



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

交流电机调速及 变频器技术

周海波 熊 巍 主 编 ●

徐 哲 王俊清 副主编 ●



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

交流电机调速及 变频器技术

主 编 周海波 熊 巍

副主编 徐 哲 王俊清

编 写 肖 青 黄伟林

主 审 李方园



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

本书根据我国电气自动化控制技术的发展，结合工程实际应用编写，内容由浅入深，由易到难，介绍了交流电机调速的原理和方法，以及变频器的工作原理及运行维护。

本书分为八个模块，主要内容包括异步电动机交流调速和绕线转子异步电动机串级调速系统，变频器工作原理，变频器基本运行项目，变频器的综合控制电路，变频器的选用、安装与维护，变频器在工业上的应用。

本书可作为高职高专院校自动化类、机电类及相关专业的教材，也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

交流电机调速及变频器技术/周海波，熊巍主编. —北京：中国电力出版社，2015.2

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5123-6782-1

I. ①交… II. ①周…②熊… III. ①交流电机-变频调速-高等职业教育-教材 IV. ①TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 288199 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.75 印张 234 千字

定价 20.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着社会对节能环保的要求及各行各业对自动化控制要求的不断提高，变频器的应用日益广泛。自变频器问世以来，电气传动领域发生了一场技术革命，即用成本低廉、维护方便、性能日益优良的交流调速系统取代直流调速系统。变频调速已被公认为最理想、最有发展前途的调速方式。变频器的使用不仅在节能方面有很好的效果，而且随着不断发展，变频器的应用是提高自动化水平、提高工艺水平和产品质量方面也具有重大意义。

在高校中，变频器对于自动化类及机电类专业的学生来说是一门专业核心课程。经过调研，大部分高职高专院校采用的变频器实训设备都是三菱 700 系列的变频器。本书在编写时以三菱 FR-A700 系列变频器为主线，以实用为主，从理论到实践，由浅入深地阐述了变频器调速的基本知识、变频器的基本组成及控制方式，着重讲述了变频器的操作、选用、安装及维护，以及其在风机、供水系统、机床、中央空调等方面的应用实例。考虑到部分学校的教学需求，本书还添加了异步电动机调速系统的相关知识。在内容编排上理论性较强的模块仍然采用传统的结构体系，而实践性较强的模块则采用项目驱动的结构。

本书由长江工程职业技术学院周海波、熊巍任主编，湖北水利水电职业技术学院徐哲、王俊清任副主编，参加编写的还有长江工程职业技术学院的肖青和黄伟林。本书承蒙浙江工商职业技术学院李方园教授审阅，提出了宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

限于作者水平与经验，加之时间仓促，书中疏漏与不足之处在所难免，请读者批评指正。

编 者

2014 年 7 月

目 录

前言

模块一 概述	1
专题 1.1 变频器的发展	1
专题 1.2 变频器的分类	3
专题 1.3 变频器的应用	5
思考与练习	5
模块二 异步电动机交流调速系统	6
专题 2.1 交流调速系统概述	6
专题 2.2 异步电动机调压调速原理和方法	8
专题 2.3 闭环控制的异步电动机调压调速系统	10
思考与练习	16
模块三 绕线转子异步电动机串级调速系统	17
专题 3.1 串级调速系统的工作原理及基本类型	17
专题 3.2 低于同步转速的串级调速系统的机械特性	21
专题 3.3 串级调速系统的效率和功率因数	26
专题 3.4 双闭环控制的串级调速系统	28
专题 3.5 串级调速系统应用中的几个问题	31
专题 3.6 单片机控制的串级调速系统实例	33
思考与练习	35
模块四 变频器的工作原理	36
专题 4.1 变频器的主电路	36
专题 4.2 变频器的控制方式	39
思考与练习	46
模块五 变频器的基本运行项目	47
项目 5.1 初识 FR - A740 变频器	47
项目 5.2 变频器的面板操作	50
项目 5.3 变频器的 PU 运行操作	55
项目 5.4 变频器外部运行的操作	57
项目 5.5 变频器组合运行的操作	59
项目 5.6 变频器多挡速度运行的操作	63

项目 5.7 变频器的 PID 控制运行操作	69
思考与练习	72
模块六 变频器的综合控制电路	73
项目 6.1 继电器与变频器组合的电动机正、反转控制式	73
项目 6.2 继电器与变频器组合的变频与工频的切换控制	76
项目 6.3 继电器与变频器组合的多挡转速的控制	83
项目 6.4 变频器的通信控制	85
思考与练习	93
模块七 变频器选用、安装与维护	95
专题 7.1 变频器的选用	95
专题 7.2 变频器的安装、布线及抗干扰	101
专题 7.3 变频器的保护功能及故障处理	106
思考与练习	117
模块八 变频器在工业上的应用	118
项目 8.1 变频器在风机上的应用	118
项目 8.2 变频器在供水系统节能中的应用	122
项目 8.3 变频器在机床改造中的应用	129
项目 8.4 变频器在中央空调节能改造中的应用	134
思考与练习	138
附录 A 三菱变频器 FR - A700 系列部分功能参数表	139
参考文献	149

模块一 概述

变频调速在国内外被公认为是一种理想的调速方式。变频调速以其自身所具有的调速范围广、调速精度高、动态响应好等优点,应用于许多需要高精度速度控制的场合,以提高产品质量和生产效率。除此之外,变频器还有显著的节能效果,不仅在相关工业设备中,而且在民用产品中,也体现了节约电能、提高设备性能等方面的优势,因而得到了普遍认可和广泛应用。

知识目标

了解变频器的发展现状及未来的发展方向;熟悉掌握变频器的分类方式;了解变频器在几个方面的应用,明确变频调速在交直流调速系统中的优势地位。

技能目标

能对典型的电力电子器件进行简单地识别与测试;能根据国内外常见的变频器铭牌型号熟练区分变频器的种类。

专题 1.1 变频器的的发展

变频器是交流电动机的驱动器,它利用电力半导体器件的通、断将固定频率、电压的交流电变换为频率、电压连续可调的交流电来驱动交流电动机,从而使电动机调速。它与电动机之间的连接框图如图 1-1 所示。

直流电动机拖动和交流电动机拖动先后诞生于 19 世纪,距今已有 100 多年的历史,已成为动力机械的主要拖动技术。很长一段时间内,在不变速拖动系统或调速性能要求不高的场合,采用交流电动机,而在调速性能要求较高的拖动系统中,则主要采用直流电动机。

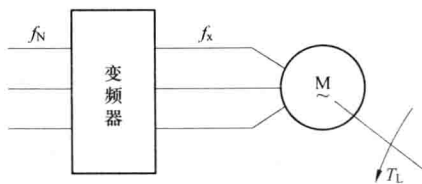


图 1-1 变频器与电动机连接框图

直流调速系统因具有良好的调速性能,在过去乃至今后的一段时间内仍将被广泛使用,但直流电动机本身的换向器及电刷维护困难,有保养成本高、寿命短等不可回避的缺点,因此,随着交流变频技术的发展,直流调速系统将逐渐被交流调速系统所取代。

1. 变频调速技术的发展

20 世纪 60 年代中期,随着普通的晶闸管、小功率管的实用化,出现了静止变频装置,它是将三相的工频电源变换后,得到频率可调的交流电。这个时期的变频装置,多为分立元件,体积大、造价高,大多是为特定的控制对象而研制的,容量普遍偏小,控制方式也很不完善,调速后电动机的静、动态性能还有待提高,特别是低速的性能不理想,因此仅用于纺

织、磨床等特定场合。

20 世纪 70 年代以后,电力电子技术和微电子技术以惊人的速度发展,推动了变频调速传动技术的进步,开始出现了通用变频器。变频器功能丰富,可以适用不同的负载和场合,特别是进入 20 世纪 90 年代,随着半导体开关器件绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、矢量控制技术的成熟,微机控制的变频调速成为主流,调速后异步电动机的静、动态特性已经可以和直流调速相媲美。进入 21 世纪以来,随着变频技术的高速发展与产品功能的拓展,变频器在电力、通信、交通等领域得到空前的发展和应用。

2. 变频器技术的发展方向

变频器技术是建立在电力电子技术基础之上的。在低压交流电动机的传动控制中,应用最多的功率器件有可关断晶闸管 (GTO)、电力晶体管 (GTR)、IGBT 以及智能模块 IPM (intelligent power module),它们的外形图如图 1-2 所示。IGBT、IPM 集 GTR 的低饱和电压特性和 MOSFET 的高频开关特性于一体是目前通用变频器中最广泛使用的主流功率器件。IGBT 集电极-发射极电压可小于 3V,频率可达到 20kHz,1992 年前后开始在通用变频器中得到广泛应用。其发展的方向是损耗更低,开关速度更快、电压更高,容量更大 (3.3kV、1200A)。第四代 IGBT 已问世,它采用了沟道型栅极技术、非穿通技术等大幅度降低了集电极-发射极之间的饱和电压。

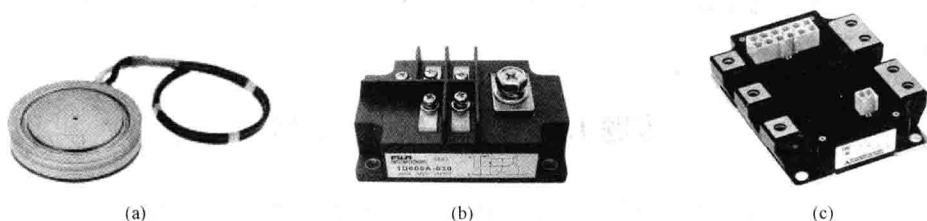


图 1-2 功率器件

(a) GTO; (b) IGBT; (c) IPM

第四代 IGBT 的应用使变频器的性能有了很大的提高。其一是 IGBT 开关器件发热减少,将曾占主回路发热 50%~70%的器件发热降低了 30%。其二是高载波控制,使输出电流波形有明显改善;其三是开关频率提高,使之超过人耳的感受范围,即实现了电机运行的静音化;其四是驱动功率减少,体积更小。

而 IPM 的投入应用比 IGBT 约晚两年,由于 IPM 包含了 IGBT 芯片及外围的驱动和保护电路,甚至还有把光耦也集成于一体,因此是种更为好用的集成型功率器件,目前,在模块额定电流 10~600A 范围内,通用变频器均有采用 IPM 的趋向。

在现代工业和经济生活中,随着电力电子技术、微电子技术及现代控制理论的发展,变频器作为高新技术、节能技术已经广泛应用于各个领域。目前变频器技术主要发展方向如下:

(1) 高水平的控制。微处理器的进步使数字控制成为现代控制器的发展方向,随着大规模集成电路微处理器的出现,基于电动机、机械模型、现代控制理论和智能控制思想等控制策略的矢量控制、磁场控制、转矩控制、模糊控制等高水平技术的应用,使变频器控制进入了一个崭新的阶段。

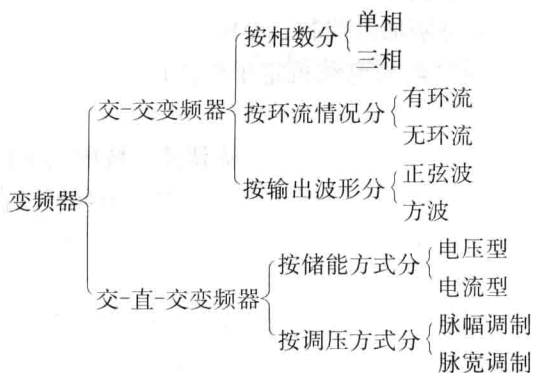
(2) 网络智能化。智能化的变频器在使用前不必进行很多设定,且可以进行故障自诊断、遥控诊断及部件自动置换,以保证变频器的长寿命。

(3) 专门化和一体化。变频器的制造专门化,可以使变频器在某一领域的性能更强。如风机、水泵专用变频器、空调专用变频器、电梯专用变频器、起重机械专用变频器和张力控制专用变频器等。除此之外,变频器逐渐与电动机一体化,使变频器成为电动机的一部分,可使其体积更小、控制更方便。

(4) 环保无公害。变频器能量转换过程的低公害,使变频器在使用过程中的噪声、电源谐波对电网的污染等问题减少到最低程度。

专题 1.2 变频器的分类

变频器可分类如下:



1.2.1 按变频器的原理分类

从变频器的工作原理来看,变频器可分为交-交变频器和交-直-交变频器。

1. 交-交变频器

交-交变频器用于将频率固定的交流电源直接变换成频率连续可调的交流电源,其主要优点是没有中间环节,变换效率高。但其连续可调的频率范围较窄,一般在额定频率的 $1/2$ 以下 ($0 < f < f_n/2$),故主要用于容量较大的低速拖动系统中。

2. 交-直-交变频器

交-直-交变频器先将频率固定的交流电整流后变成直流,再经过逆变电路,把直流电逆变成频率连续可调的三相交流电,由于把直流电逆变成交流电较易控制,因此在频率的调节范围,以及变频后电动机特性的改善等方面,都具有明显的优势,目前使用最多的变频器均属于交-直-交型。

(1) 根据直流环节的储能方式来分,交-直-交变频器可分成电压型和电流型两种。

1) 电压型交-直-交变频器。整流后的中间直流环节靠电容来滤波,目前使用的变频器大部分为电压型交-直-交变频器。

2) 电流型交-直-交变频器。整流后的中间直流环节靠电感来滤波,目前已较少使用。

(2) 根据调压方式的不同来分,交-直-交变频器又可分成脉幅调制和脉宽调制型两种。

1) 脉幅调制(PAM)型变频器。变频器输出电压的大小是通过改变直流电压来实现的,现在已很少使用。

2) 脉宽调制 (PWM) 型。变频器输出电压的大小是通过改变输出脉冲的占空比来实现的。目前使用最多的是占空比按正弦规律变化的正弦波脉宽调制 (SPWM) 方式, 也是以下重点讲解的调制方式。

1.2.2 按变频器的控制方式分类

按不同的控制方式, 变频器可分为变频变压 (U/f) 控制、矢量控制和直接转矩控制三种。

1. 变频变压控制

U/f 控制也称压频比控制, 是对变频器输出的电压和频率同时进行控制, 通过保持 U/f 恒定使电动机获得所需的转矩特性。这种方式控制成本低, 多用于精度要求不高的通用变频器。

2. 矢量控制

根据交流电动机的动态数学模型, 利用坐标变换, 将交流电动机的定子电流分解成磁场分量电流和转矩分量电流, 并分别加以控制。即模仿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, 必须同时控制电动机定子电流的幅值和相位, 也可以说控制电流矢量, 故这种控制方式被称为矢量控制。

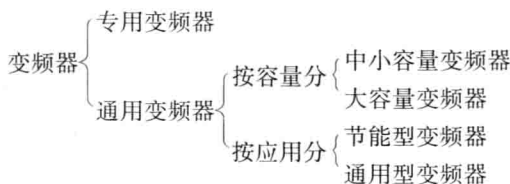
通过矢量控制, 交流电动机可获得类似于直流调速系统的动态性能。矢量变频器应用于异步电动机, 不仅在调速范围上可与直流电动机相媲美, 而且可以直接控制异步电动机转矩的变化, 所以在许多需要精密或快速控制的领域得到了广泛应用。

3. 直接转矩控制

直接转矩控制是通过控制电动机的瞬时输入电压来控制电动机定子磁链的瞬时旋转速度, 改变它对转子的瞬时转差率, 从而达到直接控制电动机输出的目的。

1.2.3 按变频器的用途分类

根据用途的不同, 变频器可分为通用变频器和专用变频器, 如下所示:



1. 通用变频器

通用变频器是变频器家族中数量最多、应用最广泛的一种, 也是本书讲解的主要类型。根据其容量分大容量和中小容量两种, 大容量主要用于冶金工业的一些低速场合。常见的中小容量变频器主要有通用型变频器和节能型变频器两大类。

(1) 通用型变频器。通用型变频器主要用于生产机械的调速。生产机械对调速性能要求往往较高, 如果调速效果不理想会直接影响到产品的质量, 所以通用型变频器必须使变频后电动机的机械特性符合生产机械的要求。因此这种变频器功能较多, 价格也较贵。它的控制方式除了采用 U/f 控制, 还使用了矢量控制技术, 因此, 在各种条件下均可保持系统工作的最佳状态。除此之外, 高性能的变频器还配备了各种控制功能, 如 PID 调节、PLC 控制、PG 闭环速度控制等, 为变频器和生产机械组成的各种开、闭环调速系统的可靠工作提供了技术支持。

(2) 节能型变频器。由于节能型变频器的负载主要是风机、泵类二次方率负载，它们对调速性能的要求不高，因此节能型变频器的控制方式比较单一，一般只有 U/f 控制，功能简单，价格相对便宜。

2. 专用变频器

(1) 高性能专用变频器。随着电力电子、交流调速理论和自动控制理论的发展，异步电动机的矢量控制技术得到了发展，矢量控制变频器及专用电动机构成的交流伺服系统已经达到并超过了直流伺服系统。此外，由于异步电动机还具有环境适应性强、维护简单等许多直流伺服系统所不具备的优点，在要求高速、高精度的控制中，这种高性能交流伺服变频器正在逐步取代直流伺服系统。

(2) 高频变频器。在超精度机械加工中常采用高速电动机。为了满足其驱动要求，出现了采用 PAM 控制的高频变频器，输出主频高达 3kHz，驱动两极异步电动机的最高转速为 18 000r/min。

专题 1.3 变频器的应用

变频调速的应用主要体现在以下几个方面：

(1) 变频器在节能方面的应用。采用变频调速后，风机、泵类负载的节能效果最明显，节电率可达到 20%~60%，这是因为风机、水泵的耗用功率与转速的三次方成正比，当用户需要的平均流量较小时，风机、水泵的转速较低，其节能效果显著。据不完全统计，我国已经进行变频改造的风机、泵类负载约占总容量的 5% 以上，年节电约 400 亿 kWh。由于风机、水泵、压缩机采用变频调速后，可以节省大量电能，所需的投资在较短时间内就可以收回，因此在这一领域中，变频调速应用得最多。目前应用较成功的有恒压供水、中央空调、各类风机、水泵的变频调速。

(2) 变频器在自动化系统的应用。由于控制技术的发展，变频器除了具有基本的调速控制功能之外，还具有多种算术运算和智能控制功能，输出频率精度高达 0.1%~0.01%。它还设置有完善的检测、保护环节，因此在自动化控制系统中得到了广泛的应用，例如化纤工业中的卷绕、拉伸、计量、导丝；玻璃工业中的平板玻璃退火炉、玻璃窑搅拌、拉边机；电弧炉自动加料、配料系统及电梯的智能控制系统等。

(3) 变频器在提高工艺水平和产品质量方面的应用。变频调速除了应用于风机、泵类负载外，还广泛应用于传送、卷绕、起重、挤压、机床等各种机械设备控制领域。它可以提高企业的成品率，延长设备的正常工作周期和使用寿命，使操作和控制系统得以简化，有的甚至可以改变原有的工艺规范，提高整个设备的控制水平。



思考与练习

- 1-1 什么是变频器？变频器的作用是什么？
- 1-2 变频器的未来发展方向是什么？
- 1-3 变频器有哪些种类？其中电压型变频器和电流型变频器的主要区别在哪里？
- 1-4 简述变频器的主要应用场合。

模块二 异步电动机交流调速系统

20 世纪 70 年代以来,随着电力电子技术和控制技术的飞速发展,使得交流调速性能可以与直流调速相媲美、相竞争。交流调速逐步代替直流调速的时代已经到来,交流电动机调速系统已从原来作为直流电动机调速系统的补充手段,发展到已在大部分场合取而代之的应用状态。

知识目标

认识交流调速系统的发展、特点以及分类方法,学习交流调速的原理和技术方法。

技能目标

掌握交流调速分类中的调压调速的原理、调速系统组成,以及相应的调速方法和调速技术。

专题 2.1 交流调速系统概述

2.1.1 交流调速系统的特点

对于可调速的电力拖动系统,工程上往往将其分为直流调速系统和交流调速系统两类。这主要是根据采用什么电流制型式的电动机来进行电能与机械能的转换而划分的,所谓交流调速系统,就是以交流电动机作为电能-机械能的转换装置,并对其进行控制以产生所需要的转速。交流调速系统的特点如下:

- (1) 交流电动机具有更大的单机容量。
- (2) 交流电动机的运行转速高且耐高压。
- (3) 交流电动机的体积小,结构简单、经济可靠、惯性小。
- (4) 交流电动机坚固耐用,可在恶劣环境下使用。
- (5) 调速装置方面,计算机技术、电力电子器件技术的发展,新控制算法的应用,使交流电动机调速装置反应速度快、精度高且可靠性高,达到与直流电动机调速系统同样的性能指标。
- (6) 在风机、泵类负载拖动领域,交流调速节能效果显著。

2.1.2 交流电动机调速系统的现状

- (1) 从中小容量等级发展到大容量、特大容量等级,填补了直流调速系统特大容量电机调速的空白。
- (2) 交流调速系统已具备较高的可靠性和长期连续运行能力,能满足实际工况对可靠性要求高、长期不停机检修等特殊要求。
- (3) 控制装置设计可以达到与直流调速控制同样良好的控制性能,交流电动机设计可以满足各种工业现场,实现了交流电动机调速系统的高性能、高精度转速控制。
- (4) 交流电动机调速系统已从原来作为直流电动机调速系统的补充手段,发展到在大部分场合取而代之的应用状态。

2.1.3 交流电动机调速系统的技术发展趋势

从 20 世纪 30 年代开始,人们就致力于交流调速技术的研究,然而进展缓慢。在相当长的时期内,在变速传动领域,直流调速一直以其优良的性能领先于交流调速。60 年代以后,特别是 70 年代以来,电力电子技术和控制技术的飞速发展,使得交流调速性能可以与直流调速相媲美、相竞争。目前,交流调速已逐步代替直流调速,其趋势可概括如下。

(1) 新型开关元件和储能元件的研制。

(2) 最新控制思想、控制算法、控制技术不断应用于交流调速产品。

(3) 控制装置设计可靠性越来越高,不断解决瞬时停电后的装置安全及恢复正常问题。

(4) 高运算速度、高控制性能的微型计算机产品在现代交流调速装置中不断应用,充分显示了现代控制手段的优越性。

(5) 进行大容量、特大容量等级的新型交流调速电动机技术研究,同时也在进行结构精巧的高效能、高精度交流控制电机技术研究。

2.1.4 交流调速系统分类

交流电动机主要分为异步电动机和同步电动机两大类。交流异步电动机的调速方式通常按以下三种方式分类。

1. 按电动机转速公式分类

电动机转速公式为

$$n = \frac{60f}{p} (1-s); n_1 = \frac{60f}{p} \quad (2-1)$$

式中 p ——电动机定子绕组的磁极对数;

f ——电动机定子电压供电频率;

s ——电动机的转差率;

n_1 ——电动机的同步转速。

从式 (2-1) 中可以看出,调节交流异步电动机的转速有三大类方案。

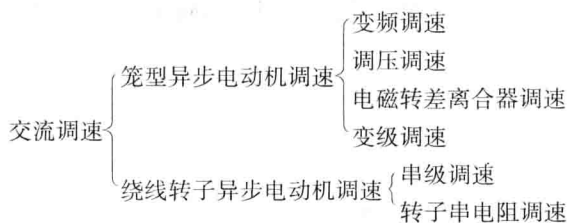
(1) 变级调速 (改变 p)。应用: 双速电机, 两挡速度。

(2) 变转差率调速 (改变 s)。应用: 调压调速, 采用晶闸管, 应用于窄范围无级变速; 转子串电阻调速, 有级变速; 串级调速, 采用晶闸管, 应用于绕线式异步电动机无级变速。

(3) 变频调速 (改变 f)。应用: 全控型电力电子器件宽范围无级变速。

2. 按电动机类型分类

根据交流异步电动机的类型不同, 交流调速系统可分为:



3. 按对电动机转差功率 P_s 的处理方式分类

根据交流异步电动机的基本原理知, 从定子传递给转子的电磁功率 P_{em} 可分为两部分: 一部分是拖动负载的有效功率 $P_m = (1-s)P_{em}$; 另一部分是转差功率 $P_s = sP_{em}$ 。根据电动机转差功率的去向来区分, 交流调速系统可分为三类:

(1) P_s 消耗型调速系统: P_s 全部转换为热能消耗在转子回路中。调压、电磁转差离合器调速、绕线转子异步电动机转子串电阻调速方法属于这一类。

(2) P_s 回馈型调速系统: 除转子铜耗外, 大部分 P_s 通过变流装置转换为有用功率。串级调速方法属于这一类。

(3) P_s 不变型调速系统: P_s 只有转子铜耗, 且无论转速高低, P_s 基本不变。变频、变极调速方法属于这一类。

在交流异步电动机调速系统中, 各种调速方法各有用途, 目前应用最普遍的是笼型异步电动机变压变频调速。同步电动机没有转差功率, 故其调速属于转差功率不变 (恒等于 0) 型的, 只能靠变压变频调速。

2.1.5 交流电动机调速系统的应用

(1) 风机、水泵、压缩机耗能占工业用电的 40%, 进行变频、串级调速, 可以节能。

(2) 对电梯等垂直升降装置调速实现无级调速, 运行平稳。

(3) 纺织、造纸、印刷、烟草等各种生产机械, 采用交流无级变速, 提高产品的质量和效率。

(4) 钢铁企业在轧钢、输料、通风等多种电气传动设备上使用交流变频传动。

(5) 有色冶金行业, 如冶炼厂对回转炉、焙烧炉、球磨机、給料等进行变频无级调速控制。

(6) 油田利用变频器拖动输油泵控制输油管线输油。此外, 在炼油行业变频器还应用于锅炉引风、送风、输煤等控制系统。

(7) 变频器用于供水企业、高层建筑的恒压供水。

(8) 变频器在食品、饮料、包装生产线上被广泛使用, 用以提高调速性能和产品质量。

(9) 变频器在建材、陶瓷行业也获得大量应用, 如水泥厂的回转窑、給料机、风机均可采用交流无级变速。

(10) 机械行业是企业最多、分布最广的基础行业, 从电线电缆的制造到数控机床的制造, 电线电缆的拉制需要大量的交流调速系统。一台高档数控机床上就需要多台交流调速甚至精确定位传动系统, 主轴一般采用变频器调速 (只调节转速) 或交流伺服主轴系统 (既可实现无级变速又使刀具准确定位停止), 各伺服轴均使用交流伺服系统, 各轴联动完成指定坐标位置移动。

专题 2.2 异步电动机调压调速原理和方法

所谓调压调速, 就是通过改变异步电动机定子电压来改变其机械特性的函数关系, 从而达到在一定输出转矩下改变电动机转速的目的。通过改变异步电动机定子电压来实现异步电动机转速可调的控制系统称为调压调速系统。

2.2.1 异步电动机的调压调速原理

异步电动机的机械特性方程式为

$$T_e = \frac{3pU_1^2 R'_2 / s}{\omega_1 [(R_1 + R'_2 / s)^2 + \omega_1^2 (L_{L1} + L'_{L2})^2]} \quad (2-2)$$

式中 p ——电动机的极对数;

R_1 、 R'_2 ——定子每相电阻和折合到定子侧的转子每相电阻；

L_{11} 、 L'_{12} ——定子每相漏感和折合到定子侧的转子每相漏感；

U_1 ——定子相电压；

ω_1 ——供电角频率；

s ——转差率。

可见，当转差率 s 一定时，电磁转矩与定子电压的二次方成正比，这就说明不同的定子电压可以得到一组不同的人为机械特性，如图 2-1 所示。带恒转矩负载时，可得到不同的稳定转速（见图中的 A、B、C 点）。由于普通异步电动机工作段的转差率 s 很小，因此对轻负载来说，调速范围很小。但是，对风机、泵类负载，由于其负载特性为 $T_L = kn^\alpha$ ($\alpha > 1$)，故采用调压调速可得到较大的调速范围（见图中的 D、E、F 点）。

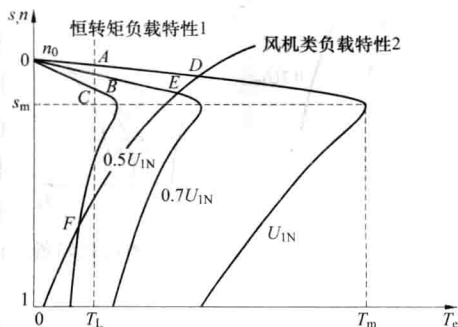


图 2-1 异步电动机在不同电压下的机械特性

1. 机械特性

(1) 不同电压时，空载转速 n_0 不变，即

$$n_0 = n_1 = \frac{60f}{p}$$

式中 n_1 ——同步转速；

p ——极对数。

(2) 不同电压时，临界转差率 s_m 不变，即

$$s_m = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (L_{11} + L'_{12})^2}}$$

(3) 调压调速属于弱磁调速，磁通量公式为

$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4.44f_1 N_s K_N}$$

式中 N_s ——线圈匝数；

K_N ——比例系数。

(4) 调压调速的稳定工作范围为 $0 < s < s_m$ ，调速范围小，风机、泵类负载调速范围可以大一些。

2. 调速范围

由图 2-1 可见，当负载 T_L 为恒转矩负载时，普通笼型电动机工作点定在 A、B、C 点，改变定子电压能实现调速，且机械特性也硬，但是转差率 s 的变化范围限制在 $0 \sim s_m$ ，调速范围有限，无法实现低速运行。为了扩大恒转矩负载的调速范围，应设法增大 s_m 。增大 s_m 可通过增大转子电阻的方法来解决，即采用具有较高转子电阻的电动机。图 2-2 为高转子电阻电动机调压时的人为特性，这种电动机又称为交流力矩电动机，其调速范围扩大，但是机械特性变得很软，负载变化使的静差率很大，低速时过载能力较低，难以满足生产机械的要

求。因此，调压调速要获得较好的调速特性，应引入速度负反馈构成闭环系统。

2.2.2 异步电动机的调压调速方法

交流调压调速是一种比较简便的调速方法。供电电源大都直接取自工频三相 380V 交流电网，为了获得可调电压，必须加上调压器。过去主要是利用自耦变压器（小容量时）或饱和电抗器串在定子三相电路中来实现调压，其原理图如图 2-3（a）和图 2-3（b）所示。饱和电抗器是带有直流励磁绕组的交流电抗器，改变直流励磁电流可以控制铁心的饱和程度，从而改变交流电抗值。当铁心饱和时，交流电抗很小，因而电动机定子电压高；当铁心不饱和时，交流电抗变大，因而定子电压降低，实现降压调速。

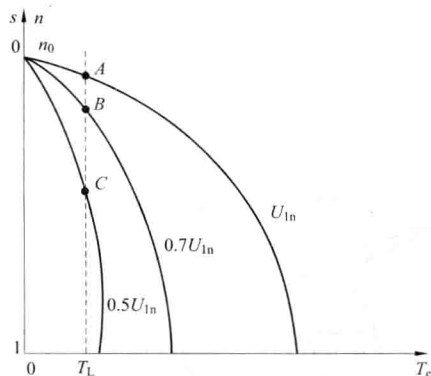


图 2-2 力矩电动机调压调速的机械特性

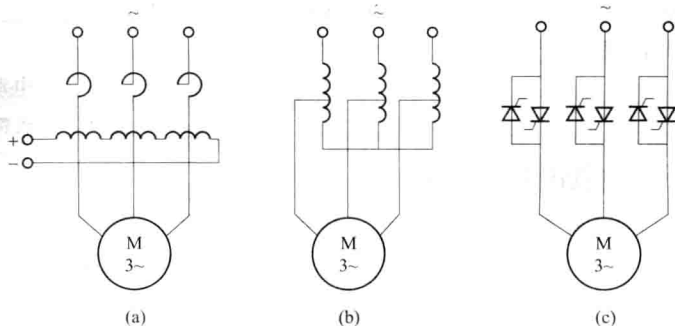


图 2-3 异步电动机调压调速原理图

(a) 串饱和电抗器调压；(b) 串自耦变压器调压；(c) 晶闸管调压

自从电力电子技术发展起来后，晶闸管几乎不消耗铜、铁材料，体积小、质量轻、惯性小、控制方便，因此用晶闸管组成的调压器很快成为自动交流调压器的主要形式，如图 2-3（c）所示。晶闸管交流调压器采用三对反并联的晶闸管或两个双向晶闸管调节电动机定子电压，调速方法比较如下。

(1) 自耦变压器调压：用于小容量电动机，体积大、质量重。

(2) 带直流磁化绕组的饱和电抗器调压：控制铁心电感的饱和程度改变串联阻抗，体积大、质量重。

(3) 晶闸管交流调压：用电力电子装置调压调速，体积小，轻便。

专题 2.3 闭环控制的异步电动机调压调速系统

2.3.1 闭环调压调速系统的组成

调压调速开环控制的缺点：采用普通电动机调速范围窄；采用力矩电动机时，调速范围虽然可以大一些，但机械特性变软，负载变化时的静差率大。为了提高调压调速系统机械特性的硬度及电动机转速的稳定性，常采用闭环控制系统。

图 2-4（a）所示为转速负反馈闭环交流调压调速系统原理图。该系统由速度调节器

(ASR)、晶闸管调压器、测速反馈装置和异步电动机组成。改变给定电压 U_n^* 的大小,就可以改变电动机的转速 n 。由于某种因素使电动机转速发生变化时,系统可自动调节电动机的转速而维持速度稳定。

图 2-4 (b) 所示为该调速系统的静特性,这样的静特性由于具有一定的硬度,所以不但能保证电动机在低速下稳定运行,而且提高了调速的精度,扩大了调速范围。

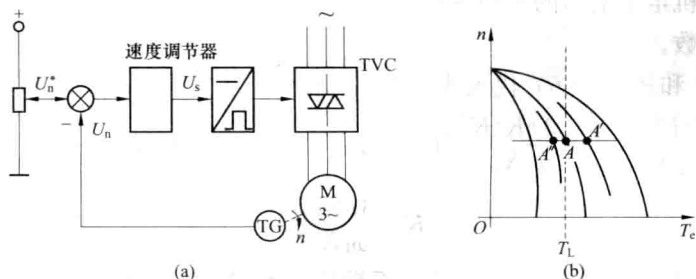


图 2-4 转速负反馈闭环控制的交流调压调速系统

(a) 原理图; (b) 静特性

2.3.2 闭环调压调速系统的静特性分析

根据图 2-4 (a) 所示的系统原理图可画出闭环调压调速系统的静态结构框图,如图 2-5 所示。

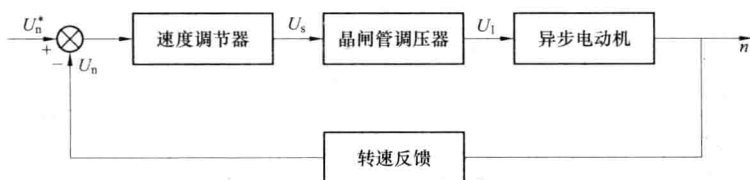


图 2-5 闭环调压调速系统静态结构框图

根据图 2-5, 可以写出各控制环节的输入输出量的关系

$$\begin{aligned} U_s &= K_n (U_n^* - U_n) \\ U_1 &= K_s U_s \\ U_n &= a n \end{aligned} \quad (2-3)$$

式中 K_n ——速度调节器的静态放大倍数;

K_s ——调节器(包括触发器)的放大倍数;

a ——转速负反馈系数。

联立推得

$$U_1 = K_s K_n (U_n^* - a n) = K_s K_n [U_n^* - a n_1 (1-s)] \quad (2-4)$$

式中 n_1 ——异步电动机的同步转速。

根据异步电动机机械特性的实用表达式,当电动机在额定负载以下运行时,转差率 s 很小, $s/s_{cr} \ll s_{cr}/s$, 故电磁转矩为

$$T_e = \frac{2T_{cr}}{s_{cr}/s + s/s_{cr}} \approx \frac{2T_{cr}}{s_{cr}} s \quad (2-5)$$