

# 永磁同步电机的改进指数趋近律控制策略

王湘明<sup>1</sup>, 王 正<sup>2</sup>

(1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳工业大学 人工智能学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 为了改善使用 PI 控制算法和指数滑模控制(SMC)算法的永磁同步电机(PMSM)速度控制系统的鲁棒性差和突加负载转矩恢复较慢的问题,设计了一种改进趋近律 SMC 算法,并将该方法用在 PMSM 调速系统的速度控制器上。为了验证所提出的改进趋近律 SMC 算法的可行性,使用 MATLAB/Simulink 对 PMSM 双闭环调速系统仿真建模,并对比了传统的指数趋近律 SMC 算法、PI 控制算法。结果表明设计的改进趋近律滑模速度控制器具有较好的鲁棒性和抗负载扰动性。

**关键词:** 永磁同步电机; 指数趋近律; 滑模控制; 速度控制器

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)06-0044-05

doi: 10.12177/emca.2021.018

## Improved Exponential Reaching Law Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor

WANG Xiangming<sup>1</sup>, WANG Zheng<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. School of Artificial Intelligence, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Poor robustness and slower torque recovery of sudden load torque occur in permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed control system using PI control algorithm and exponential sliding mode control (SMC) algorithm. In order to solve these problems, an improved reaching law SMC algorithm is designed, which is used in the speed controller of the PMSM speed control system. In order to verify the feasibility of the proposed SMC algorithm, MATLAB/Simulink is used to simulate the PMSM double-closed-loop speed control system, and the traditional exponential reaching law SMC algorithm and PI control algorithm are compared. The results show that the improved reaching law sliding mode speed controller has better robustness and resistance to load disturbance.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); exponential reaching law; sliding mode control (SMC); speed controller

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、运行可靠、损耗小、效率高、电机尺寸灵活多样等优点,广泛应用于风机、数控机床、国防等科技领域中<sup>[1-2]</sup>。由于 PMSM 是一种非线性、强耦合、多变

量、参数时变的复杂系统,使用传统 PI 调节器,速度调节的品质一般,很难满足高性能的调速要求<sup>[3-5]</sup>。

为了提高 PMSM 的调速性能,国内外众多的学者做了大量的研究,如自适应控制<sup>[6-8]</sup>、模糊控制<sup>[9-10]</sup>、神经网络控制<sup>[11-12]</sup>、滑模控制(SMC)<sup>[13-17]</sup>等。文献[14]提出的二阶滑模算

收稿日期: 2021-01-21; 收到修改稿日期: 2021-03-19

作者简介: 王湘明(1963—),男,硕士,教授,研究方向为风力发电、自控技术。

法,减小了开关磁阻电机(SRM)的转矩波纹,消除了抖振现象。文献[15]在双幂次趋近律的基础上,提出三幂次趋近律和一个线性项,可以更快地稳定系统,减小系统的抖动,但该趋近律存在3个幂次项,对控制器的计算能力要求较高。文献[16]根据指数趋近规律,设计的新型趋近律滑模算法,提高了PMSM的动态性能,较大削弱了电机加速和突加负载时的转矩和电流的波动,但趋近律的参数较多。文献[17]设计了一种新型幂次趋近律滑模算法,该趋近律在以往幂次趋近律的基础上通过函数改进和新型函数的引入,实现了系统的快速收敛和无抖振,但算法较为复杂,较难实现。

为了提高PMSM的调速性能,本文根据传统的SMC设计了一种改进的速度SMC。对常规的指数趋近律进行改进,使用 $\frac{x}{1+|x|}$ 函数代替传统的 $\text{sgn}(x)$ 函数,并引入 $\sqrt{x_1+x_2}$ 项函数,优化指数趋近律,降低了系统的抖动程度,减小了系统的超调,提升了系统的抗干扰能力。本文基于此趋近律设计了PMSM速度环的SMC来改善PMSM调速系统的动态性能。最后,使用MATLAB对设计的改善趋近律滑模算法进行仿真,并与指数趋近律SMC算法和PI控制算法进行对比,验证了所提算法的优点。

## 1 PMSM 数学模型

为了便于分析与设计,通常选择同步旋转坐标系 $d-q$ 轴下的数学模型,其定子电压方程可表示为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega_e\psi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\psi_q + \omega_e\psi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程为

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

由式(1)和式(2)可得定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt}i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt}i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_d, u_q$ 分别为定子电压的 $d, q$ 轴分量; $i_d, i_q$ 分别为定子电流的 $d, q$ 轴分量; $R$ 为定子的电阻; $\psi_d, \psi_q$ 为定子磁链的 $d, q$ 轴分量; $\omega_e$ 为电角速度; $L_d, L_q$ 分别是 $d, q$ 轴电感分量; $\psi_f$ 为永磁体磁链。

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (4)$$

机械运动方程为

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

式中: $J$ 为转动惯量; $T_e$ 为电磁转矩; $T_L$ 为负载转矩; $p$ 为极对数; $\omega_m$ 为机械角速度;

## 2 改进 SMC 算法

### 2.1 趋近律设计

传统的指数趋近律为

$$\dot{s} = -qs - k\text{sgn}(s), \quad k > 0, q > 0 \quad (6)$$

式中: $qs$ 为指数趋近项; $k\text{sgn}(s)$ 为等速趋近项; $\text{sgn}(s)$ 为符号函数; $s$ 为滑模面。

指数趋近律<sup>[19]</sup>由高为炳院士提出,并在电机控制领域得到广泛的应用。该方法可以在增大 $q$ 的同时减小 $k$ 来削弱系统的抖动,由于 $k\text{sgn}(s)$ 等速趋近项的存在,并不能从理论上很好地消除抖动,作为PMSM的速度控制器存在转速超调偏大,鲁棒性不足的问题。

为了更好地解决指数趋近律的抖动和鲁棒性问题,对上述的趋近律进行改进,得到了一种改进趋近律为

$$\dot{s} = -k\sqrt{x_1^2 + x_2^2} \frac{s}{1+|s|} - qs, \quad k > 0, q > 0 \quad (7)$$

式中: $x_1, x_2$ 为系统的状态变量; $k\sqrt{x_1^2 + x_2^2} \frac{s}{1+|s|}$ 为变速项; $qs$ 为指数趋近项。

定义Lyapunov函数如下:

$$V = \frac{s^2}{2} \quad (8)$$

则有:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -qs^2 - k\sqrt{x_1^2 + x_2^2} \frac{1}{1+|s|} s^2 \leq 0 \quad (9)$$

由式(9)可以看出设计的改进趋近律满足可达性条件<sup>[20]</sup>。

图1为滑模算法的运动阶段, CB段表示状态变量  $x_1, x_2$  距离平衡点较远时, 指数趋近项  $qs$  起主要作用。随着状态变量距平衡点的距离减小到 B 点时, 即 BA 段变速项  $k\sqrt{x_1^2+x_2^2} \frac{s}{1+|s|}$  起主导作用。随着  $\sqrt{x_1^2+x_2^2}$  减小, 滑模的运动速度在逐渐地减小, 最终稳定于平衡点, 并可以削弱系统的抖动。

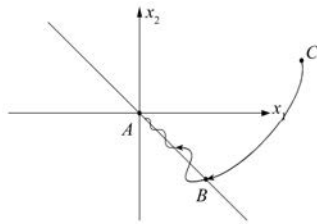


图1 滑模算法的运动阶段

### 2.2 速度控制器设计

为了简化分析, 本文忽略涡流和磁滞损耗; 忽略铁心的饱和; 永磁体磁场在气隙中为正弦波分布; 满足  $L_d=L_q=L_s$ , 并且采用  $i_d=0$  的转子磁场定向控制策略。定义 PMSM 控制系统的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\omega^*$  为给定转速, 一般为常数;  $\omega_m$  为实际转速;  $L_s$  为定子电感。

由式(4)和  $i_d=0$  可得:

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q \psi_f \quad (11)$$

由式(3)、式(5)和式(11)可得:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_s} (-R i_q - p_n \psi_f \omega_m + u_q) \\ \frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p \psi_f i_q - T_L \right) \end{cases} \quad (12)$$

根据式(10)和式(12)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = -\frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p \psi_f i_q - T_L \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\frac{3p\psi_f}{2J} \frac{d}{dt} i_q \end{cases} \quad (13)$$

定义  $D = \frac{3}{2J} p \psi_f$ ,  $u = \frac{d}{dt} i_q$ , 由式(13)可得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u \quad (14)$$

定义滑模面函数为  $s = cx_1 + x_2, c > 0$ , 对其求导可得:

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 \quad (15)$$

根据式(7)和式(15)得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= -k\sqrt{x_1^2+x_2^2} \frac{s}{1+|s|} - qs = \\ c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 &= cx_2 - Du \end{aligned} \quad (16)$$

从而得到  $q$  轴的参考电流

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int \left( k\sqrt{x_1^2+x_2^2} \frac{s}{1+|s|} + qs + cx_2 \right) dt \quad (17)$$

由式(17)可以看出, 由于控制器包含有积分项, 可以在消除系统稳态误差的同时削弱系统的抖动现象, 提高 PMSM 速度控制的品质。

### 3 仿真分析

为了验证本文所提改进趋近律的可行性, 设计了 PMSM 双闭环调速系统, 如图2所示, 其中电流环的控制器采用传统的 PI 控制, 速度环的控制器采用改进 SMC; 同时建立了 MATLAB/Simulink 仿真模型, 并与传统的 PI 控制器、指数趋近律 SMC 进行比较。

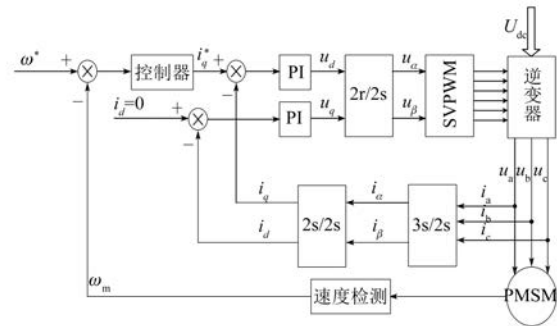


图2 调速系统框图

仿真时电机所用的参数如表1所示<sup>[21]</sup>。改进趋近律滑模速度控制器参数设置为,  $c = 45$ ,  $q = 300$ ,  $k = 1050$ ; 仿真条件为, 电机的给定转速  $\omega^* = 1500$  r/min, 初始的负载转矩  $T_L = 0$  N·m, 在  $t = 0.3$  s 时突加负载  $T_L = 10$  N·m, 仿真时间为 0.6 s。

图3可以看出, 当系统在 0.3 s 加入负载时, 系统的状态变量收敛时间需要约 0.268 s。图4中分别为 PI 控制器、传统的指数趋近律 SMC 和改进趋近律 SMC 下的转速响应曲线。从图4可

表 1 PMSM 参数

| 参数名称                    | 参数值   |
|-------------------------|-------|
| 定子电感 $L_s/mH$           | 8.5   |
| 定子电阻 $R/\Omega$         | 2.875 |
| 磁链 $\psi_f/Wb$          | 0.175 |
| 极对数 $p$                 | 4     |
| 转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$ | 0.003 |

可以看出,传统指数趋近律 SMC 的超调最大,PI 控制器的超调次之,改进趋近律 SMC 的超调最小。图 5 可以看出,在 PMSM 突加负载时,PI 控制器和传统指数趋近律 SMC 的转速波动超过了约 75 r/min,且转速波动较大,而改进趋近律的 SMC 转速波动约 25 r/min,转速的波动小。

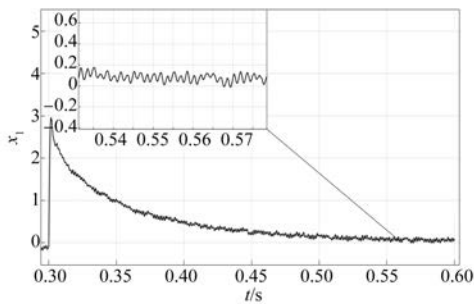


图 3 改进滑模系统状态变量收敛时间

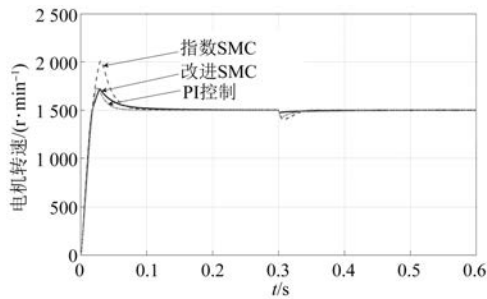


图 4 转速曲线

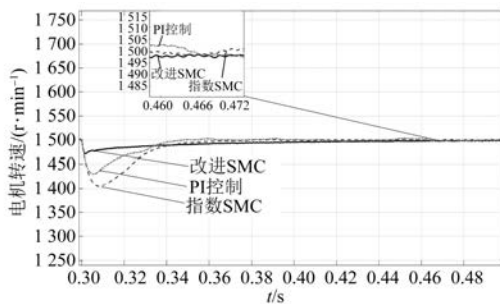


图 5 突加负载的转速曲线

图 6 结果表明,在 PMSM 起动的过程中,电磁转矩在改进趋近律 SMC 作用下快速地到达稳态,在 0.3 s 时突加负载时,改进趋近律 SMC 能在 0.004 s 左右使转矩趋于平稳,而传统的指数趋近律 SMC 和 PI 控制器需用更多的时间使转矩趋于平稳。

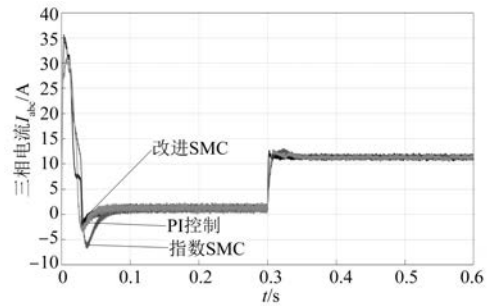


图 6 电磁转矩曲线

当电机的负载在 0.3 s 变化时,由图 7 可以看出使用 PI 控制器时,大约在 0.305 s 电流第一次到达 10 A,由图 8 可以看出使用传统指数 SMC 时,电流大约在 0.307 s 第一次到达 10 A,图 9 表明采用改进趋近律 SMC 时,电流大约在 0.302 s 第一次到达 10 A;在加入负载的 0.05 s 内使用传统指数 SMC 的电流变化最大,使用 PI 控制器的电流变化次之,使用改进趋近律 SMC 的电流变化最小。

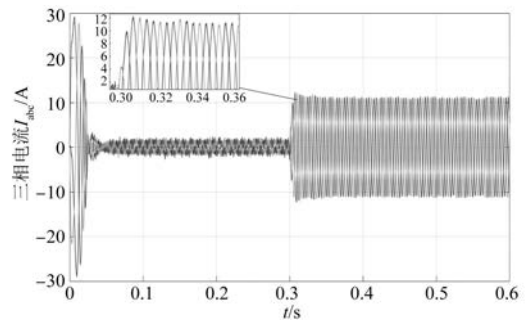


图 7 PI 控制器下的电流波形

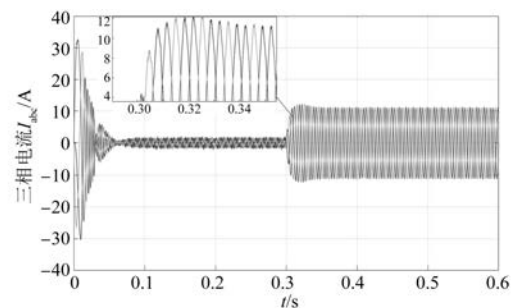


图 8 传统指数 SMC 下的电流波形

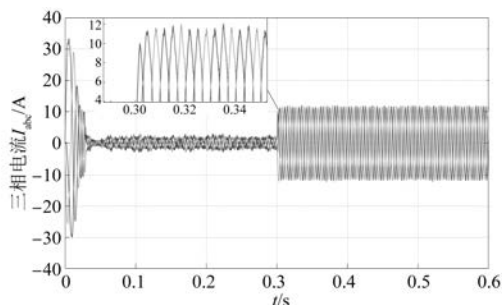


图9 改进指数 SMC 下的电流波形

基于改进趋近律 SMC 比 PI 控制和传统指数趋近律 SMC, 超调小, 鲁棒性和抗干扰强。

## 4 结 语

本文在传统指数趋近律 SMC 的基础上, 提出了一种改进的趋近律 SMC 方法。该趋近律是将  $k\text{sgn}(s)$  等速趋近项, 使用  $k\sqrt{x_1^2+x_2^2}\frac{s}{1+|s|}$  代替, 即使用变速项代替传统的等速项。设计了用改进趋近律的 SMC 代替指数趋近律的 SMC 或 PI 控制。并使用 MATLAB/Simulink 搭建系统的仿真模型进行仿真, 其仿真结果表明改进趋近律 SMC 算法能够减小系统的超调, 对扰动和负载的变化均具有较好的鲁棒性, 改善了 PMSM 速度控制器的控制效果。

## 【参 考 文 献】

[ 1 ] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] 符慧, 左月飞, 刘闯, 等. 永磁同步电机转速环的一种变结构 PI 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 237.

[ 4 ] 郭小定, 柏达, 周少武, 等. 一种新型趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 控制工程, 2018, 25(10): 1865.

[ 5 ] 李峰, 夏超英. 考虑磁路饱和的内置式永磁同步电机电感参数旋转辨识算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 203.

[ 6 ] 张苏英, 王跃龙, 刘慧贤, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电机滑模速度控制[J]. 微特电机, 2020, 48(4): 50.

[ 7 ] 柴青, 刘旭东, 罗巨龙, 等. 基于预测控制和模型参考自适应的 PMSM 电流控制[J]. 电气传动, 2018, 48(3): 17.

[ 8 ] CHOI H H, VU N T, JUNG J. Digital implementation of an adaptive speed regulator for a PMSM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 3.

[ 9 ] 李耀华, 秦玉贵, 赵承辉, 等. 基于模糊控制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 13.

[ 10 ] 刘红利, 张鹏, 朱其新, 等. 基于新型趋近律的积分模糊滑模控制及其在 PMSM 控制中的应用[J]. 航天控制, 2014, 32(6): 81.

[ 11 ] 张冷, 于霜, 丁力. 永磁同步电机的神经网络左右逆协同解耦控制[J]. 控制工程, 2016, 23(10): 1482.

[ 12 ] YU J, SHI P, DONG W, et al. Neural network-based adaptive dynamic surface control for permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(3): 640.

[ 13 ] 周旋, 张海燕. 基于改进型趋近律与负载观测器的永磁同步电机滑模速度控制器设计[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 34.

[ 14 ] SALEM F B, BAHRI I, MAAMRI H, et al. A second-order sliding mode control of switched reluctance motor[J]. Electric Power Components and Systems, 2020, 48(6): 640.

[ 15 ] 张瑶, 马广富, 郭延宁, 等. 一种多幂次滑模趋近律设计与分析[J]. 自动化学报, 2016, 42(3): 466.

[ 16 ] 宗学军, 朱庆雪, 张居华. 基于快速趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 微特电机, 2019, 47(10): 63.

[ 17 ] 张国山, 李现磊. 一种滑模控制新型幂次趋近律的设计与分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(11): 1112.

[ 18 ] GHAFARI-KASHANI A R, FAIZ J, YAZDANPANAH M J. Integration of non-linear  $H_\infty$  and sliding mode control techniques for motion control of a permanent magnet synchronous motor[J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(4): 267.

[ 19 ] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[ 20 ] UTKIN V. Variable structure systems with sliding modes[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(2): 212.

[ 21 ] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.