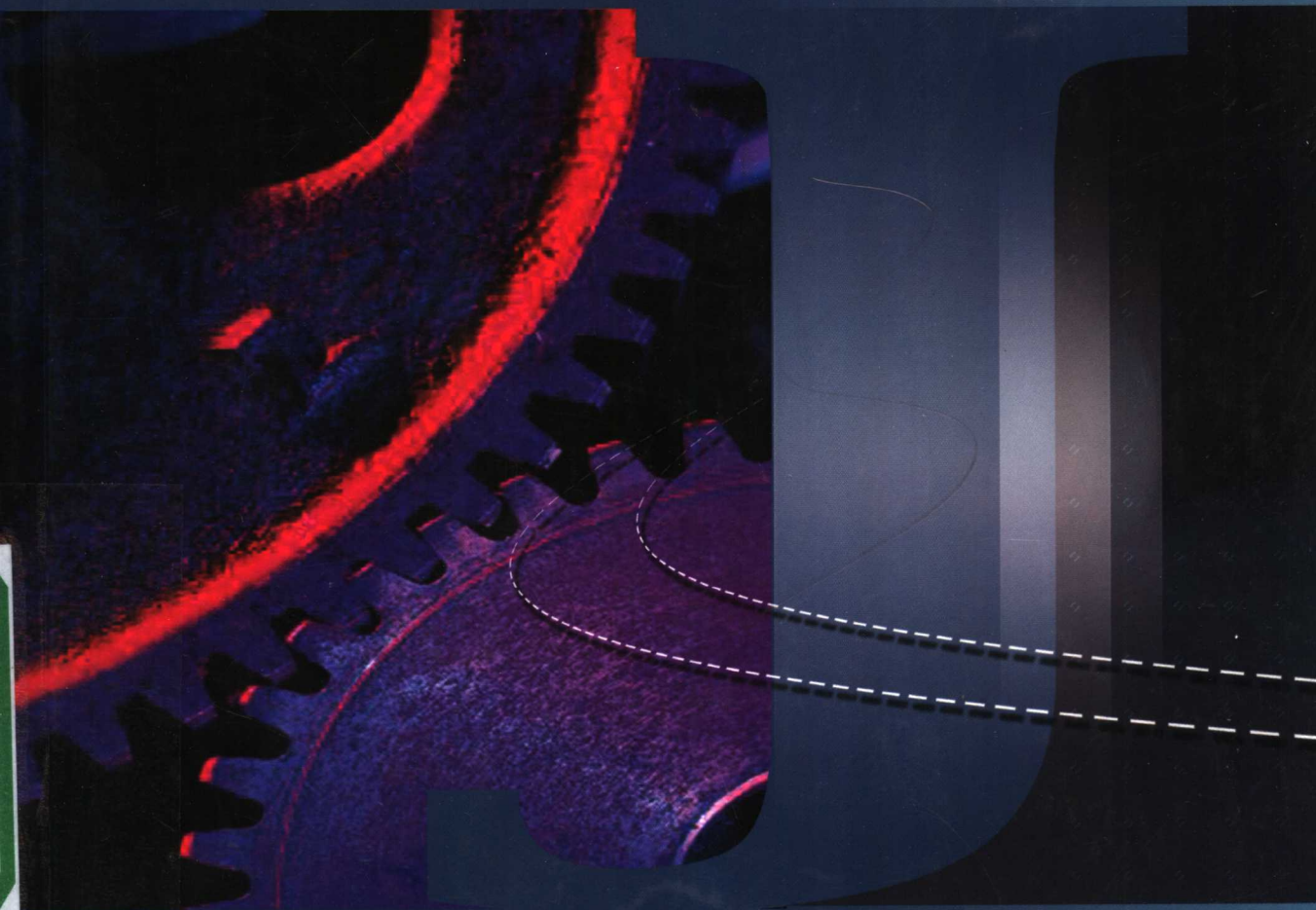


交流调速系统

JIAO LIU DIAO SU XI TONG

冯垛生 主编



机械工业出版社
China Machine Press

TM340.12/6

2008

机械工业出版社

高等院校信息学科应用型本科规划教材

交流调速系统

JIAO LIU DIAO SU XI TONG

冯焱生 主编



机械工业出版社
China Machine Press

本书是根据高等院校信息学科应用型本科规划教材的要求编写的。全书分为8章,讲述了异步电动机转差功率不变型变压变频调速系统、 U/f 恒压变频器及其控制技术、转速闭环控制的异步电动机矢量控制变频调速系统、异步电动机的变压和串接调速系统、同步电动机的转矩控制方式和调速方法、通用的同步电动机变频调速系统、永磁同步电动机的变频调速系统、交流调速的工程实用技术。各章后面均附有习题和思考题。此外,还提供了四种参考实验项目。全书具有很强的实践性和应用性。

本书适用于高等工科院校应用型本科的自动化、电气工程及其自动化、机械设计及其自动化等专业“交流调速系统”课程的教材,也可供工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

交流调速系统/冯垛生主编. —北京:机械工业出版社, 2008. 5

(高等院校信息学科应用型本科规划教材)

ISBN 978-7-111-23746-4

I. 交… II. 冯… III. 交流电机—调速—高等学校—教材 IV. TM344. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 036289 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:曾 珊

三河市明辉印装有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 11.75 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-23746-4

定价: 20.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

前 言

随着信息技术的飞速发展,我国高等教育大众化步伐正在加快。顺应高等教育普及化迅速发展的趋势,推动国家经济建设,向社会输送既懂理论,又有实践能力的人才,已成为高校教学改革的重点。目前,高校教材的建设尚不能适应不同层次本科院校的发展和社会的需求。为适应我国当前高等教育的蓬勃发展和对应用型人才培养的需要,全面促进高等院校教材建设,培养以就业市场为导向的高等应用型人才,机械工业出版社于2006年12月在南京召开高等院校信息学科应用型本科规划教材建设研讨会。会议从应用型人才培养的教学改革、教材建设的需求出发,确定了一批教学急需、改革方案明确、适用范围较广的教材。本书就是该系列教材的一种。

本书根据会议的指导精神,组织广东工业大学华立学院和广东轻工职业技术学院等院校合作编写,由广东工业大学华立学院担任主编单位。为使教材具有先进性、合理性,更适合应用型本科院校的要求,我们聘请了国内著名交流调速方面的专家,教育部21世纪精品教材《电力拖动自动控制系统》的主编和《国家电气大典》、《交流调速系统》作者,上海大学陈伯时教授和上海交通大学陈敏逊教授,审查了本书的编写大纲并提出了宝贵意见。

本书与研究型院校本科教材的不同之处有如下几方面:

- 强调实践性和应用性。强调用物理概念,简化繁琐的数学推导。例如第3章矢量控制系统,一般均要用数学的矩阵才能推导出由 i_m^* 、 i_t^* 到 i_d^* 、 i_q^* 、 i_c^* 的矢量变换,而本书仅用简单的代数、三角运算即能做到。
- 强调时代性。目前国内同类教材中,同步电动机篇幅较少,而实际上永磁同步电动机实际应用的势头很猛,如:电动汽车、变频空调器、变频洗衣机早已大量推广。一般参考书在介绍时多以工作原理(转动原理)的讲解为主,本书则加强了波形分析和定量计算的内容。
- 实用性。研究性院校的“交流调速系统”或“运动控制系统”课程一般只讲到调速系统设计为止。而本书为适应应用型本科的特殊要求,加强了应用内容,增加第8章“工程实用技术”一章,内容包括:变频器在水泵、风机、起重机、数控机床、运输传送带上的应用。不但讲原理,还介绍变频器容量选择、选型、维护等。

此外,第2章增加了用微机设计IGBT-PWM变频系统的硬件电路和软件程序,可作为课程设计、毕业设计的参考。

本书编写的分工如下:广东工业大学华立学院冯焱生教授任主编,负责绪论和第3章的编写;张亚婉老师负责第2章和实验一的编写;宋金莲老师负责第4~7章的编写;赵恒圣老师负责实验二~四的编写;广东轻工职业技术学院的赵慧老师负责第8章的编写。

由于作者水平有限,在编写中错漏难免,请读者不吝提出意见,以使再版时予以订正。

作 者

2007年11月15日于广州

目 录

前言

第0章 绪论	1
--------	---

第1章 异步电动机转差功率不变型

变压变频调速系统原理 5

1.1 异步电动机的稳态等值电路和感应电势	6
1.1.1 等值电路和基本方程式	6
1.1.2 速度-转矩特性	8
1.2 电压-频率协调控制时的稳态特性	9
1.2.1 基频以下电压频率协调控制时的机械特性	9
1.2.2 基频以上恒压变频控制时的机械特性	11
1.3 笼型异步电动机恒压频比控制的调速系统	12
1.3.1 系统的构成	12
1.3.2 恒压比控制和低速时电压修正	13
习题和思考题	14

第2章 U/f 恒压变频器及其控制技术

技术 16

2.1 变压变频器的主要类型	17
2.1.1 交-直-交和交-交变频器	17
2.1.2 电压型和电流型变频器	19
2.1.3 转差频率控制变频器简介	19
2.1.4 180° 导通型变频器和 120° 导通变频器	21
2.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 控制技术	24
2.2.1 SPWM 逆变器的工作原理	24
2.2.2 SPWM 波形成的方法	29
2.2.3 其他脉宽调制方式	31

2.3 电压空间矢量 SVPWM 控制技术	33
2.4 微机控制 IGBT-PWM 电压型通用变频器的设计	36
2.4.1 微机控制变频调速系统结构	37
2.4.2 变频调速系统主电路设计	37
2.4.3 80C196MC 微机控制系统设计	40
2.5 中压大容量变频器简介	47
2.5.1 中压大容量变频技术的各种方案	48
2.5.2 三电平逆变器	49
2.5.3 中性点钳位型逆变器工作状态的切换	50
2.5.4 中性点钳位型逆变器的输出电压波形	51
2.5.5 中性点钳位型逆变器的特点	54
2.5.6 单元串联式多电平 PWM 变频器	55
习题和思考题	56

第3章 转速闭环控制的异步电动机

矢量控制变频调速系统 58

3.1 异步电动机转矩的产生原理	59
3.2 与定子三相电流对应的 I_T 和 I_M	61
3.3 转差频率型矢量控制变频调速系统	62
3.3.1 矢量控制的基本思路	62
3.3.2 直接检测转子磁通 ϕ_m 的相位 φ 的矢量控制变频调速系统	64
3.3.3 检测电机转速的转差频率型矢量控制变频调速系统	65
3.3.4 无速度传感器矢量控制变频调速系统	66
3.4 异步电动机按定子磁场控制和直接转矩控制系统	67
3.4.1 直接转矩控制系统的原理和特点	67

3.4.2 直接转矩控制系统和矢量控制系统的比较	68	习题和思考题	109
3.4.3 直接转矩控制实际应用举例	69		
习题和思考题	69		
第4章 异步电动机的变压和串级调速系统	71	第7章 永磁同步电动机的变频调速系统	110
4.1 异步电动机的转差功率消耗型变频调速系统	72	7.1 正弦波驱动方式	111
4.1.1 变频调速特性	72	7.1.1 工作原理	111
4.1.2 软起动器	78	7.1.2 与转矩电流 I_q 对应的定子三相电流	112
4.1.3 轻载减压节能运行	80	7.1.3 同步电动机矢量控制系统	113
4.2 异步电动机转差功率馈送型变频调速系统	81	7.2 梯形波驱动方式	114
4.2.1 串级变频调速系统	81	7.2.1 工作原理	114
4.2.2 异步电动机双馈变频调速系统	91	7.2.2 控制系统的构成	115
习题和思考题	92	习题和思考题	116
第5章 同步电动机的转矩控制方式和调速方法	93	第8章 交流调速的工程实用技术	117
5.1 同步电动机的特点和调速方法	94	8.1 概述	118
5.2 他控变频和自控变频	95	8.1.1 变频器的分类	118
5.2.1 他控变频同步电机调速系统	95	8.1.2 使用变频器的注意事项	118
5.2.2 自控变频同步电机调速系统	95	8.1.3 变频器控制方式的合理选用	119
		8.1.4 转矩控制型变频器的选型及相关问题	119
第6章 通用的同步电动机变频调速系统	98	8.1.5 通用变频器的主要功能	121
6.1 小容量恒压频比控制的同步电动机群控调速系统	99	8.2 变频器在水泵节能中的应用	121
6.2 无整流子电动机的调速原理和闭环驱动方式	100	8.2.1 泵的特性和对调速的要求	122
6.2.1 无整流子电动机电路的基本结构	100	8.2.2 对变频器功能提出的要求	125
6.2.2 工作原理	101	8.2.3 变频器用于泵负载的特点	125
6.2.3 特性方程式	104	8.2.4 变频调速系统举例	126
6.2.4 工作特性	106	8.3 变频器在风机节能中的应用	127
6.2.5 调速方法	107	8.3.1 风机的风量-压力特性	128
6.2.6 电动状态和反馈再生制动状态	107	8.3.2 应用变频调速的要点	129
6.2.7 无整流子电动机的起动	108	8.3.3 风机变频调速举例	131
		8.4 变频器在机床传动中的应用	131
		8.4.1 普通机床的变频调速	132
		8.4.2 NC 机床主轴变频调速	133
		8.5 变频器在生产线传送带上的应用	138
		8.5.1 概述	138
		8.5.2 传送带对变频调速提出的要求	138
		8.5.3 变频器的选用原则	140
		8.5.4 变频调速应用举例	141

8.6 变频器在起重机械上的应用	143	实验一 双闭环三相异步电动机串级调速系统	157
8.6.1 起重机械的特点	143		
8.6.2 变频调速控制方案选择	144	实验二 异步电动机 SPWM 与电压空间矢量变频调速系统	161
8.6.3 变频调速应用注意事项	145		
8.6.4 变频器的容量选择和有关问题处理原则	145	实验三 基于 DSP 的矢量变换控制与直接转矩控制变频调速系统	165
8.6.5 应用举例	148		
8.7 变频器在报纸印刷机上的应用	150	实验四 基于 DSP 的方波无刷直流电动机 (BLDCM) 调速系统	171
8.7.1 轮转机电力拖动发展概况	150		
8.7.2 变频器在轮转机上的应用项目 ...	151	参考文献	178
8.7.3 轮转机变频器的规格	151		
8.7.4 轮转机的拖动系统举例	152		
8.8 变频器在化纤机械上的应用	153		
8.8.1 对变频器性能提出的要求	154		
8.8.2 卷绕机变频调速控制举例	155		

第0章

绪 论

- ◇ 0.1 交流调速系统的发展
- ◇ 0.2 交流调速系统的基本类型
- ◇ 0.3 现代交流调速的技术基础



0.1 交流调速系统的发展

直流电气传动和交流电气传动在 19 世纪先后诞生。在 20 世纪上半叶, 鉴于直流传动具有优越的调速性能, 高性能可调速传动都采用直流电动机, 而约占电气传动总容量 80% 以上的不变速传动系统则采用交流电动机, 这种分工在一段时期内已成为一种举世公认的格局。交流调速系统的多种方案虽然早已问世, 并已获得实际应用, 但其性能却始终无法与直流调速系统相匹敌。直到 20 世纪 60 ~ 70 年代, 随着电力电子技术的发展, 采用电力电子变流器的交流传动系统得以实现, 特别是大规模集成电路和计算机控制的出现, 使高性能交流调速系统应运而生, 交直流传动按调速性能分工的格局终于被打破。这时, 直流电动机和交流电动机相比的缺点日益显露出来, 例如具有电刷和换向器因而必然经常检查维修, 换向火花使它的应用环境受到限制, 换向能力限制了直流电动机的容量和速度(极限容量与转速之积约为 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$) 等等。于是, 用交流可调传动取代直流可调传动的趋势越来越明显, 交流传动控制系统已经成为电气传动控制的主要发展方向, 据统计, 在 2001 年的世界可调速电气传动产品中, 交流传动已占 2/3 以上。目前, 交流传动系统的应用领域主要有下述三个方面:

1. 一般性能的节能调速和按工艺要求调速

在过去大量的所谓“不变速交流传动”中, 风机、水泵等通用机械的容量几乎占工业电气传动总容量的一半, 其中有不少的场合并不是不需要调速, 只是因为过去的交流传动本身不能调速, 不得不依赖挡板和阀门来调节送风和供水的流量, 因而把许多电能白白地浪费了。如果改造成交流调速系统, 把消耗在挡板和阀门上的能量节省下来, 每台风机、水泵平均都可以节约 20% ~ 30% 的电能, 效果是很可观的。而且风机、水泵对调速范围和动态性能的要求都不高, 只要有一般的调速性能就足够了。

许多在工艺上需要调速的生产机械过去多用直流传动, 鉴于交流电动机比直流电动机结构简单、成本低廉、工作可靠、维护方便、惯量小、效率高, 如果改成交流传动, 显然能够带来不少的效益, 于是一般按工艺要求需要调速的场合也纷纷采用交流调速。

2. 高性能的交流调速系统和伺服系统

由于交流电动机的电磁转矩难以像直流电动机那样通过电枢电流施行灵活的控制, 交流调速系统的控制性能在一段时期内赶不上直流调速系统。直到 20 世纪 70 年代初发明了矢量控制技术(或称磁场定向控制技术), 通过坐标变换, 把交流电动机的定子电流分解成转矩分量和励磁分量, 用来分别控制电动机的转矩和磁通, 可以获得和直流电动机相仿的高动态性能, 才使交流电动机的调速技术取得了突破性的进展。其后, 又陆续提出了直接转矩控制、解耦控制等方法, 形成了一系列可以和直流调速系统媲美的高性能交流调速系统和交流伺服系统。

3. 特大容量、极高转速的交流调速

直流电动机的换向能力限制了它的容量转速积不超过 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$, 否则其设计与制造就非常困难了。交流电动机没有换向问题, 不受这种限制, 因此特大容量的电气传动设备, 如厚板轧机、矿井卷扬机、巨型电动船舶等, 以及极高转速的传动, 如高速磨头、离心机等, 都以采用交流调速为宜。

0.2 交流调速系统的基本类型

交流电动机有异步电动机(即感应电动机)和同步电动机两大类。每种电动机又都有不同类型的调速方法。

0.2.1 异步电动机调速系统的基本类型

现有文献中介绍的异步电动机调速方法种类繁多,常见的有:①变压调速;②转差离合器调速;③转子回路串电阻调速;④绕线转子电动机串级调速和双馈电机调速;⑤变极对数调速;⑥变压变频调速等。在研究开发阶段,人们从多方面探索调速的途径,因而种类繁多是很自然的。现在交流调速的发展已经比较成熟,为了深入掌握其基本原理,就不能满足这种表面上的罗列,而是要进一步探讨其本质,认识交流调速的基本规律。

按照交流异步电动机的原理,从定子传入转子的电磁功率 P_m 分成两部分:一部分 P_{mech} [$P_{\text{mech}} = (1-s)P_m$]是带动负载的有效功率,称做机械功率;另一部分 P_s ($P_s = sP_m$)是传给转子回路转差功率,与转差率 s 成正比。从能量转换的角度看,转差功率是否增大,是消耗掉还是得到回收,是评价调速系统效率高低的标志。从这点出发,可以把异步电动机的调速系统分成以下三类。

1. 转差功率消耗型调速系统

在这种类型的调速系统中,全部转差功率都转换成热能消耗在转子回路里面,上述的第①、②、③三种调速方法都属于这一类。在三类异步电动机调速系统中,这类系统的效率最低,而且越到低速时,效率越低,它是以增加转差功率的消耗使转速下降(恒转矩负载时)。可是相对来说,这类系统的结构简单,设备成本最低,所以还有一定的应用价值。

2. 转差功率馈送型调速系统

在这类系统中,除转子铜耗外,大部分转差功率在转子侧通过变流装置馈出或馈入,转速越低,能馈送的功率越多,上述第④种调速方法必属于这一类,无论是馈出还是馈入的转差功率,扣除变流装置本身的损耗后,最终都转化成有用的功率,因此这类系统的效率较高,但要增加一些设备。

3. 转差功率不变型调速系统

在这类系统中,转差功率只有转子铜耗,而且无论转速高低,转差功率基本不变,因此效率更高,上述的第⑤、⑥两种调速方法属于此类。其中变极对数调速是有级的(即调速时分割为3~5级,每级规定一种速度),应用场合有限。只有变压变频调速应用最广,可以构成高动态性能的交流调速系统,取代直流调速。但在定子回路中需配备与电动机容量相当的变压变频器,相比之下,设备成本最高。

0.2.2 同步电动机调速系统的基本类型

同步电动机没有转差,也就没有转差功率,所以同步电动机调速系统只能是转差功率不变型(恒等于0)的,而同步电动机转子极对数又是固定的,因此只能靠变压变频调速,没有像异步电动机那样的多种调速方法。在同步电动机的变压变频调速方法中,从频率控制的方式来看,可分为他控变频调速和自控变频调速两类。后者利用转子磁极位置的检测信号来控



制变压变频装置换相，类似于直流电动机中电刷和换向器的作用，因此有时又称做无换向器电动机调速，或无刷直流电动机调速。

开关磁阻电动机是一种特殊类型的同步电动机，有其独特的、比较简单的调速方法，在小容量交流电动机调速系统中很有发展前途。

0.3 现代交流调速的技术基础

早在半个多世纪以前，现在常用的变压、串级、变压变频等主要交流调速方法的原理都已经清楚，只是当时必须用电磁元件和旋转变流机组来实现，而控制性能又赶不上直流调速，所以长期得不到推广。20 世纪 60 ~ 70 年代，有了静止的电力电子变流装置以后，逐步解决了调速装置的减少设备、缩小体积、降低成本、提高效率、消除噪声等问题，才使交流调速系统获得了飞速发展。

图 0-1 表示现代交流调速系统的一般组成框图。图 1 中，电力变换器是由电子器件构成的，完成 AC ~ DC ~ AC 或 AC ~ AC 变换。控制装置是由大规模集成电路或微处理器构成，现代交流调速系统大多选用 32 位 DSP 芯片，控制更为可靠，体积减小，成本降低。除此外还需要检测传感器、检测电压、电流和转速。

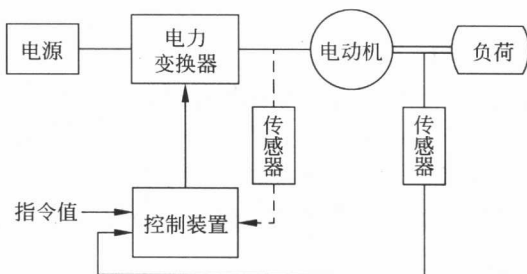


图 0-1 交流调速系统的一般组成框图

第 1 章

异步电动机转差功率不变型变压变频调速系统原理

- ◇ 1.1 异步电动机的稳态等值电路和感应电势
- ◇ 1.2 电压-频率协调控制时的稳态特性
- ◇ 1.3 笼型异步电动机恒压频比控制的调速系统



1.1 异步电动机的稳态等值电路和感应电势

1.1.1 等值电路和基本方程式

异步电动机的结构分为绕线式和笼型两种形式,图 1-1 为三相绕线式异步电动机的电路。笼型异步电动机与其区别仅在于转子绕组是短路的不能外接电阻,其等值电路和特性两者完全可以通用。

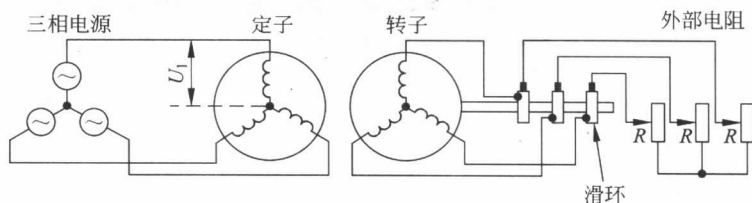


图 1-1 三相绕线式异步电动机的电路

由图 1-1 的实际接线图可绘出如图 1-2 的一相等值电路。图 1-2 中,转子电路的参数 I_2' 、 R_2' 、 x_2' 是已折算到定子侧的参数。同时,该等值电路也不考虑电动机铁耗的影响。为简化起见,图中省略 U_1 、 I_1 、 I_2' 、 E_1 的矢量符号,图中的各参数分别表示为

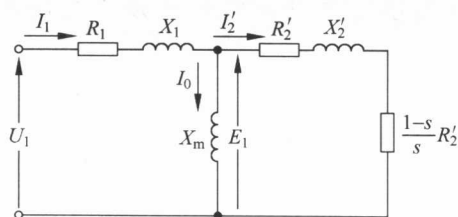


图 1-2 异步电机一相的等值电路

R_1 : 定子绕组一相的电阻;

R_2' : 转子绕组一相的电阻(已折算到定子);

X_1 : 定子绕组一相的漏抗, $X_1 = \omega_1 L_1$, ω_1 为电源角频率;

X_2' : 转子绕组一相的漏抗, $X_2' = \omega_1 L_2'$ (已折算到定子);

X_m : 励磁电抗, $X_m = \omega_1 L_m$;

s : 转差;

U_1 : 定子绕组相电压有效值;

E_1 : 定子绕组一相的感应电势有效值;

I_1 : 定子电流有效值;

I_2' : 转子电流有效值(经折算后);

I_0 : 磁化电流。

该等值电路中,由于 R_1 、 X_1 的数值比较小,一般 X_m 远大于 R_1 和 X_1 ,于是可将 X_m 移至靠近电源侧,绘出如图 1-3 所示的异步电动机简化等值电路。

应用该电路在一般情况下进行定性的研究还是实用的,但在变频调速低频时采用本电路

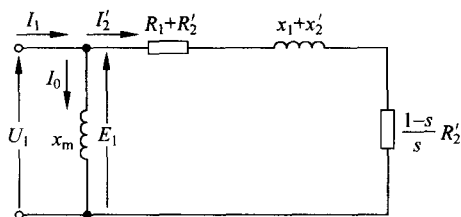


图 1-3 异步电动机简化等值电路

即会造成误差。根据图 1-3 电路可导出如下的电压方程式(同上, 均省略矢量符号)。

• 定子侧:

$$U_1 = E_1 \quad (1-1)$$

$$E_1 = I_0 x_m \quad (1-2)$$

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega_1 N_1 \phi_m = 4.44 f_1 N_1 \phi_m \quad (1-3)$$

式中, f_1 为电源频率; N_1 为定子绕组一相的有效匝数; ϕ_m 为气隙磁通。

• 转子侧:

$$U_1 = Z I_2' \quad (1-4)$$

$$Z = \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x^2} \quad (1-5)$$

$$x = x_1 + x_2' \quad (1-6)$$

• 转矩方程:

电动机轴上的转矩方程式是考虑到忽略电机内部机械损耗, 可得出

$$T = T_L \quad (1-7)$$

式中, T 为电动机产生的电磁转矩; T_L 为负载转矩。

电动机产生的转矩与电动机的输出机械功率及转速有关即

$$T = \frac{P_0}{\omega} \quad (1-8)$$

$$P_0 = 3 I_2'^2 \frac{1-s}{s} R_2' \quad (1-9)$$

$$\omega = \omega_1 (1-s) \quad (1-10)$$

$$\omega_1 = 2\pi \frac{f_1}{p} \quad (1-11)$$

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (1-12)$$

式中, p 为电机磁极对数(简称极对数)。

【例题】 异步电动机转子侧输入输出的关系, 可简单的表示为

(1) 转子输入 = 转子输出 + 转子消耗;

(2) 转子效率 = $1-s$ 。

试定性予以推导。



解: (1) 由图 1-2 和图 1-3 可写出三相的能量平衡关系即

$$3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} = 3I_2'^2 \frac{1-s}{s} R_2' + 3I_2'^2 R_2'$$

三者之间的比例关系如下:

$$3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} : 3I_2'^2 \frac{1-s}{s} R_2' : 3I_2'^2 R_2' = 1 : (1-s) : s$$

(2) 若设从定子输入到转子的能量为 1, 转子实际输出能量为 $1-s$, 则铜耗为 s , 故效率

$$\eta_2 = \frac{1-s}{1} = 1-s。$$

1.1.2 速度-转矩特性

速度-转矩特性又称机械特性 $n=f(T)$ 或 $T=f(s)$, 由式(1-4)求出 I_2' 代入到式(1-8), 式(1-9), 式(1-10)即得电动机的转矩 T 和转差 s 的关系式

$$T = \frac{3}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X^2} \cdot \frac{R_2'}{s} \quad (1-13)$$

由上式(1-13)可知, 异步电动机的速度-转矩特性与电源电压 U_1 和频率 f_1 有很大关系。从图 1-4 的 $T=f(s)$ 曲线可看出特性上的关键点 ω_m 和 s_m 。

当电动机空载运行时, 与 $s=0$ 的点即 p_0 相对应, 此时电动机的角速度 ω_0 称空载速度。此时在电动机轴上增加负载, 则速度降低, 工作点移至与负载转矩相对应即 $T=T_L$

时的 p 点。以后随着 T_L 增加, 电动机转矩达到最大值 T_m , 与此对应为图上的 p_m 点。到达 p_m 点后负载转矩 T_L 继续增加, 电动机产生失速现象, 电流增大, 转速最后降至零。因此电动机正常运行的范围是曲线上工作点 p_0 、 p_m 之间, 对应的转差范围为 $0 < s < s_m$, 最大转差率 s_m 可由式(1-13)求出

$$s_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X^2}} \quad (1-14)$$

为提高异步电动机的运行效率, 一般希望 s 要尽量减小, 因此在电机设计时应使 R_2' 尽可能小。这样可使正常工作时 s 约为 $0.01 \sim 0.05$ 。这样, 当负载变化时速度波动可减小。普通异步电动机(非调速)也可视为恒速运行。

若把图 1-4 的坐标改变即得图 1-5 速度-转矩特性, 这是调速系统研究时常用的形式。

由图 1-5 可见, 特性中的虚线部分实际上是不用的。调速只在 $\omega_0 \sim \omega_m$ 范围内进行。该特性称为自特性(或固有特性), 是电动机固有存在的为增大调速范围只有改变曲线的形状, 如: 转子串电阻则调速可在 $s=0 \sim 1$ 内进行, 或再采用变频调速改变 ω_1 值, 并可使 ω 在 $0 \sim \omega_1$ 范围内调速, 详见后面章节。

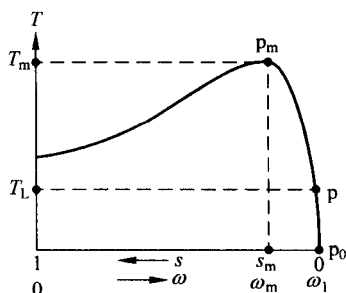


图 1-4 转矩-转差特性

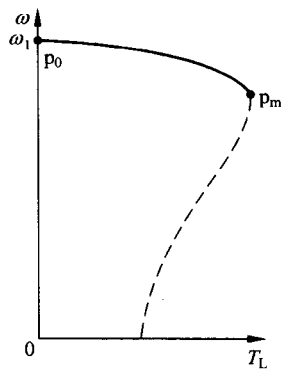


图 1-5 异步电动机的速度-转矩特性分析



1.2 电压-频率协调控制时的稳态特性

1.2.1 基频以下电压频率协调控制时的机械特性

1. 保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 的恒压频比控制方式

根据式(1-3), 在忽略定子阻抗压降后可得到 $U_1/f_1 = C_1\phi_m$, 式中 $C_1 = 4.44K_M N_1$ 为常数。因此, 在变频时要维持恒磁通, 只要使 U_1 与 f_1 成比例改变即可。下面分析 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 变频调速时的机械特性。

由式(1-13)可知, 当定子电压 U_1 和频率 f_1 都为恒定时, 异步电动机的转矩为

$$T = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]} \quad (1-15)$$

式中, p 为电动机的极对数; R_1, x_1 为定子每相电阻和电抗; R'_2, x'_2 为折合到定子侧的转子每相电阻和电抗; s 为转差。

式(1-15)稍作处理, 可得

$$T = \frac{3p \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2}{2\pi} \frac{sf_1 R'_2}{(sR_1 + R'_2)^2 + s^2(x_1 + x'_2)^2} \quad (1-16)$$

式(1-16)为恒压恒频时异步机的机械特性方程式, 相应的机械特性曲线如图 1-6 所示。

当 s 很小时, 可忽略式(1-16)分母中含 s 各项, 则

$$T = \frac{3p \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2}{2\pi} \frac{sf_1}{R'_2} \propto s \quad (1-17)$$

当 s 很小时, 转矩近似于 s 成正比 ($T \propto s$), 机械特性 $T=f(s)$ 是一段直线, 见图 1-5 中的直线段。

当 s 接近于 1 时, 可忽略式(1-16)分母中的 R'_2 , 则

$$T = \frac{3p \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2}{2\pi} \frac{f_1 R'_2}{s [R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2]} \propto \frac{1}{s} \quad (1-18)$$

当 s 接近于 1 时, 转矩近似于 s 成反比 ($T \propto \frac{1}{s}$), $T=f(s)$ 见图 1-5 中的双曲线段。

当 s 为上述两段的中间数值时, 机械特性从直线段平滑过渡到双曲线段。

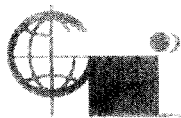
在实现保持 $\frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$ 的恒压频比控制时, 异步电动机的同步转速随着频率的改变而变化。

因为

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-19)$$

所以, 带负载时的转速降落 Δn 为

$$\Delta n = sn_0 = \frac{60}{p} sf_1 \quad (1-20)$$



从式(1-17)所表示的机械特性的近似直线段上,可以导出

$$sf_1 = \frac{R'_2 T}{\frac{3p}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2} \quad (1-21)$$

由此可见,当 U_1/f_1 为恒值时,对于同一转矩 T , sf_1 是基本不变的,因而 Δn 也是基本不变的,也就是说,在恒压频比条件下改变频率时,机械特性基本是平行上下移动的,频率降低,转速下降,如图 1-6 所示。

另外,根据电动机最大转矩的公式

$$\begin{aligned} T_{\max} &= \frac{3pU_1^2}{2 \times 2\pi f_1 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2})} \\ &= \frac{3p}{4\pi} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{f_1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \end{aligned} \quad (1-22)$$

可以看出,在恒压频比控制变频调速时,电动机最大转矩 $T_{\max}$ 随着频率的降低而减小,频率很低时, $T_{\max}$ 太小将限制调速系统的带载能力。实际中,在低频时,采用定子压降补偿,适当地提高电压 U_1 ,以增强带载能力,如图 1-6 虚线所示。

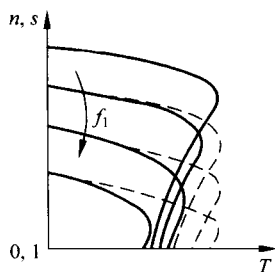


图 1-6 恒压频比控制变频调速的机械特性

2. 保持 $T_{\max}$ = 常数的恒磁通控制方式

采用 U_1/f_1 = 常数的恒压频比控制方式,由于低频时电机的定子压降所占比重增加,无法保证最大转矩,因而适用于调速范围不太大或转矩随转速下降而减小的负载,如风机、泵类负载。

对于要求调速范围大的恒转矩负载,则希望在整个调速范围内保持最大转矩 $T_{\max}$ 不变,即须保持 ϕ_m 恒定不变,由式(1-3)可见,最好采用 $\frac{E_1}{f_1}$ = 常数的恒磁通控制方式。保持 $T_{\max}$ = 常数的恒磁通控制方式时,异步电动机的机械特性推导如下:

从图 1-3 给出的异步电动机稳态等效电路可得

$$I'_2 = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_2'^2}} \quad (1-23)$$

代入电磁转矩公式,得

$$T = \frac{3p}{2\pi f_1} \cdot \frac{E_1^2}{\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_2'^2} \cdot \frac{R'_2}{s} = \frac{3p}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{sf_1 R'_2}{R_2'^2 + s^2 x_2'^2} \quad (1-24)$$

式(1-24)为恒 E_1/f_1 时的机械特性方程式。利用和上面一样的分析方法,当 s 很小时,忽略上式分母中含 s^2 的项,则

$$T = \frac{3p}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1} \right)^2 \frac{sf_1}{R'_2} \propto s \quad (1-25)$$

这说明机械特性近似为一段直线。当 s 接近于 1 时,可忽略式(1-24)分母中的 R'_2 , 则