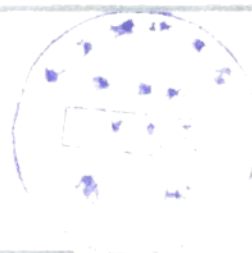


534680

高等纺织院校教材

交流调速系统及其应用



纺织工业出版社

前 言

《交流调速系统及其应用》是根据1986年9月纺织工业部召开的纺织院校工业电气自动化专业教育委员会第二次会议制定的编写计划和大纲进行编写的。本书是高等工业院校工业电气自动化专业必修课——《交流调速系统及其应用》课程的教学用书。

本书共分八章。第一章为异步电动机调压调速系统；第二章是绕线式异步电动机串级调速系统；第三章介绍了晶闸管交-直-交逆变器和交-交变频器以及电流型逆变器的多重化技术；第四章为自关断型元件逆变器，对大功率晶体管（GTR）、可关断晶闸管（GTO）和功率金属氧化物场效应晶体管（MOS-FET）三种自关断型元件的工作特性、逆变器线路及保护等问题进行了分析；第五章着重讨论了变频调速控制电路及其实现方法；第六章为交流电动机变频调速系统，讨论了转速开环电压闭环、锁相控制、转差频率控制和微机控制的变频调速系统；第七章为异步电动机矢量变换控制系统；第八章为无换向器电动机调速系统。

本书绪论、第一章、第二章，第三章的第一节、第二节和第四至第八章由中国纺织大学徐银泉编写，第三章第三至第七节由黄炯编写，全书由徐银泉担任主编。

本书由西北纺织工学院伍恩华教授担任主审，该院的丁学文、秦兰双，郑州纺织工学院庄惠震，天津纺织工学院陈素波，苏州丝绸工学院朱礼通，山东纺织工学院马仁富等同志参加了审稿工作，对书稿提出了许多宝贵意见；在本书编写过程中，还得到中国纺织大学自动控制系统学科组全体同志的大力支持和帮助，并提出了宝贵意见，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中错误或不当之处，望广大读者批评指正。

编 者

1988年

目 录

绪论	(1)
第一章 交流调压调速系统	(3)
第一节 晶闸管移相调压电路	(4)
一、单相移相调压电路	(4)
二、三相移相调压电路	(8)
第二节 异步电动机调压调速特性分析	(14)
一、异步电动机调压时的机械特性	(14)
二、异步电动机调压系统的组成	(14)
三、系统的静特性与动特性分析	(16)
第三节 调压调速时的功率损耗和变极调压调速	(19)
一、调压调速时的功率损耗	(19)
二、变极调压调速	(21)
第四节 交流调压调速的应用	(21)
一、导布辊调压调速系统分析	(21)
二、交流调压的其它应用	(24)
第五节 电磁调速电动机	(25)
一、电磁调速电动机的工作原理	(25)
二、梳棉机晶闸管控制电磁调速电动机调速系统	(26)
三、电磁调速电动机恒张力调速系统	(28)
四、电磁调速电动机在风机水泵交流调速节能中的应用	(29)
习题	(30)
第二章 绕线式异步电动机的串级调速系统	(31)
第一节 串级调速的原理和装置	(31)
一、串级调速的原理	(31)
二、串级调速的四种基本工作状态	(32)
三、串级调速的分类和装置	(33)
第二节 串级调速系统转子整流电路的特殊工作状态	(35)
一、整流器的第一工作状态	(36)
二、整流器的第二工作状态	(39)
三、整流器的第三工作状态	(42)
第三节 串级调速系统的调速特性和机械特性	(43)
一、串调系统的调速特性	(43)
二、串调系统的机械特性	(45)

第四节 晶闸管串级调速系统的效率和功率因数	(50)
一、串级调速系统的效率	(50)
二、串级调速系统的功率因数	(51)
第五节 晶闸管串级调速系统的设计	(55)
一、异步电动机容量的选择	(55)
二、逆变变压器的设计	(56)
三、直流回路平波电抗器的设计	(57)
四、起动方式的选择	(59)
五、继电器接触器控制电路的设计	(60)
六、双闭环系统的组成和系统动态结构图	(61)
第六节 晶闸管串级调速在纺织厂通风机上的应用	(64)
一、纺织厂通风机晶闸管串级调速的主电路方案	(64)
二、KGJAO1型晶闸管串级调速装置	(66)
第七节 晶闸管串级调速系统的改进和发展	(70)
一、纵续控制和差相控制的串级调速系统	(70)
二、采用强迫换相逆变器的串级调速系统	(71)
三、斩波式逆变器串级调速系统	(71)
四、超同步串级调速系统	(74)
习题	(75)
第三章 晶闸管变频器	(76)
第一节 晶闸管变频器的分类及其特性	(76)
一、交-交变频器	(76)
二、交-直-交变频器	(76)
三、电压型和电流型变频器	(77)
第二节 具有辅助晶闸管换流的电压型逆变器	(78)
一、主电路及其工作原理	(79)
二、换流原理分析	(80)
三、换流参数的计算	(82)
四、辅助晶闸管换流的三相逆变器的辅助充电问题	(82)
五、麦克墨莱逆变器的特点	(83)
六、麦克墨莱逆变电路的改进	(83)
七、导通制的选择和输出电压波的绘制与计算	(84)
八、谐波分析	(86)
第三节 串联电感式电压型逆变器	(89)
一、主电路及其工作原理	(89)
二、换流原理分析	(90)
三、换流参数的计算	(92)
四、串联电感式逆变器的换流能量反馈问题	(93)

五、电路的特点	(94)
第四节 串联二极管式电压型逆变器	(95)
一、主电路及其工作原理	(95)
二、电感性负载下换流原理和输出电压波形分析	(95)
三、电路的特点	(96)
第五节 串联二极管式电流型逆变器	(97)
一、异步电动机等效电路的简化	(98)
二、主电路及其工作原理	(98)
三、换流原理分析	(99)
四、换流参数的计算	(101)
五、具有辅助充电的电流型逆变器	(105)
六、换流尖峰电压吸收电路	(105)
第六节 多单元逆变器的级联技术	(106)
一、谐波转矩	(106)
二、多单元逆变器的级联方式	(107)
第七节 交-交变频器	(110)
一、正弦型交-交变频器	(110)
二、矩形波交-交变频器	(117)
三、交-交直接变频调速的优缺点	(118)
习题	(118)
第四章 自关断型元件逆变器	(121)
第一节 自关断型元件的工作特性	(121)
一、大功率晶体管 (GTR) 的工作特性	(121)
二、功率金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOS-FET) 的工作特性	(123)
三、可关断晶闸管 (GTO) 的工作特性	(124)
第二节 功率晶体管开关线路	(126)
一、功率晶体管在开关状态下的特点	(126)
二、功率晶体管开关过程中尖峰电压的抑制和吸收	(127)
三、减少晶体管开关损耗的措施	(128)
四、并联连接	(130)
第三节 晶体管开关线路吸收电路的计算	(131)
一、电阻性负载的晶体管开关损耗	(131)
二、电感性负载的晶体管开关损耗	(132)
三、吸收电路参数的计算	(133)
第四节 晶体管逆变器的主电路	(135)
一、晶体管逆变器线路的发展简况	(135)
二、它激单相线路	(136)
三、它激三相线路	(137)

第五节 晶体管斩波调压逆变器.....	(138)
一、晶体管斩波调压逆变器的组成和工作原理.....	(138)
二、斩波频率的选择.....	(139)
三、滤波器参数的计算.....	(139)
第六节 功率MOS-FET逆变器.....	(141)
一、主电路.....	(141)
二、保护.....	(141)
三、并联.....	(142)
四、驱动电路.....	(142)
第七节 可关断晶闸管逆变器.....	(143)
一、门极电路.....	(143)
二、主电路和GTO的保护.....	(144)
习题.....	(146)
第五章 变频调速控制电路及其实现.....	(147)
第一节 频率发生器.....	(147)
一、模拟式频率发生器.....	(147)
二、高稳定度数字式频率发生器.....	(150)
第二节 环形计数器.....	(153)
一、固定脉宽小晶闸管环计.....	(153)
二、半固定脉宽集成电路环计.....	(155)
三、CMOS六分频环计.....	(155)
四、CMOS十二分频环计.....	(158)
第三节 脉冲放大电路.....	(159)
一、光电耦合器.....	(159)
二、带反偏压的脉冲放大电路.....	(160)
三、高频脉冲放大电路.....	(161)
第四节 函数发生器.....	(161)
一、斜坡函数发生器(给定积分器).....	(161)
二、方波和三角波发生器.....	(163)
第五节 延时电路.....	(164)
第六节 脉冲宽度调制(PWM)电路.....	(165)
一、脉宽调制的方法.....	(165)
二、一种简单实用的等脉宽调制电路.....	(167)
三、模拟电路实现的正弦脉宽调制电路.....	(171)
四、数字电路实现的正弦脉宽调制电路.....	(174)
第七节 保护和检测电路.....	(180)
一、过流和过载保护控制电路.....	(180)
二、错相保护控制电路.....	(182)

三、欠压和过压保护.....	(182)
四、电流和电压检测电路.....	(183)
习题.....	(184)
第六章 交流电动机变频调速系统.....	(187)
第一节 异步电动机变频调速的原则及其机械特性.....	(187)
一、恒转矩变频调速.....	(187)
二、恒最大转矩变频调速.....	(188)
三、恒功率变频调速.....	(190)
第二节 转速开环电压闭环变频调速系统.....	(191)
一、PAM变频调速系统.....	(191)
二、采用HEF4752V的SPWM变频调速系统.....	(191)
第三节 锁相控制变频调速系统.....	(194)
一、锁相控制的工作原理.....	(194)
二、转速给定频率源和转速反馈编码器.....	(195)
三、锁相环电路.....	(196)
四、控制系统的特点.....	(198)
第四节 转差频率控制变频调速系统.....	(198)
一、转差频率控制的基本思想.....	(199)
二、转差频率控制的条件及其实现.....	(199)
三、电压型变频调速转差频率控制系统框图.....	(200)
四、转差频率控制系统的各种工作情况.....	(201)
第五节 微机转差频率控制SPWM变频调速系统.....	(203)
一、规则采样原理和方法.....	(203)
二、脉宽及前后沿计算公式.....	(204)
三、计算机实现SPWM波的几种方法.....	(205)
四、系统控制过程的量化和对计算机控制精度的要求.....	(205)
五、SPWM波生成器的硬件结构.....	(206)
六、SPWM波生成器的工作原理和软件.....	(207)
七、转差频率控制SPWM变频调速系统.....	(207)
第六节 交流电动机变频调速应用实例分析.....	(210)
一、外转子永磁式同步电动机晶闸管变频调速.....	(210)
二、电动磨头晶体管变频调速.....	(214)
习题.....	(215)
第七章 异步电动机矢量变换控制系统.....	(217)
第一节 矢量变换控制的基本思想.....	(217)
第二节 坐标变换和矢量变换.....	(218)
一、三相/两相变换 ($3\phi/2\phi$).....	(219)
二、矢量旋转变换 (VR).....	(220)

三、直角坐标/极坐标变换 (K/P)	(221)
第三章 矢量变换控制的异步电动机数学模型	(222)
一、双轴理论和原型电机的电压方程	(223)
二、用 α - β 轴坐标系描述的异步电动机数学模型	(224)
三、用M-T轴坐标系描述的异步电动机数学模型	(225)
四、数学模型中各变量的关系	(228)
五、两种数学模型比较	(229)
第四节 异步电动机磁通的检测和运算	(230)
一、磁通检测法	(230)
二、磁通观察器法	(232)
第五节 矢量变换控制系统	(234)
一、原理性的异步电动机矢量变换控制系统	(234)
二、电流型逆变器供电的异步电动机转差型矢量变换控制系统	(235)
三、微机矢量变换控制SPWM变频调速系统	(237)
第六节 矢量变换控制系统的特点及应用	(239)
习题	(240)
第八章 无换向器电动机调速系统	(241)
第一节 无换向器电动机的工作原理	(241)
一、无换向器电动机的基本原理	(241)
二、无换向器电动机的组成	(242)
第二节 无换向器电动机的换流	(244)
一、自然换流法 (反电势换流法)	(244)
二、断续电流换流法	(245)
第三节 无换向器电动机的基本特性及调速方法	(245)
一、电枢反应和换流剩角	(246)
二、负载特性和过载能力	(247)
三、机械特性和调速方法	(247)
第四节 无换向器电动机调速系统	(250)
一、无换向器电动机调速系统的组成	(250)
二、正反转运行	(251)
三、 ν 信号处理	(252)
第五节 交流无换向器电动机及其在涤纶牵伸加捻机上的应用	(255)
一、主电路	(255)
二、分配器	(257)
三、系统工作原理	(257)
四、交流无换向器电动机在涤纶牵伸加捻机上的应用	(258)
习题	(259)
附录	(260)

附录 I 具有辅助晶闸管换流的逆变器换流参数计算公式的推导·····	(260)
附录 II 谐波失真度公式式 (3-16) 的证明·····	(263)
附录 III 三相串联电感式逆变器换流参数计算公式的推导·····	(265)
主要参考文献·····	(270)

绪 论

80年代以来,交流调速系统已经进入到能与传统的直流调速系统相抗争的地位,在各工业发达的国家,已经出现了用交流调速系统取代直流调速系统的热潮,从数控机床和机器人用的小功率伺服电机到上万千瓦的重型机械主传动,都采用了交流调速技术。

纵观电力传动的发展过程,交、直流两种传动方式共存于各个生产领域,随着工业技术的发展,它们相互竞争,相互促进。过去,由于直流传动调速系统的性能指标优于交流传动调速系统,因此直流传动调速系统一直在调速领域内居首位。但由于直流电动机具有机械整流器和电刷,因而存在着维护保养工作量大、电动机安装环境受到限制和难以向大容量、高转速及高电压方向发展等缺点。随着电子技术和自动控制技术的迅速发展以及各种高性能电力电子元器件产品的出现,历来阻碍交流调速技术发展的一些因素相继被克服,原直流调速系统领先的一些技术性能,如宽广的调速范围、较高的稳速精度、快速的动态响应和四象限运行等方面,都已能与直流调速系统相媲美。又由于交流电动机本身具有结构简单、坚固耐用、运行可靠和惯性小等优点,还适用于直流调速无法胜任的场合,如化纤纺丝机等高精度、高速化的生产机械,泵、空压机和电梯等无齿轮化的生产机械以及冶金等大容量的生产机械。因此,交流调速在电气传动领域中已越来越占有重要的地位,它已成为机电一体化的电气传动技术。

目前,交流调速技术在节能方面已获得了广泛的应用,把一些原有的恒速交流电力传动系统改造成为转速可调的交流调速系统,可以取得明显的节电效果。因此,交流调速已成为节能方面的一项关键技术,它在工业中的应用将有广阔的前景。

交流电动机的转速公式为

$$n = \frac{60f_1}{p} (1 - s)$$

可见要改变转速可采取以下三种基本措施: (1) 改变电动机定子供电频率 f_1 ; (2) 改变转差率 s ; (3) 改变极对数 p (改变极对数只能实现有级调速)。

交流调速的方法很多,这里只介绍几种目前已获得广泛应用及带有方向性的交流调速方法。

1. 调压调速 调压调速是改变电动机定子绕组电压进行调速的。晶闸管交流调压是在负载电路(交流电动机等)与恒定电压的交流电源之间加入晶闸管作为交流电压控制器,其控制方式有通断控制和相位控制两种。当以通断控制方式工作时,晶闸管起着快速接触器的作用。在相位控制方式工作时,作为开关的晶闸管在每个电源周期的选定时间将负载与电源接通。虽然这两种控制方式不同,但它们的主电路形式却是相同的。采用晶闸管通断控制方式的交流调压主要用于电加热温度控制,而晶闸管交流调压调速系统中是以相位控制方式为主的。这是一种改变转差率的调速方法。

2. 串级调速 串级调速是将绕线式异步电动机的转差功率回馈到电网的一种比较经济的调速方法,也是一种改变转差率的调速方式。串级调速除了电气串级调速外,还有机械串级调速方式。电气串级调速又分为低同步和超同步两种串级调速方式,低同步串级调速较简单,已获得广泛应用。超同步串级调速控制复杂,动静态理论分析还有待进一步研究。

3. 变频调速 变频调速是改变加到交流电动机定子绕组电源的频率来改变转速的调速方法。这是一种应用范围最广和最有发展前途的交流调速方法,它可以分为交-直-交和交-交变频调速两种方式。随着半导体器件的发展,所使用的功率器件已从普通晶闸管发展到快速晶闸管、可关断晶闸管GTO和大功率晶体管GTR等;控制电路从分立元件向大规模集成电路和微机控制发展。从而使变频调速装置的经济性和可靠性不断提高。

4. 矢量控制 矢量控制是模拟直流电动机的控制特点对交流电动机进行控制。通过电机统一理论和坐标变换方法,把交流电动机的定子电流分解成磁场定向坐标的磁场电流分量和与之相垂直的转矩电流分量并加以控制,从而使交流电动机获得和直流电动机一样的控制性能。矢量控制有两种方式,一种称为磁场定向式,另一种称为滑差频率控制式。

5. 无换向器电动机 无换向器电动机又称晶闸管电动机。由于它是用位置检测器及晶闸管代替了相当于直流电动机的电刷和整流器,所以无换向器电动机的原理和特性与直流电动机相类似。这种新型电动机实质是一种自控式变频调速的同步电动机,它不同于普通的它控式变频调速,它是由转子磁极位置检测信号自动地控制与转子转速相对应的频率,因此,它没有失步现象产生。它具有同步电动机功率因数高的特点,并采用反电势自然换流方法,可省去强迫换流电路。

在交流调速装置中,由于组成功率变换器的电力电子器件工作在开关状态,因此交流调速系统目前还存在着输出电压电流波形非正弦、高次谐波引起电动机发热和电动机转矩脉动等问题;对于目前仍大量使用的晶闸管变频调速装置,由于它具有换流线路,因此效率和功率因数也较低;线路也较复杂;这些都是目前正在研究的课题。

本书作为工业电气自动化专业学生的一门必修课,使学生在掌握了交流调速基本技术的基础上重点了解串级调速和变频调速系统。学习本教材时,应已学过《电机及拖动基础》、《半导体变流技术》、《自动控制理论》和《直流电力拖动自动控制系统》等教材。

第一章 交流调压调速系统

交流调压调速是一种比较简便的调速方法。以前曾采用在异步电动机定子回路中串入饱和电抗器以及在定子侧加调压变压器的方法实现调压调速，其原理线路如图1-1(a)和图1-1(b)所示。这种调压方法简单可靠，因此，目前在一些工业部门中仍有应用。但它们所用的调压设备体积笨重、动特性差，所以现在一般都采用晶闸管调压，其原理线路如图1-1(c)所示。

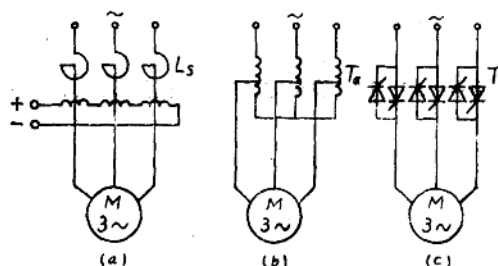


图1-1 异步电动机调压调速原理图

(a) 饱和电抗器调压 (b) 调压变压器调压 (c) 晶闸管调压

晶闸管交流调压具有调速线路简单、调压装置体积小、价格低廉、电动机可以是线绕式异步电动机或是高转差率的鼠笼式异步电动机以及能使电动机在四个象限运行等优点。其主要缺点为它是一种能耗调速方法，转差功率消耗在转子电路中，低速运行时电动机发热严重，效率也较低。另外对恒转矩负载而言，一般鼠笼式异步电动机调压调速范围不大，为此常采用转速负反馈组成闭环系统，如图1-2所示。它由调压电路、异步电动机和控制电路三部分组成。目前这种系统已应用在电梯、通风机、卷扬机、纺织机和造纸机等调速上。

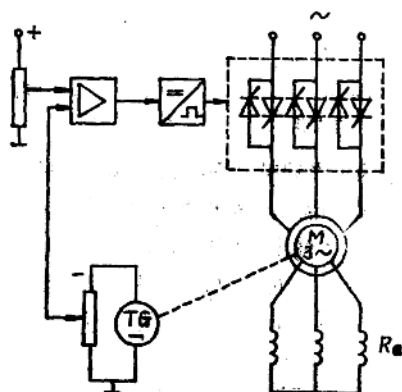


图1-2 晶闸管调压调速系统结构框图

第一节 晶闸管移相调压电路

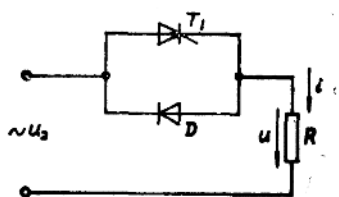
晶闸管移相控制调压电路是改变晶闸管每周导通的起始点，从而调节其输出电压和功率，通常被称为移相调压器。它有单相和三相两类。先分析单相，了解它带不同负载时的工作特点，然后再分析三相交流调压电路。

一、单相移相调压电路

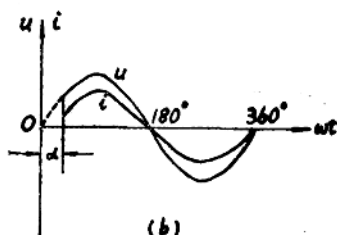
单相晶闸管移相调压电路也有半波和全波两种。半波移相调压电路是用一只晶闸管和一只二极管反并联组成（图1-3）；全波移相调压电路是用两只晶闸管反并联（或一只双向晶闸管）组成（图1-4）。

（一）电阻性负载

在电阻性负载下，单相移相调压电路输出电压和电流波形分别如图1-3(b)和图1-4(b)所示。

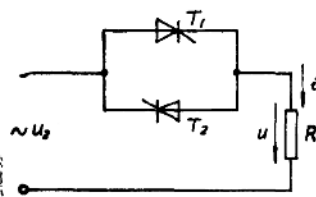


(a)

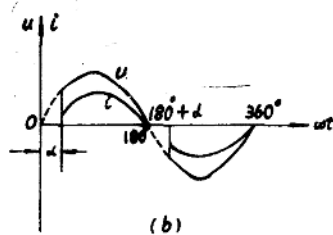


(b)

图1-3 半波移相调压电路
(a) 主电路 (b) 负载电压电流波形



(a)



(b)

图1-4 全波移相调压电路
(a) 主电路 (b) 负载电压电流波形

从波形图可知，当电源电压为正半周时，在控制角为 α 时刻触发晶闸管 T_1 导通，当电压过零时， T_1 自行关断。对于半波相控电路，负半周时二极管导通，电压不能控制，所以电压控制范围是50%~100%。这种电路的输出电流中含有直流分量，易引起电源变压器铁芯的饱和。对于全波相控电路，在 $180^\circ + \alpha$ （电角度，下同）时触发 T_2 导通，如此不断重复，负载上得到正负对称的交流电压。改变晶闸管控制角 α 的大小就可以改变负载上交流电压的大小。这种电路的电压可调范围为0~100%。

下面讨论全波相控电路交流输出电压有效值 U 与 α 的关系。用积分法求半个周期内的均方根值得到

$$U = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\sqrt{2} U_1 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-1)$$

式中 U_1 为输入交流电压有效值。

输出电流的有效值为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_1}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} = I_0 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-2)$$

式中 $I_0 = \frac{U_1}{R}$ 为 $\alpha = 0^\circ$ 时输出电流有效值。

从式 (1-1) 可以看出, 随着 α 的增大, U 值降低, 当 $\alpha = \pi$ 时, $U = 0$ 。所以当单相全波交流调压电路工作于电阻性负载时, 其电压可调范围为 $0 \sim U_1$, 相应的移相范围为 $180^\circ \sim 0^\circ$ 。这种电路在电炉温度控制与剧场的灯光控制中得到广泛应用。

在电阻性负载下, 单相交流调压的调压特性与单相整流电路的情况是一样的, 实际上, 交流调压与可控整流在电源侧的电压、电流波形是完全一样的, 通过晶闸管的电流波形也一样, 移相范围也是 180° , 其调压特性如图 1-5 所示。其中把有功功率与视在功率之比定义为功率因数, 输入的视在功率为 $U_1 I$, 输出的有功功率为 UI , 则有

$$\cos \phi = \frac{UI}{U_1 I} = \frac{U}{U_1} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-3)$$

它就是输出与输入电压有效值之比。

流过晶闸管的平均电流,

$$\begin{aligned} I_{av} &= \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_1 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_1}{R} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \\ &= I_0 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \alpha) \end{aligned} \quad (1-4)$$

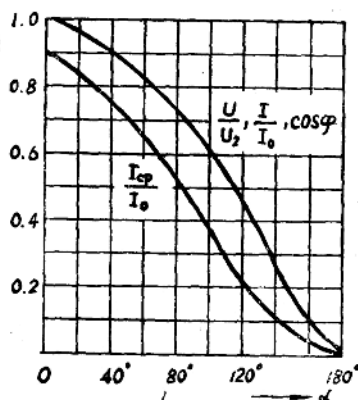


图 1-5 电阻性负载单相交流调压特性

(二) 电感性负载

晶闸管相位控制交流调压电路工作在电感性负载时, 就有许多新的特点, 这是由于在电感性负载中的电流在电源电压过零点变负值以后, 要经过一个延滞角才能降到零, 因此晶闸管也要经过一个延滞角才能关断。晶闸管在关断时将立即承受一个反向电压, 所以在电感性负载情况下需要考虑两个问题, 一是讨论延滞角的大小与控制角 α 和负载功率因数角 φ 的关系; 二是对晶闸管触发脉冲的特殊要求。

电感性负载晶闸管相位控制交流调压电路及其电压、电流波形如图1-6所示。

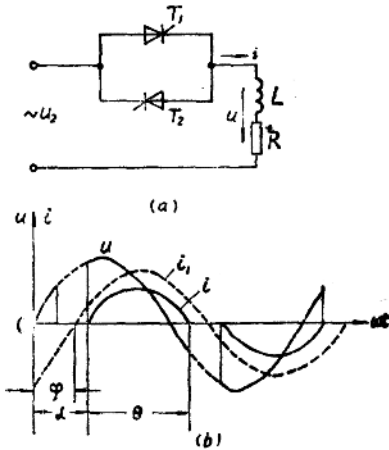


图1-6 电感性负载单相交流调压电路

(a) 主电路 (b) 负载电压和电流波形

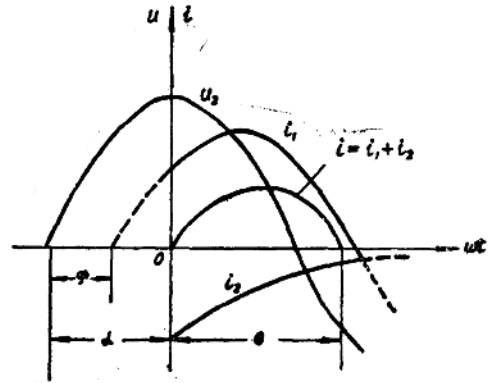


图1-7 电感性负载瞬时电流分析

下面根据交流电路的理论进一步推导导通角 θ 、功率因数角 φ 和控制角 α 的关系。

1. 电感性负载时瞬时电流分析 如图1-7, 假设在 α 时刻定为 $\omega t = 0$ 时刻, 晶闸管触发导通, 相当于开关合闸, 通过晶闸管的电流可以分为强制(稳态)分量 i_1 和自由(瞬态)分量 i_2 两部分。

设外加交流电压为 $u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin(\omega t + \alpha)$, 则 i_1 就是一般交流电路中的稳态电流值:

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} U_2}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) = \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (1-5)$$

式中: $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$;

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R};$$

$$I_0 = \frac{U_2}{Z} \text{ 为 } \alpha = 0 \text{ 时输出电流有效值。}$$

自由分量 i_2 的初始值与 α 有关, 在 $\omega t = 0$ 时刻, 晶闸管导通时电流应从零开始上升, 即 $i_1 + i_2 = 0$, 而此时强制分量为

$$i_1 = \sqrt{2} I_0 \sin(\alpha - \varphi)$$

故此时 $i_2 = -\sqrt{2} I_0 \sin(\alpha - \varphi)$, 随后按指数规律衰减趋于零, 衰减时间常数 $T = \frac{L}{R} = \frac{tg\varphi}{\omega}$, 因此

$$i_2 = -\sqrt{2} I_0 \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t}{tg\varphi}} \quad (1-6)$$

通过晶闸管的电流即负载电流的瞬时值为以上两部分之和, 即

$$i = i_1 + i_2 = \sqrt{2} I_0 [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t}{tg\varphi}}] \quad (1-7)$$

2. 不同功率因数角 φ 的负载下晶闸管导通角 θ 的分析 由图1-7可知, 当电流 i 降到零以后, 因晶闸管电流不能反向, 电流中断。设导通角为 θ , 则 $\omega t = \theta$ 时 $i = 0$, 代入式 (1-7) 可求出 θ 、 α 和 φ 三者之间的关系式:

$$\sin(\theta + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\theta}{tg\varphi}} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 是一个超越方程, 只能用数值解法, 给定一系列 φ 值, 代入式 (1-8) 求出 θ 与 α 的关系, 如图1-8所示。图中 $\beta = \alpha + \theta$ 称为关断角。

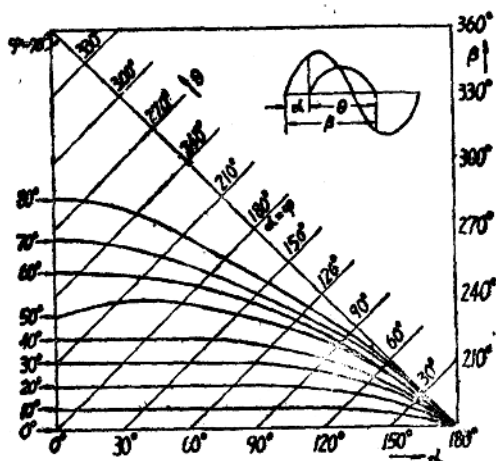


图1-8 不同 φ 角时导通角 θ 关断角 β 与控制角 α 的关系曲线

由图1-8及式 (1-8) 可以看出:

(1) $\varphi = 0^\circ$, 即纯电阻负载时, 式 (1-8) 右端为零, 则左端应满足 $\theta + \alpha = 180^\circ$, 在图1-8中为最下面一条线 (横轴)。相应的负载电压与电流波形见图1-9(a);

(2) $\alpha = \varphi$, 则 $\sin\theta = 0$, $\theta = 180^\circ$, 晶闸管导通 180° , 从式 (1-6) 可以看出 $i = 0$, 不存在电流的自由分量, 在此工作条件下, 反并联晶闸管相当全开放, 负载上得到全电压为正弦波, 在图1-8中为 $\alpha = 0^\circ$ 与 $\theta = 180^\circ$ 的连接线。相应的负载电压与电流波形见图1-9(b);

(3) $\alpha > \varphi$, $\theta < 180^\circ$, 电流出现断续, 其值按式 (1-7) 确定。在图1-8中为 $\alpha = \varphi$ 线右下区域, 相应的负载电压与电流波形见图1-9(c);

(4) $\alpha < \varphi$, 此时可计算求出导通角 $\theta > 180^\circ$, 表示负载的电感作用很大, 这时就提出了对晶闸管触发脉冲的特殊要求, 即必须采用宽脉冲触发。在图1-8中为 $\alpha = \varphi$ 线左上区域。

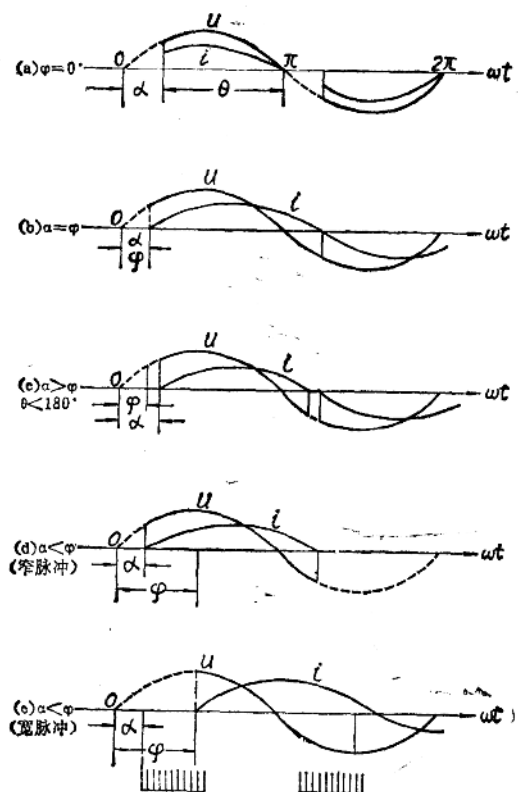


图1-9 不同 α 和 φ 时输出电压和电流波形

如果晶闸管 T_1 与 T_2 是用窄脉冲触发的, 由于 $\alpha < \varphi$, 在 T_1 还未关断时, T_2 两端已加上反向电压, 即使对 T_2 加上触发脉冲也不会使之导通。待 T_1 电流过零关断, T_2 的触发脉冲却已消失, T_2 还是不能导通, 这样在交流调压电路中始终只有一个晶闸管工作, 负载上电压和电流波形正负半波不对称, 会出现直流分量。相应的负载电压和电流波形见图1-9 (d)。为解决这个问题, 可以采用宽脉冲或脉冲列触发。这样在稳定工作时将得到如 $\alpha = \varphi$ 时一样的电流波形, 此时负载上的电压也是全电压正弦波形, 如图1-9 (e) 所示。

综合以上几种工作情况, 当相位控制交流调压电路工作在电感性负载时, 为了可靠有效地工作, 应使晶闸管控制角的移相范围为 $\varphi \leq \alpha \leq 180^\circ$ 。为了避免出现直流分量, 应采用宽脉冲或脉冲列触发方式, 但在宽脉冲线路中要注意晶闸管的控制极损耗功率应不超过允许值。

二、三相移相调压电路

(一) 常用的三相调压电路