

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209709

基于新型趋近律的 PMSM 反演滑模控制*

冯志伟^{1,2} 毛国勇^{1,2} 余世刚¹ 于建英² 朱益利²

(1.常州大学机械与轨道交通学院 常州 213164; 2.常州工学院电气信息工程学院 常州 213032)

摘要: 在永磁同步电机(PMSM)矢量控制系统中,针对传统的PI控制器控制精度不足、超调量大、易受外界扰动影响的问题,本文提出了一种反演滑模控制器替换传统的PI控制器,该反演滑模控制器是由反演法与滑模控制理论相结合产生的,且在趋近律设计方面引入双曲正切函数和系统状态变量,从而形成一种新型趋近律,代替传统的指数趋近律,提高系统的收敛速度,减小滑模抖振现象。在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型,仿真结果表明,该方法使系统对电机的转速有着良好的控制效果,与PI控制、传统滑模控制以及变指数滑模控制相比较,具有较好的动态响应性能,转速超调量分别减少了22.15%、18%和2.75%,系统抗扰动能力提高,具有较强的稳定性。

关键词: 永磁同步电机;反演法;趋近律;滑模控制

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

PMSM inverse sliding mode control based on new reaching law

Feng Zhiwei^{1,2} Mao Guoyong^{1,2} She Shigang¹ Yu Jianying² Zhu Yili²

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

Abstract: In the vector control system of permanent magnet synchronous motor (PMSM), aiming at the problems of insufficient control accuracy, large overshoot and easy to be affected by external disturbance of the traditional PI controller, an inverse sliding mode controller is proposed to replace the traditional PI controller. The inverse sliding mode controller is produced by the combination of inversion method and sliding mode control theory. In the design of reaching law, hyperbolic tangent function and system state variables are introduced to form a new reaching law, which replaces the traditional exponential reaching law, improves the convergence speed of the system and reduces the chattering phenomenon of sliding mode. The simulation model is built in MATLAB/Simulink. The simulation results show that this method makes the system have a good control effect on the motor speed. Compared with PI control, traditional sliding mode control and variable exponential sliding mode control, it has better dynamic response performance, the overshoot is reduced by 22.15%, 18% and 2.75% respectively. The anti-disturbance ability of the system is improved and the system has strong stability.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; inversion method; reaching law; sliding mode control

0 引言

永磁同步电机(PMSM)因其原材料资源丰富、体积小、能量损耗低、能量转化率高、稳定性较强等一系列优秀特性,在当今多个领域被被人们广泛运用。且PMSM本身具有的非线性、强耦合和多变量的特性^[1],其矢量控制^[2]系统中传统的PI控制器容易出现超调现象以及抗扰动能力差等问题,已无法满足如今的控制需求。

针对这一问题,国内外的诸多专家将非线性控制理

论^[3]应用到PMSM矢量控制系统中,提出了许多比较有针对性的控制算法。包括诸如滑模控制^[4-5]、模糊控制^[6-7]、自抗扰控制^[8-9]、自适应控制^[10]等。其中,滑模控制因其优点众多,例如不依赖被控对象的数学模型,响应速度快,不易受到扰动影响等,受到大量研究者研究,将其应用到PMSM矢量控制系统中进行速度控制。但由于滑模控制自身存在控制不连续的问题,对此,不少专家学者着眼于趋近律设计方面,精益求精,从而解决整个控制系统后续的抖振现象。张晓光等^[11]在指数趋近律的基础上,融入了系统

收稿日期:2022-04-22

* 基金项目:江苏省高校自然科学研究重大项目(19KJA430006)、江苏省产学研项目(BY2021483)

的状态变量,形成一种新型的滑模速度控制器,代替原有的PI速度控制器,一定程度上改善了PI控制器的不足,但效果不明显。王要强等^[12]在幂次趋近律的基础上引入系统状态变量,使其与系统相互联系,更好的控制趋近速度。刘胜等^[13]利用自适应思想改变趋近律,使其切换项进行连续性处理,以此减少抖振。Liu等^[14]利用全局积分设计非线性滑动面,保证了控制的连续性,有效降低抖振。毛亮亮等^[15]通过设计一种以电流误差为基础的变指数趋近律,通过调整滑模面和切换增益,实现连续控制,从而减少系统的抖振问题。Zhou等^[16]提出了一种自适应变量额定的指数的趋近律,能够根据状态变量与平衡位置之间的距离调节速度,缩短时间。当然,其他一些研究人员也在尝试在其中引入其他现代控制方法。Bouguenna等^[17]将模糊控制引入到三面滑模变结构中,形成一种复合控制,抖振抑制效果显著,但其控制器结构复杂,加大应用难度。侯利民等^[18]将自抗扰控制应用到滑模变结构中,引入非线性误差反馈控制律,抑制扰动的同时也对误差项加以补偿,提高了系统响应速度和鲁棒性,但系统参数过多,导致调参难度加大,难以获取最优控制。Li等^[19]将幂指数趋近律进行模糊化处理,形成一种模糊指数趋近律,对系统抖振有了一定的抑制作用。王天鹤等^[20]利用神经网络算法加强滑模对系统不确定因素的估计,但其会加大控制算法的复杂程度,增加实操难度。Ge等^[21]通过利用高阶线性组合为基础形成新的估计随后与自适应滑模控制融合形成一种全新复合型滑模控制器,提高了系统的鲁棒性。王晓光等^[22]在传统滑模控制的基础上加入自抗扰对系统未知的扰动进行估计,且加入了一个低通滤波器,对信号干扰进行滤波处理,实现了系统控制精度的提升。

因此,通过以上研究,对于PMSM矢量控制系统中PI控制器易出现超调以及抗扰动能力差的问题,本文提出了一种基于新型趋近律的PMSM反演滑模控制。该方法是利用反演思想对传统滑模控制器进行改造,且在趋近律方面引入双曲正切函数和系统状态变量,从而设计出一种新型趋近律,形成一种新型趋近律的反演滑模控制器,提高系统的收敛速度,减小滑模抖振。最后通过仿真实验验证该控制方法的有效性,表明本文提出的新型趋近律的反演控制器应用在PMSM矢量控制系统中时,与PI控制、传统滑模控制以及毛亮亮的变指数滑模控制相比,控制精度提高,转速超调量分别减少了22.15%、18%和2.75%,系统抗干扰能力得到明显改善。

1 PMSM 数学模型

为了方便分析,选择表贴式PMSM,且设该电机为理想电机。

PMSM在 d - q 轴下的定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d p i_d - \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q p i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 轴、 q 轴电压, R 为定子绕组阻值; i_d 、 i_q 分别为 d 轴、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为 d 轴、 q 轴电感量; ω 为转子电角速度; ψ_f 为永磁体转子磁链。

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 轴、 q 轴磁链。

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (3)$$

式中: T_e 为电机的电磁转矩; p 为电机的极对数。

当采用 $i_d = 0$ 控制策略时,由于 d 轴期望电流一直为0,则电磁转矩方程可近似简化为:

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q \psi_f \quad (4)$$

运动方程:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (5)$$

式中: T_L 为电机的负载转矩; J 为电机的转动惯量; ω_m 为转子机械角速度; B 为阻尼系数。

2 传统滑模控制器设计

首先通过上述式(1)、(4)和(5)联立得:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} (u_q - Ri_q - \psi_f i_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p i_q \psi_f - T_L \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_s 为定子电感,其值与 L_d 、 L_q 相等。

其次定义PMSM矢量控制系统状态变量,如下:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω_{ref} 为给定转速, ω_m 为实际转速。又通过式(6)和(7)联立得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(-\frac{3}{2} p i_q \psi_f + T_L \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\frac{3 p \psi_f i_q}{2J} \end{cases} \quad (8)$$

然后定义滑模面,如下:

$$s = c x_1 + x_2 \quad (9)$$

式中: c 为控制 x_1 的变量,且 $c > 0$ 。对式(9)求导得:

$$\dot{s} = c \dot{x}_1 + \dot{x}_2 = c x_2 - \frac{3 p i_q \psi_f}{2J} \quad (10)$$

趋近律方面,选取传统的指数趋近律,如下:

$$\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s) - q s \quad (11)$$

式中: $k > 0$; $q > 0$; $k \operatorname{sgn}(s)$ 为等速项; $q s$ 为指数项; $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数。

通过式(10)和(11)可得该控制器控制律为:

$$i_q = \frac{2J}{3p\psi_f}(cx_2 + k\text{sgn}(s) + qs) \quad (12)$$

最后进行系统稳定性分析,在式(11)两边同乘 s , 得:

$$ss' = -k\text{sgn}(s)s - qs^2 \quad (13)$$

因此可得 $ss' \leq 0$, 则可验证该滑模控制系统是稳定的。但由于符号函数 $k\text{sgn}(s)$ 的存在, 系统将不可避免地出现抖振, k, q 难以满足趋近速度调节需求。

3 新型趋近律的反演滑模控制器设计

3.1 反演法原理

反演法, 也称后退法, 其本质上是一种数学方法, 即从已知条件入手, 逐步往回推。在控制理论中, 其基本思想是将复杂的非线性系统分成若干个子系统, 然后分别设计李雅普诺夫函数, 以层叠的方式, 将系统中的一些状态变量视为虚拟控制量, 随后后退到整个系统中, 最终获得系统实际的控制输入。

3.2 新型指数趋近律设计

针对传统的指数趋近律存在符号函数而造成抖振的问题, 本文引入双曲线正切函数和系统状态变量建立一种饱和函数替换原有的符号函数, 形成一种新型趋近律:

$$\dot{s} = -\epsilon_1 f(s) - \epsilon_2 |X|^\gamma s \quad (14)$$

其中:

$$f(s) = \begin{cases} \text{sgn}(s), & |s| > \phi(s) \\ \frac{s}{\phi(s)}, & |s| \leq \phi(s) \end{cases} \quad (15)$$

$$\phi(s) = |\tanh(\pi s)|^\alpha \quad (16)$$

式中: $\epsilon_1, \epsilon_2, \gamma, \alpha$ 为常数; $f(s)$ 为边界饱和函数; $\text{sgn}(s)$ 为传统符号函数; $\phi(s)$ 为边界函数; X 为系统的状态变量。

通过以双曲线正切函数为基础的边界厚度函数来建立新的边界饱和函数, 改善了边界层过大易对系统稳定性造成影响的问题, 对传统的符号函数进行连续性处理, 改善其在趋近滑模面时不连续问题, 从而解决滑模的抖振问题。并且在指数项引入系统的状态变量, 从而更好的调节趋近速度。

3.3 新型趋近律的反演滑模控制器

根据反演法的基本思想, 将 PMSM 矢量控制系统分解为子系统。

首先是对同步旋转坐标轴 d 轴定子电流 i_d 的控制, 设:

$$e_1 = i_d^* - i_d \quad (17)$$

式中: i_d^* 为 d 轴电流期望给定值, e_1 为 d 轴电流的误差值。

本文使用 $i_d^* = 0$ 的控制方法, 所以:

$$\dot{e}_1 = -\frac{di_d}{dt} = \frac{R}{L}i_d - p\omega i_q - \frac{u_d}{L} \quad (18)$$

选取李雅普诺夫函数 $V_1 = 0.5e_1^2$, 得:

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left(\frac{R}{L}i_d - p\omega i_q - \frac{u_d}{L} \right) \quad (19)$$

所以可以设:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - p\omega i_q + k_1 e_1 \\ \dot{e}_1 = -k_1 e_1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $k_1 > 0$ 。

其次是对 PMSM 转速的控制, 设:

$$e_2 = \omega^* - \omega \quad (21)$$

式中: ω^* 为转速给定值, e_2 为电机转速的误差值。

$$\dot{e}_2 = \frac{\dot{\omega}^* + B\omega + T_L - 1.5p\psi_f i_q}{J} \quad (22)$$

假设 i_q 为虚拟控制变量, 即:

$$i_q^* = \frac{2(\dot{\omega}^* + B\omega + T_L + k_2 J e_2)}{3p\psi_f} \quad (23)$$

式中: $k_2 > 0$ 。

所以:

$$\dot{e}_2 = -k_2 e_2 \quad (24)$$

设:

$$e_3 = i_q^* - i_q \quad (25)$$

式中: e_3 为 q 轴电流的误差值。

然后设计滑模面为:

$$s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + c_3 e_3 \quad (26)$$

式中: c_1, c_2, c_3 均大于 0。

选取本文设计的新型趋近律:

$$\dot{s} = -\epsilon_1 f(s) - \epsilon_2 |X|^\gamma s \quad (27)$$

对式(26)求导得:

$$\begin{aligned} \dot{s} = & -c_1 k_1 e_1 - c_2 k_2 e_2 + c_3 \dot{e}_3 = -c_1 k_1 e_1 - c_2 k_2 e_2 + \\ & \frac{2c_3}{3p\psi_f} \left(\dot{\omega}^* + \frac{3Bp\psi_f}{2J} i_q - \frac{B^2 \omega}{J} - \frac{BT_L}{J} + \dot{T}_L - k_2^2 J e_2 \right) + c_3 \\ & \frac{c_3 R}{L} i_q + c_3 p\omega i_d + \frac{c_3 p\omega\psi_f}{L} - \frac{c_3 u_q}{L} \end{aligned} \quad (28)$$

通过式(27)和(28)联立得:

$$\begin{aligned} u_q = & \frac{2L}{3p\psi_f} \left(\dot{\omega}^* + \frac{3Bp\psi_f}{2J} i_q - \frac{B^2 \omega + BT_L}{J} + \dot{T}_L - k_2^2 J e_2 \right) - \\ & Ri_q + Lp\omega i_d + p\omega\psi_f + \\ & \frac{L}{c_3} [\epsilon_1 f(s) + \epsilon_2 |X|^\gamma s - c_1 k_1 e_1 - c_2 k_2 e_2] \end{aligned} \quad (29)$$

最后进行系统稳定性分析, 在式(27)两边同乘 s , 得

$$\begin{cases} -\epsilon_1 \text{sgn}(s)s - \epsilon_2 |X|^\gamma s^2, & |s| \geq \phi(s) \\ -\frac{\epsilon_1 s}{|\tanh(\pi s)|} - \epsilon_2 |X|^\gamma s^2, & |s| \leq \phi(s) \end{cases} \quad (30)$$

由此可得 $ss' \leq 0$, 则可验证该滑模控制系统是稳定的。

4 系统仿真实验与结果分析

在 MATLAB/Simulink 平台下搭建基于新型趋近律的 PMSM 反演滑模控制系统, 系统总体结构框图如图 1 所示。该控制系统主要以矢量控制为基础, 用本文设计的新颖趋近律的反演滑模控制器替换了 PI 控制器,

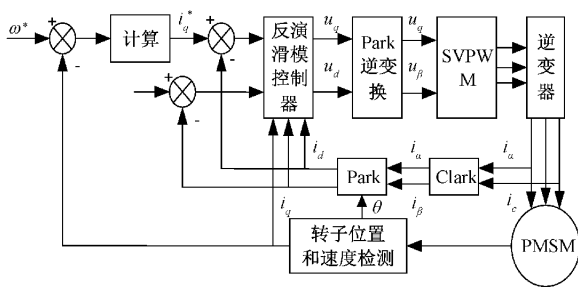


图1 系统总体结构框图

PMSM 仿真参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机仿真参数

参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	2.875
定子电感 L_s/H	0.008 5
极对数 p	4
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.001
永磁体磁链 φ_f/Wb	0.172
阻尼系数 B	0.000 1

为了验证本文提出的新型趋近律的滑模控制方法的有效性,将其与 PI 控制、传统滑模控制以及变指数滑模控制在空载启动与负载转矩扰动两种情况下进行对比。4 种控制器参数如表 2 所示。

表 2 控制器参数

PI	传统滑模	变指数滑模	本文滑模
$k_p = 0.14$	$c = 50$	$\epsilon = 1$	$c_1 = 500$
$k_i = 7$	$k = 200$	$\eta = 15$	$c_2 = 200$
—	$q = 300$	$c_0 = 0.01$	$c_3 = 50$
—	—	$c_1 = 1$	$k_1 = 120$
—	—	$\delta = 0.5$	$k_2 = 20$
—	—	—	$\gamma = 0.5$
—	—	—	$\epsilon_1 = 50$
—	—	—	$\epsilon_2 = 100$
—	—	—	$\alpha = 0.5$

1) 空载启动情况

首先进行初始状态设定:期望转速为 800 r/min,负载转矩 $T_L = 0$ 。本文设计的基于新型趋近律的反演滑模控制与 PI 控制、传统滑模控制以及变指数滑模控制的转速曲线对比如图 2 所示。从图 2 中可以看出,PMSM 在空载启动情况下,采用 PI 控制时,为达到期望的转速 800 r/min,转速稳定增长,但是出现超调情况,超调量为 25.15%,在 0.09 s 时电机运行达到期望转速 800 r/min,随后平稳运行;采用传统滑模控制时,转速超调量为 21%,在 0.07 s 时

达到期望转速;采用变指数滑模控制时,转速超调量为 5.75%,在 0.06 s 时达到期望转速;而采用本文的滑模控制时,转速超调量降低至 3%,与其他 3 种控制相比分别减少了 22.15%、18% 以及 2.75%,在 0.05 s 时到达期望转速,随后稳定运行。

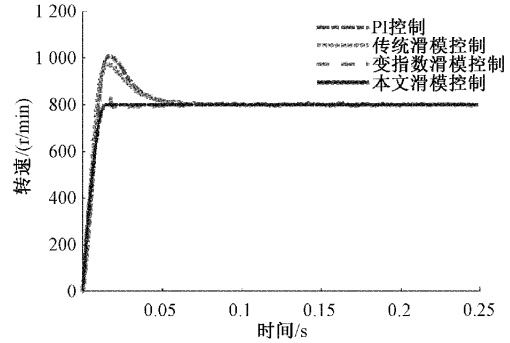


图 2 空载启动下转速曲线对比

2) 负载转矩扰动情况

在空载启动的基础上加入负载转矩, $t = 0.15$ s 时,设置 $T_L = 6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

转速曲线仿真对比结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出在 0.15 s 时由于负载扰动的突现,转速受到影响产生波动,PI 控制下转速降至 700 r/min,在 0.23 s 时恢复至稳定状态;传统滑模控制下转速下降至 740 r/min,在 0.2 s 时调节至稳定;变指数滑模控制下转速下降至 760 r/min,在 0.18 s 时调节至稳定;而本文的滑模控制下转速只下降至 786 r/min,在 0.16 s 时调节至稳定状态,转速波动更小,调节时间更短。

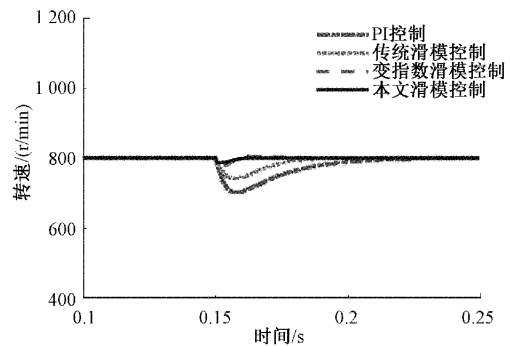


图 3 负载扰动下转速曲线对比

图 4 为在负载扰动状态下的 4 种控制的电磁转矩曲线对比结果。从图 4 中可以看出,在 0.15 s 时由于突加负载扰动的关系,电机电磁转矩发生变化,PI 控制下的电磁转矩曲线产生波动,升至 $7.62 \text{ N} \cdot \text{m}$,经过 0.08 s 调节至稳定;传统滑模控制下的电磁转矩波动至 $7.30 \text{ N} \cdot \text{m}$,经过 0.05 s 调节至稳定;变指数滑模控制下的电磁转矩波动至 $6.63 \text{ N} \cdot \text{m}$,调节时间为 0.03 s;而本文的反演滑模控制下的电磁转矩曲线产生波动与这前面 3 种控制相比明显减小,仅升至 $6.2 \text{ N} \cdot \text{m}$,调节时间仅为 0.01 s,随后处于稳定状态。

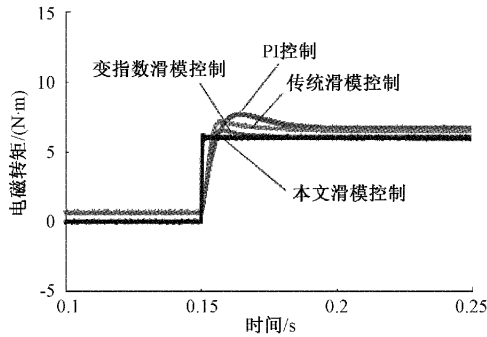


图 4 负载扰动下电磁转矩曲线对比

4 种控制的 d 轴电流波形对比如图 5 所示。从图 5 中可以看出,由于本文使用 $i_d = 0$ 控制,4 种控制方式下 d 轴电流一直在 0 处上下波动,波动范围分别为 $[-0.28, 0.35]$ 、 $[-0.24, 0.28]$ 、 $[-0.15, 0.17]$ 和 $[-0.10, 0.09]$,可以看出本文的滑模控制波动最小。在 0.15 s 时由于突加负载扰动,电流波动发生改变,PI 控制下的电流波动升至 2.79 A,调节时间为 0.08 s;传统滑模控制下的电流波动升至 1.08 A,调节时间为 0.05 s;变指数滑模控制下的电流波动升至 0.41 A,调节时间为 0.03 s;而本文的反演滑模控制下的电流波动仅升至 0.13 A,调节时间仅为 0.01 s,随后处于稳定状态。

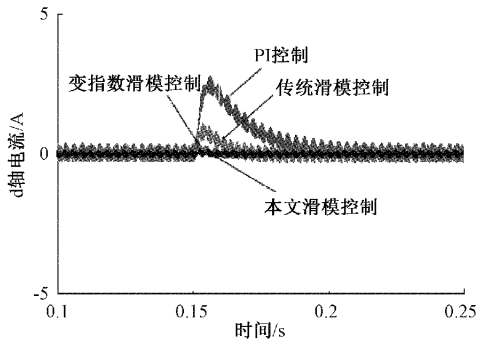


图 5 负载扰动下 d 轴电流曲线对比

表 3、4 分别给出了 4 种控制在空载启动和负载扰动下对电机的控制效果性能对比。

表 3 空载启动性能比较

	PI 控制	传统滑模控制	变指数滑模控制	本文滑模控制
转速超调量/%	25.15	21.00	5.75	3.00
调节时间/s	0.09	0.07	0.06	0.05

由此可知,通过上述空载启动、负载扰动两种情况下对 4 种控制方式下的控制效果可以看出,本文设计的新型趋近律的反演滑模控制器在空载启动和突加负载转矩扰动的情况下在进行速度控制时,与 PI 控制器、传统的滑模控制以及变指数滑模控制相比,响应时间更短,转速超调量分别

表 4 负载扰动性能比较

	PI 控制	传统滑模控制	变指数滑模控制	本文滑模控制
转速扰动量/%	12.50	7.50	5.00	1.75
转矩扰动量/%	27.00	21.67	10.50	3.23
电流波动范围	$[-0.28, 0.35]$	$[-0.24, 0.28]$	$[-0.15, 0.17]$	$[-0.10, 0.09]$
电流扰动量/%	27.90	10.80	4.10	1.30
调节时间/s	0.08	0.05	0.03	0.01

减少了 22.15%、18% 以及 2.75%,转速扰动量降低,电磁转矩控制效果更佳,电流抑制波动更小,系统抗干扰能力更强。

5 结 论

本文以矢量控制系统为基础,设计了一个基于新型趋近律的反演滑模控制器,代替传统 PI 控制器,对 PMSM 进行速度控制,在 MATLAB/Simulink 中建模仿真,与 PI 控制、传统滑模控制以及变指数滑模控制进行对比,取得以下结论:

基于新型趋近律的反演滑模控制器通过引入反演法、双曲正切函数和系统状态变量,能够提高系统的收敛速度,减小系统抖振现象,加强稳定性,对电机转速有着良好的控制效果。

与 PI 控制、传统滑模控制以及变指数滑模控制相比,本文设计的控制方法在空载运行、负载转矩扰动情况下转速控制效果更优越,响应更快,超调量分别减少了 22.15%、18% 以及 2.75%,扰动量降低,电磁转矩控制效果更佳,电流抑制波动更小,系统抗干扰能力更强,具有较强的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 侯利民, 申鹤松, 李蕴焯, 等. 永磁同步电机调速系统的非线性鲁棒滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 18(6): 143-152.
- [2] 贾宁, 程瑶, 田又源. 基于电流前馈的电动汽车永磁同步电机矢量控制[J]. 国外电子测量技术, 2021, 32(12): 61-66.
- [3] 崔茂振, 张昌凡, 朱剑. 永磁同步电机滑模调速控制及其实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1): 84-92.
- [4] 岳聪聪, 于海生, 孟祥祥. 基于新型趋近律的欠驱动系统解耦滑模控制[J]. 控制工程, 2021, 77(8): 1-6.
- [5] 周华伟, 于晓东, 刘国海, 等. 基于内模的圆筒永磁直线电机滑模速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 62(11): 3382-3391.
- [6] 王伟然, 吴嘉欣, 张懿, 等. 永磁同步电机模糊自整定自适应积分反步控制[J]. 电工技术学报, 2020,

- 35(4): 724-733.
- [7] 王延年, 吕志发, 武阳, 等. 基于MFO的车用PMSM控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2021, 378(22): 75-79.
- [8] 孙斌, 王海霞, 苏涛, 等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. 中国电机工程学报, 2020, 655(20): 6715-6726.
- [9] 周凯, 孙彦成, 王旭东, 等. 永磁同步电机的自抗扰控制调速策略[J]. 电机与控制学报, 2018, 160(2): 57-63.
- [10] 目云奎, 李祥飞, 陈玄. 自适应高阶滑模永磁同步电机永磁磁链观测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 231(3): 163-170.
- [11] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 47-52.
- [12] 王要强, 朱亚昌, 冯玉涛, 等. 永磁同步电机新型趋近律滑模控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 192-198.
- [13] 刘胜, 郭晓杰, 张兰勇. 六相永磁同步电机新型指数趋近律滑模控制[J]. 控制工程, 2018, 25(10): 1791-1797.
- [14] LIU Y B, WANG X D. Speed global integral sliding mode control with a load sliding mode observer for PMSM[J]. IEICE Electronics Express, 2018, 15(6): 1-12.
- [15] 毛亮亮, 周凯, 王旭东. 永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 106-111.
- [16] ZHOU S. Adaptive nonsingular terminal sliding model control for permanent magnet synchronous motor drive system [C]. 2016 Chinese Control and Decision Conference(CCDC). IEEE, 2016: 666-669.
- [17] BOUGUENNA I F, AZAIZ A, TAHOUR A, et al. Hybrid fuzzy sliding mode speed control for an electric vehicle drive [J]. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2017, 8(3): 1050-1061.
- [18] 侯利民, 任一夫, 徐越, 等. 基于NESO的永磁同步电机滑模自抗扰控制[J]. 控制工程, 2019, 26(1): 50-54.
- [19] LI Y, WANG D Z. Servo motor sliding mode control based on fuzzy power index method[J]. Computers and Electrical Engineering, 2021, 94(8): 1-6.
- [20] 王天鹤, 赵希梅, 金鸿雁. 基于递归径向基神经网络的永磁直线同步电机智能二阶滑模控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(6): 1229-1237.
- [21] GE Y, YANG L, MA X. Adaptive sliding mode control based on a combined state/disturbance observer for the disturbance rejection control of PMSM [J]. Electrical Engineering, 2020, 102(4): 1863-1879.
- [22] 王晓远, 刘铭鑫, 陈学永, 等. 电动汽车用PMSM带滤波补偿三阶滑模自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 205(11): 25-34.

作者简介

冯志伟, 硕士研究生, 主要研究方向为电机驱动控制技术。

E-mail: 1416547505@qq.com

毛国勇, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为计算机控制技术、计算机图形图像处理等。

E-mail: maogy@czust.edu.cn

余世刚(通信作者), 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为精密测量与控制技术、机电控制与伺服技术、电子技术应用等。

E-mail: sheshg@cczu.edu.cn

于建英, 博士, 讲师, 主要研究方向为电机设计、电机驱动控制技术。

E-mail: yujianying@czu.cn

朱益利, 博士, 副教授, 主要研究方向为电机驱动控制技术、磁悬浮轴承技术等。

E-mail: nuaazy1@163.com