



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
中等职业学校数控技术应用专业教学用书

技能型紧缺人才培养培训系列教材

变频器应用 与实训指导

王兆义 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

教育部职业教育与成人教育司推荐教材
中等职业学校数控技术应用专业教学用书

技能型紧缺人才培养培训系列教材

变频器应用与实训指导

王兆义 主编
王廷才 主审
赵承获

高等教育出版社

内容简介

本书是教育部推荐的数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训系列教材之一,是根据教育部 2003 年 12 月颁发的《中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案》中核心教学与训练项目的基本要求,并参照相关的国家职业标准和行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准编写的。

本书主要内容有:基础知识、通用变频器功能介绍、富士 FRENIC 5000G11S/P11S 变频器、变频器常用控制电路、变频器的选择与安装、应用举例、综合实训及附录。重点介绍变频器在工程上的具体应用。

本书可作为中等职业学校数控技术应用专业及相关专业的教学用书,也可作为有关行业的岗位培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

变频器应用与实训指导/王兆义主编. —北京:高等教育出版社,2005.6

ISBN 7-04-016571-6

I. 变… II. 王… III. 变频器-技术培训-教材
IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 037804 号

策划编辑 王瑞丽 责任编辑 王莉莉 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 王艳红 责任校对 张颖 责任印制 孔源

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	河北新华印刷一厂		http://www.landaco.com.cn
开 本	787×1092 1/16	版 次	2005 年 6 月第 1 版
印 张	13.25	印 次	2005 年 6 月第 1 次印刷
字 数	310 000	定 价	17.30 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

物料号 16571-00

出版说明

2003年12月,教育部、劳动和社会保障部、国防科工委、信息产业部、交通部、卫生部联合印发了《教育部等六部门关于实施职业院校制造业和现代服务业技能型紧缺人才培养培训工程的通知》。为了配合该项工程的实施,高等教育出版社开发编写了数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训系列教材。该系列教材已纳入教育部职业教育与成人教育司发布实施的《2004—2007年职业教育教材开发编写计划》,并经全国中等职业教育教材审定委员会审定,作为教育部推荐教材出版。

高等教育出版社出版的教育部推荐数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训系列教材(以下简称推荐系列教材),是根据教育部办公厅、国防科工委办公厅、中国机械工业联合会最新颁布的《中等职业学校数控技术应用专业领域技能型紧缺人才培养培训指导方案》编写的。推荐系列教材力图体现:以培养综合素质为基础,以能力为本位,把提高学生的职业能力放在突出的位置,加强实践性教学环节,使学生成为企业生产服务一线迫切需要的高素质劳动者;职业教育以企业需求为基本依据,办成以就业为导向的教育,既增强针对性,又兼顾适应性;课程设置和教学内容适应企业技术发展,突出数控技术应用专业领域的新知识、新技术、新工艺和新方法,具有一定的先进性和前瞻性;教学组织以学生为主体,提供选择和创新的空間,构建开放的课程体系,适应学生个性化发展的需要。推荐系列教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新尝试。主要特色有:

1. 以就业为导向,定位准确,全程设计,整体优化。
2. 借鉴国内外职业教育先进教学模式,突出项目教学,顺应现代职业教育教学制度的改革趋势,适应学分制。
3. 理论基础知识教材,以职业技能所依托的理论知识为主线,综合了多门传统的专业基础课程的理论知识。知识点以必需、够用为度。
4. 理论实践一体化教材,缩短了理论与实践教学之间的距离,内在联系有效,衔接与呼应合理,强化了知识性和实践性的统一。
5. 操作训练和实训指导教材,参照国家职业资格认证标准,成系列按课题展开,考评标准具体明确、直观、实用,可操作性强。

推荐系列教材既注重了内在的相互衔接,又强化了相互支持,并将根据教学需求不断完善和提高。

查阅推荐系列教材的相关信息,请登录高等教育出版社“中等职业教育资源网”(网址:<http://sv.hep.com.cn>)

前 言

变频器经过二十多年的发展,已经走向成熟,众多的变频器生产厂家推出了自己的系列产品。由于变频器调速优于以往的各种调速方式具有节能、操作简便、容易实现自动控制等特点,因此得到了广泛的应用,已经普及到了机械、冶金、矿山、煤炭、石化、农业、纺织、印刷、造纸等各个领域。变频器在我国各行各业的应用已经产生了显著的经济效益。

随着我国经济和技术的发展,变频器性价比的提高,其用量将会越来越大。据相关研究显示,我国变频器应用已经进入高速增长的“黄金时期”,2003年销售额达到80亿元,年增长率为15%,业内人士估计2004年我国变频器产值将突破100亿元,并将以15%~20%的年增长率发展,其潜在市场为1200~1800亿元。世界的知名厂商纷纷行动,已经或正在准备将其研发机构、生产基地移至中国;国内的变频器厂家也在上档次、上规模,并不断有新的厂家加盟。目前我国市场上流行的变频器品牌有60种之多。

随着变频器应用的普及,中等职业学校数控及机电类学生应掌握变频器的应用技术。因为他们是变频器的直接使用及操作者,普及变频器的应用知识是他们的职业需要。为此,很多学校开设了变频器应用课程。但就目前来看,还没有一本有关供中等职业学校应用的变频器教材,因此,开发中等职业变频器应用教材已迫在眉睫。在高等教育出版社和廊坊职业技术学院的大力支持下,我们开始了本教材的开发编写工作。

通过多方调查和论证,根据国家中等职业教育的培养目标,又根据教材的读者就是变频器的使用者,将教材定位于变频器的应用,围绕“应用”展开编写工作。应用的范畴包括:根据工程要求能合理地选择变频器;根据电动机的运行要求能正确地选择变频器的功能参数;根据变频器的应用环境能设计安装方案,并能进行安装;能进行变频器的正确操作和日常维护等。教材在编写时还注意了以下几个方面:一方面是把握教材的深浅度。变频器是一个高科技产品,编写时如稍不留神,就会将教材写深写难,使学生难以接受,因此在编写时尽量减少理论分析,即使个别地方进行了一些理论分析,也是围绕应用展开的,点到为止;尽量少采用结构复杂的构图,将教材深度控制在学生能够接受的范围内。另一方面就是教材要有通用性。市场上流行的变频器种类繁多,五花八门,学生毕业后会接触到各种品牌的变频器,因此本教材不是专讲某一个品牌,而将重点放在各种变频器的共性上。当学生掌握了变频器的共性知识后,再去学习某个品牌的变频器就容易了。

再有,教材要便于组织教学。本教材是学习变频器应用的一门专业课程,教学过程中既要课堂讲授,又要动手实训。在内容的选取及编排上尽量让老师课堂上好讲,实训时好操作,即便于老师组织教学,充分体现职业教育的特色。

参加本书编写的有廊坊职业技术学院的王兆义、阙玉怀、王卫东、成都佳灵公司专事变频器开发应用的张锦荣工程师。具体分工为:阙玉怀编写第一章、附录二;王卫东编写第五章、附录三;张锦荣编写第六章;其余由王兆义编写,由王兆义任主编并统稿。

本书编写过程中,得到了高等教育出版社、廊坊职业技术学院的大力支持。廊坊职业技术学院为此书的编写提供了多台不同品牌的变频器样机,电气工程系的部分教师参与了编写提纲的讨论并对实训课题进行了试做,作者在此对领导的支持和大家的帮助表示衷心地感谢。

教育部聘请河南工业职业技术学院王廷才和湖南铁道职业技术学院赵承荻审阅了本书,他们对本书提出了很多宝贵意见。此外,本书在编写过程中还参考了杂志发表过的成果论文、变频器专著;得到了富士、森兰、佳灵、三垦、惠丰等公司的支持,他们为本书的编写提供了产品说明书和相关技术资料。作者借本书出版之机,一并表示衷心地感谢。

编写变频器应用教材是我们的第一次尝试,由于缺乏经验及水平所限,书中难免有不足之处,望读者给予批评指正,作者万分感谢。

编者
2004年12月

目 录

绪论	1	第四节 变频器制动及保护控制电路	92
第一章 基础知识	5	第五节 多段速控制电路	94
第一节 三相异步电动机	5	第六节 工频 - 变频切换	99
第二节 三相异步电动机的起动和制动	9	小结	104
第三节 电力电子器件简介	11	习题	105
第四节 脉冲宽度调制(PWM)原理	15	第五章 变频器的选择与安装	106
第五节 变频器的组成	20	第一节 负载的机械特性及传动机构	106
第六节 变频器的分类	24	第二节 变频器的选择	109
小结	26	第三节 变频器的谐波干扰	114
习题	27	第四节 变频器常用电磁选件	116
第二章 通用变频器功能介绍	28	第五节 变频器的安装	122
第一节 频率控制功能	28	第六节 变频器的维护保养与故障处理	127
第二节 与频率有关量的功能设置	29	小结	130
第三节 U/f 控制与转矩补偿、转差补偿控制	35	习题	130
第四节 矢量控制功能	37	第六章 应用举例	132
第五节 运行控制与制动功能	38	第一节 变频器在恒压供水中的应用	132
第六节 其他控制功能	39	第二节 变频器在塑料机械中的应用	136
第七节 变频器的闭环运行	40	第三节 变频器在同速控制中的应用	141
第八节 变频器的外接端子功能	42	第四节 变频器在电梯中的应用	145
小结	47	第五节 变频器在龙门刨床中的应用	151
习题	49	小结	157
第三章 富士 FRENIC 5000 G11S/P11S 变频器	50	第七章 综合实训	158
第一节 变频器铭牌与基本功能	50	模块一 功能练习	158
第二节 变频器外接端子	53	实训一 功能参数码预置练习	158
第三节 功能参数码	61	实训二 外端子控制正反转及点动运行	159
第四节 操作面板及功能应用	77	实训三 U/f 输出曲线测试	161
小结	84	实训四 段速控制与程序运行控制	162
习题	84	实训五 常用功能参数预置	165
第四章 变频器常用控制电路	86	模块二 安装实训	167
第一节 变频器输入端子的控制方法	86	实训六 变频器运行控制	167
第二节 变频器起动与正反转控制	88	实训七 变频 - 工频切换运行	169
第三节 变频器的并联运行	90	实训八 升降速端子在供水中的应用	171
		附:供水实训系统制作参考	173
		实训九 变频器的 PLC 控制	174

实训十 变频器的比例运行	177	附录三 三菱 FR - A540 系列	
附录一 实训板制作	179	变频器	190
附录二 森兰 BT40 系列变频器	182	参考文献	200

绪 论

变频器是由计算机控制电力电子器件、将工频交流电变为频率和电压可调的三相交流电的电器设备,用以驱动交流异步(同步)电动机进行变频调速。变频器的出现,使交流电动机的调速变得和直流电动机一样方便,并可由计算机联网控制,因此得到了广泛的应用,其发展前景广阔。

一、变频器的发展历程

自 19 世纪末确立了三相交流供电制式和发明了三相异步电动机到 20 世纪 60 年代末,电力工业的格局大体为:99.999% 的电能由同步发电机发出,60% ~ 70% 的电能通过各种电动机加以利用。在电动机用电中,80% 的电能由交流电动机利用,其中主要为异步电动机(作定速传动);另外 20% 的电能被直流电动机利用,主要用于高性能变速传动系统中。

直流电动机控制简单、调速平滑、性能良好,因此一直占据调速应用的主导地位。但直流电动机有着先天性的缺陷,就是它的电枢电流是由换向器和电刷引入的,电刷和换向器摩擦工作,这就决定了它的转速不能太高,单机功率不能做得太大,应用电压也不能太高,否则电刷和换向器均会发热、打火、烧坏。另一方面电刷和换向器由于是摩擦工作,电刷要经常更换,也不适应在多粉尘等恶劣环境下工作,因此,交流电动机从诞生之日起,人们就设想着它也能像直流电动机那样进行调速,这是因为交流电动机结构简单、工作可靠、价格低廉,可适应任何环境,可做成各种功率(高压、大容量)规格,但交流(异步)电动机的转速与电动机的磁极对数有关,与转差率有关,与电源频率有关,要想连续改变电动机的转速,只有连续改变电源的频率。这在异步电动机发明后的百年中,因受到技术条件的限制,是难以做到的。

进入 20 世纪 70 年代,微电子技术和电力电子技术有了长足的发展,这为变频器的诞生奠定了基础。恰在此时一场石油危机席卷全球,工业发达国家投入大量人力、财力研究节能措施。人们发现,占用电量一半的风机、泵类负载是用异步电动机恒速拖动,用阀门或挡板来控制流量或压力,造成了大量能源的浪费。如果这些风机和泵类能用调节电动机的转速来控制流量或压力,则可节能 20% ~ 30%,因此开发交流变频器就成了当务之急。最初的变频器能完成变频调速工作,在风机和泵类负载应用中收到了很好的节能效果。

变频器的发展和成熟是与电力电子器件、计算机技术密不可分的。自从变频器诞生以后,电力电子器件制造技术在不断地进步,从双极性晶体管(BJT)到金属氧化物场效晶体管(MOSFET),又到绝缘栅双极晶体管(IGBT),这些开关器件的功率越做越大,开关速度、耐压及可靠性也越做越高;近 20 年来,计算机技术的发展速度人人皆知,其芯片的集成度从小规模到大规模,又到超大规模,电力电子器件为变频器提供了足够的开关容量,计算机技术为变频器提供了控制及操作系统。由于计算机控制的灵活性,现在的变频器早已超出了原来简单变频的范畴,其应用范围也早已超出了风机和泵类。变频器已由最初的基本 U/f 控制发展到高功能 U/f 控

制,又发展到矢量控制和直流转矩控制。而无传感器矢量控制变频器,利用其内部的检测和运算功能,推算出电动机转子的位置矢量和转速,具有较高的传动精度,省掉了成本高、安装复杂的传感器控制系统,特别适用于高性能调速系统的应用。

变频器由于是计算机控制,除了单机调速应用之外,还可联网控制。现代的交流电动机传动控制已不再局限于单一的调速要求,而是要求装置化、系统化、网络化应用,以获得更强的应用功能,而变频器恰好满足了这一技术要求,因此变频器已成为当今高科技领域的综合性应用技术之一,它与现场设备一起,通过网络管理可构成企业的自动化控制系统。

二、我国变频器的应用现状

变频器在我国的应用起步较晚,20世纪90年代初中国企业界才开始认识并尝试使用。当时轴承行业的150多个厂家采用了佳灵公司生产的3188台变频器用于轴承加工机床,总容量为14346kW,年节电量为 $4.13 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,平均节电40%,而且还保证了工件的加工质量。为此国家科委成果办公室在1991年8月10日下发文件,推荐使用佳灵变频器。由于当时人们对变频器认识了解不多,且产品的价格较贵,变频器的应用没有得到大面积推广。变频器在我国企业界得到认可并大量使用只是最近几年的事。随着变频器价格的下调、性能的提高,以及人们对变频器的逐渐认识,推动了变频器的推广应用。变频器业界人士一致公认,国内的变频器应用已经进入高速增长的“黄金时期”。

作为新兴的高科技产品,变频器从一开始进入我国,国外品牌就占据了绝大部分市场份额,如:日本的三菱、富士、东芝、安川、日立和松下;欧洲的西门子、ABB、施耐德等,这些公司的产品都以功能先进、质量可靠而赢得客户。就在国外产品占据我国市场的同时,国内变频器的研制和生产也在向前发展,到目前为止我国的变频器厂家已超过几十家,生产变频器较早和规模较大的厂家有成都的森兰、佳灵;北京的利德华福;山东的惠丰、风光等。国产变频器从功能到质量都有了显著提高,已能满足多领域的应用,正在被更多的国内外用户所认可和选用。

当今,变频器的应用几乎涵盖了国民经济的各个行业,特别是在建材、钢铁、有色金属、采油、石化、纺织、电力、机械、矿山、轻工、医药等领域应用广泛。采用变频器调速,除了替代过去的老式调速,诸如调压器调速、变极调速、串级调速、滑差调速、液力耦合调速以及直流调速等,更多的是用于老式调速无法胜任(因老式调速方式不能进行功能预置和联网控制)的新的调速领域。表绪0-1给出了变频器在各个领域的应用目的、范围及效果。

表绪0-1 变频调速效果

应用目的	应用范围及效果
节能	风机、泵类、采油、挤压机、搅拌机。通过调节电动机转速达到节能目的,通过节能在1~2年内即可收回改造成本
自动化	提高搬运机械停止位置的精度;提高生产线速度、控制精度;采用有反馈装置的流量控制实现自动化
提高产品质量	生产加工实现最佳速度控制及协调生产线内各装置的速度,使其同步、同速,以提高产品的质量和加工精度
提高生产率	根据产品种类联网控制,实现生产线的最佳速度,提高生产率

应用目的	应用范围及效果
增加设备使用寿命	采用对设备不产生冲击的启动、停止及空载低速运行等方式,增加设备的使用寿命
增加舒适度	电梯、电车等,采用平滑加速、减速,以提高乘坐的舒适性;改变空调间断运行为变速连续运行,使室内温差减小,增大环境舒适度

变频器在我国虽然推广应用已有了长足的发展,但离全面使用还有相当的距离,假如以该用的地方作为 100%,则现在实际应用还不足 10%,这与日本、美国、德国等工业发达国家该用变频器的地方基本都用上了变频器相比,确实还有很长的路要走。变频器在我国普及率低除了变频器本身和企业原因之外,另一个主要原因就是变频器诞生才 20 年,在我国的应用也仅仅 10 年时间,很多工程技术人员对变频器不了解,操作人员对变频器不能正确使用。有的企业选用了变频器但由于功能参数选择不合理而造成跳闸停产。因此有人说用好一台变频器并不比用好一台计算机容易,这话有一定的道理,看来在工程界普及变频器的应用知识已是当务之急,在机电类职业技术学校中开设变频器应用课程即适应了这一社会需求。

三、变频器的发展趋势

变频器发展至今,已经是一个成熟的电子产品,虽然还在不断地更新发展,但革命性的进步不多。根据变频器今后的市场需求,其发展主要体现在以下几个方面。

1. 向专用型方向发展

此类变频器在功能、控制理论上寻求先进性。在应用上以某特定领域为对象,诸如卷曲、提升、主从等应用领域,生产电梯专用、注塑机专用、中央空调专用、机床专用、中压潜油泵专用等专用变频器。此类专用变频器可以降低生产成本,节省安装调试时间,简化外控设置,方便使用操作。

2. 向人性化方向发展

现在的变频器安装、调试、操作等技术性都较强,影响了变频器的应用普及。向人性化方向发展就是使操作更加简单,使用更加方便。小功率变频器应当像普通的开关、接触器、继电器等简单的电器元件一样,具有使用简单、安装方便、安全可靠的基本性能,即类似傻瓜电器。

3. 易用性不断提高

变频器设计时充分考虑用户的安装要求,同时在软件设计上加入初始启动指导工具,通过引导程序使用户简化调试过程。例如 ABB 公司推出的 ACS800 系列变频器产品,在体积上较 ACS600 系列小了一半,称为“最窄”的书本型变频器,可以方便地安装在深而窄或宽而浅的空间当中;同时内置启动设置辅助工具及自适应编程软件,使得调试整定变得容易。从目前各公司推出的产品来看,变频器的功能越来越强大、越灵活,但这并未增加产品的使用难度,关键就在于厂家为用户提供的辅助工具帮用户选择了所需的功能参数,引导使用。

4. 功率结构模块化

模块化的功率结构设计为不同系列的产品提供了一致性,利于产品可靠性的提高,为生产厂家选型、安装、调试维护带来了方便,有效地降低了运行维护成本,同时增强了产品的可靠性。

5. 智能化

智能化的发展朝着两个方向:一是通过增加功能参数的编程能力来提高变频器的智能化程度,满足不同应用场合的要求。这实际上是将 PLC 的部分功能融入变频器中。例如 ABB 公司的 ACS800 系列变频器的自适应编程,可以在预先设定的 20 个功能基础上进行编程,以适应运行需求。二是使变频器具备网络连接能力,支持多种协议,通过通信接口与外部智能化设备连接,以提高变频器的智能化程度。虽然当前变频器单独使用的居多,但网络化运行前景光明,并已经成为工业自动化的发展趋势。

6. 减小谐波影响

作为交-直-交变频器,安装进线电抗器不仅可以大大减少进线电网谐波的影响,而且可以减小对设备的电流冲击,提高设备的可靠性。将电抗器内置在变频器中已是发展方向,已有很多厂家进行了内置。总之设法减小变频器的谐波影响既是变频器的发展方向,也是相关部门对变频器提出的要求。

第一章

基础知识

第一节 三相异步电动机

一、三相异步电动机的工作原理

在变频调速拖动系统中,使用的电动机大多数是三相异步电动机。为了说明变频器的功能和应用,有必要先了解三相异步电动机的相关知识。

1. 旋转磁场与转差率

三相异步电动机主要由定子和转子组成。定子包括定子铁心和定子绕组,在定子绕组中通入三相交流电,便产生一个旋转磁场,旋转磁场的转速与三相交流电的频率和电动机的磁极对数有关,表达式为

$$n_1 = 60f_1/p \quad (1-1)$$

式中, n_1 ——旋转磁场转速,又称为同步转速,单位为 r/min;

f_1 ——电源的频率,单位为 Hz;

p ——旋转磁场的磁极对数。

同步转速 n_1 的旋转方向由电源的相序决定:设电源为正序(或顺序,一般称为正序),同步转速 n_1 为顺时针方向旋转,若将三相定子绕组与三相电源接线中的任意两相对调(即电源为反序或逆序), n_1 则为逆时针方向旋转。

转子由转子铁心、转子绕组、转轴等部件组成。转子绕组是自行闭合的短路绕组,根据其结构不同分为笼型和绕线型两大类。笼型转子由铝条或铜条构成,两端各用一端环短路,如图 1-1(a)所示。绕线型转子绕组与定子绕组相似,绕制为三相对称绕组,一般作星形联结,三个首端接到转轴上的对应集电环上,再通过一套电刷将转子绕组与外电路相连,如图 1-1(b)所示。绕线型转子结构复杂,价格较高,运行可靠性较差。

当定子绕组接通三相电源,在定子空间产生旋转磁场。假设旋转磁场按顺时针方向旋转,则相当于转子按逆时针方向切割磁场,转子绕组中便产生感应电流,这个电流在磁场中受到力的作用,使转子沿着磁场旋转的方向转动。

由于转子只有在切割旋转磁场的情况下,才能产生感应电流,从而产生电磁力矩使转子转动,因此转子的转速 n 要比旋转磁场的转速 n_1 低一点,它们之间的差值用转速差 Δn 表示,即

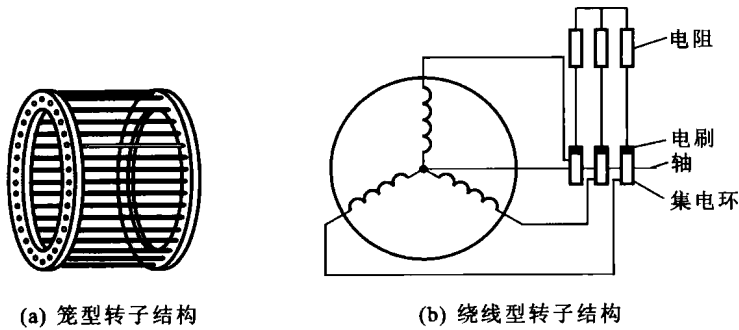


图 1-1 三相异步电动机转子结构

$\Delta n = n_1 - n$, 转速差 Δn 与同步转速 n_1 的比值称为转差率 s , 即

$$s = (n_1 - n) / n_1 \quad (1-2)$$

式中, s ——转差率;

n_1 ——同步转速;

n ——转子转速。

s 是分析异步电动机运行状态的重要参数。在电动机起动的瞬间, 转子转速 $n = 0$, 转差率 $s = 1$; 当电动机以额定转速运行时, 转差率 s 很小, 约为 $0.02 \sim 0.06$; 当电动机空载运行时, 转子转速 n 略小于同步转速 n_1 , 转差率 $s \approx 0$ 。

由式(1-1)、式(1-2)整理可得转子转速 n 的表达式为

$$n = (1 - s) 60 f_1 / p \quad (1-3)$$

由式中可见, 转子转速 n 与电源频率 f_1 、磁极对数 p 、转差率 s 有关, 因此, 三相异步电动机的调速方式有: 变频(f_1)调速、变极(p)调速、变转差率(s)调速。

2. 三相异步电动机的电磁特性

给三相异步电动机的定子绕组加上电源电压 U_1 后, 绕组中便产生感应电动势 E_1 , 由理论分析可得 E_1 的表达式为

$$E_1 = 4.44 K_1 N_1 f_1 \Phi_m \quad (1-4)$$

式中, E_1 ——定子绕组的感应电动势有效值;

K_1 ——定子绕组的绕组系数, $K_1 < 1$;

N_1 ——定子每相绕组的匝数;

f_1 ——定子绕组感应电动势的频率, 即电源的频率;

Φ_m ——主磁通。

在式(1-4)中, 由于 $4.44 K_1 N_1$ 均为常数, 因此定子绕组的感应电动势 E_1 可表示为

$$E_1 \propto f_1 \Phi_m \quad (1-5)$$

由于定子绕组中存在导体电阻, 电动机工作时在电阻上要产生一定的电压降 ΔU , ΔU 与额定电压相比很小, 如果将 ΔU 忽略, 则

$$E_1 \approx U_1 \propto f_1 \Phi_m \quad (1-6)$$

三相异步电动机是根据其工作在额定电压、额定频率以及额定磁通下进行设计的,其磁通 Φ_m 选在了铁心磁化曲线的接近饱和处。 Φ_m 的大小关系到电动机的电磁转矩,并与电动机的工作电流成正比。由式(1-6)可见,如 f_1 下降, U_1 不变,则 Φ_m 上升,因为 Φ_m 已设计在接近饱和处, Φ_m 上升即进入磁化曲线的饱和区,引起工作电流大幅度增加,使电动机过热损坏;如 f_1 上升, U_1 不变,则 Φ_m 下降,将使工作电流下降,由于电流的下降,电动机的输出转矩不足。为了保持电动机的 Φ_m 不变,即电动机的转矩不变,在 f_1 变化的同时, U_1 必须同时变化,使 U_1 与 f_1 的比值保持恒定,即

$$U_1/f_1 = \text{常数} \quad (1-7)$$

变频器在工作时,有时 f_1 调得很低,同时 U_1 也很低,此时定子绕组上的电压降 ΔU 在电压 U_1 中所占的比例不能忽略。由于 ΔU 所占比例增加,将使定子电流减小,从而使 Φ_m 减小,这将引起低速时的输出转矩减小。此时,可提高 U_1 来补偿 ΔU 的影响,使得 E_1/f_1 不变,即 Φ_m 不变,这种控制方法称为电压补偿,也称为转矩提升。

二、三相异步电动机的机械特性

当加在电动机上的电压 U_1 为额定电压时,电动机的电磁转矩 T 与转子转速 n 之间的关系,称为电动机的机械特性,即

$$n = f(T) \quad (1-8)$$

三相异步电动机的机械特性曲线如图1-2所示。下面讨论曲线上几个特殊的转矩。

1. 起动转矩 T_{st}

在 $n=0$ ($s=1$), $T=T_{st}$ 点,这点的转矩称为起动转矩 T_{st} ,也称为堵转转矩。当电动机的负载转矩大于 T_{st} 时,电动机将不能起动。

2. 额定转矩 T_N

在 $n=n_N$ ($s=s_N$), $T=T_N$ 点,这点的转矩称为额定转矩 T_N 。当电动机工作在额定转矩 T_N 时, s_N 通常在0.02~0.06之间,转速在很小的范围内变化时,转矩即可在很大的范围内变化,即工作于额定转矩 T_N 时,电动机具有很硬的机械特性。

3. 最大转矩 T_M

在 $n=n_L$ ($s=s_L$), $T=T_M$ 点,这点的转矩称为最大转矩 T_M 。 T_M 的大小象征着电动机的过载能力,用过载倍数 λ 表示, $\lambda=T_M/T_N$ 。在任何情况下,电动机的负载转矩都不能大于 T_M ,否则电动机转速将急剧下降,致使电动机堵转停止,因此这一点称为临界转速点。临界转速 n_L 的大小决定了L点的上下位置,从而反映了机械特性的硬度。

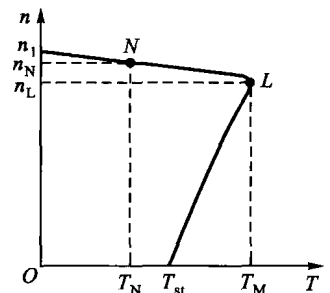


图1-2 三相异步电动机的机械特性曲线

三、三相异步电动机的调速

1. 变极调速

三相异步电动机的变极调速是有级调速,通过改变磁极对数 p ,可以得到2:1调速、3:2调

速、4:3 调速及三速电机等,调速的级数很少。由于磁极对数 p 取决于定子绕组的结构,而且笼型转子的极数能自动地保持与定子极数相等,所以此调速只适用于特制的笼型异步电动机,这种电动机结构复杂,成本高。

2. 变转差率调速

变转差率调速一般适用于绕线型异步电动机或转差电动机。具体的实现方法很多,比如:转子串电阻的串级调速、调压调速、电磁转差离合器调速等。随着 s 的增大,电动机的机械特性变软,效率降低。

3. 变频率调速

变频调速具有调速范围宽,调速平滑性好,调速前后不改变机械特性硬度,调速的动态特性好等特点。下面分析变频调速时的机械特性。

根据电动机理论,当 f_1 较高时,忽略定子绕组电阻,最大电磁转矩 $T_M \propto (U_1/f_1)^2$ 、临界转差率 $s_L \propto 1/f_1$ 、对应临界转速的转速差 $\Delta n = s_L n_1 = s_L 60f_1/p$ 为常数、起动转矩 $T_{st} \propto U_1^2/f_1^3$; 当 f_1 较低时,定子绕组电阻的影响不可忽略,最大电磁转矩 T_M 随着频率的减小而减小、转速差 Δn 仍为常数、 T_{st} 随着频率减小而减小。按照上述分析,可以大致了解变频调速的机械特性,如图 1-3 所示。下面分两种情况加以说明。

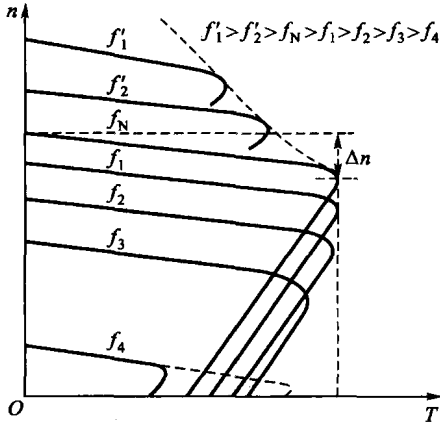


图 1-3 三相异步电动机变频调速的机械特性

(1) 基频以下的恒磁通变频调速

调速时,通常以电动机的额定频率为基本频率,即基频。由式(1-5)可知,在基频以下调速时,须保持 E_1/f_1 恒定,即保持主磁通 Φ_m 恒定。由于 E_1 难以直接控制,由式(1-6)可知, f_1 较高时,保持 U_1/f_1 恒定,即可近似地保持主磁通 Φ_m 恒定。由于 $T_M \propto (U_1/f_1)^2$,保持 U_1/f_1 恒定时, T_M 恒定,电动机带动负载的能力不变,而且此过程中,转速差 Δn 基本不变,所以调速后的机械特性曲线平行地移动,电动机的输出转矩不变,属于“恒转矩”调速。

当 f_1 较低时,若仍由 U_1/f_1 恒定来代替 E_1/f_1 恒定,会带来较大的误差, T_M 和 T_{st} 随着频率的减小而减小,电动机带动负载的能力变小。此时,若仍由 U_1/f_1 恒定来代替 E_1/f_1 恒定,可采用电压补偿方法,即适当提高电压 U_1 ,目的是补偿定子阻抗压降,近似保持 E_1/f_1 恒定,提高电动机带

动负载的能力,其机械特性曲线如图 1-3 虚线所示。

(2) 基频以上的弱磁变频调速

由于电动机不能超过额定电压运行,所以频率由额定值向上升高时,定子电压不可能随之升高,只能保持在额定值不变。这样必然会使 Φ_m 随着 f_1 的升高而下降,类似于直流电动机的弱磁调速。

由于 $T_M \propto (U_1/f_1)^2$,保持 U_1 恒定时, T_M 随着 f_1 的升高而下降,电动机带动负载的能力变小;随着 f_1 的升高, Φ_m 下降,输出转矩 T 下降,而转速 n 上升,属于近似“恒功率”调速。

第二节 三相异步电动机的起动和制动

在拖动系统中,电动机要经常起动、停止(即制动)。从提高劳动生产率的角度看,电动机起动时间、制动时间越短越好,但是由于三相异步电动机起动和制动的具体特点,起动时间、制动时间又不能太短。

一、起动

电动机起动时,要求有不太大的起动电流和足够大的起动转矩。但是实际情况恰恰相反,在起动瞬间,转子还没转动, $s=1$,由于转子以较大的转速切割旋转磁场,在转子绕组中产生较大的感应电动势 E_2 和电流 I_2 ,根据磁动势平衡关系,定子电流随着转子电流改变而改变,所以起动时定子电流 I_{st} 也很大,一般会达到额定电流 I_N 的 4~7 倍,这样大的起动电流会在线路中引起过大的电压降,从而影响接在同一电网上的其他用电设备的正常运行。

在生产中,除了小容量的三相异步电动机能直接起动外,一般要采取不同的方法起动,比如自耦变压器降压起动、串电阻或电抗器降压起动、Y- Δ 降压起动等。在变频调速拖动系统中,变频器用降低频率 f_1 (从而也降低了 U_1)的方法来起动电动机。如图 1-4 所示为低频起动时的机械特性曲线,电动机以很低的频率起动,随着频率的上升,转速上升,直至达到电动机的工作频率后,电动机稳速运行。在此过程中,转速差 Δn 被限制在一定的范围,起动电流也将被限制在一定的范围内,而且动态转矩 ΔT 很小,起动过程很平稳。

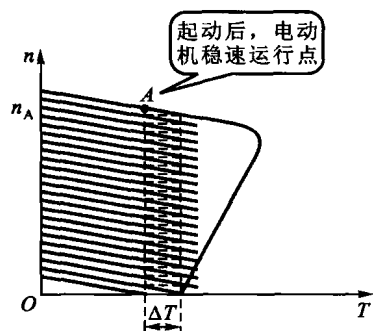


图 1-4 低频起动时的机械特性曲线

二、制动

电动机的制动状态是指电磁转矩 T 与转速 n 方向相反的状态。三相异步电动机的制动方式有直流制动、回馈制动和反接制动。由于反接制动在变频调速系统中禁止使用,所以下面只介绍前两种制动方式。

1. 直流制动

电动机制动时,切断电动机的三相电源,在定子绕组中通入直流电,产生一恒定磁场,如图 1-5(a)所示。由于转子在机械惯性作用下仍按原方向旋转,它切割恒定磁场产生感应电流,用左手定则可判断感应电流在磁场中的受力方向,从而可判断电磁转矩方向与转子转速方向相反,