

基于无功功率模型参考自适应的速度估算研究

杨 宁, 缪仲翠

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 对基于异步电动机矢量控制的无功功率模型参考自适应控制器(MRAC)进行了详细的研究, 论文以电动机的无功功率为模型进行电动机的速度估计, 消除了定子电阻变化的影响, 并且不含微积分项, 提高了转速估算的精确性, 增强了控制系统的动态性能和稳定性. 分别对异步电动机的加载运行, 阶跃响应和斜坡响应进行了仿真分析, 结果验证基于无功功率 MRAC 的异步电动机矢量控制系统在低速段估算转速波形较为理想, 估算跟随性能良好, 过零点满足控制性能的要求, 具有良好的收敛性和稳定性.

关键词: 异步电动机; 矢量控制; 模型参考自适应控制; 无功功率

中图分类号: TM343+.2 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.016

0 引言

异步电动机矢量控制的调速性能可和直流电机调速性能相媲美, 交流调速系统已被广泛应用于高性能要求的工业应用中. 在调速系统中要获得良好的调速性能需要通过速度传感器来实现转速闭环控制, 而速度传感器的使用又会带来一系列的问题: ①高精度速度传感器价格通常比较昂贵, 增加了系统的安装成本; ②抗电磁干扰能力差, 在恶劣环境中性能不稳定, 造成系统整体稳定性变差; ③速度传感器是引起系统故障的主要根源之一, 不能满足调速控制设备对可靠性的要求^[1]. 为了解决这些问题, 无速度传感器控制技术逐渐成为研究的热点, 它解决问题的出发点是利用检测到的定子电压、电流等容易检测的物理量进行速度估计以取代速度传感器^[2]. 因而, 近年来越来越多的研究人员将目光投向电机转速在线估计的研究, 以更好提高调速系统的控制性能.

根据参考文献, 目前有许多可用的在线速度估算方法, 信号注入法主要是注入一些高频或低频信号以达到控制效果^[3], 该类方法的主要缺点是信号注入对电机动态引起的不利影响, 以及注入信号所需的硬件扩展要求; 观测器法主要包括扩展卡尔曼滤波(EKF), 扩展状态观测器(ELO)

和自适应观测器等方法, 然而, 随着 EKF 和 ELO 的使用又会引入一系列新的问题, 例如: 大量的内存需求, 计算复杂, 将电动机模型中的所有感应系数作为常数等约束条件^[4]; 模型参考自适应法是一种基于稳定性设计的渐近估算方法, 由一个参考模型、一个可调模型和自适应机构组成, 参考模型和可调模型的输出为相同物理意义的量值. 根据误差信号计算量的不同, 有多种模型参考自适应控制器(MRAC)可供选择: 磁链 MRAC, 反电动势 MRAC, 无功功率 MRAC 等^[5]. 磁链 MRAC 和反电动势 MRAC 对定子电阻的变化敏感, 且包含磁链计算, 在低速时会遭受积分作用的影响, 辨识精度不理想; 相反, 无功功率 MRAC 对定子电阻变化不敏感, 受电机参数变化影响较小. 除了上述方法, 还有一些其他方法可用于转速的在线估计, 如递归最小二乘法, 频谱分析技术, 判别函数法等^[6]. 基于人工神经网络和模糊逻辑的方法也可用来进行估算^[5].

大部分 MRAC^[5,7]系统的速度估计通过磁链估算, 而在磁链计算的过程中, 由于定子电阻受定子频率、温度以及定子电流变化的影响, 其值变化较大, 进而导致磁链的观测发生偏差, 同时导致电磁转矩也产生偏差, 并最终影响整个控制系统的运行性能, 致使控制系统在低速时估算精度不高;

收稿日期:2013-11-23; 修订日期:2014-01-14

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(213218)

通讯作者: 缪仲翠(1971-), 女, 甘肃景泰人, 兰州交通大学副教授, 硕士, 主要研究方向为电气传动及控制, E-mail: miaozhongcui@mail.lzjtu.cn.

另外,磁链计算中包含积分计算,而引入积分环节会造成系统的稳定性降低等问题.为了解决基于磁链计算的 MRAC 系统存在的问题,笔者主要以电动机的无功功率为模型,对电动机的转速在线估算方法进行了详细的研究,以电动机瞬时无功功率作为参考模型,稳态无功功率作为可调模型,计算无功功率的信息差,并通过自适应机构调节,完成对电动机转速的估算.电动机无功功率模型中不含定子电阻参数,消除了定子电阻变化的影响,并且不含微积分项,无需任何微积分操作,提高了转速估算的精确性,加快了系统的收敛速度,增强了系统的动态性能和稳定性.

1 无功功率 MRAC 控制

1.1 无功功率的数学模型

异步电动机在同步旋转坐标系中的 d 、 q 轴电压分量的数学模型为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \sigma L_s \omega_0 i_{sq} - \omega_0 \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq}; \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \sigma L_s \omega_0 i_{sd} + \omega_0 \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd}, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\omega_0 = \omega_r + \omega_{sl}$.

式中: ω_0 为同步转速; ω_r 为转子转速; ω_{sl} 为转速偏差; u_{sd}, u_{sq} 为定子电压 d 、 q 轴分量; i_{sd}, i_{sq} 为定子电流 d 、 q 轴分量; R_s 为定子电阻; L_s, L_r 为定、转子自感; L_m 为定转子互感; σ 为漏磁系数.

异步电动机瞬时无功功率可表示为

$$Q_{IRP} = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}. \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得到瞬时无功功率 Q_{IRP} 新的表达式为

$$Q_{IRP} = \sigma L_s \left(i_{sd} \frac{di_{sq}}{dt} - i_{sq} \frac{di_{sd}}{dt} \right) + \sigma L_s \omega_0 (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) - \frac{L_m}{L_r} \left(i_{sq} \frac{d\psi_{rd}}{dt} - i_{sd} \frac{d\psi_{rq}}{dt} \right) + \omega_0 \frac{L_m}{L_r} (i_{sq} \psi_{rq} + i_{sd} \psi_{rd}). \quad (3)$$

由式(3)可以看出,无功功率的表达式中不含电动机定子电阻参数,因而尽管电动机实际运行时定子电阻会有波动,但以无功功率为模型进行的转速估算过程不会受到定子电阻变化的影响,避免定子电阻变化对控制系统的波动,提高转速估算精度.

电动机稳态时,式(3)中的微分项为零,得到

稳态无功功率的表达式

$$Q_{SRP} = \sigma L_s \omega_0 (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + \omega_0 \frac{L_m}{L_r} (i_{sq} \psi_{rq} + i_{sd} \psi_{rd}). \quad (4)$$

代入条件 $\psi_{rd} = L_m i_{sd}, \psi_{rq} = 0$, 可得到稳态无功功率 Q_{SRP} 的化简式

$$Q_{SRP} = \sigma L_s \omega_0 (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + \omega_0 \frac{L_m^2}{L_r} i_{sd}^2. \quad (5)$$

1.2 无功功率 MRAC 原理

无功功率 MRAC 的结构如图1所示.图中选择不包含转速信息的瞬时无功功率表达式(2)作为参考模型,选择含有转速信息的稳态无功功率表达式(5)作为可调模型,可调模型不含转子磁链计算,同时不含微积分项.根据 Popov 超稳定性理论,自适应律选取比例积分控制,可实现对可调模型的实时调节,以达到跟踪参考模型的目的.

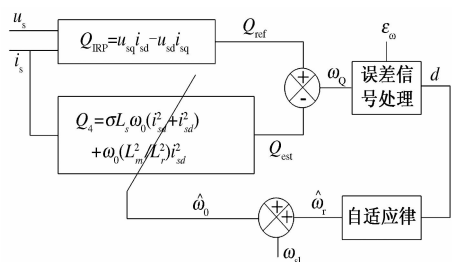


图1 无功功率 MRAC 结构图

Fig. 1 Basic structure of reactive power MRAC

从图1可以看出,在无功功率 MRAC 控制系统中,对于误差的处理进行了两次调节,较之一般 MRAC 控制系统只采用一次误差处理,采用两次调节提高了误差处理环节的精度,使转速估算更为准确.其中误差信号处理模块为速度误差信号和无功功率误差信号处理模块,速度误差通过给定转速和估算转速获得.误差信号处理原则如下:

if $\text{sign}(\varepsilon_Q) = \text{sign}(\varepsilon_\omega)$ then $d = \varepsilon_Q$

if $\text{sign}(\varepsilon_Q) \neq \text{sign}(\varepsilon_\omega)$ then $d = -\varepsilon_Q$

式中: $\varepsilon_Q, \varepsilon_\omega$ 分别为无功功率误差和转速误差, d 为模块的输出.误差处理模块的设计满足 Popov 超稳定性定理,Popov 超稳定性理论指出:当闭环系统线性部分的传递函数(矩阵)为严格正实(或正定),闭环系统是全局渐近稳定的.此处根据上文的误差处理原则,误差信号处理模块的引入确保了线性前向环节的严格正定性^[7].因而,该系统是渐近稳定的.

在速度误差信号和无功功率误差信号经过误差信号处理模块调节之后,再输入自适应机构中进行调节,并完成速度的估计,进而调节可调模型使其输出逐渐趋近于参考模型,以最终使估算转

速与实际转速达到一致.

2 仿真模型的建立

根据无功功率数学模型和无功功率 MRAC 结构图,可以构建异步电动机无功功率 MRAC 矢量控制系统结构仿真模型.

在 Matlab2010b 环境下,通过 Simulink/Sim-

PowerSystem 丰富的模库块,在分析异步电动机无功功率数学模型的基础上,搭建异步电动机无功功率 MRAC 矢量控制系统的仿真模型如图 2 所示.系统包含逆变器、电机本体、电压空间矢量调制模块 (SVPWM)、矢量控制模块 (Vector Control)^[8]、转速估算模块 (Reactive Power MRAC) 等.

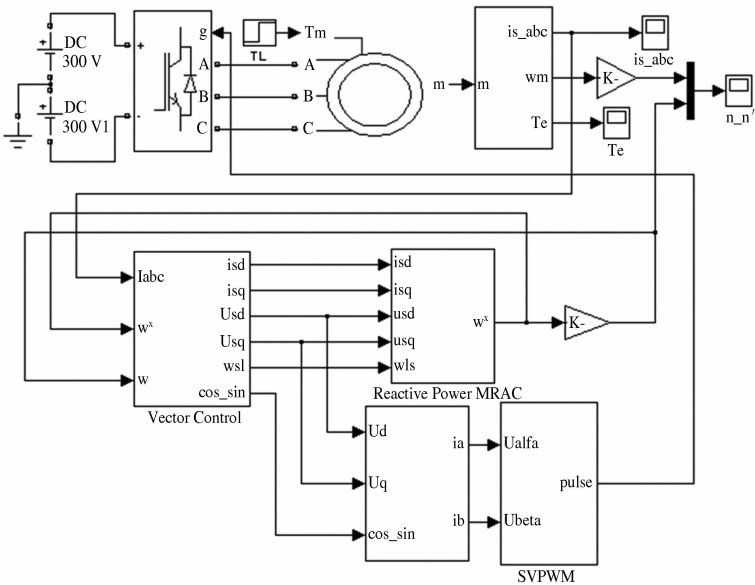


图 2 无功功率 MRAC 异步电动机矢量控制仿真模型

Fig.2 Simulation model of vector controlled asynchronous motor with reactive power MRAC

3 结果分析

异步电动机无功功率 MRAC 矢量控制仿真在 Matlab/Simulink 环境下完成,电动机参数如表 1 所示.分别对电动机的加载运行,阶跃响应和斜坡响应进行了仿真分析,仿真结果如图 3~5 所示.

表 1 异步电动机参数

Tab.1 Asynchronous motor parameters

| 电机参数 | 参数值 |
|--------------------|-------------|
| 电压 U_n/V | 380 |
| 频率 f_n/Hz | 50 |
| 定、转子绕组电阻/ Ω | 0.435,0.816 |
| 定、转子绕组自感/ mH | 0.071,0.071 |
| 互感/ mH | 0.069 |
| 极对数 p | 2 |

3.1 加载运行

电动机加载性能如图 3 所示.给定转速为 1 500 r/min,空载启动,从图 3(a)可以看出转速在 0.3 s 左右基本稳定,收敛速度和估计精度皆满足控制系统要求.0.5 s 后加载 60 N·m,0.7 s 时加载 -60 N·m,负载转矩曲线如图 3(b)所

示,负载变化过程中的实际转速曲线和估算转速曲线如图 3(a)所示.在转速波形中可以看出,加载后电动机转速略有变化但随即恢复,估算转速可以准确地跟踪实际转速,即使在加载时,估算转速和实际转速之间的偏差亦较小,转速的估算精度满足控制系统要求.

3.2 阶跃响应

阶跃响应在低速和零速段运行.电动机给定转速 ω^* 通过阶梯状上升的步骤完成 0~100 rad/s 的变化,再次通过阶梯状下降的步骤降低到零速.给定转速、实际转速和估算转速曲线如图 4 所示.从图中可以看到,即使给定转速变化较大,转速的估算也能以良好的准确性跟随实际转速.

3.3 斜坡响应

斜坡响应结果如图 5 所示,图中还给出了估算转速过零点的性能.电动机转速通过斜坡响应逐渐完成从 0~30 rad/s 的变化,从 0.1 s 开始以正斜率持续 0.2 s,在 0.3 s 到 0.6 s 的时间里保持不变,然后又以 -250 rad/s² 的负斜率减小速度持续 0.2 s,在 0.8 s 之后保持常值不变.给定转速、实际转速和估算转速如图 5 所示,从图中可以

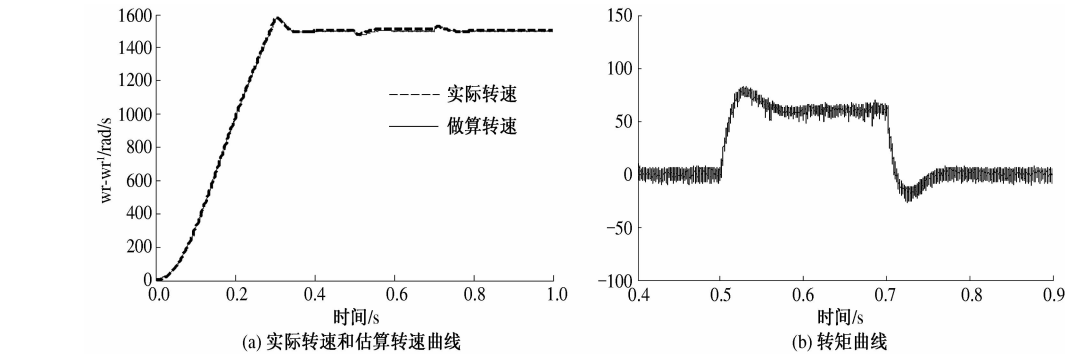


图 3 加载运行仿真结果
Fig.3 Effect of loading

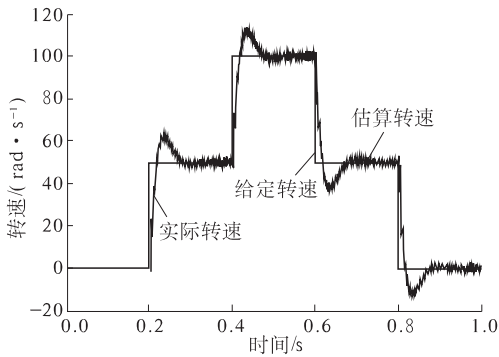


图 4 阶跃响应仿真结果
Fig.4 Simulation results for step response

看出即使转速有过零现象,估算转速与实际转速基本保持一致,估算误差较小可忽略;转速过零发生在 0.72 s 附近,结果显示转速的估算符合要求的过零点性能。

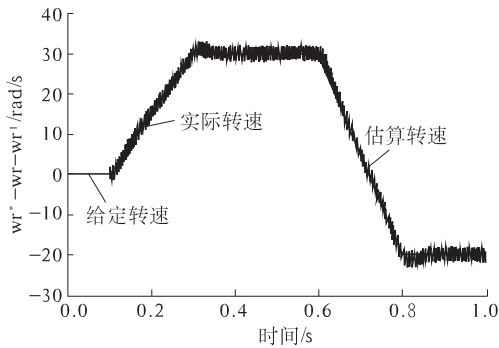


图 5 斜坡响应仿真结果
Fig.5 Simulation results for ramp response

4 结论

- (1)从加载响应的仿真中可以看出转速在 0.3 s 左右基本稳定,收敛速度和估计精度满足系统控制要求。
- (2)解决了基于磁链 MRAC 系统低速时转速估算不精确的问题,转速波形较为理想。

- (3)结合电动机实际运行情况,在低速和零速段对阶跃响应进行仿真,仿真结果说明估算转速跟随性能良好。
- (4)斜坡响应过程中进行过零点测试,结果显示基于无功功率 MRAC 系统控制电动机过零点性能良好。
- (5)无功功率数学模型不含定子电阻,对定子电阻变化不敏感。

通过仿真结果,表明无功功率 MRAC 控制方法完全可行,验证了基于无功功率 MRAC 的异步电动机矢量控制系统具有良好的收敛性和稳定性。

参考文献:

- [1] 王涛. 无速度传感器的动车组牵引传动控制理论研究[J]. 前沿动态,2012(2):26-29.
- [2] 冯堃生,曾岳南. 无速度传感器矢量控制原理与实践[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [3] DIAZ R, D. BRIZ, F B C, et al. Sensorless control of doubly fed induction generators based on rotor high-frequency signal injection[J]. Industry Applications, IEEE Trans. ,2013,49(6):2593-2601.
- [4] ZHUANG Xu, RAHMAN M F. Comparison of a sliding observer and a kalman filter for direct-torque-controlled IPM synchronous motor drives[J]. IEEE Trans. Ind. Electron,2012,59(11):4179-4188.
- [5] SUMAN M, CHANDAN C, YOICHI H, et al. An adaptive speed sensorless induction motor drive with artificial neural network for stability enhancement[J]. IEEE Trans. Ind, Informatics,2012,8(4):757-766.
- [6] KARANAYIL B, RAHMAN M F, GRANTHAM C. Online stator and rotor resistance estimation scheme using artificial neural networks for vector controlled speed sensorless induction motor drive [J]. IEEE Trans. Ind. Electron,2007,54(1):167-176.

- [7] SUMAN M, CHANDAN C. Model reference adaptive controller-nased rotor resistance and speed estimation techniques for vector controlled induction motor drive utilizing reactive power[J]. IEEE Trans. Ind. Elec-tron, 2008,55(2):594-601.
- [8] 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

Model Reference Adaptive Controller-Based Reactive Power for Speed Estimation

YANG Ning, MIAO Zhong-cui

(Department of Automation, Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this paper, a detailed study on the Model Reference Adaptive Controller(MRAC) utilizing the reactive power for the vector control of motor drive is presented. The model of speed estimation on the MRAC based reactive power is building. It eliminates the effect of the stator resistance's change, and is free of calculus items, and improves the accuracy of speed estimation, dynamic performance and stability enhancement of the control system. That has one simulation analysis on the loading, step response and ramp response of the motor. Simulation results have been presented to confirm that Vector Controlled Induction Motor based MRAC utilizing the reactive power has good convergence and stability. The results reveal that the estimated speed follows the actual with good accuracy, and has satisfactory performance around zero crossing.

Key words: induction motor, vector control, model reference adaptive controller, reactive power

(上接第 49 页)

Channel Estimation and Decoding Iteration Algorithm over Doubly Selective Fading Channels Based on FG-PF

WANG Zhong-yong¹, FENG Li-ting¹, DUAN Lin-lin^{1,2}

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Science, Information and Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper, a joint channel estimation and decoding algorithm over doubly selective fading channels is proposed. Based on Factor Graph and Sum-Product algorithm, the channel estimator and the decoder, as independent information processors and using different internal/external update rules, are integrated into a unified FG model. Combined with particle filter algorithm, the channel parameters are tracked and estimated in real time to realize the iterative message passing. The simulations show, under certain pilot interval and number of particles, the performance of the algorithm is close to the known channel information with clear iterative process, and effectively solve the low frequency spectrum utilization problem.

Key words: joint channel estimation and decoding, doubly selective fading channel, uniform FG model, joint FG-PF algorithm