

研
究
开
发

一种新型永磁同步电机无传感器方法

李国雄

(天津凯发电气股份有限公司, 天津 300384)



作者简介：李国雄（1977-），男，工程师，主要从事电气化铁路牵引供电综合自动化系统的产品研发。

摘 要：从永磁同步电机的数学模型出发，设计滑模自适应观测器，将电流误差作为滑模开关函数，根据李亚普诺夫稳定性理论来判定观测器的收敛性的条件，并根据滑模观测器求解出扩展反电动势，将反电动势和位置误差构成锁相环，通过锁相环得到准确的位置和转速信息，最后通过仿真结果验证了所提方案的可行性。

关键词：永磁同步电机；滑模观测器；锁相环；无传感器控制

中图分类号：TM351；TM341 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2012)03-0017-03

A New Sensor-less Method for PMSM Drive System

LI Guo-xiong

(Tianjin Keyvia Electric Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: The slid motor observer was created based on the mathematical model of permanent magnet synchronous motor. The current error was defined as the slid sign function, and the stability of the observer was guaranteed by the Lyapunov stability theory. By the back-emf obtained from slid motor observer and position error, PLL(Phase-Locked Loop) was structured, with which position and speed was calculated. Simulink result indicated the valid of the theory.

Key words: PMSM; slid motor observer; PLL; sensor-less control

0 引言

滑模变结构控制理论出现在20世纪50年代，近年来基于滑模变结构理论的滑模观测器被广泛地应用于永磁同步电机的无传感器控制中^[1-4]。滑模观测器在很宽的速度范围内具有良好的动态性能，对电机的参数也有着很好的鲁棒性。

本文将滑模变结构控制与自适应控制相结合，在保证系统在抗干扰和参数变化方面具有高鲁棒性的条件下，设计滑模自适应观测器，用电流误差作为滑模开关函数，依据李亚普诺夫稳定性理论判定观测器的收敛性的条件，再由观测器推导出扩展反电动势，将反电动势和误差位置信息来构成锁相环结构，跟踪实际位置信息，从而保证能够准确地得到位置、转速信息，该方法在观测器和控制器的设计上都比较容易实现。

1 永磁同步电机数学模型

在建立数学模型之前做如下的假设：忽略铁心饱和，不计涡流和磁滞损耗，转子上没有阻尼绕组，永磁材料的电导率为0；相绕组中感应电动势波形是正弦波。根据以上的假设和一系列的推导可得到PMSM在坐d-q坐标系下的数学模型如下。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

将上述方程变形如下：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_q & pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (L_d - L_q)(\omega_e i_d - p i_q) + \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

将上述方程变换到 α - β 静止坐标系，数学模型如下：

收稿日期：2012-02-15

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_q & pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $\lambda = \{(L_d - L_q)(\omega_e i_d - i_q) + \omega_e \psi_f\}$ 。

即令扩展反电动势等效为下式：

$$\begin{cases} e_\alpha = -\lambda \sin\theta \\ e_\beta = \lambda \cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

2 滑模自适应方法设计

2.1 滑模变结构的基本原理

滑模变结构控制是变结构控制中的一种控制策略，它与常规控制的根本区别在于控制的不连续性。考虑系统 $\dot{x} = f(x)$ ($x \in R^n$) 的状态空间中，有一个切换面 $s(x) = s(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = 0$ ，将状态空间分为上下两部分 $s > 0$ 或 $s < 0$ 。在切换面上的运动点有 3 种情况：通常点 A，系统运动点到达切换面附近时，穿越此点而过；起始点 B，系统运动点到达切换面附近时，从切换面两边离开该点；终止点 C，系统运动点到达切换面时，从切换面的两边趋向于该点。

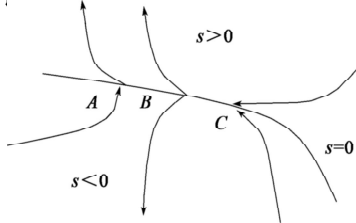


图 1 滑模运动示意

在滑模控制中，当某一区域内所有的点都是 C 这样的趋近点时，则一旦运动点趋近于该区域就会被吸引到该区域运动。此时这个区域就叫滑模区，系统在滑模区中的运动叫滑模运动。因此系统处于滑模运动时，即相当于在运动点趋近到切换面 $s=0$ 时，必有：

$$\lim_{s \rightarrow 0} \dot{s} \leq 0 \quad (5)$$

且当系统处于滑模面上运动时，有 $s=0$ 及 $\dot{s}=0$ 。

式 (5) 也可以由李亚普诺夫第二方法得到。取李亚

普诺夫函数为： $v = \frac{1}{2} s(x)^T s(x)$ ，则滑模运动在全局范围内渐近稳定的条件为：

$$\dot{v} = s(x)^T \dot{s}(x) \leq 0 \quad (6)$$

当满足上述条件，在切换面以外的运动点都将沿着切换面滑动并于有限的时间里到达切换面。这样得到的控制算法比较简单，系统鲁棒性强。

2.2 滑模观测器

根据永磁同步电机在 $a-b$ 坐标系上的数学模型，构造的观测器的状态方程如下所示：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_q & pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ K \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

用式 (7) 减去式 (3)，如果两方程中的电机参数一致，则结果为：

$$p \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_q & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} K \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ K \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

显然式 (8) 为滑模观测器的误差动态方程，如果

选择 $s(x) = K \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} = 0$ 为滑模超平面，此时能

满足式 (6) 的条件，则误差动态方程渐进稳定，因此将 $s(x)$ 带入式 (6) 中，应有：

$$s(x)^T \dot{s}(x) = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha & \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)}{dt} \\ \frac{d(\hat{i}_\beta - i_\beta)}{dt} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (9)$$

将式 (8) 方程带入到式 (9) 中，可以推导出满足式 (9) 的条件是^[5]：

$$K > \max(|e_\alpha|, |e_\beta|) \quad (10)$$

即，如果满足不等式 (10)，那么就可以产生滑模运动，这样误差动态方程式 (8) 渐进稳定，也就保证了观测器方程式 (7) 的收敛。满足式 (8) 的稳定后即推出以下方程：

$$\begin{cases} e_\alpha = K \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ e_\beta = K \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (11)$$

式中： K 为滑模观测器增益。

2.3 锁相环的角度估算

采用观测器出来的 e_α 和 e_β 以及实际的 $\hat{\theta}$ 构成锁相环，其构成锁相环方程为

$$\begin{aligned} \text{error} &= e_\beta (-\sin \hat{\theta}) - e_\alpha (\cos \hat{\theta}) = \\ &\lambda (-\cos \theta \sin \hat{\theta}) + \lambda (\cos \hat{\theta} \sin \theta) = \lambda \sin(\theta - \hat{\theta}) \end{aligned}$$

经过 PI 环节后得到实际跟踪的角度值，形成对 θ 的锁相结构，其组成结构如图 2。

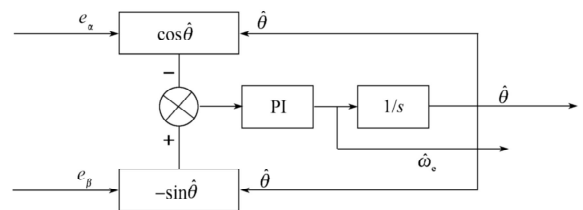


图 2 锁相环结构图

用这种 PLL 的角度跟踪方法能避免观测器估算 e_α 和 e_β 带来的相位误差，同时能减少使用 $\theta = \arctan(e_\alpha / e_\beta)$ 公式在转子位置接近 90° 时干扰所引起的角度测量误

差。

3 仿真

3.1 系统仿真原理框图

根据矢量控制和SVPWM调制策略,建立了基于滑模观测器的PMSM无传感器矢量控制系统的原理框图,如图3所示,其中,电机参数如表2所示。

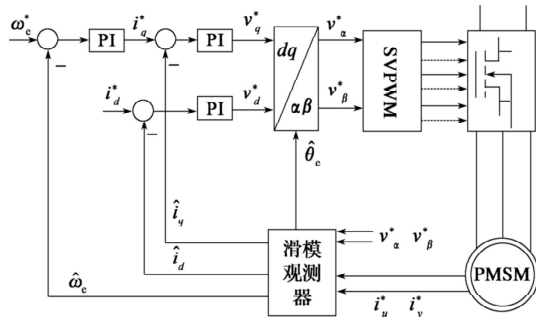


图3 基于滑模观测的PMSM仿真原理框图

表2 电机参数表

额定功率/kW	线电压/V	永磁体磁链/Wb	极对数	电阻/ Ω	电感/mH
3	400	0.175	4	2.875	8.5

3.2 仿真结果

本文基于Matlab/Simulink建立了基于滑模观测器的PMSM无传感器矢量控制系统仿真模型,输入转速为一阶跃函数,初值为150 rad/s,在0.06 s时跃变为850 rad/s,在0.12 s时有阶跃变化为150 rad/s。负载转矩在0.1s由1 N·m阶跃变化为5 N·m。此时,滑模观测器估算的 α 轴反电势如图4所示,系统响应如图5所示。

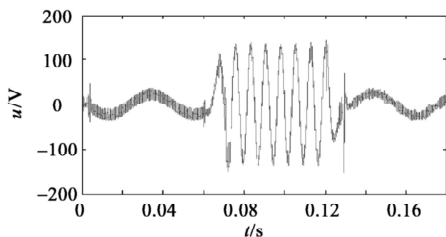


图4 估算的 α 轴反电势

图4为测量的 α 轴反电势波形,波形美观、正弦度高,且幅值随着转速阶跃同步变化。图5(a)表示实际转速和观测转速的波形,无论电机加减速,估算速度都能准确地跟踪实际转速;图5(b)表示转速误差曲线,电机稳定运行后,误差基本为0,在转速阶跃跳变时,跟踪误差也很小;图5(c)表示实际位置和观测位置的波形,无论电机加减速,估算位置都能准确地跟

踪实际位置,2条曲线基本吻合;图5(d)表示位置误差曲线,电机稳定运行后,误差基本为0。从整组试验结果可得出,辨识曲线只在初始阶段有微小震荡,在很短的时间就能很好跟踪实际速度,整个辨识曲线的动静性较好,鲁棒性好。

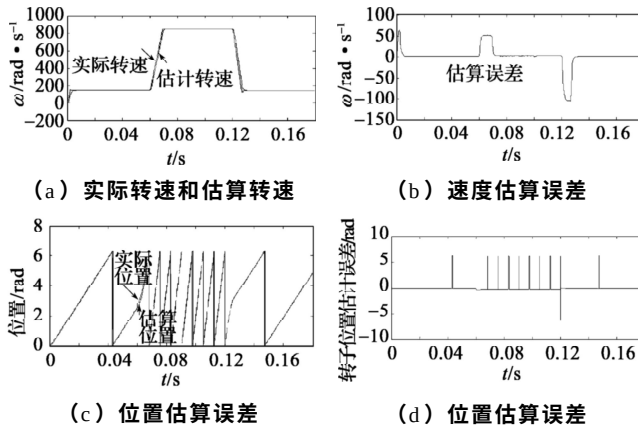


图5 系统响应

4 结语

本文基于滑模自适应观测器提出了一种永磁同步电机无传感器方案。在无速度传感器矢量控制系统中设计了一种鲁棒滑模观测器,根据误差方程构造滑模面,得到观测器的稳定条件,根据估算的反电动势构造锁相环跟踪实际位置信息。从仿真结果可以看出,系统输出速度位置曲线能够有效地跟踪实际曲线,并且对电机的参数不敏感,动静态性能好,辨识误差几乎为零,稳定性好,能够在较短的时间内快速达到稳定值。

参考文献：

- [1] Yoon-Seok Han, Jung-Soo Choi, Young-Seok Kim. Sensorless PMSM Drive with a Sliding Mode Control Based Adaptive Speed and Stator Resistance Estimator [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2000, 136(5): 2588-2599.
- [2] Kye-Lyong Kang, Jang-Mok Kim. Sensorless Control of PMSM in High Speed Range with Iterative Sliding Mode Observer [C] //APEC04. Nineteenth Annual IEEE, 2004(2): 1111-1116.
- [3] 林平, 胡长生, 李明峰, 等. 基于模型参考自适应系统算法的速度估算核的研制 [J]. 中国机电工程学报, 2004, 24(1): 118-123.
- [4] 吴春华, 陈国呈, 孙承波. 基于滑模观测器的无传感器永磁同步电机矢量控制系统 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(2): 1-3.
- [5] 贾洪平, 贺益康. 永磁同步电机滑模变结构直接转矩控制 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 1-6.