

基于新型滑模观测器的永磁同步电机 无传感器控制

胡锦涛, 邵宜祥, 周百灵, 李伟祚, 卫楚奇

[南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106]

摘要: 滑模观测器(SMO)的高鲁棒性使其在永磁同步电机(PMSM)无传感器控制系统中成为了研究热点之一。针对传统SMO的计算量大及自身存在的高频抖振现象,主要研究了PMSM无传感器中高速控制过程,设计了一种新型SMO,将边界层和锁相环(PLL)技术共同应用于SMO中,理论分析并建立PMSM的SMO数学模型后,对PLL的设计进行了严格的推导,验证其获得转子位置的精确性。最后,对整体设计方案进行了全面的仿真和试验,结果表明新型SMO对高频抖振的抑制效果显著,且具有更高的精确性和更强的鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机; 滑模观测器; 高频抖振; 无传感器; 边界层; 锁相环

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0017-05

doi: 10.12177/emca.2020.040

Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Novel Sliding Mode Observer

HU Jintao, SHAO Yixiang, ZHOU Bailing, LI Weizuo, WEI Chuqi

[NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China]

Abstract: In the sensorless control system of permanent magnet synchronous motors (PMSMs), the high robustness of the sliding mode observer has been a research hotspot. To solve the problems of large amounts of calculation of the traditional sliding mode observer (SMO) and its high-frequency chattering, a new SMO for the medium and high speed sensorless control process of PMSM is designed. The boundary layer and phase-locked loop (PLL) technology are applied in SMO, and the mathematical model of SMO is built. The design of PLL is strictly deduced, and the precision of rotor position is reasonably verified. Finally, the design is implemented by simulation and experiment. The results show that the proposed new SMO has good suppression of high-frequency chattering. Simultaneously, the precision and robustness of the new SMO are higher.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); sliding mode observer (SMO); high-frequency chattering; sensorless; boundary layer; phase-locked loop (PLL)

0 引言

电机驱动系统作为电动汽车的核心环节^[1],调速的关键在于转速的检测。永磁电机作为电动汽车领域的优势电机,在实现高性能控制过程中,通常在电机轴上安装机械传感器来获得转子位置

和速度信号。考虑到电动汽车驱动电机的尺寸和恶劣的环境条件,在实际应用过程中会降低控制的可靠性和精确性。为了解决该问题,无传感器控制技术已经成为国内外学者的研究热点之一。文献[2]提出一种带有正交锁相环(PLL)的ADALINE滤波器,利用补偿转子估算误差的方法

收稿日期: 2020-03-18; 收到修改稿日期: 2020-04-18

作者简介: 胡锦涛(1995—),男,硕士,研究方向为电力系统及其自动化,新能源发电与并网技术。

提高了无传感器控制的估算精度。文献[3]利用扩展滑模动态方程将模型参考自适应(MRAS)与滑模控制有效结合,削弱了传统滑模观测器(SMO)中的抖振,且估计精度较高。文献[4]利用高频注入法获取转子位置实现对永磁同步电机(PMSM)的无传感器控制,系统静态性能良好。文献[5]将自适应同步滤波器与正交PLL结合后设计了一种新型SMO,提高了观测精度且电机的参数鲁棒性强。文献[6]利用反电动势修正法来消除位置估计误差,计算量较小且误差收敛。文献[7]设计一种基于参数自适应的二阶SMO,且采用饱和函数代替了传统一阶SMO中的开关函数,有效抑制了滑模抖振且稳态性能良好。文献[8]提出一种基于准谐振型趋近律的改进算法并应用于SMO中,有效降低了估算位置中存在的脉动分量。文献[9]针对传统SMO存在的抖振问题,将模糊规则应用于超螺旋SMO中,利用高阶滑模结构保证输出连续的同时,也解决了超螺旋算法中边界函数上界的实际取值问题,系统抖振现象得到了明显减弱。文献[10]采用双曲正切函数代替开关函数的思想获得了转速及位置信号,有效抑制了抖振,提高了估算精度及动态性能。文献[11]设计了一种基于分段指数型函数的新型SMO并进行稳定性分析,明显减弱了系统抖振,抑制了转矩脉动,且鲁棒性强。本文针对传统SMO在PMSM无传感器中高速控制过程中存在的计算量大及高频抖振现象,提出一种新型SMO设计方案,将边界层和PLL^[12]共同引入到控制系统中,以完成对抖振的抑制。

1 PMSM SMO 模型

1.1 数学模型

PMSM在两相静止坐标系下的数学模型如下:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i_α 、 i_β 、 u_α 、 u_β 分别为定子电流和电压的 α 、 β 轴分量; $A = \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} -R & -(L_d-L_q)\omega \\ (L_d-L_q)\omega & -R \end{bmatrix}$; L_d 、 L_q 为电感的 d 、 q 轴分量; R 为定子电阻; E_α 、 E_β 为电机扩展反电动势的 α 、 β 轴分量。

通过SMO观测反电动势时,根据电机模型和滑模变结构控制理论,可设计相应的定子电流SMO:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: v_α 、 v_β 为开关信号,包含了反电动势的信息,可通过滤波得到电机的反电动势; k 为滑模增益;“ $\hat{\cdot}$ ”表示相应变量的估计值。

传统SMO原理框图如图1所示。图1中 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\omega}$ 分别为转子位置角和转速的估算值。

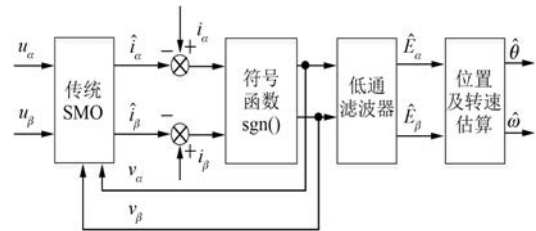


图1 传统SMO原理框图

通过图1滤波处理得到的反电动势估计分量会引发相位延迟,直接影响了转子位置的估算准确性。采用相角补偿后,可得转子位置和转速的估算值:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{eq} = -\arctan(\hat{E}_\alpha / \hat{E}_\beta) \\ \hat{\theta}_e = \hat{\theta}_{eq} + \arctan(\hat{\omega} / \omega_c) \\ \hat{\omega} = \sqrt{\hat{E}_\alpha^2 + \hat{E}_\beta^2} / \psi_f \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{\theta}_{eq}$ 和 $\hat{\theta}_e$ 分别为估算转子位置角过程中的等效值和补偿后的值; ω_c 为低通滤波器的截止频率。

1.2 存在问题

传统SMO利用反正切的思想估计转速及转子位置,计算量大,且属于开环方法,抗干扰能力弱。此外,在滑模变结构系统中,由于惯性原因,控制函数会出现时间延迟和空间滞后的现象,使得SMO观测到的等效反电动势值含有高频分量,估计值存在着抖振问题,这影响了传统SMO在高精度场合下的应用,而低通滤波后的角度补偿也影响了实际应用中的观测精度。

2 新型 SMO 设计

针对传统 SMO 在估计过程中存在的计算量大、抗干扰能力弱以及自身存在抖振问题,本文做以下设计。

2.1 边界层设计

本文利用边界层中的邻域思想,构造了一种近似滑动模态,使邻域内的状态点均被吸引到滑模面的边界层上,设计了饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 作为边界层:

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} k_1, & x > \delta \\ k_1 x / \delta, & -\delta \leq x \leq \delta \\ -k_1, & x < -\delta \end{cases} \quad (5)$$

式中: x 为实际值与估计值的误差; δ 为边界层厚度; k_1 为正的饱和函数边界值。

饱和函数特性曲线如图 2 所示。可以看出,在边界层以外,函数具有使误差饱和的特性,边界层内进行连续控制,线性函数拟合系统的变结构变化,边界层外进行切换控制,以此来削弱滑模面上的抖振,使得反电动势估计值更加稳定。

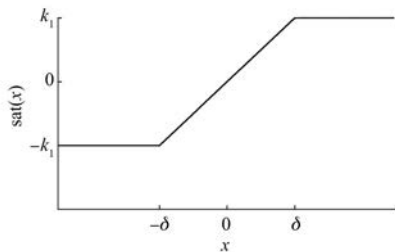


图 2 饱和函数特性曲线

2.2 PLL 设计

PLL 技术是一种自适应闭环系统,具备优良的实时跟踪和估算实际转子位置信息的能力,能够适应谐波较大、电压相角不平衡等因素的影响。本文将 PLL 引入系统中,定义 $\Delta\theta = \hat{\theta} - \theta$ 为 PLL 的估计误差。由于中性点隔离,不考虑零序分量,将反电动势的观测值变换到同步旋转坐标系下后,可得 d - q 坐标系下的电压方程为

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \sin(\hat{\theta} - \theta) \\ u \cos(\hat{\theta} - \theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: U_d 、 U_q 为定子电压的 d 、 q 轴分量; u 为定子绕组机端电压的幅值。

当估计值跟踪上实际位置时,误差 $\Delta\theta$ 为零。可得转子速度的估计值为 $\hat{\omega} = U_q / \psi_f$ 。PLL 转子位置检测等效原理图如图 3 所示。图 3 中, Δe 为电机反电动势估计值的误差量。

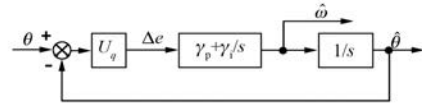


图 3 PLL 转子位置检测等效原理图

由图 3 可得 PLL 系统的闭环传递函数为:

$$G(s) = \frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{U_q \gamma_p s + U_q \gamma_i}{s^2 + U_q \gamma_p s + U_q \gamma_i} \quad (7)$$

式中: γ_p 和 γ_i 分别为 IP 调节器的比例系数与积分系数。

在 MATLAB 中作出 $G(s)$ 的波特图,如图 4 所示。由图 4 可知,PLL 系统具有低通滤波的特性,当频率低于约 190 Hz 时,PLL 系统能够对高频分量有效滤除且有较高估计精度,满足了电机系统在实际应用中的要求。

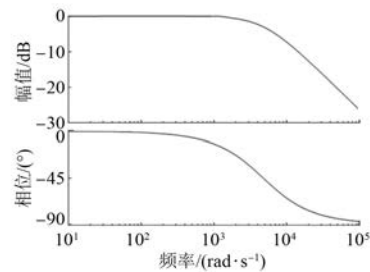


图 4 PLL 系统闭环传递函数波特图

当转速稳定时,转子位置信号为斜坡函数,则 PLL 系统的稳态误差为

$$\Delta e_{ss}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta e(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{s^2 + U_q \gamma_p s + U_q \gamma_i} = 0 \quad (8)$$

稳态误差为零,说明转子位置信息可以准确地从 PLL 中获得。设闭环系统的期望带宽为 w_n ,可设计 PLL 中 PI 调节器的参数如下:

$$\begin{cases} \gamma_p = \frac{U_q}{\sqrt{2} w_n} \\ \gamma_i = \frac{w_n^2}{U_q} \end{cases} \quad (9)$$

综上所述,将边界层与 PLL 引入 PMSM 无传感器控制系统后,将反电动势的估计值作为 PLL

的输入,采用 $i_d = 0$ 的控制策略,整体设计框图如图 5 所示。图 5 中, n_{ref} 为转速参考值; \hat{E}_d 、 \hat{E}_q 为扩展反电动势估计值的 d 、 q 轴分量; ω_m 为机械角速度; n_p 为极对数; “*”表示参考值。

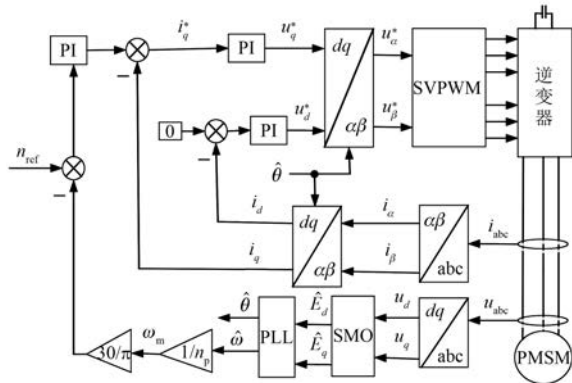


图 5 基于新型 SMO 的无传感器控制框图

3 仿真与试验

根据设计框图,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建基于新型 SMO 的 PMSM 无传感器控制仿真模型,电机仿真参数如表 1 所示。

表 1 电机仿真参数表

参数名称	参数值
d 轴电感/mH	1.56
q 轴电感/mH	1.56
定子电阻/ Ω	0.013
极对数	3
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.000 75

采用永磁电机矢量控制,仿真条件为,直流侧电压 $U_{dc} = 311 \text{ V}$,脉宽调制 (PWM) 开关频率为 10 kHz ,给定转速为 $1\ 200 \text{ r/min}$,先空载起动,主要观察传统和新型观测器模型中转速、转子位置的估计差异。最后对系统的动态性能测试,验证了新型 SMO 的鲁棒性。

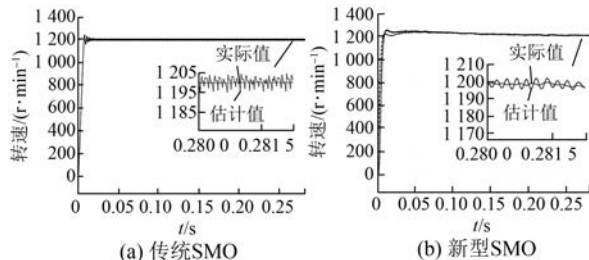


图 6 转速估计值与实际值的变化曲线

图 6 为传统 SMO 与新型 SMO 对应的电机转速估算值与实际值的变化曲线及对应的局部放大大图。可以看出,新型 SMO 的高频部分减弱,抖动较小,曲线更加平滑。

图 7 为 2 种观测器对应的转子实际位置和估算位置的跟踪曲线(稳态放大图),可以看出,传统 SMO 应用过程中依然存在明显延迟现象,且存在较大抖振;而新型 SMO 的跟踪性能更好、延迟小、抖振小、精度较高。

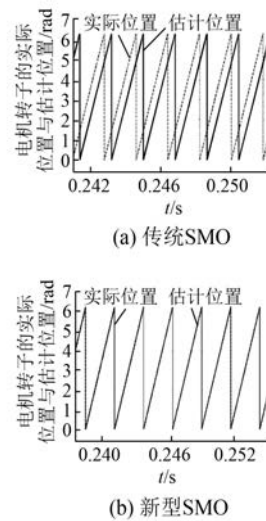


图 7 转子位置估计值与实际值的变化曲线

对系统做鲁棒性测试,0.15 s 时突加负载 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$,2 种观测器的转速及三相电流变化的波形如图 8 和图 9 所示。可以看出,新型 SMO 面对负载的变化,响应较为平稳,恢复更快,鲁棒性更强。

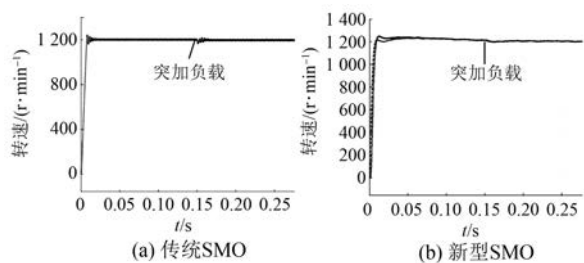


图 8 突加负载时转速变化曲线

图 10 为基于传统 SMO 和新型 SMO 的 2 kW PMSM 无传感器控制系统的转速误差、转子位置估计情况的试验波形,硬件参数和仿真参数一致。可以看出,新型 SMO 能够有效抑制抖振,转速和转子

位置的估计值满足工程要求,鲁棒性也比较强。

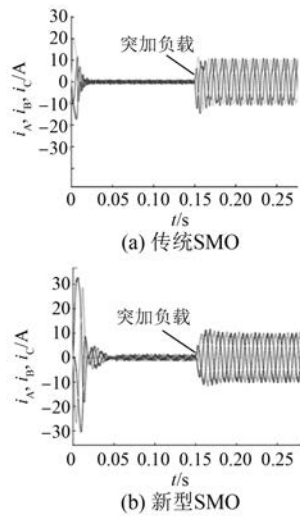


图9 突加负载时三相电流变化曲线

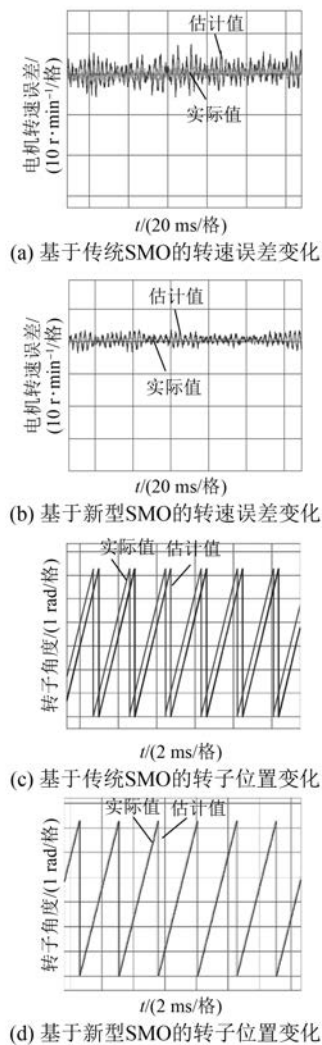


图10 试验波形

4 结 语

本文设计了一种新型SMO,针对传统SMO在PMSM无传感器控制的高速控制过程中存在的计算量大和抖振问题,研究出了一种基于边界层和PLL技术结合的抖振抑制方法,理论分析边界层和PLL的设计原理并给出了严格推导及验证。通过对设计方案进行仿真和试验,结果表明新型SMO改善了传统SMO存在的抖振问题,电机转速和转子位置的估计精度高、计算量小,且对外部干扰有很强的鲁棒性。

【参考文献】

- [1] 潘峰,秦国锋,王淳标,等.电动汽车用永磁同步电机模型预测MRAS无速度传感器控制[J].电机与控制应用,2019,46(10): 104.
- [2] ZHANG G, WANG G, XU D, et al. ADALINE-network-based PLL for position sensorless interior permanent magnet synchronous motor drives[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1450.
- [3] 李冉,赵光宙,徐绍娟.基于扩展滑模观测器的永磁同步电动机无传感器控制[J].电工技术学报, 2012,27(3): 79.
- [4] LUO X, TANG Q, SHEN A, et al. PMSM sensorless control by injecting HF pulsating carrier signal into estimated fixed-frequency rotating reference frame[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016,63(4): 2294.
- [5] 陈勇,高玉文,陈章勇.一种自适应同步滤波器和正交锁相环相结合的滑模观测器[J].电工技术学报,2018,33(2): 265.
- [6] 徐晨栋,尹泉,罗慧,等.永磁同步电机无位置估计误差的滑模观测器无速度传感器控制方法[J].电机与控制应用,2019,46(12): 1.
- [7] 王旭东,杨传江.基于参数自适应二阶滑模观测器的PMSM控制[J].电力电子技术,2019,53(10): 48.
- [8] 廖勇,莫家宝,燕罗成.改进型滑模观测器的PMSM无位置传感器控制[J].微特电机,2020,48(3): 6.
- [9] 陶彩霞,赵凯旋,牛青.考虑滑模抖振的永磁同步电机模糊超螺旋滑模观测器[J].电力系统保护与控制,2019,47(23): 11.
- [10] 张海刚,胡添添,王步来,等.一种改进的PMSM滑模变结构控制策略研究[J].电气传动, 2019, 49(10): 13.

(下转第37页)