

# 基于变指数趋近律的永磁同步电机滑模控制\*

林城美<sup>1</sup>, 杨静<sup>2</sup>

(1. 海军装备部驻武汉地区军事代表局驻湘潭地区军事代表室, 湖南湘潭 411101;

2. 湖南湘电动力有限公司, 湖南湘潭 411101)

**摘要:** 为了提升永磁同步电机(PMSM)调速系统的动态品质,提出了一种基于新型变指数趋近律的滑模速度控制算法。基于传统指数趋近律,引入了变指数函数和双曲正切函数,提高了系统趋近速度自适应调节能力和抖振抑制能力。基于新型变指数趋近律,设计了PMSM滑模速度控制器。通过与传统指数趋近律滑模控制算法、PI控制算法对比,仿真试验结果表明,新型滑模速度控制器具有较好的速度跟踪精度和抗扰动能力。

**关键词:** 永磁同步电机; 滑模控制; 变指数趋近律; 转速控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)05-0018-04

doi: 10.12177/emca.2020.018

## Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Variable Exponential Reaching Law\*

LIN Chengmei<sup>1</sup>, YANG Jing<sup>2</sup>

(1. Xiangtan Representatives Office, Naval Wuhan Representatives Bureau, Xiangtan 411101, China;

2. Xiangtan Electric Power Co., Ltd., Xiangtan 411101, China)

**Abstract:** In order to improve the dynamic quality of permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed regulation system, a novel sliding mode speed control algorithm based on variable exponential reaching law is proposed. Based on conventional exponential reaching law, variable exponential function and hyperbolic tangent function are introduced to improve the system adaptive adjustment ability of sliding mode approaching speed and suppress chattering effectively. Based on the novel variable exponential reaching law, the sliding mode speed controller of PMSM is designed. Simulation results show that, compared with conventional sliding mode speed controller and PI controller, the novel sliding mode speed controller can effectively improve speed tracking accuracy and anti-disturbance capability.

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

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有高功率密度、高效率等优点,在工业控制领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。由于PMSM自身的非线性、强耦合性、时

变性等特点,当受到内外部不确定因素影响时,传统PI控制算法难以满足高性能控制的需求<sup>[1]</sup>。

为了实现PMSM的高性能控制,模糊控制<sup>[2]</sup>、预测控制<sup>[3]</sup>、滑模控制<sup>[4-8]</sup>等非线性控制算法已广泛应用于PMSM控制器的设计中。滑模

收稿日期: 2020-02-16; 收到修改稿日期: 2020-03-31

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51825703)

作者简介: 林城美(1986—),男,工程师,研究方向为电力电子与电气传动、电机控制技术。

杨静(1987—),女,工程师,研究方向为电力集成技术。(通信作者)

变结构控制因其对外部干扰和参数变化具有较强鲁棒性、实现简单等优势,广泛应用于电机控制系统。文献[5]提出了一种具有全局鲁棒性的非线性积分滑模控制算法,有效地提高了系统响应速度和抗干扰能力。文献[6]在传统指数趋近律的基础上,引入终端吸引子与系统状态变量的幂函数,对滑模抖振进行了抑制,并提高了趋近速度,但模型对系统参数依赖性较大。文献[7]则通过引入加权积分增益来抑制系统抖振,收敛速度较快,但控制参数较多,设置复杂。文献[8]设计了一种非奇异终端滑模控制器(SMC),能够有效提高收敛速度,但高频抖振问题尚未解决。

为了提高PMSM调速系统的控制性能,本文研究了一种新型变指数趋近律。在传统指数趋近律的基础上,引入变指数项函数,并采用双曲正切函数代替传统的符号函数,优化趋近方式,提升了系统自适应调节能力,收敛速度快、抖振小。基于新型指数趋近律,设计了滑模速度控制器。在PMSM调速系统中,与传统指数趋近律SMC、PI控制器进行对比,仿真验证了所提算法的优越性。

## 1 PMSM 数学模型

PMSM是一个电磁关系复杂、强耦合、多变量的时变非线性系统。为了简化分析过程,假设PMSM满足以下条件:

- (1) 定子绕组三相对称且完全相同;
- (2) 定子绕组电流和转子永磁体产生的气隙磁链均为正弦规律分布;
- (3) 忽略铁心磁饱和效应以及涡流、磁滞损耗,忽略转子的阻尼绕组,忽略绕组之间的互漏感。

在转子旋转坐标系下,PMSM电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \end{bmatrix} \psi_f \quad (1)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$ 为 $d$ 、 $q$ 轴定子电压分量; $R$ 为定子电阻; $p$ 为微分算子; $L_d$ 、 $L_q$ 为 $d$ 、 $q$ 轴定子电感分量; $\omega_e$ 为转子电角速度; $i_d$ 、 $i_q$ 为 $d$ 、 $q$ 轴定子电流分量; $\psi_f$ 为永磁体磁链。

电磁转矩方程为

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

式中: $T_e$ 为电磁转矩; $p_n$ 为电机极对数。

当 $i_d = 0$ ,  $L_d = L_q$ 时,有:

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

运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega_m = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4)$$

式中: $T_L$ 为负载转矩; $B$ 为阻尼系数; $\omega_m$ 为机械角速度; $J$ 为转动惯量。

## 2 新型 SMC 设计

### 2.1 新型趋近律设计

基于趋近律的SMC设计主要包含2部分:

(1) 设计滑模面;(2) 设计SMC的切换函数 $s(x)$ ,确保运动点在短时间内运动至滑模面,使控制系统具有较强的鲁棒性。

高为炳院士等<sup>[9]</sup>提出了趋近律的概念,并设计了一种应用广泛的指数趋近律,其表达式为

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs \quad (5)$$

式中: $s$ 为滑模面; $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数; $\varepsilon$ 为趋近率; $q$ 为趋近系数; $\varepsilon, q > 0$ 。

为了解决指数趋近律固有抖振的问题,改进上述的指数趋近律,得到一种新型的趋近律——变指数趋近律,其表达式为

$$\dot{s} = -\varepsilon \|X\|_p \operatorname{sgn}(s) - qs \quad (6)$$

式中: $X$ 为状态变量; $\|X\|_p$ 为变量 $X$ 的 $p$ 阶范数, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|X\|_p = 0$ ;  $-\varepsilon \|X\|_p \operatorname{sgn}(s)$ 为变速趋近项; $-qs$ 为指数趋近项; $\varepsilon, q, p > 0$ 。

由于引入了变指数项,系统可以自适应地以指数和变速速率趋向滑模面,获得较快的收敛速度。当系统接近滑模面时,指数项 $-qs$ 接近于零,其作用效果变小,变速项 $-\varepsilon \|X\|_p \operatorname{sgn}(s)$ 起主要作用。系统进入滑动模态过程,选取的状态量 $X$ 进入滑模面并且向原点运动,此时变速项 $-\varepsilon \|X\|_p \operatorname{sgn}(s)$ 也随着 $X$ 减小而减小,最终稳定于原点处。当 $X$ 减小为零时,变速项变为零,抖振得到了抑制。

为了进一步抑制到达原点前状态变量运动轨迹的抖振,采用双曲正切函数代替传统符号函数以改善电机控制性能。定义双曲正切函数为

$$\tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) = \frac{e^{\frac{s}{\varepsilon}} - e^{-\frac{s}{\varepsilon}}}{e^{\frac{s}{\varepsilon}} + e^{-\frac{s}{\varepsilon}}} \quad (7)$$

与传统符号函数对比,双曲正切函数可以利用常数  $\varepsilon$  来调整斜率,使双曲正切函数在  $-1 \sim 1$  之间连续变化。当常数  $\varepsilon$  值越大时,函数的斜率越小,曲线越平滑;当  $\varepsilon$  值越小时,双曲正切函数的斜率就越接近符号函数。

### 2.2 滑模转速控制器设计

为了便于控制器的设计,采用基于  $i_d=0$  的转子磁场定向控制策略。首先定义 PMSM 控制系统状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\omega_{ref}$  为电机的参考转速,常数值。

对式(8)进行求导,并结合式(3)和式(4),可得:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - T_L - B\omega_m \right) \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{3p_n \psi_f}{2J} \frac{di_q}{dt} + \frac{B}{J} \left( \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - T_L - B\omega_m \right) \end{cases} \quad (9)$$

定义  $A = (3p_n \psi_f) / (2J)$ ,  $u = di_q/dt$ , 对式(9)进行整理,可得电机控制系统的状态空间表达式为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -A \end{bmatrix} u \quad (10)$$

定义滑模面函数表达式为

$$s = cx_1 + x_2 \quad (11)$$

式中:  $c$  为待设计参数,  $c > 0$ 。

对式(11)进行求导,并代入式(10),可得:

$$\dot{s} = (c - B)x_2 - Au \quad (12)$$

令  $k = c - B$ , 为了保证 PMSM 控制系统具有较好的品质,采用式(6)的趋近律算法,并结合式(7),可以得到控制器表达式为

$$u = \frac{1}{A} \left( kx_2 + \varepsilon \|X\|_p \tanh \frac{s}{\varepsilon} + qs \right) \quad (13)$$

从而,可得 PMSM  $q$  轴参考电流表达式为

$$i_q^* = \frac{1}{A} \int \left( kx_2 + \varepsilon \|X\|_p \tanh \frac{s}{\varepsilon} + qs \right) dt \quad (14)$$

由式(14)可知,电机  $q$  轴参考电流经过积分器的滤波作用,既减小了系统稳态误差,也可以有效削弱抖振,提高了控制器稳定性。

### 2.3 稳定性分析

为了分析新型滑模转速控制器的稳定性,定

义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

对式(15)进行求导,并代入式(11)和式(12),可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -\varepsilon s \|X\|_p \tanh \frac{s}{\varepsilon} - qs^2 \leq 0 \quad (16)$$

当且仅当  $s=0$  时,  $\dot{s}=0$ 。

根据连续系统滑模存在与滑动模态可达性条件<sup>[10]</sup>,该趋近律存在且系统渐进稳定,系统能够达到滑动模态平衡点  $s=0, \dot{s}=0$ 。

## 3 仿真与结果分析

为了验证本文算法的正确性与有效性,基于 MATLAB/Simulink 搭建了 PMSM 矢量控制系统,如图 1 所示。对提出的新型滑模控制算法进行仿真分析,并与传统指数趋近律滑模控制算法、基于 PI 控制算法进行比较。

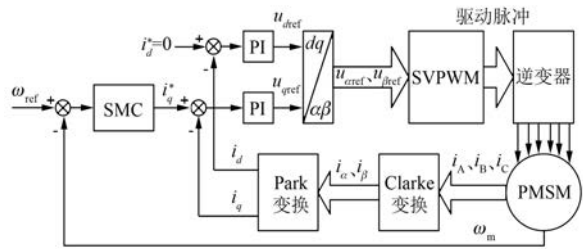


图 1 PMSM 矢量控制系统

仿真系统中 PMSM 参数如表 1 所示。滑模速度控制器的参数设置为:  $c = 1\ 000, q = 275, \varepsilon = 10$ 。

表 1 PMSM 参数

参数名称	参数值
直流母线电压 $U_{dc}/V$	310
定子电阻 $R/\Omega$	0.958
定子电感 $L/mH$	5.25
永磁体磁链 $\psi_f/Wb$	0.182 7
极对数 $p_n$	4
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.003
阻尼系数 $B/(N \cdot m \cdot s)$	0.008

仿真条件设置为:给定转速  $n = 1\ 000$  r/min, 在  $t = 0.2$  s 突变转速至  $1\ 100$  r/min, 仿真时间为  $0.4$  s, 仿真结果如图 2 和图 3 所示。

通过对比仿真结果可知,在稳态负载突变过程中,PI 控制算法下转速和电磁转矩波动较大,

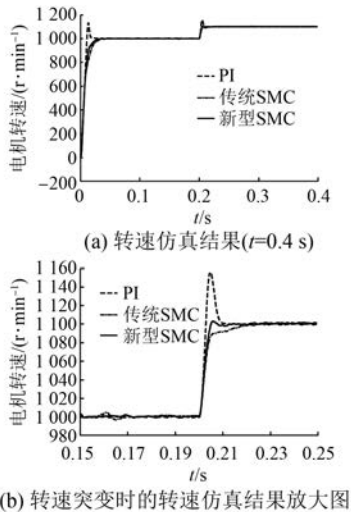


图2 电机转速曲线

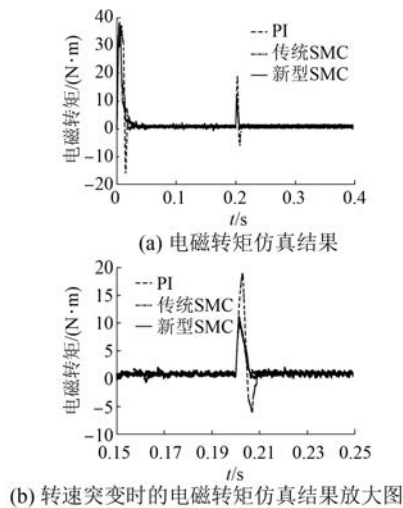


图3 电磁转矩响应曲线

且恢复到稳定状态较慢,动态调节时间较长。SMC下转矩波动小,动态调节时间较短,动态调节性能好。通过仿真结果比较可以看出,相对于其他2种控制算法,新型SMC在动态响应速度和抗扰动能力上均具有较强的鲁棒性。

#### 4 结 语

为了提升PMSM调速系统的动态性能,在传

统指数趋近律的基础上,提出了一种新型变指数趋近律的控制算法。在PMSM矢量控制系统中,设计了基于新型变指数趋近律的滑模速度控制器,并与传统指数趋近律滑模控制算法、基于PI控制算法进行比较。仿真结果表明,新型滑模速度控制器的调速系统性能更为优越,在抑制抖振、速度跟踪、抗外部扰动等方面具有较好的性能。

#### 【参考文献】

- [1] 霍召晗,许鸣珠.基于小波神经网络PID的永磁同步电机转速控制[J].电机与控制应用,2019,46(11):1.
- [2] 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.
- [3] 张永昌,杨海涛,魏香龙.基于快速矢量选择的永磁同步电机模型预测控制[J].电工技术学报,2016,31(6):66.
- [4] 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.
- [5] XU B, SHEN X, JI W, et al. Adaptive nonsingular terminal sliding model control for permanent synchronous motor based on disturbance observer[J]. IEEE Access, 2018, 6: 48913.
- [6] 张晓光,赵克,孙力,等.永磁同步电动机滑模变结构调速系统新型趋近率控制[J].中国电机工程学报,2011,31(24):77.
- [7] 霍召晗,许鸣珠.永磁同步电机滑模调速系统新型趋近律控制[J].电机与控制应用,2019,46(12):16.
- [8] 张月玲,党选举.基于死区迟滞函数的永磁同步直线电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2011,31(3):67.
- [9] GAO W, HUNG J C. Variable structure control of nonlinear systems: a new approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 45.
- [10] UTKIN V. Variable structure systems with sliding modes[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(2): 212.