



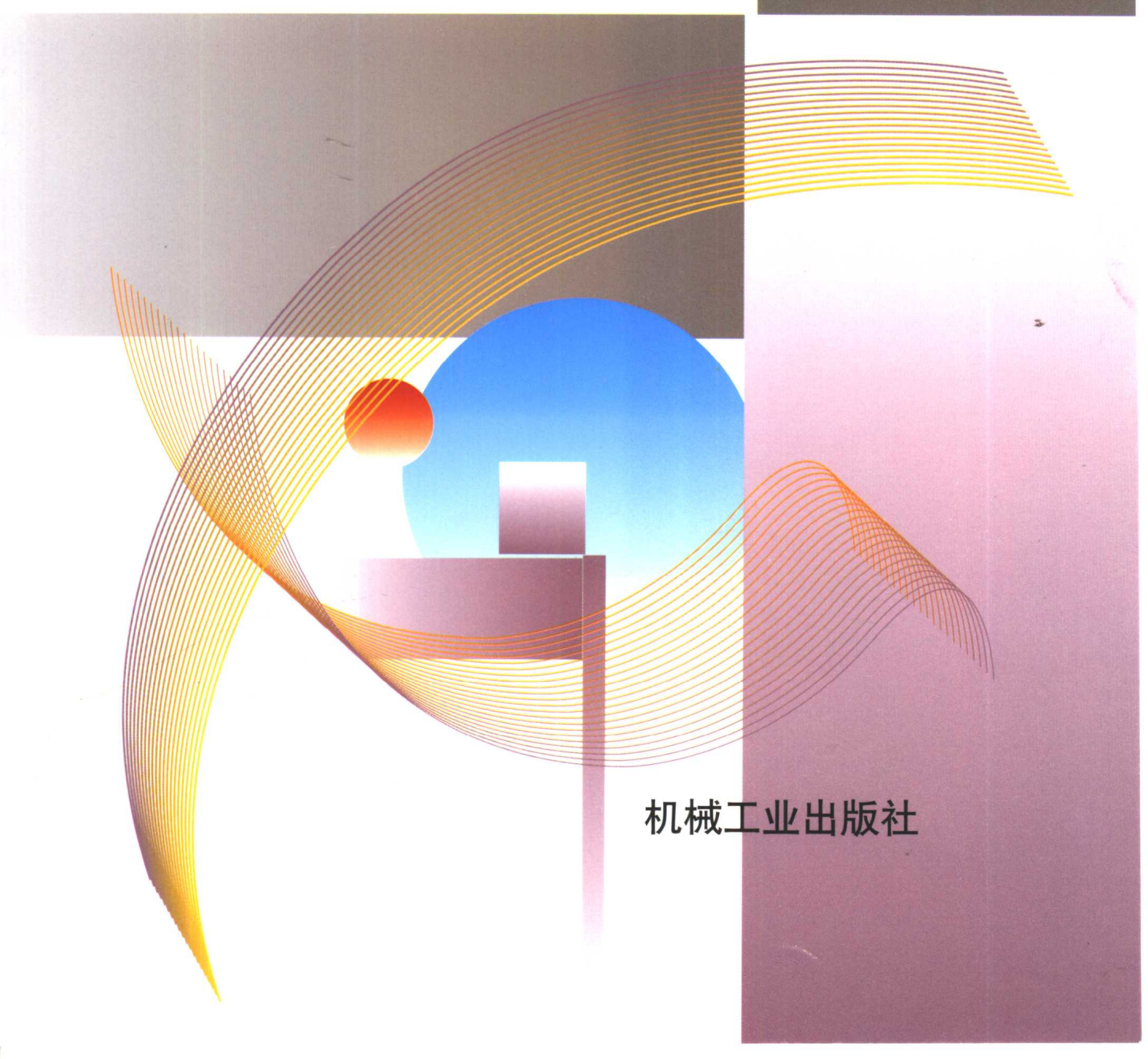
普通高等专科学校教育机电类规划教材

交流调速系统

洛阳工业高等专科学校
郑州工业高等专科学校

宋书中
常晓玲

主 编
副主编



机械工业出版社

普通高等专科学校教育机电类规划教材

交 流 调 速 系 统

主 编 宋书中

副主编 常晓玲

参 编 马 铁

张万锋

焦 斌

主 审 杨正堂



机 械 工 业 出 版 社

本书为普通高等专科学校机电类规划教材。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,其中包括调压调速、串级调速、变频调速、无换向器电动机调速和矢量变换控制的交流电动机调速系统,重点为变频调速系统。同时也介绍了新型电力电子器件及其控制和驱动电路,并介绍了各种典型变频器产品的技术性能和使用、维护方法。

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。

本书可作为高等专科学校电类专业教材,也可作为职业大学、技术学院、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。

图书在版编目(CIP)数据

交流调速系统/宋书中主编. —北京:机械工业出版社,
1999.5

普通高等专科学校机电类规划教材

ISBN 7-111-06855-6

I. 交… II. 宋… III. 交流电机-调速-高等学校-教材
N. TM340.12

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第48344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:韩雪清 版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣
商红云

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年1月第1版第3次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·11.75印张·282千字

11 001 16 000册

定价:15.50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)68993821、68326677-2527

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的等。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。

1998 年 8 月

目 录

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
一、调压调速原理	4
二、调压调速方法	4
第二节 晶闸管三相交流调压电路	6
一、晶闸管三相交流调压电路的接线形式	6
二、晶闸管三相交流调压电路的工作原理	7
第三节 调压调速系统的组成及特性分析	14
一、转速闭环调压调速系统的组成	14
二、系统的静特性与动特性分析	15
三、调压调速系统中的能耗	19
四、调压调速系统的控制角计算	20
第四节 滑差电机调速系统	22
一、电磁转差离合器的基本结构与工作原理	22
二、滑差电机调速系统的组成及机械特性	23
三、滑差电机控制器 (DK-2 型) 简介	24
第五节 异步电动机调压调速系统应用实例	25
一、模拟电路的调压调速系统	25
二、微机控制的交流调压调速系统	27
练习与思考题	33
第二章 绕线转子异步电动机串级调速系统	34
第一节 串级调速的原理及基本类型	34
一、串级调速的原理	34
二、串级调速的基本运行状态及其功率传递关系	34
三、串级调速系统的基本类型	36
第二节 低同步串级调速系统的机械特性	38
一、转子整流器的工作状态	38
二、串级调速系统的调速特性	40
三、串级调速系统的机械特性与最大转矩	41
第三节 串级调速系统的效率和功率因数	43
一、串级调速系统的总效率	43
二、串级调速系统的总功率因数	44
第四节 串级调速的闭环控制系统	46
一、双闭环串级调速系统的组成和工作原理	46
二、双闭环串级调速系统的动态结构图	47
第五节 超同步串级调速系统	50
一、转子交-直-交交流方式超同步串级调速的运行状态	50
二、超同步串级调速系统的主要控制环节	51
第六节 串级调速系统应用中的几个问题	52
一、电动机的选择	52
二、起动方式的选择	53
三、串级调速装置的选择	54
第七节 串级调速系统应用实例	55
一、KGJF 系列晶闸管串级调速装置	55
二、单片机控制的串级调速系统举例	60
练习与思考题	62
第三章 变频调速及变频器	63
第一节 异步电动机变频调速的控制方式和机械特性	63
一、保持 U_1/f_1 = 常数的近似恒磁通 (转矩) 控制方式和机械特性	64
二、保持 E_g/f_1 = 常数的严格恒磁通 (转矩) 控制方式和机械特性	65
三、保持 P_m = 常数的恒功率控制方式和	

机械特性	66	一、模拟控制的 PWM 变频调速系统	114
第二节 变频器的分类与特点	67	二、单片机控制的 PWM 变频调速系统	116
第三节 晶闸管交-交变频器	70	练习与思考题	121
一、方波型交-交变频器	70	第五章 异步电动机的矢量变换变频调速系统	122
二、正弦波型交-交变频器	71	第一节 矢量变换控制的基本概念	122
第四节 晶闸管交-直-交变频器	76	一、问题的提出	122
一、交-直-交电压型变频器	76	二、矢量变换控制的基本思想	123
二、交-直-交电流型变频器	80	第二节 异步电动机的数学模型	124
第五节 脉宽调制型 (PWM) 变频器	84	一、三相异步电动机的数学模型	124
一、电力半导体器件介绍	85	二、原型电机的数学模型	128
二、PWM 逆变器的脉宽调制方法	87	第三节 坐标变换	130
三、PWM 变频器的谐波分析与开关点算法	90	一、坐标变换	130
四、功率晶体管通用型 PWM 变频器的 主电路	94	二、三相异步电动机在二相旋转 MT 轴 系上的数学模型	138
练习与思考题	96	第四节 交流电动机的矢量变换变频调速系统	142
第四章 异步电动机变频调速系统	97	一、磁场定向控制	142
第一节 转速开环的晶闸管变频调速 系统结构	97	二、三相异步电动机磁通的检测和 估算	144
一、转速开环的电压型变频调速 系统结构	97	三、磁链开环的转差型矢量控制交-直- 交电流源变频调速系统	145
二、转速开环的电流型变频调速 系统结构	98	四、转速、磁链闭环控制的电流滞环 型 SPWM 变频调速系统	147
第二节 晶闸管变频调速系统中的主要 控制环节	99	第六章 无换向器电动机调速系统	148
一、给定积分器	99	第一节 概述	148
二、绝对值运算器	100	一、异步电动机与同步电动机的区别	148
三、电压-频率转换器	101	二、同步电动机变频调速系统的分类	148
四、环形分配器	101	第二节 无换向器电动机的工作原理	149
五、脉冲输出级	101	一、无换向器电动机的类型	149
六、函数发生器	102	二、无换向器电动机的工作原理	149
七、逻辑开关	103	三、无换向器电动机的转子位置检 测器	152
第三节 转差频率控制的转速闭环变频 调速系统	103	第三节 无换向器电动机的换流	154
一、转差频率控制的基本思想	103	一、反电动势换流法	154
二、 Φ_m 恒定对定子电流的控制要求	104	二、电流断续换流法	155
三、转差频率控制的转速闭环变频 调速系统	105	三、电源换流法	155
第四节 PWM 变频调速系统中的 功率接口	106	第四节 无换向器电动机的基本特性	156
一、大功率晶体管的基极驱动电路	106	一、无换向器电动机的调速特性	156
二、PWM 大规模单片集成电路	109	二、无换向器电动机的电磁转矩	157
第五节 PWM 变频调速系统	114	三、无换向器电动机的机械特性	158

四、无换向器电动机的过载能力 158

第五节 无换向器电动机调速系统
及其运行 159

一、无换向器电动机的控制策略 159

二、晶闸管式无换向器电动机调速
系统 159

三、晶体管式无换向器电动机调速
系统 161

练习与思考题 161

第七章 变频调速应用资料 162

第一节 变频调速技术在工业生产中的
应用概况 162

第二节 现代变频器的运行功能说明 164

第三节 几种典型变频器产品的技术性能
介绍 171

参考文献 181

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宽广、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,只被应用于恒速拖动领域。本世纪 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,晶闸管元件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 60 年代后期解决了交流电动机调速方案中的关键问题,70 年代就开始实现了产品的高压、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应用领域。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备了较宽的调速范围、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 1000 多伏,而交流电动机容易达到 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,且交流电动机构造简单、坚固耐用、经济可靠、惯性小,成了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,使用中受很多环境限制。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碳刷。维修起来又比较困难。而交流电动机却可以用在十分恶劣的环境下不致损坏。

(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,越来越广泛地应用于国民经济各个生产领域中。

(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的话,效率将会大大提高。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

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

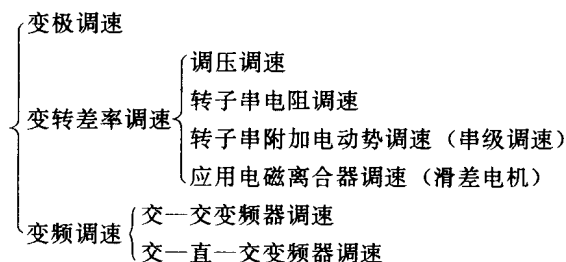
式中 n ——转速,单位为 r/min;

f_1 ——定子供电频率,单位为 Hz;

p ——极对数;

s ——转差率。

由此可以归纳出交流电动机的三种调速方法: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_1 、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:



以上三种调速方案中,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) 已从中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的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贮能元件。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是采用交流电动机的矢量变换控制，而且在建模、电动机的某些参数变化对系统影响、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

$$T_e = \frac{3pU_1^2 R_2' / s}{\omega_1 [(R_1 + R_2' / s)^2 + \omega_1^2 (L_{l1} + L_{l2}')^2]}$$

式中 p ——电动机的极对数；

U_1 、 ω_1 ——电动机定子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_{l1} 、 L_{l2}' ——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平方成正比，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

1. 带恒转矩负载 T_L 时，可得不同的稳定转速，如图 1-1 中的 A、B、C 点。由于普通异步电动机工作段转差率 s 很小，因此对轻负载来说，调速范围很小。但是，对风机泵类机械，由于其负载特性为 $T_L = kn^\alpha$ ($\alpha > 1$)，采用调压调速则可得到较大的调速范围，如图 1-1 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 和 b 所示。自耦变压器 TU 的调压原理是很好理解的。饱和电抗器 LS 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。铁心饱和时，交流电抗很小，因而电动机定子所得电压高，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。

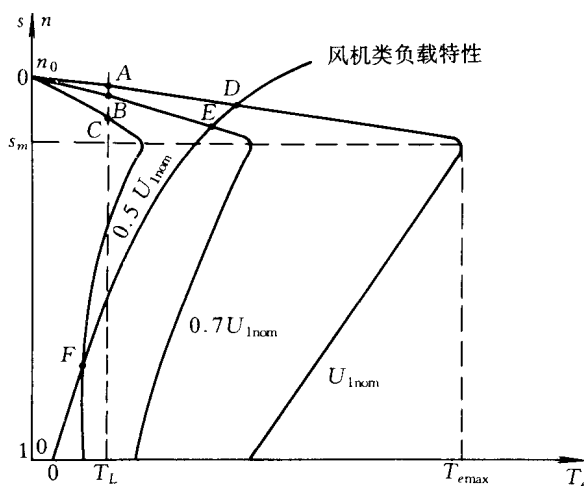


图 1-1 异步电动机在不同电压下的机械特性

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,因此用晶闸管元件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三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,然后再完全断开几个周。交流电压的大小完全靠改变通断时间比来调节。在这里晶闸管起着通断频率可调的快速开关作用。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,从而起到调压作用。电压输出波形如图1-5所示。

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

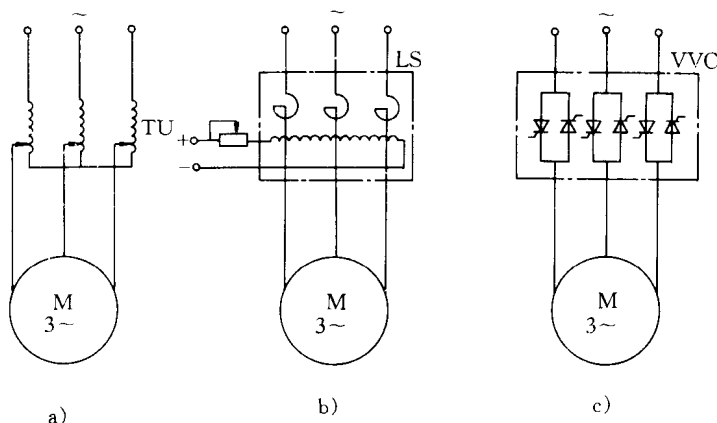


图 1-2 异步电动机调压调速原理图

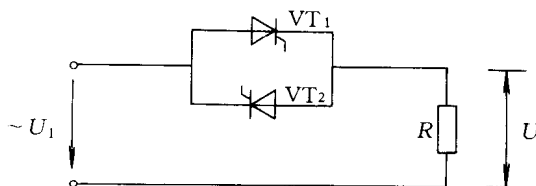


图 1-3 晶闸管单相调压电路

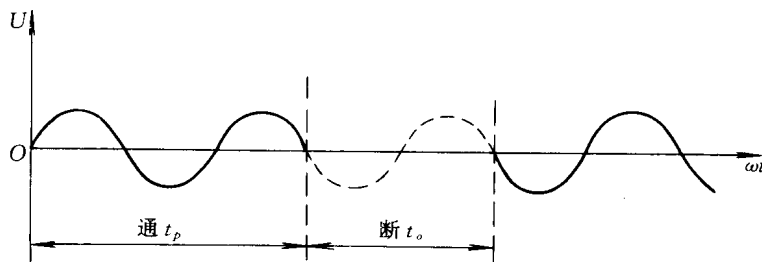


图 1-4 晶闸管单相调压电路通断控制下的负载电压波形

相位控制的导通波形只是工频正弦波一周期的一部分,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,不需要另加换流装置,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,所以常用于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。

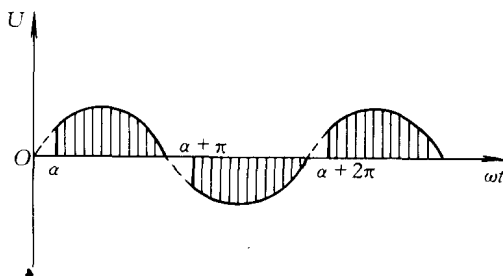


图 1-5 晶闸管单相调压电路相位控制下的负载电压波形

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

如图 1-6 所示。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

如图 1-7 所示。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。

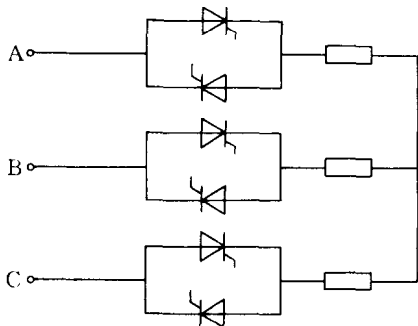


图 1-6 三相全波星形联结的调压电路

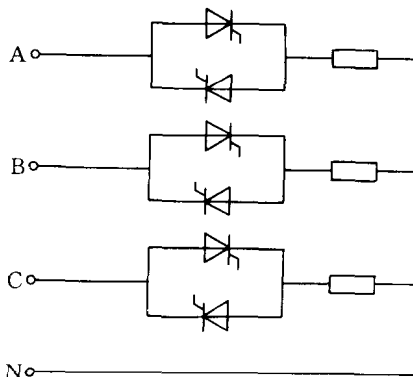


图 1-7 带零线的三相全波星形联结的调压电路

3. 三相半控星形联结调压电路

如图 1-8 所示。这种结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元件,所以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。因此仅在要求线路简单的小容量场合使

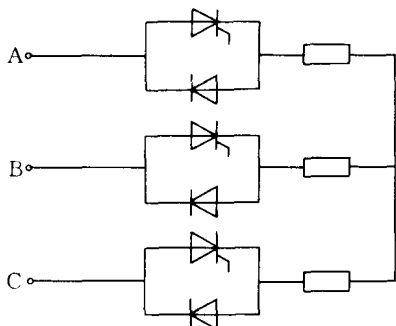


图 1-8 三相半控星形联结调压电路

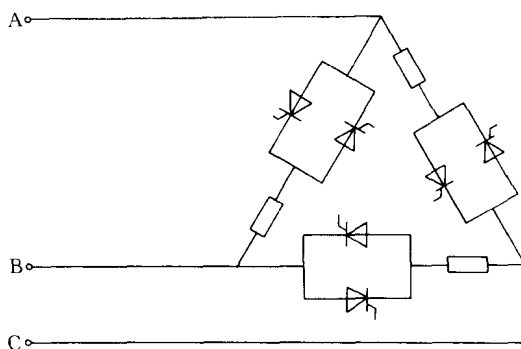


图 1-9 晶闸管与负载接成内三角形的三相调压电路

用。

4. 晶闸管与负载接成内三角形的三相调压电路

如图 1-9 所示。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

如图 1-10 所示。由于该电路只用三只晶闸管，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结法为高。

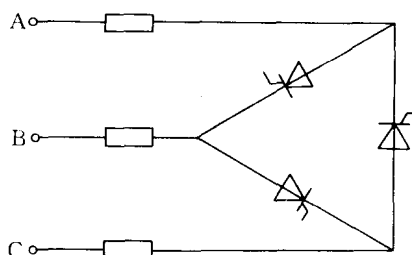


图 1-10 三相晶闸管三角形联结调压电路

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。电路如图 1-11 所示。

用三对反并联晶闸管作为开关元件，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相位控制角 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，任意时刻至少要有两个晶闸管同时导通。为了调整电压，需要改变触发脉冲的相位角 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为了保证电路起始工作时能两相同时导通，以及在感性负载和控制角较大时，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（大于 60° ）。③为了保证输出三相电压对称可调，应保持触发脉冲与电源电压同步。

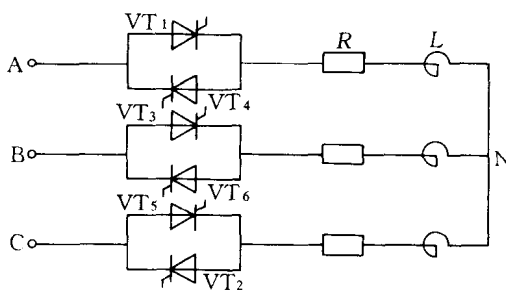


图 1-11 三相全波星形联结的调压电路

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. 控制角 $\alpha=0^\circ$ 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 相电压正半周导通, VT_4 在 A 相电压负半周导通。B、C 两相导通情况与此相同。晶闸管 $VT_1 \sim VT_6$ 的导通区间如图 1-12c 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正向晶闸管导通,而负半周反向晶闸管导通,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每管持续导通 180° 。②每 60° 区间有三个晶闸管同时导通。

2. 控制角 $\alpha=30^\circ$ 时

$\alpha=30^\circ$ 意味着各相电压过零后 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} , u_A 过零变负后 30° 发出 VT_4 的触发脉冲 U_{g4} 。B、C 两相类似之。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管导通区间。 VT_1 从 U_{g1} 发出开始导通, u_A 过零变负时关

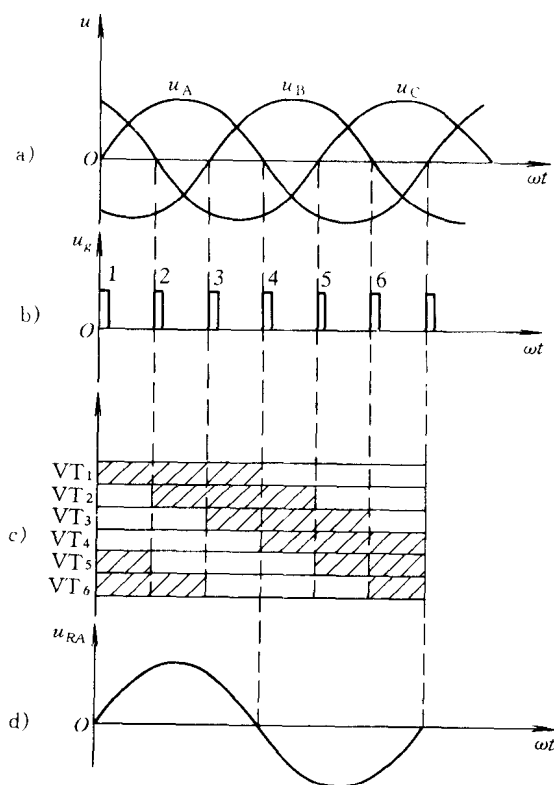


图 1-12 三相全波星形联结调压电路
 $\alpha=0^\circ$ 时的波形

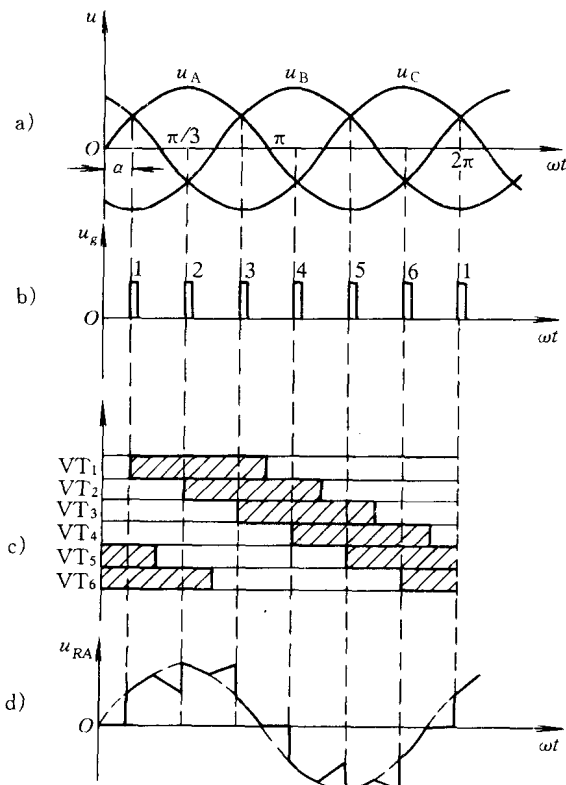


图 1-13 三相全波星形联结调压电路
 $\alpha=30^\circ$ 时的波形

断； VT_4 从 U_{g4} 发出时导通，则 u_A 过零变正时关断。B、C 两相类似之。图 1-13c 为晶闸管的导通区间图。

同样由导通区间可计算各相负载所获得的调压电压。以 A 相正半周为例：

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

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

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

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

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

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

A 相负半周各时域输出电压与正半周反面对称。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每管持续导通 150° 。②有的区间由两个晶闸管同时导通构成两相流通回路，也有的区间三个晶闸管同时导通构成三相流通回路。

3. 触发角 $\alpha = 60^\circ$ 时

$\alpha = 60^\circ$ 情况下的具体分析与 $\alpha = 30^\circ$ 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 a) 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每个区间均有两个晶闸管构成回路。

4. 触发角 $\alpha = 90^\circ$ 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，认为正半周或负半周结束就意味着相应晶闸管的关断，那末，我们就得到如图 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：有的区间只有一个管子导通，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，一只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。

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

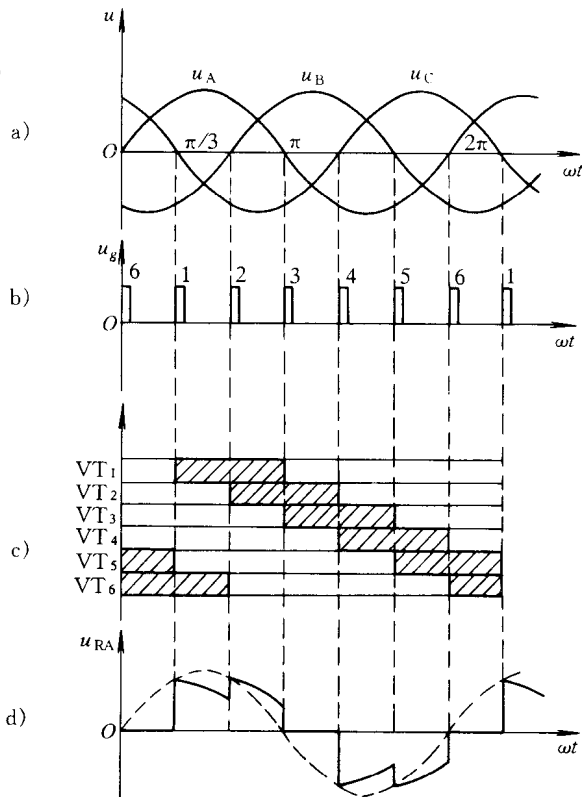


图 1-14 三相全波星形联结调压电路
 $\alpha = 60^\circ$ 时波形

状态维持到什么时候呢？只要 $u_A > u_B$ ， VT_1 、 VT_6 就能随正压导通下去。一直到开始 $u_A < u_B$ (ωt_2 时刻)， VT_1 、 VT_6 才能同时关断。同样，当 U_{g2} 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 能随正压一起触发导通，构成 AC 相回路，……如此下去，可以知道每个管子导通后，与前一个触发的管子一起构成回路导通 60° 后关断，然后又与新触发的下一个管子一起构成回路再导通 60° 后关断。图 1-15d 即为其正确的导通区间图。

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

$\omega t = 0^\circ \sim 30^\circ$ VT_4 、 VT_5 导通 $u_{RA} =$

$$\frac{1}{2} u_{AC}$$

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

$\omega t = 90^\circ \sim 150^\circ$ VT_1 、 VT_6 导通 $u_{RA} =$

$$\frac{1}{2} u_{AB}$$

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

$$= \frac{1}{2} u_{AC}$$

归纳起来 $\alpha = 90^\circ$ 时的导通特点如下：① 每管导通 120° 。② 每个区间有两个晶闸管导通。

5. 触发角 $\alpha = 120^\circ$ 时

同 $\alpha = 90^\circ$ 的情况一样，我们仍假设触发脉宽大于 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 AC 相回路，到 $u_A < u_C$ 时， VT_1 、 VT_2 又同时关断……如此下去，每个管子与前一个触发的管子一起通 30° 后关断，等到下一个管子触发时再与之一起构成回路通 30° 。图 1-16c 即为其导通区间图。

以 A 相负载电压为例，其 u_{RA} 正半周电压为：

$\omega t = 0^\circ \sim 30^\circ$ VT_4 、 VT_5 导通 $u_{RA} = \frac{1}{2} u_{AC}$

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

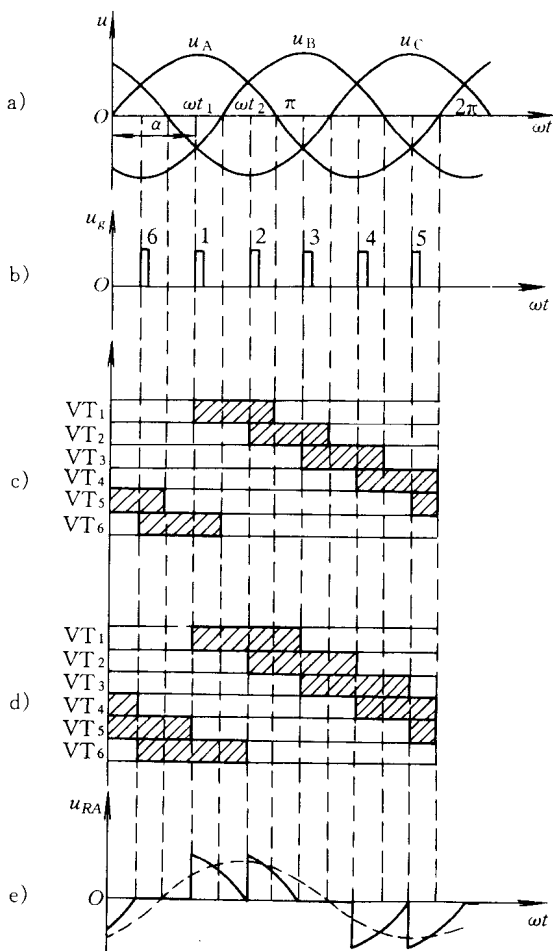


图 1-15 三相全波星形联结调压电路
 $\alpha = 90^\circ$ 的波形