



从校园到职场

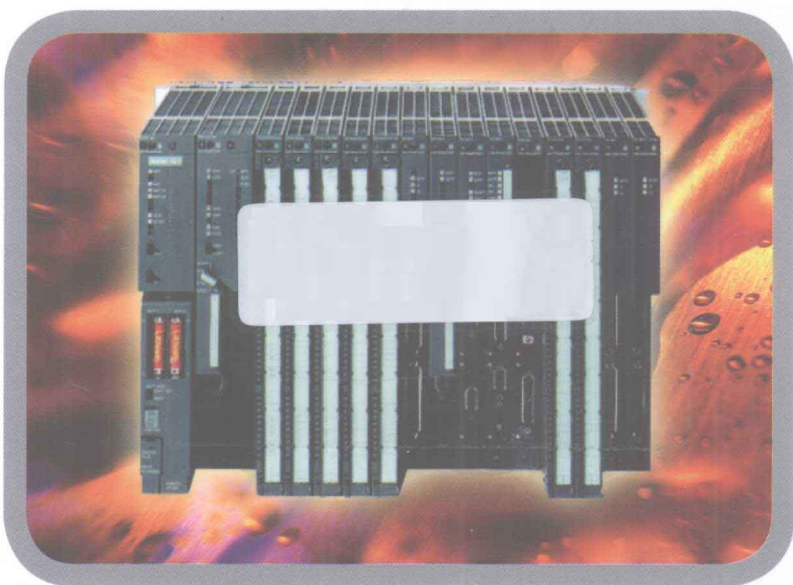
CONG XIAOYUAN DAO ZHICHANG

变频器应用

—— 专业技能入门与精通

第2版

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

第2版

王兆义 等编著



机械工业出版社

第2版前言

本书自第1版出版以来,因为其内容通俗易懂,结合生产实际,实用性强,受到了读者的欢迎。本次修订,为了更加适应现场工程技术人员的需要,做了较大篇幅的改动。

根据作者了解,很多现场工程技术人员是从事变频器的保养、维护以及维修工作。当变频器在工作中出现了问题,能够及时地加以处理解决,是非常有意义的。因为变频器在工作中是和负载、外围控制电路构成一个控制系统,一旦变频器出现了停机故障,有些问题是出在变频器,有些问题则是出在外围电路;有些故障变频器报警跳闸,而有些故障是不报警停机的。因为故障的多样性,给变频器故障的排除带来了难度。本书在保留了第1版特色的基础上,对变频器的维护维修内容做了较全面的充实。

本次修订,内容作了以下变动:

1. 变频器通信控制。变频器通信控制应用越来越普遍,也是变频器应用的发展方向,本书从物理层面和软件层面进行了介绍。

2. 增加了低压变频器的维护维修。根据变频器过电流、过载、过电压、欠电压、过热、电磁干扰等分类介绍,又根据报警停机和非报警停机给出维修方法,并介绍了硬件电路的测量检修方法。

3. 增加了高压变频器的维护维修内容。该章介绍了高压变频器的结构、参数定值、轻故障和重故障处理、通信故障处理等。

4. 删除了第4章内容,各章都作了重点修订。如第1章重点分析了电动机的电动状态和发电状态,这是分析变频器过电流和过电压故障的基础。又如第2章,在分析变频器主电路的同时,重点分析了因为整流电路和逆变电路工作原理的原因,造成工作电流不连续,这是分析电磁干扰故障的理论依据。在其他章节中,除了重点修订之外,还增加了一些工程案例,丰富了本书内容。

本书修订工作主要由王兆义完成,刘杰、阚玉怀、郝志平和史映红参与了部分修订工作。

本书在修订过程中,参考了利德华福、合康、英威腾、罗宾康等高压变频器的使用说明书和相关资料,参考了相关发表的应用论文,参考了一些变频器应用科技书籍,应用了一些企业科技人员提供的工程案例。在此,向原作者和对该书做出贡献的朋友表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,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

第 1 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普及推广问题。短短几年,变频器在我国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 年一个已毕业的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

第2版前言

第1版前言

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 电动机的发电效应 6

1.2.3 三相异步电动机的电磁特性 7

1.2.4 三相异步电动机变频调速 8

1.2.5 三相异步电动机的机械特性 9

1.2.6 三相异步电动机的功率和机械转矩 11

1.3 变频器配用的电动机 12

1.3.1 普通三相笼型异步电动机 12

1.3.2 三相绕线转子异步电动机 17

1.3.3 变频器专用电动机 19

1.3.4 电动机和变频器容量的选择 20

1.4 三相异步电动机的起动和制动 21

1.4.1 三相异步电动机的起动 21

1.4.2 电动机的制动 22

第2章 变频器 PWM 控制原理及电路简介 24

2.1 变频器的分类及交-直-交变频器 24

2.1.1 变频器的分类 24

2.1.2 交-交变频器与交-直-交变频器 24

2.1.3 交-直-交变频器的组成 24

2.2 PWM 原理 26

2.2.1 PAM 和 PWM 26

2.2.2 开关电路的输出波形 26

2.2.3 PWM 技术的基本原理 27

2.2.4 变频器的三相桥式 SPWM 逆变电路 29

2.2.5 低压 PWM 控制变频器主电路 30

2.3 中(高)压 PWM 变频器 33

2.3.1 中(高)压变频器概述 34

2.3.2 功率单元串联高压变频器 34

2.3.3 三电平 IGBT 高压变频器 37

2.3.4 直接 IGBT 串联高压变频器 39

2.3.5 交-交变频器 41

第3章 变频器控制方式及基本功能 43

3.1 基本 U/f 控制变频器 43

3.1.1 基本 U/f 控制变频器的转矩特性 43

3.1.2 基本 U/f 控制变频器的应用范围 44

3.2 转差频率控制变频器(闭环控制) 45

3.2.1 控制原理 45

3.2.2 转差频率控制应用 47

3.3 矢量控制变频器 48

3.3.1 矢量控制原理 48

3.3.2 矢量控制功能的使用 50

3.4 直接转矩控制变频器 51

3.4.1 直接转矩控制的基本概念 51

3.4.2 直接转矩控制方法 52

3.4.3 直接转矩控制功能的应用 53

3.5 变频器的外接功能端子 53

3.5.1 主电路端子 53

3.5.2 输入控制端子 55

3.5.3 输出信号指示端子 57

3.5.4 计算机通信接口 RS-485 及接地端 59

3.6 操作面板 60

3.6.1 键盘 60

3.6.2 显示屏 61

3.7 频率控制功能 61

3.7.1 极限频率 61

3.7.2 加速时间和减速时间 62

3.7.3 加速曲线和减速曲线 63

3.7.4 回避频率 64

3.7.5 段速频率设置功能 65

3.7.6 频率控制特性线的设置 66

3.7.7 载波频率设置	67	4.5.4 Modbus 通信协议	113
3.8 U/f 控制线、转矩补偿线及转差补偿		4.5.5 Modbus 协议控制方式	115
控制的设置	67	4.5.6 西门子变频器 USS 通信控制	116
3.8.1 U/f 控制线的设置	67	第5章 变频器在机械传动中的应用 ...	123
3.8.2 转矩补偿线的设置	67	5.1 变频器的低压控制电路	123
3.8.3 转差补偿控制的设置	68	5.1.1 电动机的正、反转运行控制	
3.9 电压自动控制功能和节能运行控制		电路	123
功能	68	5.1.2 变频器手动工频 - 变频切换	
3.9.1 电压自动控制功能	68	电路	125
3.9.2 节能运行控制功能	69	5.1.3 其他控制电路	129
3.10 过载保护、瞬时停电再启动及制动		5.2 变频器在翻车机上的应用	131
功能	69	5.2.1 翻车机运行要求	131
3.10.1 过载保护功能	69	5.2.2 变频器功能选择	132
3.10.2 瞬时停电再启动功能	70	5.2.3 参数设置	132
3.10.3 制动功能	70	5.3 变频器在回转窑中的应用	133
3.11 变频器的功能预置及功能码的选择 ...	71	5.3.1 回转窑负载分析	134
3.11.1 变频器的编码方式及功能码的		5.3.2 应用实例	134
预置	71	5.4 变频器在起重机中的应用	136
3.11.2 变频器功能码的选择	74	5.4.1 起重机运行系统 & 特点	136
第4章 变频器在水泵风机中的应用	76	5.4.2 起重机用变频器的制动及功率	
4.1 变频器在风机水泵中应用节能原理	76	要求	138
4.1.1 水泵工作原理	76	5.4.3 台达变频器在提升机构中的	
4.1.2 节能原理	77	应用	140
4.1.3 风机的控制特性	78	5.4.4 英威腾 CHV190 变频器在门式起重	
4.1.4 风机的功率流量分析	79	机中的应用	144
4.1.5 总结	80	5.5 变频器在注塑机中的应用	146
4.1.6 功率计算	80	5.5.1 概述	146
4.2 变频器 PID 控制	82	5.5.2 注塑机变频控制原理	147
4.2.1 变频器 PID 控制过程	82	5.5.3 注塑机油泵特性分析	149
4.2.2 PID 控制原理	82	5.5.4 注塑机变频器控制应用特点及	
4.2.3 变频器 PID 控制参数的选择	85	效果	149
4.3 变频器恒压供水系统	87	5.6 变频器在电梯中的应用	150
4.3.1 变频器单机供水系统	87	5.6.1 概述	150
4.3.2 变频器工频 - 变频切换控制	90	5.6.2 616G5 通用变频器调速系统	151
4.3.3 一拖多变频器恒压供水系统	93	5.6.3 变频器的选择	152
4.3.4 智能控制器恒压供水系统	96	5.6.4 变频器功能的选择	153
4.4 变频器在风机中的应用	103	5.6.5 变频器用于电梯系统中的预防	
4.4.1 风机的类型及工作原理	103	措施	155
4.4.2 变频器在锅炉引风机中的应用 ...	104	5.6.6 常见问题分析	155
4.5 变频器通信控制	107	5.7 变频器在提升机中的应用	156
4.5.1 并行通信和串行通信	107	5.7.1 运行控制分析	156
4.5.2 RS-232 总线	108	5.7.2 改造方案	157
4.5.3 RS-485 总线	110	5.8 变频器在张力控制设备中的应用	158

5.8.1 检测传感装置	159	第7章 低压变频器故障的排除	213
5.8.2 变频器在拉丝机中的应用	160	7.1 变频器功能框图	213
5.8.3 三星 SAMCO - vm05 变频器在成缆机 中的应用	165	7.1.1 保护电路	214
5.9 变频器的同速(比例)控制	167	7.1.2 控制端子	216
5.9.1 同速控制方法	167	7.1.3 DC 电源和驱动电路	217
5.9.2 开环同速应用实例	170	7.1.4 其他功能单元	218
第6章 变频器选择与安装调试	175	7.2 变频器主电路故障测量与维修	219
6.1 典型控制电路	175	7.2.1 整流滤波电路分析	219
6.1.1 主令开关	175	7.2.2 整流电路的测量维修	220
6.1.2 断路器与接触器	178	7.2.3 整流电路具体损坏器件的 测量维修	220
6.1.3 传感器	180	7.2.4 逆变电路的测量维修	222
6.2 变频器选配器件	183	7.3 变频器过电流故障的排除	224
6.2.1 变频器外围主控制电路	183	7.3.1 变频器过电流分类	224
6.2.2 交流电抗器	185	7.3.2 变频器启动过电流跳闸	224
6.3 变频器输入输出端子的控制方法	188	7.3.3 正常工作中负载引起过 电流跳闸	225
6.3.1 输入模拟控制端子信号输入 方法	188	7.3.4 故障案例分析	227
6.3.2 输入数字控制端子的通断控制	189	7.4 变频器过载故障的排除	228
6.3.3 输出指示端子的控制方法	190	7.4.1 过载故障分类	228
6.4 变频器容量的选择	191	7.4.2 机械负载过重故障的排除	228
6.4.1 根据负载的转矩特性选择变 频器容量	191	7.4.3 负载异常或变频器异常 引起过载跳闸	229
6.4.2 降速机构传动特点	192	7.4.4 过载案例分析	230
6.4.3 根据不同负载特性选择变频器 容量	194	7.5 变频器过电压故障的排除	231
6.4.4 根据具体运行场合选择变频器 的容量	195	7.5.1 过电压分类	231
6.5 变频器的功能选择	196	7.5.2 变频器过电压故障的 处理方法	232
6.5.1 速度型负载变频器的选择	196	7.5.3 变频器过电压案例分析	233
6.5.2 张力和位置控制变频器的选择	198	7.6 断相、欠电压故障的原因及处理	234
6.5.3 风机、泵类负载变频器的选择	200	7.6.1 欠电压分类	234
6.6 变频器的安装	201	7.6.2 欠电压分析及故障排除	235
6.6.1 导线的选择	202	7.6.3 变频器欠电压、断相案例分析	235
6.6.2 导线的排布	202	7.7 变频器过热故障分析与处理	236
6.6.3 变频器的安装环境	204	7.7.1 变频器过热原因	236
6.7 变频器通电调试	206	7.7.2 变频器过热案例分析	237
6.7.1 检查安装质量	206	7.8 电磁干扰故障的排除	237
6.7.2 系统调试条件	207	7.8.1 电磁干扰的三种途径	237
6.7.3 变频器测试	209	7.8.2 受干扰的原因	238
6.8 变频器维护保养	211	7.8.3 受到电磁干扰的现象与 排除方法	238
6.8.1 变频器的日常巡视	211	7.8.4 故障案例分析	238
6.8.2 变频器的定期维护与保养	211	7.9 变频器无故停机故障的排除	241

7.9.1 无故停机分析	241	8.4.2 变频器过电流故障（三相 输出过电流）	253
7.9.2 变频器输入控制端子故障案例 ...	241	8.4.3 变压器轻度过热和严重 过热故障的处理	253
第8章 高压变频器故障的排除	243	8.4.4 柜门联锁报警	254
8.1 变频器的硬件结构	243	8.4.5 变频器控制系统电源	254
8.1.1 电气开关柜	243	8.5 系统通信故障处理	254
8.1.2 变压器柜	243	8.5.1 信号流程图	254
8.1.3 功率柜	244	8.5.2 控制器（变频器的控制 系统）不就绪	256
8.1.4 控制柜	245	8.5.3 控制器无反应故障处理	256
8.2 变频器的轻重故障	246	8.5.4 PLC 通信无响应	257
8.2.1 轻故障和重故障的划分	246	8.5.5 有故障显示无报警和有 报警无显示	257
8.2.2 轻故障的量值和处理方法	247	8.5.6 工控机死机	257
8.2.3 重故障的量值和处理方法	247	8.5.7 变频器无法起动	257
8.3 功率单元的保护与故障排除	248	8.5.8 变频器不能调整运行频率	258
8.3.1 功率单元低压控制电源	248	8.5.9 报警故障处理的步骤	258
8.3.2 直流母线过电压	248	附录	259
8.3.3 直流母线欠电压	249	附录 A 富士变频器故障代码表	259
8.3.4 功率单元模块过热	249	附录 B 西门子 M440 变频器故障信息表 ...	260
8.3.5 功率单元断相故障	250	参考文献	266
8.3.6 光纤故障的检修	250		
8.3.7 驱动电路故障	251		
8.4 变频器故障的处理	252		
8.4.1 旁路运行报警	252		

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。

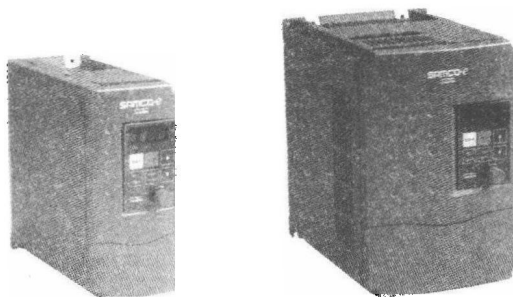


图 1-1 变频器外形

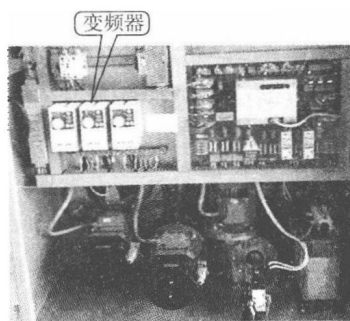


图 1-2 在薄膜压合机中工作的变频器

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

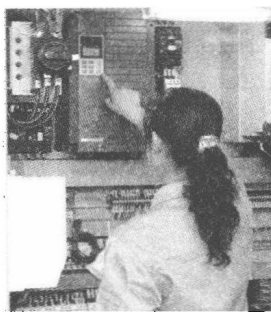


图 1-3 技术人员在进行变频器调试

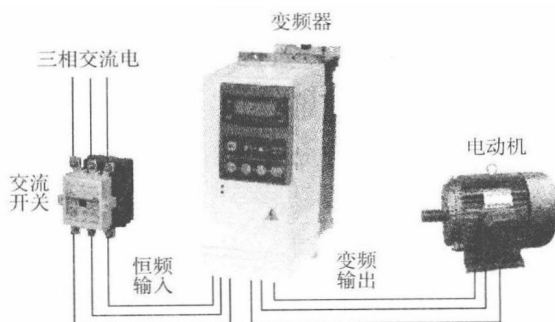


图 1-4 变频器连接示意图

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,在起动、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比控制($U/f = \text{常数}$)模式;当电动机直接在电网上工作时直接起动,起动电流是工作电流的4~7倍,那么在通过变频器起动时,就必须考虑过电流现象,要有一个起动加速时间;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。

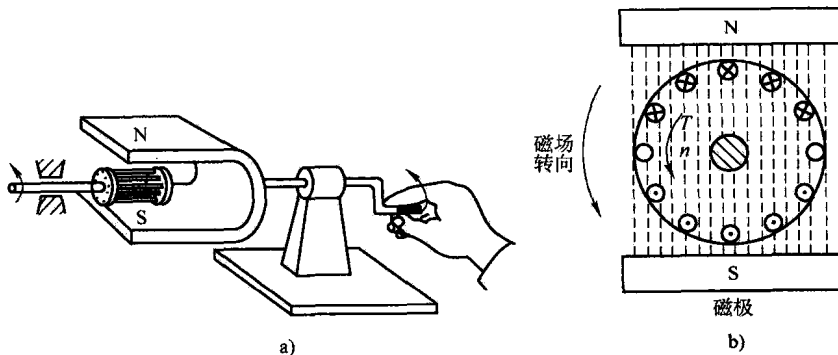


图 1-5 三相异步电动机的工作原理

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,在感应电动势的作用下,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。

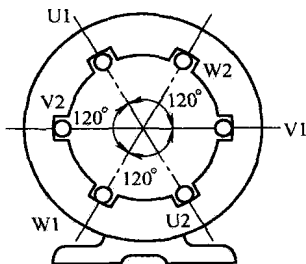


图 1-6 三相异步电动机结构图

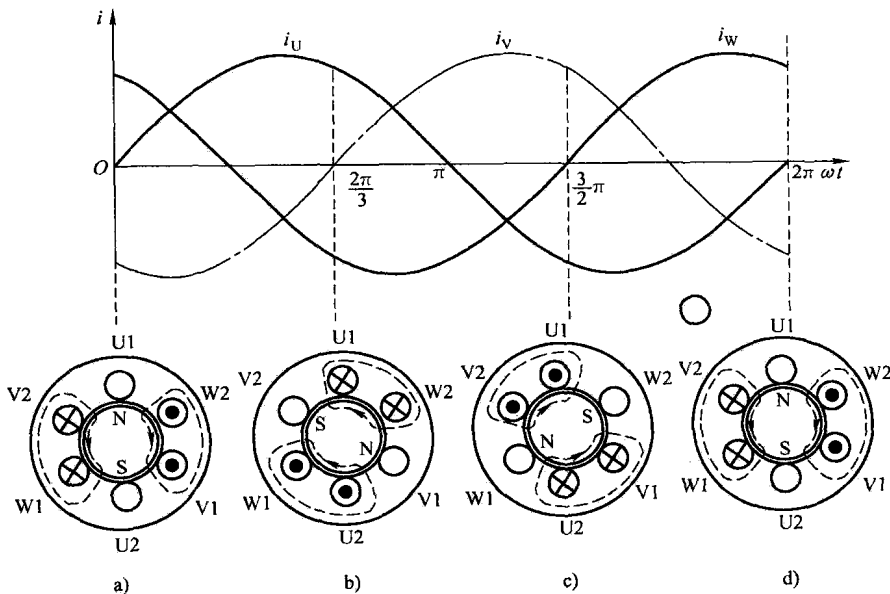


图 1-7 三相异步电动机旋转磁场示意图

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

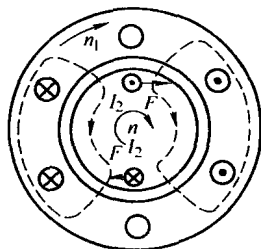


图 1-8 异步电动机转动原理

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 、转速差与转动方向

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 之差称为转速差,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,因为存在转速差,才能产生电磁转矩,转子才能转动。是否转速差越大,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。

即有

$$\Delta n \uparrow \downarrow \rightarrow I_2 \uparrow \downarrow \rightarrow T \uparrow \downarrow$$

其中, I_2 为转子电流, T 为转子转矩。

由于 I_2 是来自定子电流 I_1 , 故有 $\Delta n \propto I_2 \propto T \propto I_1$ 。电动机的输出转矩 T 实际上就是负载的转矩 T_L , 负载重, 电动机的输出转矩就大; 反之, 就小。所以负载转矩 T_L 、定子电流 I_1 以及转速差 Δn 有下列关系:

$$T_L (T) \uparrow \downarrow \rightarrow I_1 \uparrow \downarrow \rightarrow n \downarrow \uparrow \rightarrow \Delta n \uparrow \downarrow$$

该关系符合工程实际, 当电动机的负载加重时, 转速有所下降, Δn 上升, 定子电流上升。

将转速差 Δn 换算为电动机的转差频率 Δf 。根据式 (1-1) 和式 (1-2), 有

$$\Delta n = \frac{60f_1}{p} - \frac{60f}{p}$$

整理得

$$\frac{\Delta n p}{60} = f_1 - f = \Delta f \quad (1-3)$$

式中 f ——电动机转子转动频率;

Δf ——转差频率, 也是转子电流的频率。

4. Δn 的工程应用

(1) $\Delta n (\Delta f)$ 概念在变频器起动中的应用

因为电动机突然加上较高频率, 会使 Δn 很大, 造成过电流, 所以变频器是在 0 速起动。当电动机从 0 速起动时, n_1 上升到额定 Δn 时, 电动机具有额定转矩, 转子在额定转矩的作用下随着变频器的输出频率逐渐上升, 直到电动机达到正常转速。即起动过程为

$$n_1 \uparrow \rightarrow \Delta n \uparrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

如果频率上升到 Δn 时电动机转子还没有转动, 此时电动机达到了额定转矩, 同时达到额定电流, 如果因为负载重转子转不起来, n_1 继续上升, Δn 进一步增大, I_1 进一步增大, 当 I_1 达到过电流值, 变频器过电流跳闸。

当变频器降速时, 其降速过程为

$$n_1 \downarrow \rightarrow \Delta n \downarrow \rightarrow I_1 \downarrow \rightarrow T \downarrow \rightarrow n \downarrow$$

由以上分析可知, 在控制变频器升速或降速的过程中, 实际上是控制 Δn 的下降或增加来达到改变变频器输出转速的目的。

(2) Δn 用于抱闸频率的计算

具有机械抱闸的系统, Δn 是变频器松闸或抱闸的计算频率 (根据该计算频率, 适当增加)。如有一矿井运煤的绞车, 因松闸时间长引起起动过电流, 在两年时间损坏了两台变频器。变频器功率 110kW、额定电流 220A, 拖动 1 台 10 极、90kW、额定电流 180A 的电动机。起动时因为抱闸系统不能及时松闸, 变频器电流达 340A, 严重过电流。

抱闸频率换算如下:

该电动机为 10 极: $n_1 = 600 \text{ r/min}$, $n = 590 \text{ r/min}$

$$\Delta n = 600 \text{ r/min} - 590 \text{ r/min} = 10 \text{ r/min}$$

$$\Delta f = 10 \times 5/60 = 0.83 \text{ Hz}$$

当变频器输出频率 n_1 为 0.83Hz 时, 此时电动机具有额定转矩 T_N , 抱闸系统应该松闸。因为该绞车松闸时间严重滞后, 造成变频器严重过电流。解决的方法是缩短松闸时间, 即当变频器的输出频率达到 1Hz 时就应松闸。如果松闸时间不好处理, 可将限流功能的限流值设置得小一些, 如将 340A 改设为 220A, 220A 是变频器的额定电流, 因 $220\text{A} > 180\text{A}$ (电动机额定电流), 变频器可正常工作。

1.2.2 电动机的发电效应

上述分析了电动机的电动状态, 三相异步电动机在变频器中应用时, 还有另一种状态——发电状态。例如电梯轿厢下行时, 电动机变为发电机; 起重机械负载重物下行时电动机变为发电机; 变频器停机时电动机变为发电机等。

1. 电动机发电的条件

图 1-9 是电动机发电状态分析图。设电动机转子的旋转方向和旋转磁场的方向相同, 并且 $n > n_1$ 。因为转子的转速高于旋转磁场的转速, 存在转速差, 转子导线切割磁力线产生感应电流。根据右手定则, 判断转子感应电流方向如图 1-9 所示 (上面的电流流出, 下面的电流流进)。因转子感应电流也要产生一磁场, 并且以 Δn 的速度切割定子绕组, 在定子绕组中产生感应电流, 该电流因为流进变频器, 所以称为回馈电流。该电流由安装在变频器中的制动电阻所消耗, 使电动机得到制动转矩。

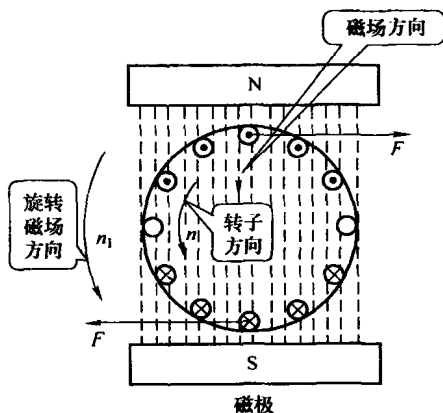


图 1-9 电动机发电原理图

转子电流处在定子磁场中, 同样会产生电磁力, 该电磁力用左手判断, 方向与转子的旋转方向相反。这个力就是转子产生的制动转矩。

由上述分析可见, 电动机变为发电机的条件是:

- 1) 变频器要有输出, 电动机存在旋转磁场。
- 2) 电动机的转子转速高于旋转磁场的转速。

上述条件实际上就是变频器在工作中, 出现了负载拉着电动机快转的现象。该现象有些应用场合是一种正常状态, 如下滑或下降负载, 为了保持匀速下降, 电动机要处于发电状态; 另一种情况是非正常状态, 如突然的反向冲击负载, 使电动机出现发电效应, 造成变频器过电压跳闸。

2. 工程应用

1) 起重、升降设备制动。当负载重物下降时, 拉着电动机转动, 电动机将重物的动能转化为电能回馈给变频器, 使电动机得到制动转矩。根据 $P = nT$ (T 为负载作用在电动机上的负向转矩, n 为电动机的转速即负载的下降速度), 当 T 为常数时, 回馈功率 P 与电动机的转速 n 成正比; 当 n 为常数时, 回馈功率 P 与电动机的转矩 T 成正比。在电梯应用时, 当下行速度一定, 轿厢负载重, 电动机的回馈电能就大。图 1-10a 是负载下行时的制动特性线。

2) 减速制动。负载需要停机时, 为了使电动机尽快停止, 变频器采用降速停机的方法。在变频器降速过程中, 电动机的转速高于变频器的输出频率, 电动机变为发电机, 将机械能变为电能, 这个电能由制动电阻所消耗, 使电动机得到制动转矩而较快地停止转动。图 1-10b 是减速制动特性线。

3) 变频器没装制动电阻。在机械传动、风机等负载应用时, 如果变频器没有加装制动电阻, 在工作中因出现回馈电能, 变频器就会过电压跳闸。所以在停机时, 一般不设频率下降时间, 如果设置频率下降时间, 要设置得较长, 使电动机在停止时不会出现回馈电能。

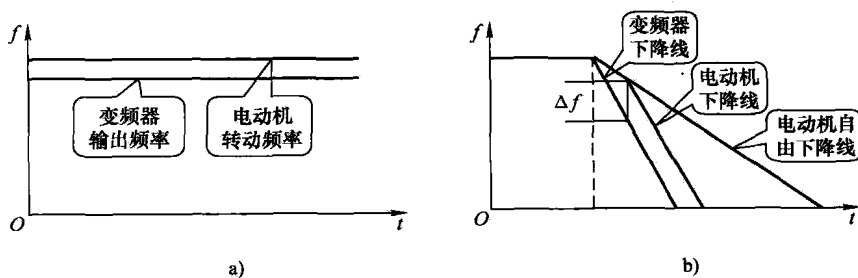


图 1-10 变频器制动特性线

1.2.3 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 1-11 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。

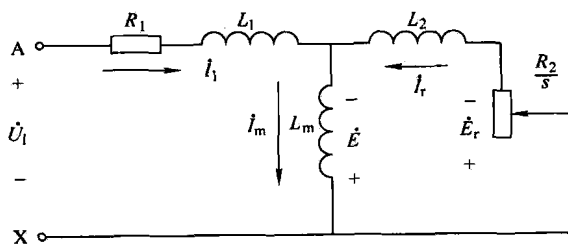


图 1-11 三相异步电动机一相的等效电路

由图 1-11, 根据基尔霍夫定律, 列出定子电压平衡方程式为

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

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 $E_1 = 4.44K_1N_1$

$f_1 \Phi_m$ (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 $4.44K_1N_1$ 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 1-12)。在图 1-12a 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 $\dot{I}_1 Z_1$ 项, 在低频时会引起转矩不足, 要进行转矩补偿。

1.2.4 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 1-13 中 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 所示。

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,

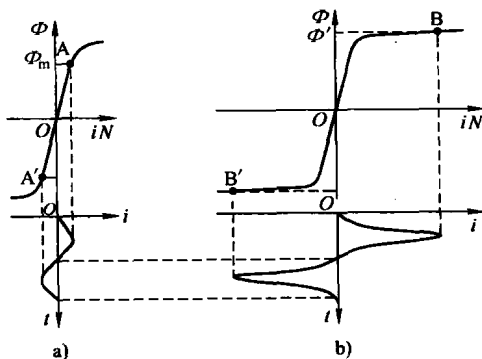


图 1-12 磁化曲线

a) 磁通取额定值 b) 磁通大引起饱和

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 1-14 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。

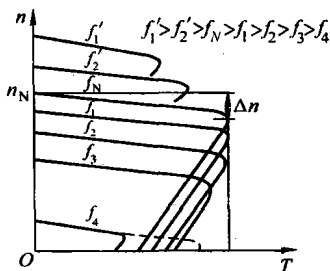


图 1-13 三相异步电动机变频调速的机械特性

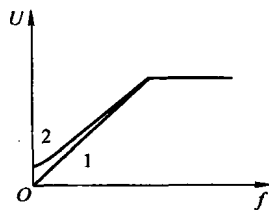


图 1-14 特性曲线

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。

1.2.5 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做电动机的输出转矩 ($N \cdot m$);

U_1 ——电动机定子每相绕组上的电压 (V);