

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.05.011

基于MRAS的永磁同步电机矢量控制系统

孙延军, 谭 兮, 冯鹏辉, 刘国营

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 提出了将模型参考自适应技术应用于永磁同步电机无速度传感器控制系统中。根据永磁同步电机的数学模型, 设计了一个基于模型参考自适应的状态观测器估算电机转子速度, 并对系统的稳定性进行分析, 在 Simulink 软件中建立相应的仿真模型。仿真结果表明: 该控制系统可以较准确地追踪转速, 具有良好的动态性能和鲁棒性。

关键词: 模型参考自适应系统; 矢量控制; 无速度传感器

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)05-0049-04

MRAS-Based PMSM Vector Control System

Sun Yanjun, Tan Xi, Feng Penghui, Liu Guoying

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The model reference adaptive technique is applied in the sensorless control system of PMSM. On the basis of PMSM mathematical model, a MRAS observer is designed to estimate the motor rotor speed, the stability of system is analyzed and the simulation model is built by Simulink. The simulation results show that the system tracks the motor speed accurately, and it has better dynamic performance and strong robustness.

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

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因具有效率高、体积小、适应性强和可靠性好等优点, 在国防和日常生活中得到了广泛地应用。电机的调速系统^[1]需要速度反馈, 因此, 添加了一个速度传感器。但是, 速度传感器给电机带来很多缺陷和不足, 不仅增加了成本和体积, 还降低了电机的可靠性, 且不适合在某些恶劣的环境中运行。

近年来, 学者们提出了无速度传感器技术, 并将其运用到电机调速系统中。无速度传感器技术能够准确地在线估计电机的转子速度和位置^[2], 既节

省成本又增加了系统的稳定性, 尤其能在一些特殊的环境中稳定运行。该技术是电机调速的一大发展方向。

模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS)因具有计算量小、实时性和稳定性好等优点, 受到了人们的重视。MRAS 转速估计系统的收敛性由 Popov 超稳定性来保证, 对 Popov 积分不等式作逆向求解即可得到转速估计自适应律。本文将电机的实测电流与经过 MRAS 估计出的电流进行对比, 通过辨识方法估算出转子的转速和位置。仿真结果表明, 该方案能够准确地检测出转子的速度, 且系统具有较好的调速性能。

收稿日期: 2013-07-08

作者简介: 孙延军(1986-), 山东烟台人, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子与自动控制,

E-mail: yanhusun168@163.com

1 参考模型与可调模型选取

PMSM在d-q坐标系下的数学模型如下^[3]。

电压方程：

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + p\psi_d - \omega_e \psi_q, \\ u_q &= R_s i_q + p\psi_q - \omega_e \psi_d. \end{aligned} \quad (1)$$

磁链方程：

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_r, \\ \psi_q &= L_q i_q. \end{aligned} \quad (2)$$

式中： u_d, u_q 分别为电机定子端电压d-q轴分量；

i_d, i_q 分别为电机定子端电流d-q轴分量；

L_d, L_q 分别为d-q轴同步电感分量；

ψ_d, ψ_q 分别为定子磁链d-q轴分量；

ψ_r 为转子磁链；

R_s 为定子电阻；

ω_e 为电角速度；

p 为微分算子。

对于隐极式PMSM来说， $L_d=L_q=L$ ，将式(2)代入式(1)中，则有

$$\begin{aligned} pi_d &= -\frac{R_s}{L} i_d + \omega_e i_q + \frac{u_d}{L} - \frac{p\psi_r}{L}, \\ pi_q &= -\frac{R_s}{L} i_q - \omega_e \left(i_d + \frac{\psi_r}{L} \right) + \frac{u_q}{L}. \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)进行整理变换后，可得

$$\begin{aligned} pi_d &= -\frac{R_s}{L} \left(i_d + \frac{\psi_r}{L} \right) + \omega_e i_q + \frac{1}{L} \left(u_d + \frac{R_s \psi_r}{L} \right), \\ pi_q &= -\frac{R_s}{L} i_q - \omega_e \left(i_d + \frac{\psi_r}{L} \right) + \frac{u_q}{L}. \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知，电流模型存在转速信息，可作为可调模型。而参考模型不含转速信息，由于可调模型与参考模型的输出量要有相同的物理意义，因此，可将检测到的电流信号 i_d, i_q 作为参考模型的输出量，同时将电流模型估算到的电流值作为可调模型的输出量，把两者之间的误差信号通过相应的自

适应律进行转速辨识^[4]。

将式(4)整理成标准状态方程为

$$\begin{bmatrix} p \left(i_d + \frac{\psi_r}{L} \right) \\ pi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega_e \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_r}{L} \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \left(u_d + \frac{R_s \psi_r}{L} \right) \\ \frac{u_q}{L} \end{bmatrix}.$$

设 $i_d^* = i_d + \psi_r/L, i_q^* = i_q, u_d^* = (u_d + \psi_r R_s/L)/L, u_q^* = u_q/L$ 。

由上式可知，若直接采取电流模型为可调模型，其输出的物理量 i_d^*, i_q^* 和检测到的d-q轴电流 i_d, i_q 的物理意义不同。因此，参考模型不能直接采用 i_d, i_q 作为输出，而需做相应变换。根据模型参考自适应系统并联结构辨识转速原则，可选取参考模型的状态方程为

$$\begin{bmatrix} pi_d^* \\ pi_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega_e \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix},$$

式中，输入输出物理量 $u_d^*, u_q^*, i_d^*, i_q^*$ 分别由测量值 u_d, u_q, i_d, i_q 加上一个常数得到，计算中不存在转速信息，且计算量小，满足参考模型的条件。

可调模型的状态方程为

$$\begin{bmatrix} pi_d^{\hat{}} \\ pi_q^{\hat{}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \hat{\omega}_e \\ -\hat{\omega}_e & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^{\hat{}} \\ i_q^{\hat{}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d^* \\ u_q^* \end{bmatrix},$$

式中， $i_d^{\hat{}}, i_q^{\hat{}}, \hat{\omega}_e$ 分别为 i_d^*, i_q^*, ω_e 的估计值。 $i_d^{\hat{}}, i_q^{\hat{}}$ 通过求解可调模型的状态方程式得到， $\hat{\omega}_e$ 为自适应律反馈的估计转速信息。

2 控制系统设计

永磁同步电机无速度传感器矢量控制^[5]是将基于电流模型的自适应控制添加到双闭环电机控制系统中，整个控制系统的结构见图1。

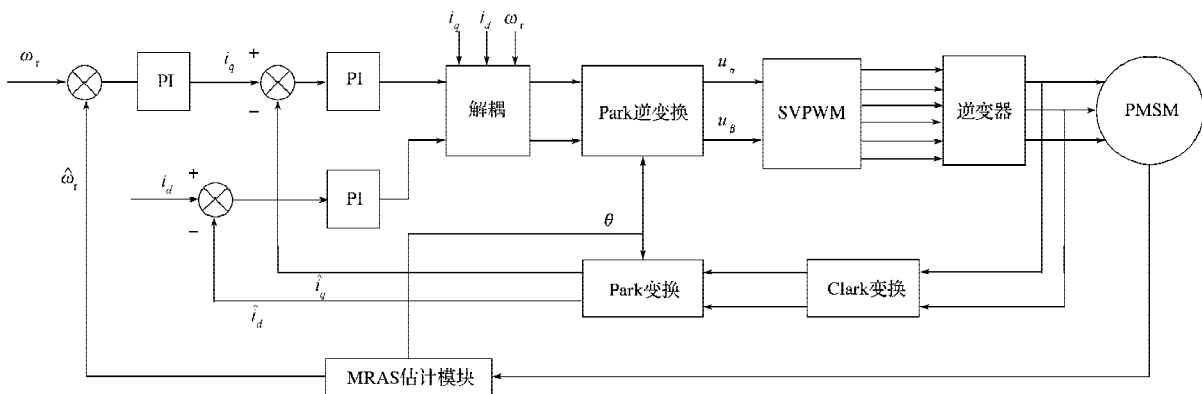


图1 无速度传感器矢量控制系统结构图

Fig. 1 The structure diagram of speed sensorless vector control

图2所示的MRAS估算模块是基于电流模型的自适应控制器^[6]。由第1章分析可知, 控制器分为参考模型和可调模型, 2个模型同时工作, 并将它们的输出分别进行交叉相乘, 最终将相乘的结果进行差值运算, 根据模型参考自适应律估算转子的速度^[7], 使可调模型及时跟踪参考模型。

以图2为指导, 在Simulink软件中搭建自适应转速估计仿真模型, 如图3所示。

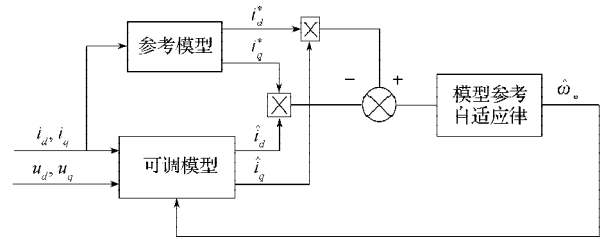


图2 转速自适应辨识框图

Fig. 2 The block diagram of adaptive speed identification

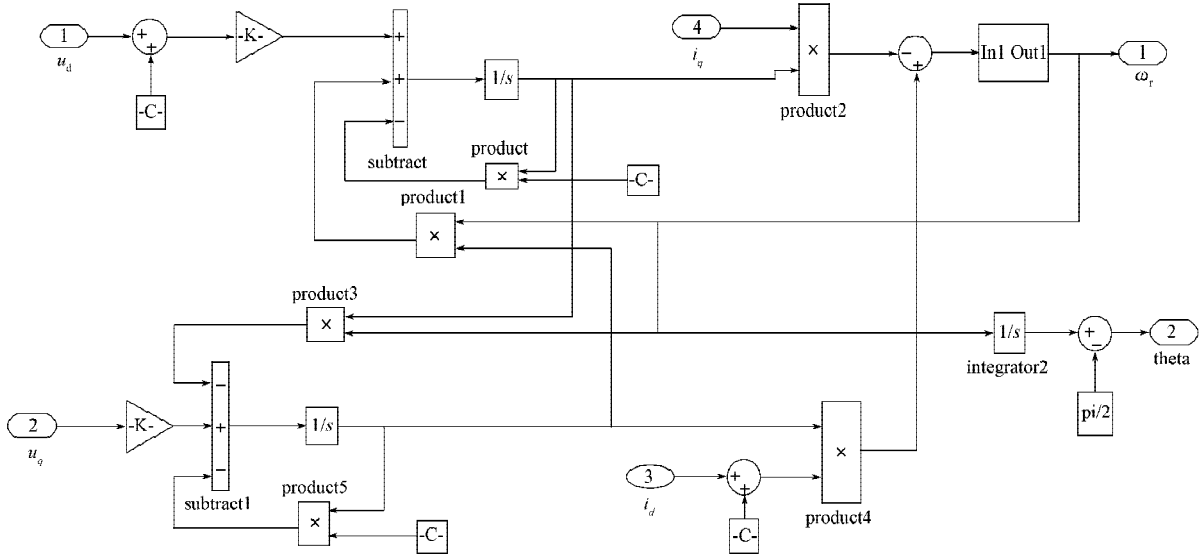


图3 自适应转速辨识仿真模型

Fig. 3 The simulation model of adaptive speed identification

3 仿真结果及分析

在系统的仿真过程中^[8], PMSM的主要参数为: 极对数 $n_p=2$, $R_s=0.4579 \Omega$, $L_d=L_q=8.5 \times 10^{-3} \text{ H}$, $J=1.496 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $\psi_f=0.175 \text{ Wb}$, 电压逆变器直流侧的给定电压为300 V。

为了检验速度辨识的估计效果和抗干扰性, 本课题组将给定速度设定在不同的速度区, 分别为800, 1200, 1000, 600 r/min, 时间间隔为0.1 s, 并设定启动负载为5 N·m。

转速响应波形如图4所示。

由图4可以看出:

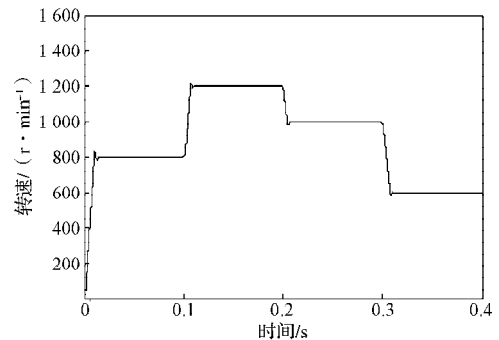
1) 在图a中, 当给定速度突变时, 转速响应较快, 超调较小, 速度能够快速达到稳态, 在整个速度区域中都有比较理想的效果, 稳定后速度偏差基本在8 r/min以内。

2) 在图b中, 估计转速可以快速地收敛到实际值, 速度跟踪效果较好, 满足不同速度区的实时性要求。

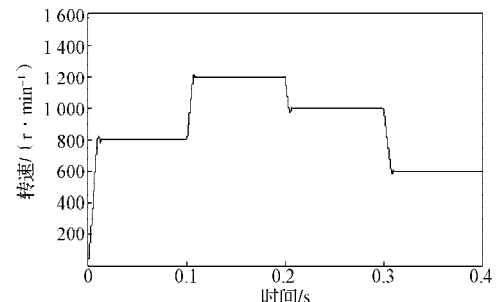
3) 在图c中, 当设定速度突变时, 转速的偏差稍大, 约为28 r/min, 达到稳态后, 速度的误差控制

在6 r/min以内。

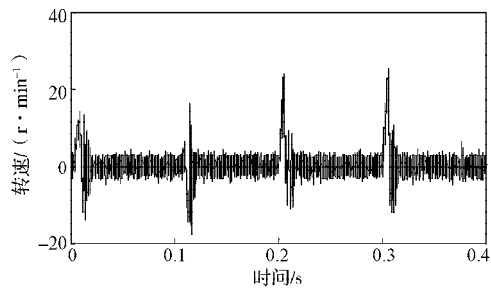
由此可以说明, 速度辨识方法具有较高的估计精度和响应速度, 估计效果良好。



a) 实际转速图



b) 估计转速图



c) 速度误差分析图

图4 转速响应波形图

Fig. 4 Speed response diagram

转矩响应波形如图5所示。由图可以看出,转矩的响应速度较快,速度达到稳态后转矩能够迅速稳定到给定值 $5\text{ N}\cdot\text{m}$,且波动较小,因此,该方法使系统具有较高的调速性能。

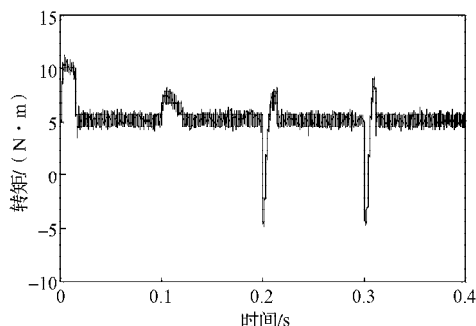


图5 转矩响应波形图

Fig. 5 Torque response waveform

4 结语

本文将基于MRAS的无速度传感器调速技术应用于电机调速控制系统中,并采用电流反馈补偿技术进行解耦。控制器的设计为电流模型法,采用并联结构对转速进行辨识,建立自适应律,使其在较宽的速度范围内估计转子的速度和位置。仿真结果表明,该方法具有较高的转速估计精度,反应速度较快,实时性和鲁棒性较好。

参考文献:

[1] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京:

电子工业出版社, 2003: 115-129

Liu Jingkun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 115-129

[2] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 117-119.

Tao Yonghua. New PID Control and Its Applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 117-119.

[3] Bolognani S, Zigliotto M. Fuzzy Logic Control of a Switched Reluctance Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 1063-1068.

[4] 冯焱生, 曾岳南. 无速度传感器矢量控制原理与实践[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-100.

Feng Duosheng, Zeng Yuenan. Speed Sensorless Vector Control Principle and Practice[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 1-100.

[5] Rahman K M, Gopalakrishnan S, Fahimi B, et al. Optimized Torque Control of Switched Reluctance Motor at All Operational Regimes Using Neural Network[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(3): 904-913.

[6] 廖勇, 张凤蕊. 无传感器矢量控制系统及其速度估算的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 36-40.

Liao Yong, Zhang Fengrui. Research of Sensorless Vector Control System and Speed Estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 36-40.

[7] 沈安文, 李自成. 基于MRAS的感应电机无速度传感器矢量控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(12): 51-53.

Shen Anwen, Li Zicheng. The Vector Control in Sensorless Induction Motor Drives Based on MRAS[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2005, 33(12): 51-53.

[8] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动系统的MATLAB仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 150-180.

Hong Naigang. MATLAB Simulation of Power Electronics and Electric Drive System[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 150-180.

(责任编辑: 邓彬)