

# 基于模型参考自适应系统理论的异步电机 矢量控制系统研究

艾永乐<sup>1</sup>, 赵荣国<sup>1</sup>, 高子余<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000; 2. 河南煤化工公司 鹤壁煤业集团, 河南 鹤壁 458000)

**摘要:** 采用模型参考自适应系统对系统转速进行估算, 实现了异步电机的无速度传感器控制。在一个 4 kW 的三相异步电动机上进行了实验, 异步电机结果表明: 该系统具有快速的动态响应能力和良好的稳定性。

**关键词:** 矢量控制; 模型参考自适应; 无速度传感器

中图分类号: TM 301.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)03-0057-03

## The Vector Control System of Asynchronous Motor Based on Model Reference Adaptive System Theory

Ai Yongle, Zhao Rongguo, Gao Ziyu

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China;

2. Hebi Coal Group, Henan Coal Chemical Company, Hebi Henan 458000, China)

**Abstract:** Applies model reference adaptive system to system speed estimate and achieves speed sensorless control of asynchronous motor. Makes an experiment on a three-phase asynchronous motor (4 kW) and the result shows that the system has fast dynamic response capability and good stability.

**Keywords:** vector control; model reference adaptive; speed sensorless

在异步电机的控制领域, 矢量控制原理为异步电动机的驱动器提供了极大的灵活性, 但是由于需要转速、位置编码器, 所以实施成本比较昂贵。相对于应用速度编码器的控制方法来说, 无速度传感器控制的成本是比较低的。在无速度传感器控制方法中, 应用较为广泛的为模型参考自适应系统的控制方法。在无速度传感器控制的方法中, 电机参数对速度估计的影响比较敏感。无速度传感器控制的引入为驱动领域开启了一扇新门, 使调速系统的成本更低, 性能更优越<sup>[1-3]</sup>。

## 1 矢量控制

### 1.1 工作原理

根据感应电机的坐标变换理论, 在三相坐标系下的定子输入电流通过坐标交换, 由三相静止坐标变换为两相垂直的静止坐标, 再从两相静止坐标系变换到两相旋转坐标系, 使得  $M$  轴沿转子总磁链矢量的方向, 最终获得同步旋转坐标系下的直流电流分量即励磁电流和转矩电流。这样异步电机通过坐标变换可实现直流电机一样的控制, 从而实现了异步电机的磁场

收稿日期: 2010-03-18

基金项目: 河南理工大学博士研究基金资助项目(648207)

通信作者: 艾永乐(1963-), 男, 河南辉县人, 河南理工大学教授, 博士, 主要研究方向为现代交流调速控制策略, 电力系统的谐波分析与治理, E-mail: zhaorongguo1234@163.com

和转矩独立控制<sup>[4]</sup>。

一般在异步电机矢量控制运算中需要速度传感器，该速度传感器用于检测电机的速度并反馈到控制模块中与参考速度进行比较。但因电机的速度传感器需要一定的安装空间和精度，因此，速度传感器的使用，无疑会增加控制系统的成本和降低可靠性。无速度传感器的矢量控制是采用转速估算的方法，速度的估计通常采用复杂的算法来完成，且依赖于电机的参数。在低速情况下这些参数对速度的估算影响较大，无速度传感器对速度估算的准确性就会降低。

### 1.2 矢量控制硬件组成

矢量控制硬件电路如图1所示，主要由整流单元，逆变器和DSP共3部分构成。交流电源经过整流单元整流，电容滤波变为恒定直流；然后经过逆变器变换为交流向电机供电，用DSP控制逆变器的触发导通从而达到矢量控制的目的。矢量控制的转子磁场定向需要知道转子磁链幅值和相位，对于无速度矢量控制还需要对电机转速进行估计。本文利用模型参考自适应系统对异步电机的状态进行估计，可以同时得到转子磁链和转速的估计值。

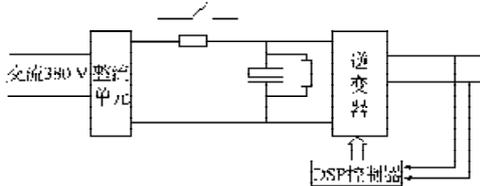


图1 矢量控制系统主电路图

Fig.1 The main circuit diagram of vector control system

## 2 模型参考自适应系统

模型参考自适应系统如图2所示。

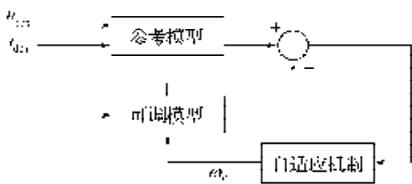


图2 模型参考自适应系统结构

Fig.2 The structure of model reference adaptive system

在图2中，模型参考自适应系统规定了一个性能指标，它与实际的性能指标之间的比较差值可以从比较可调模型与参考模型的输出中得到。参考模型的输出与可调模型的输出之差被自适应机构用来修改可调系统的参数，从而使可调系统的输出和参考模型的输出之差趋于最小。模型参考自适应系统使用定子侧的电压和电流对转速进行估算，该可调模型的输出和参考模型输出相比较。然后，根据状态变量之间的差异估计转子的速度。运用模型参考自适应系统理论

(MRAS)，可以实现电机参数在线辨识。自适应控制已经成为实现高性能控制系统中重要的解决方案，特别是当动态特性不明，或有大的变化时，模型参考自适应系统能实现快速的动态响应<sup>[5-6]</sup>。

自适应模型是利用磁链方程构造的，该模型通过定子电压和电流信号计算出转子磁链。模型在d-q坐标系下转子侧平衡方程式可表示为：

$$\frac{d\psi_{dr}^s}{dt} + R_r i_{dr}^s + \omega_r \psi_{qr}^s = 0,$$

$$\frac{d\psi_{qr}^s}{dt} + R_r i_{qr}^s + \omega_r \psi_{dr}^s = 0.$$

又因为：

$$\psi_{dr}^s = L_{\sigma} i_{dr}^s + L_m i_{dr}^r, \psi_{qr}^s = L_{\sigma} i_{qr}^s + L_m i_{qr}^r,$$

因此自适应模型可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_{dr}^s \\ \dot{\psi}_{qr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_r - \omega_r \\ \omega_r - 1/T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{dr}^s \\ \psi_{qr}^s \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{bmatrix} i_{dr}^r \\ i_{qr}^r \end{bmatrix},$$

上述方程给出了作为定子电流和转子转速下的转子磁链（其中 $T_r = L_r / R_r$ ）。经推算可得出速度估算关系为：

$$\hat{\omega}_r = \hat{\xi} \left( K_r + \frac{K_i}{S} \right), \hat{\xi} = \hat{\psi}_{dr}^s \hat{\psi}_{qr}^s - \hat{\psi}_{qr}^s \hat{\psi}_{dr}^s.$$

## 3 实验及结果

实验对象为4 kW，380 V，50 Hz 三相异步电机，系统组成如图3。系统载波频率为1 kHz，采用无速度传感器矢量控制。测量仪器采用JN338型智能数字式转矩测量仪，磁粉制动器（激磁电流2.5 A，额度转矩1 000 N·m，滑差功率20 kW）。

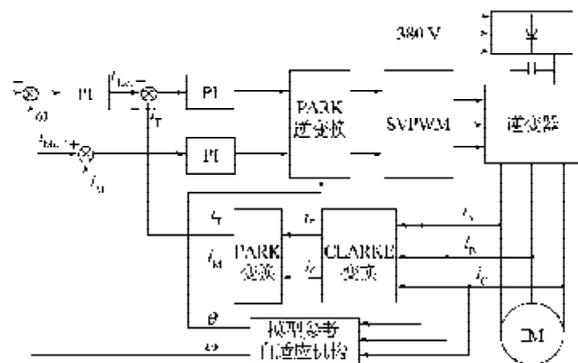


图3 无速度传感器矢量控制系统结构

Fig.3 The structure of speed sensorless vector control system

实验分别对电机进行了空载启动试验，突加负载试验，同时观察电机的动态特性曲线，分析电机在矢量控制下的性能。

1) 空载启动，预设速度为额定转速的50%时，

电机转速、励磁电流、转矩电流、转矩的变化曲线如图4所示。

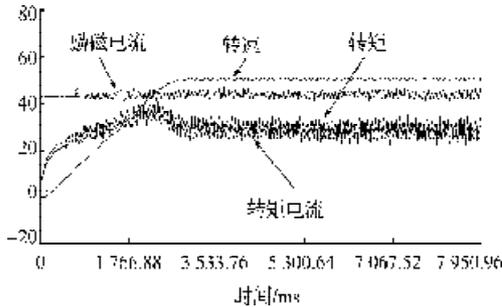


图4 预设速度不变时电机的特性曲线

Fig. 4 The motor characteristic curve at default rate unchanged

2) 空载启动, 预设速度依次为额定转速的5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%时, 电机转速、励磁电流、转矩电流、转矩的变化曲线如图5。

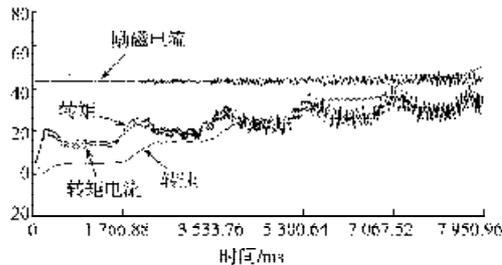


图5 预设速度变化时电机的特性曲线

Fig. 5 The motor characteristic curve at default rate changed

3) 负载以阶跃函数形式突然增加时, 电机转速、励磁电流、转矩电流、转矩的变化曲线如图6。

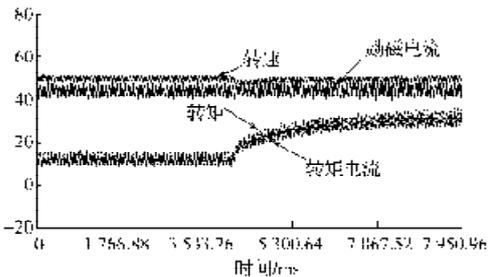


图6 突加负载时电机的特性曲线

Fig. 6 The motor characteristic curve at sudden load

一般情况下在转矩突然变化后, 系统的动态响应时间较长, 导致在较长的时间内动态误差较大。由实验结果可以看出, 在本文采用的系统中, 当空载启动或突加负载转矩时, 文中所采用的矢量控制系统具有优良的稳态性能, 速度观测器的平均误差小。此外, 系

统具有快速的动态响应能力, 50 Hz 时速度上升时间短, 充分体现了无速度控制系统的优越性。

## 5 结语

本文采用模型参考自适应系统对三相异步电机进行了矢量控制, 实验表明该系统能够准确辨识转子磁链, 并且具有较好的鲁棒性, 相对于其它高级的速度辨识算法, 使用的速度观测器结构简单, 实验表明该系统具有较好的精度。

### 参考文献:

- [1] 黄志武, 桂卫华, 年晓红. 基于自适应观测器的无速度传感器感应电机控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 913-918.  
Huang Zhiwu, Gui Weihua, Nian Xiaohong. Adaptive Observer-Based Sensorless Speed Control of Induction Motors [J]. Control Theory and Applications, 2007, 24 (6) : 913-918.
- [2] 王成元, 夏加宽, 杨俊友, 等. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 238-296.  
Wang Chengyuan, Xia Jiakuan, Yang Junyou, et al. Modern Control Technology for Motors[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 238-296.
- [3] 邱阿瑞, 尹雁, 王光辉, 等. 基于DSP的无速度传感器异步电机矢量控制系统[J]. 清华大学学报, 2001, 41 (3): 31-36.  
Qiu A' rui, Yin Yan, Wang Guanghui, et al. A Speed Sensorless Vector Control System of Induction Motor Based on DSP[J]. Journal of Qinghua University, 2001, 41 (3) : 31-36.
- [4] 祝龙记, 王宾. 基于MRAS速度辨识矢量控制系统的仿真研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (1): 43-49.  
Zhu Longji, Wang Bin. Simulation Research on Vector Control System Using MARS Speed Identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (1) : 43-49.
- [5] 李言俊, 张科. 自适应控制理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 10-153.  
Li Yanjun, Zhang Ke. Adaptive Control Theory and Application[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005: 10-153.
- [6] Kim Y R, Park M H. Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Extended Kalman Filter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30 (5) : 1225-1233.

(责任编辑: 罗立宇)