

文章编号:1671-251X(2010)02-0122-04

# 变频调速的基本方法

陈和权

(煤炭科学研究院常州自动化研究院,江苏 常州 213015)

**摘要:**文章介绍了变频调速的基本原理、主要的变频方式,详细分析了  $u/f$  控制方式、矢量控制方式的数学变换,并比较了  $u/f$  控制方式、矢量控制方式和直接转矩控制方式的基本特点及性能,对从事煤矿机电设备特别是变频器选型的技术人员具有一定的参考作用。

**关键词:**变频器; 调速; 压频比控制;  $u/f$  控制; 矢量控制; 直接转矩控制; 变换

**中图分类号:**TN773      **文献标识码:**B

## 0 引言

随着工业化与自动化程度的提高,电动机的应用越来越多。如何让电动机按照所希望的方式运转、实现调速是众多用户的需求。对于交流异步电动机,选用变频器驱动是最好的实现办法。以下笔者介绍几种常用的变频调速方法,以供参考。

## 1 变频调速的基本原理

在拖动系统中,用变频器驱动电动机的目的就是实现调速,让电动机按照希望的方式运转。但不论系统是否采用调速,稳定运行是必须的,即要求系统在受到扰动时有自动恢复的能力。

系统的负载特性不能依靠改变外加电气参数来改变,只能改变电动机自身的电气参数来实现。由

于电动机机械特性曲线是由电动机本身多个电气参数决定的,通过改变这些电气参数,得到不同的人为机械特性,从而使新的人为机械特性曲线与负载特性曲线形成新的稳定交点,实现稳定速度调节,这就是引入变频器驱动电动机实现调速的基本原理。

电动机机械特性随电动机自身电气参数改变而改变,但由于系统转动惯量的存在,转速不能突变,一旦外部施加的电气参数改变,必然引起电动机电磁转矩的突变,从而破坏原来的转矩平衡关系而产生新的系统合转矩。该合转矩将对系统产生一个加速度,使系统加速或减速。当外部参数稳定之后,系统转速过渡到新的稳定状态,这个加速或减速过程就称为调速过程。

## 2 变频方式

实现变频的方式主要有2种,即交-交变频和交-直-交变频。

### 2.1 交-交变频

根据半导体变流技术,改变晶闸管导通控制角

运行良好,数据传输的可靠性、实时性强,可以方便地形成一套腐蚀监测和数据采集系统,有一定推广应用价值。此外,本文还利用公共电话网对远距离环境下的腐蚀在线监测仪通信问题进行了研究,由于公共电话网通信的实时性和保密性都比较差,因此只用在了解远程测控对象的运行状态和提前预防事故的场合。

### 参考文献:

- [1] 张波,张振仁.基于Modbus协议的C51软件编程[J].电测与仪表,2005(8):54-55.

- [2] 杜树春.单片机C语言和汇编语言混合编程实例详解[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.  
[3] 朱小襄. Modbus 通信协议及编程[J]. 电子工程师, 2005,31(7):42-44.  
[4] WINIECKI W, MIEL CARI T. Internet-based Methodology for Distributed Virtual Instrument Designing [C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2003, Warsaw :760-765.  
[5] 孙先逵,秦嵒.远程测控技术的发展现状和趋势[J].仪器仪表学报,2004,25(4):562-564.  
[6] 许卫春,贺忠海.远程血压监测系统[J].电子测量技术,2005(3):29-33.

可调节其直流输出电压:当 为 90°时,输出电压为零;为 0°时,输出电压最大。如果让 从 90°逐步变化为 0°,再以同样的时间回到 90°,就得到从小到大再从大到小变化的输出直流电压;如果再反向并联一组同样的整流桥,也照同样方式控制,得到一个交流波形的另一个半波。将 2 个部分整流桥合并,于是就得到一个新的、完整的交流电压值。由于控制角 是受控制的,输出的电压值大小也就随之受控,调压过程即可实现。在控制角 的变化时,变化速度的快慢即可改变输出波形的周期,就实现了调频。交-交变频单相电路如图 1 所示。

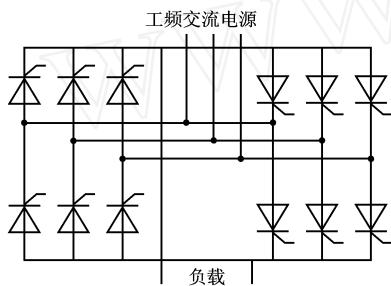


图 1 交-交变频单相电路图

## 2.2 交-直-交变频

交-直-交变频就是在交-交变频的中间增加一个直流环节。首先将输出的交流电通过整流变成直流,再通过逆变器将直流电变成交流电,这样的变频器就称为交流-直流-交流变频器,简称交-直-交变频器。变频的问题解决了,变压与交-交方式一样。交-直-交电压型变频主电路如图 2 所示。

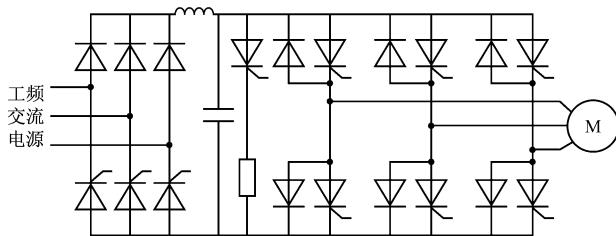


图 2 交-直-交电压型变频主电路图

直流环节中,若滤波元件为电容,由于电容两端电压不能突变,因而直流环节的电压比较稳定,相当于一个恒压源,这种变频器称为电压型变频器;若滤波元件为电感的,由于电感的电流不能突变,直流通部分就相当于一个恒流源,就称为电流型变频器。

## 3 变频控制方式

变频器的控制方式主要是指针对频率、电压参数的适当变化控制,实现对电动机磁通和转矩的控制。目前市场上通用变频器常见的控制方式有  $u/f$

控制方式、矢量控制方式和直接转矩控制方式 3 种。最简单的是  $u/f$  控制方式,下面重点介绍该方式,对矢量控制方式的数学变換作简单介绍。

### 3.1 $u/f$ 控制模式

同时配合调节加在电动机输入端电源的电压与频率是变频器调速的基本思想。根据交流异步电动机定子转速公式,电动机的转速与电源频率有关(电动机的极对数是一定的),因此,在电压频率的函数中,频率是自变量,电压跟随自变量变化而变化,这种方式就称为  $u/f$  控制方式。

#### $u/f$ 控制方式的实现方式:

交流异步电动机定子的转速公式为  $n = 60f/p$ ,其中  $n$  为转速;  $f$  为电源频率;  $p$  为电动机的极对数。对于一台具体的电动机,  $p$  是固定不变的,得到  $n$  与  $f$  成正比变化。由三相异步电动机的 T 型等值电路(如图 3 所示)得:

$$U_1 = I_1 r_1 + j I_1 \chi_1 - E_1 \quad (1)$$

式中:  $U_1$  为定子端电压;  $I_1$  为定子电流;  $r_1$  为定子电阻;  $\chi_1$  为定子漏抗;  $E_1$  为定子感应电动势。

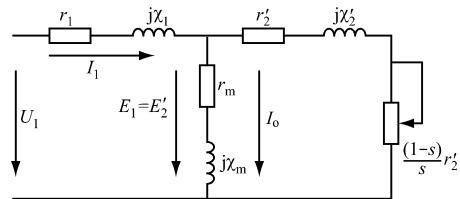


图 3 三相异步电动机 T 型等值电路图

$E_1$  主要与切割磁力线的速度、主磁通  $\Phi_m$  的大小、导体的有效长度有关,而速度又正比于电源频率,对于一台具体的电动机,本身的电气参数是固定不变的。根据电磁感应定律,有:

$$E_1 = -I_1(r_m + j\chi_m) = -jC_f \Phi_m \quad (2)$$

式中:  $C_f$  为定子电动势系数。

将式(2)代入式(1),得:

$$U_1 = I_1 r_1 + j I_1 \chi_1 + j C_f \Phi_m \quad (3)$$

如果忽略定子电阻上的电压降,即式(3)右边的第一项,则电动机的端电压与频率成正比,让该比值与额定供电电压和工频频率时的比值保持一样恒定,这就是基本  $u/f$  控制方式的指导原则。

在工频以上,额定电压不变,压频比变小,电动机弱磁运行,所以运行频率存在一个上限;在工频以下,压频比在忽略定子电阻上的电压降后近似成正比,磁通近似恒定,这是在忽略式(3)的右边第一项的前提下,  $u/f$  控制方式才能保持磁通恒定,即  $u/f = \text{常数}$ ,而实际上定子电阻  $r_1$  是客观存在的,根据欧姆定律,有电阻必然有电压降。频率下降时,

式(3)右边的第二、第三项等比例下降,但同样定子电流下的定子电阻降却不变,要保持压频比为定值,只能是电动机端电压(即变频器的输出电压)下降比例要小于频率下降的比例;特别是当频率  $f$  下降太多时,定子电阻  $n$  上分得的电压就越多,磁通就不再恒定,即在低频时出现衰减,其结果造成启动困难,启动加速度低,加速时动态速度偏差大,满负载时需要为保证启动能力而加大变频器容量。

如果从电动机能量传递关系上分析,更容易理解变频时为什么必须调压:电动机的输入功率与输入的线电压、电动机每相电流、定子的功率因数三者的乘积成正比,电动机的输出功率与转矩和对应频率下的转速的乘积成正比。当频率下降时,电动机的转速随之下降,其输出功率相应的下降;而输入功率不会自动减少,这就导致电动机的输入功率与输出功率间的失衡。为了保证输入与输出功率的平衡,要求在频率下降时同时降低其电压。其中这功率的损耗主要是定子侧铜损和铁损,而铜损在二者中又占绝大部分,即在定子电阻  $n$  上。

弥补该方式不足的方法是采取低频下的电压补偿措施,如图 4 所示,需要补偿的是定子电阻  $n$  和定子漏抗  $\tau$  产生的电压分量,而定子电流是变化的,定子漏抗  $\tau$  又随频率变化,如何确定该预置电压,电压值为多少,想完全补偿是很困难的。不同的变频器厂家因采用的算法不同,一般用多条直线组成的折线来近似模拟图 4 的电压频率曲线,有的变频器可以设置多条不同补偿程度的曲线,供用户根据不同负载类型或要求选择。

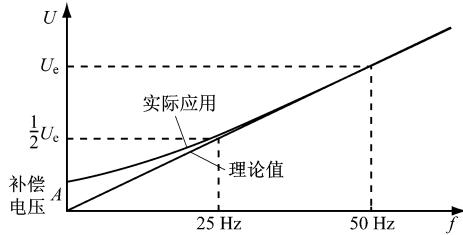


图 4 低频下的电压补偿示意图

尽管有了电压补偿,  $u/f$  控制方式不适合在极低频率下运行,一般不建议在 6 Hz 以下长期稳定运行。为了弥补电压补偿仍存在的不足,目前知名品牌的变频器还采取转矩补偿、转差补偿以及转差频率控制等辅助手段,目的在于改善系统的稳定运行性能和提高动态性能。

### 3.2 矢量控制方式

众所周知,直流电动机的调速性能十分优越,异步交流电动机能否达到同样的性能呢?答案是肯定

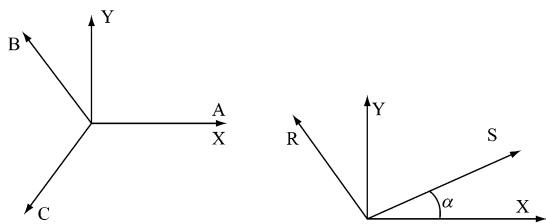
的。由于直流电动机的磁通由定子绕组和转子绕组分别激励,使磁通和转矩能分别控制,从而使得直流电动机具有对转矩良好控制能力。同样办法,能将交流异步电动机定子电流分解成励磁磁分量和转矩分量,分别进行控制,然后再通过恰当算法变换最后合成对变频器相关量的控制信号,这就是矢量控制的指导思想。该技术在理论上也完全可行。

#### 3.2.1 坐标变换

交流异步电动机由空间上三相等分布的绕组励磁组成,三相绕组激励出三相磁场,由于三相绕组在空间上等分布,所以三相磁场互成 120°。假设由三相绕组产生的合成磁场和两相绕组产生的合成磁场相等,寻找由此假设三相与两相电动机之间存在的数量关系,就需要进行坐标变换。

交流异步电动机三相绕组定义为 A、B、C,直流电动机两相绕组定义为 X、Y,并且将 X 相在空间位置与三相绕组的 A 相绕组重合,如图 5(a)所示。若沿 X、Y 相方向建立直角坐标,由于磁通与电流和匝数成正比,利用特殊角的三角函数,根据前面的假设,由矢量代数可得出如下矢量关系表达式:

$$\begin{cases} N_2 i_X = N_3 \left\{ i_A - \frac{1}{2} i_B - \frac{1}{2} i_C \right\} \\ N_2 i_Y = N_3 \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} i_B - \frac{\sqrt{3}}{2} i_C \right\} \end{cases} \quad (4)$$



(a) 三相电动机与  
两相电动机磁场  
坐标变换示意图  
(b) 两相交流电动机与  
直流电动机瞬时  
坐标变换示意图

图 5 交流异步电动机绕组坐标变换关系示意图

式中:  $N_2$ 、 $N_3$  分别为两相和三相电机绕组的匝数。

当匝数比  $\frac{N_2}{N_3} = \frac{\sqrt{3}}{2}$  时,由式(4)可以求出电流幅值比为  $\frac{|i_X|}{|i_A|} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ 。在相同的磁通下,电动机感应电动势之比正比于绕组的匝数比,将这个比例式代入式(4),经变换后得到由三相交流电动机向两相交流电动机的电流变换关系,如式(5)所示,这就是坐标变换的目的。

$$\begin{cases} i_X = \sqrt{3} \left( i_A - \frac{1}{2} i_B - \frac{1}{2} i_C \right) \\ i_Y = \sqrt{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} i_B - \frac{\sqrt{3}}{2} i_C \right) \end{cases} \quad (5)$$

### 3.2.2 旋转变换

直流电动机由于电枢导体中电流分布不变,因此绕组激励的磁场是相对静止的,而三相交流电动机绕组激励的磁场对于定子来讲是旋转的。在某一时刻,假设经过坐标变换后得到的两相交流电动机与直流电动机在相位关系上有夹角,其坐标关系如图5(b)所示,同样以坐标变换的思路,列出两者磁通间的关系式:

$$\begin{cases} N_{DC} i_S = N_{AC} (i_X \cos \theta + i_Y \sin \theta) \\ N_{DC} i_R = N_{AC} (-i_X \sin \theta + i_Y \cos \theta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $N_{DC}$ 为两相直流电动机的绕组匝数; $N_{AC}$ 为三相交流电动机转换成两相交流电动机后的绕组匝数。

此时都是两相电动机,总功率是一样大小,匝数比也应该一样,就得到两相交流电动机与等效直流电动机的电流变换关系:

$$\begin{cases} i_S = i_X \cos \theta + i_Y \sin \theta \\ i_R = -i_X \sin \theta + i_Y \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

该变换被称为旋转变换。连续进行坐标变换和旋转变换,将三相交流电参数换成为等效的直流参数。再将以上2种变换进行逆变换,从而得到相应的三相交流参数,再用这些参数去控制交流电动机。通过连续2次变换和逆变换,实现了定子电流中励磁与转矩2个分量的分离,实现分别控制,这就是矢量控制的理论基础。

### 3.3 直接转矩控制方式

直接转矩控制方式主要被ABB公司所采用。它是不同于矢量控制方式的另一种高性能控制方式:它也是分别控制电动机的转矩和磁链,不过该方式不是选择转子磁链,而是以定子磁链作为被控对象,通过建立定子磁链和转矩的数学模型,实时检测磁通幅值和转矩值,分别与给定值比较,获得定子磁链和转矩的反馈值,将该反馈值控制逆变电路,即利用逆变电路的开与关状态切换来实现对磁链和转矩的直接闭环控制,这就是基于磁链跟踪的直接转矩控制的基本原理。

## 4 3种控制方式的比较

$u/f$ 控制方式思路简单,附加要求少,控制容易,但急加、减速或负载过大时,容易引起电流能力

不足,调速范围窄;同时,由于不能精确控制电动机的实际速度,常用于对速度精度要求不是很高和负载变动不大的场合;矢量控制方式和直接转矩控制方式都是高性能控制方式,前者的稳定性能优于后者,后者的动态性能优于前者,很多高性能的变频器是将2种控制方式混合使用;但两者的差别不大,稳定性能均能满足实际应用要求。3种控制方式的性能比较如表1所示。

表1 3种控制方式的性能比较表

性能	控制方式								
	$u/f$ 控制		矢量控制		直接转矩控制				
	简单		复杂		复杂		复杂		
调速范围	1	10~1	20	1	20~1	80	1	20~1	80
最低运行频率/Hz	6			1			1		
最高运行频率/Hz	80			100			100		
带载能力	弱		强		强				
稳定性	不够稳定		好		较好		较好		
动态性能	不够理想		较好		好				
响应速度	一般		较快		快				
谐波成份	大		较小		较大				
性价比	不高		高		高				
适用场所	适用于多数二次方负载和动态性能要求不高的恒转矩负载		适用于绝大部分负载		适用于绝大部分负载				

## 5 结语

本文介绍了变频调速的基本原理、变频调速的种类、变频器调速实现的方法,详细地分析了 $u/f$ 控制方式、矢量控制方式的数学变换,并比较了各种控制方式的基本特点及性能。本文所述内容对从事煤矿机电设备特别是变频器选型的技术人员具有一定的参考作用,可以帮助相关人员选择适合实际负载情况和精度要求的变频器,以发挥变频器最优的性价比,更好地为生产、生活服务。

## 参考文献:

- [1] 李发海,王岩.电机与拖动基础[M].2版.北京:清华大学出版社,1994.
- [2] 孙树朴,肖量,王旭光,等.半导体变流技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,1994.
- [3] 张燕滨.变频调速460问[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [4] 韩国收获电气株式会社.SOHOB-VD变频器用户手册[EB/OL].(2009-07-09).<http://www.bp911.com/tiaozao6.html>.