

考虑滑模抖振和扰动补偿的 永磁同步电机改进滑模控制

赵峰, 罗雯, 高峰阳, 余佳乐

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 730070, 兰州)

摘要: 针对永磁同步电机传统滑模控制系统中存在的滑模抖振、负载扰动、控制精度差等问题,提出了一种基于新型趋近率和改进型扩张状态观测器的永磁同步电机改进滑模控制策略。首先,针对滑模抖振问题,在速度环提出一种新型趋近率,结合积分滑模结构,设计了一种基于新型趋近率的积分滑模速度环控制器,并通过差分方程对新型趋近率的抖振抑制效果进行了分析。其次,针对扰动补偿问题,在扩张状态观测器中加入滑模控制率,以提高其自适应能力,设计了一种改进型扩张状态观测器,可以对扰动转矩进行估计,并将扰动转矩估计值作为前馈信号补偿给滑模速度环控制器;通过李雅普诺夫判据对所提控制策略的稳定性进行了推导说明。仿真结果表明:与传统滑模控制相比,所提控制策略可使电机在启动和受到负载扰动时系统响应良好,有效改善滑模抖振,提高转矩估计精度和系统控制精度。

关键词: 永磁同步电机;新型趋近率;滑模控制;改进型扩张状态观测器

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202006004 **文章编号:** 0253-987X(2020)06-0028-08



OSID 码

An Improved Sliding Mode Control for PMSM Considering Sliding Mode Chattering and Disturbance Compensation

ZHAO Feng, LUO Wen, GAO Fengyang, YU Jiale

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: An improved sliding mode control strategy for permanent magnet synchronous motor (PMSM) using novel reaching law and improved extended state observer is proposed to solve problems of sliding mode chattering, load disturbances and poor control accuracy in traditional sliding mode control system for PMSM. Firstly, a novel reaching law is proposed to solve the problem of sliding mode chattering, and an integral sliding mode controller based on the novel reaching law is designed in speed loop. The chattering suppression effect of the novel reaching law is analyzed by a difference equation. Secondly, a sliding mode control law is added to the extended state observer to solve the problem of disturbance compensation and to improve the adaptive ability of observer, and an improved extended state observer is designed to estimate disturbance torque. Then, the estimated disturbance torque value is served as a feedforward signal to compensate sliding mode controller in speed loop. The stability of the proposed control strategy is proved by Lyapunov criterion. Simulation results, and a comparison with the traditional sliding mode control show that the proposed controller obtains very nice system

收稿日期: 2019-10-21。 作者简介: 赵峰(1966—),男,教授,硕士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1201602)。

网络出版时间: 2020-03-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200306.1344.004.html>

respond, effectively suppresses the sliding mode chattering and improves the estimation accuracy of torque and the control accuracy of system when the motor starts and is subjected to load disturbances.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (PMSM); novel reaching law; sliding mode control; improved extended state observer

永磁同步电机(PMSM)具有机械强度高、可靠性好等优点。近年来,由永磁同步电机驱动的新型城市轨道交通在我国得到大力支持和鼓励发展,这也对电机的控制性能提出了更高要求。永磁同步电机中采用的传统滑模控制存在控制鲁棒性差、滑模抖振明显等问题,同时在永磁同步电机的实际控制过程中,因电机负载转矩无法测量导致电机控制系统的鲁棒性受到严重影响。为提高永磁同步电机系统性能,各国学者广泛研究滑模控制策略^[1-9]。

文献[10-12]提出采用一种新型指数趋近率对滑模的抖振进行抑制,但该系统控制结构单一,且当电机受到外部扰动时,PMSM 转速和转矩会出现一定的超调和抖动。文献[13]针对负载转矩估计问题设计了龙伯格线性观测器,但该类观测器的观测精度较低,且不具备自适应能力。文献[14]提出了基于锁相环(PLL)的双滑模直接转矩控制策略,主要针对传统永磁同步电机直接转矩控制(DTC)中的磁链脉动进行改善,但对转子位置补偿精度不足,转速观测值存在明显抖振和超调,误差较大。为减少滑模抖振现象,文献[15-17]设计了离散型高阶终端滑模面,在受到未知干扰的情况下,在有限时间内可使系统状态到达滑模面。文献[18-20]设计了一种新型非奇异快速终端滑模面,解决了传统滑模控制中由于微分信号产生的噪声问题,可以有效平滑控制信号,在一定程度上抑制了滑模抖振问题,但该结构过于复杂,参数过多,控制难度较高。文献[21-22]设计了一种扩张状态观测器估计负载转矩,但缺乏自适应能力,对负载扰动的敏感度不足。文献[23-24]设计了基于模型参考自适应的电机参数辨识系统,有效降低了电机运行时参数变化对控制系统性能的影响。

针对上述文献中存在的滑模抖振抑制效果差、负载扰动估计精度差、自适应能力差等问题,本文以基于 $i_d=0$ (i_d 为 d 轴的定子电流)的表贴式永磁同步电机矢量控制系统为背景,在速度环提出一种基于分段函数的新型趋近率来抑制滑模固有的抖振问题并提高系统的动态响应性能,设计了基于新型趋近率的积分滑模结构以提高控制系统的全局鲁棒

性。为进一步提高滑模控制对负载扰动的自适应能力,在传统扩张状态观测器的基础上,加入了滑模控制率,设计了改进型扩张状态观测器来估计扰动转矩的变化,将扰动转矩估计值作为前馈信号补偿给滑模控制器,同时分析了滑动模态到达条件和扰动量估计值的收敛情况,确定了改进型扩张状态观测器的约束条件,设计了基于新型趋近率和改进型扩张状态观测器的永磁同步电机改进滑模控制策略。最终,通过仿真实验验证了控制策略的优越性。

1 滑模控制器

1.1 PMSM 数学模型

在不影响电机性能的前提下,假定定子铁心不饱和,转子空间磁场正弦分布,不计磁滞和涡流损耗,则 PMSM 控制系统的电压方程在 dq 坐标系下表述为

$$\left. \begin{aligned} u_d &= Ri_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q &= Ri_q + \omega_e L_q i_q + \omega_e \psi_f + L_q \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: i_d 、 i_q 分别是定子电流在 d 轴和 q 轴上的分量; L_d 、 L_q 分别是定子电感在 d 轴和 q 轴上的分量; u_d 、 u_q 分别是定子电压在 d 轴和 q 轴上的分量; R 是电机定子绕组的电阻; ω_e 是电机的电角速度; ψ_f 是永磁磁链。

对于表贴式永磁同步电机,转矩方程和运动方程分别为

$$\left. \begin{aligned} T_e &= 3n_p \psi_f i_q / 2 \\ \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_e}{dt} &= T_e - T_L - B\omega \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: T_e 是电机电磁转矩; n_p 是极对数; ω 是电机的机械角速度, $\omega = \omega_e / n_p$; B 是阻尼系数; J 是转动惯量; T_L 是负载转矩。

1.2 新型趋近率

在指数趋近率($\dot{s} = -k \operatorname{sgn}(s) - qs$)的基础上,设计了一种基于分段函数的新型趋近率

$$\left. \begin{aligned} \dot{s} &= -f(x_1) \operatorname{sgn}(s) - qs \\ f(x_1) &= \begin{cases} k/\epsilon, & |x_1| > \delta \\ \frac{k|x_1|}{|x_1|+1}, & |x_1| \leq \delta \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: x_1 是系统状态变量; s 是滑模面; k, q 是趋近率系数, 均大于 0; $\delta > 0$; $0 < \epsilon < 1$ 。

从这种新型趋近率可以看出, 当系统远离滑模面时, 明显有 $k/\epsilon > k$, 则滑模趋近速度大于指数趋近率; 当系统轨迹接近滑模面时, $|x_1|$ 逐渐趋近 0, 即 $f(x_1)$ 逐渐趋近 0, 可以有效抑制滑模抖振, 因此式(3)中的新型趋近率可以动态适应系统状态变量 $|x_1|$ 的变化。

为验证本文提出的新型趋近率的稳定性, 定义李雅普诺夫方程为

$$V = 1/2s^2 \quad (4)$$

对式(4)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} &= s[-f(x_1)\text{sgn}(s) - qs] = \\ &= -|s| |f(x_1) - qs| \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

由李雅普诺夫稳定性判别可知, 本文提出的新型趋近率是稳定的。

1.3 新型趋近率抖振分析

当状态轨迹接近滑模面 ($|x_1| < \delta$) 时, 新型趋近率可以表示为

$$\dot{s} = -\frac{k|x_1|}{|x_1|+1}\text{sgn}(s) - qs \quad (6)$$

对趋近率进行离散化处理, 可得

$$s(n+1) - s(n) = -\frac{k|x_1|}{|x_1|+1}\text{sgn}[s(n)] - qs(n)T \quad (7)$$

式中: n 为周期数; T 为系统采样周期。

假设当 $s > 0$ 时, 系统轨迹到达滑模面, 则有 $s(n) = 0^+$, 故在下一个周期, 有

$$s(n+1) \approx -\frac{k|x_1|}{|x_1|+1}T \quad (8)$$

假设当 $s < 0$ 时, 系统轨迹到达滑模面, 则有 $s(n) = 0^-$, 故在下一个周期, 有

$$s(n+1) \approx \frac{k|x_1|}{|x_1|+1}T \quad (9)$$

则新型趋近率的离散型切换带带宽可表述为

$$\Delta = \frac{k|x_1|}{|x_1|+1}T \quad (10)$$

同理, 指数趋近率的切换带带宽可表述为

$$\Delta_e = k_e T \quad (11)$$

通过观察可知, 式(11)中的带宽为一个常数, 表明指数趋近率系统无法趋近原点, 而是在 $-k_e T$ 和 $k_e T$ 之间形成一个抖振。

通过观察可知, 式(10)中新型趋近率的切换带带宽随着系统状态变量 $|x_1|$ 的减小而减小, 最终趋近原点。因此, 本文提出的新型趋近率的抖振被有

效抑制, 其中指数趋近率和新型趋近率的状态轨迹分别如图 1 和图 2 所示。

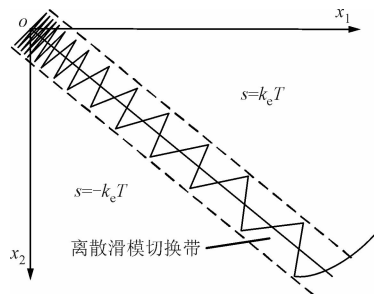


图 1 指数趋近率的状态轨迹

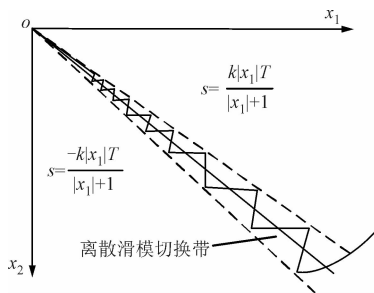


图 2 新型趋近率的状态轨迹

1.4 基于新型趋近率的速度环设计

在速度环控制出现扰动的情况下, 需要保证转速的精确控制, 故设计系统状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega \\ x_2 = \int_{-\infty}^t (\omega^* - \omega) dt \end{cases} \quad (12)$$

式中: ω^* 为给定电机的机械角速度。为提高系统动态性能, 在滑模面设计中加入系统状态变量的积分结构。相比于微分滑模面, 积分滑模面可有效减小高频噪声的干扰, 故根据上述滑模设计方法, 选取积分滑模面为

$$s = x_1 + cx_2 \quad (13)$$

式中: s 为积分滑模面; c 为常数。

对式(13)求导可得

$$\dot{s} = -\dot{\omega} + cx_1 \quad (14)$$

在实际系统中, 电机内部参数变化、摩擦系数未知和负载变化等无法测量的扰动, 会严重影响控制系统的鲁棒性, 故须考虑外部扰动对系统的影响。根据式(2)可得

$$\dot{\omega} = a_1 i_q - b_1 T_L - c_1 \omega + d_1 = a_1 i_q - c_1 \omega + d_1 \quad (15)$$

式中: $a_1 = 3n_p \phi_f / 2J$; $b_1 = 1/J$; $c_1 = B/J$ 。因负载转矩无法测量, 故可将其看作扰动量, d_1 为其他未知外部扰动, d_1 表示总扰动转矩, $d_1 = -b_1 T_L + d_1$ 。

将式(3)和式(15)代入式(14)可得

$$-a_1 i_q + c_1 \omega - d_t + c x_1 = -f(x_1) \operatorname{sgn}(s) - q s \quad (16)$$

因此,滑模控制器输出为

$$i_q^* = 1/a_1 [c x_1 + c_1 \omega - d_t + f(x_1) \operatorname{sgn}(s) + q s] \quad (17)$$

由于式(17)包含未知的扰动量 d_t , 因此无法通过式(17)直接得出滑模控制器输出, 需要扰动量 d_t 进行估计。

2 扩张状态观测器的改进

2.1 改进型扩张状态观测器的设计

在滑模控制系统中, 负载转矩、摩擦系数和电机内部参数变化无法测量, 会作为一种扰动在控制系统中存在, 如果它们无法得到有效及时地补偿, 将严重影响控制系统的鲁棒性。本文在传统扩张状态观测器的基础上加入滑模控制率, 提出一种改进型扩张状态观测器对扰动转矩 d_t 进行在线估计, 并将扰动估计值补偿给式(17)中的滑模控制器。

根据式(15), 可将扰动量 d_t 作为扩张系统状态变量, 故得到扩张状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega} &= a_1 i_q - c_1 \omega + d_t \\ \dot{d}_t &= r_t \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: r_t 为系统扰动量 d_t 的变化率。

根据式(18), 设计改进型扩张状态观测器为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{\omega}} &= a_1 i_q - c_1 \hat{\omega} + \hat{d}_t + u_{\text{smo}} \\ \dot{\hat{d}_t} &= g u_{\text{smo}} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: $\hat{\omega}$ 是机械角速度 ω 的估计值; $\hat{d}_t$ 是扰动量 d_t 的估计值; $u_{\text{smo}} = \mu \operatorname{sgn}(s_1)$, μ 是观测器参数(后续会进行参数分析), 且是可调负数, s_1 为滑模面, $s_1 = \hat{\omega} - \omega$; g 是滑模参数(后续会进行参数分析)。

通过式(18)和式(19), 可以得到误差方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_1 &= -c_1 e_1 + e_2 + u_{\text{smo}} \\ \dot{e}_2 &= g u_{\text{smo}} - r_t \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: $e_1 = \hat{\omega} - \omega$ 是机械角速度的估计误差; $e_2 = \hat{d}_t - d_t$ 是扰动量的估计误差。滑模面 $s_1 = e_1$ 。

改进型扩张状态观测器的结构图如图3所示。

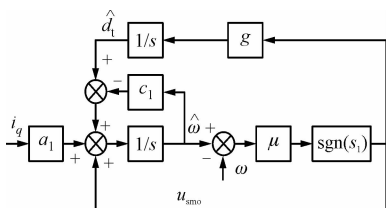


图3 改进型扩张状态观测器的结构图

2.2 改进型扩张状态观测器的参数分析

定理1 滑动模态到达条件可以等价为

$$s \dot{s} < 0 \quad (21)$$

参数 μ 应在满足滑动模态到达条件的前提下进行选择, 即满足式(21)的要求。根据式(20)和式(21)可以将观测器的滑动模态到达条件表述为

$$\begin{aligned} e_1 \dot{e}_1 &= e_1 (-c_1 e_1 + e_2 + u_{\text{smo}}) = \\ e_1 [(e_2 - c_1 e_1) + \mu \operatorname{sgn}(e_1)] &< 0 \end{aligned} \quad (22)$$

根据 e_1 取值的正负, 可以将式(22)表述为

$$e_1 \dot{e}_1 = \begin{cases} e_1 [(e_2 - c_1 e_1) + \mu] < 0, & e_1 > 0 \\ e_1 [(e_2 - c_1 e_1) - \mu] < 0, & e_1 < 0 \end{cases} \quad (23)$$

根据式(23)可以求得

$$\mu < -|e_2 - c_1 e_1| \quad (24)$$

因此, 可以将参数 μ 表述为

$$\mu = -n |e_2 - c_1 e_1|, \quad n > 1 \quad (25)$$

式中: n 是滑动模态到达条件的影响因子, 在实际仿真实验中, $n=2$ 就可满足滑动模态到达条件。

因此, 参数 μ 可以使观测器状态变量到达滑模面, 并维持在滑模面之上, 可以得到

$$e_1 = \dot{e}_1 = 0 \quad (26)$$

将式(26)代入式(20)可得

$$\left. \begin{aligned} e_2 &= -u_{\text{smo}} \\ \dot{e}_2 &= g u_{\text{smo}} - r_t \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式(27)可改写为

$$\dot{e}_2 + g e_2 + r_t = 0 \quad (28)$$

根据式(28)可得, 扰动估计误差为

$$e_2 = e^{-g t} \left(c_2 + \int r_t e^{g t} dt \right) \quad (29)$$

式中: c_2 为常数。为确保扰动估计误差可以收敛到0, 滑模参数 g 的取值应该满足

$$g > 0 \quad (30)$$

此外可以看出, 扰动估计误差的收敛速度与参数 g 的取值直接相关, 且通过式(25)和式(29)可以看出, 参数 μ 和参数 g 的选取是改进型扩张状态观测器的唯一约束条件。

2.3 基于新型趋近率和改进型扩张状态观测器的速度环控制器

为了提高滑模控制系统的控制精度, 在负载转矩等外部扰动无法测量的情况下, 设计了改进型扩张状态观测器, 完成了改进型扩张状态观测器与滑模速度环控制器相结合的控制方法。在这种控制方法中, 将扰动量 d_t 估计值作为滑模速度环的前馈补偿, 因此, 滑模控制器输出可以表述为

$$i_q^* = 1/a_1[cx_1 + c_1\omega - \hat{d}_t + f(x_1)\text{sgn}(s) + qs]$$

(31)

由式(31)可知,本文滑模控制器可以做到对外部扰动的在线估计与补偿,可以有效提高滑模系统控制精度和鲁棒性。本文提出的改进控制策略的系统控制框图如图 4 所示。

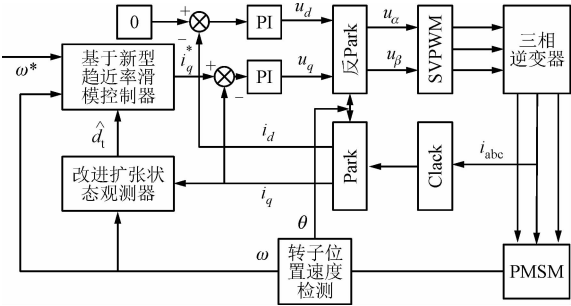


图 4 本文改进控制策略的系统控制框图

为验证本文提出控制系统的稳定性,结合式(14)~(16),对式(4)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(-\dot{\omega} + cx_1) = s[-a_1 i_q - d_t + c_1\omega + cx_1] = \\ &= -|s| f(x_1) - qs^2 \leqslant 0 \end{aligned}$$

(32)

由李雅普诺夫稳定性判别可知,本文提出的控制系统是稳定的。

3 仿真实验

通过 MATLAB/Simulink 仿真来验证本文提出的控制策略的合理性和优越性。控制方案采取基于 $i_d=0$ 的矢量控制。将传统滑模控制(SMC)和本文控制策略(改进策略)进行仿真对比,仿真实验中永磁同步电机参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机参数

参数	数值
额定转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 200
极对数 n_p	4
定子电感 L_s/mH	11.5
定子电阻 R/Ω	3.4
磁链 ϕ_t/Wb	0.105
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.004
阻尼系数 $B/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0.008

传统滑模控制采用指数趋近率,速度环滑模参数为: $k=200,q=300$ 。本文控制策略的电流环 PI 与传统滑模控制相同,速度环滑模参数为: $k=25,\delta=10,q=260,\epsilon=0.1$ 。

图 5 为在空载状态下,使用指数趋近率和基于新型趋近率的滑模速度控制器的滑模系统运动过程

对比。由图 5 可以看出,相比于指数趋近率,新型趋近率的趋近速度有明显提升,趋近滑模面所需时间明显缩短。

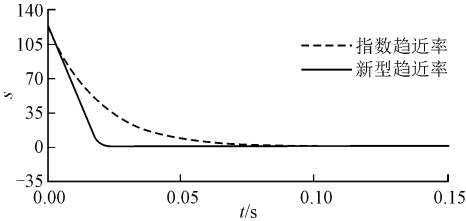


图 5 空载状态下 2 种趋近率滑模趋近过程曲线

为检验本文控制策略的启动性能和扰动补偿性能,电机采用空载启动方式,给定转速 1 200 r/min;在 0.1 s 时将负载转矩调高到 5.0 N·m,0.2 s 时将负载转矩降低到 2.5 N·m。图 6 为改进型扩张状态观测器转矩的观测值和实际值对比,可以看出,扩张滑模状态观测器能够快速准确地估计出扰动量,有效补偿给滑模控制器。

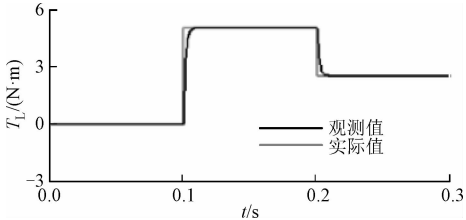


图 6 改进型扩张状态观测器转矩的观测值与实际值对比

图 7 和图 8 为 2 种控制策略的 d,q 轴电流响应曲线,可以看出,相比与传统滑模控制,改进型扩张状态观测器补偿后改进策略的 d,q 轴电流响应在启动时超调时间明显缩短,且 d,q 轴电流响应基本不受负载扰动的影响,能够快速追踪负载转矩的变化。

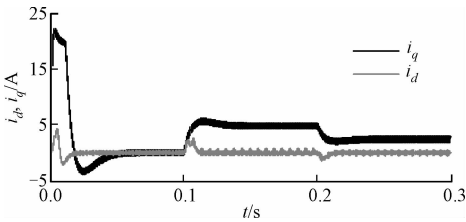


图 7 传统滑模控制的 d,q 轴电流响应曲线

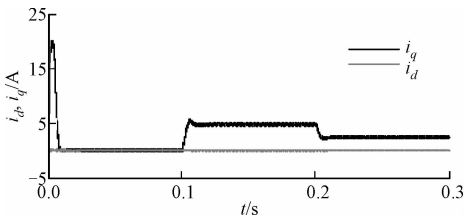


图 8 改进策略的 d,q 轴电流响应曲线

图 9 为 2 种控制策略的启动转速响应对比,可以看出,相比于传统滑模控制,改进策略在启动时,转速响应速度有明显提升,且无明显超调。

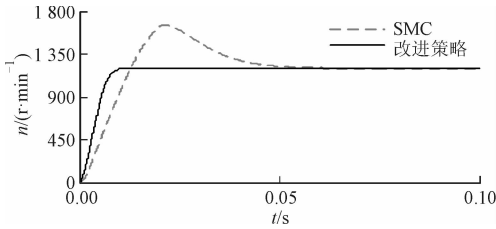


图 9 2 种控制策略启动转速响应对比曲线

图 10 为 2 种控制策略在负载转矩突变时的转速响应曲线,可以看出,改进型扩张状态观测器能够准确地估计出扰动量,并有效补偿给滑模控制器,使转速响应在负载转矩变化时,能够快速恢复稳态,且有效降低转速波动及超调。

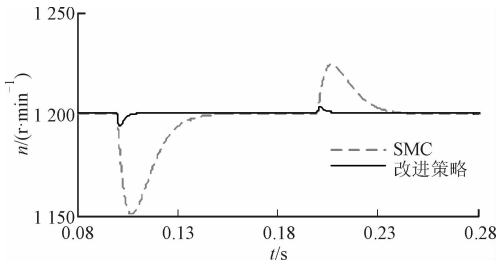


图 10 负载扰动时 2 种控制策略转速响应对比曲线

图 11 和图 12 为 2 种控制策略的 a 相电流响应曲线,可以看出,相比于传统滑模控制,改进策略在启动时,启动电流降低,且进入稳态时间明显缩短,受到扰动时,整体电流响应更加稳定且更接近正弦波。

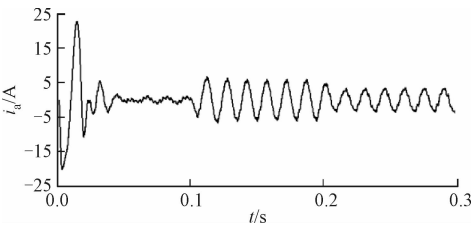


图 11 传统滑模控制的 a 相电流响应曲线

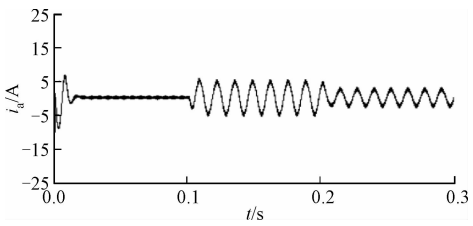


图 12 改进策略的 a 相电流响应曲线

为进一步观测 d 、 q 轴电流的脉动情况,在 0.3 s 后将负载转矩降低到 0。图 13 和图 14 为 2 种控制策略在 0.3 s 后的 d 、 q 轴电流图像对比,可以看出,

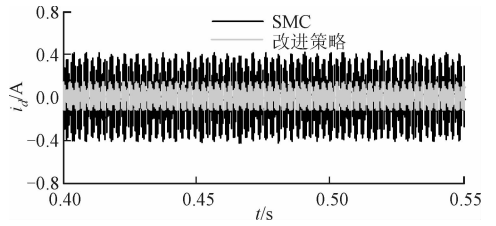


图 13 d 轴电流响应曲线

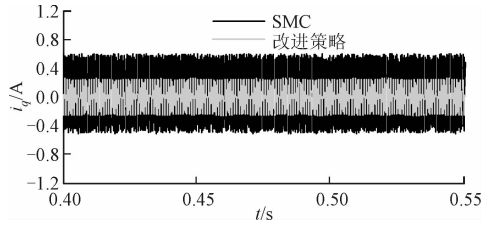


图 14 q 轴电流响应曲线

改进策略的 d 、 q 轴电流在稳态时,脉动明显小于传统滑模控制。

4 结 论

本文设计了基于新型趋近率和扰动转矩补偿的永磁同步电机改进滑模控制策略。首先,设计了电机控制系统中的速度环,提出了新型趋近率,以提升滑模趋近速度和抑制滑模抖振,对滑模抖振的抑制效果进行了严格分析论证,并设计了积分滑模结构,可进一步减小滑模抖振和高频噪声的干扰,实现了对转速的精确控制。

其次,为了对外部扰动进行补偿和提高传统扩张状态观测器的自适应能力,设计了改进型扩张状态观测器,对扰动转矩进行估计,并将其估计值作为一种前馈信号补偿给滑模控制器,以求做到对外部扰动的在线估计与补偿,并对观测器滑动模态到达条件和扰动误差收敛情况进行了严格论证分析。

最后,通过与传统滑模控制策略进行仿真实验对比,验证了本文改进控制策略的优越性。

参考文献:

[1] 王坤,王建美,王芳,等. 非匹配不确定系统的滑模控制及在电机控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36(1): 143-150.
WANG Kun, WANG Jianmei, WANG Fang, et al. Sliding mode control for nonlinear system with mismatched uncertainties and application in motor control [J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(1): 143-150.
[2] 邹权,钱林方,蒋清山. 永磁同步电机伺服系统的自适应模糊滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32

- (6): 817-822.
- ZOU Quan, QIAN Linfang, JIANG Qingshan. Adaptive fuzzy sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor servo system [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(6): 817-822.
- [3] LIN F J, HUNG Y C, RUAN Kaichun. An intelligent second-order sliding-mode control for an electric power steering system using a wavelet fuzzy neural network [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2014, 22(6): 1598-1611.
- [4] 滕青芳, 柏建勇, 朱建国, 等. 基于滑模模型参考自适应观测器的无速度传感器三相永磁同步电机模型预测转矩控制 [J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(2): 150-161.
- TENG Qingfang, BAI Jianyong, ZHU Jianguo, et al. Sensorless model predictive torque control using sliding-mode model reference adaptive system observer for permanent magnet synchronous motor drive systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(2): 150-161.
- [5] 吴荒原, 王双红, 辜承林, 等. 内嵌式永磁同步电机改进型解耦控制 [J]. *电工技术学报*, 2015, 30(1): 30-37.
- WU Huangyuan, WANG Shuanghong, GU Chenglin, et al. An improved decoupling control strategy for the IPMSMS [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(1): 30-37.
- [6] VERRELLI C, BIFARETTI S, CARFAGNA E, et al. Speed sensor fault tolerant PMSM machines: from position-sensorless to sensorless control [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 5(4): 3946-3954.
- [7] 程祎, 杜钦君, 张铭, 等. 三次谐波抑制的五相永磁电机容错控制策略及仿真分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(2): 95-102, 136.
- CHENG Yi, DU Qinjun, ZHANG Ming, et al. A fault-tolerant control strategy and simulation analysis of five-phase permanent magnet motor with third-harmonic suppression [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(2): 95-102, 136.
- [8] 王悍泉, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(6): 104-109.
- WANG Hanxiao, LIU Ling, WU Huawei. A sensorless permanent magnet synchronous motor control strategy for improved sliding mode observers with stator parameters identification [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(6): 104-109.
- [9] LIU Jing, LI Hongwen, DENG Yongting. Torque ripple minimization of PMSM based on robust ILC via adaptive sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(4): 3655-3671.
- [10] HU Quanlong, LIU Ling, YANG Hang. A sliding mode speed controller based on novel reaching law of permanent magnet synchronous motor system [C] // *Proceedings of 2017 Chinese Automation Congress*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 954-958.
- [11] LENG Jianwei, MA Chang. Sliding mode control for PMSM based on a novel hybrid reaching law [C] // *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 3006-3011.
- [12] MA Haifeng, WU Jianhua, XIONG Zhenhua. Discrete-time sliding-mode control with improved quasi-sliding-mode domain [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10): 6292-6304.
- [13] 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): 431-437.
- LI Zheng, HU Guangda, CUI Jiarui, et al. Sliding-mode Variable Structure Control with Integral Action for Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(3): 431-437.
- [14] 潘峰, 闫庚龙, 苑伟华, 等. 基于双滑模的永磁同步电机直接转矩控制 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(S2): 427-433.
- PAN Feng, YAN Genglong, YUAN Weihua, et al. Research on direct torque control for permanent magnet synchronous motor based on the double sliding mode [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(S2): 427-433.
- [15] GORP J V, DEFOORT M, DJEMAI M, et al. Fault detection based on higher-order sliding mode observer for a class of switched linear systems [J]. *IET Control Theory*, 2015, 9(15): 2249-2256.
- [16] RATH J J, DEFOORT M, KARIMI H R, et al. Output feedback active suspension control with higher order terminal sliding mode [J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2017, 64(2): 1392-1403.
- [17] SUN Guanghui, MA Zhiqiang, YU Jinyong. Discrete-time fractional order terminal sliding mode tracking control for linear motor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3386-3394.
- [18] 侯利民, 蔡柯, 李勇, 等. 无速度传感器 PMSM 混沌运动的非奇异快速终端滑模控制 [J]. *信息与控制*, 2016, 45(6): 666-670.
- HOU Limin, CAI Ke, LI Yong, et al. Nonsingular

- fast terminal-sliding-mode control of chaotic motion in PMSM based on speed sensorless [J]. Information and Control, 2016, 45(6): 666-670.
- [19] 常雪剑, 彭博, 刘凌, 等. 新型非奇异终端滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 85-91, 99.
- CHANG Xuejian, PENG Bo, LIU Ling, et al. A novel nonsingular terminal sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 85-91, 99.
- [20] 常雪剑, 刘凌, 崔荣鑫. 永磁同步电机非奇异快速终端可变边界层滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 53-59.
- CHANG Xuejian, LIU Ling, CUI Rongxin. A nonsingular fast terminal sliding mode controller with varying boundary layers for permanent magnet synchronous motors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 53-59.
- [21] 陈哲, 薛钊, 方海伊, 等. 基于自适应逆控制的永磁同步电机调速系统 [J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(4): 824-829.
- CHEN Zhe, XUE Zhao, FANG Haiyi, et al. Permanent magnet synchronous motor speed control system based on adaptive inverse control method [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(4): 824-829.
- [22] 边疆, 牛聪, 姚家琛. 基于 ESO 自抗扰的永磁同步电机逆控制 [J]. 控制工程, 2019, 26(7): 1413-1418.
- BIAN Jiang, NIU Cong, YAO Jiachen. Inverse control of permanent magnet synchronous motor based on ESO self anti-perturbation [J]. Control Engineering of China, 2019, 26(7): 1413-1418.
- [23] DONG-MYUNG L. On-line parameter identification of SPM motors based on MRAS technique [J]. International Journal of Electronics, 2017, 104(4): 593-607.
- [24] KIVANC O C, OZTURK S B. Sensorless PMSM drive based on stator feedforward voltage estimation improved with MRAS multi-parameter estimation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3): 1326-1337.

(编辑 亢列梅)

(上接第 16 页)

- [18] COLLINS T. Active acoustic touch interface [J]. Electronics Letters, 2009, 45(20): 1055-1056.
- [19] ZHANG Cheng, XUE Qiuyue, WAGHMARE A, et al. Finger ping: recognizing fine-grained hand poses using active acoustic on-body sensing [C] // Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York, USA: ACM, 2018: 20182105213008.
- [20] LUO Gan, CHEN Mingshi, LI Ping, et al. Soundwrite ii: ambient acoustic sensing for noise tolerant device-free gesture recognition [C] // 2017 IEEE 23rd International Conference on Parallel and Distributed Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 121-126.
- [21] 胡玉勇, 吕明, 王时英. 关于敲击法测量材料固有频率及弹性模量的研究 [J]. 机械工程与自动化, 2010, 5(10): 88-89.
- HU Yongjun, LÜ Ming, WANG Shiyong. Research on measuring natural frequency and elastic modulus of materials by percussion [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2010, 5(10): 88-89.
- [22] 李锁斌, 窦益华, 陈天宁, 等. 局域共振型周期结构振动带隙形成机理 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 169-175, 182.
- LI Suobin, DOU Yihua, CHEN Tianning, et al. Formation mechanisms of vibration band gaps in locally resonant periodic structures [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 169-175, 182.
- [23] 张军锋. 手动变速器齿轮敲击噪声的实验分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 14-16.
- [24] 白杨. 基于数据挖掘的 TDOA 定位技术 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015: 17-25.
- [25] MULLER A C, GUIDO S. Introduction to machine learning with python: a guide for data scientists [M]. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2016: 33-123.

(编辑 刘杨)