega t_3 \leq \omega t < \omega t_4$ 时, 输入电压瞬时值 $u_2 < 0$; 在 $\omega t = \omega t_3$ 时刻, 给晶闸管 VT_2 、 VT_4 门极施加触发电压 u_{g2} 、 u_{g4} , 即 $u_{g2} > 0$, $u_{g4} > 0$; 晶闸管 VT_2 、 VT_4 承受正向阳极电压导通, 即 $u_{T2} = u_{T4} = 0$; 而晶闸管 VT_1 、 VT_3 的压降 $u_{T1} = u_{T3} = u_2 < 0$; 直流侧负载有电流通过且产生压降, 即 $u_d = u_2 > 0$, $i_{T2} = i_{T4} = i_d > 0$ 。

(4) 当 $\omega t_0 \leq \omega t < \omega t_1$ 时, 输入电压瞬时值 $u_2 \geq 0$, 但数值很小, 在数值上小于电感 L_d 产生的感应电动势 u_L , 所以晶闸管 VT_2 、 VT_4 继续承受正向阳极电压且保持导通状态, 即 $u_{T2} = u_{T4} = 0$, 而晶闸管 VT_1 、 VT_3 的压降 $u_{T1} = u_{T3} = u_2 \geq 0$; 直流侧负载有电流通过且产生压降, 即 $u_d = -u_2 \leq 0$, $i_{T2} = i_{T4} = i_d > 0$ 。

2) 各电量的计算

单相桥式全控整流电路带感性负载不接续流二极管时, 有效移相范围为 $0 \sim \pi/2$, 在此区间负载上直流输出电压的平均值 U_d 为

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.9 U_2 \cos \alpha \quad (1-22)$$

晶闸管可能承受的最大正、反向电压均为 $\sqrt{2}U_2$ 。

3. 电感性负载并接续流二极管

1) 电路组成及工作过程

图 1-15 为单相桥式全控整流电路带电感性负载并接续流二极管的电路及工作过程。在交流电压 u_2 的一个周期内,用 ωt 坐标点将波形分为四段,下面对波形进行逐段分析。

(1)当 $\omega t_0 \leq \omega t < \omega t_1$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 \geq 0$,续流二极管导通,晶闸管 VT_2 、 VT_4 通过续流二极管承受反向阳极电压且而关断,所有晶闸管不导通,即 $i_T = 0$,其中晶闸管 VT_1 的压降 $u_{T1} = u_2/2 \geq 0$;直流侧负载通过续流二极管保持电流,即 $u_d = 0, i_D = i_d > 0$ 。

(2)当 $\omega t_1 \leq \omega t < \omega t_2$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 > 0$;在 $\omega t = \omega t_1$ 时刻,给晶闸管 VT_1 、 VT_3 门极施加触发电压 u_{g1} 、 u_{g3} ,即 $u_{g1} > 0, u_{g3} > 0$;晶闸管 VT_1 、 VT_3 承受正向阳极电压导通,即 $u_{T1} = u_{T3} = 0$;直流侧负载有电流通过且产生压降,即 $u_d = u_2 > 0, i_{T1} = i_{T3} = i_d > 0$ 。

(3)当 $\omega t_2 \leq \omega t < \omega t_3$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 \leq 0$;续流二极管导通,其中晶闸管 VT_1 、 VT_3 通过续流二极管承受反向阳极电压且关断,所有晶闸管不导通,即 $i_T = 0$,晶闸管 VT_1 的压降 $u_{T1} = u_2/2 \leq 0$;直流侧负载通过续流二极管保持电流,即 $u_d = 0, i_D = i_d > 0$ 。

(4)当 $\omega t_3 \leq \omega t < \omega t_4$ 时,输入电压瞬时值 $u_2 < 0$,在 $\omega t = \omega t_3$ 时刻,给晶闸管 VT_2 、 VT_4 门极施加触发电压 u_{g2} 、 u_{g4} ,即 $u_{g2} > 0, u_{g4} > 0$;晶闸管 VT_2 、 VT_4 承受正向阳极电压导通,即 $u_{T2} = u_{T4} = 0$;而晶闸管 VT_1 、 VT_3 的压降 $u_{T1} = u_{T3} = u_2 < 0$,直流侧负载有电流通过且产生压降,即 $u_d = |u_2| > 0, i_{T2} = i_{T4} = i_d > 0$ 。

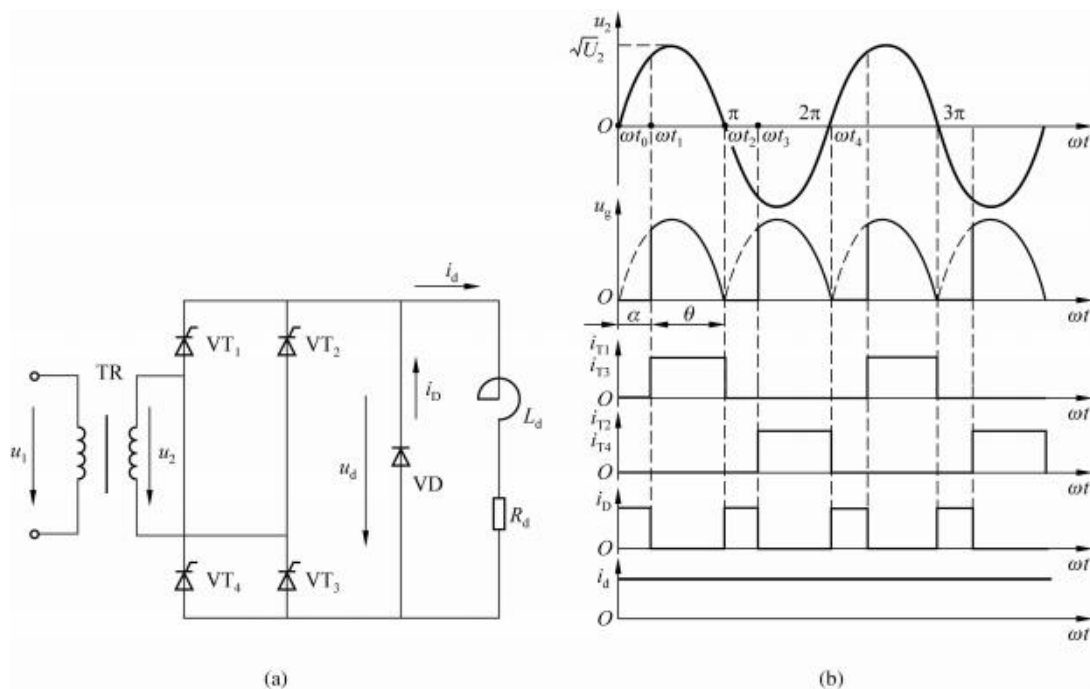


图 1-15 单相桥式全控整流电路带电感性负载并接续流二极管的电路及工作过程

(a) 电路图; (b) 工作过程

2) 各电量的计算

单相桥式全控整流电路带感性负载接续流二极管时,有效移相范围为 $0 \sim \pi$,在此区间负载上直流输出电压的平均值 U_d 为

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-23)$$

晶闸管可能承受的最大正、反向电压均为 $\sqrt{2} U_2$ 。

例 1-3 单相桥式全控整流电路带大电感负载, $U_2 = 220 \text{ V}$, $R_d = 4 \Omega$, 计算当 $\alpha = 60^\circ$ 时, 输出电压、电流的平均值以及流过晶闸管的电流平均值和有效值。若负载两端并接续流二极管, 如图 1-15 所示, 则输出电压、电流的平均值又是多少? 流过晶闸管和续流二极管的电流平均值和有效值又是多少?

解: (1) 不接续流二极管时, 有

$$U_d = 0.9 U_2 \cos \alpha = 0.9 \times 220 \times \cos 60^\circ \text{ V} = 99 \text{ V}$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{99}{4} \text{ A} = 24.75 \text{ A}$$

因负载电流是由两组晶闸管轮流导通提供的, 故流过晶闸管的电流平均值和有效值为

$$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d = \frac{1}{2} \times 24.75 \text{ A} \approx 12.38 \text{ A}$$

$$I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 24.75 \text{ A} \approx 17.5 \text{ A}$$

(2) 加续流二极管时, 有

$$U_d = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 \times 220 \times \frac{1 + \cos 60^\circ}{2} \text{ V} = 148.5 \text{ V}$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{148.5}{4} \text{ A} \approx 37.13 \text{ A}$$

负载电流由两组晶闸管及续流二极管共同提供, 所以每个晶闸管的导通角均为 $\theta_T = \pi - \alpha$, 续流二极管 VD 的导通角为 $\theta_D = 2\alpha$, 所以流过晶闸管和续流二极管的电流平均值和有效值分别为

$$I_{dT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d = \frac{180^\circ - 60^\circ}{360^\circ} \times 37.13 \text{ A} = 12.38 \text{ A}$$

$$I_{dD} = \frac{2\alpha}{2\pi} I_d = \frac{\alpha}{\pi} I_d = \frac{60^\circ}{180^\circ} \times 37.13 \text{ A} \approx 12.38 \text{ A}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d = \sqrt{\frac{180^\circ - 60^\circ}{360^\circ}} \times 37.13 \text{ A} \approx 21.44 \text{ A}$$

$$I_D = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} I_d = \sqrt{\frac{60^\circ}{180^\circ}} \times 37.13 \text{ A} \approx 21.44 \text{ A}$$

三、单相桥式半控整流电路

在单相桥式全控整流电路中, 由于每次都要同时触发两只晶闸管, 因此线路比较复杂。为了简化电路, 实际上可以采用一只晶闸管来控制导电回路, 然后用一只整流二极管来代替另一只晶闸管。把图 1-15 中的 VT_3 和 VT_4 换成二极管 VD_1 和 VD_2 , 就形成了单相桥式半控整流电路, 下面介绍单相桥式半控整流电路带不同负载时的工作情况。

1. 电阻性负载

1) 电路组成及工作过程

单相桥式半控整流电路可以看成是单相桥式全控整流电路的一种简化形式。其结构一般是将晶闸管 VT_1 、 VT_2 接成共阴极，二极管 VD_1 、 VD_2 接成共阳极，如图 1-16 所示。晶闸管 VT_1 、 VT_2 可以采用同一组脉冲触发，两组脉冲相位间隔必须保持 180° 。由于在 a 点和 b 点之间经 VD_1 、 VD_2 有一漏电流流通路径，因此哪个二极管的阴极所处的电位低，哪个二极管就导通，即二极管 VD_1 、 VD_2 能否导通仅取决于电源电压 u_2 的正、负，与 VT_1 、 VT_2 是否导通及负载性质均无关。在任意瞬时，电路中总会有一个二极管导通，因此晶闸管只承受正压而不承受反压，最小值是零；二极管只承受反压而不承受正压，最大值是零。

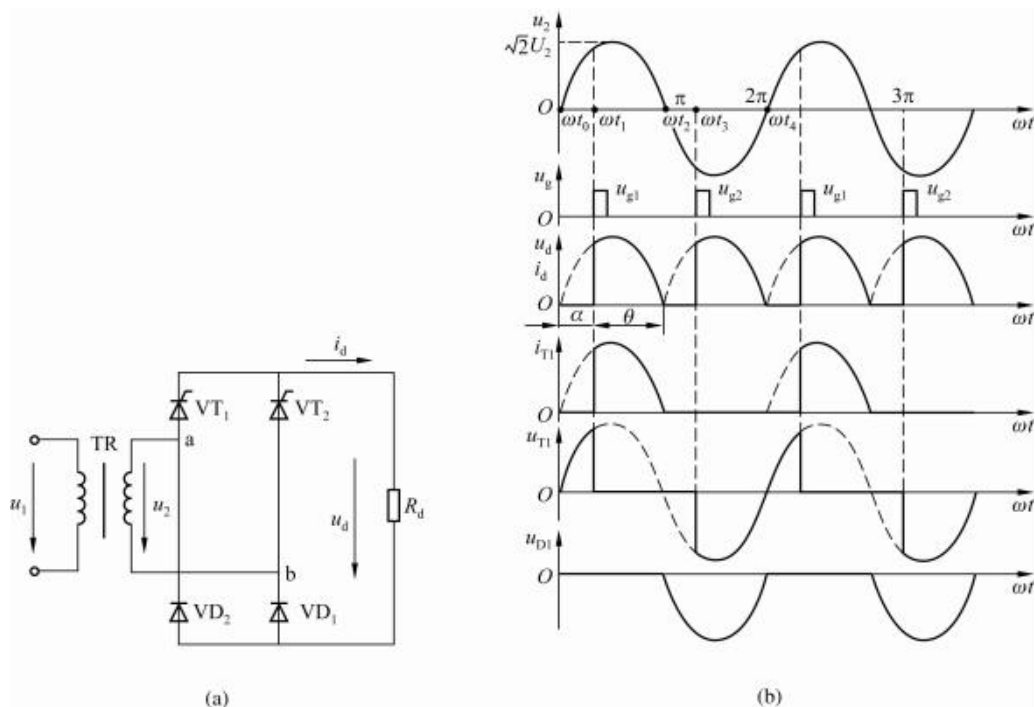


图 1-16 单相桥式半控整流电路带电阻负载的电路及工作过程

(a) 电路图；(b) 工作过程

在交流电压 u_2 的一个周期内，用 ωt 坐标点将波形分为四段。

(1) 当 $\omega t_0 \leq \omega t < \omega t_1$ 时，输入电压瞬时值 $u_2 \geq 0$ ，晶闸管门极没有触发电压，即 $u_g = 0$ ，所有晶闸管保持阻断状态，其中晶闸管 VT_1 承受的电压 $u_{T1} = u_2 \geq 0$ ；二极管 VD_1 导通，其压降 $u_{D1} = 0$ ；直流侧负载电阻 R_d 无电流通过，也无压降，即 $u_d = 0$ ， $i_d = i_T = 0$ 。

(2) 当 $\omega t_1 \leq \omega t < \omega t_2$ 时，输入电压瞬时值 $u_2 > 0$ ，在 $\omega t = \omega t_1$ 时刻，给晶闸管 VT_1 门极施加触发电压 u_{g1} ，即 $u_{g1} > 0$ ；晶闸管 VT_1 承受正向阳极电压导通，即 $u_{T1} = 0$ ；二极管 VD_1 导通，其压降 $u_{D1} = 0$ ；直流侧负载电阻 R_d 有电流通过且产生压降，即 $u_d = u_2 > 0$ ， $i_d = i_{T1} = i_{D1} > 0$ 。

(3) 当 $\omega t_2 \leq \omega t < \omega t_3$ 时，输入电压瞬时值 $u_2 \leq 0$ ，在 $\omega t = \omega t_2$ 时刻，晶闸管 VT_1 和二二极管 VD_1 自然关断，二极管 VD_2 导通，晶闸管 VT_2 门极仍没有施加触发电压而不导通；晶闸管 VT_1 承受电压 $u_{T1} = 0$ ；二极管 VD_1 压降 $u_{D1} = u_2 \leq 0$ ；直流侧负载电阻 R_d 无电流通过，也无压降，即 $u_d = 0$ ， $i_d = i_T = 0$ 。