

# 交-交变频自适应转差频率控制策略的研究

杜庆楠<sup>1</sup> 奚振武<sup>1</sup> 冯高明<sup>1</sup> 杨立峰<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000; 2. 国网河南嵩县供电公司 嵩县 471400)

**摘要:** 在交流调速系统中,转差频率始终都是一个变化的量,加之交流调速中对转速的调节始终会有一个滞后性,这就造成了普通算法很难实现对转差频率的精确控制。PID算法是对变量进行控制的一种比较好的控制算法,但是由于普通PID控制算法的参数是一组固定的数值,虽然能够实现对变量的控制,但是在控制精度和灵敏度上,不能很好地适应系统的变化,本文在进行转差频率控制时,引入了专家PID控制算法,建立了专家知识库,利用专家控制策略,实行在线自动修正PID参数以及改变控制策略,使系统适应在不同工作状态下的特征。通过编写s函数建立Matlab仿真,并进行实验验证。

**关键词:** 交流调速;转差频率控制;专家PID;闭环调速

**中图分类号:** TM343 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

## AC-AC converter adaptive slip frequency control strategy

Du Qingnan<sup>1</sup> Xi Zhenwu<sup>1</sup> Feng Gaoming<sup>1</sup> Yang Lifeng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. State Grid of Songxian, Songxian 471400, China)

**Abstract:** In AC speed regulation system, slip frequency always change. There is still a lag in the adjustment of the speed of AC speed regulation. This makes it difficult to realize the precise control of slip frequency. PID algorithm is a good control algorithm for variable control. But the parameters of the ordinary PID control algorithm are a set of fixed values. In control precision and sensitivity, it can not adapt to the changes of the system. This paper introduces an expert PID control algorithm. Expert knowledge base is set up, the expert control strategy is used to automatically modify the PID parameters and control strategy. It makes system to adapt to different working conditions.

**Keywords:** AC speed control; slip frequency control; expert PID algorithms; closed loop speed control

## 1 引言

变频调速技术是通过利用功率器件实现对电能的变换,从而满足用电设备的需求<sup>[1-2]</sup>。在变频调速中,主要有恒压频比控制、矢量控制、直接转矩控制和转差频率控制<sup>[3-7]</sup>。转差频率控制是恒压频比控制的一种改进,通过控制转差频率来控制转矩,其动态性能较好,容易实现而被广泛应用。转差频率控制的中心思想就是通过对转差频率的控制,实现对系统转矩的控制<sup>[8]</sup>。在交流调速系统中,转差频率始终都是一个变化的量,PID算法就是对变量进行控制的算法,但交流调速中对转速的调节始终会有滞后性,这就使普通PID算法很难对转差频率的精确控制<sup>[9-14]</sup>。故本文引入专家PID控制策略。建立仿真模型进行MATLAB仿真<sup>[15]</sup>,搭建实验平台,从仿真和实验两方面验证控制策略控制精度高和稳定性强。

## 2 转差频率控制的概念

转差频率控制是基于恒压频比控制,为了解决异步电动机电磁转矩控制问题应运而生的一种方法,基于该方案对系统进行调速,控制电机的电磁转矩,从而得到与直流调速系统中恒磁通调速相似的调速性能。异步式电动机的机械特性方程式是:

$$T_M = 3n_p \left( \frac{E_g}{\omega_1} \right)^2 \frac{\omega_1 R'_2}{R_2^2 + s^2 \omega_1^2 L_{l2}^2} \quad (1)$$

将  $E_g = 4.44 f_1 N_1 k_{N1} k_{N1} \Phi_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega_1 N_1 k_{N1} \Phi_m$  代入式(1)得:

$$T_M = K_m \Phi_m^2 \frac{\omega R'_2}{R_2^2 + \omega^2 L_{l2}^2} \quad (2)$$

式中:  $K_m = (3/2)n_p N_1^2 k_{N1}^2$  为电机的结构常数由于电机在

稳态运行时,  $s$  值很小, 可以认为  $s^2 \omega_1^2 \ll R'_2$ , 令  $\omega_s = s\omega_1$ , 则式(2)近似表示为:

$$T_M = K_m \Phi_m^2 \frac{\omega_s}{R'_2} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 当  $s$  值很小时, 如果能够保证系统的气隙磁通  $\Phi_m$  为恒值, 就可以近似认为异步电机的电磁转矩与转差频率  $\omega_s$  成正比。也就是说, 只要在交流调速系统中控制电动机的  $\omega_s$ , 就可以达到与直流调速系统中控制电机电流相似的效果, 达到间接控制电机转矩的目的。因此, 转差频率控制的概念可以总结为控制转差频率来实现控制系统的转矩。

### 3 专家 PID 控制

专家控制系统是基于知识或经验的控制系统, 主要处理定性的、启发或不确定的问题, 根据专家知识库, 通过逻辑推理最终实现对系统的控制。基于转差频率控制策略设计的专家 PID 结构原理如图 1 所示, 专家控制部分主要包括: 专家知识库和逻辑推理, 原理图中的各个模块都是由交变频的主控芯片来完成的, CPU 根据转差频率、电网当前电压、系统当前状态来调整具体的 PID 参数, 并按照 PID 参数进行运算, 计算出输出频率和电压值, 从而实现转差频率控制。

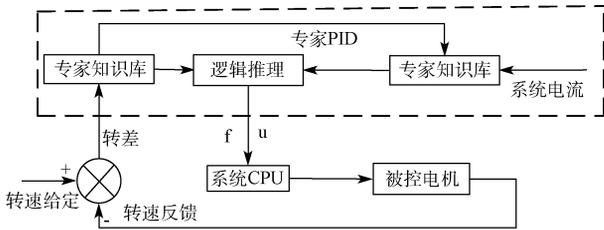


图 1 专家 PID 控制原理框图

#### 3.1 专家知识库的建立

1) 想要使系统的调速效果满足系统在不同分频、负载、性能要求, 所设置的 PID 控制器就应该选则不同的参数值。并在实验中对各个分频下总结出来的 PID 参数进行验证和修改, 最后在各个分频下均选取一组能够是系统运行良好的 PID 参数, 如表 1 所示。

表 1 不同分频下的 PID 参数

分频数	4	5	6	7	8	9	10
比例系数	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1
积分系数	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6
微分系数	0.1	0.1	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08

2) 结合实验过程中对电机在不同频率条件下的运行情况, 通过大量的实验研究和对数据的分析处理, 总结出了不同频率不同负载情况下系统运行的最佳压频比的值, 部分列于表 2 中。

表 2 部分频率负载情况下的最佳电压/V

频率/Hz	50/4	50/5	50/6	50/7	50/8	50/9	50/10	
0	58.8	49.7	40.1	34.7	30.3	27.2	26	
2.4	65.5	54.3	46.2	41	38	34	32	
负载/ N·m	3.4	71.6	64.7	53.5	51.6	46	40.7	35.2
4.6	77.1	74.2	63.7	58	54	48	45	
6.5	82.7	90	77	69.8	64	58	55	
7.6	89.9	95	82	75	38	62	59	

3) 为了在调速的过程中, 方便系统对输出电压的灵活控制, 满足转差频率控制的系统要求, 特将不同速度给定的情况按区域换分, 去调节系统的输出, 将具体的划分情况列于表 3 之中。

表 3 给定速度的区域划分

分频数	4	5	6	7	8	9	10
速度下限	576	481	416	366	324	291	220
速度上限	725	575	480	415	365	323	290

另外, 电网电压的变化以及不稳定性对系统的调速性能的影响很大。在做实验时发现, 如果能够准确的检测到电网电压的变化, 并根据变化在线修正系统的 PID 参数, 可以明显的减小由电网电压变化引起的系统的动态偏差, 从而提高系统的闭环调速性能。因此, 在电压变化时, 可以根据电网电压的变化量来修改系统 PID 的各项参数。

#### 3.2 专家 PID 控制规则

通过改变 PID 控制器的各项参数, 可以实现改变交-交变频调速系统的性能。增加控制器的比例系数可以减少系统的响应时间, 减小系统稳态误差; 减小控制器的微分系数可以减小系统的超调量; 增大控制器的积分系数同样可以减小系统超调量, 加快响应速度。过分调节某一个参数又会使系统其他方面的性能减弱, 因此, PID 控制规则如下。

1)  $|e(k)| > M_l$ , 即此时系统的偏差很大, 应该加强控制器的积分作用, 快速减小偏差, 控制器的表达式为:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 K_I e(k) \quad (4)$$

2)  $M_m < |e(k)| < M_l$ , 即此时系统的偏差较大。

如果  $e(k)\Delta e(k) < 0$ , 即偏差在减小, 应该采用加强的比例作用, 算式如下:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 K_p [e(k) - e(k-1)] \quad (5)$$

3)  $\epsilon < |e(k)| < M_s$ , 即此时系统的偏差较小。如果  $e(k)\Delta e(k) < 0$  且  $\Delta e(k)\Delta e(k-1) > 0$ , 即系统的偏差在朝平衡状态的方向发展, 应保持控制器输出不变, 控制器的表达式为:

$$u(k) = u(k-1) \quad (6)$$

如果  $e(k)\Delta e(k) < 0$  且  $\Delta e(k)\Delta e(k-1) < 0$ , 即系统偏差在平衡状态附近, 此时系统出现了震荡。为了减弱以致消除系统的震荡, 应使控制器的表达式为

$$u(k) = u(k-1) + k_2 K_p [e(k) - e(k-1)] \quad (7)$$

4)  $|e(k)| < \epsilon$  时,即此时系统偏差的绝对值很小,为消除系统静差,PID控制器采用PI环节,即:

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) \quad (8)$$

以上式中, $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 分别为当前和上一采样时刻给定转速与实际转速的差值; $u(k)$ 、 $u(k-1)$ 分别为当前和上一采样时刻PID控制器的输出; $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 分别为PID控制器的比例系数、积分系数、微分系数; $M_l$ 、 $M_m$ 、 $M_s$ 、 $\epsilon$ 分别为系统偏差很大、较大、较小、很小的临界值; $k_1$ 为PID控制器的放大系数, $k_2$ 为PID控制器的抑制系数;在多次的实验中,得到参数如表4所示。

表4 PID结构调整参考值

$M_l$	$M_m$	$M_s$	$\epsilon$	$k_1$	$k_2$
60	30	15	7	4	0.8

## 4 仿真分析

根据转差频率控制策略原理以及加入的专家PID控制算法,放入到专家PID知识库之中,编写s函数,建立MATLAB仿真模型进行仿真,并对仿真结果进行分析。为了验证转差频率控制策略以及加入专家PID控制算法后的效果,首先对仿真模型进行起动研究。在工业生产中,系统的运行不可能是直接起动和停止这样简单,必定会遇到各种工况,故仿真其启动效果、速度突变时的效果和负载变化时的效果。

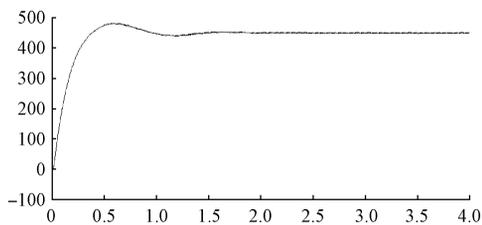


图2 450 r/min无转差频率控制启动效果

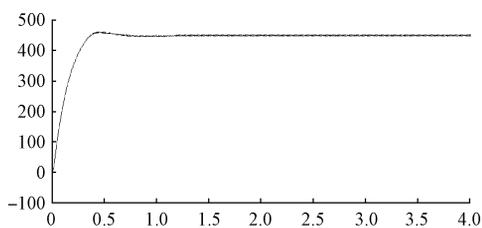


图3 450 r/min转差频率控制启动效果

由图2和3可以看出,在加入转差频率控制策略之前,系统从开始起动到系统最终稳定下来用了1.5 s,起动过程中系统超调量为6.5%;而为加入转差频率控制策略之后系统响应时间变为0.7 s,超调量变为2.5%。

由图4可以看出,加入转差频率控制策略之前,给定突变后,过渡过程为1 s,超调量为5%。图5可以看出,给定突变后,系统能够很快的进入下一个稳定状态,过渡过程共用时0.6 s,过渡过程没有出现明显的震荡,超调量为2.5%。

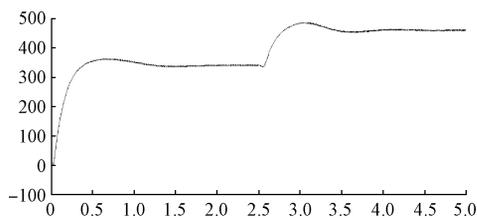


图4 速度突变(340~460)时无转差频率调速效果

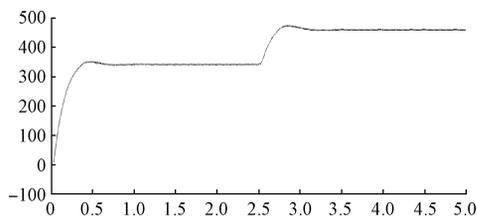


图5 速度突变(340~460)时转差频率调速效果

图6和7分别是系统转矩突然减少时普通控制方式下和转差频率控制模式下系统的调速效果。仿真时设定:初始状态下负载转矩为 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,当系统达到稳定状态后,突然减少系统的负载转矩为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。对比2个仿真结果图可知,图6中当系统转矩突然减小为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 后,由于负载力矩是突然变化的,而系统的输出转矩不可能发生突变,造成瞬间系统的输出转矩大于负载力矩,致使系统的转速增加,但是增加过程较慢,增幅为 $21 \text{ r/min}$ ,然后系统转速开始下降,系统回到给定转速的过程较为缓慢,用时1 s才再次稳定,并且系统在回复的过程中再次出现了震荡,超调量为3.2%。转差频率控制方式下,当负载转矩突然较少为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 后,系统转速同样出现了迅速增加,增幅为 $10 \text{ r/min}$ ,然后又开始迅速的下降,经过0.4 s回到稳定状态,整个调速过程中,系统过度平稳,没有出现超调,能够满足系统在反应的快速性和控制的精度的要求。

## 5 实验与分析

为了验证交交变频转差频率控制系统的调速效果,在搭建的实验平台的基础上,编写实验程序,进行转差频率控制的实验研究。实验中选用的电机是型号为1LA7096-2AA10的西门子鼠笼式电机,其名牌参数为,额定电压230 V,额定转速2 880 r/min,额定功率2.2 kW,额定电流7.9 A,额定功率因数为0.85。

图8是转差频率控制下,负载转矩设定在 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,系统在给定转速为450 r/min,系统的启动效果图。从图中可以看出:系统都能够很平稳快速的启动,且启动过程无超调

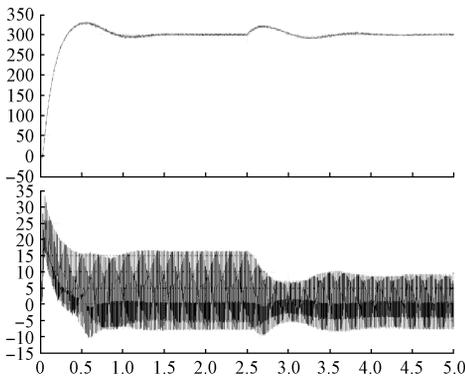


图 6 负载突减时普通控制方式调速效果

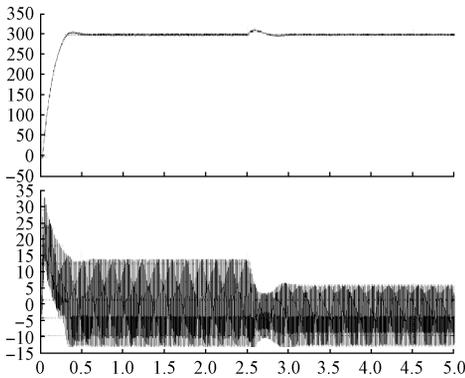


图 7 负载突减时转差频率调速效果

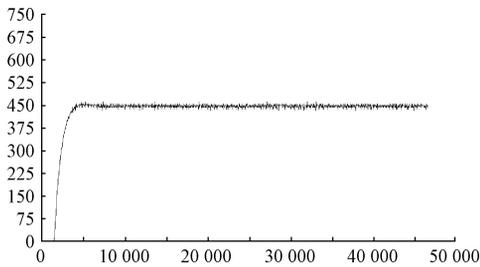


图 8 转差频率控制给定 450 r/min 启动效果(负载 2 N·m)

现象也没有出现震荡,系统进入给定转速之后,转速波动较小,能够稳定运行。

在图 9 中,由于在系统中加入了转差频率控制策略以及专家 PID 控制算法,当系统给定转速突然增加到 570 r/min 后,系统转速迅速的增加,用时 1.8 s 系统达到给定转速,整个切换过程中,系统转速变化平稳,没有出现超调和震荡。造成这种现象的原因是:系统中加入的转差频率控制策略和专家知识库,能够使系统自发的根据电机的负载情况和运行情况,去选择不同的 PID 参数,以及系统输出变量的幅值,从而使电机自觉地适应不同的工作状态,实现精确地控制电机转速的目的。

图 10 同样是给定转速为 520 r/min,负载转矩为

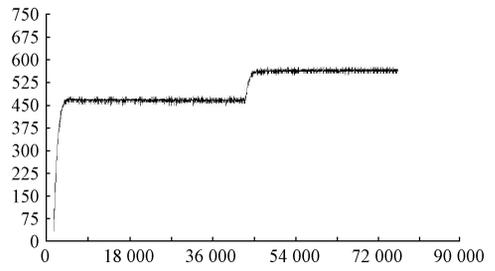


图 9 转差频率控制下给定突变(470~570)调速效果(负载 2 N·m)

2.4 N·m 的情况,当系统转矩突然由原来的 2.4 N·m 变为 1.6 N·m 时,同样由于系统的输出转矩没有发生突变,导致系统的输出转矩瞬间大于负载转矩,这样就带动系统的转速立即上升到 555 r/min 左右,然后又迅速的下降到 520 r/min,进入稳定运行状态,整个变化过程共用时 2.5 s,且变化过程中没有出现超调现象。

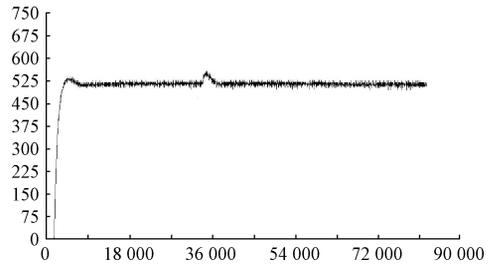


图 10 突减负载(2.4~1.6 N·m)时调速效果

## 6 结 论

结合双变量交交变频器转差频率控制系统的结构特性,以及搭建的实验平台的特点和研究所现有的实验资源,在控制算法中加入了专家 PID 算法,本章对转差频率控制调速状况进行了研究。分别就普通的闭环控制和加入专家 PID 控制算法后的转差频率控制进行了对比实验。对不同给定转速的启动效果进行对比研究,速度突变情况下的切换效果做了对比分析,还对负载突变情况下系统的性能进行了探讨,最终证明了所设计的交交变频器转差频率控制调速系统能够满足工业生产中对系统的快速性,稳定性以及控制精度的要求,可以在工控领域进行的推广生产。

## 参考文献

- [1] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2012.
- [2] 王成元,夏加宽,孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [3] 朱高中. 变频调速系统控制方法的研究[J]. 中国农机化学报,2012(4):134-137.
- [4] 刘丽,熊家新,徐鹤. 三相异步电动机变频调速的节能研究[D]. 长春:长春理工大学,2014.

- [5] 刘华林. 双变量六脉波交-交变频器高频调速研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(11): 112-114.
- [6] 王继忠, 李江昀. 大型同步电机交交变频调速系统对电网的谐波影响分析[J]. 电子学报, 2014, 42(5): 1035-1040.
- [7] 冯彩绒. 异步电动机的变频调速控制方式分析[J]. 制造业自动化, 2011, 33(24): 7-9.
- [8] 杜贵平, 李树强. 基于最大转矩输出的改进型转差频率控制技术[J]. 电力电子技术, 2009, 43(12): 14-16.
- [9] 杜井庆, 高世桥, 罗创, 等. 基于PID算法的控制量按任意函数变化的一种控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1317-1323.
- [10] 王慧, 张笑, 赵迪. 基于PLC的掘进机恒功率变频调速系统仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(10): 951-956.
- [11] 徐龙威, 杨帆, 徐令令, 等. 基于TMS320F28335无刷直流电机控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(9): 79-83.
- [12] 肖成, 陈刚, 冯登超, 等. 基于最优模糊推理的风电机组变桨距二维模糊PID控制器设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(10): 22-25.
- [13] 张堃, 费敏锐, 吴建国, 等. 一类参数不确定时滞系统的智能控制应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1394-1401.
- [14] 朱俊杰, 粟梅, 陈程, 等. 无刷直流电机反电势过零检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 441-447.
- [15] 陈承义. 异步电机变频调速矢量控制系统的MATLAB仿真研究[J]. 煤炭技术, 2012, 31(2): 40-43.

## 作者简介

**杜庆楠**, 1958年出生, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为自动控制、电力电子技术与交直流调速。

**奚振武**(通讯作者), 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: 491158385@qq.com

**冯高明**, 1973年出生, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为电力电子与电力传动。

**杨立峰**, 就职于国网河南嵩县供电公司。

(上接第30页)

- [14] 王兴伟, 林桦, 邓建, 等. 实际应用中的矩阵变换器空间矢量调制算法及优化调制模式[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30): 7-15.
- [15] 汪旭东, 夏涛, 许孝卓, 等. 永磁同步直线电机的粒子群PID空间矢量控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 655-661.
- [16] 宋卫章, 钟彦儒, 孙向东. 具有高电压传输比且能抵御非正常输入的Z-源双级矩阵变换器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(24): 21-28.
- [17] 徐龙威, 杨帆, 徐令令, 等. 基于TMS320F28335无刷直流电机控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(9): 79-83.

## 作者简介

**肖儿良**, 1969年出生, 博士, 硕士生导师, 研究方向为功率电子变换技术、嵌入式系统。

E-mail: xiaorliang@126.com

**陈朱杰**(通讯作者), 1990年出生, 硕士生, 主要研究方向为电力电子传动、电机控制等。

E-mail: czj15152350152@sina.cn

**莫康**, 1990年出生, 硕士生, 主要研究方向为电能变换与电力传动、新能源发电控制技术等。

**钱双杰**, 1990年出生, 硕士生, 主要研究方向为新能源, 电机控制。