

基于新型滑模扰动观测器的永磁同步电机控制^{*}

陈 玄, 李祥飞, 周 杨

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了提高永磁同步电机(PMSM)的控制精度与鲁棒性,并减小外界扰动对控制的影响,提出了一种新型趋近律的控制方法,解决了传统趋近律在收敛速度与滑模抖振之间存在冲突的问题。首先,在传统幂次趋近律的基础上提出设计了一种分段式的幂次趋近律,并在第二段幂次项后面添加一项线性项,可以更好地抑制抖振。然后,以负载转矩和转速为状态变量设计了一种滑模扰动观测器,并将观测结果反馈到速度控制环,进一步提高了控制系统鲁棒性。最后,通过仿真试验验证了该理论和方法的有效性与可行性。

关键词: 永磁同步电机; 新型趋近律; 滑模控制; 扰动观测器

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)03-0023-05

doi: 10.12177/emca.2019.164

Permanent Magnet Synchronous Motor Control Based on New Sliding Mode Disturbance Observer^{*}

CHEN Xuan, LI Xiangfei, ZHOU Yang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: In order to improve the robustness and control accuracy of permanent magnet synchronous motor (PMSM) and reduce the influence of external disturbance on the control, a sliding mode control method is proposed based on a new reaching law. The new reaching law solves the contradiction between sliding mode surface reaching time and the system chattering in the regular reaching law. Based on the traditional power approaching law, a piecewise power approaching law is proposed. A linear term is added after the second power term to better reduce chattering. A sliding mode disturbance observer is designed with the load torque and rotational speed as the observation objects. The observation results are fed back to the speed control loop to further improve the robustness. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); new reaching law; sliding mode control (SMC); disturbance observer

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有质量轻、噪声小、功率密度高、构造简单等优点,广泛应用于工业领域。PMSM是一个典型的非线性、强耦合系统,电

机参数易受内部和外部影响而发生改变,传统PID控制难以满足现在的控制精度与要求^[1]。近年来,研究学者提出了许多新型控制算法,如滑模控制(SMC)^[2-3]、自适应控制^[4-5]、预测控制^[6-7]、模糊控制^[8]等。其中,SMC具有响应快、对参数

收稿日期: 2019-11-20; 收到修改稿日期: 2020-01-02

^{*} 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2018JJ4066); 湖南省教育厅科学研究重点项目(18A267)

作者简介: 陈 玄(1992—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制与故障诊断。

李祥飞(1969—),男,博士,教授,研究方向为永磁同步电机牵引传动控制。(通信作者)

周 杨(1997—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制与故障诊断。

及环境变化不灵敏、物理实现简单等诸多优点,已广泛应用于各领域。文献[2]设计了一种滑模观测器,可将观测的负载转矩前馈补偿,简单可靠,提升了系统的鲁棒性。文献[9]提出了一种在线识别转动惯量的观测器,通过对转动惯量在线识别并反馈至控制前端,改善了系统控制的动态性能。文献[10]在传统指数趋近律的基础上,设计了一种新的指数趋近律,有效减小了滑模抖振。文献[11]在传统趋近律上加入指数项、可变项、终端项和线性增益,解决了系统抖振与滑模面趋近时间的矛盾。文献[12]设计了一种简单的非线性扰动观测器,结合无差拍预测控制,能够实现电流的快速跟踪,且鲁棒性强。文献[13]结合工程实际,在现有趋近律方法的基础上,提出一种新的变指数幂次趋近律,与指数趋近律、fal 函数趋近律、多幂次趋近律相比,收敛时间更短,稳态误差更小。文献[14]通过在第二段幂次项后面添加线性项提高了参数设计的灵活性,并且通过合理分配参数避免了实际应用中的抖振问题。

本文在文献[13-14]的基础上,设计了一种分段式的幂次趋近律。在速度环上采取新型趋近律构建一种滑模控制器,电流环采用 PI 控制器。为了增强系统鲁棒性,减小系统的控制增益,设计了滑模扰动观测器,进一步削弱了系统的抖振。基于新型控制律和扰动观测器建立了 PMSM 矢量控制系统,通过仿真进行了分析,进一步提高了系统的控制性能。

1 PMSM 数学模型

在 d - q 坐标系下的表贴式 PMSM 电压方程式为^[15]

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L \frac{di_d}{dt} - Lp\omega i_q \\ u_q = R_s i_q + L \frac{di_q}{dt} + Lp\omega i_d + p\omega\varphi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴定子电压; R_s 为定子电阻; i_d 、 i_q 分别为定子绕组 d 、 q 轴电流; L 为定子绕组的 d 、 q 轴电感; p 为磁极对数; ω 为机械角速度; φ_f 为永磁体磁链。

运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B\omega \quad (2)$$

$$T_e = 1.5p\varphi_f i_q = K_t i_q \quad (3)$$

式中: J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为摩擦因数; K_t 为转矩系数。

2 滑模控制器设计

2.1 新型趋近律设计

针对传统趋近律存在的问题,在文献[14]的基础上改进了一种新型分段式幂次趋近律:

$$\dot{s} = \begin{cases} -\frac{k}{\varepsilon} \operatorname{sgn}(s), & |s| \geq 1 \\ -k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 s, & |s| < 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中: $k=s_{\max}$; $k_1>0$; $k_2>0$; $k_1+k_2=k$; $0<\alpha<1$; $0<\varepsilon<1$; s 为滑模面。

当 $|s| \geq 1$ 时,该趋近律具有更快的趋近速度和更强的鲁棒性;当 $|s| < 1$ 时, $-k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s)$ 在到达滑模面后不会出现抖振现象^[13]。但系统在实际运行时仍会有较大抖振,在该趋近律后面增加了一项线性项 $k_2 s$,通过合理分配 k_1 、 k_2 的值可以避免上述抖振的产生。

2.2 速度环滑模控制器设计

定义速度跟踪误差:

$$e = \omega_{\text{ref}} - \omega \quad (5)$$

SMC 实质上是一种非线性的开关切换控制,当状态轨迹收敛到滑模面后会在两边来回穿梭趋近平衡点,从而产生抖振。积分型滑模面具有更好的鲁棒性和抗负载扰动性能^[16],因此采用积分型滑模面:

$$s = e + c \int_0^t e dt \quad (6)$$

式中: c 为积分型滑模面的积分系数。

对 s 求导,得:

$$\dot{s} = \dot{e} + ce = \dot{\omega}_{\text{ref}} - \dot{\omega} + ce \quad (7)$$

由式(2)、式(3)可得:

$$\dot{\omega} = a i_q - b T_L - h\omega \quad (8)$$

其中: $a=K_t/J$; $b=1/J$; $h=B/J$ 。

考虑系统内部参数摄动和外部负载扰动^[2],可将式(8)等价为

$$\dot{\omega} = a i_q - bd(t) - h\omega \quad (9)$$

式中: $d(t)$ 为系统内部与外部总扰动。

结合式(4)、式(7)和式(9),可设计滑模控制律:

$$i_q^* = \begin{cases} a^{-1} [\dot{\omega}_{\text{ref}} + h\omega + bd(t) + ce + \frac{k}{\varepsilon} \text{sgn}(s)] , & |s| \geq 1 \\ a^{-1} [\dot{\omega}_{\text{ref}} + h\omega + bd(t) + ce + k_1 |s|^\alpha \text{sgn}(s) + k_2 s] , & |s| < 1 \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可看出,扰动项 $d(t)$ 对系统控制性能有较大的影响,而在实际工程中, $d(t)$ 无法直接由传感器测量。因此,需要设计观测器来实时观测扰动 $d(t)$ 值的变化,然后将观测的值反馈至系统的速度环进行补偿。

定义李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (11)$$

对 V 求导可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (12)$$

结合式(4)、式(12)可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = \begin{cases} -\frac{k}{\varepsilon}|s|, & |s| \geq 1 \\ -(k_1 |s|^\alpha |s| + k_2 s^2), & |s| < 1 \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq 0 \quad (14)$$

根据李亚雅诺夫稳定性理论可得根据式(10)所设计的控制器是稳定的。

3 滑模扰动观测器设计

为了进一步提高系统控制性能,设计了滑模扰动观测器。

在 PMSM 矢量控制系统中,控制周期小,与电流和转速信号相比,负载扰动转矩变化缓慢,因此在控制周期内负载转矩的变化可以看作为恒定值,即:

$$\frac{dT_L}{dt} = 0 \quad (15)$$

根据式(15),扰动 $d(t)$ 的一阶导数为零,即:

$$\dot{d}(t) = 0 \quad (16)$$

选取机械角速度 ω 和系统总扰动 $d(t)$ 作为状态变量,由式(2)和式(15)可得状态方程^[11]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (17)$$

其中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -B/J & -1/J \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/J \\ 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{y}$ 分别为状态变量、系统输入、系统输出, $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega \\ d \end{bmatrix}$, $\mathbf{u} = T_e$, $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \omega \\ d \end{bmatrix}$ 。

选取 ω 和 $d(t)$ 作为观测对象。由于从工程角度考虑系统内外总扰动 $d(t)$ 是有界的,可利用式(17)设计滑模观测器方程观测出 $d(t)$ 的值,有

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}g(e_\omega) \quad (18)$$

其中: $\mathbf{D} = [1 \quad \eta]^T$; η 为观测器增益; $g(e_\omega)$ 为待设计的滑模控制律。

由式(17)和式(18)可得扰动观测器的误差方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_\omega = -\frac{B}{J}e_\omega - \frac{1}{J}e_T - g(e_\omega) \\ \dot{e}_T = -\eta g(e_\omega) \end{cases} \quad (19)$$

式中: e_ω 为速度观测误差, $e_\omega = \omega - \hat{\omega}$; e_T 为扰动观测误差, $e_T = d - \hat{d}$ 。

选取积分型滑模面:

$$s_\omega = e_\omega + c_\omega \int_0^t e_\omega dt \quad (20)$$

对 s_ω 求导,得:

$$\dot{s}_\omega = \dot{e}_\omega + c_\omega e_\omega \quad (21)$$

选取趋近律:

$$\dot{s}_\omega = -\varepsilon_\omega \text{sgn}(s_\omega) \quad (22)$$

式中: ε_ω 为待设计切换增益参数。

结合式(19)、式(21)与式(22),设计滑模扰动观测器的控制律:

$$g(e_\omega) = \left(c_\omega - \frac{B}{J}\right)e_\omega - \frac{1}{J}e_T + \varepsilon_\omega \text{sgn}(s_\omega) \quad (23)$$

将 $\frac{1}{J}e_T$ 作为扰动项,则式(23)可变为

$$g(e_\omega) = \left(c_\omega - \frac{B}{J}\right)e_\omega + \varepsilon_\omega \text{sgn}(s_\omega) \quad (24)$$

定义李雅普诺夫函数:

$$V_0 = \frac{1}{2}s_\omega^2 \quad (25)$$

对 V_0 求导并结合式(19)、式(21)、式(24),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= s_\omega \dot{s}_\omega = \\ s_\omega \left[c_\omega e_\omega - \frac{B}{J} e_\omega - \frac{1}{J} e_T - g(e_\omega) \right] &= \quad (26) \\ s_\omega \left[-\varepsilon_\omega \operatorname{sgn}(s_\omega) - \frac{e_T}{J} \right] \end{aligned}$$

若要使观测器稳定,则:

$$\dot{V}_0 = s_\omega \dot{s}_\omega < 0 \quad (27)$$

由式(26)和式(27),可得:

$$\varepsilon_\omega > \frac{|e_T|}{J} \quad (28)$$

当参数 ε_ω 的设计满足式(28),该观测器逐渐稳定。

当系统到达滑模面后,由滑模等值原理,可得:

$$s_\omega = \dot{s}_\omega = 0 \quad (29)$$

$$e_\omega = \dot{e}_\omega \quad (30)$$

由式(19)可得:

$$\begin{cases} e_T = -Jg(e_\omega) \\ \dot{e}_T = -\eta g(e_\omega) \end{cases} \quad (31)$$

由式(31)可得:

$$e_T = c_T e^{\frac{\eta}{J} t} \quad (32)$$

式中: c_T 为待设计常数;参数 $\eta < 0$ 。

4 仿真分析

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略,基于扰动观测器的 PMSM 控制系统结构如图 1 所示。仿真用 PMSM 参数如表 1 所示。根据前述方法设计的新型滑模控制器参数为 $a = 410$ 、 $b = 820$ 、 $c = 300$ 、 $h = 600$ 、 $k = 2\,000$ 、 $k_1 = 400$ 、 $k_2 = 1\,600$ 、 $\varepsilon = 0.8$ 。扰动观测器参数为 $c_\omega = 2$ 、 $\varepsilon_\omega = 5\,000$ 、 $c_T = 10$ 、 $\eta = -2$ 。

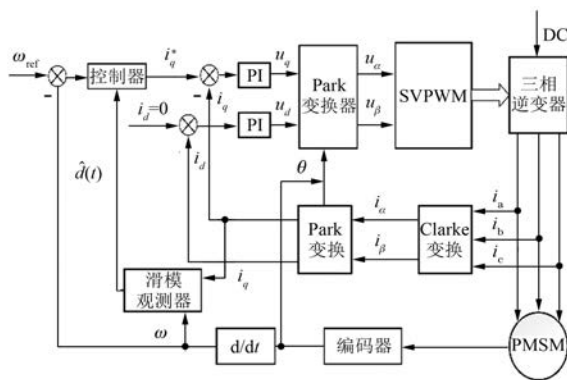


图1 PMSM 控制系统结构

表1 仿真用 PMSM 参数

参数名称	参数值
定子绕组相电阻 R_s/Ω	2.875
极对数 p	4
定子绕组 d 轴电感 L_d/H	0.008 5
定子绕组 q 轴电感 L_q/H	0.008 5
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.015

为了验证新型趋近律的有效性,将基于新型趋近律的 SMC 与传统 SMC 性能进行仿真对比,电流环均采用相同参数的 PI 控制器。 q 轴电流环 PI 控制器参数为 $k_p = 12$ 、 $k_i = 5$ 。 d 轴电流环 PI 控制器参数为 $k_p = 6$ 、 $k_i = 2.8$ 。

图 2 所示为空载系统从静止开始到跟踪 400 r/min 速度阶跃到 600 r/min 时,新型 SMC 与常规 SMC 控制的仿真结果。从图 2 可以看出,与常规 SMC 相比,新型 SMC 起动时间更短,快速性更好,且无超调。

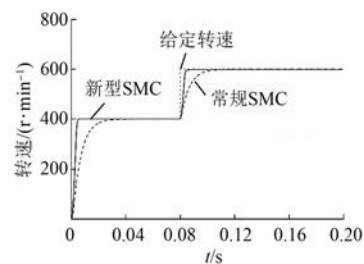


图2 PMSM 空载起动转速响应对比

图 3、图 4 所示分别为 2 种控制方法在突加负载时的转速响应与电磁转矩响应对比。

从图 3 可以看出,在 $t = 0.08$ s 时加入扰动转矩 $10\text{ N}\cdot\text{m}$,在 $t = 0.14$ s 时卸去扰动转矩,与常规 SMC 控制方法相比,新型 SMC 的控制方法调节时间更短,超调更小。

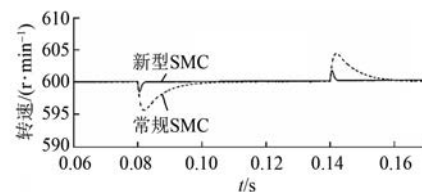


图3 负载突变时转速响应对比

图 4 中,在 $t = 0.08$ s 时加入扰动转矩 $10\text{ N}\cdot\text{m}$,在 $t = 0.14$ s 时卸去扰动转矩,与常规 SMC 控制方法相比,新型 SMC 控制方法鲁棒性更强,转矩控

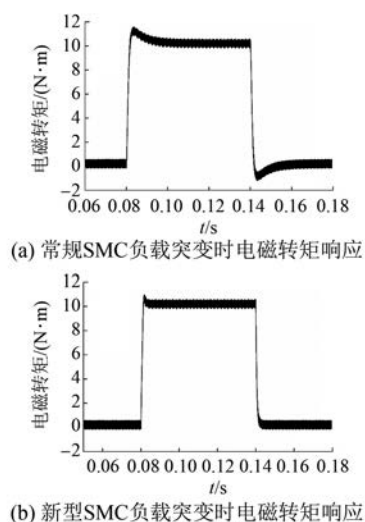


图4 负载突变时电磁转矩响应对比

制精度较高,且控制性能优异。

图5所示为滑模扰动观测器观测结果。仿真表明,该观测器响应速度快,能够准确对扰动进行估计。

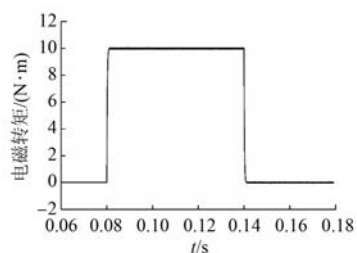


图5 滑模扰动观测器观测结果

5 结 语

本文设计了一种基于新型趋近律的PMSM控制方法。基于矢量控制建立了PMSM控制仿真模型,结合积分型SMC,减小了系统固有的抖振问题,并且有效提高了系统的响应速度。针对外部扰动对系统造成的影响,设计了滑模扰动观测器以实现对扰动的高精度估计,改善了系统控制性能,提高了系统鲁棒性。通过仿真验证了该方法的正确性与有效性。

【参考文献】

[1] 许叙遥,林辉.基于动态滑模控制的永磁同步电机位置速度一体化设计[J].电工技术学报,2014,29(5): 77.

[2] 张晓光,孙力,赵克.基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2012,

32(3): 111.

[3] ZHANG X, SUN L, ZHAO K, et al. Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1358.

[4] MOHAMED A R I. Design and implementation of a robust current-control scheme for a PMSM vector drive with a simple adaptive disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 1981.

[5] 王庆龙,张兴,张崇巍.永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J].中国电机工程学报,2014,34(6): 897.

[6] 林茂,李颖晖,吴辰,等.基于滑模模型参考自适应系统观测器的永磁同步电机预测控制[J].电工技术学报,2017,32(6): 156.

[7] 牛里,杨明,刘可述,等.永磁同步电机电流预测控制算法[J].中国电机工程学报,2012,32(6): 131.

[8] 马立新,范洪成,黄阳龙.永磁伺服电机模糊PID自整定SVPWM控制研究[J].电子测量技术,2016,39(6): 20.

[9] 刘颖,周波,方斯琛.基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2010,30(9): 80.

[10] WANG A, JIA X, DONG S. A new exponential reaching law of sliding mode control to improve performance of permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 2409.

[11] 刘京,李洪文,邓永停.基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J].工程科学学报,2017,39(6): 933.

[12] 孙静,刘旭东.基于无差拍预测控制和扰动观测器的永磁同步电机电流控制[J].电机与控制应用,2017,44(10): 25.

[13] 蒲明,蒋涛,付克昌.输入受限约束下的无抖振有限时间稳定趋近律设计[J].控制与决策,2018,33(1): 135.

[14] 杨新岩,廖育荣,倪淑燕.基于分段趋近律的航天器对地凝视姿态滑模控制[J].科学技术与工程,2018,18(25): 262.

[15] 李永恒,刘陵顺,闫红广.基于积分滑模控制的对称六相永磁同步电机调速系统研究[J].电机与控制应用,2018,45(12): 1.

[16] 李政,胡广大,崔家瑞,等.永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J].中国电机工程学报,2014,34(3): 431.