



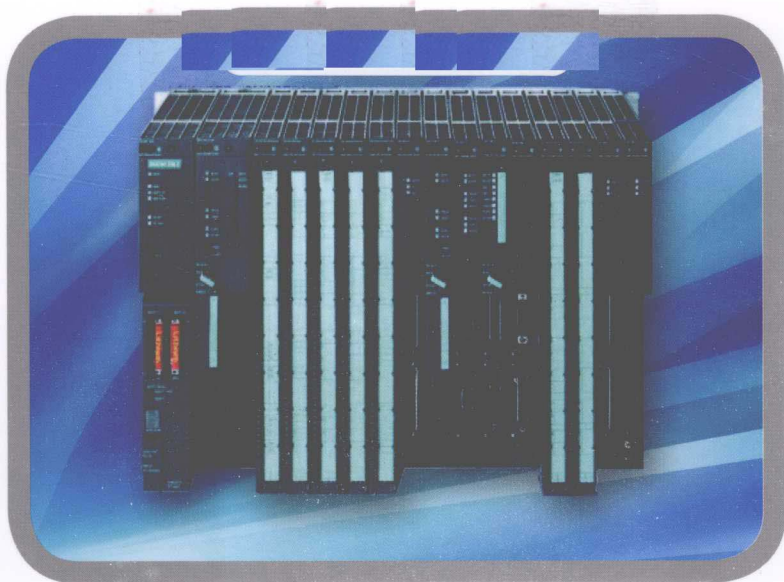
从校园到职场

CONG XIAOYUAN DAO ZHICHANG

变频器应用

—— 专业技能入门与精通

王兆义 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



从校园到职场

变频器应用 ——专业技能入门与精通

王兆义 等编著



机械工业出版社

本书是变频器应用技术入门类书籍,其主要内容包括异步电动机与变频调速、变频器 PWM 控制原理及电路简介、变频器控制方式及基本功能、富士 FRENIC5000G11S/P11S 变频器、变频器在水泵风机中的应用、变频器在机械传动中的应用、变频器选择与安装、变频器的调试与维护等。

本书可供工矿企业从事变频器应用设计、运行管理、安装调试、保养维修的工程技术人员阅读,也可供有关专业大中专学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频器应用:专业技能入门与精通/王兆义等编著. —北京:机械工业出版社, 2010.5

(从校园到职场)

ISBN 978-7-111-30487-6

I. ①变… II. ①王… III. ①变频器-基本知识 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 074374 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:朱林 责任编辑:朱林

版式设计:张世琴 责任校对:陈延翔

责任印制:李妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13.75 印张·339 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-30487-6

定价:33.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

门户网: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

前言

就在几年前,一些专家学者还在研究探讨变频器在我国的普及推广问题。短短几年,变频器在我国的各行各业有了广泛的应用,应用变频器的好处已被企业家、工程技术人员所认识,变频器的应用也给企业带来了丰厚的回报。近几年变频器的快速普及,给一线的工程技术人员也带来了新的问题,因为变频器是一个新型高科技电子产品,大家原来没有接触过,要想正确地使用它,必须具备相应的专业知识。

作者从事变频器的应用推广工作已有十几年时间,亲历了变频器在我国的应用普及情况,并较早地在高职机电应用专业开设了变频器应用课程。记得2005年一个毕业学生高兴地给我打来电话,告诉我他在一个电气安装公司工作,因为他学习过变频器的应用技术,在工友当中先行一步,领导安排他专门从事变频器的调试工作,他为得到这样一份稳定的工作而高兴。当时笔者预测到,随着变频器的应用普及,职业教育必须开设变频器应用课程,在2005年编写了《变频器应用与实训指导》,作为教育部推荐的“技能型紧缺人才培养培训系列教材”,由高等教育出版社出版。该书在岗前普及变频器的应用知识方面起到了很好的作用。

近年来,作者不断地深入企业,指导变频器的应用和为企业工程技术人员讲课。在和企业工程技术人员接触中,发现有些企业的变频器不能正常工作。如并联风机出现断轴;刚进行完变频器改造的企业,因为电磁干扰造成频繁跳闸;变频器拖动的电动机严重发热;在变频调速中设备噪声增大等。上述问题并非是什么难以解决的问题,无非是安装不规范和使用中参数设置欠佳,平时维护不到位等。有些问题现场工程人员拿不出较佳的处理方案,实际上还是因为变频器是一个新设备,人们对它的了解和掌握不够全面。作者根据了解到的这些情况,决定编写一本变频器从入门到精通的应用普及知识读本。通过努力,这本书终于完稿,它以变频器的应用为主线,读者群为一线的现场工程技术人员,作者希望通过本书,能给大家的工作提供一些帮助。

本书由王兆义编写了第2、4、6、8章,刘杰编写了第1章,阚玉怀编写了第3章,郝志平编写了第5章,史映红编写了第7章。

本书在编写过程中,得到了机械工业出版社的大力支持,变频器培训班的一些同学提供了大量的应用素材,同时参考了一些变频器应用科技书籍和变频器应用论文,在此谨向所有参考资料的原作者致以诚挚的谢意,对为本书出版帮助过作者的朋友表示衷心的感谢。

由于作者学识水平有限,书中难免有不足和谬误之处,殷切期望读者给予批评指正,作者万分感谢。

作者

2010年3月

目 录

前言

第1章 异步电动机与变频调速 1

- 1.1 变频调速概述 1
 - 1.1.1 变频器概述 1
 - 1.1.2 变频器与电动机的关系 1
 - 1.2 三相异步电动机 2
 - 1.2.1 三相异步电动机的工作原理 2
 - 1.2.2 三相异步电动机的电磁特性 5
 - 1.2.3 三相异步电动机变频调速 6
 - 1.2.4 三相异步电动机的机械特性 7
 - 1.2.5 三相异步电动机的功率和机械转矩 9
 - 1.3 变频器配用的电动机 10
 - 1.3.1 普通三相笼型异步电动机 10
 - 1.3.2 三相绕线转子异步电动机 15
 - 1.3.3 变频器专用电动机 17
 - 1.4 三相异步电动机的起动和制动 18
 - 1.4.1 三相异步电动机的起动 18
 - 1.4.2 电动机的制动 19
- ## 第2章 变频器 PWM 控制原理及电路简介 21
- 2.1 变频器的分类及交-直-交变频器 21
 - 2.1.1 变频器的分类 21
 - 2.1.2 交-交变频器与交-直-交变频器 21
 - 2.1.3 交-直-交变频器的组成 21
 - 2.2 PWM 原理 23
 - 2.2.1 PAM 和 PWM 23
 - 2.2.2 开关电路的输出波形 23
 - 2.2.3 PWM 技术的基本原理 24
 - 2.2.4 变频器的三相桥式 SPWM 逆变电路 26
 - 2.2.5 低压 PWM 控制变频器主电路 27
 - 2.3 中(高)压 PWM 变频器 29
 - 2.3.1 中(高)压变频器概述 29
 - 2.3.2 功率单元串联高压变频器 30
 - 2.3.3 三电平 IGBT 高压变频器 31

- 2.3.4 直接 IGBT 串联高压变频器 33
- 2.3.5 交-交变频器 34

第3章 变频器控制方式及基本功能 37

- 3.1 基本 U/f 控制变频器 37
 - 3.1.1 基本 U/f 控制变频器的转矩特性 37
 - 3.1.2 基本 U/f 控制变频器的应用范围 38
- 3.2 转差频率控制变频器(闭环控制) 39
 - 3.2.1 控制原理 39
 - 3.2.2 转差频率控制应用 40
- 3.3 矢量控制变频器 41
 - 3.3.1 矢量控制原理 41
 - 3.3.2 矢量控制功能的使用 43
- 3.4 直接转矩控制变频器 44
 - 3.4.1 直接转矩控制的基本概念 44
 - 3.4.2 直接转矩控制方法 44
 - 3.4.3 直接转矩控制功能的应用 45
- 3.5 变频器的外接功能端子 45
 - 3.5.1 主电路端子 46
 - 3.5.2 运行控制端子 47
 - 3.5.3 输入控制端子 47
 - 3.5.4 输出信号指示控制端子 49
- 3.6 操作面板 50
 - 3.6.1 键盘 51
 - 3.6.2 显示屏 52
- 3.7 频率控制功能 52
 - 3.7.1 极限频率 52
 - 3.7.2 加速时间和减速时间 53
 - 3.7.3 加速曲线和减速曲线 54
 - 3.7.4 回避频率 55
 - 3.7.5 段速频率设置功能 55
 - 3.7.6 频率增益与频率偏置功能 56
 - 3.7.7 载波频率设置 56
- 3.8 U/f 控制线、转矩补偿线及转差补偿控制的设置 57
 - 3.8.1 U/f 控制线的设置 57

3.8.2 转矩补偿线的设置	57	5.3 变频器在风机中的应用	110
3.8.3 转差补偿控制的设置	58	5.3.1 风机的类型及工作原理	110
3.9 电压自动控制功能和节能运行控制 功能	58	5.3.2 变频器在锅炉引风机中的应用 ...	111
3.9.1 电压自动控制功能	58	第6章 变频器在机械传动中的应用 ...	116
3.9.2 节能运行控制功能	58	6.1 变频器的低压控制电路	116
3.10 过载保护、瞬时停电再起动及制动 功能	58	6.1.1 电动机的正、反转运行控制 电路	116
3.10.1 过载保护功能	58	6.1.2 变频器手工工频 - 变频切换 电路	118
3.10.2 瞬时停电再起动功能	59	6.1.3 其他控制电路	122
3.10.3 制动功能	60	6.2 变频器在回转窑中的应用	124
3.11 变频器的功能预置及功能码的选择 ...	60	6.2.1 回转窑负载分析	124
3.11.1 变频器的编码方式及功能码的 预置	61	6.2.2 应用实例	125
3.11.2 变频器功能码的选择	63	6.3 变频器在起重机中的应用	126
第4章 富士 FRENIC C5000G11S/P11S 变频器	65	6.3.1 起重机运行系统及特点	126
4.1 变频器铭牌与基本功能	65	6.3.2 起重机用变频器的制动及功率 要求	128
4.1.1 变频器铭牌与型号命名方法	66	6.3.3 台达变频器在提升机构中的 应用	130
4.1.2 基本功能	66	6.3.4 英威腾 CHV190 变频器在门式起重 机中的应用	134
4.2 变频器外接端子	68	6.4 变频器在注塑机中的应用	136
4.3 功能参数码	74	6.4.1 概述	137
4.3.1 基本功能参数码 $F \times \times$	75	6.4.2 注塑机变频控制原理	138
4.3.2 扩展端子(多功能端子)功能参数 码 $E \times \times$	80	6.4.3 注塑机油泵特性分析	139
4.3.3 频率控制功能参数码 $C \times \times$	81	6.4.4 注塑机变频器控制应用特点及 效果	140
4.3.4 电动机1功能参数码 $P \times \times$	85	6.5 变频器在电梯中的应用	141
4.3.5 高级功能参数码 $H \times \times$	85	6.5.1 概述	141
4.3.6 电动机2功能参数码 $A \times \times$	88	6.5.2 616G5 通用变频器调速系统 ...	141
4.4 操作面板及功能应用	89	6.5.3 变频器的选择	142
4.4.1 操作面板外观	89	6.5.4 变频器功能的选择	143
4.4.2 操作与运行	90	6.5.5 变频器用于电梯系统中的预防 措施	145
4.4.3 保护动作	94	6.5.6 常见问题分析	145
第5章 变频器在水泵风机中的应用	96	6.6 变频器在提升机中的应用	146
5.1 变频器 PID 控制	96	6.6.1 运行控制分析	146
5.1.1 变频器 PID 控制过程	96	6.6.2 改造方案	147
5.1.2 PID 控制原理	97	6.7 变频器在张力控制设备中的应用 ...	149
5.1.3 变频器 PID 控制参数的选择	98	6.7.1 检测传感装置	149
5.2 变频器恒压供水系统	101	6.7.2 变频器在拉丝机中的应用	151
5.2.1 变频器单机供水系统	101	6.7.3 三肯 SAMCO - vm05 变频器在成缆机 中的应用	156
5.2.2 变频器工频 - 变频切换控制 ...	104		
5.2.3 一拖多变频器恒压供水系统 ...	107		

6.8 变频器的同速(比例)控制	157
6.8.1 同速控制方法	157
6.8.2 开环同速应用实例	159
第7章 变频器选择与安装	164
7.1 典型控制电路	164
7.1.1 主令开关	164
7.1.2 断路器	167
7.2 变频器选配器件	169
7.2.1 变频器外围主控制电路	169
7.2.2 交流电抗器	171
7.3 变频器输入输出端子的控制方法	175
7.3.1 输入模拟控制端子信号输入方法	175
7.3.2 输入触点控制端子的通断控制	176
7.3.3 输出控制端子的控制方法	177
7.4 变频器容量的选择	177
7.4.1 根据负载的转矩特性选择变频器容量	177
7.4.2 降速机构传动特点	179
7.4.3 根据不同负载特性选择变频器容量	181
7.4.4 根据具体运行场合选择变频器的容量	181
7.5 变频器的功能选择	182

7.5.1 速度型负载变频器的选择	183
7.5.2 张力和位置控制变频器的选择	185
7.5.3 风机、泵类负载变频器的选择	186
7.6 变频器的安装	189
7.6.1 导线的选择	189
7.6.2 导线的排布	189
7.6.3 变频器的安装环境	192
第8章 变频器的调试与维护	195
8.1 变频器通电调试条件	195
8.1.1 检查安装质量	195
8.1.2 系统调试条件	196
8.1.3 变频器故障显示及故障排除	198
8.2 变频器测试	201
8.2.1 测量表具的选择	201
8.2.2 变频器绝缘测试	202
8.2.3 变频器在路电压的测量	203
8.2.4 变频器在路电阻的测量	205
8.3 变频器调试举例	207
8.4 变频器维护保养	210
8.4.1 变频器的日常巡视	210
8.4.2 变频器的定期维护与保养	211
参考文献	213

变频器应用案例——变频器应用案例

变频器应用案例——变频器应用案例

第1章 异步电动机与变频调速

1.1 变频调速概述

1.1.1 变频器概述

关于什么是变频器，人们从不同的角度对变频器进行了描述，如果从应用的角度进行定义，可表述为：把工频交流电（或直流电）变换为电压和频率可变的交流电的电气设备称为变频器。变频器的主要用途是用于交流电动机的调速控制。

变频器在应用中，通过对电动机的调速控制，达到节能、提高工作效率、实现自动控制等目的，在钢铁、石油、石化、化纤、纺织、机械、电力、电子、建材、煤炭、医药、造纸、注塑、卷烟、起重设备、城市供水、中央空调及污水处理等行业都得到了普遍应用。图 1-1 是某型号变频器外形，图 1-2 和图 1-3 是变频器在薄膜压合机中的应用。

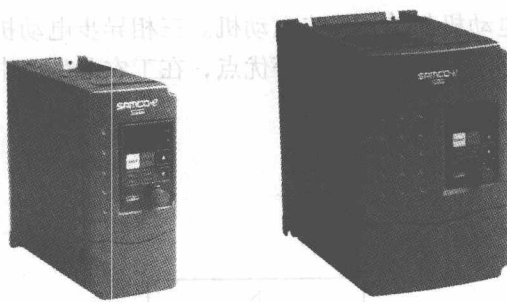


图 1-1 变频器外形

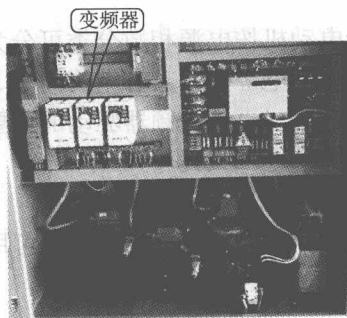


图 1-2 在薄膜压合机中工作的变频器

1.1.2 变频器与电动机的关系

图 1-4 是变频器连接示意图。由图可知，三相交流电（50Hz）通过控制开关，由变频器变频变压，对电动机进行调速控制。即变频器是连接电源和电动机的控制电器。由此可

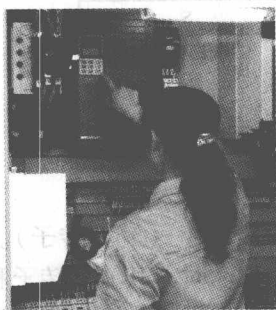


图 1-3 技术人员在进行变频器调试

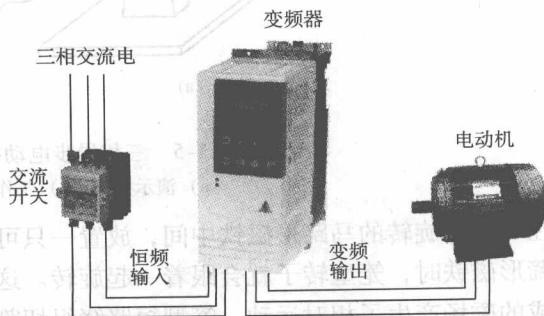


图 1-4 变频器连接示意图

见,变频器从输入端看,输入的是三相工频交流电,从输出端看,输出的是频率和电压可调的交流电。

变频器既然是电动机和电源之间的一个中间控制环节,这里就有一个变频器和电动机的匹配问题,即变频器的输出特性和功能参数必须与交流电动机的工作特性相吻合,这样变频器和电动机才能协调工作;电动机在调速时有哪些要求,在启动、制动时有哪些特点;工程上对电动机的运行有哪些要求,变频器根据这些要求应具备哪些功能等,这些都是变频器需要满足的条件,也是变频器所应具备的基本功能。如电动机工作时频率改变,则电压也必须随之改变,不然会造成电动机无法拖动负载或过载,这就是变频器的恒压频控制($U/f = \text{常数}$)模式;当电动机直接在电网上工作时直接启动,启动电流是工作电流的4~7倍,那么在通过变频器启动时,就必须考虑过电流现象,要有一个启动加速时间;在变频器用于过程控制中,变频器和电动机组成闭环系统,变频器要具备闭环控制的相关功能;在位置控制和需要快速响应的控制场合,要求交流电动机具有直流电动机的控制性能,以此满足工程需要,这就是变频器采用的电流矢量控制、直接转矩控制等。因此,我们要想掌握变频器,首先要了解三相异步电动机的工作原理,由此理解变频器众多功能的意义以及正确应用。

1.2 三相异步电动机

异步电动机按电源相数分类可分为三相异步电动机与单相异步电动机。三相异步电动机使用三相交流电源,它具有结构简单、使用和维修方便、坚固耐用等优点,在工农业生产中应用极为广泛,也是变频器驱动的主要对象。

1.2.1 三相异步电动机的工作原理

1. 旋转磁场

三相异步电动机的工作原理,可用图1-5来说明。

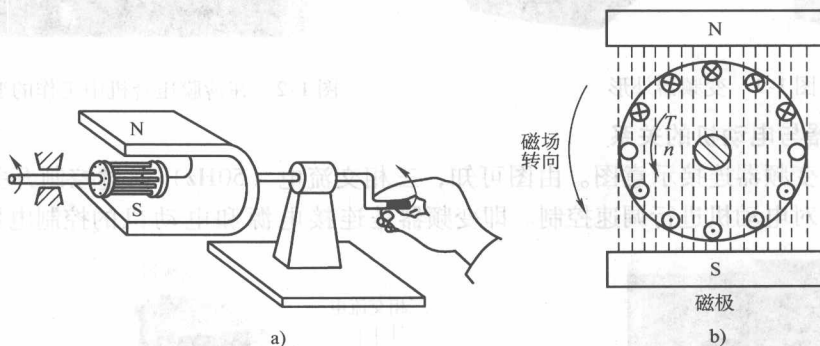


图 1-5 三相异步电动机的工作原理

a) 演示模型 b) 工作原理示意图

在一个可旋转的马蹄形磁铁中间,放置一只可转动的笼型短路绕组(笼型转子)。当转动马蹄形磁铁时,笼型转子就会跟着一起旋转。这是因为当磁铁转动时,其笼型转子和由磁铁形成的磁场产生了相对运动,笼型短路绕组切割磁力线,在导体中因电磁感应而产生感应电动势,由于笼型转子本身是短路的,在感应电动势作用下,导体中就产生感应电流,方向

如图 1-5b 所示(叉为流进,点为流出)。该电流又和旋转磁场相互作用(处于磁场中的载流导体要受到力的作用),产生转矩 T ,驱动笼型转子随着磁场的转动方向旋转起来,这就是异步电动机的旋转原理。

由以上分析可知,旋转磁场的速度 n_1 要高于笼型转子的旋转速度 n 。这样笼型绕组才能切割磁力线产生感应电流,感应电流和磁场作用产生电磁转矩而发生转动。我们将笼型转子旋转的速度 n 低于永久磁铁旋转的速度 n_1 称为异步。

图 1-6 是三相异步电动机的结构图,图中所示的 3 个绕组在空间上相互间隔 120° 机械角度,3 个绕组的首端为 U_1 、 V_1 、 W_1 ,尾端为 U_2 、 V_2 、 W_2 ,3 个尾端连接在一起(Y 联结)。将对称的三相交流电 $i_U = I_m \sin \omega t$ 、 $i_V = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ 、 $i_W = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$ 从 3 个绕组的首端通入,在定子中便产生旋转磁场。图 1-7 是三相异步电动机旋转磁场示意图。

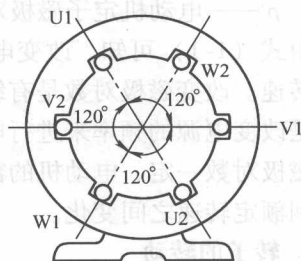


图 1-6 三相异步电动机结构图

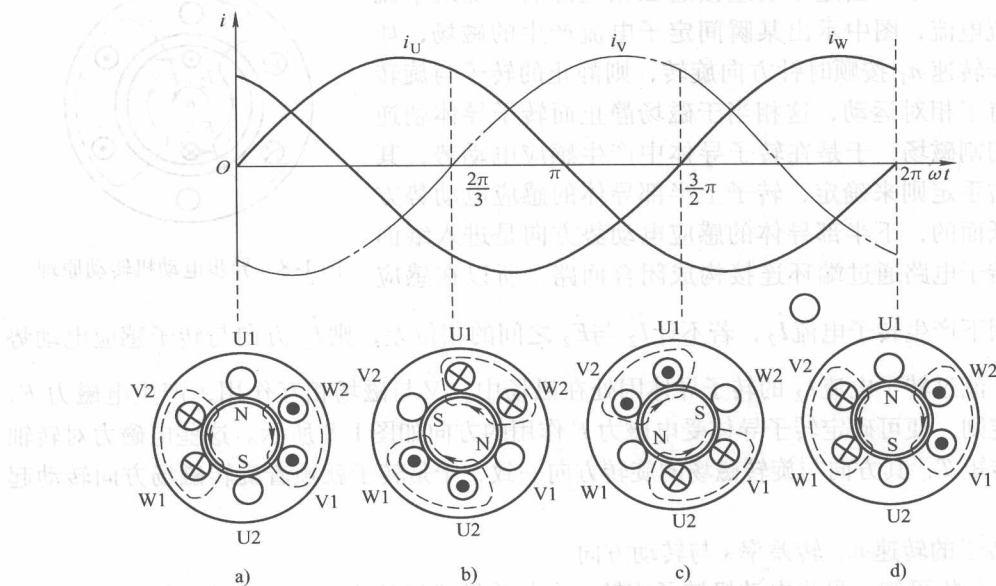


图 1-7 三相异步电动机旋转磁场示意图

由以上 4 个特殊角度可见,电流变化了一个周期,磁场在空间也旋转了一周。电流连续变化,磁场也连续地旋转。即三相对称的交变电流通过对称分布的 3 组绕组时产生的合成磁场,是在空间旋转的磁场,而且是一种磁场幅值不变的圆形旋转磁场。

2. 旋转磁场的转速

在以上的分析中,旋转磁场只有一对磁极(一个 N 极和一个 S 极),即 $p=1$,当电流变化一个周期,旋转磁场正好在空间转过一周。对 50Hz 工频交流电而言,旋转磁场每秒在空间旋转 50 周, $n_1 = 60f_1 = 60 \times 50 \text{ r/min} = 3000 \text{ r/min}$ 。若磁场有两对磁极, $p=2$,则电流变化一周,旋转磁场只转过 0.5 周,比磁极对数 $p=1$ 情况下的转速慢了一半,即 $n_1 = 60f_1/2 = 1500 \text{ r/min}$ 。同理,在 3 对磁极 $p=3$ 情况下,电流变化一周,旋转磁场仅旋转了 $1/3$ 周,即

$n_1 = 60f_1/3 = 1000\text{r/min}$ 。以此类推,当旋转磁场有 p 对磁极,旋转磁场的转速为

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

式中 n_1 ——旋转磁场转速 (r/min);

f_1 ——交流电源频率 (Hz);

p ——电动机定子磁极对数。

由式 (1-1) 可知,改变电动机的电源频率 f_1 或定子的磁极对数,都可以改变电动机的磁场转速。改变磁极对数是有级调速,是通过改变电动机的结构实现的,即多速电动机;变频器是改变电源的频率来进行电动机调速的,即变频无级调速。由式 (1-1) 可知,当电动机的磁极对数一定、电动机的额定转速一定、变频器在 0 到额定频率之间变化时,电动机也在 0 到额定转速之间变化。

3. 转子的转动

(1) 转子转动原理

如图 1-8 所示,当定子绕组接通三相电源后,绕组中流过三相交流电流,图中示出某瞬间定子电流产生的磁场,如果它以同步转速 n_1 按顺时针方向旋转,则静止的转子与旋转磁场间就有了相对运动,这相当于磁场静止而转子导体朝逆时针方向切割磁场,于是在转子导体中产生感应电动势,其方向可用右手定则来确定,转子上半部导体的感应电动势方向是穿出纸面的,下半部导体的感应电动势方向是进入纸面的。由于转子电路通过端环连接构成闭合回路,所以在感应

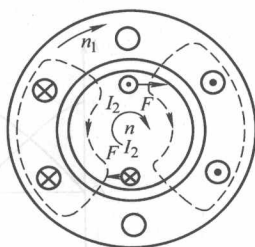


图 1-8 异步电动机转动原理

电动势作用下产生转子电流 I_2 , 若不计 I_2 与 E_2 之间的相位差, 则 I_2 方向与转子感应电动势方向一致。流过转子电流 I_2 的转子导体因处在磁场中, 又与磁场相互作用, 产生电磁力 F , 根据左手定则, 便可确定转子导体受电磁力 F 作用的方向如图 1-8 所示。这些电磁力对转轴形成电磁转矩 T , 其方向与旋转磁场的旋转方向一致, 于是转子就顺着旋转磁场方向转动起来。

(2) 转子的转速 n 、转差率 s 与转动方向

由以上分析可知,异步电动机转子旋转方向与旋转磁场的旋转方向一致,但转速 n 不可能达到与旋转磁场的转速 n_1 相等。因为产生电磁转矩需要转子中存在感应电动势和感应电流,如果转子转速与旋转磁场转速相等,两者之间就没有相对运动,转子导体将不切割磁力线,则转子感应电动势、转子电流及电磁转矩都不存在。所以,转子转速 n 与旋转磁场转速 n_1 之间必须有差别,且 $n < n_1$ 。这就是“异步”电动机名称的由来。另外,又因为产生转子电流的感应电动势是由电磁感应产生的,所以异步电动机也称为“感应”电动机。

同步转速 n_1 与转子转速 n 之差称为转差率,用 Δn 表示

$$\Delta n = n_1 - n \quad (1-2)$$

我们在分析转子的转动过程时已知,因为存在转差率,才能产生电磁转矩,转子才能转动。是否转差率越大,产生的转矩就越大呢? Δn 越大,转子电动势的频率越高,转子感抗越大,转子的功率因数越低,转子绕组中的有效电流越小,产生的电磁力越小。亦即当 Δn

大到一定程度,电动机的转矩反而小。

当 Δn 工作在额定状态 (电动机工作在额定转速时的 Δn), Δn 的数值较小,转子感抗很小,转子的功率因数很高, Δn 和电磁转矩 T 近似成正比关系。这个结论对我们分析电动机的调速性能很有用。

当电动机已经定型,在额定转矩工作情况下, Δn 与 n_1 的大小无关,为一恒定值。为了表示 Δn 和 n_1 之间的关系,我们定义转差率。

转速差与同步转速的比值称为转差率,用 s 表示,即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

或 $n = (1-s)n_1$ (1-3)

转差率是分析异步电动机运行情况的一个重要参数。如起动瞬间 $n=0$ 、 $s=1$,转差率最大;空载时 n 接近 n_1 , s 很小,在 0.005 以下;若 $n=n_1$ 时,则 $s=0$,此时称为理想空载状态,这在实际运行中是不存在的。异步电动机工作时,转差率在 1~0 之间变化,当电动机制造完成后,其额定转差率就为一确定值。如 $n=1470\text{r/min}$, $s_N=0.02$ 。就电动机的总体而言,其额定转差率 $s_N=0.01\sim0.07$ 。

由上分析还可知,异步电动机的转动方向总是与旋转磁场的转向一致。因此,要改变三相异步电动机的旋转方向,只需把定子绕组与三相电源连接的三根导线对调其中任意两根,就会改变旋转磁场的转向,也就改变了电动机的旋转方向。

1.2.2 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 ,根据电动机理论, E_1 的表达式为

$$E_1 = 4.44K_1N_1f_1\Phi_m \quad (1-4)$$

式中 E_1 ——定子每相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 ——旋转磁场的主磁通,由定转子磁动势共同作用产生的。

异步电动机定子电流产生的磁通,除主磁通 Φ_m 之外,还有漏磁通 Φ_1 ,定子绕组还存在着电阻 R_1 ,当定子电流 I_1 流过 R_1 时要产生电压降。

图 1-9 所示是三相异步电动机一相的等效电路。图中, R_1 是定子绕组的导体电阻, L_1 是定子绕组的漏电感, L_m 是定子绕组和转子绕组形成的主电感, L_2 是转子绕组漏电感, R_2 是转子电阻。

由图 1-9,根据基尔霍夫定律,列出定子电压平衡方程式

$$\dot{U}_1 = j2\pi f_1 L_m \dot{I}_m + \dot{I}_1 (R_1 + j2\pi f_1 L_1) = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-5)$$

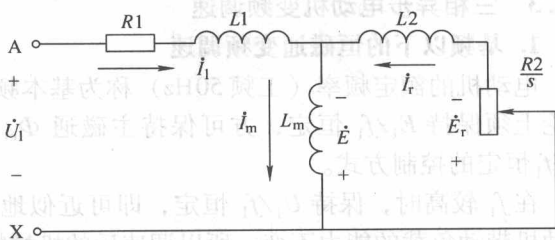


图 1-9 三相异步电动机一相的等效电路

式中 $\dot{E}_1$ ——主电感产生的感应电动势, 其相量 $\dot{E}_1 = j2\pi f_1 L_m \dot{I}_m$, 在数值上 $E_1 = 4.44K_1 N_1 f_1 \Phi_m$ (V);
 Z_1 ——漏感抗 (Ω);
 $\dot{I}_1$ ——定子电流 (A)。

当电动机运行在额定状态、定子电压和频率较高时, $\dot{E}_1 = (0.85 \sim 0.95) \dot{U}_1$, 当忽略 $\dot{I}_1 Z$ 时, 有

$$\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 \quad (1-6)$$

即电动机的定子外加电压 $\dot{U}_1$ 都由主磁通产生的自感电动势 $\dot{E}_1$ 来平衡。

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

$$U_1 \approx E_1 \propto f_1 \Phi_m \quad (1-7)$$

异步电动机是根据其工作在额定电压、额定频率 (如 380V, 50Hz) 以及额定磁通下进行的, 其磁通 Φ_m 选在了铁心磁化曲线的接近饱和处 (见图 1-10)。在图 1-10a 中, 磁化电流按正弦规律变化, 磁通最大值到了磁化曲线的拐点 A, 如果磁通 Φ 超出了 Φ_m 到达 Φ' , 此时铁心已进入了饱和区, 虽然磁通增加很少, 但磁化电流却增加很多, 如图 1-10b 所示, 这将引起铁心和绕组的严重发热。

由以上分析可知, 电动机在工作时, 主磁通大了会引起磁饱和, 使定子过电流; 主磁通小了又会使电磁力不足, 转矩下降。因此, 电动机在调速过程中, 必须保持 Φ_m 恒定。由式 (1-4) 可知, 要保持 Φ_m 恒定, 即

$$E_1/f_1 = C \text{ (常数)} \quad (1-8)$$

在变频调速中, 因为 $E_1/f_1 = \text{常数}$ 不好控制, 一般采取 U_1/f_1 恒定的控制方式, 此时变频器称为 U/f 控制变频器。该控制方式因为忽略了式 (1-5) 中的 $\dot{I} Z_1$ 项, 在低频时会引起转矩不足, 要进行转矩补偿。

1.2.3 三相异步电动机变频调速

1. 基频以下的恒磁通变频调速

电动机的额定频率 (工频 50Hz) 称为基本频率, 简称基频。在基频以下恒磁通调速时, 理论上须保持 E_1/f_1 恒定, 方可保持主磁通 Φ_m 恒定。由于 E_1 难以直接控制, 一般采取 U_1/f_1 恒定的控制方式。

在 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, 电磁转矩 T_M 恒定, 电动机带动负载的能力不变; 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, U_1 也较低, 式 (1-5) 中的 Z_1 已不可忽略, 特别是定子电阻 R_1 , 将使定子电流下降, 从而使 Φ_m 减小, 这将引起低速时的输出转矩减小。其特性曲线如图 1-11 中 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 所示。

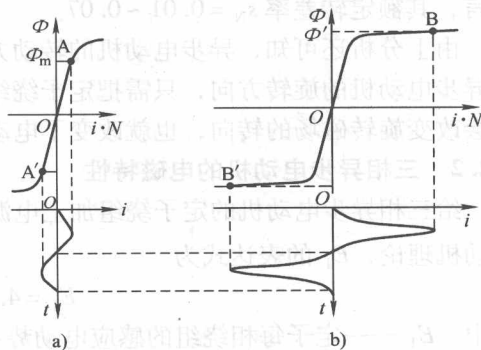


图 1-10 磁化曲线

a) 磁通取额定值 b) 磁通大引起饱和

为了补偿 R_1 上的电压损失, 在频率较低时, 适当提高电压 U_1 , 以补偿定子阻抗压降, 近似保持 E_1/f_1 恒定, 提高电动机的带负载能力。

另一方面, 电动机在低速或起动时, 也需要提高电动机的转矩, 因此变频器为了适应电动机的这一需要, 设计了转矩提升功能, 转矩提升功能实际上是在频率的低端修正了 U/f 曲线, 如图 1-12 中曲线“2”所示。

转矩提升功能是变频器的基本功能之一, 有多条提升曲线供选择。

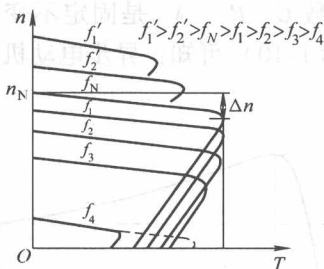


图 1-11 三相异步电动机变频调速的机械特性

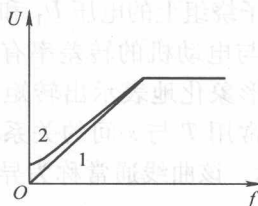


图 1-12 特性曲线

2. 基频以上的弱磁变频调速

当电动机工作在额定频率以上时, 由于变频器的输出电压最高为工频电压值, 所以频率由额定值向上升高时, 输出电压只能为工频电压值。由于变频器的输出频率上升, 电动机的感抗上升, 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 $T_m \propto U_1/f_1$, 保持 U_1 恒定时, T_m 随着 f_1 的升高而下降, 电动机的转矩 T_m 下降, 带动负载的能力降低; 虽然输出转矩 T 下降, 但因转速上升, 输出功率不变, 属于“恒功率”调速。

1.2.4 三相异步电动机的机械特性

1. 电磁转矩

在电动机拖动系统中, 人们最关心的是电动机输出的转矩大小、转速高低、转矩与转速之间的相互关系等问题。由于异步电动机的转矩是由载流导体在磁场中受电磁力的作用而产生的, 因此转矩的大小与旋转磁场的磁通 Φ_m 、转子导体中的电流 I_2 及转子功率因数有关, 即

$$T = C_T \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-9)$$

式中 T ——电磁转矩 ($N \cdot m$);

C_T ——电动机转矩常数;

I_2 ——电动机转子电流有效值 (A);

Φ_m ——定子主磁通 (Wb);

$\cos \varphi_2$ ——转子绕组功率因数。

式 (1-9) 在实际应用或分析时不太方便, 我们将 Φ_m 、 I_2 、 $\cos \varphi_2$ 的相关参数方程代入式 (1-9), 得近似方程式为

$$T \approx C \frac{s R_2 U_1^2}{f_1 [R_2^2 + (s X_{20})^2]} \quad (1-10)$$

式中 T ——电磁转矩, 在近似分析与计算中可将其看作电动机的输出转矩 ($N \cdot m$);

U_1 ——电动机定子每相绕组上的电压 (V);

s ——电动机的转差率;

R_2 ——电动机转子绕组每相的电阻 (Ω);

X_{20} ——电动机静止不动时转子绕组每相的感抗值 (Ω);

C ——电动机结构常数;

f_1 ——交流电源的频率 (Hz)。

对一台具体的电动机而言, 它的结构常数及转子参数 C 、 R_2 、 X_{20} 是固定不变的, 当加在电动机定子绕组上的电压 U_1 和 f_1 为确定值时, 由式 (1-10) 可知: 异步电动机轴上输出的转矩 T 仅与电动机的转差率有关。在实际应用中, 为了更形象化地表示出转矩与转差率之间的相互关系, 常用 T 与 s 间的关系曲线来描述, 如图 1-13 所示, 该曲线通常称为异步电动机的转矩特性曲线。

由异步电动机的转矩特性曲线可知, T 与 s 在 s_N 附近呈近似线性关系, 即电动机的转矩变化时, s 亦随之变化, 相应的电动机的转速 n 也随之变化。但 n 的变化量很小。

2. 机械特性

电动机的输出转速与输出转矩之间的关系, 称为电动机的机械特性。将图 1-13 顺时针转过 90° , 并把转差率 s 转换成转速 n , 变成图 1-14 所示的 n 与 T 之间的关系曲线, 称为异步电动机的机械特性曲线, 它的形状与转矩特性曲线是一样的。

由图 1-14 所示的机械特性曲线可见, 在额定转速附近, 当电动机的输出转矩在较大的范围内变化时, 转速的变化很小。说明交流异步电动机有很硬的机械特性。这一特点可适应于大量的对转速精度要求不高的传动系统中。这是三相异步电动机得到广泛应用的基础。在变频调速中, 当电动机的转速精度要求不高时, 可以采用开环控制。

在变频器精确控制中, 要求电动机的转速严格按照给定速度运行, 不允许超出给定速度范围。

虽然交流异步电动机有很硬的机械特性, 单靠自然机械硬度是不能满足精确控制要求的, 解决的方法一是变频器和电动机进行闭环控制, 二是变频器要具备矢量控制等功能。

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。

起动转矩 T_{st} 是电动机工作在工频状态下的起动转矩。当变频起动时, 因为是低频起动, 起动转矩为转矩补偿后的最大转矩 T_N 。当变频器供电的电动机直接起动时, 则起动

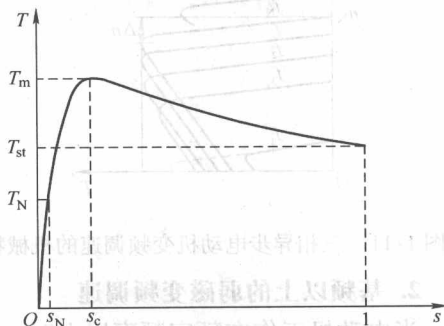


图 1-13 异步电动机的转矩特性曲线

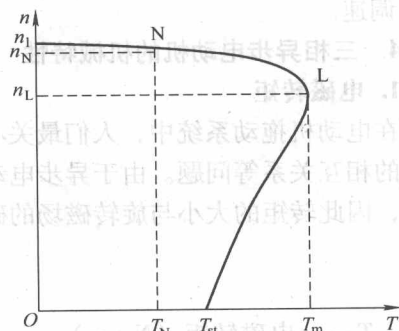


图 1-14 三相异步电动机的机械特性曲线

转矩为 T_{st} 。

(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, 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, $\lambda = T_m / T_N$, 一般 $\lambda = 1.8 \sim 2.2$ 。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。

电动机具有最大转矩, 是三相异步电动机的一大特点, 因为电动机在工作时, 负载是变化的, 当电动机因为某种原因出现了瞬间过载, 不至于因为转矩不足而堵转。

在变频器和电动机配套使用时, 因变频器的过载能力很差, 其容量是根据电动机的瞬时功率来选取的。如工作在某水泥回转窑的电动机, 回转窑需要的正常额定功率为 50kW, 其瞬间冲击功率可达正常功率的一倍, 因电动机具有 2 倍的过载能力, 其功率可按正常负载时选取, 即电动机可选 50kW, 则变频器的输出功率应选 100kW, 方可正常工作。这就是在很多场合变频器的容量大于电动机功率的原因。

1.2.5 三相异步电动机的功率和机械转矩

1. 功率和效率

任何机械在实现能量的转换过程中总有损耗存在, 异步电动机也不例外, 因此异步电动机轴上输出的机械功率 P_2 总是小于其从电网输入的电功率 P_1 。图 1-15 是三相异步电动机的功率流程。

由图可知, 三相异步电动机在运行中的功率损耗有:

1) 电流在定子绕组中的铜损耗 P_{Cu1} 及转子绕组中的铜损耗 P_{Cu2} 。

2) 交变磁通在电动机定子铁心中产生的磁滞损耗及涡流损耗, 通称为铁损耗 P_{Fe} 。

3) 机械损耗 P_t , 包括电动机在运行中的机械摩擦损耗、风的阻力及其他附加损耗。

输入的功率 P_1 中有一小部分供给定子铜损耗 P_{Cu1} 和定子铁损耗 P_{Fe} 后, 余下的大部分功率通过旋转磁场的电磁作用经过空气隙传递给转子, 这部分功率称为电磁功率 P , 电磁功率中再扣除转子铜损耗 P_{Cu2} 和机械损耗 P_t 后即输出功率 P_2 , 电动机的功率平衡方程式为

$$P_2 = P - P_{Cu2} - P_t = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} - P_{Cu2} - P_t = P_1 - \sum P_L \quad (1-11)$$

式中 $\sum P_L$ ——总功率损耗。

电动机的效率 η 等于输出功率 P_2 与输入功率 P_1 之比, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_1 - \sum P_L}{P_1} \times 100\% \quad (1-12)$$

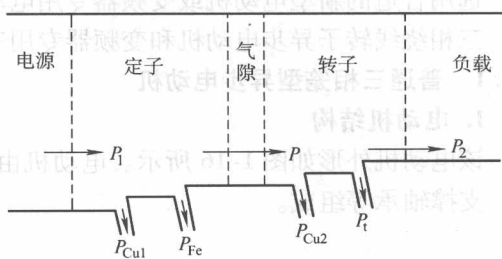


图 1-15 三相异步电动机的功率流程

2. 机械转矩表达式

由工程力学知识可知,旋转体的机械功率等于作用在旋转体上的转矩 T 与它的机械角速度 Ω 的乘积,即 $P = T\Omega$,将其代入式 (1-11),并消去 Ω 后可得

$$T_2 = T - T_{\text{Cu2}} - T_{\text{t}} = T - T_0 \quad (1-13)$$

式中 T ——电磁转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$);

T_0 ——空载转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$);

T_2 ——输出的机械转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)。

机械转矩为

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2 \times 60}{2\pi n} = \frac{1000 \times 60 P_2}{2\pi n} = 9550 \frac{P_2}{n} \quad (1-14)$$

当电动机在额定状态下运行时,式 (1-14) 中的 T_2 、 P_2 、 n 分别为额定输出转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)、额定输出功率 (kW)、额定转速 $n(\text{r/min})$ 。

由式 (1-14) 可知,电动机的输出转矩与电动机的转速有关。我们说电动机的输出功率为 $\times \text{kW}$,是指电动机工作在工频额定转速下的输出电功率。当电动机变频调速时,因电动机为恒转矩电器,转速下降,输出功率也下降。在一些场合,会使输出功率不足。如果转速下降不能满足传动机械的功率要求,则要增大电动机功率和变频器容量或者增加传动减速机构。

1.3 变频器配用的电动机

在工程上,变频器配用的电动机一是旧设备改造,利用原来的电动机;二是新设备投入,选用合适的新型电动机或变频器专用电动机。现在用得最多的是普通三相笼型异步电动机、三相绕线转子异步电动机和变频器专用三相异步电动机。

1.3.1 普通三相笼型异步电动机

1. 电动机结构

该电动机外形如图 1-16 所示。电动机由机壳、端盖、定子铁心和绕组、转子铁心和绕组、支撑轴承等组成。

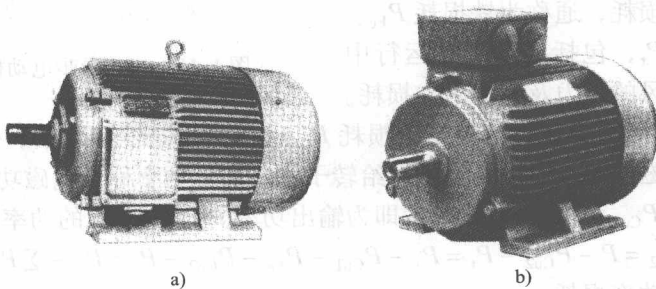


图 1-16 电动机外形

a) Y 系列 b) Y2 系列

(1) 定子绕组

定子绕组作为电动机的电路部分,通入三相交流电产生旋转磁场。它由嵌放在定子铁心