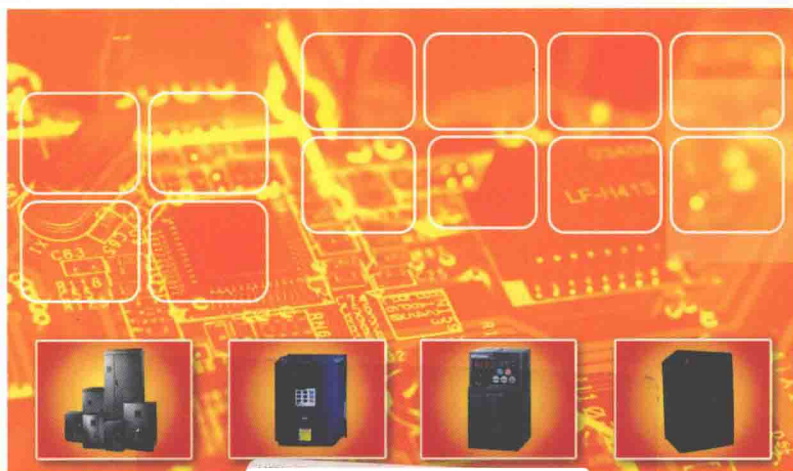




高等职业教育“十二五”规划教材
高职高专电子信息类系列教材

变频器应用技术

(第二版)



李方园 主编



科学出版社

高等职业教育“十二五”规划教材

高职高专电子信息类系列教材

变频器应用技术

(第二版)

李方园 主编

高明远 陈希球 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从变频器使用者的角度出发,从理论到实践、从设计到应用,由浅入深地阐述了变频器的基础知识、使用功能、使用系统的设计、节能应用及维护经验。

本书最大的特点就是按照使用者了解和应用变频器的渐进过程,结合生产工艺和机械装备的实际应用,详细介绍了变频器的使用范围、工作原理以及行业经验,力图将变频器在应用中所涉及的重点以言简意赅的方式呈现给读者。

本书可以作为高职高专院校电气自动化技术、机电一体化技术、自动控制及相关专业的教材,也可供电气从业人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

变频器应用技术/李方园主编. —2版. —北京:科学出版社,2014
(高等职业教育“十二五”规划教材·高职高专电子信息类系列教材)
ISBN 978-7-03-040020-8

I. ①变… II. ①李… III. ①变频器-高等职业教育-教材
IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 043056 号

责任编辑:孙露露/责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉/封面设计:子时文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年4月第 二 版 印张:14 1/4

2014年4月第五次印刷 字数:329 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-2010

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

变频器调速技术是集自动控制、微电子、电力电子、通信等技术于一体的高科技技术，它以很好的调速、节能性能，在各行各业中获得了广泛的应用。随着工业的快速发展，变频器的应用也经历了从初级到高级、从传统控制到先进控制的过程，变频器在节能应用、设备控制中所扮演的角色越来越重要。

随着维修电工（高级、技师）对于变频器的使用、操作和设计要求越来越高，“变频器应用技术”在高职高专教育中的课程改革迫在眉睫。为了使高职高专学生更好地掌握和理解变频器知识，本书进行了大胆的改革和尝试。从变频器使用者的角度出发，从理论到实践、从设计到应用，由浅入深地阐述了变频器的基础知识、变频器的使用功能、变频器使用系统的设计、变频器的节能应用以及变频器的维护经验。

本书共分5章。第1章主要介绍了变频器的基础知识，包括交流电动机的调速方式、异步电动机的变频调速原理、变频器的电路结构和变频器的分类与特点；第2章主要介绍了变频器的使用功能，内容包括变频器的控制方式、频率给定方式、运转指令方式和启动制动方式；第3章介绍了变频器使用系统的基本设计原理，包括转速控制应用、PID控制应用和通信控制应用，同时介绍了变频控制柜设计的基本要点；第4章介绍了变频节能应用的必要性，并列举了给排水系统的变频器节能应用、暖通空调系统的变频器节能应用、注塑机的变频器节能应用和变频家电的应用；第5章主要介绍了变频器维护经验，包括变频器维护基本要点和具体的故障排除案例（过压、过流、过载原因、缺相、通信故障等），以及如何进行原因查找及故障定位。

本书由李方园任主编，高明远、陈希球任副主编，张小冰、储海燕、钟晓强、杨帆、郑发泰、李雄杰、张东升、叶明、应秋红等参与了编写。在编写过程中，三菱、西门子、安川、艾默生等厂家相关人员提供了相当多的典型案例和调试经验。同时，在编写本书过程中参考和引用了国内外许多专家、学者、工程技术人员发表的论文、著作等资料，在此一并致谢。

为便于教师教学和学生学习，本书配有电子课件等教学资源，可到科学出版社网站（www.abook.cn）下载。

由于编者水平有限，编写过程中难免存在不足和疏漏之处，希望广大读者能够给予更多的批评、指正，不胜感谢。变频器市场规模的逐渐扩大，变频器产品的日渐丰富，变频器技术的异彩纷呈，这些都使得变频器的应用案例更新速度加快，因此编者烦请各位业内人士：如果您有好的应用案例或者想更正书中需要商讨的任何细节，都请联系主编（邮箱：Muzi_woody@163.com），以本书搭建起变频器应用技术的培训平台和实践基地，为提高变频器的应用水平做出一定的贡献。

目 录

第 1 章 变频器基础知识	1
1.1 交流电动机的调速方式	1
1.2 交流异步电动机的调速原理	7
1.3 变频器的电路结构	17
1.4 变频器的分类与特点	31
1.5 技能训练 1: 三菱 D700 变频器的试运行	34
1.6 技能训练 2: 西门子 MM4 系列变频器的基本操作	46
本章小结	54
思考与练习题	55
第 2 章 变频器的使用功能	56
2.1 变频器的控制方式	56
2.2 变频器的频率给定方式	71
2.3 变频器的运转指令方式	79
2.4 变频器的启动制动方式	82
2.5 技能训练 1: 三菱 D700 变频器端子的简单接线	91
2.6 技能训练 2: 三菱 D700 变频器运行模式的操作	99
2.7 技能训练 3: 西门子 MM420 变频器调试案例分析	105
本章小结	113
思考与练习题	114
第 3 章 变频器使用系统的设计	117
3.1 变频调速系统的设计原理	117
3.2 转速控制应用	130
3.3 PID 控制应用	141
3.4 通信控制应用	151
3.5 变频控制柜的设计	159
本章小结	166
思考与练习题	167
第 4 章 变频器的节能应用	169
4.1 变频节能的典型应用	169
4.2 给、排水系统的变频器节能控制	171
4.3 暖通空调系统的变频节能控制	175
4.4 注塑机变频节能应用	182



4.5 变频家电的节能应用	187
本章小结	188
思考与练习题	189
第5章 变频器的维护经验	191
5.1 变频器维护基本要点	191
5.2 过压原因及故障定位	196
5.3 过流原因及故障定位	203
5.4 过载原因及故障定位	208
5.5 缺相原因及故障定位	212
5.6 技能训练: 变频器主电路元器件检测	216
本章小结	220
思考与练习题	221
参考文献	222

第 1 章

变频器基础知识

【内容提要】

交流电动机比直流电动机经济耐用得多，因而被广泛应用于各行各业。在实际应用场合，往往要求交流电动机能随意调节转速，以便获得满意的使用效果，但它在这方面比起直流电动机来就要逊色得多，于是人们不得不借助其他手段达到调速目的。根据交流电动机的转速特性可知，交流调速方式有 3 大类：频率调节、磁极对数调节和转差率调节。

本章首先介绍了交流异步电动机的变频调速原理，包括 U/f 控制、矢量控制和 DTC 控制；同时介绍了变频器的基础结构知识，即功率转换和弱电控制两大部分；然后阐述了变频器的分类及发展趋势；最后介绍了技能训练部分，即三菱 D700 变频器的试运行。

1.1 交流电动机的调速方式

1.1.1 异步电动机和同步电动机的概念

1. 异步电动机

三相异步电动机要旋转起来的先决条件是具有一个旋转磁场，三相异步电动机的定子绕组就是用来产生旋转磁场的。三相电源相与相之间的电压在相位上是相差 120° 的，三相异步电动机定子中的 3 个绕组在空间方位上也互差 120° ，这样，当在定子绕组中通入三相电源时，定子绕组就会产生一个旋转磁场，其产生的过程如图 1.1 所示。图 1.1 中分 4 个时刻来描述旋转磁场的产生过程。电流每变化一个周期，旋转磁场便在空间旋转一周，即旋转磁场的旋转速度与电流的变化是同步的。

旋转磁场的转速为

$$n = 60f/p \quad (1-1)$$

式中， f 为电源频率； p 是磁场的磁极对数； n 的单位是 r/min 。根据此式可知，电动机的转速与磁极对数和使用电源的频率有关。

定子绕组产生旋转磁场后，转子导条（笼型条）将切割旋转磁场的磁力线而产生感应电流，转子导条中的电流又与旋转磁场相互作用产生电磁力，电磁力产生的电磁转矩驱动转子沿旋转磁场方向以 n_1 的转速旋转起来。一般情况下，电动机的实际转速 n_1 低于旋转磁场的转速 n 。因为假设 $n=n_1$ ，则转子导条与旋转磁场就没有相对运动，就不会切割磁力线，也就不会产生电磁转矩，所以转子的转速 n_1 必然小于 n 。为此，称这

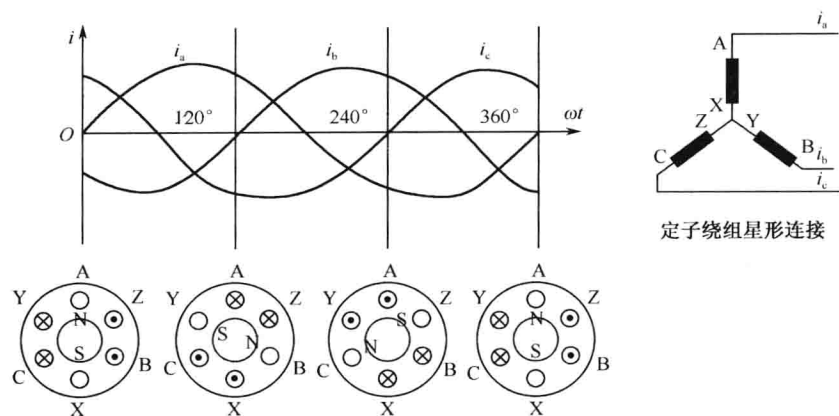


图 1.1 三相异步电动机原理

种结构的三相电动机为异步电动机。

2. 同步电动机

同步电动机和其他类型的旋转电动机一样，都是由固定的定子和可旋转的转子两大部分组成。一般分为转场式同步电动机和转枢式同步电动机。

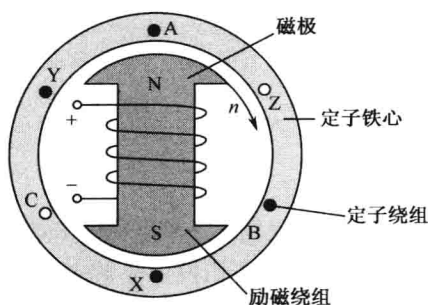


图 1.2 转场式同步电动机的结构模型

图 1.2 给出了最常用的转场式同步电动机的结构模型，其定子铁心的内圆均匀分布着定子槽，槽内嵌放着按一定规律排列的三相对称交流绕组。这种同步电动机的定子又称为电枢，定子铁心和绕组又称为电枢铁心和电枢绕组。转子铁心上装有成对磁极，磁极上绕有励磁绕组。通以直流电流时，将会在电动机的气隙中形成极性相间的分布磁场，称为励磁磁场（也称主磁场、转子磁场）。气隙处于电枢内圆和转子磁极之间，气隙层的

厚度和形状对电动机内部磁场的分布和同步电动机的性能有重大影响。

除了转场式同步电动机外，还有转枢式同步电动机，其磁极安装于定子上，而交流绕组分布于转子表面的槽内，这种同步电动机的转子充当了电枢。图中用 AX、BY、CZ 这 3 个在空间错开 120° 电角度分布的线圈代表三相对称交流绕组。

3. 交流电动机的调速

交流电动机比直流电动机经济耐用得多，因而被广泛应用于各行各业，是一种量大面广的传统产品。在实际应用场合，往往要求电动机能随意调节转速，以便获得满意的使用效果，但交流电动机在这方面比起直流电动机来就要逊色得多，于是人们不得不借助其他手段达到调速目的。根据感应电动机的转速特性可知，它的调速方式有 3 大类：频率调节、磁极对数调节和转差率调节。从而出现了目前常用的几种调速方法，如图 1.3 所示。

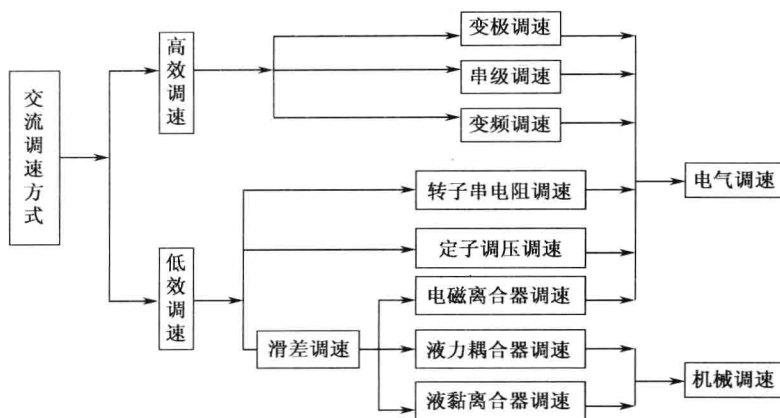


图 1.3 交流电动机主要调速方式分类

基于节能角度，通常把交流调速分为高效调速和低效调速。高效调速指基本上不增加转差损耗的调速方式，在调节电动机转速时转差率基本不变，不增加转差损失，或将转差功率以电能形式回馈电网或以机械能形式回馈机轴；低效调速则存在附加转差损失，在相同调速工况下其节能效果低于不存在转差损耗的调速方式。

属于高效调速方式的主要有变极调速、串级调速和变频调速；属于低效调速方式的主要有滑差调速（包括电磁离合器调速、液力耦合器调速、液黏离合器调速）、转子串电阻调速和定子调压调速。其中，液力耦合器调速和液黏离合器调速属于机械调速，其他均属于电气调速。变极调速和滑差调速方式适用于笼型异步电动机，串级调速和转子串电阻调速方式适用于绕线型异步电动机，定子调压调速和变频调速既适用于笼型，也适用于绕线型异步电动机。变频调速和机械调速还可用于同步电动机。

液力耦合器调速技术属于机械调速范畴，它是将匹配合适的调速型液力耦合器安装在常规的交流电动机和负载（风机、水泵或压缩机）之间，从电动机输入转速，通过液力耦合器工作腔中高速循环流动的液体，向负载传递力矩和输出转速。只要改变工作腔中液体的充满程度即可调节输出转速。

液黏离合器调速是指利用液黏离合器作为功率传递装置完成转速调节的调速方式，属于机械调速。液黏离合器是利用两组摩擦片之间接触来传递功率的一种机械设备，如同液力耦合器一样安装在笼型感应电动机与工作机械之间，在电动机低速运行的情况下，利用两组摩擦片之间摩擦力的变化无级地调节工作机械的转速。由于它存在转差损耗，因此是一种低效调速方式。

1.1.2 交流电动机的调速方式

1. 异步电动机的变极调速

变极调速技术是通过采用变极多速异步电动机实现调速的。这种多速电动机大都为笼型转子电动机，其结构与基本系列异步电动机相似，现国内生产的有双速、三速、四速等几类。



变极调速是通过改变定子绕组的极对数来改变旋转磁场同步转速进行调速的,是无附加转差损耗的高效调速方式。由于极对数 p 是整数,它不能实现平滑调速,只能有级调速。在供电频率 $f=50\text{Hz}$ 的电网, $p=1、2、3、4$ 时,相应的同步转速 $n_0=3000\text{r/min}、1500\text{r/min}、1000\text{r/min}、750\text{r/min}$ 。改变极对数是用改变定子绕组的接线方式来的完成的(图 1.4),图 1.4 (a) 所示的 $p=2$,图 1.4 (b) 和图 1.4 (c) 中的 $p=1$ 。双速电动机的定子是单绕组,三速和四速电动机的定子是双绕组。这种改变极对数来调速的笼型电动机,通常称为多速感应电动机或变极感应电动机。

多速电动机的优点是运行可靠,运行效率高,控制线路简单,容易维护,对电网无干扰,初始投资低。缺点是有级调速,而且调速级差大,从而限制了它的使用范围。适合于按 2~4 挡固定调速变化的场合,为了弥补有级调速的缺陷,它有时与定子调压调速或电磁离合器调速配合使用。

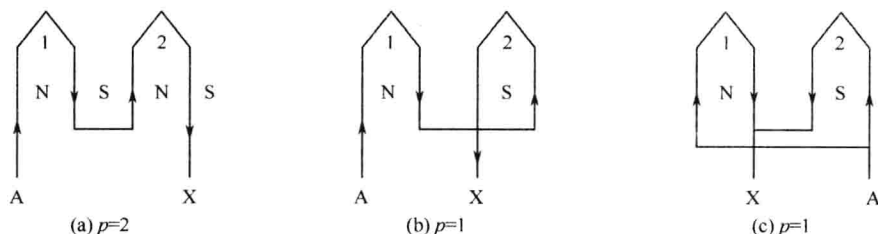


图 1.4 定子绕组改接变极对数示意图

2. 电磁调速

电磁调速技术是通过电磁调速电动机实现调速的技术。电磁调速电动机(又称滑差电动机)由三相异步电动机、电磁转差离合器和测速发电电动机组成,三相异步电动机作为原动机工作。该技术是传统的交流调速技术之一,适用于容量在 0.55~630kW 范围内的风机、水泵或压缩机。

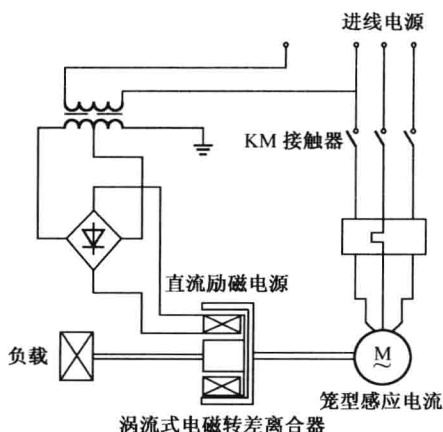


图 1.5 电磁调速示意图

电磁离合器调速是由笼型感应电动机和电磁离合器一体化的调速电动机来完成的,把这种调速电动机称为电磁离合器电动机,又称滑差电动机,属于低效调速方式。电磁调速电动机的调速系统主要由笼型感应电动机、涡流式电磁转差离合器和直流励磁电源等 3 部分组成(图 1.5),直流励磁电源功率较小,通过改变晶闸管的控制角以改变直流励磁电压的大小来控制励磁电流。它以笼型电动机作为原动机,带动与其同轴连接的电磁离合器的主动部分,离合器的从动部分与负载同轴连接,主动部分与从动部分没有机械联系,只有磁路相通。离合器的主动部分为电枢,从动部分为磁极。电枢包括电枢铁心和电枢绕组,磁极则由铁心和励磁绕组构成,绕组与部分铁心固定在机壳上不随磁极

机械联系,只有磁路相通。离合器的主动部分为电枢,从动部分为磁极。电枢包括电枢铁心和电枢绕组,磁极则由铁心和励磁绕组构成,绕组与部分铁心固定在机壳上不随磁极



旋转, 直流励磁不必经过滑环而直接由直流电源供电。当电动机带动电枢在磁极磁场中旋转时, 就会感生涡流, 涡流与磁极磁场作用产生的转矩将使电枢牵动磁极拖动负载同向旋转, 通过控制励磁电流改变磁场强度, 使离合器产生大小不同的转矩, 从而达到调速的目的。

电磁离合器的优点是结构比较简单, 可无级调速, 维护方便, 运行可靠, 调速范围也比较宽, 对电网无干扰, 它可以空载启动, 对需要重载启动的负载可获得容量效益, 提高电动机运行负载率。缺点是高速区调速特性软, 不能全速运行; 低速区调速效率比较低, 适用于调速范围适中的中、小容量电动机。

3. 串级调速

串级调速的典型调速系统有两种: 一种是电气串级调速系统; 另一种是电动机串级调速系统。电气串级调速电路是由异步电动机转子一侧的整流器和电网一侧的晶闸管逆变器组成。用改变逆变器的逆变角来调节异步电动机转速, 将整流后的直流电通过逆变器变换成具有电网频率的交流电, 将转差功率回馈电网。电动机串级调速电路是把转子整流后的直流作为电源接到一台直流电动机的电枢两端, 用调节励磁电流来调节异步电动机转速, 直流电动机与异步电动机同轴相接, 将转差功率变为直流器的输入功率与异步电动机一起拖动负载, 使转差功率回馈机轴。电动机串级调速的范围不大, 又增加了一台直流电动机, 使系统复杂化, 应用不多。电气串级调速系统比较简单, 控制方便, 应用比较广泛。

串级调速的主要优点是调速效率高, 可实现无级调速, 初始投资不大。缺点是对电网干扰大, 调速范围窄, 功率因数也比较低, 与转子串电阻相比, 主要是它的效率优势。

4. 定子调压调速

定子调压调速是用改变定子电压实现调速的方法来改变电动机的转速, 调速过程中它的转差功率以发热形式损耗在转子绕组中, 属于低效调速方式。由于电磁转矩与定子电压的平方成正比, 改变定子电压就可以改变电动机的机械特性, 与某一负载特性相匹配就可以稳定在不同的转速上, 从而实现调速功能。供电电源的电压是固定的, 它用调压器来获得可调电压的交流电源。传统的调压器有饱和电抗器式调压器、自耦变压器式调压器和感应式调压器, 主要用于笼型感应电动机的减压启动, 以减少启动电流。晶闸管是交流调压调速的主要形式, 它利用改变定子侧三相反并联晶闸管的移相角来调节转速, 可以做到无级调速。

调压调速的主要优点是控制设备比较简单, 可无级调速, 初始投资低, 使用维护比较方便, 可以兼作笼型电动机的降压启动设备。缺点是调速效率比较低, 低速运行调速效率更低; 调速范围窄, 只有对风机和泵类工作机械调速可以获得较宽的调速范围并减少转差损耗; 调速特性比较软, 调速精度差; 对电网干扰也大, 适用于调速范围要求不宽, 较长时间在高速区运行的中、小容量的异步电动机。

5. 转子串电阻调速

转子串电阻调速是通过改变绕线型感应电动机转子串接附加外接电阻, 从而改变转

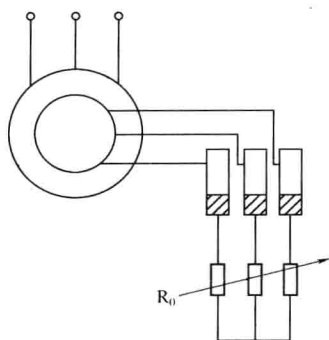


图 1.6 转子串电阻调速电路示意

响应速度慢；外接附加电阻不易做到无级调速，调速平滑性差，适合于调速范围不太大和调速特性要求不高的场合。

6. 变频调速

变频调速是通过改变异步电动机供电电源的频率 f 来实现无级调速的，其原理如图 1.7 所示，电动机转轴直接与负载连接，电动机由变频器供电。变频调速的关键设备就是变频器，变频器是一种将交流电源整流成直流后再逆变成频率、电压可变的变流电源的专用装置，主要由功率模块、超大规格专用单片机等构成。变频器能够根据转速反馈信号调节电动机供电电源的频率，从而可以实现相当宽频率范围内的无级调速。

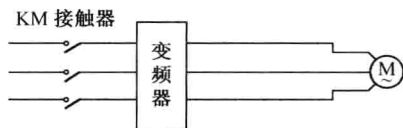


图 1.7 变频调速原理

1.1.3 调速方式汇总

根据实际应用效果，将交流电动机的各种调速方式的一般性能和特点汇总于表 1.1 中。

表 1.1 调速方式的一般特性和特点

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液黏离合器	变极	串级	变频
调速方法	改变转子串电阻	改变定子输入调压	改变离合器励磁电流	改变耦合器工作腔充油量	改变离合器摩擦片间隙	改变定子极对数	改变逆变器的逆变角	改变定子输入频率和电压
调速性质	有级	无级	无级	无级	无级	有级	无级	无级
调速范围	50%~100%	80%~100%	10%~80%	30%~97%	20%~100%	2、3、4挡转速	50%~100%	5%~100%
响应能力	差	快	较快	差	差	快	快	快
电网干扰	无	大	无	无	无	无	较大	有
节电效果	中	中	中	中	中	高	高	高
初始投资	低	较低	较高	中	较低	低	中	高
故障处理	停车	不停车	停车	停车	停车	停车	停车	不停车



续表

调速方式	转子串电阻	定子调压	电磁离合器	液力耦合器	液黏离合器	变极	串级	变频
安装条件	易	易	较易	场地	场地	易	易	易
适用范围	绕线型异步电动机	绕线型异步电动机、笼型异步电动机	笼型异步电动机	笼型异步电动机、同步电动机	笼型异步电动机、同步电动机	笼型异步电动机	绕线型异步电动机	异步电动机、同步电动机

1.2 交流异步电动机的调速原理

交流电动机不论是三相异步电动机还是三相同步电动机，它们的转速为

$N_0 = 60f/p$ (同步电动机); $N = N_0(1-s) = 60f/p(1-s)$ (异步电动机) (1-2)
式中, f 为频率; p 为极对数; s 为转差率 ($0 \sim 3\%$ 或 $0 \sim 6\%$)。

由转速公式可见, 只要设法改变三相交流电动机的供电频率 f , 就可十分方便地改变电动机的转速 N , 比改变极对数 p 和转差率 s 两个参数简单得多, 特别是近 20 多年来, 交流变频调速器得到了突飞猛进的发展, 使得三相交流电动机变频调速成为当前电气调速的主流。

实际上仅仅改变电动机的频率并不能获得良好的变频特性。例如, 标准设计的三相异步电动机、380V、50Hz, 如果电压不变, 只改变频率, 会产生以下问题: 380V 不变, 频率下调 ($< 50\text{Hz}$), 会使电动机气隙磁通 φ (约等于 U/f) 饱和; 反之, 380V 不变, 频率向上调 ($> 50\text{Hz}$), 则使磁通减弱。所以, 真正应用变频调速时, 一般需要同时改变电压和频率, 以保持磁通基本恒定。因此, 变频调速器又称为 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 装置。

1.2.1 感应电动机稳态模型及基于稳态模型的控制方法

1. 感应电动机稳态模型

根据电动机学原理, 在下述 3 个假定条件下 (即忽略空间和时间谐波、忽略磁饱和、忽略铁损), 感应电动机的稳态模型可以用 T 型等效电路表示, 如图 1.8 (a) 所示。

图 1.8 (a) 中的各参数定义如下:

R_s 、 R'_r ——定子每相电阻和折合到定子侧的转子每相电阻;

L_{1s} 、 L'_{1r} ——定子每相漏感和折合到定子侧的转子每相漏感;

L_m ——定子每相绕组产生气隙主磁通的等效电感, 即励磁电感;

U_s 、 ω_1 ——定子相电压和供电角频率;

I_s 、 I'_r ——定子相电流和折合到定子侧的转子相电流;

下标 s——stator (定子);

下标 r——rotor (转子)。

忽略励磁电流, 则得到如图 1.8 (b) 所示的简化等效电路。

因此, 电流公式可表示为



$$I_s \approx I_r' = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2}} \quad (1-3)$$

已知感应电动机传递的电磁功率为

$$P_m = \frac{3I_r'^2 R_r'}{s} \quad (1-4)$$

同步机械角速度 $\omega_{m1} = \omega_1 / n_p$, 则感应电动机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{m1}} = \frac{3I_r'^2 R_r'}{s} \cdot \frac{n_p}{\omega_1} = \frac{3U_s^2 n_p R_r'}{s \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2 \right] \omega_1} \quad (1-5)$$

感应电动机的每极气隙磁通为

$$\Phi_m = \frac{E_g}{4.44 f_1 N_s K_{Ns}} \approx \frac{U_s}{4.44 f_1 N_s K_{Ns}} \quad (1-6)$$

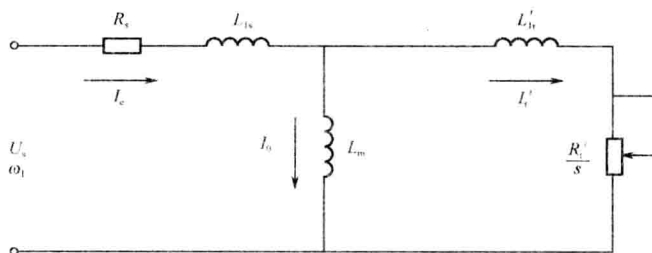
式中, E_g 为气隙磁通在定子每相中感应电动势的有效值; f_1 为定子频率; N_s 为定子每相绕组串联匝数; K_{Ns} 为定子基波绕组系数。忽略定子电阻和漏磁感抗压降, 则认为定子相电压 $U_s = E_g$ 。

对 T_e 公式对 s 求导, 并令 $dT_e/ds=0$, 可求出对应于最大转矩时的临界静差为

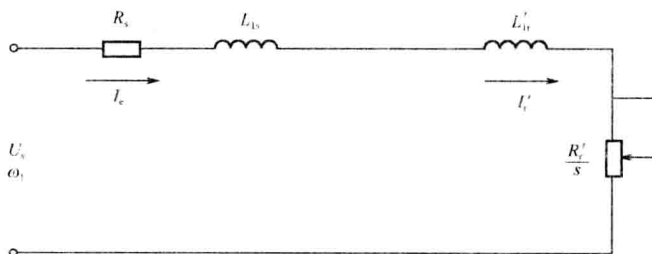
$$s_m = \frac{R_r'}{\sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2}} \quad (1-7)$$

最大转矩为

$$T_{\max} = \frac{3U_s^2 n_p}{2\omega_1 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L_{1r}')^2} \right]} \quad (1-8)$$



(a) 感应电机T型等效电路



(b) 感应电机简化等效电路

图 1.8 感应电动机等效电路

2. 转速开环的感应电动机变压变频调速 (VVVF)

变压变频调速是改变同步转速的调速方法, 同步转速 n_1 随频率而变化,

$$n_1 = \frac{60}{2\pi n_p} \quad (1-9)$$

式中, n_p 为电动机极对数, 下同。

为了达到良好的控制效果, 常采用电压-频率协调控制 (即 U/f 控制), 并分为基频 (额定频率) 以下和基频以上两种情况。

(1) 基频以下调速

为了充分利用电动机铁心, 发挥电动机产生转矩的能力, 在基频以下采用恒磁通控制方式, 要保持 Φ_m 不变, 当频率 f_1 从额定值 f_{1N} 向下调节时, 必须同时降低 E_g , 即采用电动势频率比为恒值的控制方式。然而, 绕组中的感应电动势是难以直接控制的, 当电动势值较高时, 可以忽略定子电阻和漏磁感抗压降, 而认为定子相电压 $U_s \approx E_g$, 则得

$$\frac{E_g}{f_1} = \text{常数} \quad (1-10)$$

这是恒压频比的控制方式, 其控制特性如图 1.9 所示。

低频时, U_s 和 E_g 都较小, 定子电阻和漏磁感抗压降所占的分量相对较大, 可以人为地抬高定子相电压 U_s , 以便补偿定子压降, 称为低频补偿或转矩提升。

(2) 基频以上调速

在基频以上调速时, 频率从 f_{1N} 向上升高, 但定子电压 U_s 却不可能超过额定电压 U_{sN} , 只能保持 $U_s = U_{sN}$ 不变, 这将使磁通与频率成反比地下降, 使得感应电动机工作在弱磁状态。

把基频以下和基频以上两种情况的控制特性画在一起, 如图 1.10 所示。如果电动机在不同转速时所带的负载都能使电流达到额定值, 即都能在允许温升下长期运行, 则转矩基本上随磁通变化而变化。按照电力拖动原理, 在基频以下, 磁通恒定, 转矩也恒定, 属于“恒转矩调速”性质, 而在基频以上, 转速升高时磁通减小, 转矩也随着降低, 基本上属于“恒功率调速”。

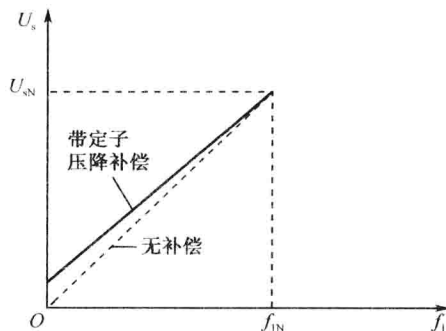


图 1.9 恒压频比控制特性

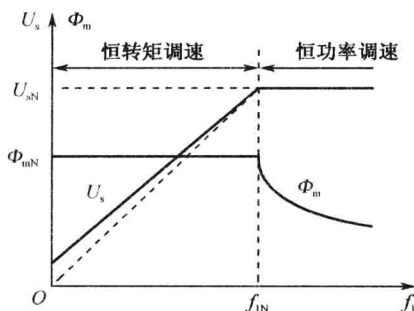


图 1.10 感应电动机变压变频调速的控制特性

3. 恒压频比时的机械特性

基频以下须采用恒压频比控制，感应电动机的电磁转矩为

$$T_e = 3n_p \left(\frac{U_s}{\omega_1} \right)^2 \frac{s\omega_1 R'_r}{(sR_s + R'_r)^2 + s^2 \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2} \quad (1-11)$$

当 s 很小时，可忽略上式分母中含 s 各项，则

$$T_e \approx 3n_p \left(\frac{U_s}{\omega_1} \right)^2 \frac{s\omega_1}{R'_r} \propto s \quad (1-12)$$

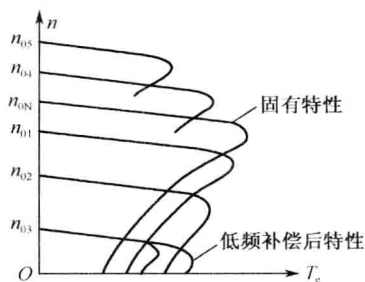
由此可以推导出带负载时的转速降落

$$\Delta n = sn_1 = \frac{60}{2\pi n_p} s\omega_1 \approx \frac{10}{\pi n_p^2} \frac{R'_r T_e}{\left(\frac{U_s}{\omega_1} \right)^2} \propto T_e \quad (1-13)$$

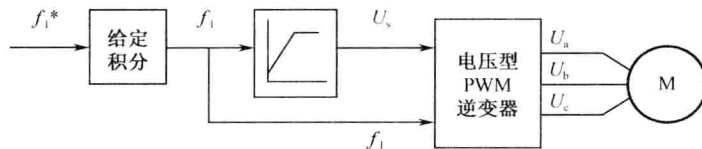
由此可见，当 U_s/ω_1 为恒值时，对于同一转矩 T_e ， Δn 基本不变。这就是说，在恒压频比的条件下改变频率 ω_1 时，机械特性基本上是平行下移，如图 1.11 (a) 所示。将最大转矩改写为

$$T_{\text{emax}} = \frac{3n_p}{2} \left(\frac{U_s}{\omega_1} \right)^2 \frac{1}{\left[\frac{R_s}{\omega_1} + \sqrt{\left(\frac{R_s}{\omega_1} \right)^2 + (L_{1s} + L'_{1r})^2} \right]} \quad (1-14)$$

可见最大转矩 T_{emax} 是随着 ω_1 的降低而减小的。频率很低时， T_{emax} 很小，电动机带负载能力减弱，采用低频定子压降补偿，适当地提高电压 U_s ，可以增强带负载能力。



(a) 感应电机变压变频调速机械特性



(b) 感应电机转速开环变压变频调速系统结构原理

图 1.11 感应电动机变压变频调速机械特性及结构原理

在基频 f_{1N} 以上变频调速时，电压 $U_s = U_{sN}$ 不变，机械特性方程式可写成

$$T_e = \frac{3U_{sN}^2 n_p R'_r}{s \left[\left(R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2 \right] \omega_1} \quad (1-15)$$

而最大转矩表达式可改写成

$$T_{\text{emax}} = \frac{3U_{sN}^2 n_p}{2\omega_1 \left[R_s \sqrt{R_s^2 + \omega_1^2 (L_{1s} + L'_{1r})^2} \right]} \quad (1-16)$$

当角频率 ω_1 提高时, 同步转速随之提高, 最大转矩减小, 机械特性上移, 而形状基本不变。由于频率提高而电压不变, 气隙磁通势必然减弱, 导致转矩的减小, 但转速却升高了, 可以认为输出功率基本不变。

图 1.11 (b) 所示为感应电动机转速开环变压变频调速系统结构原理, 一般称为通用变频器, 被广泛应用于调速性能要求不高的场合。为了避免突加给定造成的过流, 在频率给定后设置了给定积分环节。由于转速开环, 现场调试工作量小, 使用方便, 但转速有静差, 低速性能欠佳。

总之, U/f 控制是为了得到理想的转矩-速度特性, 基于在改变电源频率进行调速的同时, 又要保证电动机的磁通不变的思想而提出的, 通用型变频器基本上都采用这种控制方式。 U/f 控制变频器结构非常简单, 但是这种变频器采用开环控制方式, 不能达到较高的控制性能, 而且在低频时, 必须进行转矩补偿, 以改变低频转矩特性。

1.2.2 矢量控制方式

变频器的矢量控制是 20 世纪 70 年代开始迅速发展起来的一种新型控制思想, 是以电动机控制参数的实时解耦, 实现电动机的转矩与磁通控制, 以达到与直流电动机一样的调速性能。异步电动机矢量控制调速系统经过近几十年的发展, 其控制方法已趋成熟。

1. 基本原理

异步电动机的矢量控制是仿照直流电动机的控制方式, 把定子电流的磁场分量和转矩分了解耦开来, 分别加以控制, 即将异步电动机的物理模型等效地变成类似于直流电动机的模式。

众所周知, 交流电动机三相对称的静止绕组 A、B、C, 通以三相平衡的正弦电流时, 所产生的合成磁动势是旋转磁动势 F , 它在空间呈正弦分布, 以同步转速 ω (即电流的角频率) 顺着 A-B-C 的相序旋转。这样的物理模型绘于图 1.12 (a) 中。

然而, 旋转磁动势并不一定非要三相不可, 除单相以外, 二相、三相、四相等任意对称的多相绕组, 通以平衡的多相电流, 都能产生旋转磁动势, 当然以两相最为简单。图 1.12 (b) 中绘出了两相静止绕组 α 和 β , 它们在空间互差 90° , 通以时间上互差 90° 的两相平衡交流电流, 也产生旋转磁动势 F 。当图 1.12 (a) 和图 1.12 (b) 的两个旋转磁动势大小和转速都相等时, 即认为图 1.12 (b) 所示的两相绕组与图 1.12 (a) 所示的三相绕组等效。再看图 1.12 (c) 中的两个匝数相等且互相垂直的绕组 M 和 T, 其中分别通以直流电流 i_M 和 i_T , 产生合成磁动势 F , 其位置相对于绕组来说是固定的。