

基于自适应模糊滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制

彭思齐[†], 宋彦彦

(湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 针对传统滑模观测器(SMO)存在的抖振及相位延迟问题,提出一种自适应模糊滑模观测器来实现永磁同步电机(PMSM)无传感器控制. 根据Lyapunov稳定性定理构建自适应模糊滑模观测器,以保证系统的稳定性. 通过分析滑模增益对系统抖振的影响设计模糊控制系统,从而实现对滑模增益的动态调整,削弱抖振现象,提高系统的鲁棒性. 建立反电动势观测器代替低通滤波器,避免相位延迟,从而提高系统的稳定性及准确跟踪性. 仿真结果验证了所提出方法的可行性.

关键词: 永磁同步电机; 无传感器; 滑模观测器; 模糊控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Sensorless vector control of PMSM based on adaptive fuzzy sliding mode observer

PENG Si-qi[†], SONG Yan-yan

(College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: To solve the problem of chattering and phase delay in traditional sliding mode observer(SMO), an adaptive fuzzy sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor(PMSM) is proposed. According to the Lyapunov stability theorem, an adaptive fuzzy sliding mode observer is constructed to guarantee the stability of the system. A fuzzy control system is designed by analyzing the influence of sliding mode gain on the chattering of the system. The fuzzy control system can adjust the gain of the sliding mode dynamically, weaken the chattering phenomenon and improve the robustness of the system. The back electromotive force(EMF) observer is established to replace the low-pass filter to avoid the phase delay. At the same time, the stability and accurate tracking of the system can be improved. The simulation results show the feasibility of the proposed method.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; sensorless; sliding mode observer; fuzzy control

0 引言

永磁同步电机由于具有高转矩比、高效率以及高功率密度等特点,已被广泛应用于高性能调速系统中^[1-2]. 目前,矢量控制是永磁同步电机高性能控制中应用最成熟、最广泛的一种控制. 工程中常常通过安装传感器获得电机转子速度及位置的准确信息,这不仅增大了系统的体积和成本,而且降低了系统的可靠性. 永磁同步电机无传感器控制技术研究已经成为解决控制系统中由传感器给电机控制系统带来的各种问题的关键,该技术已成为电机控制领域的研究热点^[3-5].

目前常用的无传感器控制方法主要分为两类^[6]: 一类是利用电机凸极效应的高频信号法,但是此类方

法对电机结构要求较高,且只适用于电机低速及零速范围;另一类是利用反电动势或定子磁链估算转速及位置信息,适用于中高速范围,主要包括模型参考自适应法、扩展卡尔曼滤波器法、滑模观测器法、人工智能等方法^[7-12]. 近年来,滑模观测器因其具有计算简单、鲁棒性好、容易实现等特点而备受人们欢迎. 文献[13]将Sigmoid函数代替符号函数来估计反电动势,有效减小了系统抖振;文献[14]提出了一种改进的反电动势观测器,通过引入双曲正弦函数减少系统抖振,获得平滑的反电动势估计值;文献[15]设计了一款基于两级滤波的滑模观测器,用来对电机的转子位置和速度进行估算,提高了滑模观测器算法的正确性;文献[16]为了更有效地估计转速和位置信息,构

收稿日期: 2017-01-14; 修回日期: 2016-04-10.

责任编辑: 刘向杰.

作者简介: 彭思齐(1978—),男,副教授,博士,从事工业智能控制、数控技术及装备信息化等研究;宋彦彦(1990—),女,硕士生,从事电力电子与电力传动的研究.

[†]通讯作者. E-mail: 973556383@qq.com

造了新的级联式滑模观测器,解决了传统滑模观测器采用低通滤波器产生的相位延迟问题;文献[17]针对传统滑模观测器在低速检测时产生的抖振问题,提出了一种通过模糊控制来调节滑模观测器的滑模增益方法,实现了低速抖振抑制,增大了控制永磁同步电机速度的适用范围。

本文将滑模观测器系统与模糊控制系统相结合,提出一种自适应模糊滑模观测器的控制方法。构建滑模观测器,通过模糊控制系统自动调整观测器的滑模增益,减少动态响应时间并削弱其抖振现象。利用Lyapunov稳定性理论进行论证分析并估算出反电动势,同时为了避免由低通滤波器产生的相位延迟,建立反电动势观测器,实现对转速及位置信息的估计。最后通过仿真实验验证所提出方法的稳定性、快速响应性及鲁棒性。

1 自适应模糊滑模观测器

1.1 永磁同步电机的数学模型

表面式PMSM在静止两相坐标系 $\alpha\beta$ 下的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s}i_\alpha + \frac{1}{L_s}(u_\alpha - e_\alpha), \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s}i_\beta + \frac{1}{L_s}(u_\beta - e_\beta), \\ e_\alpha = -\psi_f\omega_r \sin\theta, \\ e_\beta = \psi_f\omega_r \cos\theta. \end{cases} \quad (1)$$

其中: i_α 、 i_β 和 u_α 、 u_β 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系上的定子电流和定子电压, e_α 、 e_β 为 $\alpha\beta$ 坐标系上的反电动势, R 和 L_s 分别为定子电阻和定子电感, ψ_f 为永磁体磁链, ω_r 为转子电角速度, θ 为转子位置角。

1.2 自适应模糊滑模观测器设计

基于滑模变结构选取滑模面为

$$s = [s_\alpha \ s_\beta] = [\hat{i}_\alpha - i_\alpha \ \hat{i}_\beta - i_\beta]. \quad (2)$$

其中: s_α 、 s_β 为定子电流误差, \hat{i}_α 、 \hat{i}_β 为定子电流的估计值, i_α 、 i_β 为定子电流实际值。传统滑模观测器一般采用 $\text{sign}(x)$ 函数作为切换函数,为了减少抖振现象,本文采用光滑连续的Sigmoid函数,该Sigmoid函数为

$$F(x) = \left(\frac{2}{1 + e^{-ax}} \right) - 1. \quad (3)$$

根据永磁同步电机的数学模型构建自适应模糊滑模观测器如下:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}[u_\alpha - K_{sw}F(s_\alpha)], \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s}[u_\beta - K_{sw}F(s_\beta)]. \end{cases} \quad (4)$$

其中: K_{sw} 为滑模增益。 K_{sw} 根据模糊控制系统进行动态调整。

将式(4)减去(1)得到的电流误差方程为

$$\begin{cases} \frac{ds_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s}s_\alpha + \frac{1}{L_s}e_\alpha - \frac{1}{L_s}K_{sw}F(s_\alpha), \\ \frac{ds_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s}s_\beta + \frac{1}{L_s}e_\beta - \frac{1}{L_s}K_{sw}F(s_\beta). \end{cases} \quad (5)$$

为了使滑动模态存在且稳定,构造Lyapunov函数为

$$V = s^T s / 2, \quad (6)$$

则自适应模糊滑模观测器的稳定性条件为

$$\dot{V} = s^T \dot{s} \leq 0, \quad (7)$$

稳定性条件可表示为

$$\begin{aligned} \dot{V} = s^T \dot{s} = s_\alpha \dot{s}_\alpha + s_\beta \dot{s}_\beta = \\ \frac{1}{L_s}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)[e_\alpha - K_{sw}F(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)] + \\ \frac{1}{L_s}(\hat{i}_\beta - i_\beta)[e_\beta - K_{sw}F(\hat{i}_\beta - i_\beta)] - \\ \frac{R}{L_s}[(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)^2 + (\hat{i}_\beta - i_\beta)^2]. \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中 $-\frac{R}{L_s}[(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)^2 + (\hat{i}_\beta - i_\beta)^2]$ 恒成立,因此 K_{sw} 需满足条件

$$K_{sw} > \max(|e_\alpha|, |e_\beta|). \quad (9)$$

因此,为保证自适应滑模观测器的稳定性,只需经模糊处理得到的滑模增益 K_{sw} 的值大于反电动势的最大幅值即可。一旦系统达到滑模面,则

$$\dot{s} = s = 0. \quad (10)$$

基于等效控制法,将式(10)代入(5)可得

$$e_\alpha = K_{sw}F(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), \quad e_\beta = K_{sw}F(\hat{i}_\beta - i_\beta). \quad (11)$$

1.3 滑模增益设计

传统的滑模观测器中的滑模增益值往往都是根据经验给定的常数,但实际系统中电流的观测误差是时变的,固定的常数有可能会增大抖振。本文采用模糊规则,根据滑模到达条件对滑模增益进行有效的估计,并利用滑模增益消除干扰项,从而消除抖振。自适应模糊滑模观测器原理如图1所示。

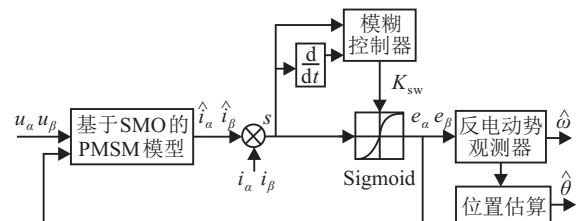


图1 自适应模糊滑模观测器原理

模糊控制系统的输入变量为 s 和 \dot{s} ,输出变量为 K_{sw} 。如果 $s\dot{s} > 0$,则 K_{sw} 应增大;如果 $s\dot{s} < 0$,则 K_{sw}

应减小. 定义输入输出变量的论域均为 $\{-3, 3\}$, 输入变量的模糊语言为 $\{\text{NB}(\text{负大}), \text{NM}(\text{负中}), \text{Z}(\text{零}), \text{PM}(\text{正中}), \text{PB}(\text{正大})\}$, 输出变量的模糊语言值为 $\{\text{NB}(\text{负大}), \text{NM}(\text{负中}), \text{NS}(\text{负小}), \text{Z}(\text{零}), \text{PS}(\text{正小}), \text{PM}(\text{正中}), \text{PB}(\text{正大})\}$ ^[18]. 在满足不等式 $s\dot{s} < 0$ 的条件下, 设计 K_{sw} , 所获得的控制规则如表1所示.

表1 控制规则

s/\dot{s}	NB	NM	Z	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NM	NS	Z	PS
Z	NM	NS	Z	PS	PM
PM	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB

模糊控制器输入有5个模糊子集, 输出有7个模糊子集, 采用 Mamdani 模糊推理算法和重心法反模糊化进行判决, 则输入输出的隶属函数如图2所示.

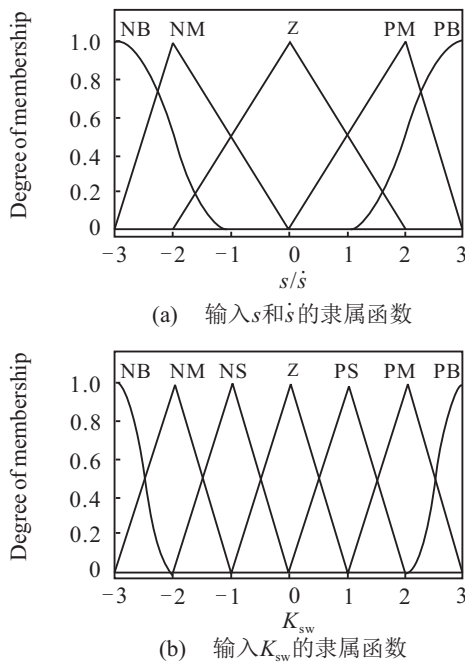


图2 隶属函数

1.4 反电动势观测器设计

由式(11)得到的反电动势中仍含有高频分量, 一般是通过低通滤波器进行滤波, 从而引起相位延迟. 要完全补偿相位延迟, 必须用到实际的角速度信息, 但角速度的估计会有一些误差, 补偿效果达不到最好. 因此, 为避免使用低通滤波器和相位补偿部分, 本文在反电动势模型的基础上, 构造一个观测器提取反电动势信号, 从而估计转子速度和位置信息.

在一个控制周期内, 由于电机的角速度变化较缓慢, 可假设 $d\omega_r/dt = 0$, 由式(1)可得反电动势模型

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} e_\alpha = -\omega_r e_\beta, \\ \frac{d}{dt} e_\beta = \omega_r e_\alpha. \end{cases} \quad (12)$$

根据上式构造反电动势观测器

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{e}_\alpha = -\hat{\omega}_r \hat{e}_\beta - l(\hat{e}_\alpha - e_\alpha), \\ \frac{d}{dt} \hat{e}_\beta = \hat{\omega}_r \hat{e}_\alpha - l(\hat{e}_\beta - e_\beta), \\ \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r = (\hat{e}_\alpha - e_\alpha) \hat{e}_\beta - (\hat{e}_\beta - e_\beta) \hat{e}_\alpha. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\hat{e}_\alpha, \hat{e}_\beta$ 为反电动势估计值; $\hat{\omega}_r$ 为电机角速度估计值; l 为观测器增益, 其值远远大于0.

根据式(12)和(13)求得反电动势误差方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \bar{e}_\alpha = -\bar{\omega}_r \bar{e}_\beta - \omega_r \bar{e}_\beta - l \bar{e}_\alpha, \\ \frac{d}{dt} \bar{e}_\beta = \bar{\omega}_r \bar{e}_\alpha + \omega_r \bar{e}_\alpha - l \bar{e}_\beta, \\ \frac{d}{dt} \bar{\omega}_r = \bar{e}_\alpha \bar{e}_\beta - \bar{e}_\beta \bar{e}_\alpha. \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\bar{\omega}_r = \hat{\omega}_r - \omega_r$ 为电机转速误差, $\bar{e}_\alpha = \hat{e}_\alpha - e_\alpha, \bar{e}_\beta = \hat{e}_\beta - e_\beta$ 为反电动势误差.

为了证明式(13)的稳定性, 定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} (\bar{e}_\alpha^2 + \bar{e}_\beta^2 + \bar{\omega}_r^2). \quad (15)$$

对式(15)求导可得

$$\dot{V} = \bar{e}_\alpha \dot{\bar{e}}_\alpha + \bar{e}_\beta \dot{\bar{e}}_\beta + \bar{\omega}_r \dot{\bar{\omega}}_r = -l(\bar{e}_\alpha^2 + \bar{e}_\beta^2) \leq 0. \quad (16)$$

由式(16)可知, 反电动势观测器是稳定的. 利用观测器得到的反电动势可直接计算出转子的位置

$$\hat{\theta} = -\arctan \frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}. \quad (17)$$

2 仿真及结果分析

为了验证以上设计系统的可行性和有效性, 利用 Matlab 仿真软件进行验证. 选取表面式永磁同步电机参数为: 相电压 220 V, 相电阻 2.875 Ω , 直交轴电感 $L_d = L_q = 8.35$ mH, 转动惯量 $J = 0.0008$ kg \cdot m², 转子磁链 $\Psi_r = 0.175$ Wb, 极对数为4. 根据以上设计, 可以构建如图3所示的永磁同步电机无传感器控制系统.

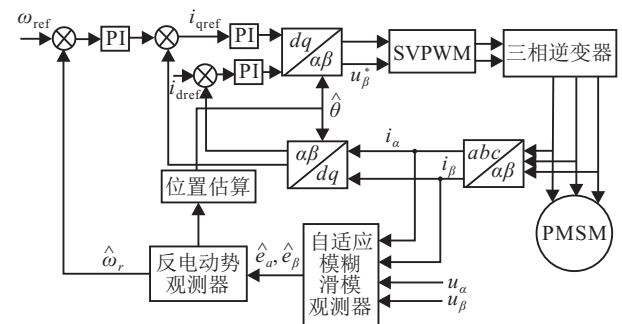
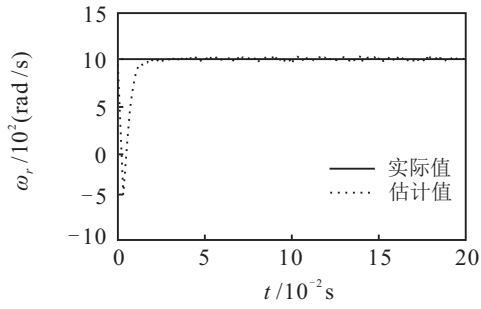
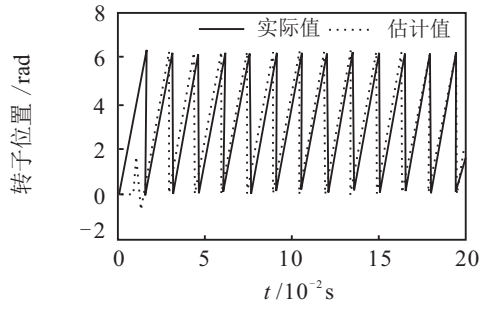


图3 永磁同步电机无传感器控制系统

给定速度值为 1000 rad/s. 为了更好地体现出本文所提方法的优越性, 分别与传统滑模观测器法及文献[5]中所采用的自适应滑模观测器法两种控制方法进行分析比较, 如图4~图6所示.

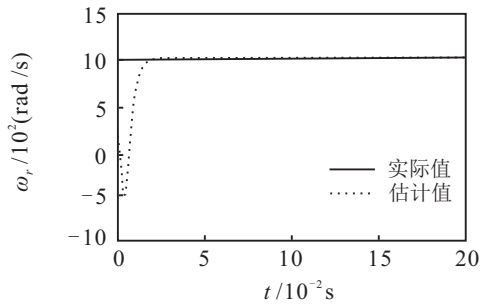


(a) 转速实际值和估计值

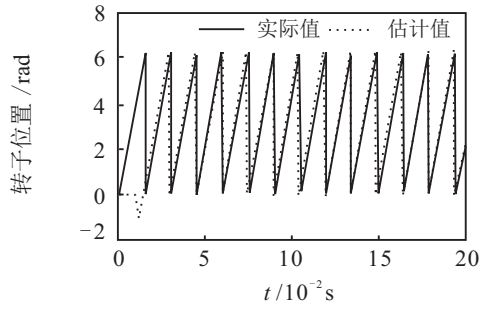


(b) 转子位置的实际值和估计值

图4 传统滑模观测器下的仿真波形



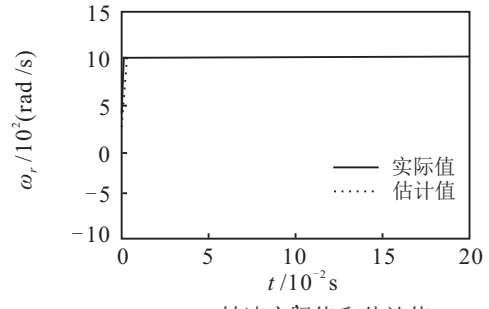
(a) 转速实际值和估计值



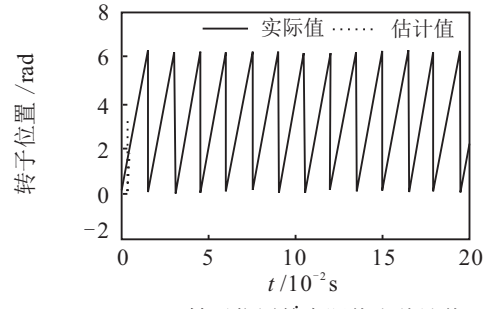
(b) 转子位置的实际值和估计值

图5 自适应滑模观测器下的仿真波形

从转速和转子位置的仿真波形来分析,图4中传统滑模观测器下的转速估计值有明显的抖振现象,转子位置也有相位延迟问题.文献[5]所提方法克服了传统无传感器控制方法对电机的依赖性,具有较强的鲁棒性,仿真波形如图5所示,仿真波形相对光滑,抖振较小,但转子位置存在相位延迟的现象.本文所提方法采用模糊控制,根据系统中电流的观测误差及误差变化率自动调节滑模增益,削弱抖振现象,并利用反电动势构建反电动势滑模观测器来代替低通滤波器,避免了相位延迟的问题,如图6所示.



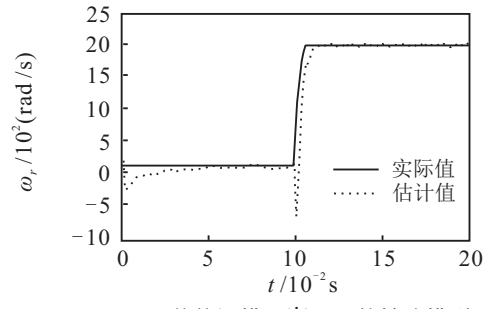
(a) 转速实际值和估计值



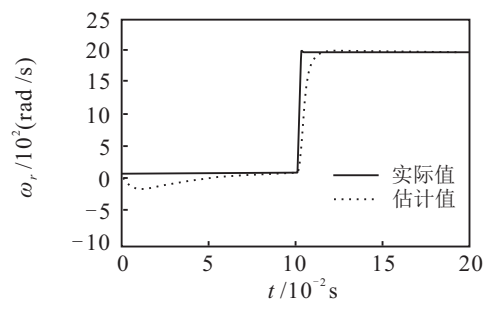
(b) 转子位置的实际值和估计值

图6 本文所提方法下的仿真波形

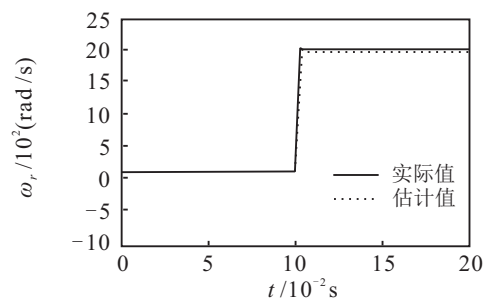
为了更进一步验证该系统的动态性能,下面给出将给定速度由100 rad/s上升为2000 rad/s时的速度仿真波形,如图7所示.



(a) 传统滑模观测器下的转速模型



(b) 自适应滑模观测器下的转速波形



(c) 本文所提方法下的转速波形

图7 转速波形

从图7(a)可以看出:速度为100rad/s时,在传统滑模观测器下得到的转速估计值受高频抖振影响更大,响应速度慢;在速度改变时抖振较大,达到2000rad/s时速度估计值的抖振相对减小了,响应速度变快.图7(b)中仿真波形比较平缓,稳定性强,但在低速或速度改变时系统响应较慢.图7(c)中自适应模糊滑模观测器系统得到的速度仿真波形在低速时抖振很小,速度变化时相对传统滑模观测器效果较好,动态响应快,速度适应范围大,跟踪效果好.

3 结论

本文提出了一种基于自适应模糊滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制方法.该方法将模糊控制与滑模观测器合理地结合,利用模糊控制器动态调节滑模增益,解决了传统方法产生的高频抖振问题,增大了速度适应范围.利用反电动势模型构建反电动势滑模观测器来代替低通滤波器,避免了相位延迟,提高了跟踪效果.最后通过仿真结果验证了所提出方法的稳定性及良好的动态性能.

参考文献(References)

- [1] Qiao Z W, Shi T N, Wang Y D, et al. New sliding-mode observer for position sensorless control of permanent-magnet synchronous Motor[J]. IEEE Trans on Industrial Electronic, 2013, 60(2): 710-719.
- [2] Wang Q L, Zhang X, Zhang C W. Double sliding-mode model reference adaptive system speed identification for vector control of permanent magnet synchronous motors[J]. Proc of the CSEE, 2014, 34(6): 897-902.
- [3] Lee J, Hong J, Nam K, et al. Sensorless Control of surface-mount permanent-magnet synchronous motors based on a nonlinear observer[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(2): 290-297.
- [4] Qi F, Deng Z Q, Qiu Z J, et al. A method of sensorless vector control for PMSM[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2007(10): 30-41.
- [5] Shang Z, Zhao R X, Dou R Z. Research on sensorless control method of PMSM based on an adaptive sliding mode observer[J]. Proc of the CSEE, 2007, 27(3): 23-28.
- [6] Li R, Zhao G Z, Xu S J. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on extended sliding mode observer[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 79-85.
- [7] Agarlita S C, Boldea I, Blaabjerg F. High frequency injection assisted "active-flux" based sensorless vector control of reluctance synchronous motors, with experiments from zero speed[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2012, 48(6): 1931-1939.
- [8] 冯江华,许峻峰.基于定子磁链自适应观测的永磁同步电机直接转矩控制系统[J].中国电机工程学报, 2006, 26(12): 122-127.
(Feng J H, Xu J F. Permanent magnet synchronous machines direct torque control system based on adaptive stator flux observer[J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(12): 122-127.)
- [9] Germano A, Parasiliti F, Tursini M. Sensorless speed control of a PM synchronous motor drive by Kalman filter[C]. Proc of International Conf on Electrical Machines(ICEM '94). Paris: IEEE, 1994: 540-544.
- [10] Lu Q W, Hu Y W, Du X Y, et al. Sensorless vector control using a novel sliding mode observer for PMSM speed control system[J]. Proc of the CSEE, 2010, 30(33): 78-83.
- [11] 孔小兵,刘向杰.永磁同步电机高效非线性模型预测控制[J].自动化学报, 2014, 40(9): 1958-1966.
(Kong X B, Liu X J. Efficient nonlinear model predictive control for permanent magnet synchronous motor[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(9): 1958-1966.)
- [12] Piippo A, Hinkkanen M, Luomi J. Analysis of an adaptive observer for sensorless control of interior permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 570-576.
- [13] Zhu X H, Li Y H, Zhang J. Sensorless control of PMSM based on a novel sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 6-10.
- [14] 史婷娜,肖竹欣,肖有文,等.基于改进型滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2043-2051.
(Shi T N, Xiao Z X, Xiao Y W, et al. A position sensorless control strategy for BLDCM based on an improved sliding mode observer[J]. Proc of the CSEE, 2015, 35(8): 2043-2051.)
- [15] 丁文,梁得亮,罗战强.两级滤波滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J].电机与控制学报, 2012, 16(11): 1-10.
(Ding W, Liang D L, Luo Z Q. Position sensorless control of PMSM using sliding mode observer with two-stage filter[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(11): 1-10.)
- [16] Comanescu M. Speed, rotor position and load torque estimation of the PMSM using an extended dynamic model and cascaded sliding mode observers[C]. Int Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Anacapri: IEEE, 2016: 98-103.
- [17] 周永勤,王东旭,张玉光,等.开关磁阻电机模糊滑模观测器间接位置检测[J].电机与控制学报, 2013, 17(6): 57-63.
(Zhou Y Q, Wang D X, Zhang Y G, et al. Sensorless detection technique on fuzzy sliding mode observer for SRM[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(6): 57-63.)
- [18] 张洪帅,王平,韩邦成,等.基于模糊滑模观测器的磁悬浮高速永磁同步电机转子位置检测方法[J].电工技术学报, 2014, 29(7): 147-153.
(Zhang H S, Wang P, Han B C, et al. Rotor position measuring method for magnetic levitation high speed PMSM based on fuzzy sliding mode observer[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 147-153.)

(责任编辑: 闫妍)