

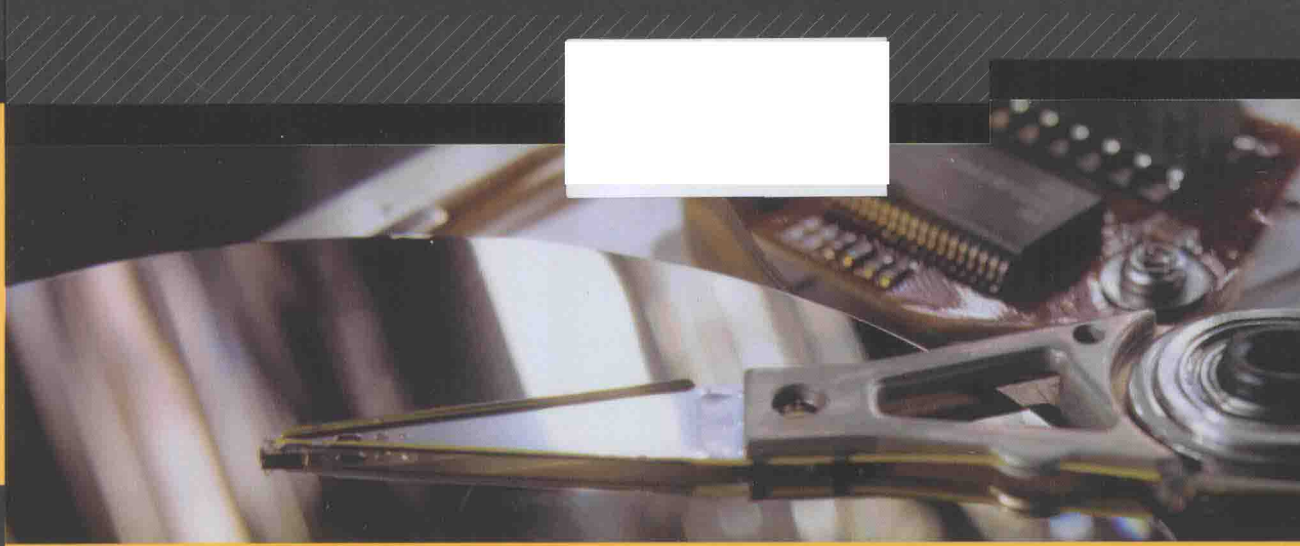


21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

**V**ariable-Frequency Control Technology  
and Application

# 变频控制技术 及应用

付丽君 主编



 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

**V**ariable-Frequency Control Technology  
and Application

# 变频控制技术 及应用

付丽君 主编

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

变频控制技术的应用 / 付丽君主编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2015. 2  
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
ISBN 978-7-115-38387-7

I. ①变… II. ①付… III. ①变频控制—高等学校—教材 IV. ①TM921.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第024536号

## 内 容 提 要

本书深入浅出地介绍了变频控制的基础理论,并以西门子 MM4 系列变频器为例介绍了变频器应用。首先介绍了变频器的发展过程,然后介绍了变频控制的基本工作原理、变频器的基本构成、变频器中逆变器所采用的典型 PWM 控制技术、良好性能的变频拖动系统和高动态性能的变频拖动系统。全书以西门子 MM4 系列变频器为例介绍了通用变频器的常用功能、变频器的参数、参数的设定、调试方法与步骤,还介绍了变频器及外围设备的选择、安装以及变频器柜的设计与配线,变频器常见故障。最后介绍了变频调速系统在三种典型负载中应用需要解决的问题,给出了西门子 MM4 变频器的应用实例。

本书从理论到实际应用,内容完整、全面,系统性强。变频控制理论内容深度适度,变频器应用内容与一些院校的实验设备相配套,全书每章安排有适当的习题或思考题,非常适合作为本专科院校自动化、机电、电力电子应用等相关专业的理论教学和实践教学用书,也可作为工程技术人员开发和应用变频器的参考用书。

- 
- ◆ 主 编 付丽君  
责任编辑 张孟玮  
执行编辑 税梦玲  
责任印制 沈 蓉 彭志环
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 14.25 2015年2月第1版  
字数: 354千字 2015年2月北京第1次印刷

---

定价: 35.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316  
反盗版热线: (010)81055315

变频器自 20 世纪 80 年代被引进中国以来,作为自动控制系统中的主要电气设备,在节能与速度工艺控制方面起着越来越重要的作用,得到了快速发展和广泛应用。在电力、纺织与化纤、建材、石油、化工、冶金、市政、造纸、食品饮料、烟草等行业以及公用工程(中央空调、供水、水处理、电梯等)中,变频器都在发挥着重要作用,在家电行业领域也被广泛使用。因此,社会需要大量掌握变频控制理论和变频器应用的工程技术人员。

“变频控制技术”或“交流调速系统”是很多本专科院校自动化及其相关专业开设的一门主干专业课程,用于传授变频器控制方面的知识,是一门理论性和实践性都较强的综合性课程。通过本课程的理论和实践教学,能够使学生掌握变频调速原理、变频调速系统的组成、变频器的内部结构、变频器常用的功能、变频器参数的设定及调试步骤、变频器及外围设备的选择、变频控制系统设计、变频器的安装调试和故障处理等知识。这门课的教学,能将电气控制技术、PLC 控制技术、调速理论等多门课程的内容综合起来,对培养学生掌握自动化系统的设计、安装、调试、维护及设备改造的综合应用能力有很大的帮助。

目前,已有变频调速技术和变频器应用的书籍出版,鉴于此,在编写本书时,我们遵守“理论适中,内容系统,培养能力,加强应用”的原则,并结合编者多年教学和科研工作经验,力图使本书在编排和内容上体现以下特色。

(1) 内容安排合理,兼顾理论和应用,符合本专科院校教学的培养目标和社会需求。按照教学规律和学生的认知规律,合理编排教材内容。本书前半部分讲述变频控制理论的知识,后半部分讲述变频器应用的知识,力求做到合理地分配变频理论与变频器应用的内容,不过分侧重某一方面的知识,较好地处理了理论教学与实践技能训练的关系。学生通过本书的学习,既能掌握一定的变频理论知识,又能获得一定的实践技能。

(2) 采用由浅入深的方法,循序渐进地展开变频控制理论的内容。从基本变频原理着手,介绍变频器组成和类型,再介绍变频器中逆变器使用的 PWM 技术,然后介绍基于稳态数学模型的变频拖动系统和基于动态数学模型的高动态性能变频拖动系统,帮助学生一步一步接受和理解较难的变频控制理论的知识。

(3) 结合本专科院校实验设备情况,编写变频器应用的内容。为了与一些学校的实验设备配套,也为了系统地介绍变频器的使用,本书以西门子 MM4 系列变频器为对象,编写变频器应用方面的内容。系统地介绍了变频器的内部结构、外部端子情况、常用功能、参数设定与调试等内容,有利于学生比较全面地掌握变频器的应用,为未来应用其他厂商的变频器产品奠定良好的基础。

(4) 本书在内容安排上, 条理清晰, 前有原理阐述和理论推导, 后有变频器应用系统设计例子和应用实例。为了便于自学, 以及理解和消化知识, 每章设有知识点概述和小结, 并配有习题和思考题, 这种编排方式非常适合教学和培训。

本书可作为从事开发、应用变频器的工程技术人员和研究人员的参考书, 也可以作为本专科院校自动化、机电、电力电子应用等相关专业的理论教学、实践教学用书和参考书, 对提高学生的理论水平、实践能力和科研能力都会有很大帮助。

本书由付丽君任主编, 沈阳理工大学的孙金根、杨青、野莹莹老师和辽宁省电力有限公司的马晓奇高级工程师也参与了编写工作。东北大学的闫士杰副教授对编写内容提出了宝贵建议和意见, 在此表示衷心感谢。在本书编写过程中, 作者参阅了大量文献资料, 在此对原作者表示诚挚的敬意和衷心的感谢!

由于作者学识有限, 书中难免存在错漏, 殷切期待各位读者批评指正。

编者

2014年12月

<b>第 1 章 交流电动机变频调速原理及发展</b> ·····1	2.3 变频器的分类····· 25
1.1 交流异步电动机的调速方式·····1	小结····· 26
1.2 交流异步电动机变频调速原理·····2	思考题····· 27
1.3 变频器的的发展·····5	<b>第 3 章 变频器中的脉宽调制控制技术</b> ·· 28
1.3.1 变频器的发展历程·····5	3.1 正弦脉宽调制控制技术····· 28
1.3.2 变频器的主要发展方向·····9	3.1.1 正弦脉宽调制原理····· 28
1.4 交流异步电动机变频调速时的机械特性·····10	3.1.2 正弦脉宽调制波的产生····· 30
1.4.1 基频以下变频调速时的机械特性·····11	3.1.3 正弦脉宽调制方法····· 32
1.4.2 基频以上变频调速时的机械特性·····12	3.2 电流滞环跟踪控制技术····· 33
1.5 变频调速系统中生产机械的负载特性·····13	3.3 电压空间矢量控制技术····· 34
1.5.1 恒转矩负载特性·····13	3.3.1 空间矢量的定义····· 34
1.5.2 平方降转矩负载·····14	3.3.2 电压与磁链空间矢量的关系·· 36
1.5.3 恒功率负载·····15	3.3.3 电压空间矢量线性组合法···· 38
1.6 我国变频器应用范围及市场前景··16	小结····· 40
1.6.1 应用范围·····16	思考题····· 41
1.6.2 市场前景·····17	<b>第 4 章 基于数学模型的变频调速系统</b> ·· 42
小结·····18	4.1 转速开环恒压频率比控制的变频调速系统····· 43
思考题·····18	4.2 转速闭环转差频率控制的变频调速系统····· 45
<b>第 2 章 变频器的电路结构</b> ·····19	4.2.1 转差频率控制的基本概念···· 45
2.1 变频器的基本电路结构·····19	4.2.2 转差频率控制规律····· 46
2.2 变频器主电路结构·····21	4.2.3 转差频率控制的闭环变频调速系统····· 47
2.2.1 交—交变频器主电路结构及工作原理·····21	4.3 三相异步电动机的动态数学模型·· 48
2.2.2 交—直—交变频器主电路结构·····23	4.3.1 三相异步电动机动态数学模型的性质····· 49



4.3.2 三相异步电动机的动态数学模型 .....	50	第 6 章 西门子 MM4 系列变频器简介 .....	94
4.3.3 矢量控制理论中的坐标变换和坐标变换阵 .....	53	6.1 MM4 系列变频器类型 .....	94
4.3.4 三相异步电动机在两相同步旋转坐标系下的动态数学模型 .....	60	6.2 MM4 系列变频器的基本构成 .....	95
4.3.5 三相异步电动机在两相静止坐标系下的动态数学模型 .....	61	6.3 MM4 系列变频器的控制方法 .....	97
4.3.6 三相异步电动机按转子磁链定向旋转坐标系下的动态数学模型 .....	62	6.4 MM4 系列变频器参数介绍 .....	100
4.4 按转子磁场定向的异步电动机矢量控制系统 .....	65	6.4.1 MM4 系列变频器的参数类型 .....	100
4.4.1 转速和磁链闭环控制的直接矢量控制系统 .....	65	6.4.2 MM4 系列变频器参数说明 .....	101
4.4.2 转子磁链观测器 .....	66	6.4.3 MM4 系列变频器的参数组 .....	102
4.4.3 磁链开环与转速闭环转差型间接矢量控制系统 .....	69	6.4.4 用 BOP 修改 MM4 系列变频器参数的操作方法 .....	104
4.5 无速度传感器矢量控制系统 .....	70	6.5 MM4 系列变频器参数的调试方法 .....	105
4.6 直接转矩控制系统 .....	72	小结 .....	107
4.6.1 直接转矩控制的基本思路 .....	72	思考题 .....	108
4.6.2 直接转矩控制系统的构成 .....	73	第 7 章 MM4 系列变频器的功能调试 .....	109
小结 .....	75	7.1 MM4 系列变频器的基本功能参数 .....	109
思考题 .....	76	7.2 MM4 系列变频器基本功能调试 .....	116
第 5 章 通用变频器的常用功能 .....	77	小结 .....	128
5.1 频率给定功能 .....	77	思考题 .....	128
5.1.1 频率给定方式 .....	77	第 8 章 设备的选择与安装及故障处理 .....	131
5.1.2 变频器中常用的频率术语 .....	80	8.1 变频器的选择 .....	131
5.1.3 运行频率的设置 .....	82	8.1.1 根据负载的特性选择变频器 .....	131
5.2 起动与加速功能 .....	85	8.1.2 变频器容量的选择 .....	132
5.2.1 变频器的加速曲线 .....	85	8.1.3 变频器箱体结构的选用 .....	135
5.2.2 变频器的起动方式 .....	86	8.2 电动机的选择 .....	137
5.2.3 加速时间及自处理功能 .....	87	8.2.1 异步电动机的防护类型与容量的选择 .....	137
5.3 制动与减速功能 .....	88	8.2.2 使用变频器驱动时电动机出现的新问题 .....	138
5.3.1 变频器制动方式 .....	88	8.2.3 电动机容量的计算 .....	138
5.3.2 制动时间及自处理功能 .....	89	8.3 变频器外围设备及其选择 .....	140
5.4 其他常用控制功能 .....	90	8.4 变频器的安装 .....	146
小结 .....	93	8.4.1 变频器的安装环境要求 .....	146
思考题 .....	93	8.4.2 变频器的安装方式 .....	148
		8.5 变频器的接线 .....	149
		8.5.1 主回路端子的接线 .....	149
		8.5.2 控制回路端子的接线 .....	151
		8.6 变频器电气柜的设计 .....	154

8.6.1 变频电气柜设计前的要求	154	9.5.2 风机的变频控制	185
8.6.2 电气柜的设计	155	9.5.3 水系的变频控制	189
8.6.3 柜体的布局设计	156	小结	190
8.6.4 变频器柜的配线	157	思考题	191
8.7 变频器故障及处理	158	<b>第 10 章 MM4 系列变频器的应用实例</b>	192
8.7.1 变频器的故障分类	158	10.1 MM440 变频器在电梯上的应用	192
8.7.2 变频器常见故障及原因	159	10.1.1 系统概述	192
8.7.3 西门子 MM4 系列变频器的 常见故障类型及排除方法	160	10.1.2 系统的组成和基本原理	193
8.7.4 变频器维修常用的检测方法	161	10.1.3 变频器参数的设定	194
小结	162	10.2 MM430 变频器在恒压供水中的 应用	196
思考题	163	10.2.1 恒压供水变频调速系统的 节能原理	196
<b>第 9 章 变频拖动系统的设计</b>	164	10.2.2 恒压供水变频调速系统	198
9.1 生产机械对变频拖动系统的 基本要求	164	10.3 MM440 变频器在离心机中的 应用	204
9.1.1 在机械特性方面的要求	164	10.3.1 常规电器实现的电杆变频 调速离心机控制系统	205
9.1.2 在运行可靠性方面的要求	165	10.3.2 利用 BICO 功能实现的 电杆变频调速离心机控制 系统	207
9.1.3 变频供电对异步电动机的 影响	166	10.4 MM440 变频器在拉丝机中的 应用	210
9.2 变频调速时异步电动机的有效 转矩线	168	10.4.1 拉丝机设备的构成	211
9.3 恒转矩负载的变频拖动	169	10.4.2 拉丝机控制功能要求	212
9.3.1 控制方式的选择	170	10.4.3 拉丝机变频调速系统的 参数设定	214
9.3.2 改变低频性能与提高电动机 输出转矩	170	10.5 MM440 变频器在钢包车运行 中的应用	215
9.3.3 提高恒转矩负载的变频调速 范围	171	10.5.1 工艺简述	215
9.3.4 恒转矩负载的功能预置 要点	172	10.5.2 电气控制系统的组成	215
9.4 恒功率负载的变频拖动	176	10.5.3 变频器参数设定	216
9.4.1 恒功率负载下的电动机容量 选择问题	176	小结	218
9.4.2 降低电动机容量的方法	177	思考题	218
9.4.3 金属切削机床的降容方法	180	<b>参考文献</b>	219
9.5 平方降转矩负载的变频拖动	184		
9.5.1 V/f 控制线的选择与节能 效果	184		



**知识点概述:**

- 交流电动机的调速方式;
- 变频调速的基本原理;
- 异步电动机采用变频供电后的机械特性变化;
- 变频器驱动的三种典型类型负载的转矩特性和功率特性;
- 变频器的发展过程和发展趋势;
- 我国变频器应用的范围及发展前景。

任何采用电动机作为原动机的生产机械,当需要提高响应性能及控制精度时,往往有调速的要求。在 20 世纪的大部分时间里,鉴于直流拖动具有优良的调速性能,均用直流电动机来完成高精度、大范围的调速要求。直流电动机通常在额定转速以下采用调节电枢电压的方法调速;在额定转速以上采用减小磁通的方法调速。而约占电力拖动总容量 80%以上设备,采用的是交流电动机进行不变速拖动,这种分工在过去很长一段时期内被认可。交流电动机调速系统的多种方案虽然早已问世,并已获得实际应用,但其性能却始终无法与直流调速系统相匹敌。直到 20 世纪 60~70 年代,随着电力电子技术、微电子技术和控制理论的发展,电力半导体器件和微处理器的性能不断提高,变频驱动技术才得以发展。随着各种复杂控制技术的应用,使得采用电力电子变换器的交流拖动系统得以实现。特别是大规模集成电路和计算机控制的出现,高性能交流调速系统应运而生,一直被认为高性能的调速采用直流调速装置,简单调速或不变速时采用交流电动机的这种交直流拖动分工格局才终于被打破了。随着变频控制技术的不断成熟,交流异步电动机变频调速以其卓越的性能、灵活多样的控制方式和显著的节能效果,在调速系统中占据了绝对的主导地位,并在现代工业生产中逐渐取代了直流电动机调速系统。

现在,交流电动机调速应用最多的是变频调速方式。本章首先阐述变频调速的控制方式,然后讨论改变交流异步电动机供电电源频率后其机械特性的变化。另外,为了更好地了解变频调速系统的应用,还对驱动的生产机械负载特性进行了分析。

## 1.1 交流异步电动机的调速方式

对于交流异步电动机,其转速表达式为

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{n_p}(1-s) \quad (1-1)$$

式中,  $n_1 = 60f_1/n_p$ ——交流异步电动机的同步转速;

$f_1$ ——定子绕组所加供电交流电源的频率;

$n_p$ ——极对数;

$s$ ——转差率。

由式(1-1)可知,交流电动机可以采用以下三种调速方式调速:改变极对数 $n_p$ 、改变转差率 $s$ (即改变电动机机械特性的硬度)和改变供电电源频率 $f_1$ 。改变转差率 $s$ 的调速方法还可以进一步进行分类,如定子变压方式、转子串电阻方式和电磁离合器方式等。

从调速的本质来看,调速可以分为改变异步电动机的同步转速和不改变同步转速两种方式,改变极对数 $n_p$ 和改变供电电源频率 $f_1$ 的调速方式将改变交流电动机的同步转速,属于改变同步转速的调速方式;改变转差率 $s$ 不改变同步转速,属于不改变同步转速的调速方式。

从调速时的能耗观点来看,分高效调速方式与低效调速方式两种。按照交流异步电动机的原理,从定子通过电磁感应传递到转子的电磁功率可分成两部分:一部分是拖动负载的有效功率,称作机械功率;另一部分是传输给转子电路的转差功率,与转差率 $s$ 成正比,即转子铜损。低效调速方式是随着转速的降低,转差损耗逐渐增加的调速方式,而且转速越低效率越低,它以增加转差功率的消耗来换取转速的降低(恒转矩负载时)。如降低异步电动机定子所加电压大小的调压调速方式,其转子电流会随着电压的降低而增大,转差功率会增加;转子串电阻调速方式,能量就损耗在转子回路中;电磁离合器的调速方式,能量损耗在离合器线圈中;液力偶合器调速方式,能量损耗在液力偶合器的油中,这些都是低效的交流异步电动机调速方式。但是采用这类调速方式的系统结构简单,设备成本最低,所以还有一定的应用价值。高效调速时转差功率不变,而且无论转速高低,转差功率不会随着速度的降低而增加,即不是靠转差功率的增加获得转速的降低,可以认为转差功率基本不变,因此这类调速方式效率高,如交流异步电动机的变极调速和交流异步电动机的变频调速,以及能将转差损耗回收的绕线式异步电动机串级调速。串级调速除转子铜损外,大部分转差功率在转子侧通过变流装置馈出或馈入,转速越低,能馈送回功率越多,扣除变流装置本身的损耗后,最终都转化成有用的功率,因此这类系统的效率较高,但需要增加变流装置。

从以上分析可见,虽然变极调速与变频调速一样改变了同步转速,并在调速时转差功率都不变,是高效的调速方式。但变极调速需要采用交流多速电动机,且只能实现有级调速,不能实现平滑无级调速。而改变异步电动机供电电源频率的调速,可以从低速到高速都保持很小的转差率,效率高,并且可以通过连续改变供电电源频率,实现无级调速,调速范围大,精度高,是一种比较理想的调速方法,所以这是现在交流异步电动机最常用的调速方式。

## 1.2 交流异步电动机变频调速原理

在使用电动机调速时,通常希望保持电动机气隙中每极主磁通量 $\Phi_1$ 为额定值不变,使电动机输出额定转矩,提高带负载的能力。因为如果磁通太弱,电机的铁心没有充分利用,电磁能量不能有效传递到转子侧,电机的设计能力没有得到充分利用,造成浪费;如果过分增大磁通,又会使铁心饱和,从而导致过大的励磁电流,严重时会导致绕组过热而损坏电机。所以在电动机变频调速时应尽量实现电动机气隙中的每极磁通量恒定。

在直流电动机中,励磁回路和电枢回路可以认为是各自独立的,只要对电枢反应进行恰当的补偿,气隙中的每极磁通量  $\Phi_1$  保持恒定很容易做到。但在交流异步电动机中,  $\Phi_1$  由定子磁动势和转子磁动势合成产生,要保持每极磁通量恒定比直流电动机实现起来困难得多。

根据电机学中的知识,在假定忽略空间、时间谐波和磁饱和条件下,可以推导出交流异步电动机稳态运行时每相绕组的等值电路,如图 1-1 所示。

在图 1-1 中,  $E_1$  是气隙中旋转磁场切割定子在其绕组中产生的感应电动势值;  $E_2'$  是旋转磁场切割转子在其绕组中产生的感应电动势折算到定子侧的值;  $R_1$  为定子绕组内阻值;  $R_2'$  为转子绕组内阻折算到定子侧的值;  $x_1$  为定子绕组漏电抗;  $x_2'$  为转子绕组漏电抗折算到定子侧的值。

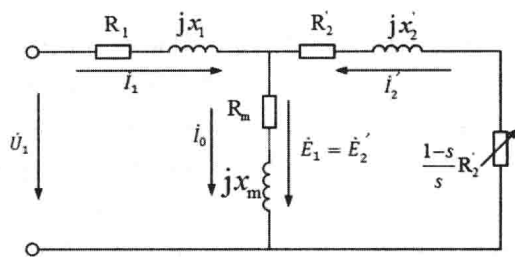


图 1-1 交流异步电动机的等值电路

在等值电路中

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{N1} \Phi_1 \quad (1-2)$$

式中,  $E_1$ ——气隙旋转磁场切割定子在其绕组中产生的感应电动势有效值;

$f_1$ ——定子的供电电源的频率;

$N_1$ ——每相定子绕组串联匝数;

$k_{N1}$ ——定子基波绕组系数;

$\Phi_1$ ——每极气隙主磁通量。

由式 (1-2) 得出

$$\Phi_1 = \frac{E_1}{4.44 f_1 N_1 k_{N1}} = C \frac{E_1}{f_1} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知,在改变定子绕组供电电源频率  $f_1$  进行变频调速时,若要能够维持磁通  $\Phi_1$  恒定,必须同时协调地改变定子绕组的感应电动势  $E_1$ ,使电动势和频率比为常数,这就是变频调速中的恒电动势频率比控制方式。

然而,定子每相绕组中的感应电动势是难以直接控制的。我们知道交流异步电动机稳态运行时的电压平衡关系式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jx_1) \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可知,当电动机速度较高时,感应电动势值较高,定子绕组漏阻抗上的压降相对感应电动势而言较小,若忽略的话,可以认为定子绕组每相的相电压  $U_1 \approx E_1$ 。而定子每相绕组上的供电电压是较容易控制的,因此通常采用的是改变定子绕组供电电源频率  $f_1$  进行变频调速时,同时协调地改变定子绕组的供电电压  $U_1$ ,使电压和频率比为常数,这就是变频调速中的恒压频率比控制方式,简称 V/f 控制。

在变频调速时,当定子绕组的电压频率已经上升到额定频率(基频)  $f_{1N}$  时,定子电压也达到了额定电压  $U_{1N}$ ,若要超过额定转速运行,定子绕组的电压频率将由  $f_{1N}$  继续向上升高,但考虑到绕组绝缘因素,定子电压不应该超过额定电压  $U_{1N}$ ,最多只能保持在额定电压  $U_{1N}$ 。这样,若频率继续升高,磁通必将随频率的升高成反比地降低,出现了相当于直流电动机弱磁升速的情况。因此交流异步电动机变频调速与直流电动机类似,也分为基频(基速)以下和基频(基速)以上两种情况。

## 1. 基频以下调速

恒电动势频率比控制方式:  $\frac{E_1}{f_1} = \text{常数}$

恒压频率比控制方式 (V/f 控制):  $\frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$

普通电动机采用的是冷轧硅钢片铁心, 其磁路导磁系数不是常数。在变频调速低频段, 随着供电电压的降低, 电机电流很小, 使得这种冷轧硅钢片铁心工作点远低于磁化曲线的膝点, 铁心的导磁系数相对较小, 磁通量减小, 电动机输出转矩降低。

V/f 控制的主要问题是低频工作时的输出转矩下降过大, 也可以这样理解, 低频时  $U_1$  和  $E_1$  都较小, 定子绕组的漏阻抗上的压降相对感应电动势而言所占的分量就比较显著, 造成电机绕组中电流产生的磁通在定子铁心和转子铁心中闭合的数量会相对减少, 表现为对铁心的磁化力不足, 导致电机的电磁转矩严重下降, 实际运行时将可能因电磁转矩不足或负载转矩相对较大而无法起动和无法低频运行。这时, 若要维持每极气隙中主磁通量的恒定, 定子绕组的漏阻抗上的压降不能再忽略, 需要人为地把电压  $U_1$  适当升高, 近似地补偿定子绕组漏阻抗上的压降, 因此现代变频器中均设置有相应的转矩提升功能或称为电压补偿功能, 并为不同的负载提供了多条补偿特性曲线, 为低频段设定了不同的转矩提升量, 如富士 5000G11S/P11S 系列变频器就提供了 38 条不同状态下的转矩提升曲线。在变频器调试时选择不同的转矩提升曲线, 对不同负载在低频段进行补偿, 以满足负载起动和低速运行的要求。

如果电动机在不同转速时所带的负载都能使电流达到额定值, 即在允许温升下都能长期运行, 则转矩基本上随磁通变化, 所以磁通恒定时转矩也必恒定, 因此在基频以下变频调速属于恒转矩调速。

低频转矩提升是通过改变  $f_1 = 0$  时的输出电压  $U_1$ , 即改变 V/f 控制曲线的起点, 来补偿定子漏阻抗压降, 提升输出转矩的一种方法, 如图 1-2 (a) 中所示的 b、c 控制曲线。多点 V/f 设定, 则是人为规定 V/f 比来改变 V/f 控制曲线形状的控制方法, 其负载适应性更好, 如图 1-2 (b) 中所示的控制曲线。转差频率补偿是另一种补偿方法, 是根据交流电动机的机械特性曲线与额定电流、转差, 按实际输出电流推算出稳态速降, 并通过提高输出频率补偿稳态速降的一种方法。转差频率补偿、定子漏阻抗压降补偿是开环 V/f 控制常用的功能。在精度要求高的场合, 还可采用闭环 V/f 控制来减小或消除稳态速度误差。

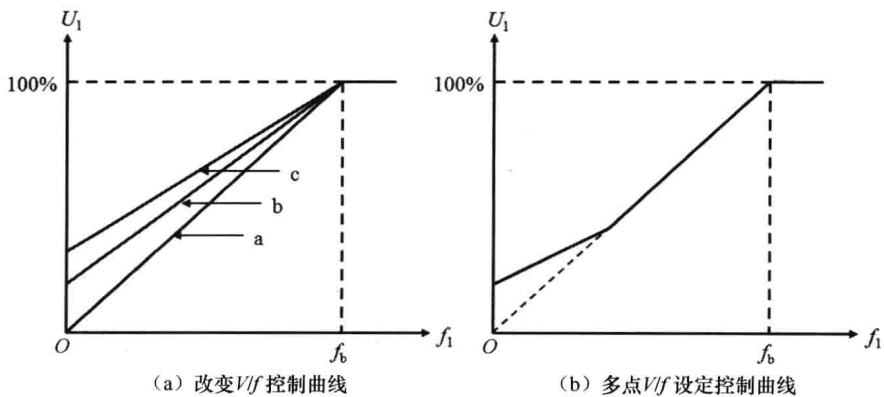


图 1-2 V/f 控制特性

现代变频器在使用改进的  $V/f$  控制功能后, 3Hz 工作时的连续输出转矩与最大输出转矩已分别可达  $50\%T_{MN}$  ( $T_{MN}$  为电动机额定转矩) 与  $150\%T_{MN}$  以上, 输出转矩大于  $50\%T_{MN}$  的有效调速范围为 40:1 左右; 速度响应为  $10\sim 20\text{rad/s}$ ; 开环速度精度为  $\pm(2\sim 3)\%$ , 闭环控制时速度精度可达  $\pm(0.2\sim 0.3)\%$ 。

## 2. 基频以上调速

若超过基频调速, 磁通将由额定磁通开始降低, 出现弱磁升速情况, 但转速升高时转矩却降低, 所以基本上属于电动机的恒功率调速方式。

图 1-3 所示是交流异步电机变压变频调速的控制特性。

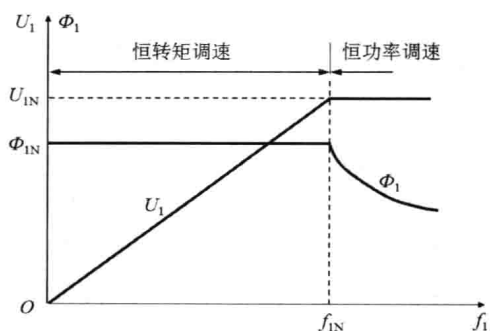


图 1-3 交流异步电机变压变频调速的控制特性

## 1.3 变频器的发展

电气传动系统是以电动机为动力拖动各种生产机械的系统, 以交流电动机为动力拖动的系统则称之为交流电气传动系统, 以直流电动机为动力拖动的系统则称之为直流电气传动系统。电气传动系统的大致构成如图 1-4 所示。

直流调速装置通常由半控型晶闸管组成的整流器、逆变器构成, 或由全控型电力电子器件组成的直流变换器构成; 现代通用的交流调速装置通常是采用全控型电力电子器件构成的静止交流变换器, 即电力电子变频器, 简称为变频器。

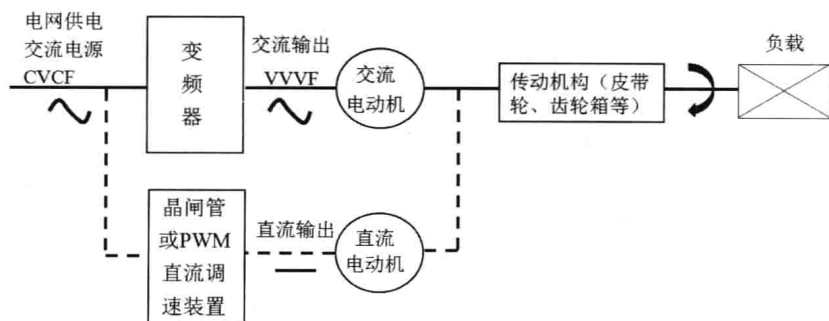


图 1-4 电气传动系统构成

从图 1-4 可见, 变频器的输入是电网来的恒压恒频 (CVCF) 交流电, 输出是电压和频率都可变的交流电 (VVVF)。所以, 变频器就是一种将工频交流电 (三相或单相) 变换成电压和频率都可连续变化的静止式交流电源变换装置, 以供给交流电动机实现软起动和变频调速。

### 1.3.1 变频器的发展历程

变频器是 20 世纪 70 年代初随电力电子器件、PWM 控制技术的一种交流电动机驱动装置, 虽然变频器是为满足生产机械的调速要求而产生的交流电动机电源设备, 但其主要是用于风机、泵类平方降转矩负载的节能控制。在 20 世纪 80 年代初, 以矢量控制理

论为基础研制成功的矢量控制变频器，实现了交流电动机的转矩控制，才较好地满足了生产机械的速度工艺控制要求。随着变频器的各种复杂控制技术日臻完善，特别是大规模集成电路和微处理器的发展，变频器的性能不断地得到提高，变频器已在自动控制各个领域得到了广泛应用，在某些场合甚至出现了全面替代直流传动的趋势。

变频器是一种强电和弱电相结合的驱动装置，其关键技术包括“变流技术”与“控制技术”两方面。前者主要涉及电力电子器件应用、电路拓扑结构与 PWM 控制等问题；后者是交流电动机控制理论的研究与控制技术实用化问题。变频器技术的发展也相应地反映了这两方面技术的发展，这两方面技术的发展同时也推动了变频器技术的发展。图 1-5 示出的是功率器件、主电路拓扑结构、控制理论和控制在变频器中的应用进程，也说明了变频器的发展历程。

### 1. 电力电子器件应用的发展

电力电子器件是变流技术的基础元件，变频器的整流电路与逆变电路都由电力电子器件组成。理想的电力电子器件应具有载流密度大、导通压降小、耐压高、控制容易、工作频率高和开关速度快等特点。电力电子器件的发展经历了以晶闸管为代表的第一代“半控型”器件，以 GTO、GTR 与功率 MOSFET 为代表的第二代“全控型”器件，以 IGBT 为代表的第三代“复合型”器件，以及以 IPM 为代表的第四代功率集成器件（PIC）的历程。

功率器件	GTR		IGBT				
			IPM				
主电路拓扑结构	电压源型 PWM 逆变						
				12 脉冲整流			
				三电平逆变			
控制理论				矩阵控制			
	V/f 控制						
		矢量控制					
控制技术		直接转矩控制					
	模拟控制		数字控制				
				网络控制			
	1974	1980	1985	1988	1994	2000	2006

图 1-5 各种技术在变频器中应用的发展历程

第一代电子电力器件由于只导通可控、关断不可控，并且工作频率低，所以并没有为变频器的实用化带来多大的帮助；推动变频器实用化快速发展的是第二代“全控型”器件；而第三代“复合型”器件的出现，使得变频器的小型化、高效率、低噪声成为了现实；第四代功率集成电路的实用化则使变频器控制更简单、性能更高。

第二代产品中的 GTR 是早期的变频器所使用的器件，1988 年后开始使用 IGBT，1994 年后在高性能专用变频器上开始逐步使用第四代 IPM，但目前通用变频器的主导器件仍是 IGBT。

第二代产品中的功率 MOSFET 是一种优秀的电力电子器件，其显著特点是驱动电路简单、驱动功率小、无少数载流子存储效应，特别是工作频率可高达 MHz，为所有电力电子器件之最。但由于电流容量小、耐压低、通态压降大（实用化水平大致在 1kV/2A/2MHz 与 60V/200A/2MHz 左右），因而不适合变频器使用。



第三代产品中的 IGBT 可视为双极型大功率晶体管与功率场效应晶体管的复合管，其既具有 GTR 通态压降小、载流密度大、耐压高的优点，又具有功率 MOSFET 驱动功率小、开关速度快、输入阻抗高、热稳定性好的优点（实用化水平大致在 4 500V/1 000A/150kHz 左右），是目前中低压、中小功率变频器的主流器件。4 500V/1 000A 以上的高压、大容量 IGBT 开发、MCT 的普及是第三代产品的发展方向。

功率集成电路（PIC）是电力电子器件技术与微电子技术结合的产物，是一种将功率器件、驱动电路、保护电路、接口电路等集成于一体的智能化器件。PIC 分为高压功率集成电路（HVIC）、智能功率集成电路（SPIC）和智能功率模块（IPM）三类，其中 HVIC 的电流容量较小（20A 以下），SPIC 的电流容量大但耐压能力差，而 IPM 则是一种适用于变频器的新型功率器件。

智能功率模块 IPM 具有高频化、小型化、高可靠和高性能的特点，使变频器中逆变器的设计变得更简化，使整机的设计、开发与制造等方面的成本降低。IPM 模块由功率开关器件（IGBT 芯片和快速二极管芯片）、控制电路、驱动电路、故障检测和保护电路等组成。其过电压、过电流、过热和控制电压欠电压等故障监测电路的信号可直接传送至外部，具有体积小、可靠性高、使用方便等优点。IPM 模块有四种封装模式：单管封装、双管封装、六管封装和七管封装。但 IPM 的价格相对较高，目前多用于性能高、价格贵的专用变频器，如交流伺服驱动器、交流主轴驱动器等。

## 2. 拓扑结构的发展

由电力电子器件组成的变频器主回路结构也在不断地发展，其拓扑结构的改进是实现“绿色变频”的重要手段。虽然目前中小功率变频器仍以传统的“交—直—交”电压源型 PWM 逆变器为主导，但随着对用电设备能耗、环保要求的不断提高，12 脉冲整流、双 PWM 变频技术、三电平逆变、矩阵控制技术等新型拓扑结构的变频器正在被普及与实用化。

12 脉冲整流是对变频器网侧整流电路所进行的改进，该结构的主回路采用了交流输入独立、直流输出并联的两组整流桥，两组整流的交流输入电压幅值相同、相位相差  $30^\circ$ （通过  $\Delta/Y$  变压得到），在直流输出侧得到的是叠加 12 个整流脉冲的电压波形。这种整流方式虽然只是对整流电路进行了简单的改进，但带来的优点是两组整流桥输入电流中的 5、7、17、19……次谐波正好相互抵消，从而大大减轻了变频器所产生的谐波对电网的影响，同时也降低了输入变压器、断路器、电缆等相关设备的容量与对耐压的要求。另外，整流侧电压纹波只有 6 脉冲整流的 50%，变频器内部对平波器件的要求也可相应降低。

三电平逆变方案原本是为解决低电压器件的高电压控制问题所设计的电路，但由于它具有可靠性高、输出电流波形好、电动机侧的电磁干扰与谐波小等优点，目前在中小容量的通用变频器上也得到了推广。三电平逆变电路每个桥臂上使用了两对串联的 IGBT，如图 1-6 所示的 U 相电路。利用二极管  $VD_5$  与  $VD_6$  的  $1/2$  电压钳位控制，使每对 IGBT 所承受的最大电压降低到  $E/2$ ，而变频器每相输出将由普通逆变器的两种状态（ $-E/2$ 、 $E/2$ ）变为三种状态，即  $VT_3/VT_4$  导通（输出电压为  $-E/2$ ）、 $VT_2/VT_3$  导通（输出电压为 0）、 $VT_1/VT_2$  导通（输出电压为  $E/2$ ），IGBT 所承受的最大电压只有原来的  $1/2$ ，从而提高了可靠

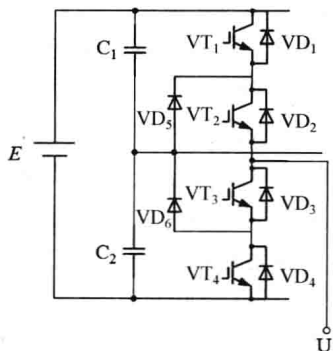


图 1-6 二极管钳位型三电平拓扑 U 相结构图

性、缩小了体积、改善了输出电流波形。

双 PWM 变频是指整流与逆变同时采用 PWM 控制的“交—直—交”电压控制型逆变电路。该拓扑结构具有四象限工作能力，因此，可解决变频器能量的双向流动问题，且无需增加附加设备就能实现回馈制动。此外，通过对整流器的高频正弦波 PWM 控制，可使输入电流的波形、相位与输入电源相同，变频器的功率因数可接近 1。

矩阵控制变频器 (Matrix Converter) 是一种借鉴了传统“交—交”变频方式、融合了现代控制技术的新型变频器。其完全脱离了“交—直—交”电压控制型 PWM 的结构，可以直接将输入的  $M$  相交流转换为幅值与频率可变、相位可调的  $N$  相交流输出。当前小容量的矩阵控制变频器产品已经问世。矩阵控制变频器目前使用的是具有输入功率因数校正功能的三相到三相的矩阵式“交—交”变换电路。与传统的“交—直—交”变频相比，矩阵控制变频器无中间直流储能环节、能量可以双向流动、输入谐波低，且输入电流的相位灵活可调（理论功率因数可达到 0.99 以上），还可实现相位的超前与滞后控制，也起到功率因数补偿器的作用。矩阵控制的变频器结构紧凑、效率高，可以实现四象限运行与回馈制动，其发展前景良好。矩阵控制变频器当前存在的主要问题是使用的功率器件数量多且为双向器件，变换控制的难度较大，电压的传输比较低，因此，目前还只能用于小容量变频器。

### 3. 变频控制技术和理论的发展

变频控制理论与技术实用化是提高变频器性能的前提，其发展经历了  $V/f$  控制、矢量控制与直接转矩控制三个主要阶段。 $V/f$  控制是一种经典控制理论，在交流电动机诞生后不久，技术人员通过对其等效电路与稳态特性的分析，就得出了为了保持气隙磁通恒定，电枢电压与频率比保持恒定的  $V/f$  控制方案。当时由于受器件和控制技术的限制，直到 20 世纪 70 年代第二代全控型电力电子器件与 PWM 控制技术的出现才被真正实用化。 $V/f$  控制是在忽略交流电动机的定子漏阻抗压降等因素影响的前提下，从稳态特性上得出的速度控制方案，虽然它较好地解决了交流电动机的无级平滑调速问题，但本质上不具备转矩控制功能，因此，电动机的转矩特性差，有效调速范围小，电动机需“降额”使用。

$V/f$  控制的最大优点是变频控制与被控对象特性几乎无关，负载波动对速度的影响小，因而可用于各类交流电动机单机与多机控制。即使在矢量控制早已实用化的今天，对于结构参数特殊的高速电动机，或对低速稳定性有较高要求的磨床、研磨机，或用一台变频器同时为多台电动机供电调速的场合，仍需采用  $V/f$  控制方式。

矢量控制理论由西门子工程 F. Blaschke 等科技工作者在 20 世纪 70 年初首先提出，80 年代初矢量控制的变频器研制成功，并迅速得到普及与推广。矢量控制的基本思路是将交流电动机等效为直流电动机，该理论通过坐标变换将定子电流分解为转矩电流  $I_t$  和励磁电流  $I_m$  两个独立分量，实现了磁通与转矩的解耦。由于矢量控制需要进行坐标变换，解耦得到的励磁电流  $I_m$  对应转子磁链，故又称“坐标变换矢量控制”或“转子磁场定向控制”。

矢量控制虽然解决了交流电动机的转矩控制问题，但由于转子磁链与系统速度的精确观测与控制难度都比较大，所以变频器实际使用的矢量控制技术通常都是简化了的控制方案（如转差频率矢量控制、定子磁场定向矢量控制等），至今尚未形成一种世界所公认的最佳控制方案。

直接转矩控制理论在 20 世纪 80 年代中期由德国的 Depenbrock 教授等首先提出，该理论摒弃了矢量控制中对定子电流“解耦”思想，省略了复杂的旋转坐标变换与计算，使得转矩控制更为简捷，20 世纪 80 年代末逐渐被应用到变频器产品上。直接转矩控制是基于定子电压的转矩控制方案，在忽略定子电阻影响时，理论证明了定子磁链矢量的运动方向与定子电

压方向一致，且旋转速度决定于定子电压幅值，因此可利用空间矢量分析法在定子坐标系下计算出交流电动机的转矩。直接转矩控制的最大优点是不需要进行电流、磁链等变量的复杂变换，物理概念明确，系统结构简单，特别适合开环控制的变频器，但同样存在转矩与速度的精确观测问题。

矢量控制与直接转矩控制的共同问题是需要建立准确的磁通观测模型与速度观测模型，前者决定了变频器的转矩控制性能，后者决定了变频器的速度控制精度。这些精确的观测模型需要详细的参数（如电动机的定子/转子电阻、电感、铁心饱和系数等），这对被控对象不确定的通用变频器来说是非常困难甚至是不可能的。为此，现代高性能变频器在完成变频控制的基础上，增加了可自动进行对象参数测试与设定的“自动调整（Auto-tuning）”功能。

自动调整功能包括在线调整、停止型调整、空载旋转型调整与带负载在线自动调整等功能。在线调整用于定子连接线与电动机定子的电阻测试与设定，可减小低频时的定子电阻压降对输出转矩的影响，它对  $V/f$  控制、矢量控制、直接转矩控制同样有效。停止型调整通过电动机的静态励磁，可根据电压/电流反馈数据，计算出建立模型所需要的电阻、电感等基本参数。旋转型调整最初只能在空载时进行，它根据不同转速下的动态电压/电流变化数据，计算出较为准确的对象参数。而带负载在线自动调整则是在此基础上进一步完成包括负载惯量在内的更多参数的测试与设定，其得到的观测模型更为准确。

当前，开环矢量控制变频器 3Hz 时连续输出转矩已可达 95% 电动机额定转矩以上，0.3Hz 时的最大输出转矩可达 200% 电动机额定转矩，有效调速范围大于 200:1，速度响应为 120rad/s 左右，速度精度为  $\pm(0.2\sim0.3)\%$ 。闭环矢量控制变频器的有效调速范围可达 1500:1 以上，速度响应为 300rad/s 左右，速度精度可达  $\pm(0.02\sim0.03)\%$ ，其性能已经接近闭环直流调速系统。

### 1.3.2 变频器的主要发展方向

变频器作为运动控制系统中的功率变换器，为交流电动机提供变压变频电源，涉及了多种学科的技术。变频器的快速发展得益于电力电子技术、计算机技术和自动控制技术及电机控制理论的发展。当前竞争的焦点是高压变频器的研究开发与生产。

随着新型电力电子器件和高性能微处理器的应用以及控制技术的发展，变频器的性能价格比越来越高，体积越来越小，而且厂家仍在不断地提高可靠性，为实现变频器的进一步小型轻量化、高性能化和多功能化以及无公害化而做着新的努力。辨别变频器性能的优劣，一要看其输出交流电压的谐波对电机的影响；二要看输入侧对电网的谐波污染和输入功率因数高低；最后还要看本身的能量损耗（即效率）。变频器的发展趋势大致有下面几个方向。

#### 1. 主控电路一体化

日本三菱公司研制的功率芯片和控制电路集成在一块芯片上的 DIPIPM（即双列直插式封装）已经推向市场。这是一种将逆变功率电路和控制电路一体化、智能化和高性能化的 HVIC（高耐压 IC）SOC（System on Chip）。其首先应用到家电产品中，以满足低成本、小型化、高可靠性和易使用等要求。因此随着芯片功率逐渐增大，将在市场上极具竞争力。

#### 2. 小型化

变频器的体积越来越小是另一发展趋势。小功率变频器产品的最终目标是像接触器、软起动器等电器元件一样，使用简单，安装方便，安全可靠。变频器的小型化取决于支撑部件