

永磁同步电动机新型滑模观测器无传感器控制

鲁文其, 黄文新, 胡育文

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 由于传统滑模观测器算法存在固有抖振, 根据永磁同步电动机的数学模型, 设计了一种新的滑动模态观测器转子位置自检测控制算法; 切换函数采用饱和函数代替开关函数; 选择合适的边界层厚度以削弱抖振; 将反电动势估算值反馈到定子电流的观测计算中, 通过选择合适的反馈值来提高低速时转子位置角的估算精度和高速时系统的稳定性. 为了简化驱动系统的硬件结构以提高滤波效果, 设计了一个截止频率可随转子转速变化的低通滤波器对延迟进行补偿. 以 1 台表面式永磁同步电动机为对象进行实验, 实验结果表明, 这种新型滑模观测器对电机参数变化具有很强的鲁棒性, 可以在较广频率范围运行时准确地估算出转子信息, 是实现永磁同步电动机无传感器控制的一种实用方法.

关键词: 滑动模态观测器; 饱和函数; 无位置传感器

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A

A novel sliding-mode observer for the sensorless control of permanent-magnet synchronous machines

LU Wen-qi, HUANG Wen-xin, HU Yu-wen

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: To deal with the chattering in the traditional sliding-mode observer, we propose a novel sensorless control algorithm of the sliding-mode observer for the self-sensing estimation of rotor position. Being different from other observers, the sign function is replaced by a saturation function and the chattering problem is solved by properly choosing the thickness of the boundary layer. To increase the estimation precision of the rotor position at low speed and the stability of the system at high speed, the estimated back electromotive force is fed-back to the current observer. To achieve a better effect in filtration and to simplify the hardware structure, we design a low pass filter with a variable cut-off frequency depending on the rotor speed, which readily compensates the phase-angle delay over the entire speed range. Experimental results show that the proposed scheme is suitable for the sensorless control of a permanent-magnet synchronous machine over a wide speed range, and the novel algorithm is robust to uncertainties in operating conditions and parameters.

Key words: sliding mode observer; saturation function; sensorless

1 引言(Introduction)

永磁同步电动机(PMSM)具有高可靠性、高转矩惯量比、高效率和高功率密度等优点, 随着微处理器技术、电力电子技术、控制理论以及低成本、高磁能积永磁材料的发展, 得到越来越广泛的应用. 永磁同步电动机采用无位置传感器控制, 电动机结构更加简单, 应用范围扩大, 相对于有位置传感器控制优势非常明显.

近来, 主要有两种技术应用于永磁同步电动机的无位置传感器控制中. 第 1 种技术是利用电动机的空间凸极效应^[1], 向电动机定子绕组施加高频脉冲电

压信号并检测其相应的定子电流幅值, 根据其电流幅值在空间上的各向差异性估计出转子实际位置. 第 2 种技术是直接或间接地从电机的反电动势中提取位置信息, 这种方法具有良好的动态性能, 但是在低速特别是零速时转子位置估算困难. 目前有多种控制策略, 文献[2]采用定子磁链估计法, 磁链由反电动势积分求得, 但是由于积分器的零漂问题, 得到的磁链值会有积分误差. 为了克服这个问题, 文献[3, 4]采用卡尔曼滤波器估计法, 可以从随机噪声信号中得到最优观测. 但采用该算法一方面计算量相当大, 需要用高速、高精度的数字信号处理器, 这使得

无位置传感器控制系统的硬件成本提高;另一方面受电机参数的影响较大.而滑模变结构控制可通过简单的开关控制使系统状态变量沿事先规定的滑模面运动,不仅可在滑模运动段保证系统的动态性能而且对控制对象的参数变化以及扰动具有完全的自适应能力,所以在交流电机系统中引入基于变结构控制理论参数观测器日益增多^[5~8].文献[5]将传统常值切换滑模控制应用于反电动势观测器中,通过估算到的反电动势进一步算得转子位置;实验结果显示定子估算电流能够很好地追踪实际电流,并且在滑模面上作滑模运动,但是由于开关时间和空间上的滞后,使滑模观测器呈现固有的抖振现象,估算电流沿着实际值上下振荡.振荡现象会影响转子位置角度估计的准确性,这对于高性能系统是不允许的.另外,传统滑模变结构控制应用在反电势观测中,当电机低速时反电势幅值很小,也会影响转子位置角度估计的准确性,这很大程度上限制了其在低速领域的应用.因此,为了削弱抖振,并同时提高低速时转子位置角的估算精度和高速时系统的稳定性,本文将一种新的滑模变结构观测器引入到永磁同步电动机驱动系统中,本文以此内容为核心,以一台表面式永磁同步电动机为实验对象进行详细的分析与研究.

2 永磁同步电动机数学模型(Mathematical model of permanent magnet synchronous machine)

表面式永磁同步电动机在 α, β 定子静止坐标系下的数学模型为

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R}{L_s}i_s - \frac{1}{L_s}e_s + \frac{1}{L_s}u_s. \quad (1)$$

其中

$$i_s = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}; u_s = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}; e_s = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_E\omega \sin\theta \\ K_E\omega \cos\theta \end{bmatrix};$$

i_α, i_β 为 α, β 坐标系中 α 轴、 β 轴电流, L_s 为相电感, R 为相电阻, K_E 为反电势系数. 由于电机定子电流变化的反应时间远远快于转速变化的反应时间,可以假设 $\dot{\omega} = 0$, 电机的反电势模型可以变换如下:

$$\begin{cases} \dot{e}_\alpha = -\omega e_\beta, \\ \dot{e}_\beta = \omega e_\alpha. \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知, 永磁同步电动机的转子位置只与反电势的相位有关, 反电势波形为一正弦波, 其幅值与转速成正比. 反电势信息包含着电机转子的位置和转速信息, 通过估计到的反电动势就可以得到转子位置和速度.

3 传统滑模观测器算法(Traditional sliding mode observer algorithm)

根据永磁同步电动机数学模型, 构建传统滑模观测器状态方程为^[5]:

$$\frac{d\tilde{i}_s}{dt} = -\frac{R}{L_s}\tilde{i}_s + \frac{1}{L_s}(u_s - Z_s). \quad (3)$$

其中:

$$\tilde{i}_s = \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix}; Z_s = \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \times \text{sgn}(\tilde{i}_\alpha - i_\alpha) \\ k \times \text{sgn}(\tilde{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix};$$

$\tilde{i}_\alpha, \tilde{i}_\beta$ 分别为 α, β 坐标系中 α 轴、 β 轴估算电流值; Z_s 为控制函数, $\text{sgn } S$ 为开关函数, 定义如下:

$$S = \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha - i_\alpha \\ \tilde{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix}; \text{sgn } S = \begin{cases} 1, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ -1, & S < 0. \end{cases}$$

$\text{sgn } S$ 为高频开关信号, 将式(3)代入式(1)可得 $e_s = k \times \text{sgn } S$ 也是一个高频开关信号. 在滑模面上作滑模运动时, 由于开关时间和空间上的滞后, 使滑模观测器呈现固有的抖振现象, 虽然 e_s 进行低通滤波就能得到连续的反电势, 但是估算电流还是沿着实际值上下振荡. 振荡现象会影响转子位置角度估计的准确性, 工程实际应用时需要削弱抖振. 但是采用滑模变结构控制的优点在于通过不连续的开关控制来提高系统的鲁棒性, 而削弱抖振会降低系统的鲁棒性, 两者互相矛盾. 因此, 在削弱抖振的同时仍然要保证系统的鲁棒性将是这种传统滑模观测器算法迫切需要解决的问题.

4 新型滑模观测器控制算法(Novel sliding mode observer algorithm)

基于饱和函数的新型滑模观测器控制算法的总体方框图如图1所示:

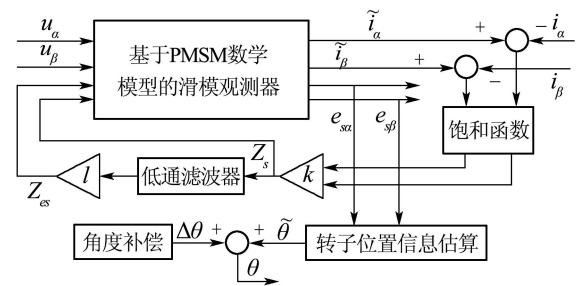


图1 基于饱和函数的滑模观测器方框图

Fig. 1 Block diagram of sliding mode observer based on saturation function

基于PMSM模型的滑模观测器的状态方程为

$$\frac{d\tilde{i}_s}{dt} = -\frac{R}{L_s}\tilde{i}_s + \frac{1}{L_s}(u_s - l \times Z_{es} - Z_s). \quad (4)$$

其中:

Z_{es} 为控制函数(反电势);

l 为控制函数(反电势)的反馈增益;

Z_s 为替代传统滑模变结构开关函数的饱和函数, 函数曲线如图2所示:

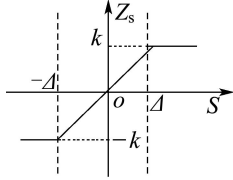


图2 饱和函数曲线

Fig. 2 Diagram of the saturation function

具体分别作如下定义:

$$Z_{es} = \begin{bmatrix} Z_{e\alpha} \\ Z_{e\beta} \end{bmatrix} = Z_s \times \frac{\omega_c}{s + \omega_c}, \quad (5)$$

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ Z_\beta \end{bmatrix} = k \times \text{sgn}\left(\frac{S}{\Delta}\right) = \begin{cases} k, & S > \Delta, \\ k/\Delta \times S, & -\Delta < S < \Delta, \\ -k, & S < -\Delta. \end{cases} \quad (6)$$

其中: ω_c 为低通滤波器截止频率; Δ 为边界层; k 为滑模系数, 此系数的选取必需满足可达性和存在性条件, 否则观测器不能进行滑模运动. 由式(4)知, 该新型滑模观测器把反电势估算值反馈引入到定子电流的观测计算中, 再联系公式(1)和(4)可推得新型滑模观测器的动态方程如下:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{R}{L_s}S + \frac{1}{L_s}(e_s + l \times Z_{es} - Z_s). \quad (7)$$

根据滑模变结构控制理论^[9,10], 在滑模面上进行滑模运动时:

$$S = 0. \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中得:

$$e_s = Z_s + l \times Z_{es}. \quad (9)$$

由式(2)可知, 估算出反电势后, 转子位置角度可以用公式(10)进行计算,

$$\tilde{\theta} = -\tan^{-1} \frac{e_\alpha}{e_\beta}. \quad (10)$$

从式(5)可知反电势通过低通滤波器来获得, 引入了相位延迟. 为了在简化驱动系统硬件结构的同时达到更好的滤波效果, 设计一个截止频率可随转子转速变化的低通滤波器是一种行之有效的方法.

截止频率可变的低通滤波器的截止频率可以表

示如下:

$$\omega_c = \frac{\omega}{M}. \quad (11)$$

截止频率可变的低通滤波器满足:

$$H(j\omega) = \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c} = \frac{1}{1 + jM}. \quad (12)$$

转子位置角度相移角为:

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{\omega}{\omega_c} = \tan^{-1} M. \quad (13)$$

求得该相移角 $\Delta\theta$ 后加上 $\tilde{\theta}$ 就得到准确的转子位置实际角度 θ .

5 实验结果与分析(Experimental results and analysis)

为了验证这种新型滑模观测器控制算法的准确性, 本文针对一台表面式永磁同步电动机进行了实验, 实验电机参数如下: 额定功率350 W, 额定电压48 V, 额定频率100 Hz, 23对极, 定子电阻0.25 Ω , d , q 轴电感8.3 mH. 实验电机由电压型逆变器供电, 系统采用SVPWM调制策略, 控制器采用Freescle最新推出的高性价比DSP 56F8013为核心, 逆变器开关频率为6 kHz. 由于反电势幅值跟转速大小成正比, 电机静止时转速为零, 相应的反电势也为零, 滑模观测器无法估算出转子的位置和速度, 本文采用开环起动, 频率达到4 Hz时切换为新型滑模观测器转子位置自检测控制.

图3为起动时的实际角度和估算角度波形, 从图可知, 0~4 Hz范围内转子估算角度误差随着频率增大而逐渐减小, 4 Hz时转子估算角度就能和实际角度保持一致, 实现开环起动到新型滑模观测器转子位置自检测控制的平滑切换.

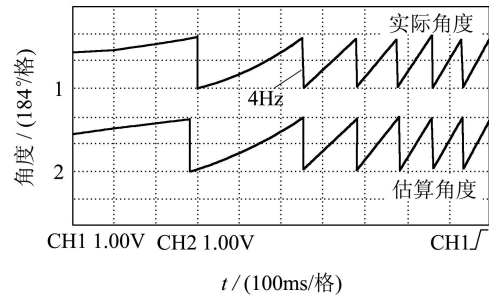


图3 起动时实际角度和估算角度波形

Fig. 3 Estimated and actual angle waveforms at motor startup

图4为同一转速下($f = 62.5$ Hz)运行时新型滑模观测器的实验波形, 从图可知, 定子估算电流能够很好的跟踪实际电流(图4(c)), 估算反电势波形比较理想(图4(b)), 转子估算角度和实际角度保持一致(图4(a)), 因此, 该新型滑模观测器控制算法高速时无传感器运行可靠.

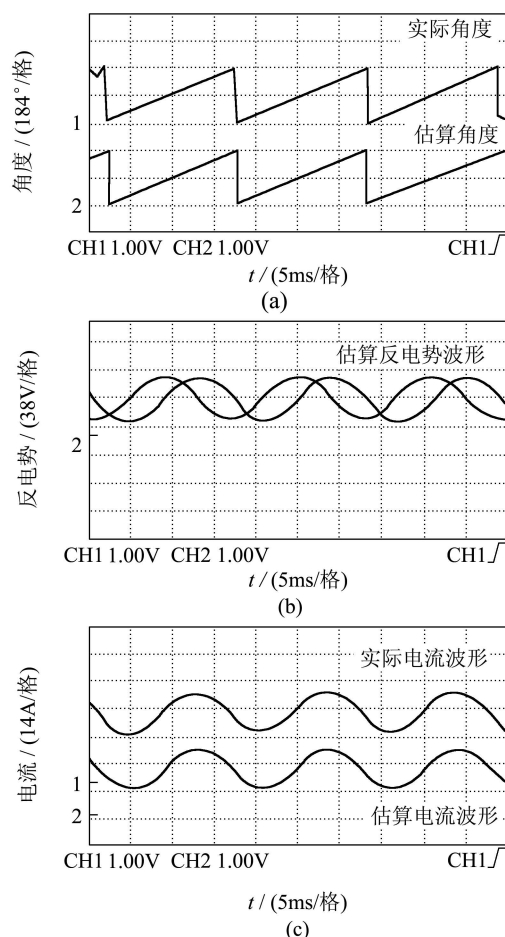


图4 高速运行时新型滑模观测器的实验波形

Fig. 4 Experiment waveforms at high speed

综合前面实验结果可知,在不同转速下通过合理选择参数 l , Δ 和 k ,新型滑模观测器控制算法不仅在削弱抖振的同时保证了系统的鲁棒性,而且提高了低速运行时转子位置角的估算精度和高速运行时系统的稳定性,因此,该算法能够在较广频率范围运行时有效地估算出转子位置信息。

6 结论(Conclusion)

本文针对传统滑模观测器算法存在的固有抖振问题,设计了一种新的滑模观测器转子位置自检测控制方法,实验结果表明该方法能够在保证滑模变结构鲁棒性本质特点的基础上明显地削弱抖振,且引入参数 l 来估算转子位置信息,能够在较低速场合准确地估算出转子位置信息,扩大了其在低速领域的无传感器控制。因此,该新型滑模观测器算法能够在宽转速范围运行时有效地读取转子位置信息,是实现永磁同步电动机无传感器运行的一种实用方法。

参考文献(References):

[1] 王丽梅, 郭庆鼎. 基于转子凸极跟踪的永磁同步电动机转子位置

的自检测方法[J]. 电工技术学报, 2001, 16(2): 14-17.

(WANG Limei, GUO Qingding. Rotor position estimation for permanent magnet synchronous motor using saliency tracking self sensing method[J]. *Transactions of China Electro-technical Society*, 2001, 16(2): 14-17.)

- [2] TOMONOBUS, TSUYOSHI S, KATSUMI U. Vector control of permanent magnet synchronous motors without position and speed sensors[C] // *Power Electronics Specialists Conference, 26th Annual IEEE*. Atlanta, GA, USA: IEEE, 1995, 2: 759-765.
- [3] BADO A, BOLOGNANI S, ZIGLIOTTO M. Effective estimation of speed and rotor position of a pm synchronous motor drive by a KALMAN filtering technique[C] // *Power Electronics Specialists Conference, 23rd Annual IEEE*. Toledo, Spain: IEEE, 1992: 951-957.
- [4] DHAOUADI R, MOHAN N. Design and implementation of an extended KALMAN filter for the state estimation of a permanent magnet synchronous motor[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1991, 6(3): 491-497.
- [5] 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, 51.
- (WU Chunhua, CHEN Guocheng, Sun Chengbo. Sliding mode observer for sensorless vector control of PMSM[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2006, 25(2): 1-3, 51.)
- [6] 孙宜标, 郭庆鼎. 基于滑模观测器的直线伺服系统反馈线性化速度跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 391-394.
- (SUN Yibiao, GUO Qingding. Feedback linearization speed-tracking control of linear servo system based on sliding mode observer control[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 391-394.)
- [7] 王家军, 王江, 许镇琳. 基于逆变器死区的永磁同步电动机系统的变结构控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 579-582.
- (WANG Jiajun, WANG Jiang, XU Zhenlin. Variable structure control of PMSM system based on inverter dead-time[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 579-582.)
- [8] 袁性忠, 姜新建. 基于滑模变结构的倒立摆系统稳定控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(5): 720-723.
- (YUAN Xingzhong, JIANG Xinjian. Stabilizing control of inverted pendulum using sliding mode control scheme [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(5): 720-723.)
- [9] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社. 1995.
- (WANG fengyao. *Sliding Mode Variable Structure Control*[M]. Beijing: Machine Industry Press, 1995.)
- [10] 姚琼荃, 黄继起, 吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.
- (YAO Qionghui, HUANG Jiqi, WU Hansong. *Variable Structure Control System*[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997.)
- [11] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
- (LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 407-418.)

作者简介:

鲁文其 (1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: luwenqi@nuaa.edu.cn;

黄文新 (1966—), 男, 教授博士, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动;

胡育文 (1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子技术与运动控制。