

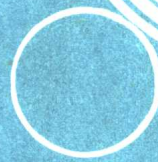
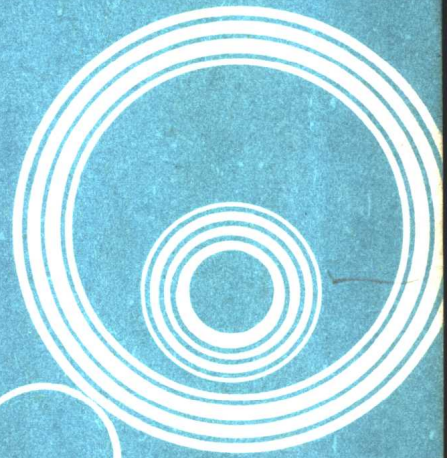
977921

高等学校教材

TM34
2514

现代交流调速系统

朱震莲 主编



西北工业大学出版社

高等学校教材

现代交流调速系统

朱震莲 主编

西北工业大学出版社

1994年12月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书是根据原航空航天工业部教材编审委员会专业组制定的编写大纲编写的。

本书从电机运行基本概念出发,系统深入地阐明交流电机变频调速的工作原理、运行特性、矢量变换控制基本理论和分析方法,着重介绍以大功率晶体管逆变器主电路构成的变频调速系统的控制技术及其发展的最新动向。

本书可作为高等工业院校电气技术、电机电器及其控制和工业自动化专业本科高年级学生选修课教材和相应学科硕士研究生教材;对从事电机、电力拖动自动控制及机电一体化产品开发、设计和研究的工程技术人员也有较好的参考价值。

高等学校教材
现代交流调速系统

朱震莲 主编

责任编辑 王 璐

责任校对 郑 刚

© 1994 西北工业大学出版社出版

(710072 西安市友谊西路 127 号 5269046)

陕西省新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0705-0/TN·26(课)

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 11.5 字数 276 千字
1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷
印数:1—1 500 册 定价:9.00 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言

本书是根据原航空航天工业部教材编审委员会专业组制定的编写大纲编写的。可作为高等工业院校“电气技术”、“电机电器及其控制”和“工业自动化”等专业高年级学生选修课和相应学科研究生教材。对从事电机、电力拖动自动控制及机电一体化产品开发、设计、研究的工程技术人员也有较好的参考价值。

交流电机调速包括不同类型的交流电机及与其相关的调速控制技术，而感应电动机和同步电动机的变频调速是交流调速系统发展的主要方向。因此，本书将上述两类变频调速系统作为基本内容，由于变频调速系统的基本原理、工作特性、交流电机的数学模型以及变换电路是研究具体变频调速系统的基础知识，所以将这些内容列在本书的前面；鉴于国际上变频调速系统的发展，本书在最后还介绍了目前正在国内外开发的开关磁阻电动机调速系统。

全书内容共分六章，按 50 学时课时编写，难度较大的章、节冠以“*”号，当作为本科生教材时，可不予讲授。另外，第三章的内容涉及电力电子学课程内容，如有些院校前修课程已经讲授，则可以精简。第一章阐述交流电机变频调速的基本原理和机械特性；第二章介绍交流电机的综合矢量、数学模型、等效电路和状态变量方程；第三章专门讨论晶体管电力变换器；第四章详细讨论了感应电动机转速开环变频调速系统、 sf 控制的变频调速和转子磁场定向控制的变频调速系统，并介绍了感应电动机转矩直接控制的变频调速系统；第五章研究了同步电动机的矢量控制、稀土永磁同步电动机的磁场定向控制和无刷直流电动机；第六章讨论了开关磁阻调速电动机。

本书是作者在多年教学实践和科研成果的基础上，以作者为本科高年级学生、硕士研究生撰写的《现代调速系统》讲稿为蓝本，并参考了国内外有关文献编写而成的。

本书由南京航空航天大学教师编写，朱震莲副教授担任主编，其中第三章由严仰光教授编写，第四章的第 1、2、4 节由周波副教授编写；第六章由刘迪吉教授编写。其余章、节均由朱震莲编写。

本书请东南大学赵家璧教授主审，对如何精选内容、润饰文字，提出了许多宝贵意见，对此编者表示衷心感谢。同时要感谢居美华、吴洁工程师精心绘制了全书插图，感谢西北工业大学吴斌教授对本书的关心及提出的许多宝贵意见。此外，对南京航空航天大学电气工程研究所的领导和同事们给予的支持和帮助，在此一并表示衷心感谢。

由于水平所限，书中错误和不当之处在所难免，恳请同行专家和读者批评指正。

编者

1993 年 8 月于南京航空航天大学

A00113

目 录

引论	1
第一章 交流电机变频调速的基本原理和机械特性	7
§ 1-1 交流电机变频调速的基本原理	7
§ 1-2 感应电动机变频调速的机械特性	8
§ 1-3 同步电动机变频调速的基本特性	16
思考题	20
习题	20
第二章 交流电机的数学模型	22
§ 2-1 交流电机的综合矢量	22
§ 2-2 交流电机中常用的坐标变换	26
§ 2-3 功率不变的坐标变换	29
§ 2-4 感应电动机的数学模型	31
§ 2-5 同步电动机的数学模型	46
* § 2-6 交流电机的状态变量方程	55
思考题	58
习题	58
第三章 晶体管电力变换器	60
§ 3-1 晶体管直流变换器	60
§ 3-2 单相晶体管逆变器	64
§ 3-3 三相晶体管逆变器	72
* § 3-4 电力电子变换器的组合	82
思考题	83
习题	83
第四章 感应电动机变频调速系统	85
§ 4-1 感应电动机开环变频调速系统	85
§ 4-2 感应电动机 sf 控制的变频调速系统	95
§ 4-3 感应电动机矢量控制的变频调速系统	101
* § 4-4 感应电动机转矩直接控制的调速系统	113
思考题	117
习题	117
第五章 同步电动机变频调速系统	119

§ 5-1 概述.....	119
* § 5-2 他控变频同步电动机调速系统.....	120
§ 5-3 自控变频同步电动机调速系统.....	137
思考题.....	154
习题.....	154
* 第六章 开关磁阻调速电动机.....	155
§ 6-1 开关磁阻调速电动机基本原理.....	155
§ 6-2 开关磁阻调速电动机的主要结构与分类.....	159
§ 6-3 开关磁阻调速电动机的运行特性分析.....	162
§ 6-4 开关磁阻调速电动机的控制.....	171
思考题.....	176
习题.....	176
参考文献.....	177

引 论

一、交流电机调速技术发展概况

交流电动机,特别是鼠笼型感应电动机,由于结构简单,制造方便,价格低廉,坚固耐用,运行可靠,维护简便,在工农业生产中得到了广泛应用。但由于交流电机调速比较困难,以往由于缺乏相应的控制手段,所以主要用于不需调速的场合。相反,由于直流电动机调速方便灵活,所以在70年代以前,需要调速的生产机械普遍应用直流电动机调速。直流电动机的转速 n 和电磁转矩 T 分别为

$$n = \frac{U - I_a R}{K_e \Phi} \quad (0-1)$$

$$T = K_T \Phi I_a \quad (0-2)$$

式中 U —— 加到直流电动机电枢端的电压;

I_a —— 电枢电流;

R —— 电枢回路电阻;

Φ —— 电动机励磁磁通;

K_e —— 电势常数;

K_T —— 电机转矩常数。

由式(0-1)、(0-2)可知,若 I_a 不变,保持 Φ 为额定值,增加电动机电枢的端电压 U ,即可增加电动机转速 n 。由于 I_a 和 Φ 不变,所以转矩不变,故调压调速属恒转矩调速。随着转速增大,输出功率增大。当 U 增加到额定值以后,若保持 U 和 I_a 不变,减小磁通 Φ ,则转速成正比提高,此时,转矩 T 成正比减小,输出功率不变,故弱磁调速属恒功率调速。与此相比,交流电动机调速较难。

早期交流电动机调速主要采用绕线式感应电动机转子绕组外接电阻和鼠笼型感应电动机变极调速。后来在50年代,在定子绕组上串饱和电抗器调速也有发展。但这些调速方法效率低,很不经济。为了回收在外接电阻上消耗的能量,在30年代就提出了串级调速方案,将绕线式转子绕组的输出功率经整流器整流成直流供给直流电动机,并将直流电动机与绕线式感应电动机同轴,让这部分能量转变成机械能加以利用,称为机械串级调速系统(或称Kramer系统)。除机械串级调速系统外,亦可使直流电动机带动交流发电机向电网送回部分功率,称为电气串级调速系统(或称Scherbius系统)。该系统后来又用可控水银整流器组成逆变器,使部分能量直接回馈电网加以利用,来提高系统的效率。

交流变频调速的优越性早在20年代已被人们认识。二次世界大战前,在德国和苏联就开始利用闸流管构成逆变器,用转子位置信号控制闸流管的点燃角,调节同步电动机的转速。当时因投资大,效率低,体积庞大而未能推广。

在50年代中期,晶闸管的研制成功,开创了电力电子技术发展的新时代。由于该器件具有体积小、重量轻、响应快、放大倍数高、管压降低和坚固耐用等一系列优点,使交流电机

调速技术有了飞跃发展。在60年代初,中小型感应电动机多采用晶闸管调压调速和电磁滑差离合器代替饱和电抗器调速;大中型绕线式感应电动机采用晶闸管构成的静止型电气串级调速系统。由于后者变换的仅是电机的转差功率,因此它只适用于调速范围不大的风机、水泵等,但它已起到既调速又节能的目的,其原理图如图0-1所示。目前串级调速装置容量为30~10 000kW,调速范围1:2, $\cos\varphi < 0.7$, 效率 $\eta < 0.8$ 。

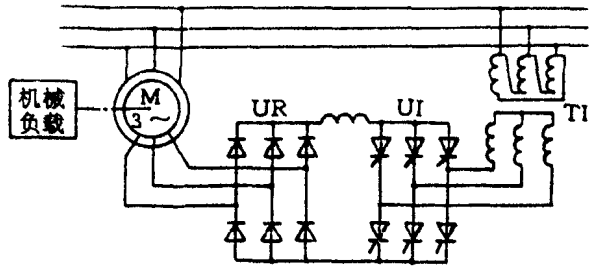


图 0-1 串级调速原理图

若将图0-1中,三相不可控整流器改为三相可控整流器,电网的电功率同时经定子和转子双馈到电机传动机械负载,此时电机运行于超同步状态,称其为双馈电机。国外生产的容量已达3 760 kW,其频率可在50 Hz的上下调整14 Hz,即从36 Hz至64 Hz。国内也已开发了超同步的双馈调速装置。

比上述两种调速方式效率更高,同时性能更好的是变频调速,近20年来得到了迅速发展。变频调速是交流电机调速的主要发展方向,其主要方案有:

1. 交-交变频调速

在变频调速传动系统中,由大容量晶闸管构成的变频电路,若没有中间储能环节,则每相采用正反两组像直流可逆传动一样的反并联可逆传动电路,如图0-2(a)所示,由此控制每相正组晶闸管的触发信号的相位,使控制角 α 由 $\frac{\pi}{2}$ (对应输出电压平均值为零)逐渐减到零(对应于最大的输出电压平均值),然后再逐渐增加到 $\frac{\pi}{2}$,也就是使 α 在 $\frac{\pi}{2} \sim 0 \sim \frac{\pi}{2}$ 之间变化,则整流后的平均电压就由零变到最大值再变到零,呈正弦规律变化。对反组负半周的控制亦是如此,如图0-2(b)所示。其他两相输出电压依次相差 120° 电角。由于它靠电网电压换流,且要求输出电压的包络线接近于正弦,最高输出电压的频率只能是电网频率的 $1/3 \sim 1/2$ 左右。因此,交-交变频调速传动适用于低速大容量的调速系统。交-交变频调速系统在1969年提出,在70年代初,就开始发展,单机容量达1 500 kW。目前国外已做到15 000 kW。国内正在开发3 000 kVA和5 500 kVA的全数字控制交-交变频调速装置,它与同容量的直流传

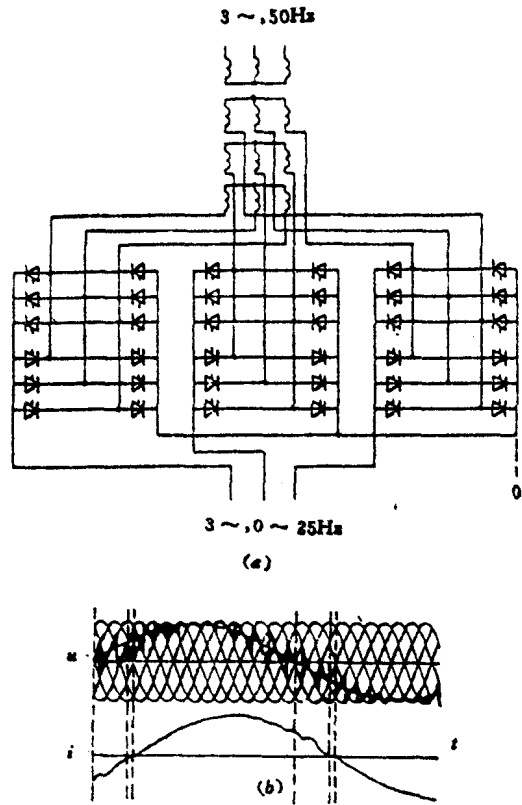


图 0-2 交-交变频调速主电路及输出电压波形

动相比,损耗可减小40%。交-交变频器既适合于感应电动机,也适用于同步电动机。但它所用的晶闸管元件数量较多,其耐压要求也较高,价格成本相对就高。

2. 交-直-交变频调速

交-直-交变频器分电压型变频器和电流型变频器两种,它们的共同点是先将工频交流电源整流成直流,再由逆变器把直流转换成频率、电压可调的交流输出,两者之间的区别在于中间环节的滤波方式不同。

(1) 电压型变频器 中间环节采用电容滤波,直流电压波形比较平直,在理想情况下是一种内阻抗为零的恒压源。由于电压极性不易改变,因此要采用两组反并联的整流桥才能实现再生制动。该系统适合于对多台电动机供电,如化纤工业的纺丝机采用了电压型逆变器拖动多台同步电动机同步运转。由晶闸管构成PWM工作方式的这种变频器国内产品已达到1000kVA。

(2) 电流型变频器 中间环节采用电感滤波,直流回路中电流波形比较平直,逆变器工作于恒流源状态,称电流源变频器。若要实现电动机再生制动,只要改变直流整流电源的极性,而不需改变电流的流向。目前在石油、钢铁和化工等行业中得到应用,单机装置的容量约300kVA。

3. 同步电动机自控式变频调速

同步电动机自控式变频调速系统,常称无换向器电动机或无刷直流电动机。它是由一台同步电动机、逆变器和转子位置检测器组成,它具有直流电动机良好调速特性,但不换向器和电刷,结构简单、可靠。它的逆变器和一般同步电动机变频调速系统中的逆变器不同,它的频率不是独立调节的,而是受控于电机轴上转子位置检测器,是一种自控式逆变器,其输出频率和电动机的转速绝对保持同步。这种自控式变频调速系统对高速大、小容量均适用。目前,其容量已做到20~60MW。

4. 开关磁阻调速电动机

开关磁阻调速电动机是最近十几年中研制开发的一种新型可调速的电动机。该电机是由磁阻电动机、功率变换器、转子位置检测器和控制器组成的机电一体化的调速系统。由于它在结构、成本、效率和调速性能方面都具有一定的优点,自1983年英国正式推出该机以来,引起了国内外许多学者的重视,经过广泛研究开发,已成为现代调速传动的又一个新支。

5. 正弦波脉宽调制(SPWM)变频调速

随着自关断元件,如功率晶体管(GTR)、门极可关断晶闸管(GTO)、绝缘门极双极性晶体管(IGBT)、功率金属氧化物场效应管(P-MOSFET)的发展,逆变器广泛采用了高频脉宽调制技术。当采用PWM技术时,整流桥采用二极管,使电网侧的功率因数接近于1,控制逆变器中功率开关器件的导通或断开,在输出端可获得一系列宽度不等的矩形脉冲波。若使脉冲宽度与正弦函数成比例,则可得到SPWM波。在工程中感兴趣的是其中的基波分量,对谐波分量则应设法抑制和消除。

目前由于电力半导体器件GTR容量的限制,装置容量只做到200kVA,国外已有GTR的PWM变频器系列产品。国内亦有工厂系列生产GTR的PWM变频调速装置,其最大容量可达近百千瓦。

6. 矢量控制变频调速

交流电动机调速技术的发展关键在于大功率半导体器件的制造水平。随着电力电子技术

的发展,特别是具有自关断能力全控功率元件 GTR 与 GTR 模块的推出和微型计算机的出现,70 年代末普遍采用了 GTR 逆变器 PWM 技术,使控制和快速性大大提高,调压、调频结合在一起,使变频器的体积小、重量轻、工作可靠。

感应电动机变频调速时,需要进行电压(或电流)和频率的协调控制,有电压(电流)和频率两个独立的输入变量。如果考虑电压是三相的,实际的输入变量数目还要多。在输出变量中,除转速外,磁通也得算是一个独立的输出变量,因为为了获得良好的动态性能,希望能对磁通施加某种控制。例如,使它在动态过程中保持恒定,以获得较大的转矩。由于这些原因,感应电动机是一个多变量(多输入、输出)系统。而电压(电流)频率、磁通、转速之间又互相有影响,所以是强耦合的多变量系统。另外,感应电动机磁通与电流相互作用产生转矩,转速与磁通作用感应电势,即使不考虑磁饱和等因素,感应电动机数学模型亦是非线性的。若沿用直流电机调速系统的分析和设计方法采用标量控制的转速开环和转速闭环的变频调速系统,则也难以获得像直流电机双闭环调速系统那样的高动态性能。

1971 年德国西门子公司工程师 F. Blaschke 提出了感应电动机磁场定向控制原理,同时美国的 P. C. Cushman 和 A. A. Clark 也提出了感应电动机定子电压坐标变换控制。随着微机的出现,提供了实现这一控制的手段。德国的 W. Leonhard 教授提出了用微机实现矢量控制的模型,从而使矢量控制交流调速技术得到了实际应用。并取得了突破性的进展,使交流电机可像直流电机那样进行快速的转矩控制,系统的静、动态特性可以和直流系统媲美,价格也随着半导体器件的发展而下降。交流伺服系统正在取代直流伺服系统而成为数控机床和工业机器人的主导伺服系统。在国外,如日本安川电机、富士电机、FANUC、三菱,美国 GE,德国的西门子公司在 80 年代都先后推出了交流伺服系统的系列产品。目前我国正在研制。有些厂家已引进部分交流伺服技术,有小批量产品供应市场。

二、交流电机调速技术的发展特点和趋势

随着电力电子器件、微电子器件,特别是微型计算机及大规模集成电路的发展,再加上现代控制理论向电气传动领域的渗透,交流电机变频调速从电压/频率比值恒定控制法、转差频率控制法发展到矢量控制法,使交流电机瞬时转矩的控制已实现,它可完成加速度、速度和位置等各种控制。交流电机调速技术正向高频化、数字化和智能化方向发展。

1. 采用新型器件发展新型变换器

变换器的品质直接影响到交流调速系统的静、动态性能。电力电子功率变换器的输出电压和电流,除基波分量外,还含有一系列的谐波分量。谐波会使电机产生转矩脉冲,增加电机的附加损耗和电磁噪音,也会使转速出现周期性的波动,从而影响电机平稳运行和调速范围。

50 年代出现的晶闸管算是第一代电力半导体器件,其关断是不可控的。继而出现了关断可控的全控型高开关频率的第二代电力半导体器件,如 GTR, GTO, P-MOSFET, IGBT 等,之后,逆变器就越来越多地采用高频正弦脉宽调制技术。提高开关频率是抑制谐波,提高系统性能的关键之一。但开关频率的提高,会增加逆变器开关管自身的开关损耗,影响逆变器的效率和工作的可靠性,使调制频率受到限制。目前在变换器中现实能采用的器件是 GTR、MOSFET 和 IGBT。

GTR 在逆变器中使用开关频率常选 1.5 kHz 左右,这正好是人耳的敏感区,电机的电

磁噪声较高。另外，GTR 饱和导通的程度完全取决于基极电流的大小，当基极电流为零时，自行关断，属电流控制器件。它在使用中容易出现二次击穿，故一定要设置阻容吸收电路，使 GTR 在开关过程中承受较小的电压。

P-MOSFET 与 GTR 不同，它是属于电压控制器件，靠栅极加正向控制电压形成电场强度来改变导电沟道的宽窄，实现栅极电压对漏极电流的控制，而不是像 GTR 那样是利用基极电流的大小来控制集电极电流。因而 P-MOSFET 的驱动电路功率小，开关频率更高，开关时间仅为 $0.01 \sim 0.03 \mu\text{s}$ 。又由于漏极电流温度系数是负的，不容易出现热点和二次击穿，所以它比 GTR 更可靠。但它的电压电流定额较低，只能在小功率变频调速系统中使用。

IGBT 与 P-MOSFET 相近，也属于电压控制器件，门极驱动简单，保护容易，可运行在较高频率，开关频率可达 20 kHz 。当今的 IGBT 有与 GTR 相同的功率控制能力，且价格并不比 GTR 高多少，很有前途。

电动机电流的高品质动态控制，对实现高性能伺服驱动是特别重要的，采用新型器件 IGBT 构成的自适应电流控制 PWM 逆变器，可以迅速调整电机定子电流的幅值和相位，使电机实际电流迅速跟踪正弦波给定电流，实现电机瞬时电流和瞬时转矩的控制。此时就不必考虑定子电压方程，可使电机的数学模型得到简化，即定子电流能够得到瞬时响应。

除了以上普通的硬开关 PWM 逆变器以外，目前正在开发谐振式逆变器。这种逆变器的中间环节不是直接回路，而是设置一个高频谐振电路，使逆变器中的开关器件在零电压（或零电流）瞬间条件下进行切换，称软开关 PWM 逆变器。软开关的开关损耗小，逆变器效率高、发热低， $\frac{du}{dt}$ 及 $\frac{di}{dt}$ 应力小，电磁噪声低，可靠性高。谐振式逆变器有望成为新一代逆变器结构。

2. 应用现代控制理论研究新的控制方式

交流电机是个多变量、强耦合、非线性的被控对象，采用坐标变换，可以实现定子电流的励磁分量与转矩分量之间的解耦，从而能像直流电机一样，分别对其励磁分量及转矩分量进行独立控制。这就是磁场定向控制的原理，获得了令人满意的静、动态特性。但它仍回避不了交流电机非线性的本质问题，而且并没有完全实现转矩和磁链的动态解耦。所以已有一些学者应用近年来发展的非线性系统反馈线性化理论探索对交流感应电动机的解耦控制，并已获得可喜成果。非线性反馈线性化理论是应用微分几何的原理和方法，选择适当的非线性坐标变换和非线性状态反馈，从而使非线性系统实现大范围内线性化。对于多变量非线性系统，也同时实现线性化和解耦。

近十多年来，又提出了在交流传动系统中应用滑模变结构控制。实质上，它是一种模型参考自适应控制，将预先确定的轨线存入微型计算机，使传动系统强制跟随或沿着该轨线“滑动”，与对象参数的变化和负载转矩的扰动无关。它适用于机器人和机床等电气传动伺服系统。

80 年代中期又出现了感应电动机转矩直接控制法。它是由德国鲁尔大学教授 Depenbrock 首先提出的。它仅需检测定子电压和电流，经过信号处理和双位调节器就可以实现转矩和磁通的直接自调整控制。它避开了矢量控制中复杂的坐标变换和参数的检测，动态性能优于矢量控制。

与此同时，日本学者 Yoshihiyo Moorai 提出了磁通轨迹控制原理，较好地解决了矢量变

换控制系统中存在的坐标变换运算的麻烦，并通过控制磁场对转子的转差角速度来实现感应电动机的转矩和转矩增长率的直接控制。这些都说明控制理论的深入研究将对交流电机调速技术的发展和性能的提高起到非常重要的作用。

3. 微型计算机控制

微型计算机控制或称数字控制，其优点是：使硬件简化；柔性的控制算法使控制灵活、可靠；易实现复杂的控制规律；便于故障诊断和加强保护与监视功能。不足之处：存在采样与量化误差；微机控制的响应慢于专用硬件控制。因应用硬件控制时，信号处理是同步并行进行，推迟的时间可以忽略不计，而微机处理信号是以串行方式进行，需时间长，若要完成几项任务时，又必须以分时方式进行，进一步减慢对信号的处理速度。这种时间的推迟会影响反馈控制。对高性能交流感应电动机伺服系统，由于控制系统复杂，因此，要进行矢量的坐标变换、磁通矢量的在线计算和适应参数变化而修正磁通模型，以及内部的转矩环和加速度、速度、位置的重叠外环控制的在线实时运算调节等，都需要存储多种数据和快速实时处理大量信息。为了满足对信息的快速实时处理的要求，促进微机控制技术的发展和集成电路的发展，可采用以下方案：

(1) 采用多处理器分担任务；

(2) 采用微处理器加数字信号处理器 (DSP)。例如，TMS3210 是由美国德克萨斯州仪器公司在 1983 年研制成功的一种新型外部 16 位、内部 32 位快速信号处理单片机，它具有 500 万次/秒指令执行速度，片内有 16 位×16 位乘法器，一条乘法指令仅需 200 ns，用在交流电机矢量控制系统中，完成一个旋转变换只用 24 μ s，因此 DSP 为交流电动机变频调速系统的发展提供了广阔天地。

第一章 交流电机变频调速的基本原理和机械特性

变频调速的交流电机主要包括感应电动机和同步电动机。感应电动机又分鼠笼式和绕线式。同步电动机包括励磁式、永磁式和磁阻式（反应式）同步电动机。交流电机体积小，重量轻，结构简单，效率高，无直流电机的电刷和换向器，工作可靠，并适用于恶劣环境下工作，宜向高压、高速、大容量方向发展，已得到广泛的应用。

交流电机变频调速就是用改变供电电源频率和协调控制电机端电压的方法调节电机的转速，以满足负载的要求。交流电动机变频调压调速效率高，性能好，是交流调速的主要发展方向。本章首先介绍感应电动机和同步电动机变频调速的基本原理，然后讨论感应电动机变频调速的机械特性和同步电动机变频调速的基本特性。

§ 1-1 交流电机变频调速的基本原理

交流电机旋转磁场的转速 n_1 决定于供电电源的频率 f_1 和电机的极对数 p_n ，其表达式为

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

同步电动机就是按照旋转磁场的转速同步运行的。精确地控制变频电源的频率 f_1 ，就能精确地控制同步电动机转速。若均匀地改变变频电源的频率 f_1 ，则可平滑地调节同步电动机的转速。

由电机学已知，感应电动机的转速为

$$n = \frac{60f_1}{p_n}(1-s) \quad (1-2)$$

由式(1-2)可知，感应电动机的调速方法较多，除改变供电电源频率 f_1 外，还可通过改变电机极对数 p_n ，改变转差率 s 来进行调速。

1. 变极调速

在感应电动机中，改变电机的磁极对数 p_n 调速，只适用于鼠笼型电机，它是通过改变定子绕组的连接来改变绕组极数，从而改变感应电动机的同步转速来实现的，这是有级调速，其级数较少，因而级差较大。

2. 变频调速

当转差率一定时，平滑地改变定子绕组的供电频率 f_1 ，就可均匀地调速，电机的转速 n 基本上正比于 f_1 。

3. 变转差率调速

改变转差率 s 的办法较多，常用的方法：

(1) 改变定子电压 U_1 。

(2) 绕线式转子回路中串入外加电阻 R_f 调速。这种改变转差率调速方法虽然简单方便，但当电机拖动恒转矩负载或电磁功率 P_e 接近于额定值时，串入外加电阻 R_f 运行，消耗在外加电阻 R_f 上和转子电路的转差功率都很大，使之发热，系统效率降低。

在感应电动机中由定子通过气隙传递到转子上的电磁功率 $P_e = P_g + P_r$ ，一部分转变成机械功率 P_m 在轴上输出，另一部分为转差功率 P_s 转变为转子回路的损耗，消耗在电阻上，即 $P_r = sP_e = 3I_2^2(R_2 + R_f)$ ，式中 R_f 为外加电阻。转差越大，损耗越大，特别对恒转矩负载，采用这种调速方法是很不适宜的。但对风机、水泵类负载情况有所不同，因为这种负载消耗的功率随转速的降低 (s 的增加) 而急剧下降，转子电阻中的损耗不大，由于这种调速方法简单成本低，在小容量风机中还采用。

(3) 绕线式转子电路中串入转差频率的附加电势 E_s ，构成串级调速电机或双馈电动机调速。在绕线式转子电路中串入转差频率的附加电势 E_s 的“能量回馈”的办法将转差功率加以利用，可以提高效率。串级调速系统是将转子绕组的转差功率通过整流和逆变作用，经变压器回馈到交流电网加以利用，即使在低速时，串级调速系统的效率也较高。串入附加电势的双馈电机还可以借改变附加电势 E_s 的相位，改善功率因数，适用于调速范围不大的场合，比较经济。

感应电动机的变频调速方法与改变转差率调速方法有本质的区别。前者从高速到低速可以保持有限转差率，因而变频调速具有效率高、调速范围广、精度高等优点。随着电力电子技术的发展，微机的应用，成本逐步降低，其应用越来越广。目前，同步电动机变频调速，(无换向器、无刷直流) 电动机调速，开关磁阻电机，感应电动机的变频调速和绕线式感应电动机双馈调速和串级调速已受到人们普遍重视和广泛应用。

§ 1-2 感应电动机变频调速的机械特性

上面已知道，改变三相感应电动机供电频率 f_1 就可以改变旋转磁场的同步转速 n_1 ，便可达到调速的目的。而同步转速的改变是否影响电机的特性，有何规律，应如何控制，这是首先要讨论的问题。

通常把电机的额定频率称为基频，当变频调速时，可以从基频向下调，也可以从基频向上调，调节范围较大。首先讨论其机械特性。

1-2-1 恒压恒频时的机械特性

一、感应电动机的物理模型

感应电动机由定子、气隙和转子三部分组成，定子与转子之间的气隙均匀分布，其气隙的大小直接影响电机的性能，在工艺允许的条件下，尽量取小。定子由 A, B, C 三相对称绕组构成，转子部分按绕组形式不同，常分笼型转子和绕线式转子两类：绕线式转子与定子相似，也由对称的 a, b, c 三相绕组构成；笼型转子绕组由许多导条组成。定子转子绕组都均匀地分布在气隙圆周表面各自的槽内。根据电机学原理，笼型转子表面每一根导条实际上就构成一相，从电磁关系来看，笼型转子绕组，也可用一组 a, b, c 三相对称绕组与它等效。因而感应电机都可看成由定子三相绕组 A, B, C 和转子三相绕组 a, b, c 组成，并在空间对称分布，其物理模型如图 1-1 所示。

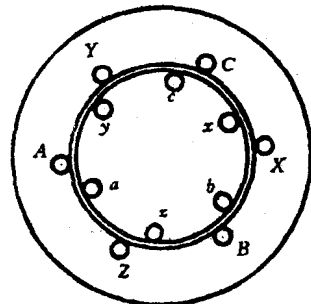


图 1-1 感应电动机的物理模型

二、感应电势和电流

根据电机的工作原理,以转速为 $n_1 = 60f_1/p$ 同步转速旋转的主磁通 Φ (即电机气隙磁通),在定子相绕组中的感应电势的有效值

$$E_1 = 4.44f_1 N_1 k_{w1} \Phi \quad (1-3)$$

式中 $N_1 k_{w1}$ —— 定子相绕组等效匝数。

当转子不动时,转子相绕组中的感应电势为

$$E_2 = 4.44f_1 N_2 k_{w2} \Phi$$

当转子旋转时,转子相绕组中的感应电势为

$$E_2 = 4.44f_2 N_2 k_{w2} \Phi = 4.44sf_1 N_2 k_{w2} \Phi = sE_2$$

式中 f_2 —— 转子电势频率;

$$s = \frac{f_2}{f_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \text{ —— 转差率;}$$

n —— 转子转速。

转子绕组短接时的转子绕组回路的电流

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (sx_{2\sigma})^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + x_{2\sigma}^2}} \quad (1-4)$$

式中 R_2 —— 转子相绕组电阻;

$x_{2\sigma}$ —— 转子相绕组漏抗 ($n = 0$)。

三、电磁转矩和机械特性

将转子边折算到定子边后的等效电路图和相量图如图 1-2 所示。同时还可得到其电磁转矩的物理表达式为

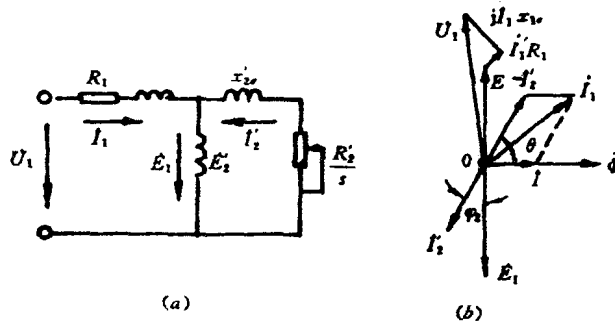


图 1-2 感应电动机的相量图和等值电路图

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P_e}{\Omega_1} = \frac{3E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\frac{2\pi n_1}{60}} \\ &= \frac{3}{2} \sqrt{2} p_n N_1 k_{w1} \Phi I_2 \cos \varphi_2 = K_T \Phi I_2 \cos \varphi_2 \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 $K_T = \frac{3}{2} \sqrt{2} p_n N_1 k_{w1}$ —— 转矩常数;

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2'}{s \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_{2s}')^2}} \quad \text{--- 转子回路功率因数。}$$

φ_2 是转子感应电势 E_2' 与电流 I_2' 之间夹角, 即相位角差。感应电势 $E_2' = E_1$ 落后于电机气隙磁链 ψ 90° 电角度, 相量 Φ 与 I_2' 之间的相角差为 $90^\circ + \varphi_2 = \theta$, $\cos \varphi_2 = \sin \theta$, 代入上式, 电磁转矩的表达式可写成

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi I_{2m}' \sin \theta \quad (1-6)$$

式中 $\psi = N_1 k_w \Phi$ --- 定子绕组的气隙磁链;

$I_{2m}' = \sqrt{2} I_2'$ --- 折算后, 转子相绕组电流幅值。

在额定电压 U_N 和基频 f_N 条件下, 感应电动机的特性 $T_e, \cos \varphi_2, I_2' = f(n)$ 的关系曲线如图 1-3 所示。电机气隙磁通基本不变, 影响转矩的因素主要是电流和功率因数。启动时功率因数很低, 电流虽大, 转矩却不大。在正常工作段, 转矩与转速接近线性关系, 在非稳定区呈双曲线关系。

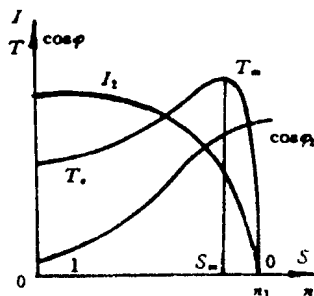


图 1-3 感应电动机的特性曲线

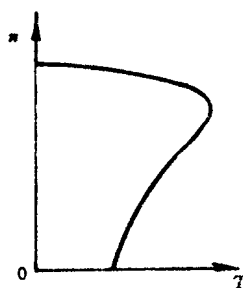


图 1-4 电压频率恒定时, 机械特性曲线

感应电动机的电磁转矩 T_e 还可用参数来表达, 其参数表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n U_1^2 \frac{\frac{R_2'}{s}}{\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_{1s} + x_{2s}')^2 \right]} \quad (1-7)$$

在额定电压 U_N 和基频 f_N 时, $n = f(T_e)$ 曲线如图 1-4 所示。

让 $\frac{dT_e}{ds} = 0$, 得感应电动机的最大电磁转矩 T_m 。

$$T_m = \pm \frac{3 p_n U_N^2}{4 \pi f_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{(x_{1s} + x_{2s}')^2 + R_1^2} \right]} \quad (1-8)$$

最大转矩 T_m 对应的转差率用 s_m 表示为

$$s_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_{1s} + x_{2s}')^2}} \quad (1-9)$$

式中 + 号适用于电动机状态; - 号适用于发电机状态。

当转速 $n = 0, s = 1$ 时, 电磁转矩称为启动转矩, 用 T_s 表示, 让式 (1-9) 中的 $s = 1$, 就得启动转矩

$$T_u = \frac{3p_n U_1^2 R_2'}{2\pi f_N [(R_1 + R_2')^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2]} \quad (1-10)$$

实际应用时,三相感应电机的参数不易得到。根据式(1-7)和式(1-8)两式相比可得

$$\frac{T_e}{T_m} = \frac{2R_2' [R_1 + \sqrt{(x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2 + R_1^2}]}{s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2 \right]}$$

由式(1-9)可知

$$\frac{R_2'}{s} = \sqrt{R_1^2 + (x_{1\sigma} + x_{2\sigma}')^2}$$

于是

$$\begin{aligned} \frac{T_e}{T_m} &= \frac{2R_2' \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)}{\frac{sR_2'^2}{s_m^2} + \frac{R_2'^2}{s^2} + 2R_1R_2'} \\ &= \frac{2 + q}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + q} \end{aligned}$$

式中 $q = \frac{2R_1}{R_2'} s_m \approx 2s_m$, 其中, s_m 一般在 0.1 ~ 0.2 范围内, $\left(\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} \right) \geq 2$, 而 $q \ll 2$ 。上式可简化,得电磁转矩的实用表达式

$$\frac{T_e}{T_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (1-11)$$

利用实用表达式就可根据感应电动机产品目录中给出的数据,方便地导出该电机的机械特性曲线。从产品目录中可查到电机的额定功率 P_N , 额定转速 n_N 和过载能力 $\lambda = \frac{T_m}{T_N}$ 。由此可算得 $s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1}$ 和 $s_m = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ 。

将 s_m 代入实用表达式,即可得到 $T_e = f(s)$ 的关系,对工程计算十分方便。

1-2-2 变频调速的机械特性

三相感应电动机在正常运行范围内,气隙电势 E_1 近似与外施电压 U_1 平衡, $U_1 \approx E_1 = 4.44f_1 N_1 k_{w1} \Phi$, 电机的主磁通 $\Phi \propto \frac{E_1}{f_1} \approx \frac{U_1}{f_1}$, 说明电机运行时,主磁通的大小取决于(电势/频率)值和近似取决于(电压/频率)值。而电机在设计时,均把电机的磁路设计在近饱和处工作,使电机材料得到充分的利用。因此,电机在变频调速时,其频率不管从基频向下调,还是从基频向上调,除了使电机的绕组端的电压和电流不允许超过额定值运行外,电机的磁通也不允许增加。因 Φ 增加会使磁路过饱和,激磁电流会急剧增加,运行性能变坏,这是不允许的。所以在电机变频调速过程中,须对电机的供电电压 U_1 、电流 I_1 和供电频率 f_1 进行调协控制。按控制的原则不同,常分①恒磁通变频调速;②恒功率变频调速;③恒电流变频调速。

一、基频以下,恒磁通变频调速

从基频向下,降低电源频率时,必须同时降低电源电压,降低电压 U_1 主要有两种控制方式。