

全国高职高专教育电子电气类专业规划教材

变频器原理 及应用

龚仲华 主 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

全国高职高专教育电子电气类专业规划教材

变频器原理及应用

Bianpinqi Yuanli ji Yingyong

龚仲华 主 编

李永茂 杨红霞 副主编

 高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书以三菱公司使用最广泛的FR-500/700系列变频器为主线,以较新的视野,全面、系统地叙述了变频器原理与应用的有关内容,突出了技术的先进性、知识的综合性,理论联系实际,重在应用。

全书共分七章,内容包括交流电机控制系统概述,变频器的调速原理、电路设计、运行与控制、常用功能与应用、调试与维修,变频调速系统的工程设计等。大部分章后均附有复习思考题,第3章~第6章还附有实践与操作练习。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校电气自动化技术、机电一体化技术等专业的教材,也可供本科院校师生与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频器原理及应用/龚仲华主编. —北京:高等教育出版社,2011.6
ISBN 978-7-04-031928-6

I. ①变… II. ①龚… III. ①变频器-高等职业教育-教材
IV. ①TN773

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第058003号

策划编辑 孙 薇 责任编辑 孙 薇 封面设计 杨立新 版式设计 王艳红
插图绘制 尹 莉 责任校对 姜国萍 责任印制 尤 静

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京市南方印刷厂	网上订购	http://www.landrace.com
开 本	787×1092 1/16		http://www.landrace.com.cn
印 张	15.75	版 次	2011年6月第1版
字 数	380 000	印 次	2011年6月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	27.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 31928-00

前 言

变频器是一种广泛用于工业自动化领域的新型交流调速装置。本书从应用型人才培养的实际应用要求出发,以较新的视野,对变频器的调速原理、电路设计、运行与控制、常用功能与应用、调试与维修等方面的内容进行了较为全面的叙述。

全书编写力求具有以下特点:

(1) 理论简洁、突出实用。以变频器的应用为主线,在简要介绍变频器的调速原理与相关技术的基础上,对工程应用密切相关的变频器电路设计、功能与应用、调试与维修知识进行了较为全面系统、深入具体的介绍。

(2) 面向应用、强调技能。全面叙述了变频器的运行控制、功能与应用、操作、维修、调试知识,并在变频器的电路设计、运行与控制、常用功能与应用、调试与维修等章后附有实践与操作练习,体现了高职高专能力培养的特色;而变频调速系统的工程设计内容则可直接供工程技术人员参考,提高了本书的工程应用参考价值。

(3) 选材典型、案例具体。选择目前工程使用最广的三菱公司产品 FR-500/700 系列变频器作为对象,对变频器实用功能的介绍深入具体;全部案例均来自工程一线,应用知识介绍综合典型。

全书由龚仲华(二级教授,教授级高级工程师)担任主编,李永茂(高级工程师)、杨红霞(副教授)参与了第2、7章的编写,宋黎光老师、宁惠刚老师参与了第7章的编写,其余内容均由龚仲华教授编写。本书由北京联合大学童启明老师主审,他对全书进行了认真的审阅,提出了许多宝贵的意见和建议;同时,本书在编写过程中还得到了三菱公司的大力支持,并参阅了该公司的产品说明书与技术资料,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足与错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

2011年2月

目 录

第 1 章 交流电机控制系统概述	1	复习思考题	108
1.1 交流调速的基本概念	1	实践与操作练习	108
1.2 交流调速系统的性能与比较	4	第 5 章 变频器的常用功能与应用	111
1.3 当代变频器的技术特点与 发展方向	8	5.1 加减速与制动功能	111
复习思考题	11	5.2 失速防止与重新启动功能	117
第 2 章 变频器的调速原理	12	5.3 PID 调节功能	122
2.1 感应电机的运行原理	12	5.4 工频切换功能	129
2.2 交流电的逆变	14	5.5 升降负载控制功能	134
2.3 PWM 逆变原理	24	5.6 通信与网络控制功能	141
复习思考题	29	复习思考题	154
第 3 章 变频器的电路设计	30	实践与操作练习	154
3.1 产品规格与技术性能	30	第 6 章 变频器的调试与维修	155
3.2 硬件组成与连接总图	34	6.1 变频器的基本操作	155
3.3 电路设计要求与实例	40	6.2 参数的设定与保护	166
3.4 基本运行控制信号	51	6.3 变频器的状态显示与输出	172
3.5 基本状态输出信号	54	6.4 变频器的维修	177
3.6 输入/输出的功能定义	59	6.5 报警的显示与处理	181
3.7 工程应用实例与设计范例	64	复习思考题	193
复习思考题	70	实践与操作练习	194
实践与操作练习	70	第 7 章 变频调速系统的工程设计	206
第 4 章 变频器的运行与控制	73	7.1 工作条件对性能的影响	206
4.1 操作模式与运行方式	73	7.2 电机与变频器的选择	208
4.2 模拟量输入的选择与调整	83	7.3 变频调速系统的电气设计	212
4.3 其他运行方式的频率给定	90	7.4 安装与连接设计	216
4.4 电机的选择与参数设定	93	附录 三菱 FR-500/700 系列变频器	
4.5 变频控制方式的选择	100	参数总表	226
4.6 输出频率的限制	106	参考文献	245

第 1 章

交流电机控制系统概述

1.1 交流调速的基本概念

1. 交流调速方式

交流电机控制系统是以交流电动机为执行元件的位置、速度或转矩控制系统的总称。按照系统的习惯,只进行转速控制的系统称为“传动系统”;而能实现位置控制的系统称为“伺服系统”。

交流传动系统通常用于机械、矿山、冶金、纺织、化工、交通等行业,其使用最为普遍,一般以感应电机^①为对象,其最为常用的控制装置是变频器。交流伺服系统主要用于数控机床、机器人、航天航空等需要大范围调速与高精度位置控制的场合,其控制装置为交流伺服驱动器,驱动电机为专门生产的交流伺服电机。

感应电机的调速方法有很多种,常用的有图 1-1.1 所示的变极调速、调压调速、串级调速、变频调速等。

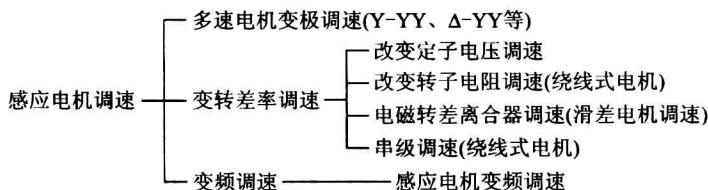


图 1-1.1 感应电机调速系统的种类

变极调速通过转换感应电机的定子绕组的接线方式(Y-YY、Δ-YY),变换了电机的磁极数,改变的是电机的同步转速,它只能进行有限级(一般为 2 级)变速,故只能用于简单变速或辅助变速,且需要使用专门的变极电机。变转差率调速系统配套的定子调压、转子变阻、滑差调节、串级调速等装置均为大功率部件,其体积大、效率低、成本高,且调速范围、调速精度、经济性等指标均较低。因此,随着变频器的日益普及,变频调速已经成为感应电机调速的技术发展趋势。

^① 为了从原理上区分各类交流电机,异步电机一词国外已被感应电机取代,本书采用国际通用名词。

2. 发展概况

与直流电机^①相比,交流感应电机具有转速高、功率大、结构简单、运行可靠、体积小、价格低等一系列优点,但从控制的角度看,感应电机是一个多变量、非线性对象,其控制远比直流电机复杂,因此,在一个很长的时期内,直流电机控制系统始终在电气传动领域中占据主导地位。

对交流电机控制系统来说,无论速度控制还是位置或转矩控制,都需要调节电机转速,因此变频调速是所有交流电机控制系统的基础。电力电子器件、晶体管脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术、矢量控制理论是实现变频调速的技术保证。

通过 PWM 技术实现变频是目前公认的最佳控制方法。20 世纪 70 年代初,随着微电子技术的迅猛发展,第二代“全控型”电力电子器件的实用化,使得高频、低耗的晶体管 PWM 变频成为了可能,基于传统电机模型与经典控制理论的方波永磁同步电机(BLDCM, Brushless DC Motor, 亦称为无刷直流电机)交流伺服驱动系统与 V/f 控制^②的变频调速系统被迅速实用化,变频器从此进入了工业自动化的各领域。

早期的交流伺服与变频器都是基于传统的电机模型与控制理论、从电机的静态特性出发所进行的控制,它较好地解决了交流电机的平滑调速问题,为交流控制系统的快速发展奠定了基础,同时由于其结构简单、控制容易、生产成本低,至今仍有所应用。

V/f 控制的变频调速的最大缺点是无法实现转矩的控制,特别在电机低速工作时的转矩输出较小,因而不能用于高精度、大范围调速、恒转矩调速。

随着对感应电机控制理论研究的深入,20 世纪 70 年代德国 F. Blaschke 等人提出了感应电机的磁场定向控制理论、美国 P. C. Custman & A. A. Clark 等人申请了感应电机定子电压的坐标变换控制专利,感应电机控制开始采用全新的矢量控制理论,而微电子技术的迅速发展,则为矢量控制理论的实现提供了可能。20 世纪 80 年代初,采用矢量控制的交流伺服驱动与变频器产品相继在 SIEMENS(德)、YASKAWA(日)、ROCKWELL(美)等公司研制成功,并被迅速推广普及。

经过 30 多年的发展,交流电机的控制理论与技术已经日臻成熟,各种高精度、高性能的交流电机控制系统不断涌现,特别是交流伺服驱动系统已经在数控机床、机器人上全面取代直流伺服驱动系统。

“变流”与“控制”是交流调速的两大共性关键技术,前者主要涉及电力电子器件应用与电路拓扑结构问题;后者是感应电机控制理论研究与控制技术实用化问题,图 1-1.2 是世界变频器主要技术的应用与发展简图。

在控制理论方面,当代变频器已从最初单一的 V/f 控制发展到了今天的矢量控制与直接转矩控制;在控制技术上,则从模拟量控制发展到了全数字控制与网络控制。变频器的速度控制范围与精度得到大幅度提高,转矩控制与位置控制功能进一步完善,以至于在某些场合开始逐步替代需要配套专用电机的主轴驱动器与伺服驱动器。

在电力电子器件的应用上,变频器主要经历了第二代“全控型”器件(主要为 GTR)、第三代“复合型”器件(主要为 IGBT)与第四代功率集成电路(主要为 IPM)三个阶段,IGBT 与 IPM 为当

① 电机包括“电动机”与“发电机”两类,本书中的电机专指“电动机”。

② V/f 应为英文电压/频率(Voltage/Frequency)首字母的缩写,在国外以 V/f 表示,但在国内常被表示为 U/f 控制,本书所采用的是国际通用表示法。

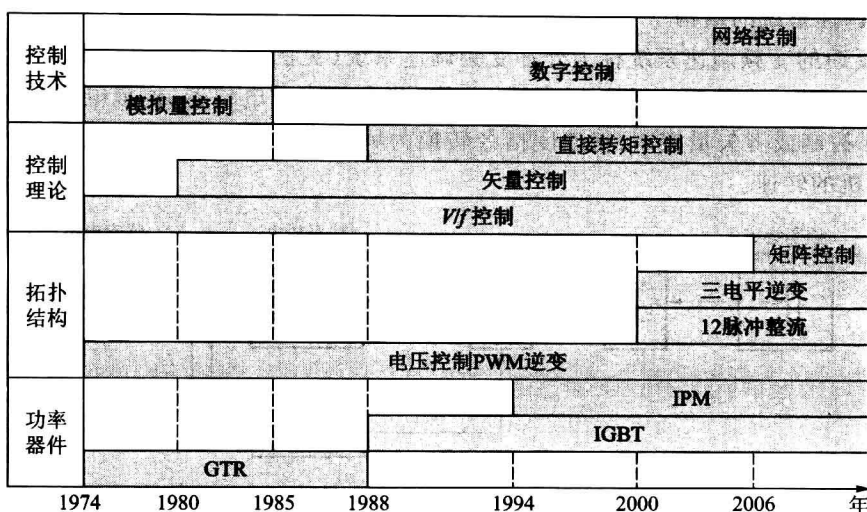


图 1-1.2 世界变频器主要技术的应用与发展简图

代变频器的主流器件。在电路拓扑结构(主电路的结构形式)上,中小容量的变频器目前仍以“交-直-交”PWM控制型逆变为主;但12脉冲整流、双PWM变频、三电平逆变等技术已在变频器上应用;新一代“交-交”逆变、矩阵控制的变频器(Matrix Converter)已经被实用化。

3. 变频器与伺服驱动

在以感应电机、交流伺服电机等为控制对象的交流电机速度控制系统中,尽管有开环V/f控制、闭环V/f控制、转差频率控制、开环磁通矢量控制、开环或闭环电流矢量控制等多种控制方式,但其本质都是通过改变供电频率来达到改变电机转速的目的,从这一意义上说,当前的交流调速装置都可以称为“变频器”。但是,考虑到交流伺服电机控制装置的主要功能是实现位置跟随控制,速度、转矩控制服务于位置控制,因此,习惯上将其称为“伺服驱动器”;而“变频器”则专指用于通用感应电机变频调速的控制器。

变频器作为一种通用控制装置,其控制对象是来自不同厂家生产、不同参数的感应电机。从后述的交流电机调速原理可知,建立电机的数学模型是实现精确控制的前提,它直接决定了调速系统的性能,依靠当前的技术还不能做到用一个通用控制装置来精确控制任意控制对象,因此变频器被分为通用型与专用型两类。

通用型变频器就是人们平时常说的“变频器”,它可以用于不同厂家生产、不同参数的感应电机控制。通用变频器在设计时由于无法预知控制对象的各种参数,电机模型需要进行大量的简化与近似处理,因此其调速范围一般较小,调速性能也较差。矢量控制变频器一般可通过“自动调整(自学习)”操作来自动测试一些简单的电机参数,在有限范围内提高模型的准确性,改善控制性能。

为了实现大范围、高精度变频调速控制,就必须预知控制对象(电机)的精确参数,因此,只能通过配套专用感应电机的专用变频器才能实现。专用变频器所配套的感应电机由变频器生产厂家专门设计,并经过严格的测试与试验,其数学模型十分精确,采用闭环矢量控制后的调速性能大大优于通用变频器,且能够实现较为准确的转矩与位置控制,此类变频器的价格高、性能好,通常用于数控机床主轴的大范围、精确调速,故称“交流主轴驱动器”。

4. 变频调速系统的结构

无速度反馈的变频调速系统称为开环变频调速系统(见图 1-1.3),它是目前最为常用的变频调速方式。在开环变频调速系统中,速度(频率)指令可通过电位器、模拟电压等形式输入;变频器通过 V/f 控制或者矢量控制,将速度指令转换为频率、幅值、相位可变的电机定子电压与电流,以控制电机的转速。

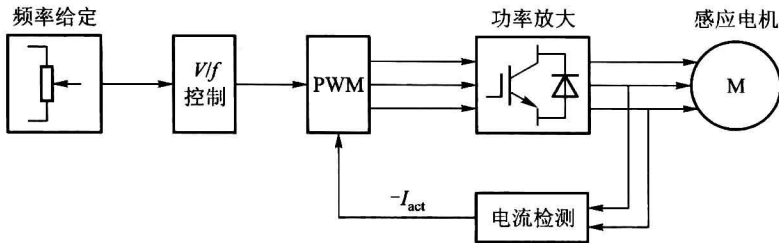


图 1-1.3 开环变频调速系统

开环变频调速系统的结构简单,使用方便,维修容易,也不存在闭环系统的稳定性问题,但由于系统不能检测电机的实际转速,因而无速度自动调整功能,其调速精度较差,只能用于调速性能要求不高的场合。

带有速度测量反馈装置的变频调速系统称为闭环变频调速系统(见图 1-1.4)。闭环变频调速系统在开环的基础上增加了速度检测装置与速度调节器,通过给定与反馈间的“误差”控制,实现了速度闭环自动调整功能,提高了调速精度。

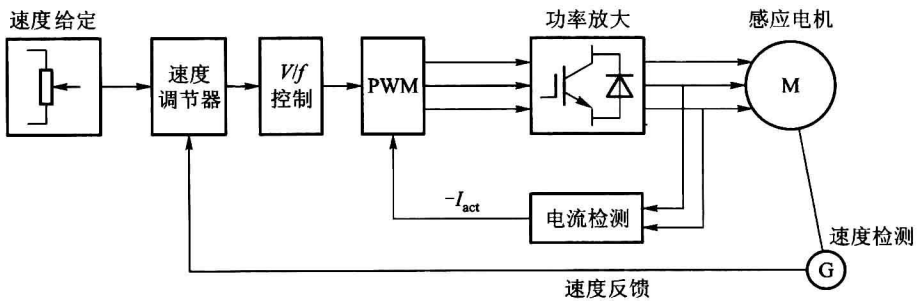


图 1-1.4 闭环变频调速系统

但由于感应电机结构的限制,当前最先进的、采用闭环矢量控制的变频器,其调速范围也难以超过 1 : 1 000;因此目前感应电机的变频调速还只能用于调速范围相对较小,对动态性能与调速精度要求相对较低的场合。

1.2 交流调速系统的性能与比较

1. 交流调速的主要技术指标

变频器与交流伺服是新型的交流电机速度调节装置,传统意义上的“调速指标”已经不能全面反映调速系统的性能,需要从静态、动态两方面来重新定义技术指标。调速系统不但要满足工

作机械稳态运行时对转速调节与速度精度的要求,而且还应具有快速、稳定的动态响应特性。因此,除功率因数、效率等经济指标外,衡量交流调速系统技术性能的主要指标有调速范围、调速精度与速度响应三方面。

(1) 调速范围

调速范围是衡量系统变速能力的指标,一般以系统在一定的负载下实际可以达到的最低转速与最高转速之比(如 1 : 100)或以最高转速与最低转速的比值(如 $D = 100$)来表示。

通用变频器的调速范围需要注意以下两点:

① 调速范围不是变频器参数中的频率控制范围。变频器的调速范围要远远小于频率控制范围,因为当变频器输出频率小于 2 Hz 时,电机无法输出正常运行所需的转矩。因此,即使像三菱公司最先进的 FR-A740 系列变频器,虽然其频率控制范围可达 0.01 ~ 400 Hz(1 : 40 000),但有效的调速范围只有 1 : 200。

② 通用变频器的调速范围不能增加传统“额定负载”的转矩约束条件。因为,当变频器采用 V/f 控制时只能在额定频率的点上才能输出额定转矩。定义通用变频器调速范围的转矩条件有所不同,三菱公司一般以变频器能短时输出 150% 转矩的范围定义为调速范围;安川等公司则以连续输出转矩大于规定值的范围定义为调速范围。

(2) 调速精度

交流调速系统的调速精度在开环与闭环控制系统中有不同的含义。开环系统的调速精度是指调速装置控制 4 极标准感应电机、在额定负载下所产生的转速降与电机额定转速之比,其性质与传统的静差率类似,计算式如下

$$\delta = \frac{\text{空载转速} - \text{满载转速}}{\text{额定转速}} \times 100\%$$

对于闭环控制的调速系统,计算式中的“额定转速”应为系统的最高转速。调速精度与调速系统的结构密切相关,一般而言,对于同样的控制方式,采用闭环控制后的调速精度可比开环提高 10 倍。

(3) 速度响应

速度响应是交流调速系统新增的技术指标,是指系统在负载惯量与电机惯量相等的前提下,速度指令以正弦波形式给定时,输出可以完全跟踪给定变化的正弦波频率值。“速度响应”有时也称“频率响应”,分别用 rad/s 或 Hz 两种不同的单位表示,转换关系为 $1 \text{ Hz} = 2\pi \text{ rad/s}$ 。

速度响应是衡量交流调速系统的动态跟随性能的重要指标,也是各种交流调速系统的主要差距(见表 1-2.1)。

表 1-2.1 变频器、交流主轴驱动器与伺服驱动器的速度响应比较表

控制装置		速度响应/(rad/s)	频率响应/Hz
通用变频器	V/f 控制	10 ~ 20	1.5 ~ 3
	闭环 V/f 控制	10 ~ 20	1.5 ~ 3
	开环矢量控制	20 ~ 30	3 ~ 5
	闭环矢量控制	200 ~ 300	30 ~ 50
交流主轴驱动器		300 ~ 500	50 ~ 80
交流伺服驱动器		3 000 ~ 4 500	500 ~ 700

2. 交流调速系统的性能比较

通用变频器、交流主轴驱动器、交流伺服驱动器三大类调速系统的性能有很大的差别,具体如下。

(1) 输出特性

图 1-2.1 为国外某著名公司在变频器控制 60 Hz/4 极标准感应电机 (V/f 控制, 矢量控制时性能有所提高)、交流主轴驱动器控制专用感应电机、交流伺服驱动器控制 PMSM 电机时的输出特性实测结果。

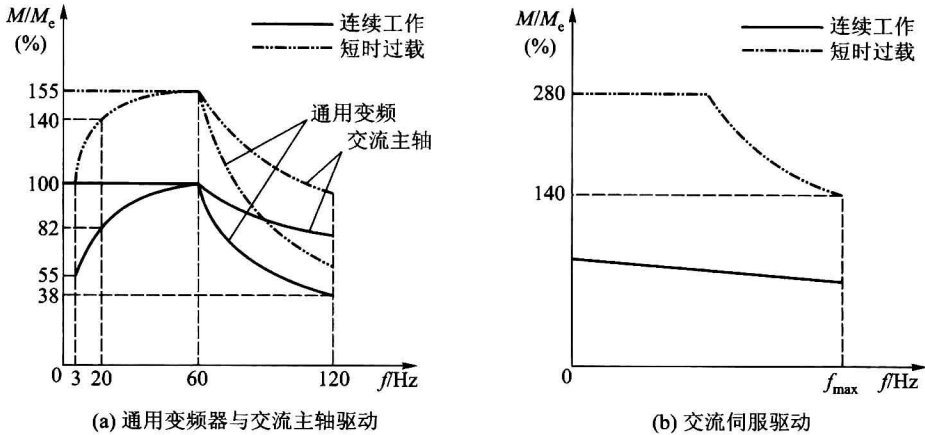


图 1-2.1 交流电机控制系统的输出特性

由图可见,采用 V/f 控制的通用感应电机只能在额定频率的点上才能输出 100% 转矩;使用专用感应电机的交流主轴驱动可在额定转速以下区域均输出 100% 转矩;而交流伺服驱动则可以在全范围输出 100% 转矩。因此,通用变频器控制恒转矩负载时必须“降额”使用。

引起通用变频器低速输出转矩下降的一个重要原因是通用电机只能依靠转子轴上的风机进行“自通风”冷却,无独立的冷却风机,随着转速的下降,其冷却能力将显著下降,导致了电机工作电流的下降。为此,在通用感应电机上安装独立的冷却风机是提高通用变频器低速输出转矩的有效措施。

(2) 控制对象

交流伺服电机的转子磁场(永久磁铁)不能调节,它是一种全范围恒转矩调速的驱动器,特别适合于恒转矩负载调速(如机床进给驱动),一般不能用于恒功率调速(如不能作为机床主轴控制)。

交流主轴驱动的控制对象是专用感应电机,它可通过定子磁链的控制进行弱磁升速,这是一种额定转速以下具有恒转矩特性、额定转速以上具有恒功率特性的调速系统,比较适合于机床主轴的调速控制。

变频器的输出特性无规律,在整个调速范围上,电机实际可保证的输出转矩与功率只有额定输出的 50% 左右。因此,无论对于恒转矩负载还是恒功率负载,在选用时都必须留有足够的余量。一般而言,当采用通用变频器进行恒转矩调速时,宜按照负载连续转矩的 2 倍来选择电机与变频器。

(3) 功率范围

通用变频器可控制的电机功率在三类产品中为最大,目前已可达 300 ~ 630 kW;交流主轴驱动多用于数控机床的主轴控制,根据实际需要,功率范围一般在 100 kW 以下;而交流伺服则是用于高速、高精度位置控制的驱动器,电机的功率范围一般在 15 kW 以下。

此外,由于交流主轴与交流伺服是针对特定电机的专用控制器,驱动器与电机原则上需要一一对应;而变频器是一种通用产品,对电机的参数无太多要求,因此,只要变频器容量允许,它可以用于不同功率电机的控制,如利用 7.5 kW 的变频器控制 3.7 kW 或 5.5 kW 的电机不但可行而且还可经常使用;在需要时还可以通过电路切换利用同一变频器来控制多台电机(称为 1:n 控制)。

(4) 过载特性

通用变频器、交流主轴驱动器、交流伺服的过载性能有较大差别,通常而言,三者可以承受的短时过载能力依次为 100% ~ 150%、150% ~ 200%、200% ~ 350%。

(5) 制动性能

交流伺服电机的转子安装有永久磁铁,停电时可以通过感应电动势的作用在定子绕组中产生短路电流,输出一定的制动转矩;而交流主轴与变频器控制的是感应电机,一旦停电旋转磁场即消失,因此在停电制动有较高要求的场合应使用机械制动器。

此外,由于交流伺服电机的转子永久磁铁可以产生固定的磁场,只要定子绕组加入电流,即使在转速为零时仍能输出转矩,即具有所谓“零速锁定”功能。而感应电机的输出转矩需要通过定子旋转磁场与转子间的转差产生,故交流主轴驱动器与变频器在电机停止时无转矩输出。但对于具有闭环位置控制功能的交流主轴驱动器来说,由于位置调节器的增益可以做得很高,因此如果电机在零位附近产生位置偏移,可以产生较大的恢复力矩。

3. 交流调速系统的性能比较

目前市场上各类交流调速装置的产品众多,由于控制方式、电机结构、生产成本与使用要求的不同,调速性能的差距较大,表 1-2.2 为通用变频器、交流主轴驱动器、交流伺服驱动器的性能比较表,使用时应根据系统的要求选择合适的控制装置。

表 1-2.2 交流调速系统性能比较表

项 目	交流伺服驱动器	通用变频器				交流主轴驱动器
电机类型	永磁同步电机	通用感应电机				专用感应电机
适用负载	恒转矩	无明确对应关系,选择时应考虑 2 倍余量				恒转矩/恒功率
控制方式	矢量控制	开环 V/f 控制	闭环 V/f 控制	开环矢量控制	闭环矢量控制	闭环矢量控制
主要用途	高精度、大范围速度/位置/转矩控制	低精度、小范围变速; 1:n 控制	小范围、中等精度变速控制	小范围、中等精度变速控制	中范围、中高精度变速控制	恒功率变速;简单位置/转矩控制
调速范围	≥ 1 : 5 000	≈ 1 : 20	≈ 1 : 20	≤ 1 : 200	≥ 1 : 1 000	≥ 1 : 1 500
调速精度	≤ ±0.01%	±(2 ~ 3)%	±0.3%	±0.2%	±0.02%	≤ ±0.02%

续表

项 目	交流伺服驱动器	通用变频器				交流主轴驱动器
		400 ~ 650 Hz	400 ~ 650 Hz	400 ~ 650 Hz	400 ~ 650 Hz	
最高输出频率	—	400 ~ 650 Hz	400 ~ 650 Hz	400 ~ 650 Hz	400 ~ 650 Hz	200 ~ 400 Hz
最大起动转矩/最低频率(转速)	200% ~ 350% / 0 (r/min)	150% / 3 Hz	150% / 3 Hz	150% / 0.3 ~ 1 Hz	150% / 0 (r/min)	150% ~ 200% / 0 (r/min)
频率响应	400 ~ 600 Hz	1.5 ~ 3 Hz	1.5 ~ 3 Hz	3 ~ 5 Hz	30 ~ 50 Hz	50 ~ 80 Hz
转矩控制	可	不可	不可	不可	可	可
位置控制	可	不可	不可	不可	简单控制	简单控制
前馈、前瞻控制等	可	不可	不可	不可	可	可

1.3 当代变频器的技术特点与发展方向

1. 技术特点

变频器作为一种面向感应电机的通用控制装置,与交流主轴驱动器、交流伺服驱动器等专用控制器比较,有如下明显的特点:

① 多种控制方式兼容。变频器的 V/f 控制、矢量控制与直接转矩控制有各自的特点与应用范围,目前还没有哪一种控制方式可以完全代替其他控制方式。当代变频器一般可以兼容多种控制方式,使用者可以根据实际需要设定参数选择控制方式。

② 开环/闭环通用。闭环控制可以通过反馈消除误差,提高稳态精度,但也带来了系统稳定性问题。为适应不同的控制要求,当代变频器一般采用开环/闭环通用的结构形式,只要简单地增加闭环接口模块,便可以实现闭环控制,这一结构变换可同时用于 V/f 控制、矢量控制与直接转矩控制。

③ 适应性强、性能低。通用变频器是一种面向普通感应电机的控制装置,由于其内部兼容了多种控制方式,因而可用于各种负载类型、几乎所有交流电机的控制,并具有 $1:n$ 多电机控制功能,其通用性强,适应面广。但是由于通用变频器的控制模型不确定,增加了控制难度,因此其性能明显低于使用专用电机的交流主轴与伺服驱动器。

2. 发展方向

变频器自产生起直到今天一直是交流调速系统的研究热点。20 世纪对变频器的研究主要集中于新型电力电子器件的应用、电路拓扑结构的改进与完善以及控制理论与控制方法的探索上,并且取得了很大的进展,变频器的动态性能与控制精度得到了大幅度提高。

进入 21 世纪以来,随着社会的进步、信息技术的普及以及资源、环境等深层次社会问题的显露,人们在继续不断提高变频器本身性能的同时,更加注重了如何提高变频器的功率因数、节能降耗、减少对电网公害、改善环境影响以及它与工业自动化网络的完美结合等系统性问题,高性

能化、环保化、网络化已成为当代变频器发展的必然趋势。

(1) 变频器的高性能化

① V/f 控制的改进。 V/f 控制是建立于感应电机等效电路基础之上、忽略定子电阻等诸多因素影响的前提下所得出的控制方案,其最大优点是变频控制与对象的特性参数无关,故可以用于各类交流电机的控制及 $1:n$ 多电机控制,且低速速度波动小;但其缺点是低频工作时随定子电阻在阻抗中所占的比重加大,输出转矩将明显下降,为此当代变频器采用了低频转矩提升、多点 V/f 设定、速度误差补偿等方法提高性能。

低频转矩提升是通过人为规定 $f=0$ 时的输出电压,来改变 V/f 控制曲线、补偿定子电阻压降的一种方法,它可以提升低频输出转矩。多点 V/f 设定不但可以提升低频输出转矩,而且还可以改变 V/f 控制曲线的形状,使得变频器的负载适应性更好。速度误差补偿的作用是提高速度控制精度,转差频率补偿、定子电阻压降补偿是开环 V/f 控制常用的功能;在精度要求高的场合,还可以直接采用闭环 V/f 控制来消除稳态速度误差。

通过以上改进,先进的变频器在采用 V/f 控制时,3 Hz 工作时的连续输出转矩与最大输出转矩已可分别达到 $50\% M_e$ 与 $150\% M_e$ 以上,输出转矩大于 $40\% M_e$ 的有效调速范围可达 $1:40$ 左右;速度响应为 $10 \sim 20 \text{ rad/s}$;开环速度精度为 $\pm(2\% \sim 3\%)$,闭环控制时可达 $\pm(0.2\% \sim 0.3\%)$ 。

② 矢量控制的改进。矢量控制与直接转矩控制(本质为矢量控制)的共性问题建立准确的磁通观测器与速度观察器,前者决定了变频器的转矩控制性能,后者决定了变频器的开环速度控制精度。

建立准确的磁通观测器与速度观察器需要有精确的模型,为此需要预知电机定子与转子的电阻、电感、铁心饱和系数等诸多参数,这对于对象不确定的通用变频器来说是十分困难甚至是不可能的。为了使矢量控制能够面向通用电机,当代变频器一般均具有“自动调整(Auto-tuning)”功能,它可以通过变频器自动完成部分参数测试与设定。

自动调整功能包括长线调整、停止型调整、空载旋转型调整与带负载在线自动调整多种。长线调整用于电枢连接线与定子的电阻测试与设定,它对 V/f 控制、矢量控制、直接转矩控制同样有效。停止型调整可通过对电机在静态励磁情况下的电压/电流等的分析与计算,获得电阻、电感等基本参数。旋转型调整则可以通过不同转速下的运行,根据电压/电流等参数的动态变化规律,获得更为准确的对象参数;而在线自动调整功能还可以完成包括负载惯量在内的更多参数的测试与设定,使得模型更为准确。

当前,最先进的开环矢量控制变频器在特定条件下的 3 Hz 连续输出转矩已可达 $95\% M_e$ 以上,0.3 Hz 时的最大输出转矩可达 $200\% M_e$;有效调速范围为 $1:200$;速度响应达 120 rad/s 左右;调速精度为 $\pm(0.2\% \sim 0.3\%)$;而闭环矢量控制的变频器的其有效调速范围可扩大至 $1:1500$ 以上;速度响应为 300 rad/s 左右;调速精度可达 $\pm(0.02\% \sim 0.03\%)$,其性能已接近交流主轴驱动器与交流伺服驱动器。

(2) 变频器的环保化

减小网侧谐波、提高功率因数、节能降噪、缩小体积等是变频器环保化的主要内容。当代变频器的环保化主要包括改变电路拓扑结构、采用矩阵控制技术、改善 PWM 控制性能、采用强制水冷等方面。此外,变频器新增的节能控制运行、工频/变频切换等也是为适应环保化要求而开

发的功能。

① 拓扑结构的改进。在传统的“交-直-交”变换、PWM 逆变的变频器上,拓扑结构的改进目前主要有整流侧的 12 脉冲整流与双 PWM 变频两种方案;逆变侧主要是采用三电平逆变技术。

12 脉冲整流是通过两组三相桥式 6 脉冲整流电路对相位互差 30° 交流输入电源进行的整流(可以通过 Δ/Y 变压得到),可以抵消整流电路(网侧)上的 5、7、17、19、…次谐波,降低整流谐波与直流纹波。在先进的变频器(如安川 Varispeed G7 系列等)上,已设计有用于 12 脉冲整流的电路,具备 12 脉冲整流功能,但中小功率的变频器仍以 6 脉冲整流为主导。

双 PWM 变频是指变频器的整流与逆变同时采用 PWM 控制的拓扑结构。双 PWM 变频不但解决了变频器能量的双向流动问题,可在不增加附加设备的情况下实现四象限运行与能量回馈制动;同时还可以通过对整流侧的高频正弦波 PWM 控制,改善输入电流的波形,使得变频器的功率因数接近 1。

三电平逆变原本是针对高压变流所设计的电路,现已推广到中小容量的通用变频器。三电平逆变的逆变电路每个桥臂上使用两只串联的 IGBT 以代替传统的单 IGBT,然后利用二极管的电压钳位控制,使每个 IGBT 所承受的最大电压降低 $1/2$,从而实现了中低压器件对中高压的控制。中小容量的通用变频器采用三电平逆变可在可靠性的同时,缩小体积、改善输出电流波形、降低电机侧的电磁干扰与谐波。当前,在先进的 400 V/18 kW 以上变频器已经采用了三电平逆变技术(如安川 Varispeed G7 系列等)。

② 矩阵控制变频器。矩阵控制变频器(Matrix Converter)是一种借鉴了传统“交-交”变频方式、融合现代控制技术的新型变频器,它采用了与“交-直-交”PWM 控制变频器完全不同的结构形式,可直接将输入的 M 相交流转换为幅值与频率可变、相位可调的 N 相交流输出。目前,小容量的矩阵控制变频器产品已经问世(如安川 Varispeed AC 系列等),其研究与应用正在日益引起人们的关注。

矩阵控制变频与“交-直-交”变频方式相比,不仅具有无中间直流储能环节、能量可以双向流动、输入谐波低等显而易见的优点,更重要的是输入电流的相位灵活可调,理论功率因数在 0.99 以上,并可对相位进行超前与滞后控制,起到功率因数补偿器的作用。由于无直流中间环节,矩阵控制的变频器结构更紧凑、效率更高,且可以实现四象限运行与回馈制动,人们对其发展前景普遍看好。

矩阵控制变频利用现代控制技术解决了传统“交-交”变频存在的输出频率只能低于输入频率的问题,还可以直接实现从 M 相到 N 相的变换($M:N$ 变换),因此,是一种有着广阔应用前景的新型结构。

矩阵控制变频当前存在的主要问题是功率器件数量众多、且需要采用双向器件,变换控制的难度较大,电压的传输比较低等,因此其实用与普及还需要一定的时间。

③ 低噪声控制技术。降低变频器的噪声是变频器环保化的重要内容之一。变频器产生的噪声包括电磁干扰与音频干扰(噪声)两大方面,前者包括空中传播的无线干扰、高频谐波产生的磁干扰、分布电容产生的静电干扰、电路传播的接地干扰等;后者是影响人类健康的噪声。

传统的降低电磁干扰方法主要有:网侧进线与电机电枢线安装滤波器、采用屏蔽电缆、进行符合要求的接地系统等。为了方便用户使用,并保证产品能够满足 EMC 规范,当代变频器已将

EMC 滤波器、零相电抗器等外置器件直接集成于变频器内部(如三菱 FR-700 系列),使得变频器的电磁噪声可限制在 EN61800-3 第 2 类环境的 QP 限值以内。

变频器的 PWM 控制还会产生噪声,研究表明,人耳对 3 ~ 4 kHz 的噪声最为敏感,但对 500 Hz 以下或 8 kHz 以上的噪声反应迟钝,利用这一特点,当代变频器一般可以采用柔性 PWM 控制技术(Soft-PWM),通过变频器的 PWM 频率自动调整功能来回避敏感区。采用柔性 PWM 控制技术不仅可以降低噪声,而且还具有限制射频干扰、减小功率损耗、保护功率器件的作用,如:当变频器在满负载工作时,如果 PWM 频率设定过高,变频器的逆变功率器件损耗将增加,而导致发热损坏,当采用柔性 PWM 控制技术后,变频器可以根据负载情况(通常在大于 85% M_n 时)自动降低 PWM 频率以保护功率器件。

(3) 变频器的网络化

信息技术发展到了今天,网络控制已成为所有自动化控制装置的基本功能之一。通过网络总线链接,将变频器作为网络从站纳入现场总线网,由主站(如计算机、PLC、CNC 等)进行集中、统一控制,不仅有利于制造业的信息化与自动化,而且还可以节省现场配线、简化系统结构。

变频器在采用数字化控制技术后已经具备了网络控制的前提条件,然而由于通用变频器使用简单、控制容易、价格低廉等多方面原因,直到 21 世纪人们才开始重视网络控制技术,其起步明显晚于 PLC、CNC 等。21 世纪初期的变频器网络功能只局限于“点对点”的数据通信与借助专用软件的监控、调试等简单功能,网络链接需要通过专门的选件模块实现。

当代变频器大幅度提升了网络控制功能,变频器不仅具有标准的 RS485 接口,且开始配备 USB 接口与支持 PROFIBUS-DP、CC-Link、Device-NET、Mod bus、CANopen、EtherNET 等开放式现场总线的通信协议;用于远程故障诊断与维修的 Teleservice 技术也已经开始在变频器上应用;变频器的调试、监控与管理更加容易,可靠性更高。

总之,变频器自 20 世纪 70 年代诞生以来,经过人们 30 多年的不懈努力,其技术已经日益进步,应用领域不断扩大,发展前景广阔。然而,由于感应电机的精确控制是一个极为复杂的问题,尽管矢量控制、直接转矩控制已大幅度提高了变频器的性能,但磁通的精确观测、电机参数的在线识别、电压的重构与死区补偿、面向三电平逆变的 PWM 技术、矩阵控制的变换技术与 PWM 控制技术等诸多问题还有待于进一步探索与研究,可以说至今还没有一种大家公认的最佳控制方案。

复习思考题

1. 什么叫交流传动系统?它与交流伺服系统有何不同?
2. 简述变频器、交流主轴驱动、交流伺服驱动在结构与用途上的主要区别。
3. 什么叫交流调速系统的调速范围?定义变频器调速范围需要注意哪些问题?
4. 交流调速系统的速度响应是怎样定义的?它与频率响应间存在怎样的转换关系?
5. 试比较变频器、交流主轴驱动、交流伺服在主要技术指标上的区别。
6. 简述当代变频器的主要技术特点。
7. 简述当代变频器的发展趋势与方向。

第 2 章

变频器的调速原理

2.1 感应电机的运行原理

变频器是一种用于交流感应电机调速控制的装置,为了了解变频调速的原理,首先必须了解感应电机的运行原理。

1. 旋转磁场的产生

三相交流感应电机的运行原理是:通过三相交流电在定子中产生旋转磁场,并通过这一磁场的电磁感应作用在转子中产生感应电流,依靠定子旋转磁场与转子感应电流之间的相互作用,使得转子跟随旋转磁场旋转。

旋转磁场是一种强度不变并以一定的速度在空间旋转的磁场。理论与实践证明,只要在对称的三相绕组中通入对称的三相交流,就会产生旋转磁场。

以图 2-1.1 所示的单绕组线圈为例,假设 A-X、B-Y、C-Z 互隔 120° 分布在定子的圆周上构成了对称三相绕组,当在三相绕组中分别通入如下电流:

$$i_A = I_m \cos \omega t$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t - 2\pi/3)$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t - 4\pi/3)$$

在对应时刻三个线圈所产生的磁场变化过程如图 2-1.1 所示。

图中,假设当电流的瞬时值为正时,电流方向从绕组的首端(A、B、C)流入(用符号 \otimes 表示),从末端(X、Y、Z)流出(用符号 \odot 表示)。对于 $\omega t = 0$ 时刻,有 $i_A = I_m$; $i_B = -I_m/2$; $i_C = -I_m/2$; 因此, A 相电流为正,从 A 端流入、X 端流出; B、C 相为负,从 Y、Z 端流入、B、C 端流出。由图可见, Y、A、Z 三个相邻线圈边的电流都为流入; 而 B、X、C 三个相邻线圈边的电流都为流出,根据右手定则,可以画出其磁感线分布为图 2-1.1 左侧第 1 图所示的、方向为自右向左的磁场。

同理可得到 $\omega t = \pi/3, 2\pi/3, \pi, 4\pi/3, 5\pi/3, 2\pi$ 时刻的磁场分布。由此可见,当对称的三相绕组通入对称三相电流后,可以得到一个磁场强度不变,但磁极在空间旋转的旋转磁场。正是由于这一旋转磁场通过电磁感应的作用带动了转子的旋转,这就是感应电机的基本运行原理。

2. 旋转磁场的转速

对于图 2-1.1 的每相采用单绕组布置的电机(1 对磁极),当三相电流随时间变化一个周期