

交流调速系统

刘竞成 主编

上海交通大学出版社

交
流
调
速
系
统

二
海
外
通

0013
11

· 203741

交 流 调 速 系 统

刘 竞 成 主 编



上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述了以电力电子器件所组成的交流电动机新型调速技术,介绍了目前国内外广泛应用与研究的各种新型交流电动机调速系统。其中以交流变频调速系统为主,包括矢量控制变频调速系统的原理;还介绍了调压调速系统、串级调速系统与无换向器电动机控制系统等。书中详细分析与讨论了上述系统的工作原理、特性与组成,并有详细的波形分析与必要的参数计算。

本书根据高等学校工业自动化教材编审委员会制定的“交流调速系统”教学大纲要求而编写。可作为高等工业学校工业电气自动化专业学生的教材。对从事工业电气自动化设计、研究与运行工作的工程技术人员也有较好的参考价值。

交 流 调 速 系 统

刘竞成 主编

*

上海交通大学出版社出版

淮 海 中 路 1984 弄 19 号

安徽新华印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 13 字数: 320千字

1984年8月第一版 1984年8月第一次印刷

印数00,001—20,000册

统一书号: 13324·31 科技新书目: 86·236

定价: 2.00元

编 者 的 话

随着电力电子器件可靠性的提高和新器件的开发,可调速的高性能交流电力拖动在工业上的应用日益广泛。为了适应这一技术发展的形势,机械工业部自动化类教材编审委员会在1983年修订的工业电气自动化专业教学计划中,已把“交流调速系统”列为必修课之一。这本教材就是为了满足这门课程的需要而编写的。

1983年8月全国高等学校工业自动化专业教育委员会在昆明举办了交流调速系统讲习讨论会,会上印发了讲义。本教材就是在该讲义的基础上,按照新审定的“交流调速系统”教学大纲修改写成的。

为了使读者对交流调速有较全面的了解,本教材对各类交流调速系统都作了分析与讨论,重点是异步电动机的变频调速系统。本教材详细叙述了采用电力电子技术的各类交流调速系统的工作原理、类型以及系统的组成、特性的分析计算与适用场合,并介绍了交流调速的发展动向。本书可作为高等学校工业电气自动化专业的试用教材,对从事这方面科研、设计与应用的工程技术人员也有很好的参考价值。

本书共分六章。第一章为异步电动机调压调速系统,内容有晶闸管三相交流调压电路的分析、输出电流的谐波分析以及调压调速系统的组成与特性分析、电磁转差离合器调速系统等。第二章为串级调速系统,内容有串级调速原理与基本类型、机械特性分析、系统的能量指标、闭环系统的组成以及系统设计中的问题讨论等。第三章讨论异步电动机变频调速的基本知识。第四章着重分析变频调速系统中的变频器,内容有交-交变频器、交-直-交电压源型变频器和电流源型变频器、逆变器的多重化问题、脉宽调制型逆变器等,并介绍了应用GTR与GTO元件的逆变器。第五章为异步电动机变频调速系统,讨论了系统中常用的主要控制环节、转速开环变频调速系统、转差频率控制的调速系统以及矢量变换控制系统等。第六章为无换向器电机及其调速系统,讨论了无换向器电动机的基本原理、基本特性与调速系统的基本构成与设计特点。

本教材由成都科技大学刘竞成副教授主编。其中,绪论和第一章由上海交通大学陈敏逊执笔;第二章由同济大学陈德俭执笔;第三章、第四章§4-1、§4-3、§4-4、§4-5及第五章§5-1~§5-3由西安交通大学王溥仁、朱仁初执笔;第四章§4-2由华东纺织工学院黄炯执笔;第五章§5-4由上海工业大学陈伯时执笔;第六章由浙江大学许大中执笔。

由于分头执笔,且最后由主编审改的时间很短,加以编写者对这门课程还没有很多的教学经验,所以本书中难免存在缺点错误以及前后风格上的不尽一致,殷切期望广大读者批评和指正。

一九八四年四月二十五日

绪 论

对于可调速的电力拖动系统,工程上往往把它分为直流调速系统与交流调速系统两类。这主要是根据采用什么电流制型式的电动机来进行电能与机械能的转换而划分的。所谓交流电力拖动,就是以交流电动机作为电能-机械能的转换装置,并通过对电能的控制以产生所需的转矩与转速。它与直流电力拖动的最大不同处,主要在于免除了电动机电流流向变化的机械式换向器——整流子。

纵观电力拖动的发展过程,交、直流两种拖动方式并存于各个工业领域。虽然由于各个时期科学技术的发展使得它们所处的地位有所不同,但它们始终是随着工业技术的发展,特别是随着电力电子元器件的发展而在相互竞争、相互促进中发生着不少的变革。由于历史上最早出现以蓄电池形式的直流电能以及直流电动机,所以在十九世纪八十年代以前,直流电力拖动是唯一的一种电力拖动方式。到十九世纪末叶,由于出现了交流电,解决了三相制交流电的输送与分配问题,同时又制成了经济实用的交流鼠笼式异步电动机,这就使交流电力拖动在工业中逐步得到了广泛的应用,并把电力拖动应用技术推向一个新的阶段——交流电力拖动占主要地位的阶段。随着生产技术的发展,特别是精密机械加工与冶金工业生产过程的进步,对电力拖动在起制动、正反转以及调速精度、调速范围等静态特性与动态响应方面提出了新的、更高的要求。而交流电力拖动比直流电力拖动在技术上难以实现这些要求。所以二十世纪以来,在可逆、可调速与高精度的拖动技术领域,相当长时期内几乎都是采用直流电力拖动系统。

然而由于直流电动机具有电刷与整流子,因而就存在着必须对它们经常进行维修检查,电动机安装的环境受到限制(如不能在有易爆气体及尘埃多的场合使用),以及限制了电机向高转速、大容量发展等缺点。特别是随着工业生产、国防和科学技术的飞速发展,这些问题显得更为突出。主要表现为以下几点:第一,直流电动机的单机容量一般为12~14兆瓦,还常制成双电枢的形式,而交流同步电动机与异步电动机的单机容量却可数倍于它;第二,直流电动机由于受换向的限制,其电枢电压最高只能做到1千多伏,而交流电机可以做到6~10千伏级;第三,直流电动机受换向器部分机械强度的约束,其额定转速随电机额定功率而减少,一般仅为每分钟数百转到1千多转,而交流电动机却可高达每分钟数千转;第四,直流电机的体积、重量与价格比同等容量的交流电机为大,这也是直流电力拖动的薄弱环节。所以在二十世纪三十年代以来,不少国家就开始进行无换向器调速电力拖动装置的研究,但进展缓慢,投入工业运行的、有良好调速性能的交流电力拖动装置尚不多。在六十年代以后,随着电力电子学与电子技术的发展,使得采用半导体变流技术的交流调速系统得以实现。尤其是七十年代以来,大规模集成电路和计算机控制技术的发展,以及现代控制理论的应用,为交流电力拖动的开发进一步创造了有利的条件。诸如交流电动机的串级调速、各种类型的变频调速、无换向器电动机调速,特别是矢量控制技术的应用,使得交流电力拖动逐步具备了宽的调速范围、高的稳速精度、快的动态响应以及在四象限作可逆运行等良好的技术性能。在调速性能方面已可与直流电力拖动媲美。目前,许多国家已实现了交流调速装置的产品系列化,它们的调速性能与可靠性在不断完善,价格也在不断降低。

特别要指出的是交流调速拖动在节约能源方面的作用。在世界能源紧张、能源费用高涨的今天,节约能源是一个迫切需要解决的问题。交流调速技术作为节约能源的一个重要手段,引起了人们的高度重视。这是因为:一方面,交流拖动负荷在各国的总用电量中都占有很大的比重(在工业发达的国家,大都占一半以上),对这类负荷实现节能,可以获得十分可观的节电效益;另一方面,交流拖动本身又存在着很大的可以挖掘的节电潜力。在许多交流拖动装置中,交流电机及其所拖动的机械在选用时往往都留有一定的富余容量,而且也不总是在最大负荷情况下运行;在轻载时,如果利用电力电子技术降低电机的外加电压,或是通过对电机的速度控制改变某些工作机械的工况,就可以达到节电的目的。以工业上大量使用的风机、水泵、压缩机为例,这类机械都是采用交流电机拖动,其用电量约占工业用电的50%,过去大都靠调节风门、闸阀来改变流量,使得大量电能被白白浪费掉;如果采用电机调速来改变流量,则其效率可大为提高,至少可以减少10%的电能消耗。这对我国来说,就意味着每年可以节约近百亿度电。

所以包括我国在内,世界各国都在计划广泛合理地使用交流调速技术,或进行技术改造(包括从小容量到超大容量的电机),以期获得更大的能源利益。

据以上讨论可知,交流调速技术的应用有着广阔的前景。因为它具有优良的调速性能,还可带来节约能源、减少维修费用,节省占地面积等优点,尤其在大容量或工作于恶劣环境时更为直流电力拖动所不及。展望前景,交流调速在各个工业技术领域中的应用所占的比重必将逐渐增大。世界各国的设计研究工作也已将重点转向交流调速技术,1983年于日本召开的国际动力电子学会议(IPEC)大量讨论了这方面的技术问题。可见它在工业电气自动化领域中的地位也日趋重要了。

交流电动机有同步电动机与异步电动机两大类。同步电动机的调速靠改变供电电压的频率而改变其同步转速。对异步电动机而言,调速的方法虽很多,但从利用晶闸管控制技术来看,不外乎控制加于电动机定子绕组的电压——调压调速,控制附加在电动机转子回路中的电势——串级调速,控制电机定子供电电压与频率——变频调速,以及无换向器电机调速系统这几种方法。如果我们按调速原理把异步电动机的调速方法按改变其同步转速与不改变其同步转速两类划分的话,可以知道,当异步电动机用调压法进行调速时,其同步转速与理想空载转速都是不变的,而用串级调速法时,电动机的同步转速维持不变,其理想空载转速在变;变频调速时电动机的理想空载转速与同步转速都在变。所以从本质上来看,无非是所使用的调速方法是否改变交流电动机的同步转速。由此可以对交流调速作如下的分类:

1. 不改变同步转速的调速法

它们有转子串电阻

转子斩波调速

改变定子电压

改变转子附加电势

应用电磁转差离合器等。

2. 改变同步转速的调速法

它们有改变定子极对数

改变定子电压频率

应用无换向器电机等。

如再深入一步从异步电动机在调速时所引起的转子能耗角度来看,调压调速时电机的转差功率 SP 全部消耗在电动机转子中,且转差损耗随电机的调速范围成比例地增大。在串级调速时电机的转差功率虽与调压调速时一样,但它仅在转子回路中损耗掉一部分,大部分都通过晶闸管逆变装置反馈回交流电网。在变频调速时,由于异步电动机的同步转速随频率而变,所以调速时相应的转差变化不大,这样转差损耗也就不大了。

由此可见,虽然不同的调速方法对异步电动机的转差功率处理方法不同,但它与这种调速方法是否改变电动机的同步转速及理想空载转速有关。所以本课程可以以调速时对转差功率处理方法的不断改进作为一条线来组织安排教学基本内容。

作为大学生的一门必修课,应该让学生掌握应用电力电子技术实现交流调速的基本技术。这就是调压调速、串级调速与变频调速的基本原理、方法与类型、系统的组成、波形的分析、电机调速的特性以及适用场合等。对于一些专门技术问题可视各校情况而作适当安排。讲授的重点为串级调速与变频调速。学时受限制时,可只讲授1~5章,也可按各自特点灵活取舍某些章节。

学习本课程时,应已具备《电机及拖动基础》、《半导体变流技术》、《反馈控制理论》、《直流拖动调速系统》等课程的知识。

目 录

绪 论

第一章 异步电动机的调压调速系统	(1)
§1-1 晶闸管三相交流调压电路	(2)
一、三相全波Y形连接的调压电路	(2)
二、输出负载电流的谐波分析	(10)
三、其它型式的三相交流调压电路	(15)
§1-2 调压调速系统的组成与特性分析	(16)
一、异步电动机在调压时的机械特性	(17)
二、扩大稳定运行范围的措施	(17)
三、电动机的反转与制动	(18)
四、系统的静特性与动特性分析	(18)
§1-3 调压调速系统运行中的一些问题	(22)
一、调压调速的功率损耗	(22)
二、非正弦波供电电压对电机出力的影响	(23)
三、变极调压调速	(25)
四、调压调速装置控制角的计算	(26)
§1-4 应用举例	(28)
§1-5 电磁转差离合器调速系统	(30)
一、电磁转差离合器的基本结构与工作原理	(30)
二、电磁转差离合器调速系统的机械特性	(31)
三、电磁转差离合器调速系统的组成	(32)
第二章 异步电动机的串级调速系统	(34)
§2-1 串级调速原理与基本类型	(34)
一、串级调速原理	(34)
二、串级调速的功率传递关系	(35)
三、串级调速系统的基本类型	(37)
§2-2 串级调速系统的机械特性	(39)
一、系统主回路的典型接线图	(39)
二、转子整流电路的特殊工作状态	(40)
三、串调系统的调速特性	(43)
四、串调系统的转矩特性	(45)
五、串调系统的机械特性与最大转矩	(47)
§2-3 串调系统的能量指标	(51)
一、串调系统的能量流图	(51)
二、串调系统的总效率	(52)
三、串调系统的总功率因数	(53)
§2-4 串级调速的闭环控制系统	(54)

一、串调主回路及电动机的传递函数	(54)
二、双闭环串调控制系统的组成与系统的动态结构图	(56)
§2-5 串级调速系统设计中的几个问题	(58)
一、串调系统中异步电动机容量的选择	(58)
二、逆变变压器容量计算	(58)
三、起动方式的选择与操作顺序	(59)
四、转子感应过电压保护与停车操作顺序	(60)
§2-6 应用举例	(61)
第三章 异步电动机变频调速的一般问题	(65)
§3-1 概述	(65)
§3-2 异步电动机在变频调速时的机械特性	(65)
一、保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 的比例控制方式	(66)
二、保持 $M_m = \text{常数}$ 的恒磁通控制方式	(67)
三、保持 $P_d = \text{常数}$ 的恒功率控制方式	(67)
四、恒电流控制方式	(68)
§3-3 变频装置的分类与各种变频器的特点	(69)
一、交-交变频器	(70)
二、交-直-交变频器	(70)
三、电压源型与电流源型变频器	(70)
四、变频器供电电动机的电动与再生运行	(71)
五、各类变频器主要特点比较	(72)
§3-4 变频器的几种换流方式	(73)
一、电网电压换流	(73)
二、负载换流	(74)
三、强迫换流	(74)
第四章 变频调速系统中的变频器	(76)
§4-1 交-交变频器	(76)
一、方波型交-交变频器	(76)
二、正弦型交-交变频器	(78)
§4-2 交-直-交电压源型变频器	(90)
一、串联电感式逆变器	(90)
二、串联二极管式电压源型逆变器	(95)
三、具有辅助换流晶闸管的逆变器	(98)
§4-3 交-直-交电流源型变频器	(104)
一、异步电机等效电路的简化	(105)
二、串联二极管式电流型逆变器	(106)
三、电流型逆变器换流电路的其它型式	(114)
四、电流型逆变器在应用中的某些问题	(117)
五、电流型逆变器的多重化	(119)
§4-4 脉宽调制型逆变器	(123)
一、逆变器输出电压和频率的控制方法	(123)
二、简单的脉宽调制逆变器的工作原理	(125)
三、高频脉宽调制逆变器的工作原理	(126)

四、脉宽调制逆变器的控制电路框图	(128)
§4-5 大功率晶体管与可关断晶闸管逆变器的介绍	(131)
一、大功率晶体管(GTR)逆变器	(131)
二、可关断晶闸管(GTO)逆变器	(136)
三、GTO的变频调速系统	(137)
第五章 异步电动机变频调速系统	(138)
§5-1 变频器用的主要控制环节	(138)
一、给定积分器	(138)
二、绝对值运算器	(139)
三、函数发生器	(140)
四、电压-频率转换器	(140)
五、环形分配器	(141)
六、脉冲功放及脉冲输出	(141)
七、逻辑开关	(143)
八、频率-电压转换器	(145)
§5-2 转速开环变频调速系统	(146)
一、电压型逆变器的频率开环调速系统	(146)
二、电流型逆变器的频率开环调速系统	(148)
§5-3 转差频率控制的变频调速系统	(149)
一、转差频率控制的基本概念	(149)
二、转差频率控制的规律及其实现	(150)
三、采用转差频率控制的变频调速系统的工作原理	(151)
§5-4 矢量变换控制系统	(154)
一、矢量变换控制的基本概念	(154)
二、矢量变换规律及其实现	(157)
三、异步电机的电路数学模型及矢量变换控制方程式	(161)
四、磁通观测器	(167)
五、矢量变换控制系统举例	(169)
第六章 无换向器电动机及其调速系统	(172)
§6-1 概述	(172)
§6-2 无换向器电动机的基本原理	(174)
一、无换向器电动机的构成及其等效直流电动机模型	(174)
二、无换向器电动机的电磁转矩	(176)
三、无换向器电动机逆变器的换流问题	(178)
§6-3 无换向器电动机的基本特性	(181)
一、无换向器电动机的性能分析	(181)
二、无换向器电动机的过载能力	(184)
§6-4 无换向器电动机的调速系统	(185)
一、无换向器电动机调速系统的基本构成	(185)
二、无换向器电动机调速系统的设计特点	(192)
参考资料	(194)

第一章 异步电动机的调压调速系统

在电力拖动基础课中我们就已经知道,当异步电动机定子与转子回路的参数为恒定时,在一定的转差率下,电动机的电磁转矩 M 与加在其定子绕组上电压 U 的平方成正比,即

$$M \propto U^2 \quad (1-1)$$

因此,改变电动机的定子电压就可改变其机械特性的函数关系,从而改变电动机在一定输出转矩下的转速。图1-1表示异步电动机在调压调速时的机械特性。

交流调压调速是一种比较简便的调速方法。早在五十年代就有人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以实现调压调速,其原理图如图1-2(a)、(b)。它们的共同缺点是调压设备笨重庞大。电力电子技术的发展,使我们能应用工作在“交流开关”状态的晶闸管元件来实现交流调压调速,见图1-2(c)。

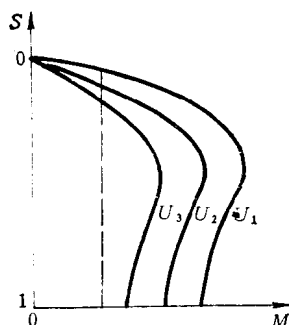


图1-1 异步电动机在改变定子电压时的机械特性 $U_1 > U_2 > U_3$

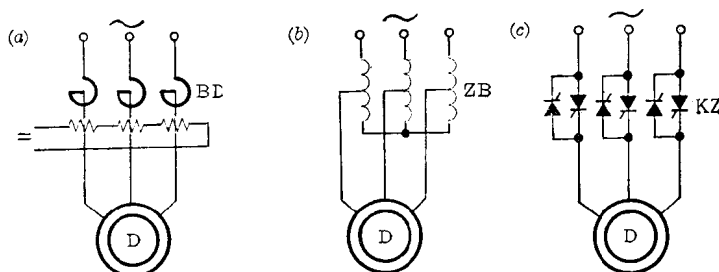


图1-2 异步电动机调压调速原理图
BD——饱和电抗器 ZB——自耦变压器 KZ——晶闸管

晶闸管交流调压就是在恒定交流电源与负载电路(如电阻、交流电动机等)之间接入晶闸管作为一交流电压控制器。由于交流电压是正弦交变的,为使负载端能获得正、负半波对称的电压波形,所以常如图1-3所示采用两个晶闸管反并联接(或用双向晶闸管)。晶闸管的控制方式有两种:

(1) 相位控制

这种控制方式工作时,作为开关的晶闸管在每个电源电压波形周期的选定时刻将负载与电源接通。如图1-4所示,对于不同的控制角 α 可得到不同的输出负载电压波形 $u=f(t)$,从而起到调压作用。为使输出电压正、负半波对称,反并联的两个晶闸管的控制角应相等。

(2) 通断控制

此时调压电路仍如图1-3,但晶闸管起着快速无

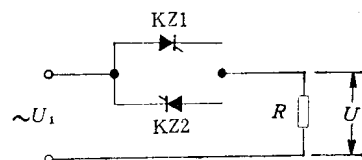


图1-3 晶闸管单相调压电路

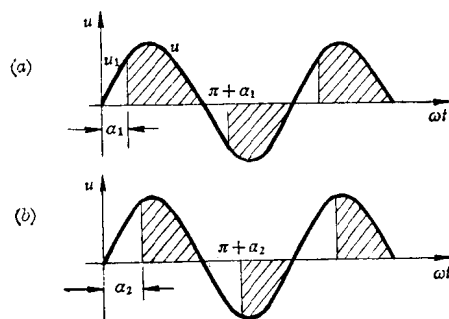


图1-4 晶闸管单相调压电路在相位控制时负载电压波形

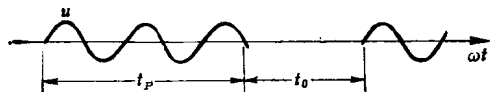


图1-5 晶闸管单相调压电路在通断控制时
负载电压波形

触点开关作用，它把负载与电源按一定的通断率关系接通与断开。晶闸管的控制角 α 一般为 0° ，可连续导通几个周期，晶闸管在控制脉冲消失时自然关断。如以电动机作负载，则它相当于工作在脉冲调速状态。负载电压波形见图1-5。

这两种控制方式虽不同，但它们的主电路型式是一样的，工作原理也都是根据电压有效值的改变而实现对负载的调压。晶闸管交流调压调速系统以相位控制方式为主，故本章不讨论通断控制方式。

在晶闸管交流调压调速系统中，晶闸管可以藉负载电流波形过零而自行关断，不需另加换流电路。所以其主要优点是线路简单、调压装置体积小、价格低廉、使用维修方便；所使用的电机可以是线绕式异步电动机或是有高转差率的鼠笼式异步电动机，能使电机作四个象限运行。其主要缺点是在低速运行时电机的转差损耗大，使电机发热厉害，效率亦随之降低。所以仅适用于一些属短时与重复短时作深调速运行的负载。为了能得到好的调速精度与能稳定运行，也常采用带转速负反馈的控制方式。目前交流调压调速系统已成功地大量使用在一些电梯、卷扬机械与化纤机械等工业装置中。国内外都已有应用于2.2~320千瓦电机功率的定型产品。

§1-1 晶闸管三相交流调压电路

工业中常用三相交流电动机，所以要相应采用三相调压电路。三相调压电路的接线方式有好几种，就晶闸管的联接方式而言可以是全波的、半波的、Y形连接的以及△形连接的等。这些电路对电阻性负载和电动机负载都适用。本节主要分析带三相电阻-电感性负载时一种典型调压电路的工作原理和工作特点。

一、三相全波Y形连接的调压电路

将三组反并联的晶闸管分别接至三相负载就形成了一个三相交流调压电路，此时负载可按Y形或△形连接。图1-6所示的是一个三相全波Y形连接的调压电路。在此电路中由于没有中线，所以在工作时若要负载电流流通，至少要有两相构成通路。为此：

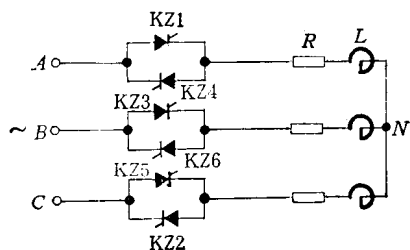


图1-6 三相全波Y形连接的调压电路

(1) 在三相电路中至少要有一相的正向晶闸管与另一相的反向晶闸管同时导通。

(2) 为了保证在电路起始工作时能使两个晶闸管同时导通，以及在感性负载与控制角较大时仍能保证不同相的正、反向两个晶闸管同时导通，所以如同三相全控桥式整流电路一样，要求采用 $>60^\circ$ 的宽脉冲或双脉冲的触发电路。

(3) 为保证输出电压三相对称并有一定的调节范围，要求晶闸管的触发信号除了必须与相应的交流电源有一致的相序外，各触发信号之间还必须严格地保持一定的相位关系。从图1-6的电路看，即要求A、B、C三相电路中正向晶闸管（即在交流电源为正半周时工作的晶闸管）的触发信号相位互差 $2\pi/3$ ，三相电路中反向晶闸管（即在交流电源为负半周时工作的晶闸管）的

触发信号相位也互差 $2\pi/3$ ；但同一相中反并联着的两个正、反向晶闸管的触发脉冲相位应互差 π 。根据上面的讨论，因而可得出三相调压电路中各晶闸管触发脉冲的序列应如图中的KZ1、KZ2、KZ3、KZ4、KZ5、KZ6的次序，相邻两个晶闸管的触发信号相位差为 $\pi/3$ 。

确定了触发脉冲序列的安排后，就可以讨论这个电路初始控制角的定位与移相范围。对图1-6所示的电路，它有一个自然运行状态，即电路在没有可控元件且具有纯电阻负载时的工作状态。此时负载上的电流与其相电压同相，为使负载上能得到全电压，晶闸管应全导通，所以应选用电源相应波形的起始点作为控制角 $\alpha=0^\circ$ 时刻。

1. 三相调压电路在负载阻抗角 $\varphi=0^\circ$ 时的工作。

阻抗角 $\varphi=\tan^{-1}\frac{\omega L}{R}$ 是反映负载性质的一个参数，它对调压电路的工作有很大影响，这里从 $\varphi=0^\circ$ 开始讨论，对弄清晶闸管调压电路的工作情况有很大的方便。

在已知初始控制角的位置后，就可讨论由三组反并联晶闸管联接的三相交流调压电路在对称性电阻负载下于不同控制角 α 时的负载电压与电流波形。并通过讨论以确定此电路的最大移相范围。

(1) 控制角 $\alpha=0^\circ$ 时

按前述，此时是属于电路在自然运行状态下工作，晶闸管全导通而负载上可得到全电压。

根据上述触发脉冲安排的原则，在图1-7(a)中画出了相应的触发脉冲信号 U_g ，它是在相电压波形的起始点给出的。图中还给出了各晶闸管导通的区间以及负载上的电压、电流波形。

可以看出，正向晶闸管(KZ1、3、5)都在电源电压波形正半波的起始点被触发导通；而反向晶闸管(KZ4、6、2)则都在电源电压负半波的起始点被触发导通。每个元件都连续导通 180° ，即在该半波过零点时自行关断，而每一个 60° 区间都有三个晶闸管同时导通。如在 $\omega t=0\sim\frac{\pi}{3}$ 区

间，A、C相电压为正，B相电压为负，此时KZ1、5、6导通；在 $\omega t=\frac{\pi}{3}\sim\frac{2\pi}{3}$ 区间，A相电压为

正，B、C相电压为负，此时KZ1、2、6同时导通，依此类推。由于在所有区间内任何时刻都有三个晶闸管导通工作，使得三相电路中正反方向在任何时刻都能流通电流，所以可将所有可控元件看作为两极管；因而此时三相调压电路相当于一般的三相交流电路。由于负载对称，所以各相电流相等，负载上的电压波形也对称，因此可以只分析一相波形。以A相电路为例， $i_A=u_{AN}/R$ 。在A相负载上的电压波形 $u_{RA}=f(t)$ 与电流波形 $i_A=f(t)$ 相似，见图1-7(a)。负载上所得到的全电压。

(2) 控制角 $\alpha=30^\circ$ 时

见图1-7(b)，在 $\omega t=\pi/6$ 时，触发KZ1。因KZ5早已被触发，由于此时 u_C 仍为正半波，所以即使KZ5的触发脉冲已消失，但它仍能维持导通；对KZ6，则由于其触发脉冲大于 60° ， u_B 又在负半波，所以使B相电路中的反向晶闸管KZ6继续导通。此时电路正常工作，所以负载上的电压即为电源相电压。但到 $\omega t=\pi/3$ 时，由于 u_C 过零点，KZ5自行关断，所以在 $\omega t=\pi/3\sim\pi/2$ 区间，只有KZ1、6导通。在图1-6的电路中，好比C相被开路，所以A相负载上的电压为 u_{AB} 的一半。在 $\omega t=\pi/2\sim2\pi/3$ 区间，KZ2被触发导通，此时有KZ1、2、6三个元件导通，所以在每一相负载上的电压即为电源相电压。在 $\omega t=2\pi/3\sim5\pi/6$ 区间，KZ6又因 u_B 过零关断，只有KZ1、2导通，所以在A相负载上的电压为 $u_{AC}/2$ 。在 $\omega t=5\pi/6\sim\pi$ 区间，是元件KZ1、2、3导通。在 $\omega t=$

$\pi \sim 7\pi/6$ 区间, KZ1 过零变负而关断, 只有元件 KZ2、3 导通, 此时相当于 A 相开路, 所以 A 相负载上无电压、电流。根据以上分析可得在 $\alpha = 30^\circ$ 时 A 相负载上电压波形 u_{RA} 如图 1-7(b) 所示。

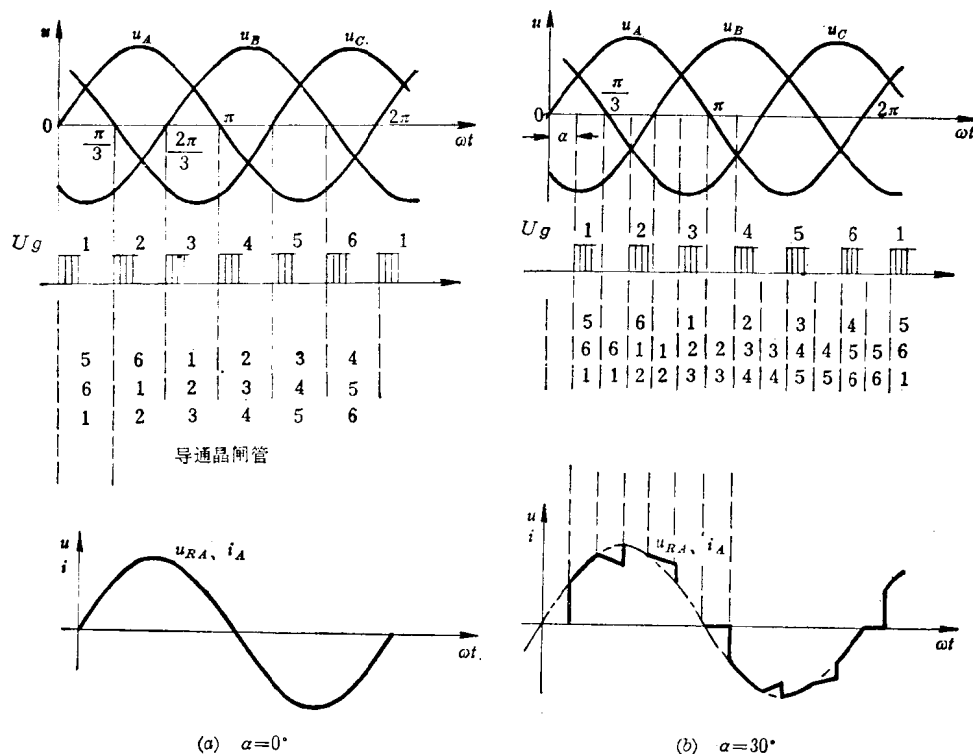


图1-7 三相Y连接调压电路的波形 ($\varphi = 0^\circ$ 时)

在只有两相导通时的电流为

$$i_{AB} = i_A = -i_B = \frac{u_{AB}}{2R} \quad (1-1)$$

(3) 控制角 $\alpha = 60^\circ$ 时

分析方法同上, 还是以 A 相负载为分析对象。(见图 1-8(a))。

在 $0 \sim \omega t_1$ 区间, KZ1 未被触发导通, 所以 A 相电流等于零。

在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 区间, 在 t_1 时刻因 u_C 过零 KZ5 被关断, 而 KZ1 被触发导通。所以有元件 KZ1、6 导通, A 相负载上所得到的电压是 u_{AB} 的一半。

在 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 区间, 元件 KZ6 关断, KZ1、2 导通, A 相负载上所得电压为线电压 u_{AC} 的一半。

后半周期工作情况与前半个周期相似, 所以可得到与前半个周期相对称的负载电压波形 $u_{RA} = f(t)$ 。

(4) 控制角 $\alpha = 90^\circ$ 时

从 KZ1 触发导通的时刻开始讨论。(见图 1-8(b))。

在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 区间, 只有 KZ1、6 导通。所以 A 相负载上所得电压为 $u_{AB}/2$ 。在这区间内, 虽然 B 相电压波形过零点, 但此时 $u_A > u_B$, 元件 6 的阳极电压比阴极电压为正, 所以它并不会关断, 而维持导通。直至 $\omega t = \omega t_2$ 时刻, $u_{AB} = 0$, 即 $u_A = u_B$; 此时 AB 相回路中无

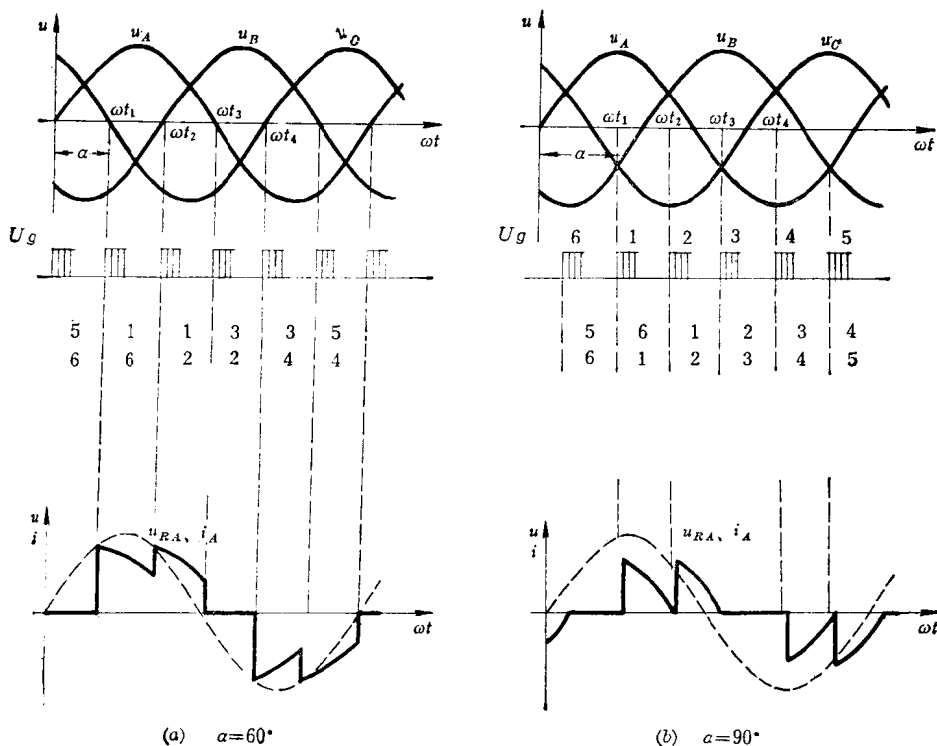


图1-8 三相Y连接调压电路的波形($\varphi = 0^\circ$ 时)

电流流通,而把 KZ6关断。但 KZ1 并不会关断,因为过了 ωt_2 时刻, KZ1 的阳极又得到比阴极为正的电压,而其触发脉冲还维持存在,同时 KZ2 又被触发导通,所以 A 相电流可经 C 相电路而继续导通。

同理分析 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 区间, 由于 $u_{AC} > 0$, 可得 $u_{RA} = u_{AC}/2$ 的波形。

在 ωt_3 时, 由于 $u_{AC} = 0$, 所以 KZ1 关断, $u_{RA} = 0$ 。

负半波时的情况同理分析, 由此可得如图 1-8 (b) 中的 u_{RA} 的波形。

(5) 控制角 $\alpha = 120^\circ$ 时(见图1-9)

设在 $\omega t = \omega t_1$ 时刻给 KZ1 以触发脉冲, 并计及 KZ6 的触发脉冲还未消失; 而在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 段内 $u_A > u_B$, 所以 KZ1 与 KZ6 都被触发导通。在负载上得到 $u_{AB}/2$ 的电压。到 $\omega t = \omega t_2$ 时刻, $u_A = u_B$, 即是 u_{AB} 开始过零反向, 故 KZ1、6 受反压而被关断, $u_{RA} = 0$ 。

在 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 一段时间内整个调压电路中所有晶闸管元件都处于关断状态, 所以维持 $u_{RA} = 0$ 。

在 $\omega t = \omega t_3$ 时刻, KZ2 得到触发脉冲, 并且

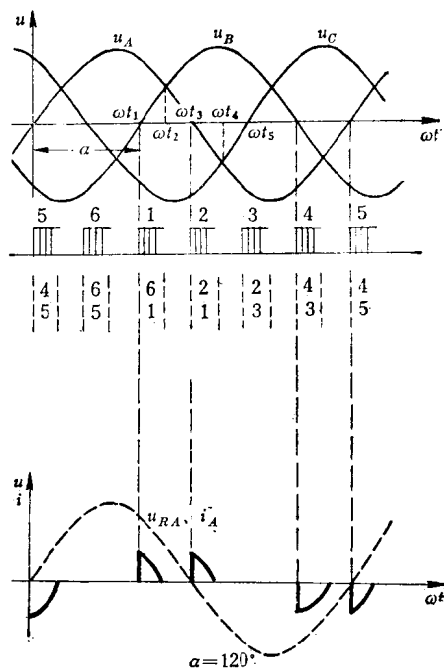


图1-9 三相Y连接调压电路的波形($\varphi = 0^\circ$ 时)

KZ1 的触发脉冲也仍存在, 所以在 $u_A > u_C$ 的情况下使 KZ1、2 都导通。在负载上得到的电压为 $u_{AC}/2$, 并一直维持到 ωt_4 时刻, 此时 u_{AC} 开始过零反向而把 KZ1、2 关断。

$\omega t_4 \sim \omega t_5$ 段内, u_{RA} 维持为零。

$\omega t_5 \sim \omega t_6$ 段内, 虽有 KZ2、3 导通, 但是 A 相无元件导通, 所以 u_{RA} 维持为零。

负半波的情况分析同上。

(6) 控制角 $\alpha > 150^\circ$

从电源电压波形图可知, 当在 $\alpha > 150^\circ$ 时给 KZ1 以触发脉冲是没有作用的。因为此时虽然 KZ6 的脉冲也还存在, 但由于 $u_A < u_B$, 所以 KZ1 与 KZ6 都处于反压状态而无法导通。因此这种交流调压电路控制角的最大移相范围应为 150° 。

根据图 1-7 至 1-9 的五种情况分析可以看出, 在三组反并联晶闸管接成的三相交流调压电路中, 每一相负载上所得到的电压与电流波形在不同 α 角时是不相同的。随着控制角 α 的增大, 负载上电流不连续的程度增加, 负载所得到的电压也相应随之降低。由于调压控制在实质上是改变一个周期内电压波形导通角的大小, 所以输出的不是正弦波。但每一相负载上所得到的电压波形正负半波对称。根据谐波分析可知, 对于这种三相对称控制电路, 其输出电压中只有奇次谐波, 并以三次谐波所占比重大。由于本电路没有零线, 所以虽有三三次谐波电势, 而三次谐波却无通路, 故没有三次谐波电流, 这样对电源装置的干扰也可小些。

2. 交流调压电路在电阻-电感性负载时的工作。

当交流调压电路的负载为交流电动机、变压器等电感性负载时, 晶闸管的工作情况与电阻

性负载时就不相同了。因为在电阻-电感性负载时, 电路中电流的波形与电压的波形不同相。当电源电压过零点时, 由于电路自感电势的作用使电流要滞后一个角度(时间)才能为零而去关断晶闸管。因此晶闸管的导通角会增大, 并由于晶闸管是在电压过零后经过一个延迟才关断, 所以它是在承受反压情况下被关断的。显然此时晶闸管的工作不只与控制角有关, 还与负载电路的参数阻抗角有关。对应图 1-10(a) 所示的电路, 以阻抗角 φ (或称功率因数角) 表征电阻-电感负载的参数情况。

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

φ 值对调压电路的工作有很大影响, 在相同的控制角 α 下, 当负载 $\frac{\omega L}{R}$ 较大时, 导电角 θ 也会增大, 即

晶闸管关断的延迟角也越大, 所以必须要进一步讨论控制角 α 、导电角 θ 与阻抗角 φ 三者之间的关系。

用图 1-11 分析交流输入电压 u_1 与负载电流 i 间的关系。设负载阻抗角为 φ , 晶闸管的控制角为 α , 并使 $\alpha > \varphi$ 。为讨论方便起见, 把触发时刻定为 $\omega t = 0$ 时刻, 此时晶闸管 KZ1 导通, 这相当于在交流

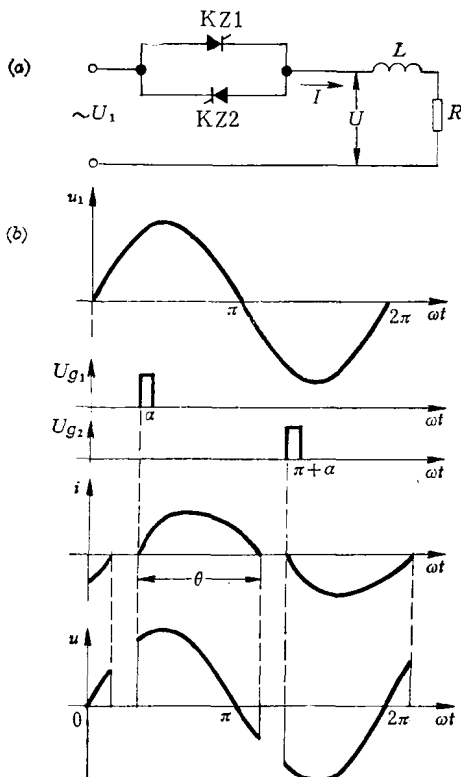


图 1-10 单相调压电路在 $R-L$ 负载时的工作

$R-L$ 电路中突然闭合开关, 此时有电流 i 开始流通。根据电路理论可把此电流分为强制分量

i_1 与自由分量 i_2 两部分。在交流输入电压 $u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha)$ 时, 电流表达式为

$$i = i_1 + i_2$$

$$= \frac{\sqrt{2} U_1}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \frac{\sqrt{2} U_1}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (1-2)$$

$$\text{或} = \frac{\sqrt{2} U_1}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \frac{\sqrt{2} U_1}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{\omega t}{1/\tau\varphi}}$$

其中 $T = \frac{L}{R}$ 为自由分量的衰减时间常数。

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

由图可见, 当交流电压 u_1 变负时, 由于电感的作用使负载电流不为零; 当电压反向进入负半周、且电路中电感储能释放完毕时, 电流降为零, 而晶闸管 KZ1 电流不能反向, 它就被关断。设 KZ1 的导电角为 θ , 则在 $\omega t = 0$ 时, $i = 0$ 。把这个条件代入式(1-2)中, 得

$$\sin(\theta + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\frac{\theta}{1/\tau\varphi}} \quad (1-3)$$

也可写作

$$\text{tg} \alpha = \frac{\sin(\theta - \varphi) + \sin \varphi \cdot e^{-\frac{\theta}{1/\tau\varphi}}}{\cos(\theta - \varphi) - \cos \varphi \cdot e^{-\frac{\theta}{1/\tau\varphi}}} \quad (1-4)$$

这是一超越方程, 表示了 $\theta = f(\alpha, \varphi)$ 的关系。图1-12是按式(1-3)所绘制成的曲线族。利用它可以按给定的负载阻抗角 φ 求得不同 α 时的导电角 θ 。但这族曲线只适用于 $\alpha > \varphi$ 的情况。

根据以上讨论, 对图 1-10(b) 所示的负载电流 i 与负载电压 u 的波形就易于理解了。并可得到以下的概念:

(1) 当 $\varphi = 0^\circ$, 式(1-3)的右部等于零, 此时从式的左部看必须有 $\theta + \alpha = 180^\circ$ 的条件。此即纯电阻负载时的工况, 相应的负载电压与电流波形见图 1-13。

(2) 当 $\varphi \neq 0^\circ$, 且 $\alpha > \varphi$ 时, 导电角 $\theta < 180^\circ$, 此时电流波形也是断续的。见图1-13(b)。

(3) 当 $\alpha = \varphi$ 时, 依式(1-2)可知 $i_2 = 0$, 即没有电流的自由分量。另依式(1-3)可求得 $\theta = 180^\circ$, 这表明反并联的晶闸管在这个条件下相当于全导通工作, 负载上得到全电压且电流连续, 见图1-13(c)。此时晶闸管已不能起调压作用。

(4) 当 $\alpha < \varphi$ 时, 此时表示负载的电感作用很大。从式(1-2)可知, 在 $\omega t = 0$ 时刻(即晶闸管导通瞬间), 负载电流的强制分量 i_1 为负值, 而自由分量 i_2 为正值, 此时可计算求出导电角 $\theta > 180^\circ$ 。如果晶闸管 KZ1 与 KZ2 是用窄脉冲触发的, 由于 $\alpha < \varphi$, 所以在 KZ1 还未关断时,

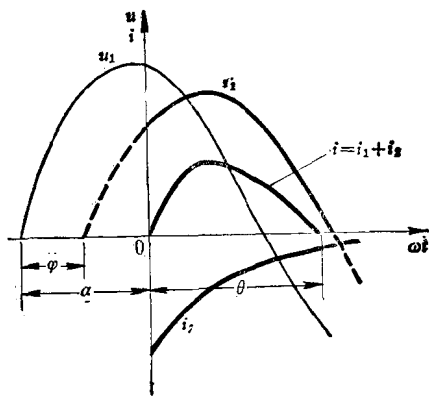


图1-11 电感性负载时电流波形的求取

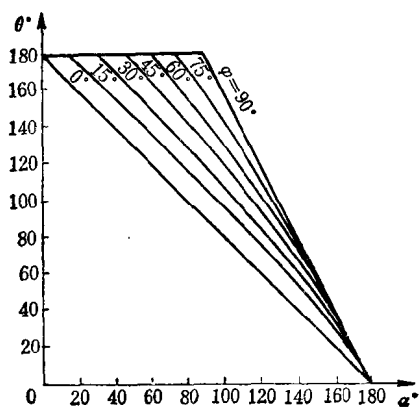


图1-12 电路在 $\alpha > \varphi$ 时的 $\theta = f(\alpha, \varphi)$ 曲线