

高 等 学 校 教 材

Gao Deng Xue Xiao Jiao Cai

交流调速

JIAOLIUTIAOSU

王君艳 编著



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书介绍几种主要的交流调速方式的原理、控制方式及调速系统,其中变频调速和矢量控制占主要部分,对直接转矩和同步电机控制仅做扼要介绍,这合乎实际应用现状。介绍控制系统时均以微机数字控制系统为例,实例选择注意“新”,切合应用实际。

本书可作为高校电气工程及其自动化专业的教材,也可作为非电专业的电气传动的教材,还可供从事电气传动和自动控制的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

交流调速/王君艳编著. —北京:高等教育出版社,
2003.8

ISBN 7-04-013097-1

I. 交... II. 王... III. 交流电机-调速-
教材 IV. TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 052488 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 10.5
字 数 190 000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

版 次 2003 年 8 月第 1 版
印 次 2003 年 8 月第 1 次印刷
定 价 13.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

在现代工业企业中,绝大多数工作机械的运行是由电动机拖动的,因而掌握拖动系统的调速知识对于从事工程技术工作的,特别是电气工程类的人员是十分重要的。电动机调速分直流调速和交流调速。直流电动机的调速性能好,因此在调速领域中曾一直占主导地位。交流电动机与直流电动机相比,具有结构简单、制造方便、成本低廉、运行可靠、坚固耐用、运行效率高等许多优点,以前未得到大规模应用,主要是由于调速困难。随着现代科学技术的高速发展,现代电力电子技术、微电子学、现代控制理论、微机控制技术等为交流电机调速提供了全新的理论和技术。可以说,自20世纪80年代开始交流调速技术就已进入了一个新的时代,也就是可以与直流调速相媲美并逐渐取而代之占据电力传动主导地位的时代。系统掌握交流调速的知识及其实用技术对于电气工程类的学生来说十分重要。

本书编者在电力拖动和计算机控制类课程多年教学实践的基础上,先将本书内容写成讲义,在上海交通大学电气工程系及有关专业进行教学,几年来已几经修订。本书是在教学实践的基础上,结合当前交流调速的发展形势,重新修改和整理而成。

本书是上海交通大学“985”教改子项目教材,它从提高学生基础和培养学生能力的目标出发,遵照重基础、重应用、内容新的原则而编写。本书侧重以下几个方面:

1. 介绍几种主要的交流调速方式的原理、控制方式及调速系统,这其中变频调速和矢量控制占主要部分,对直接转矩和同步电动机控制仅做扼要介绍,这既合乎实际应用现状,也开阔了学生眼界。

2. 介绍控制系统时均以微机数字控制系统为例,所选实例借鉴了近二、三年电力传动类期刊上的应用实例,切合实际应用。

3. 除后两章外,教材在每章后列有习题,习题既有对基本概念的考查,又有对微机数字控制的调速系统的软、硬件设计。

本书共分六章,前四章分别为:调压调速、串级调速、变频调速、矢量变换控制,第五章、第六章分别对直接转矩控制和同步电动机的控制做了简要介绍。

本书可作为高校电气工程及其自动化专业的教材,也可作为非电专业电气传动的教材,还可供从事电气传动和自动控制的工程技术人员参考。

II 前 言

西安交通大学苏彦民教授对本书进行了认真细致地审阅,并提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。在本教材的出版过程中得到了上海交通大学陈洪亮教授、黄成军副教授、朱承高教授、潘俊民教授、张秀彬教授、贾学堂教授、上海电气(集团)公司陈干锦先生的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平和能力有限,错误和不妥在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2003年1月

目 录

绪论	1
第一章 交流调压调速系统	7
第一节 异步电动机调压调速的原理	7
第二节 晶闸管三相交流调压电路	9
第三节 其他常用的三相交流调压电路简介	13
第四节 闭环控制的调压调速系统及其静特性	14
第五节 用单片机控制的调压调速系统	19
练习与思考题	22
第二章 绕线式异步电动机的串级调速系统	23
第一节 串级调速的原理和装置	23
第二节 串级调速系统转子整流电路的工作特性	29
第三节 串级调速系统的调速特性和机械特性	36
第四节 串级调速系统的功率特性	42
第五节 双闭环串级调速系统	45
第六节 串级调速系统中需要强调的问题	52
第七节 计算机控制的串级调速系统	54
第八节 晶闸管串级调速系统参数的工程计算	55
第九节 超同步串级调速系统简介	58
练习与思考题	59
第三章 交流电动机变频调速系统	60
第一节 变频调速技术的发展及应用	60
第二节 异步电动机变频调速的原理	63
第三节 变频电源	69
第四节 取样 PWM 脉宽调制技术	75
第五节 跟踪型 PWM 脉宽调制技术	87
第六节 采用 Intel80C196MC 单片机控制的变频调速系统	93
练习与思考题	99
第四章 异步电动机矢量变换控制系统	100
第一节 矢量变换控制的基本思想	100
第二节 坐标变换和矢量变换	102
第三节 交流异步电动机的数学模型	106
第四节 矢量变换控制变频调速系统	114

II 目 录

第五节 双 CPU 转速、磁链闭环矢量控制的变频调速系统	119
第六节 用 IBM-PC 机控制的矢量控制系统	122
第七节 无速度传感器矢量控制系统	126
练习与思考题	129
第五章 异步电动机的直接转矩控制	130
第一节 直接转矩控制的概述	130
第二节 直接转矩控制中的定子磁链观测模型的切换	135
第三节 全数字异步电动机直接转矩控制系统	138
第六章 同步电动机调速系统	142
第一节 同步电动机调速系统的特点	142
第二节 同步电动机的动态数学模型	144
第三节 永磁同步电动机调速控制系统	146
第四节 负载换相同步电动机(无换向器电动机)调速控制系统	150
附录 PID 调节器的数字化实现	156
参考文献	158

绪 论

一、现代交流调速的发展概况及趋势

电气传动是以电动机的转矩和转速为控制对象,按生产机械的工艺要求进行电动机转速(或位置)控制的自动化系统。根据在完成电能—机械能的转换过程中所采用的执行部件——直流电动机或交流电动机的不同,工程上通常把电气传动分为直流传动、交流传动。

直流电动机的调速性能好,因此在调速领域中曾一直占主导地位。交流电动机与直流电动机相比,具有结构简单、牢固、成本低廉等许多优点,以前未得到大规模应用,主要是由于调速困难。随着现代科学技术的高速发展,现代电力电子技术、微电子学、现代控制理论、微机控制技术等为交流电机调速提供了全新的理论和技术。可以说,自 20 世纪 80 年代开始,交流调速技术就已进入了一个新的时代,也就是可以与直流调速相媲美并逐渐取而代之占据电力传动主导地位的时代。

交流调速基本上是由异步电动机调速和同步电动机调速两大部分组成。其中,笼型异步电动机结构简单、坚固耐用、维修工作量小、运行效率高、转动惯量小、动态响应快,因此在工艺上可以达到高电压、大容量、高转速的效果。但是,异步电动机的功率因数不高,与等容量同步电动机相比,所用变频装置容量要偏大。尽管普通同步电动机在结构上要比笼型异步电动机复杂,但却比直流电动机简单,与等容量的直流电动机相比,它具有效率高、过载能力大、体积小、转动惯量小、维护简单等优点,并且可以达到大容量、高转速和高电压的技术工艺水平。与异步电动机调速系统相比,同步电动机具有功率因数高、效率高、控制性能好等方面的优势,尤其适用于低转速负载不断冲击的生产机械工作环境下。在结构上,同步电动机(除永磁式外)在转子侧须加一套励磁装置,和笼型异步电动机相比,增加了一定的维护工作量。同步电动机矢量控制比异步电动机复杂,需准确检测转子位置或转子磁链位置。当前,异步电动机调速和同步电动机调速在电气传动领域中都占有很大比重,成为电气传动的主流。

交流调速中最有发展前景的技术当属变频调速。变频调速是以变频器向交

流电动机供电,并可以构建开环或闭环系统。变频器可将原先固定电压及频率的交流电源转换为可调电压和可调频率的交流电源,变频器已经成为现代交流调速的核心部件。目前变频器正向着 PWM 型变频器和多重化技术方向发展,交-交变频器在低速大容量系统中的应用有着明显上升的趋势。在各种变频器中,电压型 PWM 方式的交-直-交变频器发展得最快。从 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始,由于电力电子器件的飞速发展,变频技术的不断完善,使得变频器性能得到大幅度提升,同时交流电动机的控制技术也在逐步提高,由于这些因素,促使现代交流调速达到了很高的水平。

全控型大功率快速电力电子器件的发展为现代交流调速提供了重要的物质保证。大功率快速电力电子器件最初是普通晶闸管,由晶闸管构成的变频电源输出的是方波或阶梯波的交变电压。然而晶闸管属于半控型器件,可以控制导通,但不能由门极控制关断,因此由普通晶闸管组成的逆变器用于交流调速必须附加强迫换相电路。20 世纪 70 年代以后功率晶体管(GTR)、门极关断晶闸管(GTO)、场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、绝缘栅门极关断晶闸管(IGTO)等器件陆续问世,这些器件既能控制导通,又能控制关断,属全控型器件。它不需强迫换相电路,这样使逆变器的构成简单化了。其中 IGBT 和 IGTO 又是把 MOSFET 技术与 GTR、GTO 技术通过在芯片上的集成化产生的,既具有电压型控制、开关损耗小、器件容量大、工作频率高、控制电路简单及热稳定性好的特点,又具有通态电压低、耐压高和承受电流大等优点。因此发展很快、备受青睐。IGBT 正在逐步取代 MOSFET 和 GTR,成为目前中、小功率最为流行的器件。IGTO 综合了晶闸管的高电压、大电流特点和 MOSFET 的快速开关特性,是很有发展前景的大功率高频功率器件。电力电子器件发展的更进一步目标是把控制、驱动、保护等功能集成化起来,构成新一代功率集成器件(PIC),目前已用于交流调速的智能功率模块为 IPM PIC 是功率器件的重要发展方向。电力电子器件的不断发展,使得交流调速装置工作更加可靠,体积更趋于小型化,性能更加优越。这也使得现代交流调速在性能/价格比上不仅能与直流调速相媲美,甚至优于直流调速。

随着新型电力电子器件的不断涌现,变频技术也获得了飞速发展。以普通晶闸管构成的方波逆变器被全控型高频开关器件组成的脉宽调制(PWM)逆变器取代后,SPWM 逆变器及其专用芯片得到普遍应用,继而又出现了 TPWM SAPWM 等其他脉宽调制方式。特别需要指出,磁通跟踪型 PWM 逆变器以不同的开关模式在电机中产生的实际磁通去逼近定子磁链的给定轨迹——理想磁通圆,由于此方法控制简单、数字化方便,已呈现出取代 SPWM 的趋势。电流跟踪型 PWM 逆变器为电流型的电压源逆变器,兼有电压和电流控制形逆变器的优点,滞环电流跟踪型 PWM 逆变器更因其电流动态响应快、实现方便而受到重

视。PWM 逆变器工作频率的进一步提高将受到开关损耗的限制,特别是大功率逆变器。近几年研究出的谐振型逆变器是一种新型软开关逆变器,由于应用谐振技术使功率开关在零电压或零电流下进行开/关状态转换,开关损耗几乎为零,使其效率提高、体积减小、重量减轻、成本降低,是很有发展前景的变频器。

就中、小容量交流电机控制而言,采用全控器件的全数字控制 PWM 变频器已经实现了通用化。全数字控制方式的软件功能不但考虑到通用变频器自身的内在性能,而且还融入了大量的使用经验和技巧,使得通用变频器的可靠性、可使用性、可维修性得以充实。由于通用变频器具有调速范围宽、调速精度高、动态响应快、运行效率高、功率因数高、操作方便且便于同其他设备接口连接等一系列优点,所以应用十分广泛,社会效益非常显著。

在变频技术迅速发展的同时,交流电机控制技术也得到突破性进展。由于交流电机是多变量强耦合的非线性系统,与直流电机相比,控制较为困难。20 世纪 70 年代提出的交流电机矢量控制系统,应用坐标变换将三相系统等效为两相系统,再经过按转子磁场定向的同步旋转变换实现了定子电流励磁分量和转矩分量间的解耦,从而达到对交流电动机磁链和转矩的分别控制。但在实际应用中,异步电动机的转子磁链不能精确获得。为了解决这个问题,出现了应用现代控制技术——自适应理论的基于参数辨识的转子磁链观测器,从而获得了可与直流电机相媲美的调速特性。另外,直接转矩控制是 20 世纪 80 年代中期提出的又一转矩控制方法,它采用空间电压矢量分析方法,在定子坐标系进行磁通、转矩计算,通过磁链跟踪型 PWM 逆变器的开、关状态直接控制转矩。此方法无须对定子电流进行解耦,免去了矢量变换的复杂计算,控制结构简单,便于实现全数字化,颇受各国专家的重视。近十几年,各国技术专家还致力于无速度传感器控制系统的研究,利用检测定子电压、电流等易于测量的量进行速度估算以取代速度传感器。同时也解决了在线速度信息检测技术。在保证较高控制精度的同时,满足实时控制要求。速度估算的方法,除了根据数学模型计算电动机转速外,目前应用较多的有模型参考自适应法和扩展卡尔曼滤波法。此类技术可以避免由于传感器带来的环境适应性、安装维护等麻烦,提高了系统可靠性,降低了成本,因而引起了技术同行的广泛兴趣。

从 20 世纪后半叶开始,控制系统硬件已由模拟技术转向数字技术。微型计算机在性能、速度、价格、体积等方面的不断发展为现代交流调速技术实现提供了重要的保证。现在 16 位以及 32 位微处理机应用十分普遍,由于微处理机的运算速度高且价格较低,使得交流调速系统可以采用全数字化控制。这样不仅使传动系统获得高精度、高可靠性,还为新的控制理论与方法提供了物质基础。

从发展趋势来看,交流数字调速有以下两个发展方向:①采用专用的硬件、大规模集成电路(IC)。研制交流调速系统专用的 IC 芯片,可使控制系统硬件小

型化、简单化。如富士电机公司推出的变频器采用专用的数字信号处理器(DSP)芯片,并采用金属化表面技术(MST),使变频器体积更小,可靠性更高。
②采用通用计算机硬件,软件模块化、可编程化。

二、现代交流调速的主要类型

(一) 异步电动机

目前,异步电动机应用较广泛的调速系统有如下几种典型类型。

1. 转速开环的变频调速系统

采用转速开环、恒压频比,并且带低频电压补偿的控制方式。其控制系统结构简单、成本低,风机、水泵等的节能调速常采用这种系统。

2. 转速闭环转差频率控制的 PWM 变频调速系统

利用电动机稳定运行时,在转差率 s 很小的范围内,当磁通 Φ 不变时,转矩与转差角频率呈正比的关系来实现电动机的较高性能调速,但此系统动态性能还不够理想。

3. 转速、磁链双闭环矢量控制的电流滞环型 PWM 变频调速系统

应用矢量控制理论,对转速、磁链进行分别控制,由于又采用了滞环电流跟踪型 PWM 逆变器,使得该系统动态性能好,再配有精确的转子磁链观测器,该系统可以达到与直流电动机调速系统相媲美的程度。

4. 异步电动机直接转矩控制系统

此系统利用直接转矩控制方法,直接在定子坐标系中计算和控制电动机的磁通和转矩,实时控制气隙磁通矢量按圆形轨迹运行,使转矩响应时间限制在一个节拍以内,且无超调,动静态性能比矢量控制还好,技术指标大大超过直流调速系统。

5. 双馈电动机亦称同步串级调速

它是定子由电网电源供电、转子由变频器电源供电的绕线型异步电动机。双馈电动机具有其他电动机所没有的优点:在同步速度以上运行时,不但可以运行在再生发电制动状态,还可以运行在电动状态。这样一来,装置容量不扩大,而调速范围却扩大了。自控式双馈电动机具有异步电动机的特性,他控式双馈电动机具有同步电动机的特性,如采用矢量控制将类同直流拖动系统,并可改善系统功率因数,是很有发展前途的一种调速方式。

(二) 同步电动机

同步电动机调速是交流调速的两大分支之一,是近些年发展起来的一门新技术,在电气传动中占有重要地位。随着电力电子技术、微电子学、现代控制理论、微机控制技术进一步发展,同步电动机调速系统将会更加完善,在国民经济各个部门得到更广泛应用,成为取代直流调速系统的重要力量。同步电动机调

速系统目前有如下几种典型类型。

1. 永磁同步电机调速系统

此系统主要用于小于 10kW、要求有良好的静态性能和动态响应的伺服装置中,如数控机床、机器人等,在性能上、坚固性上、可靠性上已超过直流伺服装置。此系统目前正向智能化、高精度化方向发展。高性能的永磁同步电机调速系统采用转子磁场定向的矢量控制技术,用定子电流幅值控制转矩,定子电流的频率和相位由转子位置检测器的转子磁极位置信号决定,该系统采用滞环电流跟踪型 PWM 逆变器。

2. 交-直-交型负载换相同步电动机控制系统

此系统又称为“无换向器电动机”,它的功率可达几十兆瓦,已实现全数字化,可用于负载较平稳的高速传动设备中。该系统是把交-直-交晶闸管电流型逆变器与同步电动机相结合,利用负载同步电动机的交流反电动势(电压)来关断逆变器中的晶闸管,这样一来省掉了强迫换向装置,使逆变器和自关断器件组成的交-直-交逆变器同样简单。负载换相同步电动机控制系统既有类似于直流电动机的调速性能,又具有交流电动机结构简单、制造容易、维护方便的特点,并兼有同步电动机功率因数高等优点。因而该系统在要求大容量、高转速、高性能的调速领域有很广泛应用,并在大型同步电动机软起动方面发挥了特殊作用。

3. 大容量交-交变频器供电的同步电动机矢量控制系统

此系统用于低速大型无齿轮传动中,例如可逆轧机或矿井提升机中,代替以前的直流电动机,同步电动机不但能满足机械负载对快速动态响应的严格要求,而且在容量上、设计上、运行上消除了直流电动机固有的限制条件。目前国外已有容量达 10 MW 以上的全数字控制的同步电动机控制系统,国内也已有 2.5 MW 的模拟控制系统投入运行。该系统根据矢量控制原理,利用气隙磁链定向实现定、转子电流的转矩分量和磁化分量的解耦,从而实现同步电动机转矩、气隙磁链和功率因数的分别控制。该系统采用晶闸管三相交-交变频器,十分适合大容量、低转速、高性能的场合。

4. 开关磁阻电动机调速系统

此系统是由电动机、角位移传感器、功率电路和控制电路组成的机电统一体,各部分密切结合,缺一不可。其中每一部分难以单独使用,但几部分组合起来便构成高性能的机电一体化产品,坚固耐用,适于较恶劣环境,容量能做到 200 kW,且兼有直流传动和普通交流传动的优点,可用于轻工、化工、冶金等行业取代直流调速系统。

(三) 电机技术发展

随着电力电子器件及变频技术发展和控制技术的提高,今后电机的发展动

向是:①无换向器电动机代替直流电动机;②某些场合部分双馈电机将代替同步电机;③发挥稀土资源优势,我国将大力发展永磁电机;④发展新型合理结构的异步电动机;⑤发展智能化电机,实现电子-电动机的机电一体化产品。

三、本书的章节安排

本书以介绍现代交流调速技术为宗旨,着重于实际应用技术并且兼顾了交流调速的发展趋势。介绍具体控制系统时都是以微机控制系统为例,很多实例都选自于近几年电力传动及电气自动化方面的期刊。本书共分六章,前四章分别为调压调速、串级调速、变频调速、矢量变换控制,第五章、第六章分别对直接转矩控制和同步电动机的控制做了简要介绍。除后两章外,本书每一章后有配合该章内容的习题以备思考、练习。

第一章

交流调压调速系统

用改变异步电动机定子电压来实现调节电动机转速的控制系统称为调压调速系统。这种系统电路简单、调试方便、成本低廉,多用于对调速性能要求不高的中、小容量拖动装置中。本章着重分析采用晶闸管的调压调速系统。

第一节 异步电动机调压调速的原理

交流异步电动机的电磁转矩表达式为:

$$T_e = \frac{3n_p U_1^2 r'_2 / s}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2 / s)^2 + (X_1 + X'_{20})^2]} \quad (1-1)$$

式中, n_p 为定子绕组构成的极对数; U_1 为定子相电压有效值; f_1 为定子电压频率; r_1 为定子每相绕组的内阻; X_1 为定子每相漏电抗; r'_2 、 X'_{20} 为转子折算到定子侧的每相电阻和每相的漏电抗; s 为转差率。

在其他参数恒定的情况下,电磁转矩 T_e 与定子相电压有效值 U_1 平方成正比。在一定负载转矩之下,定子相电压有效值 U_1 的变化引起电动机转差率 s 变化,而同步转速 n_1 未变,则电动机的转速 n 发生了变化。

在调 U_1 时,交流异步电动机的临界转差率 s_m 和同步转速 n_1 都不变,使电动机在恒定负载下的调速范围只在 $0 \sim s_m$ 之间,如图 1-1(a)所示。从图中还可以看到,如果是风机性负载,其调速范围就可以大一些。

当今用于交流调压调速系统中的电动机一般是采用高转子电阻的交流力矩电动机。因为这种电动机的转子绕组电阻 r_2 很大,这样就增加了交流异步电动

机的临界转差率 s_m , s_m 有时甚至接近 1, 采用交流力矩电动机进行调压调速, 扩大了调速范围, 交流力矩电动机机械特性见图 1-1(b) 所示。

调压调速过去常用的方法是在异步电动机定子回路串入饱和电抗器 LS, 或在定子侧加自耦调压器 TU, 如图 1-2(a), (b) 所示。晶闸管元件出现以后, 由于它几乎不消耗铜、铁材料, 体积小、重量轻, 控制方便, 因此, 用晶闸管元件组成的调压器, 现在已成为交流调压器的主要形式, 如图 1-2(c) 所示。

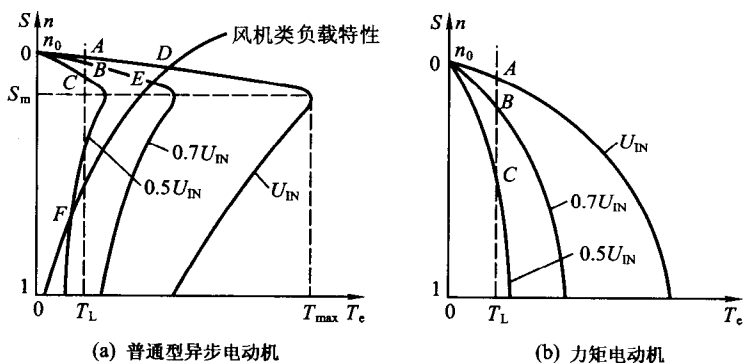


图 1-1 异步电动机机械特性

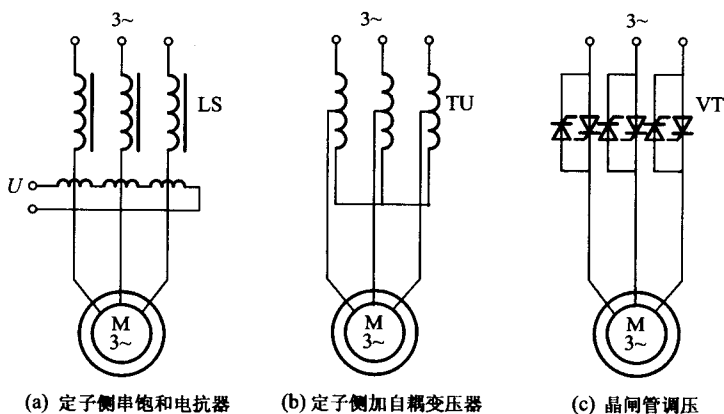


图 1-2 异步电动机定子电压的调压方法

晶闸管调压调速通常采用相位控制。这种控制方式中, 控制晶闸管的触发角 α , 就可以对输出交流基波电压有效值进行控制, 如图 1-3 所示。对不同的触发角 α , 负载电压波形 $u_R = f(t)$ 不同, α 角越大, 负载上的电压面积 (图中阴影部分) 越小, 负载上的交流基波电压有效值越低, 从而起到了调整交流电压的作用。当然, 负载上的电压波形除含有基波电压而外, 还含有高次谐波成分, 这会对电网造成谐波污染。

在晶闸管调压调速系统中,晶闸管可借负载电流过零而自行关断,不需要另加换流装置,故线路简单、调试容易、成本低廉。调压调速在低速时,由于电动机的转差损耗($P_s = sP_e \approx sP_i$, P_i 为输入功率)增大,致使电动机发热严重,效率较低,因此调压调速多用于一些调速范围不大(s 较小)或属于短时工作制以及短时重复工作制的中、小功率调速系统中,例如电梯、起重机械等。

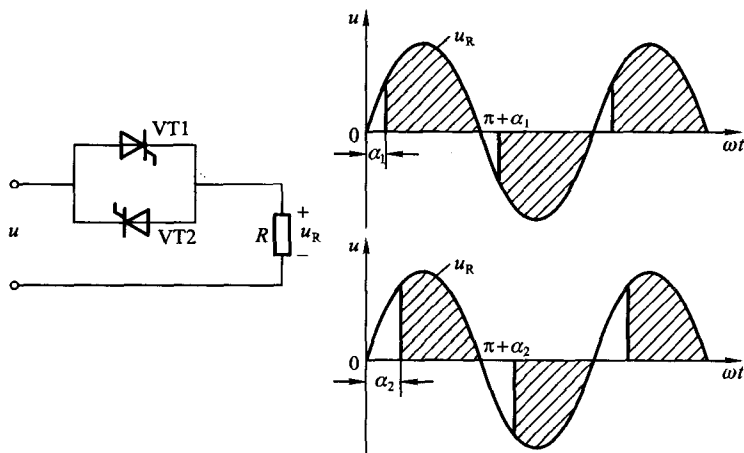


图 1-3 晶闸管单相调压电路负载电压波形

第二节 晶闸管三相交流调压电路

三相调压电路的联接方式有全波调压电路、半波调压电路、Y 形联结(以下简称为 Y 联结)调压电路以及 Δ 形联结(以下简称为 Δ 联结)调压电路。本章主要讨论应用最广泛的三相全波 Y 联结调压电路,如图 1-4 所示,此电路的每一相都有并联反接的两只晶闸管,这两只晶闸管可以用一只双向晶闸管代替,线路工作特点不变。此电路较其他调压电路谐波少。

对于图 1-4 所示电路,各个晶闸管按照如下规律触发:

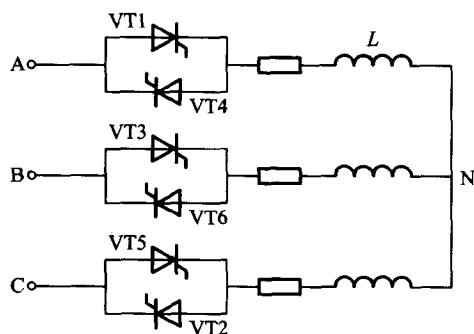


图 1-4 三相全波 Y 联结调压电路

(1) 电机正转时晶闸管的触发顺序为 $VT1 \rightarrow VT2 \rightarrow VT3 \rightarrow VT4 \rightarrow VT5 \rightarrow VT6 \rightarrow VT1$, 各管触发脉冲相差 60° ; 电机反转时晶闸管的触发顺序为 $VT6 \rightarrow VT5 \rightarrow VT4 \rightarrow VT3 \rightarrow VT2 \rightarrow VT1 \rightarrow VT6$, 各管触发脉冲相差 60° 。基于这种触发原则, 同相相反联接的两晶闸管 $VT1 - VT4$ 之间、 $VT3 - VT6$ 之间、 $VT5 - VT2$ 之间触发脉冲互差 180° ; 不同相但连接方向相同的晶闸管 $VT1 - VT3 - VT5$ 之间和 $VT4 - VT6 - VT2$ 之间互差 120° 。

(2) 由于负载力矩电机为特殊的感性负载, 因而每个晶闸管的触发脉冲采用宽脉冲(脉宽大于 60°)或双脉冲触发, 原因如下。

交流力矩电机是感性负载, 对于感性负载, 电流和电压波形不相同, 且电流滞后电压一个角度, 这时调压电路的输出电压不仅与触发角 α 有关, 也与负载的阻抗角 φ 有关。由异步电动机的等值电路可以看出, 整个电路的总阻抗是随转差率 s 不同而变化的, 即 φ 是个变量, 这就增加了问题的复杂性。同相正、反向晶闸管在感性负载下触发导通的情况类似于工作在交流电压下的感性负载电路突然合闸时电流的瞬态过程, 如图 1-5 所示的电路, 设交流电源电压为 $u = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega_1 t + \alpha)$, 开关 S 在 $t=0$ 时合闸(相当于触发角为 α 时, 使晶闸管触发导通), 根据电路理论可知, 此时流过的负载电流为:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega_1 L)^2}} \sin(\omega_1 t + \alpha - \varphi) - \frac{\sqrt{2}U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega_1 L)^2}} \sin(\alpha - \varphi) \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \quad (1-2)$$

式中, RL 电路的功率因数角 $\varphi = \arctan \frac{\omega_1 L}{R}$ 。式(1-2)中第一项为电流的稳态分量, 按正弦规律变化; 第二项为瞬态分量, 是在合闸后短时间内存在的一个递减电流分量, 当 $t \geq 4\tau$ ($\tau = L/R$) 后, 这一项基本消失。以下对三种情况进行分析:

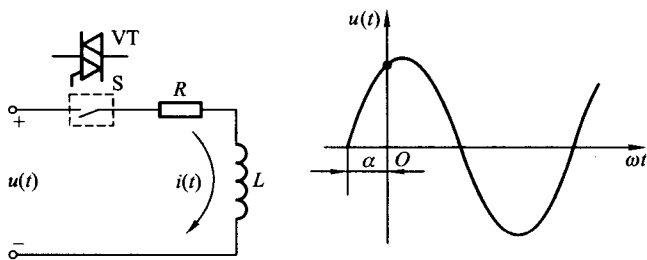


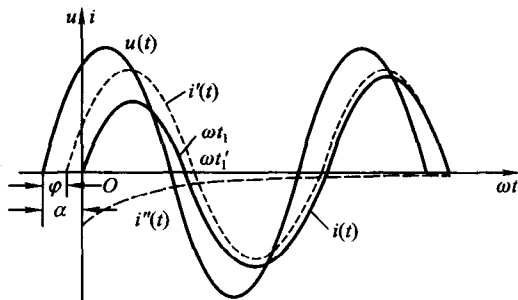
图 1-5 单相调压电路

1. $\alpha = \varphi$ 时

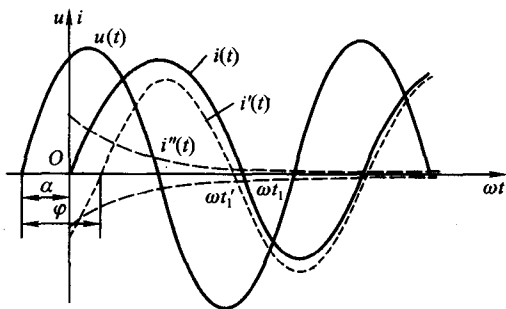
由式(1-2)可知,由于 $\alpha = \varphi$,负载电流 $i(t)$ 中没有瞬态分量,电流在接通时就进入稳态,此时负载上得到全电压,且电流连续,晶闸管不再起调压作用。

2. $\alpha > \varphi$ 时

由式(1-2)可知,此时 $i(t)$ 表达式第二项是负值,说明在这种情况下实际电流过零点 (ωt_1) 比稳态电流过零点 ($\omega t'_1$) 的时间提前了,如图 1-6 所示。由于同相连接相反的两个晶闸管触发脉冲前沿距离恒为 180° ,这样在同相另一晶闸管的触发脉冲到来时,原已导通的该相晶闸管已关断,且阳极、阴极间已加上反向电压,所以另一晶闸管可以在触发脉冲作用下触发导通,此时晶闸管起调压作用。

图 1-6 $\alpha > \varphi$ 时的电压、电流波形图3. $\alpha < \varphi$ 时

由式(1-2)可知,此时 $i(t)$ 表达式第二项变成正值,结果使实际电流过零点 (ωt_1) 比稳态电流过零点 ($\omega t'_1$) 时间延后了,如图 1-7 所示。由图可知,由于

图 1-7 $\alpha < \varphi$ 时的电压、电流波形图

同相连接相反的两个晶闸管触发脉冲前沿距离恒为 180° ,这样在同相另一晶闸管的触发脉冲到来时,原已导通的该相晶闸管尚未关断,所以另一晶闸管触发脉冲不起作用。如果所用的触发脉冲不够宽,在双向晶闸管电流过零 (ωt_1) 之时触发脉冲已消失,那么另一晶闸管在下一个半周时将由于没有触发而不能导通,结果形成“单向半波整流”现象。

如果采用足够宽的触发脉冲,使正向电流过零时,反向往工作的晶闸管仍有触发电流存在,就可以保证另一晶闸管继续导通,从而能消除“单向半波整流”现象。

对于力矩电动机而言,其功率因数角 φ 是电动机转速的函数,并且变化范围较大,所以三相全波 Y 联结调压电路在实际工作中,必然会出现 $\alpha \leq \varphi$ 的情况。为了避免“单向半波整流”现象的出现,应采用宽脉冲或双脉冲进行触发,这