

80

# 特种交流电机及其 计算机控制与仿真

戴文进 等著



A0966527



机械工业出版社

本书主要论述特种交流电机的原理、设计及其计算机控制与仿真，全书共分四章，书后备有附录。

四章内容分别论述三相异步电动机的变频调速、单相异步电动机和发电机、特种交流驱动电动机及开关磁阻电动机等的设计、控制及仿真分析。附录提供了各种特种交流电机设计的有关图表。

本书系关于特种电机及其计算机控制与仿真的专著，可供有关技术人员参考，也可作为高等院校相关专业的教科书或参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

特种交流电机及其计算机控制与仿真/戴文进等著.

—北京:机械工业出版社, 2002.4

ISBN 7-111-09915-X

I. 特… II. 戴… III. ①交流电机—计算机控制  
②交流电机—计算机仿真 IV. TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 010231 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:霍永明 责任校对:唐海燕

封面设计:鞠 杨 责任印制:付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm × 1168mm<sup>1/32</sup>·10.25 印张·271 千字

0 001—4 000 册

定价:16.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是作者在多年从事电机及计算机控制与仿真的科研，以及研究生教学的基础上，结合所取得的成果撰写的。

电机是一门老学科，但近年来随着电子技术、电力电子技术、计算机控制技术、仿真技术及控制理论等的发展和不断进步，老专业焕发出了新的活力。特别是沉寂多年的一些特种电机，又重新派上了用场。此外，一些新型的特种交流电动机也正在不断涌现。可以这样说，特种交流电动机控制系统，是集电机、电力电子变流装置与计算机控制系统为一体的典型的机电一体化及计算机综合控制系统。对该类系统的分析与研究，是对电机学的新发展。本书作者正是在这个意义上进行一种新的尝试。

本书由南昌大学戴文进教授与徐龙权、陈瑛老师三人合著，戴文进撰写第二、三章(除第六节外)和第一章的第二节，徐龙权撰写第一章(除第二节外)和第三章的第六节，陈瑛撰写第四章。

在本书的撰写过程中，得到了许多同志的支持和帮助。南昌水利水电专科学校的彭聪老师，南昌大学在校研究生李庆武、付小科、盛莉和纪少华等同学，为本书的资料收集与整理、文字录入、校稿及图表绘制等，做了大量工作，在此谨向他们表示衷心的感谢。

在本书的撰写过程中，我们还参考了许多同类著作，本书在最后的参考文献中已将此一一列出，他们的工作为我们提供了有益的借鉴和帮助，在此也一并致谢。

由于我们水平有限，加之时间仓促，书中恐有不少谬误，请读者不吝指正。

作 者

# 目 录

## 前言

<b>第一章 变频调速专用的三相异步电动机</b> .....	1
第一节 三相异步电动机的变频调速原理 .....	1
第二节 变频调速专用三相异步电动机的设计方法 .....	22
第三节 三相异步电动机变频调速运行的计算机仿真 .....	61
第四节 SPWM 变频调速系统的稳态仿真程序设计 .....	90
<b>第二章 单相异步电机</b> .....	104
第一节 单相异步电动机原理 .....	104
第二节 单相交流微型驱动异步电动机设计 .....	112
第三节 小型单相异步发电机 .....	144
<b>第三章 特种交流驱动电动机</b> .....	179
第一节 无换向器电动机 .....	180
第二节 转子供电式三相并励交流换向器电动机 .....	190
第三节 电磁转差调速异步电动机 .....	198
第四节 直线电动机 .....	200
第五节 单相串励换向器电动机 .....	205
第六节 三相交流微型驱动异步电动机的设计 .....	208
<b>第四章 开关磁阻电动机调速系统</b> .....	234
第一节 开关磁阻电动机调速系统的基本工作原理 .....	234
第二节 开关磁阻电动机的设计与仿真 .....	244
第三节 功率变换器的设计 .....	265
第四节 开关磁阻电动机的微机控制 .....	278
<b>附录</b> .....	308
附录 A 磁路及参数计算用图 .....	308
附录 B 电机绕组计算用表 .....	315
<b>参考文献</b> .....	320

# 第一章 变频调速专用的三相异步电动机

## 第一节 三相异步电动机的变频调速原理

### 一、交流电机调速发展概述

电动机传动在工业、农业、交通运输、国防军事设施以及日常生活中得到广泛应用。由于直流电动机调速系统比较容易得到良好的动态性能，所以过去直流电动机调速系统一直在变速传动领域占统治地位。但是直流电动机本身在机构上存在严重的问题，机械接触式换向机构复杂、制造费时、价格昂贵、产生火花、电刷易磨损、对环境要求高，使直流电动机无法向高速大容量机组发展。目前 3000r/min 左右的高速直流电动机所能做到的最大容量只有 400kW 左右，容量较大的直流电动机往往只能采用双电枢或三电枢式结构，这使电动机本身结构更为复杂，远远不能满足现代工业向高速大容量化方向发展的要求。

交流电动机，特别是笼型异步电动机，具有结构简单、制造方便、价格低廉、坚固耐用、惯量小、运行可靠、维护简单、可用于恶劣环境等优点，在工农业生产中得到了极为广泛的应用。但是交流电动机调速比较困难，早期采用的调速方法，主要是绕线转子异步电动机转子串电阻和笼型异步电动机变极调速。到 20 世纪 20 年代人们已经认识到交流电动机变频调速是一种性能更好的调速方法。它既能在宽广的范围实现无级调速，也可以获得良好的起动和运行性能。到 20 世纪 50 年代中期，晶闸管研制成功，开创了电力电子技术发展的新时代。这种半导体电力电子器件由于具有体积小、价格低、坚固耐用、性能良好等一系列的优点，使电动机调速用的各种变流装置迅速地进入了实用化阶段，使电动机，特别是交流电动机调速技术的发展产生了一个巨

大的飞跃。此外，作为节约电能的一个重要手段，电动机调速问题又一次得到了重视，许多过去一般不进行调速的装置，如风机、水泵等也都采用了调速系统，这对交流电动机调速技术的发展起了推动作用。

20世纪60年代，中小型异步电动机采用晶闸管调压调速，或采用电磁滑差离合器以替代以往的电抗器调速。而在大中型的绕线转子异步电动机中，多采用静止式的晶闸管串级调速系统，替代以往的机组式串级调速系统。至于变频调速，由于作为第一代半导体电力电子器件的晶闸管整流器没有自关断能力，所以最早进入实用阶段的是电动机低速时靠电源换流，高速时利用同步电动机反电动势换流的，即所谓无换向器电动机交—交调速系统。

20世纪70年代，随着具有自关断能力的新一代电力电子器件，门极可关断晶闸管 GTO 和大功率晶体管 GTR 的开发成功，在中小型电动机中广泛采用了脉宽调制 (PWM) 技术，显著降低逆变器输出电压中的谐波含量，特别是其中对异步电动机性能影响最大的 5 次和 7 次谐波得到明显削弱，从而使电动机的转矩脉动显著减小，运行更为平稳。此外，由于脉宽调制型逆变器可把调压和调频二者结合起来，输入的直流电压不需要调节，于是电源侧可用二极管整流，这样便提高了系统输入的功率因数。特别是这种逆变器采用了高频调制以后，控制的快速性得到显著提高，为制造具有良好动态特性的调速系统创造了条件。所以现在在异步电动机变频调速系统中占统治地位的，正是这种按正弦波调制的大功率晶体管 SPWM 型逆变器。如果说 15 年前交流电动机调速是一个新兴的科技领域，那么，当今它已经成为高新技术产业的一个重要组成部分，是实现节能高效，优质高产的现代化生产的重要手段。伴随微电子和电力电子技术发展，电动机调速发生了根本性变化。从普通异步电动机定子调压、变极、电磁转差离合器，已经发展到异步电动机变频、串级、自控式同步电动机及开关磁阻电动机调速等等。电动机调速真正形成了内容

广泛的工程技术范畴。

近几年来，调速领域取得的突破性进展表现在：

1) 出现了各种性能优越的新型电力半导体器件。如既能控制导通又能控制关断的门极可关断晶闸管 (GTO)；具有良好功率转换效率和适于在高频大功率情况下工作的场效应功率晶体管 (MOSFET)；既具有 MOS 管的栅极驱动功率小和驱动线路简单的优点，又具有双极性功率晶体管 (GTR) 饱和压降小的优点的绝缘栅双极性大功率管 (IGBT)。此外，其内部既有大功率开关器件，又有各种驱动电路和过电压、过电流、过热等保护电路的智能型功率模块 (IPM) 等等。这些器件的推广应用，不仅使得调速系统控制装置体积小、效率高，而且更容易实现各种功能丰富，但结构上又简单的控制方案，更加充实和推动了交流电动机调速系统的进一步发展。

2) 出现了能完成各种复杂信号和信息处理的集成芯片。如产生脉宽调制 (PWM) 信号的专用集成电路 (SLE4520 集成电路)，以及各种单片机系统用的微处理器 (8098) 和接口芯片。由于这些新型器件的出现，使得逆变器的输出频率可达 1000Hz 以上，斩波频率可达 20kHz，为我们实现高质量的控制创造了良好的条件。

3) 出现了建立在电动机统一理论和机电一体化理论基础之上的各种先进控制方案。如利用坐标变换把异步电动机改造为类似直流电动机的矢量控制方案；通过快速检测电流实现 PWM 控制的变频技术；通过直接转矩控制，快速控制转速的转矩自调节技术；此外，还有具有很强抗干扰能力的变结构控制系统等，这一切都极大地丰富和发展了电机调速领域。

## 二、交流传动系统的发展动向

随着 IGBT 与 GTR 等电力半导体向大容量与高性能化方向发展，DSP、MPU 和 ASIC 等控制用电力器件的高速化与低价格化，电力变换与传动技术的进一步发展，以及最新控制理论的出现，使得交流传动技术得到了快速发展。交流传动的这种发展

与其应用领域的扩大产生了相辅相成的效果。

通用型逆变器，由于体积小、重量轻、高性能和控制功能的增加而引人注目。在 IPM 与单片式逆变器中，由于采用了可以减小漏电感的板状配线和大电流回路基板，以及高性能冷却系统等，其性能进一步提高。在近 15 年间，0.75kW 逆变器的体积已减小到原来的 1/11。此外，由于 32 位 DSP 的采用，使得高速的电流控制成为可能，在直接磁通控制法中采用具有代表性的自动转矩增压控制，使转矩控制性能得到提高；采用转差频率补偿，提高了速度精度。再者，采用电动机常数自动调整技术和无速度传感器转矩控制，在低速范围内获得 200% 转矩的逆变器也已出现。

三点式逆变器，由于其易于实现直流部分的高电压，即使是在低开关频率时，也可改善输出波形。因此，作为电力机车和一般工业用逆变器而得到广泛应用。以中性点钳位方式的中性点电位动态补偿法，结合考虑到功率器件最小导通时间的 PWM 调制法为中心进行了开发。今后，为解决电源环境与高次谐波问题，期望开发通用型逆变器与多点式逆变器的变换控制技术。

就矢量控制而言，感应电动机转子电阻的温度变化补偿技术大体上已经解决。由于 DSP 的高速化和 ASIC 的采用，其控制性能大大提高。虽然还存在转矩脉动问题，但是在冶金、造纸等众多领域已经得到应用。对应于在电力机车上应用所要求的最大效率控制、高速磁通控制以及扩大运行范围的要求，在低速运行与高速运行时的特性改善还有待于进一步研究解决。此外，在性能方面，为了增强通用型逆变器的性能，采用了矢量控制下的无速度传感器矢量控制。这种传动技术适应性更强，要求在大范围内进行高性能控制的冶金与造纸等领域中的应用实例也不少。最近，已开发成了改善低速运行速度控制特性的几种控制方式。复杂而繁多的运算是必要的，但是如果采用 DSP 和高速 MPU 的话，将使问题得到解决，因而应用领域会进一步扩大。就工业用交流传动技术而言，今后有待于开发的技术有：包括负载在内的



电动机系统参数实时识别与参数自调整技术；可以实现指定目标值响应与扰动响应的控制装置的自调整技术；以及处理电动机参数变化与未知扰动的鲁棒控制技术等等。

功率变换器，作为弱电控制强电的纽带，在交流传动系统中起着至关重要的作用。作为其“硬件”的组成部分的电力电子器件的发展，近 10 多年来刚刚经历了一个鼎盛时代，现在已进入相对平稳的发展时期。而作为其“软件”构成部分的功率变换电路拓扑结构和 PWM 技术，近年来发展很快，尤其 20 世纪 80 年代以来，随着自关断器件的普遍应用，电力电子电路及 PWM 技术向高频方向发展、新的电路拓扑形式和 PWM 技术不断涌现，促进了功率变换装置乃至交流传动系统性能的不断提高。

### 三、交流电动机调速各方案的比较

交流电动机的调速方法主要有调转差调速、变极调速和变频调速。而调转差调速又有多种方式。表 1-1 就各种调速方法的性能进行了对比。

从表 1-1 的各项指标可以看出，变频调速的性能较好。变频调速是通过改变定子供电频率以改变同步转速来实现调速的方法。在调速过程中从低速到高速都可以保持不大的转差率，因而具有高效率、宽范围、高精度的调速性能。变频调速是异步电动机的一种比较理想的调速方法。

从控制性能、控制原理和控制方式上看，异步电动机变频调速都类似于直流电动机改变电枢电压和磁场磁通的调速。但异步电动机本身具有体积小、重量轻、成本低、惯性小、效率高和工作可靠等系列优点，因此异步电动机变频调速自始至终受到极大的重视，并在电动机调速领域占据了最重要的地位。随着电力半导体器件，特别是可关断器件的发展，变频调速装置的性能/价格比在不断提高，其应用范围也不断增大。特别是在长期需要以较低速运行和工作在恶劣环境下的设备，以及需要多台电动机共用一套变频电源，或多台电动机需要精确协调运转（如纺织机械等）的场合，电动机变频调速是优先选用的方案。

表 1-1 各种交流调速方式比较表

调速方法 比较项目	转子串电阻	定子调速	变极调速	串级调速	变频调速
调速范围 (%)	100~50	100~80	100~50	100~40	100~0
节能效果	一般	一般	优	一般	优
功率因数	优	良好	良好	差	优
快速性	差	快	快	快	快
故障处理	停车处理	可投工频	停车处理	停车处理	不停车投工频
使用范围	新老企业	新老企业	新建企业	新建企业	新老企业
外围要求	绕线转子电动机	无	无	绕线转子电动机	无
初投资	较省	省	最省	较贵	较贵
维护保养	易	易	最易	较难	易
可靠性	可靠	可靠	可靠	较差	最可靠
对电网干扰	无	大	无	较大	稍有
性能	好	不好	好	较好	最好

#### 四、交流变频调速系统的特点及其存在的问题

##### (一) VVVF 装置的特点

1) 既可分别调频调压，也可调频调压由逆变器统一完成，且均仅有一个可控功率级，从而简化了主电路和控制电路的结构，使装置的体积小、重量轻、造价低、可靠性高。

2) 使用二极管整流器，交流电网的功率因数与逆变器输出电压的大小无关而且接近 1；如有数台装置，可由同一台不可控整流器供电。

3) 输出频率和电压都在逆变器内控制和调节，其响应速度取决于电子控制回路，与直流回路的滤波参数无关，所以调节速度快，且可使调节过程中频率和电压相配合，以获得好的动态性能。

4) 输出电压和电流的波形接近正弦, 从而减少谐波分量, 降低电动机运行时的发热和转矩脉动, 改善了电动机的运行性能。

5) SPWM 逆变器要求有高的载波频率, 因此开关元件工作频率高, 开关损耗和换流损耗大。

6) 变频调速节能效果明显, 有时可高达 30% ~ 50%。调速系统机械特性硬, 无附加转差损耗, 而且频率精度高, 能保证电动机转速高精度、宽范围无级调速, 可实现软起动 ( $< 1.5I_N$ ), 易于实现生产过程自动控制。该系统技术先进、性能稳定、维护工作量少。

## (二) 交流变频调速系统存在的问题

### 1. 谐波引起电动机的效率下降和温升提高

在逆变器电路变流过程中, 其输出电压或电流为阶梯波, 因此含有丰富的谐波, 致使异步电动机在非正弦电压电流下运行。以当前比较普遍使用的正弦波 PWM 变频器为例, 其低次谐波基本上为零, 剩下的是比载波频率 (晶体管开关频率) 大一倍左右的高次谐波分量。高次谐波会引起定子铜耗、转子铝耗、铁耗及附加损耗的增加, 最为显著的是转子铝耗。如将普通异步电动机运行于变频器输出的非正弦电源条件下, 其温升一般约增加 10% ~ 20%。

### 2. 谐波引起电磁噪声与振动

当采用变频器供电时, 普通异步电动机上由电磁、机械和通风等原因所引起的振动和噪声, 将变得更加复杂。变频器电源中含有的高次时间谐波与电动机电磁部分的固有空间谐波相互干涉, 形成各种电磁振动力。当电磁力波的频率和结构件固有振动频率一致或接近时, 将产生共振现象因而噪声增大。由于电动机工作的频率范围宽, 转速变化范围大, 各种电磁波的频率很难避开电动机各种结构件的固有频率。普通异步电动机用变频器供电时的噪声, 比用工频电网供电时一般约增加 10 ~ 15dB 左右。

### 3. 低速时的冷却效果差

在电源频率较低时，因普通异步电动机的阻抗不尽理想，使电源中高次谐波所引起的损耗增大。再者，自冷式普通异步电动机在转速降低时，冷却风量将按转速的三次方成比例地减小，这必将使电动机的低速温升急剧增加，而难以实现恒转矩运行。

#### 4. 电动机绝缘结构承受高电压冲击

目前中小容量变频器，大多数采用 SPWM 的控制方式。它的载波频率约为几 kHz 到十几 kHz，这就使电动机线圈需要承受很高的电压上升率。另外，由 PWM 变频器产生的矩形斩波冲击电压叠加在电动机运行电压上，会对电动机的对地绝缘形成威胁，对地绝缘在高电压的反复冲击下会加速老化。

### 五、变频器控制策略和调速控制方式

#### (一) $U/f$ 控制

按照一定的电压和频率关系对变频器的频率和电压进行控制，称为  $U/f$  控制方式。基频以下可以实现恒转矩调速，基频以上则可以实现恒功率调速。

$U/f$  方式又称为 VVVF 控制方式，逆变器中开关元件用 SPWM 方式进行控制。逆变器的控制脉冲发生器同时受控于频率指令和电压指令，而它们之间的关系是由  $U/f$  曲线发生器决定的。这样经 SPWM 控制之后，变频器的输出频率  $f$  和输出电压  $U$  之间的关系，就是  $U/f$  曲线发生器所确定的关系。由此可见，转速的改变是靠改变频率的设定值来实现的。电动机的实际转速要根据负载的大小，即转差率的大小来决定。负载变化时，在设定值不变条件下，转子速度将随负载转矩变化而变化。故常用于速度精度要求不十分严格或负载变动较小的场合。

$U/f$  控制是转速开环控制，无需速度传感器，控制电路简单，负载可以是通用标准异步电动机，所以通用性强，经济性好，是目前通用变频器产品中使用较多的一种控制方式。

#### (二) 转差频率控制

在没有任何附加措施的情况下，当处于  $U/f$  控制方式下运行时，如果负载变化，转速也会随之变化，转速的变化量与转差

率成正比， $U/f$  控制的静态调速精度显然较差。为提高调速精度，采用转差频率控制方式。根据速度传感器的检测，可以求出转差角频率，再把它与速度设定值相叠加，以该叠加值作为逆变器的频率设定值，就实现了转差补偿。这种实现转差补偿的闭环控制方式，称为转差频率控制方式。与  $U/f$  控制方式相比，由于转差补偿的作用，其调速精度大为提高。但其使用速度传感器求取转差角频率，要针对具体电动机的机械特性调整控制参数，因而这种控制方式的通用性较差。

### (三) 转差矢量控制

上述的  $U/f$  控制方式和转差频率控制方式的控制思想，都建立在异步电动机的静态数学模型上，因此动态性能指标不高。对于轧钢、造纸设备等动态性能要求较高的应用场合，可以采用矢量控制变频器。采用矢量控制方式的目的是，主要是为了提高变频调速的动态性能。根据交流电动机的动态数学模型，利用坐标变换的手段，将交流电动机的定子电流分解成磁场分量和转矩分量，并分别加以控制，即模仿自然解耦的直流电动机的控制方式，对电动机的磁场和转矩分别进行控制，以获得类似直流调速系统的动态性能。

在矢量控制方式中，磁场电流和转矩电流可以根据可测定的电动机定子电压和电流的实际值用计算方法求得。磁场电流和转矩电流再与相应的设定值相比较，并根据需要进行必要的校正。

## 六、变频器供电的异步电动机的机械特性

异步电动机在由变频装置供电时，一般来说，电压和电流中均含有谐波分量。但是异步电动机的转矩和转速主要还是决定于基波分量，而谐波主要是引起附加损耗和产生转矩脉动，其作用毕竟是次要的。所以在分析研究异步电动机变频调速特性时，可以从分析基波分量入手。

根据“电机学”原理，异步电动机的端电压与电动机气隙磁通  $\Phi$  和频率  $f$  之间有如下关系：

$$U \approx E = 4.44 f \Phi N_1 K_{dp1} \quad (1-1)$$

式中  $N_1$ ——每相绕组串联匝数；

$K_{dp1}$ ——基波绕组系数。

可见，在异步电动机变频调速的过程中，为了使电动机的磁通能维持在恰当的水平，电动机的电压必须随频率而变化。考虑到异步电动机的电磁转矩与磁通和电流的乘积成正比，即：

$$T = \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-2)$$

从电动机损耗最小的角度出发，当负载变化时，最好使电动机的磁通和电流也能随着转矩的变化而同时作相应的增减，即：

$$I \equiv \Phi \equiv U/f \equiv \sqrt{T} \quad (1-3)$$

这就是说在恒转矩负载下，希望磁场和电流基本保持恒定，为此  $U/f = \text{常数}$ ；在恒功率负载下，由于电动机的转矩应与转速（频率）成反比，为此  $U/f \equiv \sqrt{1/f}$ ；而在带风机、水泵类负载运行时，由于负载转矩和电动机的转速平方成正比，所以磁通应正比于频率变化，即  $U/f \equiv f$  比较适合。

以上的分析虽然给出了异步电动机的变频调速时的基本规律，但是它仅是一个粗略的估计。为了充分发挥异步电动机的潜力，获得良好的调速特性，下面对变频电源的控制策略和电动机的特性进行分析。

#### （一）恒电压/频率比控制时的机械特性

根据“电机学”原理，当异步电动机运行在固定频率及电压下，忽略励磁电流时，电磁转矩和最大转矩可分别由以下两式表示：

$$T_{em} = \frac{mpU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} \quad (1-4)$$

$$T_m = \frac{mpU_1^2}{4\pi f_1 \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]} \quad (1-5)$$

式中  $m$ ——相数；

$p$ ——极对数；

$R_1$ 、 $X_1$ ——定子绕组电阻、漏电抗；

$R_2'$ 、 $X_2'$ ——折算到定子侧的转子绕组电阻、漏电抗。

异步电动机在正弦电压源作用下的稳态等效电路如图 1-1 所示。在这个等效电路中电抗  $X$  与频率有关。在变频调速情况下频率  $f$  是变化的。只考虑基波效应，如实际工作频率  $f_1$ ，用它与额定频率  $f_N$  的比值  $\alpha$  来表示，即：

$$f_1 = \alpha f_N \quad (1-6)$$

则等效电路中电抗可表示成额定频率时的电抗值乘以比值  $\alpha$ ，见图 1-1a。如果把图 1-1a 中各项参数均除以比值  $\alpha$ ，则得异步电动机变频运行时的等效电路，见图 1-1b。图中：

$$\beta = s\alpha = \frac{n_1}{n_N} \left( \frac{n_1 - n}{n_1} \right) = \frac{n_1 - n}{n_N} \quad (1-7)$$

为频率  $f_1$  下的实际旋转磁场对转子的相对速度，与额定频率下旋转磁场转速之比。后者是一个与运行频率无关的常数，所以  $\beta$  的大小直接表示了气隙旋转磁场对转子的转速之差，称为绝对转差率。在变频调速运行下的异步电动机工况，就完全由绝对转差率  $\beta$  所决定的。

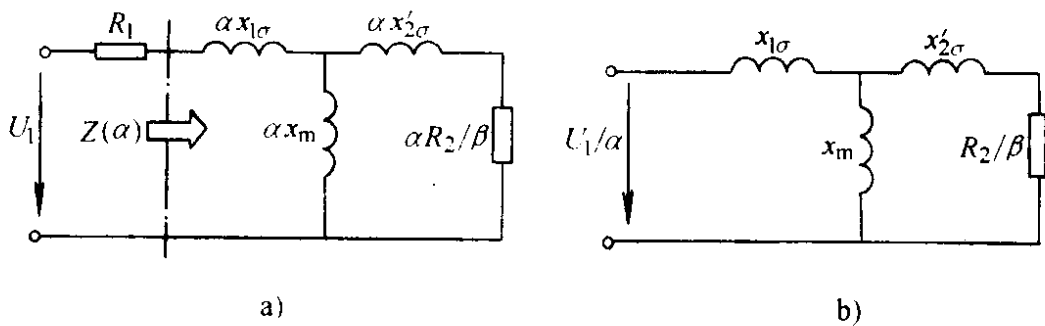


图 1-1 变频运行异步电动机等效电路

根据图 1-1 的等效电路不难求得在  $U/f = \text{常数}$  的情况下，异步电动机变频运行时的电磁转矩和最大转矩为：

$$T_{em} = \frac{mpU_N^2\beta R_2'}{2\pi f_N \left[ \left( \frac{\beta R_1}{\alpha} + R_2' \right)^2 + \beta^2 (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (1-8)$$

$$T_m = \frac{mp\alpha U_N^2}{4\pi f_N [R_1 + \sqrt{R_1^2 + \alpha^2 (X_1 + X_2')^2}]^2} \quad (1-9)$$

从式 (1-8) 可见, 在正常运行时由于转差率  $s = \beta/\alpha$  之值很小, 通常可以忽略, 则对应于一定转矩下的绝对转差率, 即旋转磁场对转子的相对运动不变, 因此在  $U/f = \text{常数}$  的条件下, 转矩特性的稳定运行段将是一组硬度不变的平行曲线。而从式 (1-9) 可以看出, 由于定子电阻  $R_1$  的影响, 随着运行频率下降, 最大转矩  $T_m$  将逐渐减小。

如果保持  $U/f = \text{常数}$  ( $= 220\text{V}/50\text{Hz}$ ), 恒电压/频率比方式控制下电动机特性曲线如图 1-2 所示。

图 1-2 所示曲线表明恒电压/频率比的运行方式用于恒转矩负载时, 随着转速的降低, 其过载能力逐渐下降, 它只适用于调速范围不大, 或转矩随转速的降低而减小的负载。例如风机、水泵等 (其转矩特性如图 1-2 中虚线所示), 其采用电压/频率比

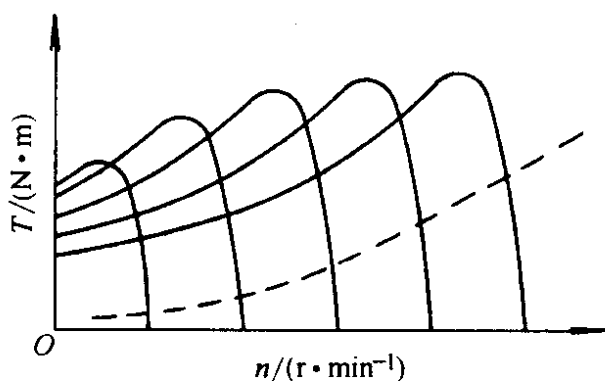


图 1-2  $U/f = \text{常数}$  时异步电动机机械特性

恒定控制在过载能力上完全能满足要求。当然从减少损耗的角度看, 在低频时可降低电压, 按  $U$  正比于  $f^2$  的规律变化。但实用上因风机、水泵的调速范围不大, 不可能在低频下运行, 所以实际上也常按恒电压/频率比方式进行控制。

## (二) 最大转矩保持恒定的控制方式

在电压/频率比恒定的控制方式中, 电动机的最大转矩有随频率而下降的趋势, 主要是由于定子电阻  $R_1$  的影响所引起的。如果我们采取适当方法, 提高输入电压, 把电阻上电压降落完全予以补偿, 那么异步电动机最大转矩就不会随工作频率下降而减小。电阻压降完全补偿的结果, 在电路中相当于电阻等于零。从图 1-1 可见, 它与额定电压、额定频率运行时的等效电路形式几



乎完全相同。唯一的差异只是在变频运行的情况下，决定电动机特性的不是相对转差率  $s$ ，而是绝对转差率  $\beta$ ，亦即实际的旋转磁场切割转子导体的转差速度  $(n_1 - n)$ 。这点不难理解，因为在定子电阻被完全补偿，内电动势与频率成正比变化的情况下，电动机内部的定子磁链和气隙磁场大小是恒定的。如果转子相对气隙磁场的速度一定，转子中感应的电流及其所产生的电磁转矩也是一定的。这反映到定子上，定子电流的大小、相位、功率因数等都不会发生变化，而与工作频率无关。

在定子电阻压降完全补偿的情况下，电动机的电磁转矩和最大转矩可由式 (1-8) 和式 (1-9) 中令  $R_1 = 0$  求得：

$$T_{em} = \frac{mpU_N^2\beta R'_2}{2\pi f_N [(R'_2)^2 + \beta^2 (X_1 + X'_2)^2]} \quad (1-10)$$

$$T_m = \frac{mp\alpha U_N^2}{4\pi f_N \alpha (X_1 + X'_2)} \quad (1-11)$$

从以上两式看出，在忽略或补偿定子电阻的情况下，恒电压/频率比变频运行时异步电动机的转矩特性曲线将是一组沿水平轴（转子转速  $n$ ）平移的特性曲线，其在不同运行频率下电动机的最大转矩  $T_m$  是不变的，而且均发生在同样大小的绝对转差下，即出现最大转矩的绝对转差率  $s_m = \text{常数}$ 。这种最大转矩保持恒定的特性适宜拖动转矩恒定的负载，可保持电动机在变频调速过程中的过载能力不变。

为了补偿定子电阻上压降，保持异步电动机的最大转矩不变，定子的输入电压控制规律可由式 (1-5) 得出，考虑到  $f_1 = \alpha f_N$  的关系，求得：

$$\begin{aligned} \left(\frac{U_1}{U_N}\right)^2 &= \alpha \left[ \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \alpha^2 (X_1 + X'_2)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \right] \\ &= \alpha \left[ \frac{1 + \sqrt{1 + \alpha^2 Q^2}}{1 + \sqrt{1 + Q^2}} \right] \end{aligned} \quad (1-12)$$