

# 无轴承开关磁阻电机滑模观测器间接位置检测研究

田建,王宏华,王卫东

( 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

**摘 要:**针对无轴承开关磁阻电机中引用位置传感器所带来的结构复杂、成本高等问题,以 12/8 极三相双绕组电机为例,采用一种基于滑模观测器的无轴承开关磁阻电机间接位置检测的控制策略。该控制策略以转子位置和转速作为状态变量,以实测主绕组电流和悬浮绕组电流与估算电流的偏差作为滑模面,构建滑模观测器进行转子位置辨识和转速估计。在 Matlab/Simulink 中搭建无轴承开关磁阻电机的滑模观测器模型并进行仿真分析。仿真表明:所采用的间接位置检测方法可有效估算出电机的转速及转子位置,并具有较好的跟随性及鲁棒性。

**关键词:**无轴承开关磁阻电机;间接位置检测;滑模观测器

**中图分类号:**TM352      **文献标志码:**B      **文章编号:**1671-5276(2021)02-0185-04

## Research on Indirect Position Detection of BSRM by Sliding Mode Observer

TIAN Jian, WANG Honghua, WANG Weidong

( College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** To solve the problems of complicated structure and high cost and of bearingless switched reluctance motor, a control strategy based on sliding mode observer for indirect position detection of bearingless switched reluctance motor was adopted. Taken 12/8-pole three-phase double winding motor as an example, the motor position and speed were adopted as state variables and the deviations between the measured main winding and suspended winding currents and the estimated current were treated as the sliding surface. Based on Matlab/Simulink, the sliding mode observer model of bearingless switched reluctance motor was built and simulated. The simulation results show that the indirect position detection method can effectively estimate the speed and position of the motor, and has good following performance and robustness.

**Keywords:** bearingless switched reluctance motor; indirect position detection; sliding mode observer

## 0 引言

无轴承开关磁阻电机(BSRM)<sup>[1]</sup>结构简单而坚固、允许转速高、摩擦功耗小,具有广阔的应用前景。但 BSRM 实现稳定旋转的前提是对转子的角度位置和转速的准确检测,传统的机械式传感器如电磁式、光电式等传感器在实际应用中不仅存在安装维护不便、价格昂贵等问题,且会增加系统的体积和质量,不利于进一步提高无轴承电机驱动系统的功率密度。因此研究 BSRM 角度位置和转速的自检测技术,可有望减小电机轴向长度,提高系统集成度和可靠性。

目前,国内外已有许多学者致力于电机转子间接位置检测技术的研究,并提出了多种检测方法,如电流梯度法<sup>[2]</sup>、电流磁链法<sup>[3]</sup>、凸极追踪<sup>[4]</sup>、高频脉冲信号注入<sup>[5]</sup>、状态观测器法<sup>[6-7]</sup>等。这些检测方法各有特点,其中状态观测器不需施加高频激励信号或使用复杂的信号处理技术就能满足转子高速运行下检测的实时性和精确性,但该方法对数学模型的依赖性特别强,同时对系统运行参数变化敏感。文献[8]基于 BSRM 状态空间模型,利用 LS-SVM 设计转子位置/位移观测器,但观测器的输入为

转子位移和转速信号,因此仍需传感器,并未真正实现无传感器运行。为实现无轴承开关磁阻电机转子角位移实时间接检测,本文采用一种新的基于滑模观测器的 BSRM 间接位置控制方法,以转子位置和转速作为状态变量,以实测主绕组电流和悬浮绕组电流及估算电流的偏差作为滑模面,构建滑模观测器进行转子位置辨识和转速估计。在 Matlab/Simulink 中搭建无轴承开关磁阻电机的滑模观测器模型并进行仿真,验证该方法的可靠性及鲁棒性。

## 1 系统结构

### 1.1 BSRM 系统模型

无轴承开关磁阻电机本体是由 BSRM 数学模型、转子机械系统模型、电机电流检测部分和转子运动检测部分构成<sup>[9]</sup>,整体结构框图如图 1 所示。电机本体与三相主绕组及悬浮力绕组功率变换电路的端口相连,将产生的径向悬浮力  $F_x$ 、 $F_y$  和电磁转矩  $T$  作为转子机械系统模型的输入量。电流检测部分输出 BSRM 三相主绕组及悬浮力绕组电流量  $i_{ma}$ 、 $i_{sa1}$ 、 $i_{sa2}$ 、 $i_{mb}$ 、 $i_{sb1}$ 、 $i_{sb2}$ 、 $i_{mc}$ 、 $i_{sc1}$ 、 $i_{sc2}$ , 其与运算部分将期望悬浮力和期望转矩带入控制策略绕组电

流公式得到的各绕组电流滞环给定量共同构成电流滞环控制,从而控制功率变换器实现电机本体转动。

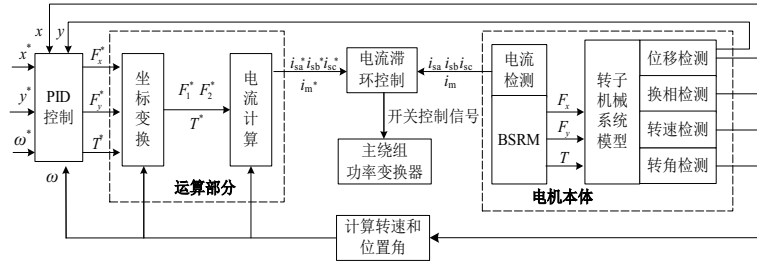


图1 BSRM系统整体框图

## 1.2 滑模变结构控制基本原理

滑模变结构控制<sup>[10]</sup>是变结构控制系统的一种控制策略。这种控制策略与常规控制的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统“结构”随时间变化的开关特性。该控制特性可以迫使系统在一定特性下沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的上下运动,即所谓的滑动模式或“滑模”运动,且这种滑动模式可设计,并与系统的系数及扰动无关。因此处于滑模运动的系统具有良好的鲁棒性。

如图2所示,从切换面穿过的A点为通常点,从切换面向两边发散在切换面上的运动点B点为起始点,从两边向切换面逼近且在切换面上的点C为终止点。在滑模观测器研究中,针对的很多都是终止点。假设在切换面上某一区域内所有的点都是终止点的话,那么当运动点趋向于该区域时,就被“吸引”在该区域内运动。称在切换面 $s=0$ 上的所有运动点均为终止点的区域为“滑模”区,或者更详细地表达为“滑动模式区”,系统在滑动模式区所做的运动称为“滑模运动”。

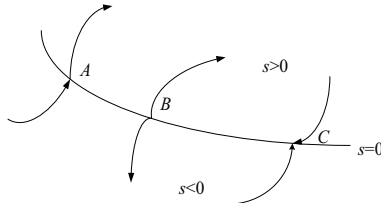


图2 切换面上三种点运动趋势图

当运动点逼近切换面 $s=0$ 时,有以下关系: $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{ds}{dt} \leq 0$ ,由此可以知道系统的一个条件李雅普诺夫函数: $v(x_1, \dots, x_n) = [s(x_1, \dots, x_n)]^2$ 。由于在切换面邻域内函数是正定的,而关系式是负半定的,即在 $s=0$ 附近函数 $v$ 是一个非增函数。因此,只需 $s$ 满足关系式,系统本身也就稳定于条件 $s=0$ 。

## 2 间接位置检测仿真研究

### 2.1 滑模观测器的设计

由上文BSRM整体系统结构可以得到无轴承开关磁阻电机转矩子系统的数学关系式为:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{D}{J}\omega + \frac{T_e - T_L}{J} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2)$$

$$T_e = K_t(2N_m^2 i_m^2 + N_s^2 i_{s1}^2 + N_s^2 i_{s2}^2) \quad (3)$$

式中: $T_e$ 、 $T_L$ 、 $\omega$ 、 $\theta$ 、 $D$ 、 $J$ 分别为电磁转矩、负载转矩、角速度、转子角位置、摩擦系数和电机转动惯量; $N_m$ 为主绕组匝数; $N_s$ 为悬浮力绕组匝数; $i_m$ 为主绕组电流分量; $i_{s1}$ 、 $i_{s2}$ 为悬浮绕组电流分量; $K_t$ 为转矩系数。

根据式(1)、式(2)引入输出偏差反馈<sup>[11]</sup>可得:

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = -\frac{D}{J}\hat{\omega} + \frac{\hat{T}_e - T_L}{J} + k_\omega \text{sgn}(e_f) \quad (4)$$

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = \hat{\omega} + k_\theta \text{sgn}(e_f) \quad (5)$$

$$e_f = K_t[2N_m^2(\hat{i}_m - i_m) + N_s^2(\hat{i}_{s1} - i_{s1}) + N_s^2(\hat{i}_{s2} - i_{s2})] \quad (6)$$

式(4)-式(6)中:上方加“ $\hat{\phantom{x}}$ ”的量为对应量的估计值; $k_\omega \text{sgn}(e_f)$ 和 $k_\theta \text{sgn}(e_f)$ 为引入的误差修正部分; $k_\omega$ 、 $k_\theta$ 分别是转速偏差和转子位置角误差的修正系数。调节系数到合适的范围,可使状态偏差方程趋于稳定。

如上所述,定义系统的估计偏差为滑模面:

$$s_1 = e_\omega = \omega - \hat{\omega} \quad (7)$$

$$s_2 = e_\theta = \theta - \hat{\theta} \quad (8)$$

对式(7)和式(8)两边求导可得:

$$\dot{s}_1 = \frac{d\omega}{dt} - \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \frac{D}{J}(\hat{\omega} - \omega) + \frac{T_e - \hat{T}_e}{J} - k_\omega \text{sgn}(e_f) \quad (9)$$

$$\dot{s}_2 = \frac{d\theta}{dt} - \frac{d\hat{\theta}}{dt} = s_1 - k_\theta \text{sgn}(e_f) \quad (10)$$

由于瞬时负载扰动难以直接测量,一般视作扰动项,且当 $k_\omega$ 取足够大的值时,电磁转矩误差项 $\frac{T_e - \hat{T}_e}{J}$ 和摩擦

力项 $\frac{D}{J}(\hat{\omega} - \omega)$ 也可忽略不计,于是式(9)可简化为:

$$\dot{s}_1 = -k_\omega \text{sgn}(e_f) \quad (11)$$

综上所述,整理可构建滑模观测器模型为:

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = k_\omega \text{sgn}(e_f) \quad (12)$$

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = \hat{\omega} + k_\theta \text{sgn}(e_f) \quad (13)$$

对式(12)和式(13)分别积分则得到电机估算转速及转子位置角。

要使得滑模观测器稳定运行,须满足李雅普诺夫稳定性定理<sup>[12]</sup>,当系统到达滑模面时,有

$$\dot{V}_1 = s_1 \cdot \dot{s}_1 = s_1 [-k_\omega \operatorname{sgn}(e_f)] \quad (14)$$

$$\dot{V}_2 = s_2 \cdot \dot{s}_2 = s_2 [s_1 - k_\theta \operatorname{sgn}(e_f)] \quad (15)$$

当  $s_2 > 0$  时,即  $\theta > \hat{\theta}$ ,假设当前转子位置处于电感上升区域,此时定转子齿极偏离角为负,由 BSRM 电机数学模型<sup>[8]</sup>可知,  $K_i$  符号为正,  $L > \hat{L}$ ,又因  $\psi = Li$ ,  $i < \hat{i}$ ,代入式(6)得  $e_f < 0$ ,  $\operatorname{sgn}(e_f) = -1$ ,因此只要满足  $k_\theta > s_1$ ,则  $\dot{V}_2 < 0$ ;当  $s_2 < 0$  时,同理分析可得相同结论。故当  $k_\theta > \max(s_1)$  时,总有  $\dot{V}_2 < 0$ 。

根据式(10)和式(14)可得:

$$\dot{V}_1 = s_1 \cdot \dot{s}_1 = s_1 [-k_\omega \operatorname{sgn}(e_f)] = [s_2 + k_\theta \operatorname{sgn}(e_f)] [-k_\omega \operatorname{sgn}(e_f)] \quad (16)$$

当系统进入滑模面时,可近似认为  $s_2$  为 0,则有

$$\dot{V}_1 = s_1 \cdot \dot{s}_1 = -k_\omega k_\theta \operatorname{sgn}^2(e_f) \quad (17)$$

即满足  $k_\omega k_\theta > 0$ ,总有  $\dot{V}_1 < 0$ 。

综上所述,选取合适的  $k_\omega$  和  $k_\theta$  的值,可满足系统的稳定运行。

## 2.2 系统仿真分析

根据前文所述滑模观测器间接检测系统,在 Matlab/Simulink 中搭建 SMO 仿真模型,电机样机参数  $N_m = 20$  匝,  $N_s = 15$  匝,期望转速设定 500 r/min,转子初始位置有偏心:  $x = 0.4$  mm,  $y = -0.4$  mm,设置期望转子位置  $x^* = y^* = 0$  mm,转子质量  $m = 4.31$  kg,转动惯量  $J$  取  $1.738 \times 10^{-3}$  kg·m<sup>2</sup>,负载转矩  $T_L = 1$  N·m,采用主绕组关断角可调节瞬时转矩瞬时悬浮力控制策略,各绕组估算电流由磁链除以电感值获得,滑模观测器系统模型如图 3 所示。

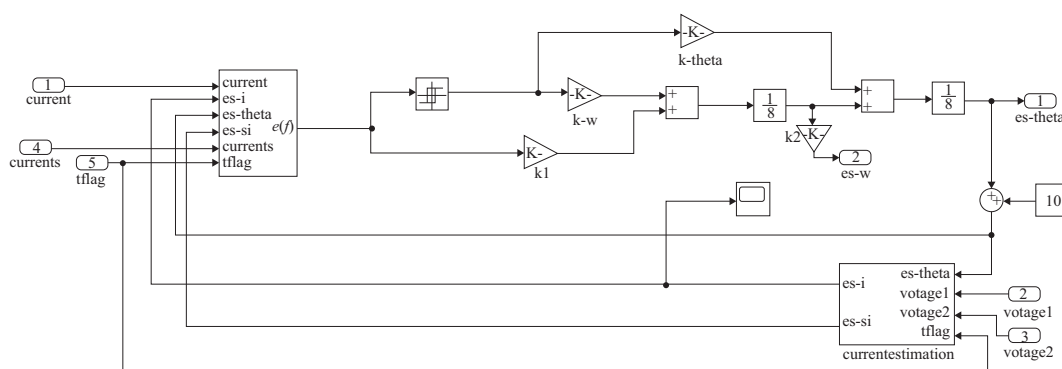


图 3 滑模观测器仿真模型

图 4、图 5、图 6 为滑模观测器估算转速与转速误差,并选取局部进行放大。图 7 将估算转子位置角与实际转子位置进行对比,从图中可看到估计转速可在短暂时间内收敛到实际转速,估计位置角和实际位置角在微小误差内浮动。同时为了验证所设计的滑模观测器的鲁棒性,在  $t = 1.5$  s 时,负载转矩由  $1$  N·m 阶跃至  $1.5$  N·m 后在  $1$  s 内又恢复原样。从图 8、图 9 中可以看出,在负载转矩突变后转速和位置角会有微小变化,但最终都会收敛至原先的稳定状态。图 10、图 11 为期望转速在  $t = 1.5$  s 时由  $500$  r/min 变为  $650$  r/min 时的仿真图,可以看到估计转速在变化后的短暂时间内会跟随至实际转速,估计转角也在转速增加后有一个折线上升并趋于稳定的过程,与实际电机运行状态相一致。

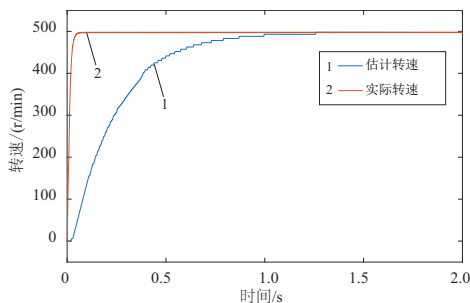


图 4 实际转速与估计转速对比

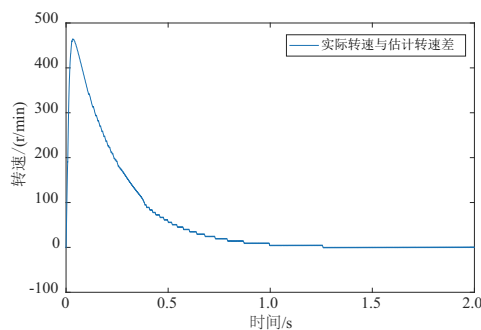


图 5 实际与估算转速差

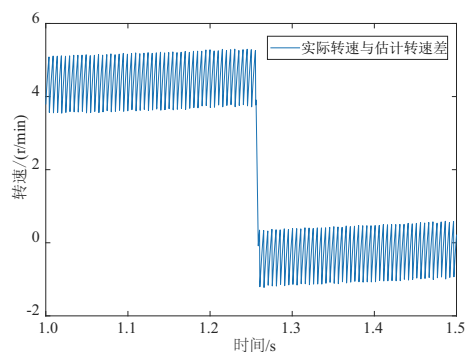


图 6 转速差局部放大图

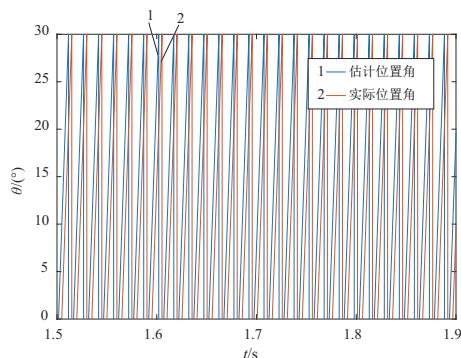


图7 实际位置角与估计位置角对比

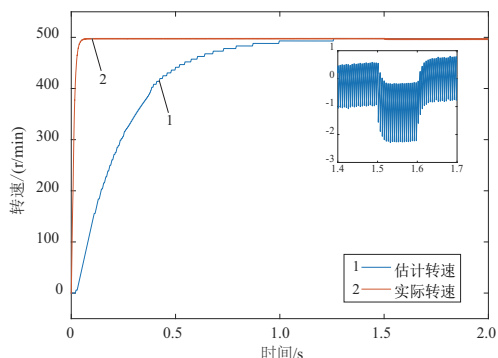


图8 负载转矩突变转速对比及转速差局部放大图

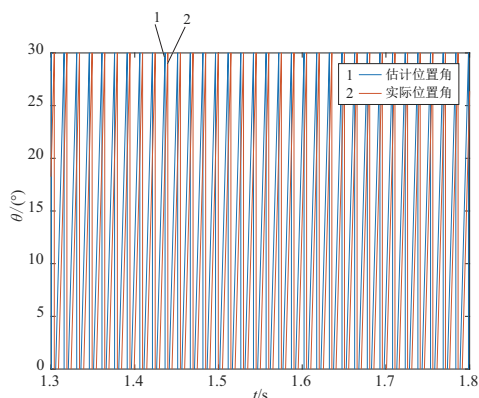


图9 负载转矩突变位置角对比图

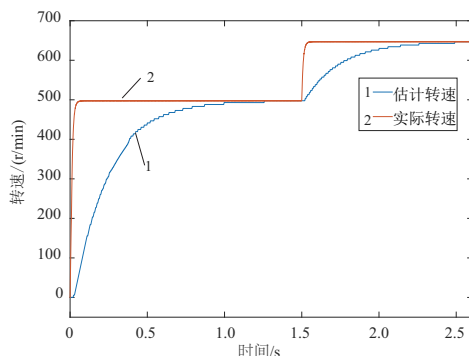


图10 期望转速改变情况下转速对比

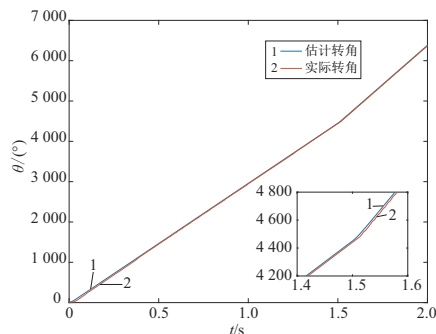


图11 期望转速改变情况下转角对比及局部放大图

### 3 结语

本文以 12/8 凸极双绕组 BSRM 为例,针对传统机械式位置传感器高成本、结构复杂等缺点,采用滑模观测器来间接观测转子转速和转子位置,并基于 Matlab/Simulink 搭建仿真模型进行仿真验证,结果表明所提出的控制方法可有效实现转子位置估算和转速辨识,且系统具有良好的跟随性和鲁棒性,为后续研究打下基础。

#### 参考文献:

- [1] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2014.
- [2] BATEMAN C J, MECROW B C, CLOTHIER A C, et al. Sensorless operation of an ultra-high-speed switched reluctance machine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2329-2337.
- [3] 郑洪涛, 蒋静坪, 徐德鸿, 等. 开关磁阻电动机无位置传感器能量优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 153-157.
- [4] 邱亦慧, 詹琼华, 马志源, 等. 基于简化磁链法的开关磁阻电机间接位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 59-62, 120.
- [5] 孙玉坤, 吴建兵, 项倩雯. 基于有限元法的磁悬浮开关磁阻电机数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 33-40.
- [6] NIAN H, HE Y K, HUANG L, et al. Sensorless operation of an inset PM bearingless motor implemented by the combination approach of MRAS and HF signal injection[C]//2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China: IEEE, 2006: 8163-8167.
- [7] LYONS J P, MACMINN S R, PRESTON M A. Flux-current methods for SRM rotor position estimation[C]//Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Dearborn, MI, USA: IEEE, 1991: 482-487.
- [8] 许波, 朱焜秋, 姬伟, 等. 无轴承永磁同步电机无速度传感器控制系统[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(5): 18-22.
- [9] 陈凌, 王宏华, 谭超. 基于麦克斯韦应力法的双绕组无轴承开关磁阻电机新型数学模型[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(11): 9-18.
- [10] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [11] 唐广雪, 朱学忠, 张磊. 基于 SMO 的开关磁阻电机无位置传感器控制仿真研究[J]. 机电工程, 2016, 33(3): 303-307.
- [12] 辛凯. 开关磁阻电机滑模观测器间接位置检测的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.

收稿日期: 2020-08-27