

# 基于 MRAS 的低速永磁电机的无位置传感器控制

吕华芬, 叶云岳\*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为解决低速复式永磁同步电机(PMSM)在工作环境下的稳定运行等问题,将基于模型参考自适应法(MRAS)的无位置传感器控制方法应用到电机的控制策略中。在控制系统中,根据电机的参考模型,建立了可调模型,基于合适的自适应规律进行调节,估算出了电机的转速和转子位置角;在 Simulink 环境下建立了基于模型参考自适应的无位置传感器控制仿真模型,并进行了仿真与分析。研究表明,该模型参考自适应法估算精度较高,稳态转速平稳且跟踪性能好,动静态性能较好,对电机给定转速和负载扰动的鲁棒性强,适应性好;但同时该方法对电机的参数很敏感。

**关键词:** 模型参考自适应系统;低速永磁同步电机;转速;转子位置角

中图分类号:TM341;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)03-0307-04

## Sensor-less control of low-speed PMSM based on MRAS

LV Hua-fen, YE Yun-yue

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of stable operation of low-speed multiple permanent magnet synchronous motor (PMSM) in working environment, the sensor-less control based on model reference adaptive system (MRAS) was investigated. The adjustable model was built according to the reference model of the motor, and regulated based on suitable self-adaptive law to estimate speed and rotor-space position in control system. A simulation model of sensor-less control based on MRAS was built in Simulink to simulate and analyze. The simulation results show that MRAS has a high estimation accuracy, good tracking performance, stable steady-state speed, good dynamic and static performance, and strong robustness towards speed variations and load disturbance of PMSM, MRAS has a good adaptability, but it's very sensitive to motor parameters.

**Key words:** model reference adaptive system (MRAS); low-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM); rotational speed; rotor space-position

## 0 引 言

近年来,随着永磁材料领域的快速发展,永磁同步电机(PMSM)所特有的结构紧凑,稳定性好,运行效率、功率因数和功率密度高,无需励磁电流等特点,使得永磁同步电机在生产和生活的各个方面的应用日益广泛<sup>[1]</sup>。而大转矩、低转速的复式永磁同步电机因其具有转子转动惯量和机电时间常数小、转矩质量比大、堵转转矩和峰值转矩高、低速运行平稳等有益的动态性能,在油田等场合作为抽油机使用,极大地节约了能

源<sup>[2]</sup>。永磁同步电机的高性能控制如矢量控制<sup>[3]</sup>、直接转矩控制<sup>[4]</sup>等都需要在转子上安装机械式传感器,如光电编码器、旋转变压器等来得到实时的准确的转子位置和速度信息,以实现精确地磁场定向和速度反馈等。但是机械式传感器也带来了安装和维护困难、系统成本增加、运行稳定性降低等问题,特别是在油田恶劣工作环境下,因此无位置传感器控制的研究已成为一个热点,并取得了很大成果。

电机的转子位置和速度是进行电机控制的关键,无位置传感器策略就是根据电机绕组中的各种电信号,采

收稿日期:2011-09-13

作者简介:吕华芬(1987-),女,湖北随州人,主要从事电机变频控制方面的研究。E-mail:lhfdre@sina.com

通信联系人:叶云岳,男,教授,博士生导师。E-mail:yeyunyue@yahoo.com.cn

用适当的方法估计转子的位置和速度,以实现转子位置自检测。目前,学者们提出的无位置策略中大多数是基于电机的基波励磁模型和反电势,如基于定子端电压和电流估算、基于观测器估算、全阶/降阶状态观测器、推广卡尔曼滤波器(EKF)、滑模观测器、模型参考自适应(MRAS)辨识等(这些策略实施简单,但在低速时反电势过小或根本无法检测,只适用于高速运行),以及适用于低速或零速运行的基于转子凸极的高频注入法<sup>[5]</sup>。由于复式永磁同步电机采用面贴式,其交直流电感几乎相等,饱和凸极的实现和计算都不易,因而无法选用适于低速运行的基于转子凸极的高频注入法。而复式永磁电机虽然在低速下运行,但由于其特殊性反电势并不低,同时模型参考自适应法作为基于基波励磁的估算方法,采用参考模型,由其规定系统的性能,可以保证参数估计的渐进收敛,鲁棒性好,因而其应用的场合较多。

本研究主要探讨基于 MRAS 的低速永磁电机的无位置传感器控制。

### 1 基于 MRAS 的无位置传感器控制原理

模型参考自适应法的基本思想是:将不含未知参数的方程作为参考模型,将含有带估计参数的方程作为可调模型,两个模型的输出量具有相同物理意义,它们同时工作,利用其输出量的差值,根据合适的自适应率来调节可调模型的参数,以达到控制对象的输出跟踪参考模型的目的<sup>[6-10]</sup>,如图 1 所示。

能否构成品质优良的自适应系统,关键是自适应结构所执行的自适应规律的确定。

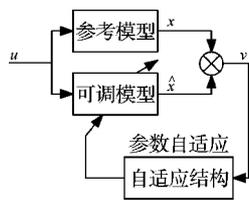


图 1 MRAS 基本结构

基于模型参考自适应法的无位置传感器控制即是电机的实际运行情况作为参考模型,将含有待估算转速、电流等参数的电机模型作为可调模型,两个模型均输出电流值,利用电机的实测电流和估算电流的差值来对可调模型进行调节,使估算值跟踪实际值,从而达到电机稳定运行的目的。

在同步旋转 dq 坐标系下,PMSM 的电压方程为:

$$\begin{cases} u_d=R_s i_d+L_s \frac{di_d}{dt}-\omega_r L_s i_q \\ u_q=R_s i_q+L_s \frac{di_q}{dt}+\omega_r L_s i_d+\omega_r \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$ —定子 d、q 轴下的电压、电流, $R_s$ 、 $L_s$ —定子每相电阻、电感, $\omega_r$ —转速, $\psi_f$ —转子永磁磁链。

将式(1)进行化简,可表示为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d+\frac{\psi_f}{L_s} \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d+\frac{\psi_f}{L_s} \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u_d+\frac{R_s \psi_f}{L_s} \\ u_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

进一步简化为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $i'_d=i_d+\psi_f/L_s$ 、 $i'_q=i_q$ 、 $u'_d=u_d+R_s \psi_f/L_s$ 、 $u'_q=u_q$ 。

本研究将式(3)以估计值的形式表示如下(即将合成电流和转速作为估算值构成可调模型,而式(3)为电机的实际运行情况,即是参考模型):

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}'_d}{dt} \\ \frac{d\hat{i}'_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \hat{\omega}_r \\ -\hat{\omega}_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

本研究定义广义误差  $e=i'_s-\hat{i}'_s$ ,再将式(3)与式(4)相减,可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{de_d}{dt} \\ \frac{de_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} (\omega_r-\hat{\omega}_r) \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $e_d=i'_d-\hat{i}'_d$ 、 $e_q=i'_q-\hat{i}'_q$ 。

本研究根据式(5)和 Popov 超稳定理论,可求得自适应规律,如下所示:

$$\hat{\omega}_r = \int_0^t K_i (i'_d \hat{i}'_q - \hat{i}'_d i'_q) d\tau + K_p (i'_d \hat{i}'_q - \hat{i}'_d i'_q) + \hat{\omega}_r(0) \quad (6)$$

式(6)可表示成如下形式:

$$\hat{\omega}_r = \left( \frac{K_i}{p} + K_p \right) \varepsilon_\omega \quad (7)$$

其中, $\varepsilon_\omega=(i'_d \hat{i}'_q - \hat{i}'_d i'_q)=i'_s \times \hat{i}'_s = |i'_s| \left| \hat{i}'_s \right| \sin \alpha$ , $\varepsilon_\omega$ 通过 PI 调节器作用后产生速度信号 $\hat{\omega}_r$ , $\hat{\omega}_r$ 使可调模型估计的 $\hat{i}'_s$ 与实际的 $i'_s$ 趋向一致,定子电流矢量误差收敛于零,同时转速估计 $\hat{\omega}_r$ 逐渐逼近实际值,如图 2 所示。

本研究将式(6)用  $i_d$ 、 $i_q$ 、 $\hat{i}_d$ 、 $\hat{i}_q$  表示,可得到下式:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r = & \int_0^t K_i \left[ i_d \hat{i}_q - \hat{i}_d i_q - \frac{\psi_f}{L_s} (i_q - \hat{i}_q) \right] d\tau + \\ & K_p \left[ i_d \hat{i}_q - \hat{i}_d i_q - \frac{\psi_f}{L_s} (i_q - \hat{i}_q) \right] + \hat{\omega}_r(0) \end{aligned} \quad (8)$$

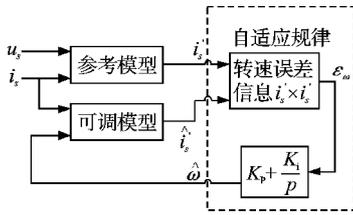


图 2 MRAS 系统自适应规律

$i_d, i_q$  是电机的实测值,  $\hat{i}_d, \hat{i}_q$  通过式(3)估算出, 因而可以得到电机的转子位置和速度估算框图, 如图 3 所示。

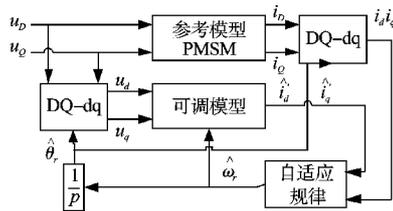


图 3 MRAS 估算转子位置和速度框图

电机的实际电流和即以通过电机模型式(3)计算得到的估算电流, 其矢量误差通过 PI 调节器即得到估算转速, 并且估算转速将跟踪实际转速。

## 2 仿真与分析

为验证以上方法的正确性, 本研究对一台低速永磁同步电机进行仿真。低速大力矩永磁同步电机的参数如下: 定子相电阻  $2.1 \Omega$ , 直轴电感  $110.6 \text{ mH}$ , 交轴电感  $130.6 \text{ mH}$ , 极对数 24, 额定转速  $10 \text{ r/min}$ , 转动惯量  $101.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

本研究在 Simulink 下建立基于 MRAS 的无位置传感器控制仿真模型如图 4 所示。电机采用基于 SVPWM 的矢量控制,  $i_d^*=0$ , 转矩只与  $q$  轴电流有关, 实现了解耦控制。

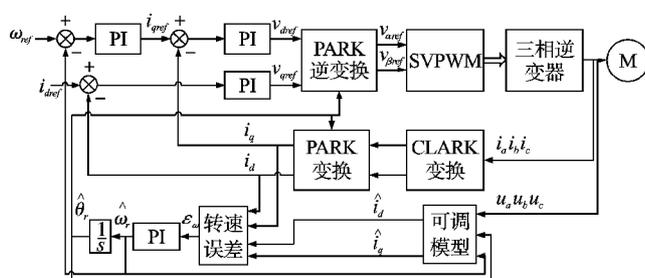
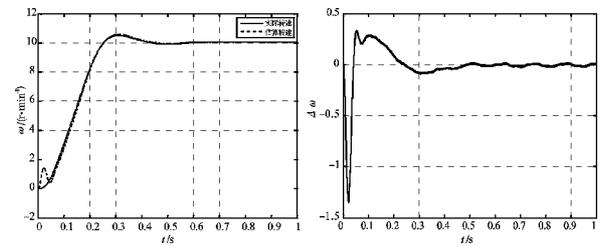


图 4 基于 MRAS 的无位置传感器控制原理框图

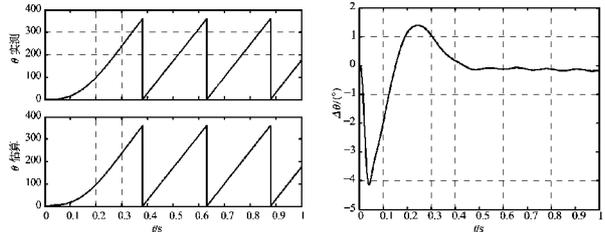
在额定转速  $10 \text{ r/min}$ 、电机空载的情况下, 本研究得到电机转速的实测值和估算值及其偏差。转子位置角的实测值与估算值及其偏差如图 5 所示。

由图 5 可知, 在电机起动加速阶段, 转速的估算值和实测值误差较大, 转子估算值在刚启动瞬间的  $1.2 \text{ r/min}$  的跳变主要是由转子初始位置角定位引起的, 达到稳定运行阶段后, 其偏差基本为 0; 电机的转子位置角在整个运行阶段其估算值与实测值误差最



(a) 电机实测转速与估算转速

(b) 电机转速偏差



(c) 电机转子位置角的实测值与估算值

(d) 电机转子位置角的偏差

图 5 电机的转速与转子位置角

大为  $4.1^\circ$ , 在稳定运行阶段其偏差几乎为 0。因而模型参考自适应法对电机的转速与转子位置角的估算精度较高。另外, 通过转速曲线也可看出电机的运行较平稳, 静态性能较好。

电机的转矩响应曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出, 电机输出转矩在稳定运行时静态性能优良。

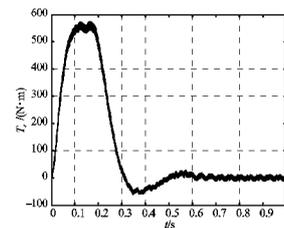
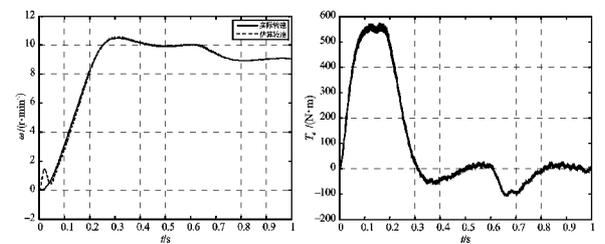


图 6 电机转矩响应

电机的给定转速在  $0.6 \text{ s}$  时从  $10 \text{ r/min}$  跳变到  $9 \text{ r/min}$ , 其速度和转矩响应曲线如图 7 所示。



(a) 电机的实测转速与估算转速

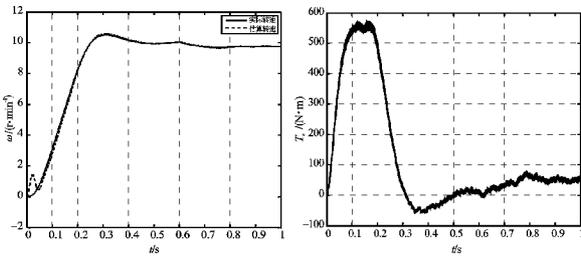
(b) 电机的转矩响应

图 7 转速突变时电机的速度与转矩响应曲线

负载转矩在  $0.6 \text{ s}$  时从 0 跳变到  $50 \text{ N}\cdot\text{m}$  时, 其转速和转矩响应曲线如图 8 所示。

由图 7、图 8 可知, 在电机稳定运行过程中, 电机的转速或者负载转矩发生突变时, 电机均能平稳且较快地跟随变化, 其跟踪性能好, 电机的动态性能较好, 对给定转速变化和负载扰动的鲁棒性强。同时, 其转速的估算与实际值的偏差也基本维持在 0, 估算精度较高。

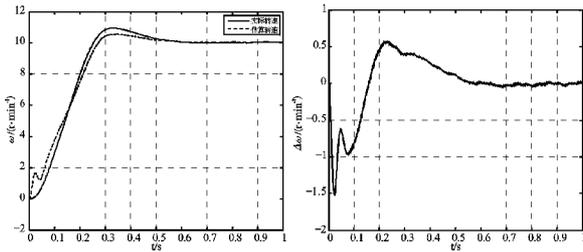
在运行的过程中, 由于发热、环境等因素的变化,



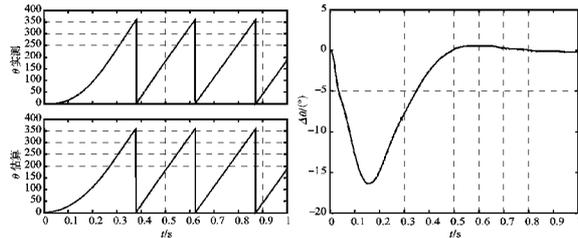
(a) 电机的实测转速与估算转速 (b) 电机的转矩响应

图 8 负载转矩突变时电机的速度与转矩响应曲线

电机的电阻、转子永磁磁链参数会发生变化。电机的定子每相电阻由 2.1 Ω 增大为 2.3 Ω 时, 电机的转速与转子位置角曲线如图 9 所示。



(a) 电机实测转速与估算转速 (b) 电机转速偏差



(c) 电机转子位置角的实测值与估算值 (d) 电机转子位置角的偏差

图 9 电机的定子电阻变化时转速与转子位置角

由图 9 可以看出, 当电机的定子电阻较小变化时, 电机的转速估算和转子位置角估算精度会大大降低, 其估算值与实测值之间的偏差变大。图中由于定子电阻仅变化一次, 最终估算值与实测值的偏差基本稳定在 0, 而实际中若随着运行和温度的变化, 定子电阻值在不断变化, 转速和转子位置角的实测值与估算值一直保持较大偏差, 不利于电机的稳定运行。在模型参考自适应系统中, 参考模型式(3)和可调模型式(4)中均含有随着温度、环境等因素而变化的参数, 如定子每相电阻、转子磁链等, 参考模型给出的是实际电机的运行状态, 即式(3)是根据实际情况始终反应电机的真实运行状态; 而可调模型是在已知电机参数的前提下得到的, 运行过程中, 电机的电阻等参数发生变化, 可调模型就不再准确, 估算的精度就降低了。

从以上分析可知, 模型参考自适应系统对电机额定参数非常敏感。在实际应用中, 应根据具体情况对可调模型进行调整。

### 3 结束语

模型参考自适应系统基于参考模型, 采用自适应规律完成系统所要求的性能, 通过对低速大力矩的永磁同步电机的仿真分析可知, 模型参考自适应法对转速和转子位置角的估算精度较高, 稳态转速平稳且跟踪性能好, 动静态性能较好, 对电机给定转速和负载扰动的鲁棒性强, 适应性好。

但同时, 该方法对电机的参数很敏感, 在电机的参数会发生较大变化的工作环境下, 该方法的精度会下降, 因而在下一步的实验调试过程中需要对可调模型根据运行和环境的变化做出适当调整。

总体而言, 由于模型参考自适应法的估算精度较高和鲁棒性好, 并且其实现也较容易, 目前很多无位置传感器控制的场合都采用该方法。对于油田抽油用复式低速大力矩永磁同步电机, 采用基于 MRAS 的无位置传感器方法简单易行, 且精度较高。

### 参考文献(References):

[1] GIERAS J F, WING M. Permanent Magnet Motor Technology [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2002.

[2] 俞佳琦, 叶云岳, 范承志. 基于 EKF 的低速永磁电机控制系统建模与分析[J]. 机电工程, 2009, 26(2): 31-33.

[3] SHIHE Z, BLASCHKE F, VANDENPUT A. Application of an electronic stator resistance in VSI fed field oriented synchronous machines [C]// Proceedings of PEAC 1993. Portugal: [s.n.], 1993: 300-305.

[4] ZHONG L, RAHMAM M F. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drivers[J]. **IEEE Transaction on Power Electronics**, 1997, 12(3): 528-536.

[5] KIM Y H, KOOK Y S. High performance IPMSM drives without rotational position sensors using reduced-order EKF [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 1999, 14(4): 868.

[6] 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.

[7] 王庆龙, 张崇巍, 张 兴. 基于变结构 MARS 辨识转速永磁电机矢量控制系统[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5230-5233.

[8] 徐志根, 刘忠举. 基于 MARS 的无速度传感器异步电机 DTC 系统[J]. 电力电子技术, 2006, 40(5): 25-26.

[9] ESKOLA M, TUUSA H. Comparison of MARS and Novel Simple Method for Position Estimation in PMSM Drives [C]// Proceedings of the 34th Annual Power Electronics Specialists Conferences. Portugal: [s. n.], 2003: 550-555.

[10] NG C H, RASHED M, VAS PETER, et al. A Novel MARS Current-based Sensor-less Vector Controlled PMSM Drive for Low Speed Operation [C]// Proceedings of IEMDC 2003. Portugal: [s.n.], 2003: 1889-1894. [编辑: 罗向阳]