



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材

交流调速系统

第2版

宋书中 常晓玲 主编



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材

交流调速系统

第 2 版

主编 宋书中 常晓玲
参编 郭广灵 邵 明
李智强 周 杰



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。书中详细叙述了各种交流电力拖动自动控制系统的工作原理、实现方法、机械特性、运行特点及适用场合,包括调压调速和电磁离合器调速、串级调速、变频调速、同步电动机调速系统和交流伺服系统,重点为变频调速系统,并介绍了新型电力电子器件及其控制和驱动电路、典型变频器产品的技术性能与使用维护方法及多个变频器工程应用实例。对交流伺服内容介绍了数控系统与伺服系统产品联合控制的应用方法,并在精简推导的前提下,扼要介绍了矢量变换、模糊控制等新型算法,在突出工程应用的同时保持了完整的交流调速理论体系。

本书的特点是:本着实际、实用的原则,尽量简化理论推导,注重物理概念的阐述与分析;力求反映交流调速的最新技术及应用成果;强调交流调速的实现方法和工程应用。每章均有应用实例和习题。

本书可作为高职高专自动化、机电类专业教材,也可作为职业大学、中等专业学校、短期培训班电类及相关专业的教材或参考书。

本书配有电子教案供教师使用,可发电子邮件至 wangyx@mail.machneinfo.gov.cn 邮箱索取。

图书在版编目(CIP)数据

交流调速系统/宋书中,常晓玲主编.—2版.—北京:
机械工业出版社,2006.7
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材
ISBN 7-111-06855-6

I.交… II.①宋…②常… III.交流电机-调速
-高等学校:技术学校-教材 IV.TM344.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第070604号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:王玉鑫 版式设计:张世琴 责任校对:张莉娟
封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2006年8月第2版·第1次印刷
184mm×260mm·13印张·318千字
0 001—4 000册
定价:19.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
编辑热线电话(010)68354423
封面无防伪标均为盗版

第 2 版前言

随着电力电子技术、微电子技术和自动控制理论的发展,交流调速技术日新月异。高性能交流电力拖动系统在工业上的应用越来越广,“交流调速系统”课程也随着交流调速技术的发展而不断充实和更新着教学内容。

本书共分七章。第一章为异步电动机调压调速系统,内容有异步电动机调压调速原理和方法、晶闸管三相交流调压电路、调压调速系统的组成及静特性、滑差电动机调速系统、异步电动机调压调速系统应用举例。第二章为绕线转子异步电动机串级调速系统,内容有串级调速系统的原理与基本类型、低于同步转速的串级调速系统的机械特性、串级调速系统的效率和功率因数、串级调速的闭环控制系统、串级调速系统应用中的几个问题。第三章为变频调速及变频器,内容有异步电动机变频调速的控制方法和机械特性、变频器的分类与特点、晶闸管变频器、脉宽调制型(PWM)变频器。第四章为异步电动机变频调速系统,内容有转速开环的晶闸管变频调速系统结构、晶闸管变频调速系统中的主要控制环节、转差频率控制的转速闭环变频调速系统、PWM变频调速系统中的功率接口、PWM变频调速系统。第五章为变频调速系统的控制算法,内容有矢量变换控制的基本概念、异步电动机的数学模型、坐标变换、交流电动机的矢量变换变频调速系统、其他控制算法。第六章为同步电动机调速系统与交流伺服系统,内容有同步电动机调速的基本原理、永磁同步电动机的调速系统、交流伺服系统及应用、负载换相的同步电动机控制系统。第七章为变频调速应用,内容有变频调速技术在工业生产中的应用概况、现代变频器的运行功能、典型变频器产品的技术性能、变频调速的运行特点和应用实例等。

与第 1 版相比,第 2 版主要改动和更新的内容如下:

1) 更加突出以工程应用为目的的教学要求,删除了过多的理论推导和模拟控制技术介绍,如第一章删除了调压调速系统动特性分析部分;第二章删除了超同步串级调速系统和 KGJF 系列晶闸管串级调速系统应用实例;第三章删除了逆变电路中晶闸管的强迫换相原理等。

2) 根据技术发展增加了新的交流电动机控制技术,如第五章增加了交流电动机矢量变换变频调速系统的内容和交流电动机的其他控制算法;第六章改写为同步电动机调速系统与交流伺服系统内容;第七章新增了变频调速的运行特点和多种应用实例。

本教材按 40~50 学时编写,由河南科技大学宋书中教授、广州轻工职业技术学院常晓玲教授任主编,上海理工大学杨正堂教授任主审。其中,绪论和第一章由宋书中编写;第四、第六章由常晓玲编写;第二章由河南工业大学郭广灵编写;第三章由周杰编写;第五章由李智强编写;第七章由邵明编写。

由于作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

第 1 版前言

随着电力电子技术、微电子技术和自动控制理论的发展，交流调速技术日新月异。可调速的高性能交流电力拖动系统在工业上的应用越来越广，“交流调速系统”课程也伴随着交流调速技术的发展而不断改革着教学内容。

本教材属普通高等专科学校教育机电类专业规划教材，是按照全国高等专科学校电气工程专业教学指导委员会制订的“工业电气自动化、电气技术专业教学计划”的内容及学时要求，根据重新审定的“交流调速系统”教学大纲编写的。

本书共分七章。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分析、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。第二章为绕线转子异步电动机串级调速系统，内容有串级调速系统的原理与基本类型、机械特性分析、功率因数及效率分析、闭环调速系统的组成及应用问题讨论等。第三章为变频调速及变频器，内容有变频调速的原理及机械特性，变频器的分类与特点，交-交变频器、交-直-交变频器、PWM 变频器的原理与实现，新型电力电子器件的性能及使用方法等。第四章为异步电动机变频调速系统，内容有典型开环调速系统结构及特性、系统中的主要控制环节电路及作用、转差频率控制的闭环变频调速系统、单片机控制的 SPWM 型变频调速系统等。第五章为异步电动机的矢量变换变频调速系统。内容有矢量变换方法、异步电动机的矢量化数学模型及矢量变换控制方程式、矢量变换控制系统等。第六章为无换向器电动机调速系统，内容有无换向器电动机的工作原理、换流方式、基本特性及调速方法、调速系统等。第七章为变频调速应用资料，内容有变频调速技术在工业生产中的应用概况、变频器产品的技术性能、使用方法介绍等。

本教材按 40 学时编写，由洛阳工业高等专科学校宋书中副教授任主编，郑州工业高等专科学校常晓玲副教授任副主编，上海理工大学杨正堂副教授主审。其中，绪论和第一、七章由宋书中执笔，第二章由承德石油高等专科学校马铁执笔，第三、四章由常晓玲执笔，第五章由上海电机技术高等专科学校焦斌执笔，第六章由哈尔滨工业大学威海分校张万锋执笔。

由于作者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	
绪论	1
第一章 异步电动机调压调速系统	4
第一节 异步电动机调压调速原理和方法	4
第二节 晶闸管三相交流调压电路	6
第三节 调压调速系统的组成及静特性	13
第四节 滑差电动机调速系统	19
第五节 异步电动机调压调速系统应用举例	22
练习与思考题	30
第二章 绕线转子异步电动机串级调速系统	31
第一节 串级调速的原理及基本类型	31
第二节 低于同步转速的串级调速系统的机械特性	35
第三节 串级调速系统的效率和功率因数	40
第四节 串级调速的闭环控制系统	42
第五节 串级调速系统应用中的几个问题	46
第六节 单片机控制的串级调速系统实例	49
练习与思考题	51
第三章 变频调速及变频器	52
第一节 异步电动机变频调速的控制方式和机械特性	52
第二节 变频器的分类与特点	56
第三节 晶闸管变频器	59
第四节 脉宽调制型变频器	67
练习与思考题	79
第四章 异步电动机变频调速系统	81
第一节 转速开环的晶闸管变频调速系统结构	81
第二节 晶闸管变频调速系统中的主要控制环节	83
第三节 转差频率控制的转速闭环变频调速系统	87
第四节 PWM 变频调速系统中的功率接口	90
第五节 PWM 变频调速系统	97
练习与思考题	104
第五章 变频调速系统的控制算法	105
第一节 矢量变换控制的基本概念	105
第二节 异步电动机的数学模型	108
第三节 坐标变换	112
第四节 交流电动机的矢量变换变频调速系统	125
第五节 其他控制算法	137
练习与思考题	143
第六章 同步电动机调速系统与交流伺服系统	144
第一节 同步电动机调速的基本原理	144
第二节 永磁同步电动机调速系统	147
第三节 交流伺服系统及应用	153
第四节 负载换相的同步电动机控制系统	157
练习与思考题	167
第七章 变频调速应用	168
第一节 变频调速技术在工业生产中的应用的概况	168
第二节 现代变频器的运行功能	171
第三节 典型变频器产品的技术性能	179
第四节 变频调速的运行特点和应用实例	182
练习与思考题	200
参考文献	201

绪 论

一、交流调速系统的特点

自从 1834 年直流电动机出现以后，直流电动机作为调速电动机的代表，在工业中得到了广泛的应用。它的主要优点在于调速范围广、静差小、稳定性好以及具有良好的动态性能。晶闸管变流装置的应用使直流拖动发展到了一个很高的水平，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采用直流电力拖动系统。尽管如此，直流调速系统却解决不了直流电动机本身机械换向问题和在恶劣环境下的不适用问题，同时，制造大容量、高转速及高电压直流电动机也十分困难，这就限制了直流传动系统的进一步发展。

交流电动机在 1885 年出现后，由于一直没有理想的调速方案，只能被应用于恒速拖动领域。直到 20 世纪 30 年代起，不少国家才开始提出各种交流电动机调速的原始方案。晶闸管的出现使交流电动机调速的发展出现了一个飞跃，使得采用半导体变流技术的交流调速得以实现。国际上在 20 世纪 60 年代后期解决了交流电动机调速方案中的关键问题。20 世纪 70 年代就开始实现了产品的高电压、大容量、小型化，且已经逐渐替代了大部分传统的直流电动机的应用。交流调速系统发展迅速的很大一部分原因在于交流电动机本身的优点：没有电刷和换向器；结构简单；坚固而寿命长。近年来大功率半导体器件、大规模集成电路、电子计算机技术的发展，加上交流电动机本身的优越特性，为交流调速提供了广泛的应用前景。目前交流电力拖动系统已具有了较宽的调速范围、较高的稳态精度、较快的动态响应、较高的工作效率以及可以四象限运行等优异性能，其静、动特性均可以与直流电动机拖动系统相媲美。

交流调速系统与直流调速系统相比，具有如下特点：

- 1) 容量大。这是由电动机本身的容量决定的。直流电动机的单机容量一般能达到 12 ~ 14MW，而交流电动机容量却可以远远高于此值。
- 2) 转速高且耐高压。直流电动机受到换向器的限制，最高电压只能达到 1000V，而交流电动机的最高电压容易达到 6 ~ 10kV 甚至更高。一般直流电动机最高转速只能达到 3000r/min 左右，而交流电动机则可高达每分钟几万转，这使得交流电动机的调速系统具有耐高压、转速高的特点。
- 3) 交流电动机的体积、重量、价格比同等容量的直流电动机小，且交流电动机结构简单、坚固耐用、经济可靠、惯性小，这成为交流调速系统的一大优点。
- 4) 交流电动机特别是笼型异步电动机的调速装置环境适应性广。直流电动机由于结构复杂，换向器工作要求高，使用中受到很多环境的限制，如工厂里的酸洗车间，由于腐蚀严重，使用直流电动机时每周都要检修电刷，维修起来又比较困难；而交流电动机却可以在十分恶劣的环境下使用，且不致损坏。
- 5) 由于高性能、高精度新型调速系统的出现和不断发展，交流拖动系统已达到同直流拖动系统一样的性能指标，这使其能越来越广泛地应用于国民经济的各个生产领域中。
- 6) 交流调速装置能显著地节能。工业上大量使用的风机、水泵、压缩机类负载都是靠

交流电动机拖动的，这类装置的用电量占工业用电量的 50%，以往都不对电动机调速，而仅采用挡板、节流阀来控制风量或流量，大量电能被白白浪费；如果采用交流电动机调速来改变风量或流量，则效率将会被大大提高。从各方面来看，改造恒速交流电动机为交流调速电动机，有着可观的能源效益。

二、交流调速系统的分类

在电机学中推导过交流电动机的转速表达式

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

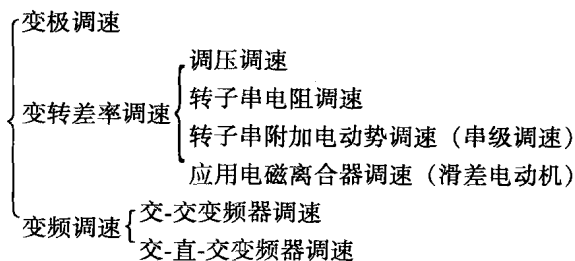
式中 n ——转速 (r/min)；

f_1 ——定子供电频率 (Hz)；

p ——极对数；

s ——转差率。

由此可以归纳出交流电动机的 3 种调速方法：变极对数 p 调速、变转差率 s 调速及变电源频率 f_1 调速。其中变转差率 s 的调速方法又可以通过调定子电压 U_1 、转子电阻 R_2 、转子附加电动势 E_f 及采用电磁离合器来实现。于是，交流电动机就有很多种调速方案，分类如下：



在以上 3 种调速方案中，变极对数调速是有级的，转速不能连续调节。变转差率调速时，不调同步转速，低速时，转差损耗较大、效率较低；只有串级调速情况下，转差损耗才得以利用，效率很高。变频调速方案与变转差率调速方案有着本质的不同：由于调节同步转速，故可以由高速到低速保持有限的转差率，效率高、调速范围大、精度高，是交流电动机的一种比较理想的调速方案。

三、交流调速系统的发展趋势

1. 发展水平

交流调速系统目前的发展水平可以概括如下：

1) 已从小容量等级发展到大容量、特大容量等级，并解决了交流调速系统的性能指标问题，填补了直流调速系统在特大容量调速时的空白。

2) 可以使交流调速系统具有高可靠性和长期连续运行能力，从而满足有些场合长期不停机检修的要求或对可靠性的特殊要求。

3) 可以使交流调速系统实现高性能、高精度的转速控制。除了控制部分可以得到和直流调速控制同样良好的性能外，异步电动机本身固有的优点又使整个控制系统得到更好的动态性能。采用数字锁相控制的异步电动机变频调速系统，调速精度可高达 0.002%。

4) 交流调速系统已从直流调速的补充手段发展到与直流调速系统相竞争、相媲美、相

抗衡，并逐渐取代的地位。

2. 技术发展趋势

交流调速系统既依赖于电子逆变技术和微电子技术的发展，也依赖于交流电动机制造技术的发展。其技术发展趋势可概括如下：

1) 研制新型的开关元件和储能元件。20 世纪 80 年代以来，各种具有自关断能力的全控型、高速型功率开关器件相继研制成功，使得交流调速跨入了电力电子技术的新时代。

2) 引入新的控制思想、理论和技术，改善交流调速系统的性能。这方面目前最先进的还是采用交流电动机的矢量变换控制，但是在建模、电动机的某些参数变化对系统的影响、矢量变换的模块化问题上，尚有许多待研究的课题。另外，对电流型变频器，可以使用近年来才发展的多重化技术，改善输出波形。

3) 进一步改进现有交流调速装置的可靠性，彻底解决瞬时停电后的装置安全及恢复正常工作问题。

4) 推广微型计算机在交流调速系统中的应用，充分显示现代控制手段的优越性。

5) 研制大容量、特大容量调速系统理想的新型交流电动机。

目前，具有代表性的交流调速系统有晶闸管调压调速系统、异步电动机串级调速系统、变频调速系统、无换向器电动机调速系统、矢量变换控制系统等。随着大量新器件的出现和计算机技术的发展，交流调速系统的性能大大提高，有些问题已得到根本的突破。交流调速系统正广泛地应用于生产的各个领域。

第一章 异步电动机调压调速系统

第一节 异步电动机调压调速原理和方法

一、调压调速原理

根据异步电动机的机械特性方程式

$$T_e = \frac{3pU_1^2 R_2' / s}{\omega_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + \omega_1^2 (L_{11} + L_2')^2]}$$

式中 p ——电动机的极对数；

U_1 、 ω_1 ——电动机定子的相电压和供电角频率；

s ——转差率；

R_1 、 R_2' ——定子每相电阻和折算到定子侧的转子每相电阻；

L_{11} 、 L_2' ——定子每相漏感和折算到定子侧的转子每相漏感。

可见，当转差率 s 一定时，电磁转矩与定子电压的二次方成正比，这就说明不同的定子电压可以得到一组不同的人为机械特性，如图 1-1 所示。带恒转矩负载 T_L 时，可得到不同的稳定转速（见图中的 A、B、C 点）。由于普通异步电动机工作段的转差率 s 很小，因此对轻负载来说，调速范围很小。但是，对风机泵类负载，由于其负载特性为 $T_L = kn^\alpha$ ($\alpha > 1$)，故采用调压调速可得到较大的调速范围（见图中的 D、E、F 点）。

所谓调压调速，就是通过改变定子外加电压来改变其机械特性的函数关系，从而达到改变电动机在一定输出转矩下转速的目的。

二、调压调速方法

交流调压调速是一种比较简便的调速方法。供电电源大都直接取自工频三相 380V 交流电网，为了获得可调电压，必须加上调压器。过去主要是利用自耦变压器（小容量时）或饱和电抗器串在定子三相电路中来实现调压，其原理图如图 1-2a、b 所示。自耦变压器 TA 的调压原理是很好理解的。饱和电抗器 LT 是带有直流励磁绕组的交流电抗器，改变直流励磁电流可以控制铁心的饱和程度，从而改变交流电抗值。当铁心饱和时，交流电抗很小，因而电动机定子所得电压高；当铁心不饱和时，交流电抗变大，因而定子电压降低，实现降压调速。

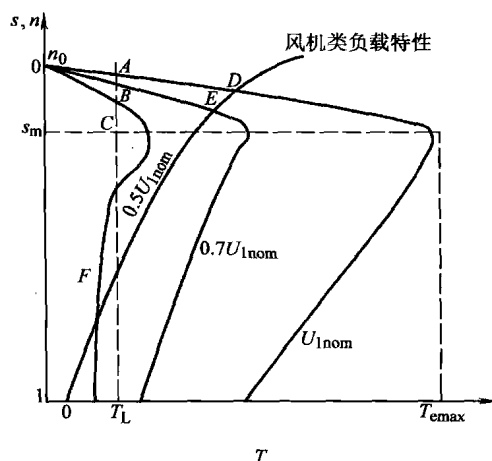


图 1-1 异步电动机在不同电压下的机械特性

自从电力电子技术发展起来后，由于它几乎不消耗铜、铁材料，体积小、重量轻、惯性小、控制方便，因此用晶闸管组成的调压器很快成为自动交流调压器的主要形式，如图 1-2c 所示。采用三对反并联的晶闸管或二个双向晶闸管调节电动机定子电压，这就是晶闸管交流调压器。

我们以单相调压电路为例来说明晶闸管的控制方式。单相调压电路如图 1-3 所示，其控制方法有以下两种：

1. 通断控制

把晶闸管作为开关，将负载电路与电源完全接通几个周期，然后再完全断开几个周期。交流电压的大小完全靠改变通断时间比来调节。在这里晶闸管起着—个通断频率可调的快速开关的作用。这种控制下的单相输出电压波形如图 1-4 所示。

2. 相位控制

把作为开关的晶闸管在电源电压的每半周期内将负载与电源接通一段时间，这段时间的长短通过改变晶闸管的触发延迟角 α 来控制。 α 角越大，晶闸管每周期的导通角越小，加在负载上的电压有效值越小，从而起到调压的作用。其电压输出波形如图 1-5 所示。

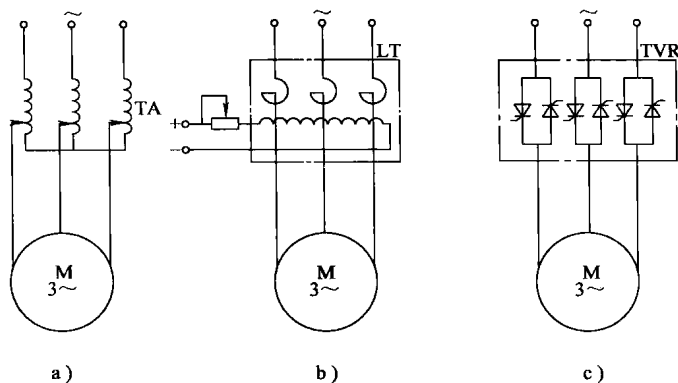


图 1-2 异步电动机调压调速原理图

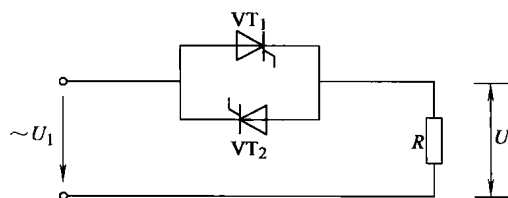


图 1-3 晶闸管单相调压电路

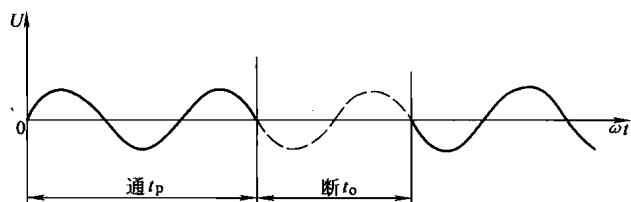


图 1-4 晶闸管单相调压电路通断控制下的负载电压波形

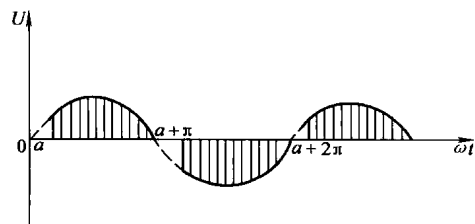


图 1-5 晶闸管单相调压电路相位控制下的负载电压波形

通断控制由于采用了“零”触发的控制方法，几乎不产生谐波污染。但由于在导通周期内电动机承受的电压为额定电压，而在间歇周期内电动机承受的电压为零，故加在电动机上的电压变化剧烈，致使转速脉动较大，特别是在低转速时，影响尤为严重，故常用于大容量、调速范围较小的场合。

相位控制的输出电压较为精确、调速精度较高、快速性好，低速时转速脉动较小。但由于相位控制的导通波形只是工频正弦波一个周期的一部分，会产生成分复杂的谐波，对电网造成谐波污染，故常用在中、小功率、调速精度与稳定性要求较高的场合。

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，不需要另加换相装

置，故线路简单、调试容易、维修方便、成本低廉，便于对原交流拖动系统改造时应用。但在低速时，由于电动机的转差损耗增大，致使电动机发热严重，效率亦随之降低，所以常用在一些属于短时工作制和短时重复工作制的调速系统中，例如电梯、起重机械及家电产品中。

第二节 晶闸管三相交流调压电路

一、晶闸管三相交流调压电路的接线形式

晶闸管三相交流调压电路的联结方式很多，各种接法均有其特点，适用范围也不尽相同，下面介绍几种常用的三相调压电路。

1. 三相全波星形联结的调压电路（见图 1-6）

这种接法的特点是输出谐波分量低，并且适用于低电压、大电流的负载电路。

2. 带零线的三相全波星形联结的调压电路（见图 1-7）

该三相交流调压电路实际上相当于三个单相反并联电路的组合。其特点是触发脉冲可采用窄脉冲，但零线上有 3 次（包括 3 的奇数次）谐波电流，且 3 次谐波对电动机和电网影响严重，所以在工业上较少应用。

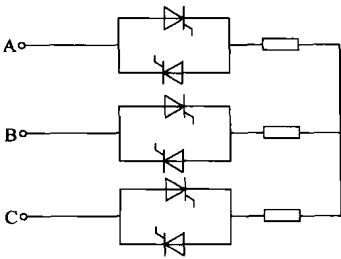


图 1-6 三相全波星形联结的调压电路

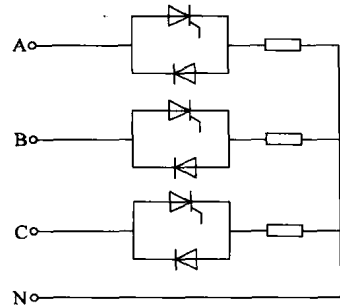


图 1-7 带零线的三相全波星形联结调压电路

3. 三相半控星形联结调压电路（见图 1-8）

这种接法的优点在于简化控制、降低调压电路成本。但由于每一相只有一个晶闸管，故每相电压和电流波形正、负半周不对称，负载电流中除奇次谐波外，还有偶次谐波，将使电动机输出转矩减小、效率降低，因此仅在线路要求简单的小容量场合中使用。

4. 晶闸管与负载接成内三角形的三相调压电路（见图 1-9）

这种调压电路实际上是由三个单相交流调压电路组合而成的。

5. 三相晶闸管三角形联结调压电路（见图 1-10）

该电路只使用 3 个晶闸管，从而使得电路的构成和控制更为简单和经济。晶闸管放在负载后面，可减少电网浪

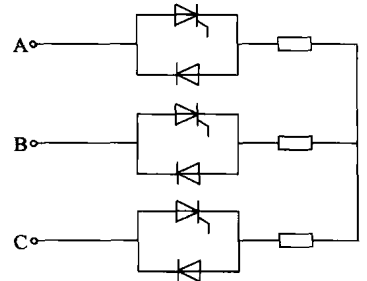


图 1-8 三相半控星形联结调压电路

涌电压对它的冲击。但该电路要求电动机定子绕组为星形联结，且中性点能拆开。这种电路负载上有偶次谐波，同样对电动机不利，且晶闸管的耐压要求比星形联结高。

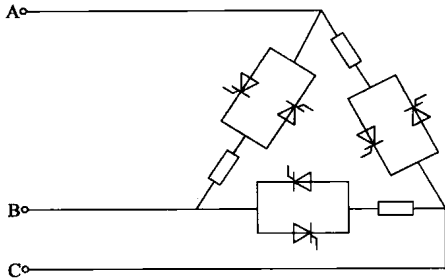


图 1-9 晶闸管与负载接成内三角形的三相调压电路

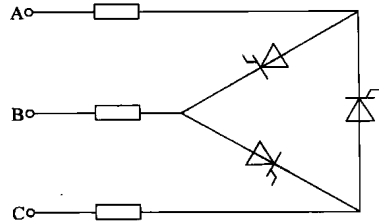


图 1-10 三相晶闸管三角形联结调压电路

二、晶闸管三相交流调压电路的工作原理

我们主要讨论三相全波星形联结的调压电路（见图 1-11）。

用三对反并联晶闸管作为开关器件，分别接至负载就构成了三相全波星形联结的调压电路。通过改变触发脉冲的触发延迟角 α ，便可以控制加在负载上的电压大小。对于这种不带零线的调压电路，为使三相电流构成通路，任意时刻至少要有 2 个晶闸管同时导通。为了调整电压，需要改变触发脉冲的触发延迟角 α 。为此对触发脉冲电路的要求是：①三相正（或负）触发脉冲依次间隔 120° ，而每一相正、负触发脉冲间隔 180° ；②为了保证电路在起始工作时能两相同时导通，以及在感性负载和触发延迟角较大时，仍能保持两相同时导通，与三相全控整流桥一样，要求采用双脉冲或宽脉冲触发（触发脉冲宽度大于 60° ）；③为了保证输出的三相电压对称可调，应保持触发脉冲与电源电压同步。

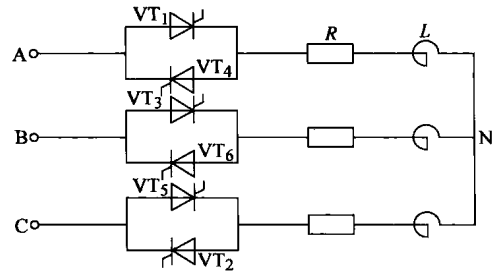


图 1-11 三相全波星形联结的调压电路

下面结合图 1-11 所示电路，具体分析触发脉冲的相位与调压电路输出电压的关系。

（一）三相调压电路在纯电阻性负载时的工作情况

1. 触发延迟角 $\alpha = 0^\circ$ 时

$\alpha = 0^\circ$ 意味着在各相电源电压过零时立即触发相应晶闸管，即过零变正时，触发正向晶闸管；过零变负时，触发反向晶闸管。图 1-12b 为触发脉冲分配图。

相应于触发脉冲分配可以确定各晶闸管的导通区间。例如 VT_1 在 A 相电压过零变正时导通，变负时受反压而自然关断；而 VT_4 在 A 相电压过零变负时导通，变正时受反压而自然关断。这样， VT_1 在 A 相电压正半周期导通； VT_4 在 A 相电压负半周期导通。B、C 两相的导通情况与此相同。晶闸管 $VT_1 \sim VT_6$ 的导通区间如图 1-12 c 所示。

由导通区间可以判断各相负载所获得的电压。由于各相在整个正半周期正向晶闸管导通，而负半周期反向晶闸管导通，所以负载上获得的调压电压仍为完整的正弦波。 $\alpha = 0^\circ$ 时，如忽略晶闸管的管压降，此时调压电路相当于一般的三相交流电路，加到负载上的电压是额

定电源电压。图 1-12d 为 A 相负载电压波形。

归纳 $\alpha = 0^\circ$ 时的导通特点如下：①每个晶闸管持续导通 180° ；②每 60° 区间有 3 个晶闸管同时导通。

2. 触发延迟角 $\alpha = 30^\circ$ 时

$\alpha = 30^\circ$ 意味着在各相电源电压过零后 30° 触发相应的晶闸管。以 A 相为例， u_A 过零变正后 30° 发出 VT_1 的触发脉冲 U_{g1} ；过零变负后 30° 发出 VT_4 的触发脉冲 U_{g4} 。B、C 两相与之类似。图 1-13b 为触发脉冲分配图。

相应于触发脉冲分配也可确定各晶闸管的导通区间。 VT_1 从 U_{g1} 发出开始导通， u_A 过零变负时关断； VT_4 从 U_{g4} 发出时导通， u_A 过零变正时关断。B、C 两相与之类似。图 1-13c 为晶闸管的导通区间图。

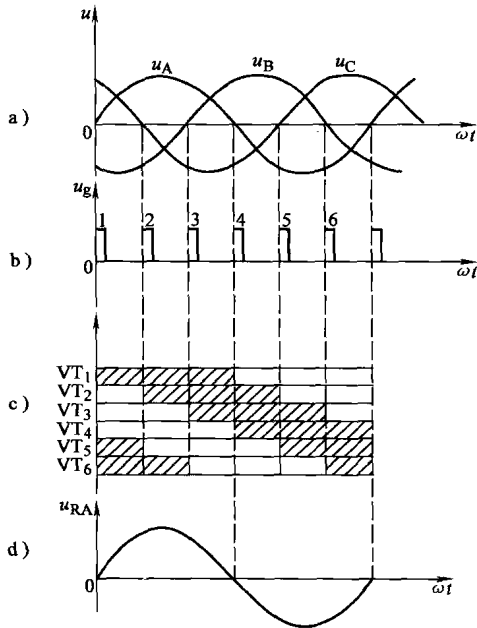


图 1-12 三相全波星形联结
调压电路 $\alpha = 0^\circ$ 时的波形

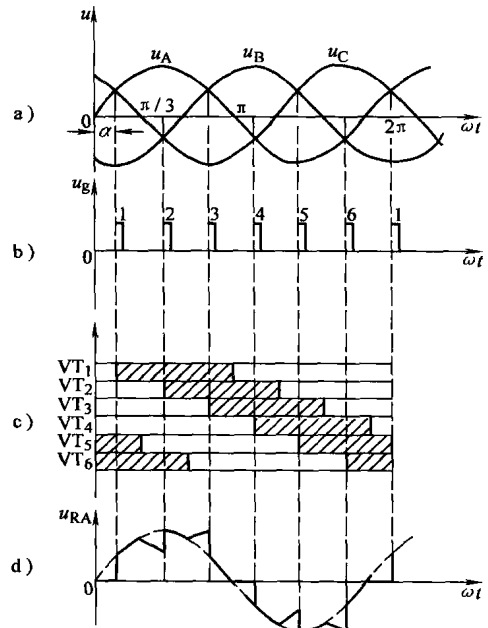


图 1-13 三相全波星形联结
调压电路 $\alpha = 30^\circ$ 时的波形

同样，由导通区间可计算各相负载所获得的调压电压。以 A 相正半周期为例，有

$\omega t = 0^\circ \sim 30^\circ$ ， VT_5 、 VT_6 导通， $u_{RA} = 0$ ；

$\omega t = 30^\circ \sim 60^\circ$ ， VT_1 、 VT_5 、 VT_6 导通， $u_{RA} = u_A$ ；

$\omega t = 60^\circ \sim 90^\circ$ ， VT_1 、 VT_6 导通， $u_{RA} = \frac{1}{2} u_{AB}$ ；

$\omega t = 90^\circ \sim 120^\circ$ ， VT_1 、 VT_2 、 VT_6 导通， $u_{RA} = u_A$ ；

$\omega t = 120^\circ \sim 150^\circ$ ， VT_1 、 VT_2 导通， $u_{RA} = \frac{1}{2} u_{AC}$ ；

$\omega t = 150^\circ \sim 180^\circ$ ， VT_1 、 VT_2 、 VT_3 导通， $u_{RA} = u_A$ 。

A 相负半周期各时域的输出电压与正半周期反向对称。B、C 两相各时域电压分析方法

同上。图 1-13d 为 A 相输出电压波形。

归纳 $\alpha = 30^\circ$ 时的导通特点如下：①每个晶闸管持续导通 150° ；②有的区间由 2 个晶闸管同时导通构成两相流通回路，也有的区间 3 个晶闸管同时导通构成三相流通回路。

3. 触发延迟角 $\alpha = 60^\circ$ 时

$\alpha = 60^\circ$ 时的具体分析 with $\alpha = 30^\circ$ 时相似。这里仅给出 $\alpha = 60^\circ$ 时的脉冲分配图、导通区间图和 A 相负载电压波形，如图 1-14 所示，可自行分析。

归纳 $\alpha = 60^\circ$ 时的导通特点如下：①每个晶闸管导通 120° ；②每个区间均有 2 个晶闸管构成回路。

4. 触发延迟角 $\alpha = 90^\circ$ 时

图 1-15b 为 $\alpha = 90^\circ$ 时各晶闸管的脉冲分配图，利用这个脉冲分配图，如果仍套用 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 时的导通区间分析，认为正半周期或负半周期结束就意味着相应晶闸管的关断，那么就得到如图 1-15c 所示的导通区间图。事实上图 1-15c 所示的导通区间是错误的。因为它出现了这样一种情况：有的区间只有一个晶闸管导通，如 $\omega t = 0^\circ \sim 30^\circ$ 只有 VT_5 导通， $\omega t = 60^\circ \sim 90^\circ$ 只有 VT_6 导通……，显然这是不可能的，一个晶闸管不能构成回路。下面我们来分析 $\alpha = 90^\circ$ 时的正确导通区间，以 VT_1 的通断为例。

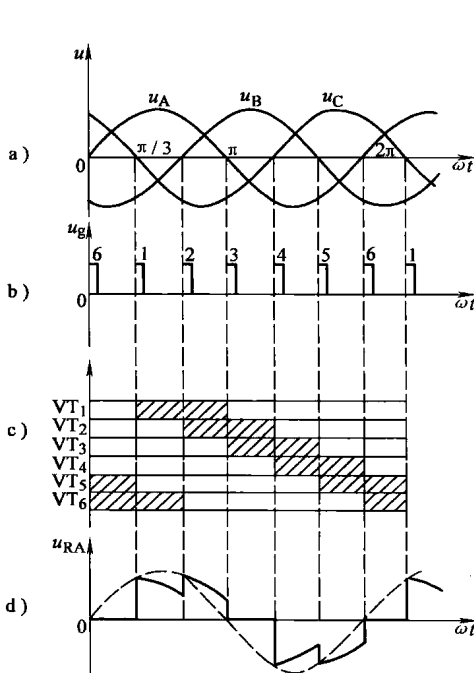


图 1-14 三相全波星形联结
调压电路 $\alpha = 60^\circ$ 时波形

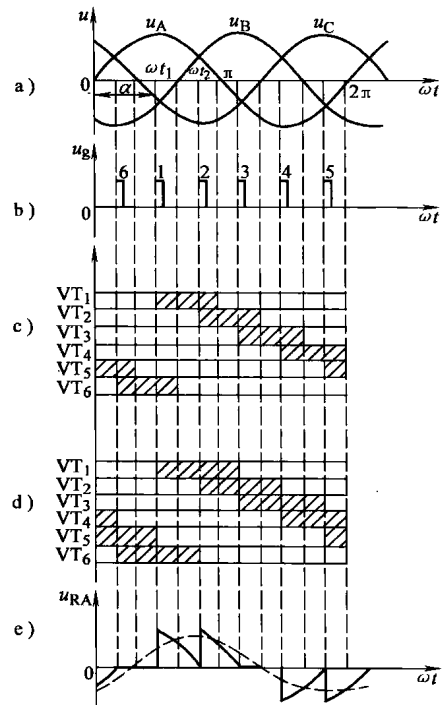


图 1-15 三相全波星形联结
调压电路 $\alpha = 90^\circ$ 时的波形

首先假设触发脉冲 U_g 有足够的宽度（大于 60° ）。则在触发 VT_1 时， VT_6 还有触发脉冲，由于此时（ ωt_1 时刻） $u_A > u_B$ ， VT_6 可以和 VT_1 一起导通，由 A、B 两相构成回路，电流流过： $VT_1 \rightarrow A$ 相负载 $\rightarrow B$ 相负载 $\rightarrow VT_6$ ，这种状态维持到什么时候呢？只要 $u_A > u_B$ ， VT_1 、

VT_6 就能随正电压导通下去。一直到 $u_A < u_B$ (ωt_2 时刻), VT_1 、 VT_6 才能同时关断。同样, 当 U_{g1} 到来时, VT_1 的触发脉冲 U_{g1} 还存在, 又由于 $u_A > u_C$, 使得 VT_2 和 VT_1 能随正电压一起触发导通, 构成 AC 相回路……, 如此下去, 可以知道每个晶闸管导通后, 与前一个触发的晶闸管一起构成回路导通 60° 后关断, 然后又与新触发的下一个晶闸管一起构成回路再导通 60° 后关断。图 1-15d 为其正确的导通区间图。

由此, 可以求出负载电压 u_{RA} (正、负半周期反向对称), 其波形如图 1-15e 所示。

$\omega t = 0^\circ \sim 30^\circ$, VT_4 、 VT_5 导通, $u_{RA} = u_{AC}/2$;

$\omega t = 30^\circ \sim 90^\circ$, VT_5 、 VT_6 导通, $u_{RA} = 0$;

$\omega t = 90^\circ \sim 150^\circ$, VT_1 、 VT_6 导通, $u_{RA} = u_{AB}/2$;

$\omega t = 150^\circ \sim 180^\circ$, VT_1 、 VT_2 导通, $u_{RA} = u_{AC}/2$ 。

归纳 $\alpha = 90^\circ$ 时的导通特点如下: ①每个晶闸管导通 120° ; ②每个区间有 2 个晶闸管导通。

5. 触发延迟角 $\alpha = 120^\circ$ 时

同 $\alpha = 90^\circ$ 时的情况一样, 仍假设触发脉冲宽度大于 60° 。

图 1-16b 为 $\alpha = 120^\circ$ 时各晶闸管触发脉冲分配图。触发 VT_1 时, VT_6 的触发脉冲仍未消失, 而这时 (ωt_1 时刻) 又有 $u_A > u_B$, 于是 VT_1 与 VT_6 一起随正电压导通, 构成 A、B 相回路。到 $u_A < u_B$ (ωt_2 时刻) 又同时关断。而触发 VT_2 时, 又由于 VT_1 的触发脉冲还未消失, 于是 VT_2 与 VT_1 一起导通, 又构成 A、C 相回路, 到 $u_A < u_C$ 时, VT_1 、 VT_2 又同时关断……如此下去, 每个晶闸管与前一个触发的晶闸管一起导通 30° 后关断, 等到下一个晶闸管触发时再与之一起构成回路导通 30° 。图 1-16c 即为其导通区间图。

以 A 相负载电压为例, 其 u_{RA} 正半周期电压为

$\omega t = 0^\circ \sim 30^\circ$, VT_4 、 VT_5 导通, $u_{RA} = u_{AC}/2$;

$\omega t = 30^\circ \sim 60^\circ$, $VT_1 \sim VT_6$ 均不通, $u_{RA} = 0$;

$\omega t = 60^\circ \sim 90^\circ$, VT_5 、 VT_6 导通, $u_{RA} = 0$;

$\omega t = 90^\circ \sim 120^\circ$, $VT_1 \sim VT_6$ 均不通, $u_{RA} = 0$;

$\omega t = 120^\circ \sim 150^\circ$, VT_1 、 VT_6 导通, $u_{RA} = u_{AB}/2$;

$\omega t = 150^\circ \sim 180^\circ$, $VT_1 \sim VT_6$ 均不通, $u_{RA} = 0$ 。

图 1-16d 为 A 相负载电压 u_{RA} 波形。

归纳 $\alpha = 120^\circ$ 时的导通特点如下: ①每个晶闸管触发后导通 30° 、关断 30° , 再触发导通 30° ; ②各区间要么由两个晶闸管导通构成回路, 要么没有晶闸管导通。

6. 触发延迟角 $\alpha \geq 150^\circ$ 时

$\alpha \geq 150^\circ$ 以后, 负载上是没有交流电压输出的。以 VT_1 的触发为例, 当 U_{g1} 发出时, 尽管 VT_6 的触发脉冲仍存在, 但电压已过 $u_A > u_B$ 区间。这样, VT_1 、 VT_6 即使有脉冲也没有正向电压, 其他晶闸管没有触发脉冲, 更不可能导通, 因此从电源到负载构不成通路, 输出电压为零。

由图 1-12 ~ 图 1-16 可以看出, $\alpha = 0^\circ$ 时调压

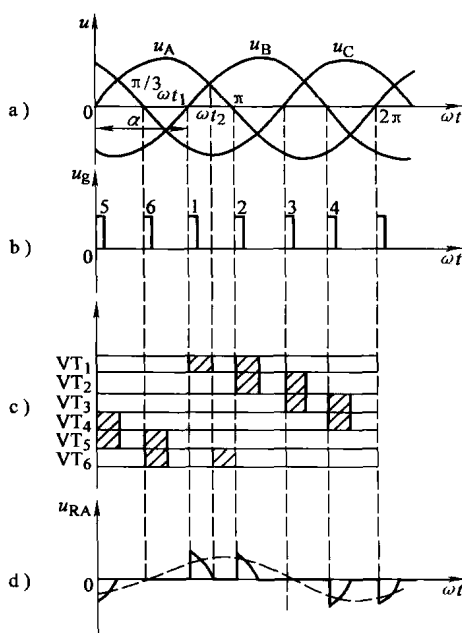


图 1-16 三相全波星形联结调压电路 $\alpha = 120^\circ$ 时的波形

电路输出全电压； α 增大则输出电压减小； $\alpha = 150^\circ$ 时输出电压为零。 α 角在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 之间变化，则输出电压从最大到零连续变化。此外，随着 α 角的增大，电流的不连续程度增加，每相负载上的电压已不是正弦波，但正、负半周期对称。因此，调压电路的输出电压中只有奇次谐波，以 3 次谐波所占比重最大。但由于这种线路没有零线，故无 3 次谐波通路，减少了 3 次谐波对电源的影响。

(二) 交流调压电路在电阻-电感性负载时的工作情况

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，由于电路自感电动势的作用，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仅与触发延迟角有关，还与负载电路的参数阻抗角有关。

为了说明问题，首先来分析单相交流调压电路在电感性负载时的工作情况，最后再介绍三相交流调压电路在电感性负载时的一般结论。

1. 单相交流调压电路

对应图 1-17a 所示单相交流调压电路，以阻抗角 $\varphi = \arctan \omega L / R$ 来表征电阻-电感性负载时的参数情况，可以很容易地作出它的导通区间及输出电流 i 、电压 u 波形图，分别如图 1-17d、e、f 所示。

为了讨论方便起见，把触发时刻定为 $\omega t = 0$ 时刻，并使 $\alpha > \varphi$ ，此时晶闸管 VT_1 导通，相当于在交流 $R-L$ 电路中外加电压 $u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha)$ ，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。电流表达式为

$$i = i_1 + i_2 = \frac{\sqrt{2} U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \frac{\sqrt{2} U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{L} t} \quad (1-1)$$

用图 1-18 分析交流输入电压 u_1 与负载电流 i 之间的关系。

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期且电路中电感储能释放完毕时，电流降为零，而晶闸管 VT_1 电流不能反向而被关断。设 VT_1 的导通角为 θ ，则在 $\omega t = \theta$ 时， $i = 0$ 。把这个条件代入式 (1-1) 中，得

$$\sin(\theta + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\theta}{\tan \varphi}} \quad (1-2)$$

解该方程可以得到 θ 与 α 、 φ 的关系，但这是一个超越方程，只能通过作图的方法解出 $\theta = f(\alpha, \varphi)$ 。图 1-19 即为表达上述方程中 θ 与 α 、 φ 之间关系的曲线族。利用它就能根据负载阻抗角 φ 确定一条曲线，并在这条曲线上按照触发延迟角 α 的大小求得导通角 θ 。

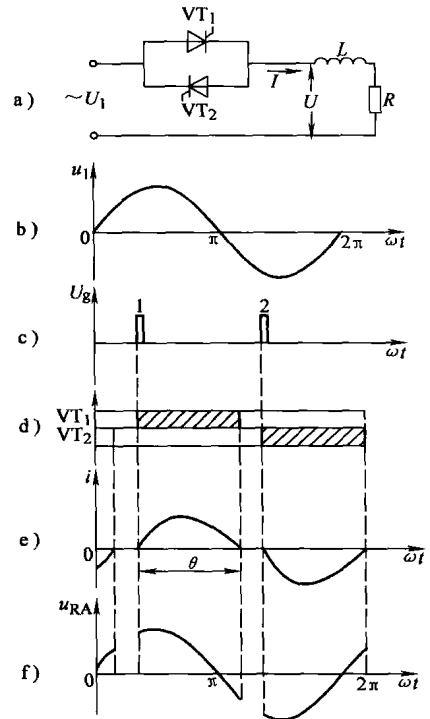


图 1-17 单相交流调压电路在电阻-电感性负载时的工作情况