

基于 MRAS 的 PMSM 无速度传感控制

刘力郡

(西安铁路职业技术学院 西安 710026)

摘要: 为精确实现对永磁同步电动机转速的辨识,提出一种基于变结构 MRAS 的转速识别方法,通过建立 PMSM 的数学模型,以电机本体作为参考模型,采用定子电流作为可调模型的方法,在参考模型自适应的基础上,加入滑模变结构控制,设计滑模观测器。在 MATLAB/Simulink 中对整个永磁同步电动机无速度传感器模型参考自适应系统进行仿真试验,通过对转子实际转速和估计转速曲线的观测和对比,以及对转速误差曲线分析,得出该系统能够精准估算出转子转速,具有较好的静态性能的结论。

关键词: 无速度传感器;永磁同步电动机;变结构;模型参考自适应系统

中图分类号: TM 351;TN606 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Control of PMSM with speed sensor-less based on MRAS

Liu Lijun

(Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an 710026, China)

Abstract: Aiming at identifying motor speed of the permanent magnet synchronous motor in an accurate manner, a method based on variable structure MARS is proposed. The sliding-mode observer is designed and the sliding mode variable structure is added by establishing mathematical models of PMSM, using the motor as a reference model, and adopting stator current as an adjustable model. In the MATLAB/Simulink, make an emulation test for the adaptive system of the no-sensor controller in PMSM model. Through observation and analysis of the rotator's actual speed and the estimated speed curve, a conclusion is drawn that this system can accurately estimate rotor speed with static performance.

Keywords: speed-sensor-less; permanent magnet synchronous motor; variable structure; model reference adaptive system

1 引言

随着永磁同步电动机的发展,在现代交流传动系统中,要想实现对永磁同步电动机的精确控制,必须使用传感器测量出转子的精确转速。永磁同步电机的无速度传感器控制,不仅可以克服速度传感器在硬件检测上带来的问题,减小电机体积,降低系统成本,而且可以提高系统的稳定性,能够实现准确估计转子速度和位置^[1-3]。

目前针对 PMSM 无速度传感器的研究在交流传动领域形成一个热点,国内外学者对永磁同步电动机无速度传感器控制中转子转速的估算提出很多方法^[4]。基于磁链位置的估算方法,利用模型公式计算定子磁链值,求得磁链比值的反正切值,得到磁链的位置角,将其微分,从而算的电机转速^[5]。此法依赖数学模型的参数较多,有噪声干扰,导致估算不准确。基于反电动势方法,计算定子磁链相角,将反电势求积分,计算定子磁链^[6]。此法使用积分器时,易造成零漂、相移等问题,且电机运行速度过低时,检测信号误差较大。基于扩展卡尔曼滤波法,确定状态变量,建立状态

方程,通过线性处理,根据公式完成速度辨识^[7]。此法模型复杂,运算繁杂,调试量过大。

基于模型参考自适应(model reference adaptive system, MRAS)的转速识别方法具有控制相对简单、计算量小,实时性与稳定性好,且不需额外的信号注入等优点,使其在无传感器的 PMSM 矢量控制中得到广泛应用。但该方法对 PMSM 参数变化较为敏感,为解决此问题,本文基于模型参考自适应法,引入滑模变结构控制,选用电机本体作为参考模型,采用定子电流作为可调模型,利用两个模型在同时工作状态下输出量的差值构造滑模面 $S^{[8-11]}$ 。利用 MATLAB 进行仿真,验证该方法对于无速度传感器的 PMSM 在该系统中的动静态性能和鲁棒性。

2 PMSM 的数学模型

永磁同步电动机在不影响控制性能的情况下,为了简化分析的复杂性,假设:1)定子三相绕组对称,均匀,Y型连接;2)反电动势为正弦;3)铁磁部分磁路线性,不计饱和、剩磁、涡流、磁滞损耗等影响;4)转子无阻尼绕组,永磁体无阻

尼作用^[12-13]。

在此假设条件下,PMSM在d-q坐标系下的数学模型如下。

电压方程为:

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

磁链方程为:

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

电磁转矩方程为:

$$T_e = p_n(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

式中: u_d, u_q 为定子电压矢量在d-q坐标系下两轴上的分量, i_d, i_q 为定子电流矢量在d、q轴上的分量, ψ_d, ψ_q 为定子磁链在d、q轴上的分量, ω 为转子角频率, T_e 为电机的电磁转矩^[14-16]。

3 基于变结构MRAS的速度估算

3.1 滑模变结构的基本原理

变结构控制是由输入量的状态满足切换函数时,改变反馈量的极性及其大小,使控制器从一种结构切换到另一种结构,以实现所需的控制性能要求^[17]。控制器的一般形式为:

$$u = \begin{cases} u^+(x), & S(x) > 0 \\ u^-(x), & S(x) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $u^+(x) \neq u^-(x)$, $S(x) = 0$ 为切换超平面,可保证最终滑动模式的动态品质和稳定性。

3.2 变结构MRAS转速观测器的设计

通过变结构控制理论,找寻到等效速度 ω_{eq} 使得系统实际转速在受到一些不确定及随机影响的状况下,能够追踪给定转速,即令 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_s(t) = 0$ (其中 $e_s = \hat{i}(t) - i(t), e_s(t_0) = 0$)。

1) 滑模面的构造

当系统发生滑动时,若 $S(e) = 0$,则系统滑动是渐进稳定的,亦表示是具有较好的动态品质。据此,构造滑模面为:

$$S = \hat{i}'_d i'_q - \hat{i}'_q i'_d \quad (5)$$

2) 滑模观测器的设计

由式(1)可知,PMSM定子电流方程为:

$$\begin{aligned} di_d/dt &= -R/Li_d + \omega i_q + u_d/L \\ di_q/dt &= -R/Li_q - \omega i_d - \frac{\psi_f}{L}\omega + \frac{u_q}{L} \end{aligned} \quad (6)$$

将其写成矩阵方程为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_f}{L} \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_f}{L} \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_d + \frac{R\psi_f}{L} \\ u_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

在式(7)中,若令 $i'_d = i_d + \frac{\psi_f}{L}, i'_q = i_q, u'_d = u_d + R\frac{\psi_f}{L},$

$u'_q = u_q,$

$A = \begin{bmatrix} -R/L & \omega - \omega \\ \omega & -R/L \end{bmatrix}, b = \frac{1}{L};$ 可得:

$$\frac{d}{dt} i' = Ai' + bu' \quad (8)$$

根据式(8),用 $\hat{i}_d, \hat{i}_q, \hat{\omega}$ 分别表示定子电流估计值d、q轴分量和定子角速度估计值,那么可构造参数可调的估计模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} \hat{u}'_d \\ \hat{u}'_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

同理,亦可将式(9)写为:

$$\frac{d}{dt} \hat{i}' = \hat{A} \hat{i}' + B \hat{u}' \quad (10)$$

将 $e = i' - \hat{i}'$ 定义为状态误差,由此,系统状态误差方程可由式(8)、(9)得出:

$$\frac{d}{dt} e = Ae - (\hat{A} - A)\hat{i}' \quad (11)$$

考虑式(6),对S求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= f(i_d, i'_d, i_q, \hat{i}_q, u_d, u_q, \omega, \psi_f, R, L) - \\ &M \left[i_d \hat{i}'_d + i_q \hat{i}'_q + \frac{\psi_f}{L}(i_d + \hat{i}_d) + \left(\frac{\psi_f}{L}\right)^2 \right] \text{sgn}(S) \end{aligned} \quad (12)$$

其中函数 f 是含有电机本体参数、角速度、估计电流和参考电流的有上界函数,且式(12)中 $i_d \hat{i}'_d + i_q \hat{i}'_q + \frac{\psi_f}{L}(i_d + \hat{i}_d) + \left(\frac{\psi_f}{L}\right)^2 > 0$,必然存在一个足够大的M,使其满足广义滑动模式的存在条件: $S < 0$,从而保证速度观测器的稳定性^[18]。变结构MRAS的速度辨识算法如图1所示。

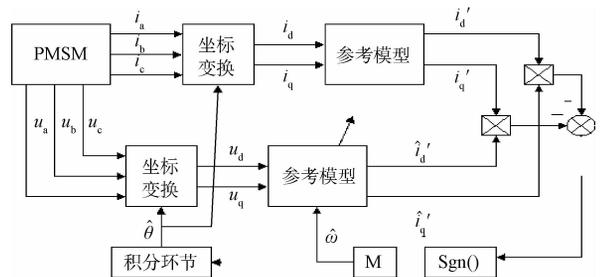


图1 变结构MRAS速度观测器

4 仿真实验

为验证变结构MRAS速度观测器的有效性和可行性,利用MATLAB对该系统进行仿真。选用参数为表1的PMSM。

表 1 PMSM 的参数

| 参数数值 |
|--|
| 额定转速 $n=2\ 000\ \text{r/min}$ |
| 直、交轴等效电感 $L_d=L_q=0.000835\ \text{H}$ |
| 定子电阻 $R_s=2.875\ \Omega$ |
| 转子磁链 $\psi_r=0.175\ \text{Wb}$ |
| 转动惯量 $J=0.008\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ |
| 黏滞系数 $B=0\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ |
| 极对数 $P=2$ |

图 2、3 所示为通过仿真系统得出 PMSM 的实际转速和估计转速。从图 2、3 可知,电动机在初始状态转速提升,进入正常状态,电动机转速基本稳定在设定值 $500\ \text{r/min}$,明显可对比得出估计转速虽有小幅波动,但系统较为稳定。图 4 所示为电动机实际转速与估计转速的误差波形,表明波动很小,系统转速估计设计较为合理。

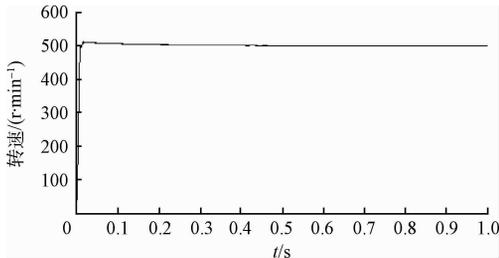


图 2 实际转速

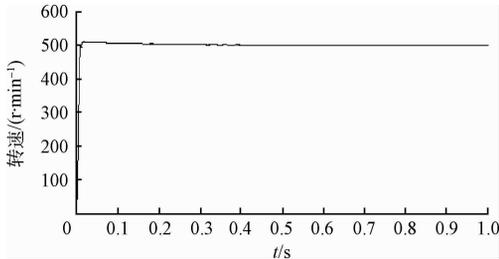


图 3 估计转速

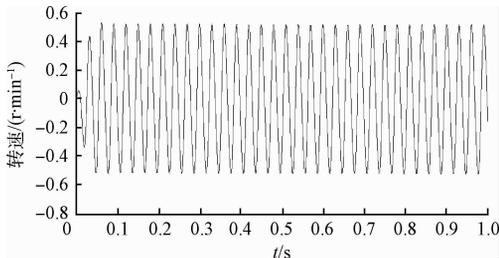


图 4 转速误差

系统提出无速度传感器转速辨识,给出一种变结构 MRAS 转速观测器,通过 MATLAB 进行仿真,表明该系统能够对电动机转速具有较高精度的估算,转速响应速度较快,静态转速性能较好。

参考文献

- [1] 杜永栋,滕青芳,左瑜君. 永磁同步电机的变结构 MRAS 转速识别系统[J]. 自动化仪表,2014,35(12): 79-82.
- [2] 王礼鹏,张化光,刘秀翀. 低速 PMSM 无速度传感器调速系统积分滑膜控制[J]. 电机与控制学报,2012, 16(2):21-24.
- [3] 韦文祥,刘国荣. 基于扩展状态观测器模型与定子电阻自适应的磁链观测器及其无速度传感器应用[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):6194-6202.
- [4] 刘冬冬,陈文燕,周申,等. 基于 MRAS 的无速度传感器矢量控制系统研究[J]. 中北大学学报:自然科学版,2015,36(5): 603-606.
- [5] 张锦,於锋,张蔚. 基于磁链观测器的永磁同步直线电机无位置传感器控制[J]. 微特电机,2016,44(10): 54-57.
- [6] 杨淑英,丁大尉,李曦,等. 基于反电动势滑模观测器的异步电机矢量控制[J]. 电机与控制学报,2016, 20(10): 23-30.
- [7] 施大发,施佳,黄庆,等. 基于扩展卡尔曼滤波的 PMSM 无位置传感器控制[J]. 电源技术,2015, 39(1): 161-164.
- [8] 赵湘衡,杨武,王敏怀. 基于 MRAS 无速度传感器的 PMSM 直接转矩控制[J]. 中南大学学报:自然科学版,2015,46(10):3631-3636.
- [9] 周博,徐大林,顾兆丹. 基于 MRAS 和模糊算法的 PMSM 无传感器控制[J]. 电子测量技术,2013, 36(2):39-42.
- [10] 孙延军,谭丹,冯鹏辉,等. 基于 MRAS 的永磁同步电机矢量控制系统[J]. 湖南工业大学学报,2013, 27(5):49-52.
- [11] 杨泽斌,樊荣,孙晓东,等. 基于 EKF 的无轴承异步电机无速度传感器控制[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(5):1023-1030.
- [12] 滕青芳,左瑜君,柏建勇,等. 基于 MRAS 观测器的无速度传感器永磁同步电机模型预测控制[J]. 兰州交通大学学报,2014,33(4):6-11.
- [13] 刘少军,张思雨. 基于 DSP 控制的永磁同步电机变频调速系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2016, 35(1):84-88.
- [14] 李红梅,陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(5):638-647.

5 结 论

利用滑模变结构和模型参考自适应理论,针对 PMSM

(下转第 47 页)