

永磁同步电机新型趋近律滑模控制策略

王要强¹, 朱亚昌¹, 冯玉涛¹, 田兵²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 为了提高永磁同步电机(PMSM)调速系统的动态性能, 提出一种新型趋近律滑模控制策略。所提出的新型趋近律在幂次趋近律的基础上加入指数项, 并且在幂次项指数中引入系统状态变量使幂次项指数与系统状态关联, 解决幂次趋近律在远离滑模面时趋近速度慢的问题, 同时使系统能平滑进入滑模面。然后, 基于扩张状态观测器观测系统负载扰动, 并将观测值前馈补偿至滑模控制器, 降低负载扰动对系统的影响, 提高系统的鲁棒性。仿真与实验结果表明, 所提出的新型趋近律滑模控制策略能够有效地提高系统的动态性和鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机; 滑模控制; 新型趋近律; 鲁棒性

中图分类号: TM 341

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202010005

0 引言

永磁同步电机 PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) 具有结构简单、体积小、可靠性高等优点, 因而被广泛应用于仪器仪表、机器人、航空航天等领域。目前, PMSM 调速系统中通常采用比例积分 PI (Proportional Integral) 控制对转速进行调节, 该控制器算法简单、参数调整方便。然而, PMSM 是一个多变量、强耦合、非线性的复杂对象。传统 PI 控制虽能在一定范围内满足控制要求, 但当电机内部参数变化或系统受到外部扰动时, 将难以满足高性能控制的要求^[1-3]。

近年来, 为了解决传统 PI 控制在 PMSM 高性能控制领域存在的不足, 国内外学者做了大量研究, 一些现代控制理论研究成果被应用于 PMSM 调速系统中, 如模糊控制、自抗扰控制、滑模控制、预测控制等^[4-7]。其中, 滑模控制因具有对外部干扰及参数摄动不敏感、鲁棒性强、响应快速等优点逐渐成为研究热点, 并在电机调速系统中得到成功应用^[8-10]。文献[11]将滑模控制应用到直接转矩控制系统中, 有效减小了转矩和磁链脉动。文献[12]在传统指数趋近律的基础上加入终端吸引子, 实现了系统的全局快速收敛, 但参数调节较为复杂。文献[13]用分数阶次的符号函数取代传统滑模趋近律中的符号函数, 提高了系统趋近速度的同时抑制了系统的抖振, 但

存在设计复杂、稳态误差较大等问题。文献[14]基于传统指数趋近律设计了一种变指数趋近律, 提高了系统的鲁棒性。文献[15]加入系统状态变量和滑模函数幂次项, 该幂次项以切换函数绝对值的取值为界, 使趋近律可以表示为 2 种不同形式, 能够有效抑制滑模的固有抖振。

另外, 在滑模控制中, 系统的强抗扰性是通过增大切换增益来实现的。然而, 较大的增益在提高系统抗扰性、滑模收敛速度的同时, 也会造成系统抖振增强。文献[16]利用边界层可变的的双曲正切函数代替传统滑模观测器中的符号函数, 一定程度上削弱了系统抖振。文献[17]通过引入扰动观测器前馈补偿负载扰动, 减小了控制器中不连续量的幅值, 从而实现在提高系统抗扰性的同时削弱系统抖振。文献[18]基于无差拍电流预测控制的参数稳定性分析, 提出采用改进滑模指数趋近律和扰动观测器相结合的方法补偿电机参数扰动所引起的参考电压变化, 提升了系统的参数鲁棒性。

基于上述研究, 为了提高 PMSM 调速系统动态性能, 首先提出一种新型趋近律, 该趋近律在传统幂次趋近律的基础上, 加入指数项并且在幂次项指数中引入系统状态变量。以幂次项指数取值 1 作为分界点, 该趋近律可以表示为 2 种趋近形式, 在增大系统趋近速度的同时减小系统抖振。然后, 为了提高系统抗扰动性能, 引入扩张状态观测器 ESO (Extended State Observer) 对系统扰动进行观测, 并将观测值前馈补偿至滑模控制器, 进一步提高系统鲁棒性。最后, 通过仿真和实验证明了所提控制策略能有效地提高 PMSM 调速系统的动态特性和鲁棒性。

1 滑模趋近律

1.1 传统幂次趋近律

为了提高滑模控制的动态品质, 高为炳院士提

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507155); 河南省高等学校青年骨干教师项目(2019GGJS011); 郑州大学研究生教育研究项目(YJSJY201964)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507155), the Youth Key Teacher Project of Henan Higher Educational Institution(2019GGJS011) and the Graduate Education Research Project of Zhengzhou University(YJSJY201964)

出趋近律概念,并设计幂次趋近律,如式(1)所示。

$$\frac{ds}{dt} = -\varepsilon |s|^\rho \operatorname{sgn}(s) \quad \varepsilon > 0, 0 < \rho < 1 \quad (1)$$

其中, ε 为大于零的常数; s 为滑模面; ρ 为幂次项指数。

当初始状态 $s(0) > 0$ 且 t 时刻 $s(t) = 0$ 时, 对式(1)等号两边求积分, 可得系统到达滑模面所需时间为:

$$t = \frac{s(0)^{1-\rho}}{\varepsilon(1-\rho)} \quad (2)$$

需要指出的是, 虽然幂次趋近律可在有限时间内到达滑模面, 但在系统状态远离滑模面的趋近阶段存在趋近速度小、运动时间长的问题, 限制了幂次趋近律的应用。由式(2)可知, 参数 ρ 的值影响系统到达滑模面的时间。增大 ρ 可以提高系统在远离滑模面时的趋近速度, 但会导致接近滑模面时趋近速度过小。如果能将幂次项指数设为可变量, 使其值与系统状态到滑模面的距离大小相关, 在远离滑模面时 ρ 取较大值, 而在接近滑模面时 ρ 取较小值, 可解决因 ρ 取值引起的上述矛盾问题。

1.2 新型趋近律的提出

为了克服传统幂次趋近律的缺点, 本文对其进行改进, 提出一种新型趋近律:

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = -\varepsilon |s|^\delta \operatorname{sgn}(s) - ks, \delta = \alpha + (\lambda - \alpha)e^{-\beta|x|} \\ \lim_{x \rightarrow \infty} |x| = 0, \varepsilon > 0, k > 0, \alpha > 1, 0 < \lambda < 1, \beta > 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, x 为系统状态变量; k 为指数项系数; δ 为幂次项指数; λ, α 分别为 δ 所能达到的最小值和最大值; β 为调节 δ 变化速率的常数项系数。

如式(3)所示, 新型趋近律在幂次项中引入系统状态变量 $|x|$, 可将趋近律的幂次项指数和系统状态变量相关联, 构成变指数幂次趋近律, 分析该趋近律可知: 当系统运行轨迹离滑模面距离相对较远时, $|x|$ 相对较大, 此时 $e^{-\beta|x|}$ 趋近于 0, 则 δ 趋近于 α , 系统按照变指数幂次项 $-\varepsilon |s|^\delta \operatorname{sgn}(s)$ 和指数项 $-ks$ 这 2 种速率快速趋向滑模面, 有效解决了传统幂次趋近律在远离滑模面时速率过小、运动时间过长的问题; 随着系统接近滑模面, $|x|$ 逐渐减小至接近于 0, 则 $e^{-\beta|x|}$ 逐渐趋近于 1, 因此幂次项指数 δ 趋近于 λ 。由于此时指数项速率趋近于 0, 变指数幂次项 $-\varepsilon |s|^\delta \operatorname{sgn}(s)$ 在趋近速度中起主要作用, 使系统接近滑模面时趋近速度放缓, 有利于削弱抖振。

令式(3)中 $\delta = 1$, 则可求得分界点为:

$$|x_1| = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\alpha - \lambda}{\alpha - 1} \quad (4)$$

由此可见, 新型趋近律通过关联系统状态变量来改变幂次项指数, 将趋近运动分为 $\delta > 1$ 和 $\delta < 1$ 两部分, 在远离滑模面时幂次项指数 $\delta > 1$, 能快速趋近

滑模面, 随着系统接近滑模面, δ 逐渐减小, 当足够接近滑模面时幂次项指数 $\delta < 1$, 保留了传统幂次趋近律在接近滑模面时抖振较小的优点。

1.3 新型趋近律控制性能分析

建立如式(5)所示的系统, 分别对传统幂次趋近律和新型趋近律进行性能对比分析。

$$\ddot{\theta}(t) = -f(\theta, t) + hu(t) \quad (5)$$

其中, $\theta(t)$ 为位置信号; $f(\theta, t) = 25\dot{\theta}(t)$; $h = 133$; $u(t)$ 为控制输入。

跟踪误差 $e(t)$ 及其导函数为:

$$\begin{cases} e(t) = \theta_d(t) - \theta(t) \\ \dot{e}(t) = \dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\theta_d(t)$ 为理想位置信号。

定义滑模函数为:

$$s(t) = ce(t) + \dot{e}(t) \quad (7)$$

其中, 滑模面系数 c 为一个正常数。

由式(5) — (7)可得:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= c\dot{e}(t) + \ddot{e}(t) = \\ &= c(\dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t)) + (\ddot{\theta}_d(t) - \ddot{\theta}(t)) = \\ &= c(\dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t)) + (\ddot{\theta}_d(t) + f(\theta, t) - hu(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

采用新型趋近律, 则由式(3)和式(8)得到改进后的滑模控制律为:

$$u(t) = \frac{1}{h} \left[\varepsilon |s|^{\alpha + (\lambda - \alpha)e^{-\beta|x|}} \operatorname{sgn}(s) + ks + c(\dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}(t)) + (\ddot{\theta}_d(t) + f(\theta, t)) \right] \quad (9)$$

在相同参数条件下对新型趋近律和传统幂次趋近律控制进行仿真对比, 仿真参数为 $c = 15, \varepsilon = 15, k = 5, \alpha = 1.5, \lambda = 0.5, \beta = 1$, 系统的理想位置信号 $\theta_d(t) = \sin t$, 被控对象初始状态 $x(0)$ 为 $[x_1 \ x_2] = [-2 \ -2]$ 。图1为传统幂次趋近律和新型趋近律的控制性能对比。由图可知, 新型趋近律在跟踪给定信号、位置跟踪误差收敛速度以及抖振抑制方面都要明显优于传统幂次趋近律。因此, 新型趋近律可有效加快系统趋近速度并抑制系统抖振。

2 抗扰动滑模控制器设计

2.1 PMSM 数学模型

PMSM 在 dq 坐标系下的电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (10)$$

PMSM 转矩方程为:

$$T_e = 1.5 p \psi_f i_q \quad (11)$$

PMSM 运动方程为:

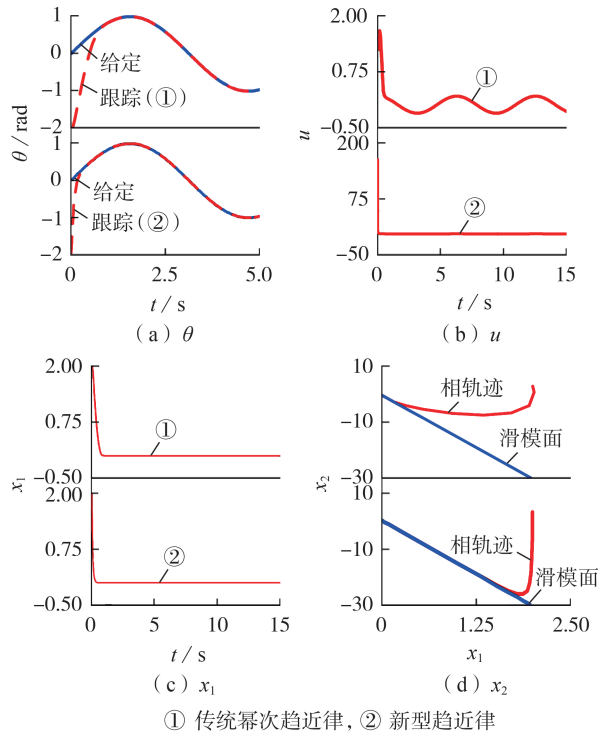


图1 幂次趋近律与新型趋近律控制性能对比分析

Fig.1 Comparative analysis of control performance between power reaching law and new reaching law

$$T_e - T_L = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (12)$$

其中, u_d, u_q 和 i_d, i_q 分别为 d, q 轴定子电压和电流; R 为定子电阻; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感; ψ_f 为永磁体磁链; ω 为转子电角速度; p 为极对数; T_e, T_L 分别为电磁转矩和负载转矩; J 为转动惯量; B 为粘滞摩擦系数。

2.2 基于ESO的抗扰动滑模控制器设计

传统滑模控制器存在抖振问题, 常规的解决方式是利用饱和函数替代开关函数, 但这样会降低系统的鲁棒性。为了解决以上矛盾, 结合所提出的新型趋近律, 引入ESO观测系统负载扰动, 并将观测值前馈补偿至滑模控制器, 提出具有扰动观测和补偿能力的新型趋近律抗扰滑模 NRLASM (New Reaching Law Anti-disturbance Sliding Mode) 控制器来代替传统PI控制器以提高系统性能。

将式(11)代入式(12)可将PMSM运动方程改写为:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3p^2}{2J} \psi_f i_q - \frac{p}{J} B\omega - \frac{p}{J} T_L \quad (13)$$

在考虑参数不确定因素影响时, 式(13)表示为:

$$\frac{d\omega}{dt} = (\chi + \Delta\chi) i_q^* - (\eta + \Delta\eta) \omega - (\gamma + \Delta\gamma) T_L \quad (14)$$

其中, $\chi = \frac{3p^2}{2J} \psi_f$, $\eta = \frac{pB}{J}$, $\gamma = \frac{p}{J}$, 其用到的参数均为电机标称参数; $\Delta\chi, \Delta\eta, \Delta\gamma$ 为电机参数变化值; i_q^* 为 q 轴定子电流给定值。

令:

$$\begin{cases} g = \Delta\chi i_q^* - \Delta\eta\omega - \Delta\gamma T_L \\ d = \chi(i_q - i_q^*) - \eta\omega - \gamma T_L \end{cases} \quad (15)$$

则式(14)可简写为:

$$\dot{\omega} = \chi i_q^* + g + d \quad (16)$$

其中, g 在下文中采用自适应方法进行估计; 扰动项 d 采用ESO观测并进行前馈。

假设一阶系统状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = f(x_1) + hv(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (17)$$

其中, $h > 0$; $f(x_1)$ 为有界扰动; $v(t)$ 为控制量。

若选择 $x_2(t)$ 为扩张状态变量, 令 $x_2(t) = f(x_1)$,

$\dot{x}_2(t) = w(t)$, 则系统(式(17))可以扩张为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) + hv(t) \\ \dot{x}_2(t) = w(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (18)$$

若 $v(t) = i_q^*$, $x_1(t) = \omega$, 结合式(16) — (18), 可构造基于双曲正切函数的ESO为:

$$\begin{cases} e_1(t) = z_1(t) - \omega(t) \\ \dot{z}_1(t) = z_2(t) + g + \chi i_q^* - \beta_1 e_1(t) \\ \dot{z}_2(t) = -\beta_2 \tanh(\beta_3 e_1(t)) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $e_1(t)$ 为转速观测值与实际值之间的误差。

PMSM速度反馈信号由 z_1 观测得到, z_2 对负载转矩扰动 d 进行观测, 因此可实现对扰动的补偿。另外, 根据文献[19]中参数选取规则, $\beta_1 - \beta_3$ 应满足 $\beta_1 - \beta_2\beta_3 > 0$ 。

定义转速跟踪误差为:

$$x = \omega^* - \omega \quad (20)$$

其中, ω^* 为给定转速参考值。

则转速跟踪误差导数可以表示为:

$$\dot{x} = -\chi i_q^* - g - d \quad (21)$$

由于参数不确定项导致的误差难以获得, 采用自适应方法对其进行估计, 式(21)可被重写为:

$$\dot{x} = -\chi i_q^* - \hat{g} - d \quad (22)$$

其中, $\hat{g}$ 为参数不确定项的估计值。

以转速误差 x 为自变量, 选取积分型滑模面为:

$$s = x + c \int_0^t x d\tau \quad c > 0 \quad (23)$$

结合式(3)、式(22)和式(23), 得到转速环控制器输出 q 轴电流参考值为:

$$i_q^* = \frac{1}{\chi} \left[-\hat{g} - d + \varepsilon |s|^{\alpha + (\lambda - \alpha)e^{-\beta|s|}} \operatorname{sgn}(s) + ks + cx \right] \quad (24)$$

为了分析本文设计的闭环控制系统的稳定性, 定义参数估计误差为 $\tilde{g} = g - \hat{g}$, 可以得到 $\dot{\tilde{g}} = -\hat{g}$, 构造Lyapunov函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{b} \tilde{g}^2 \quad (25)$$

对式(25)求导,结合式(3)、式(21)和式(24)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{b} \tilde{g}\dot{\tilde{g}} = s(\dot{x} + cx) + \frac{1}{b} \tilde{g}\dot{\tilde{g}} = \\ &= s(-\chi i_q^* - g - d + cx) + \frac{1}{b} \tilde{g}\dot{\tilde{g}} = \\ &= -s[\varepsilon |s|^{\alpha+(\lambda-\alpha)e^{-\beta|s|}} \operatorname{sgn}(s) + ks] - \tilde{g}\left(s + \frac{1}{b} \dot{\tilde{g}}\right) \quad (26) \end{aligned}$$

按如下自适应律对 $\hat{g}$ 进行更新:

$$\dot{\hat{g}} = -bs \quad b > 0 \quad (27)$$

将式(27)代入式(26)可得:

$$\dot{V} = -s[\varepsilon |s|^{\alpha+(\lambda-\alpha)e^{-\beta|s|}} \operatorname{sgn}(s) + ks] \quad (28)$$

由Lyapunov稳定性定理可知,若式(28)满足 $\dot{V} \leq 0$,则系统(式(14))稳定。显然,当 $\varepsilon > 0$ 且 $k > 0$ 时, $\dot{V} \leq 0$,表明系统在存在外部扰动和参数变化的情况下能够实现稳定。

3 仿真与实验结果

为了验证新型趋近律滑模 NRLSM(New Reaching Law Sliding Mode)控制器的工作性能,采用如附录中图A1所示的调速系统控制方案,进行仿真与实验研究,并对结果进行对比分析。

3.1 仿真结果及分析

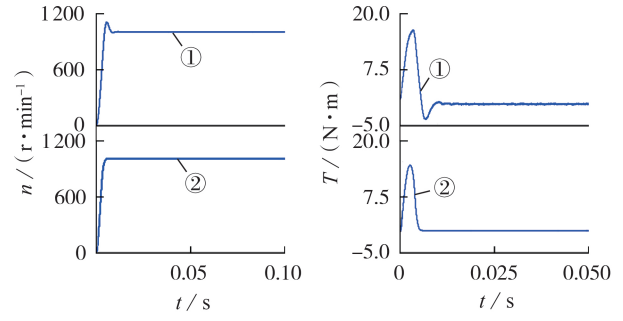
基于图A1所示的PMSM调速系统,在MATLAB/Simulink仿真环境下搭建系统仿真模型,首先对系统负载扰动进行观测,并将观测结果补偿至NRLSM控制器,取代传统速度环中的PI控制器。

仿真中,电机参数为: $L_d = L_q = 6.71 \text{ mH}$, $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$, $R = 1.55 \Omega$, $J = 0.0002 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $p = 5$, $B = 0.0003 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$, 额定转速为 2000 r/min 。PI控制器参数为: d 、 q 轴电流环PI控制器参数均为 $k_{pc} = 1$ 、 $k_{ic} = 0.05$;速度环PI控制器参数为 $k_p = 0.5$ 、 $k_i = 0.15$ 。NRLASM控制器的参数为: $\alpha = 1.5$, $\lambda = \beta = 0.5$, $c = 15$, $\varepsilon = 15$, $k = 10$, $\beta_1 = \beta_2 = 160$, $\beta_3 = 0.85$ 。

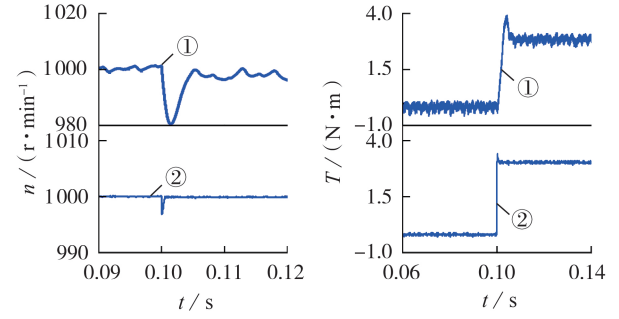
图2为系统在传统PI控制和所提NRLASM控制策略2种控制方法下电机空载起动转速、转矩以及突增负载时三相电流、转速和转矩的响应曲线。由图2可得如下结论。

(1)系统在PI控制下起动迅速,但有 150 r/min 左右超调,最终达到稳态所需时间为 0.015 s ;而系统在所提NRLASM控制策略下仅需 0.007 s 便能无超调地达到稳态。

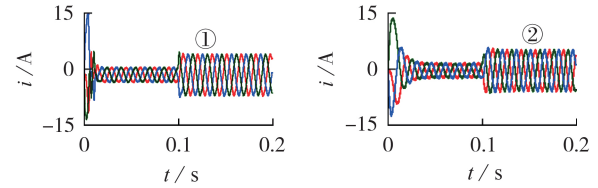
(2)在突增负载时,系统在PI控制下对负载突变较为敏感,电磁转矩波动较大,转速波动后恢复稳态所需调节时间较长。而在采用所提NRLASM控



(a) 电机空载起动动态响应



(b) 突增负载时动态响应



(c) 突增负载时三相变流

① 传统PI控制, ② NRLASM控制

图2 系统起动与突增负载时动态响应仿真结果

Fig.2 Simulative results of dynamic response under system start and sudden increase of load torque

制策略时,突增负载时的转矩动态性能良好,转速可快速恢复到稳态;并且由于采用了能够削弱抖振的新型趋近律,控制器对转矩脉动的抑制作用明显。

3.2 实验结果及分析

以TMS320F28335为控制芯片搭建实验平台进行实验研究,验证系统分别在PI控制、基于传统幂次趋近律的滑模控制和NRLASM控制下的PMSM空载起动以及负载突变时的动态响应。

实验中,电机空载起动,给定转速 1000 r/min ;电机运行至稳态后,负载转矩突增 $1.27 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。实验中PI控制器参数为: d 、 q 轴电流环PI控制器参数均为 $k_{pc} = 8$ 、 $k_{ic} = 2$;速度环PI控制器参数为 $k_p = 1.3$ 、 $k_i = 0.15$ 。NRLASM控制器的参数为: $\alpha = 1.5$, $\lambda = 0.5$, $\beta = 1$, $c = 15$, $\varepsilon = 13$, $k = 20$, $\beta_1 = \beta_2 = 200$, $\beta_3 = 0.9$ 。

图3为系统在PI控制、基于幂次趋近律的滑模控制和NRLSM控制下的起动响应实验结果。由图3可知,系统在PI控制下达到稳态用时最长且转速有明显超调;系统在2种趋近律滑模控制器下起动均无超调,但在NRLSM控制器下到达稳态用时更短,

表明新型趋近律的快速性优于幂次趋近律。

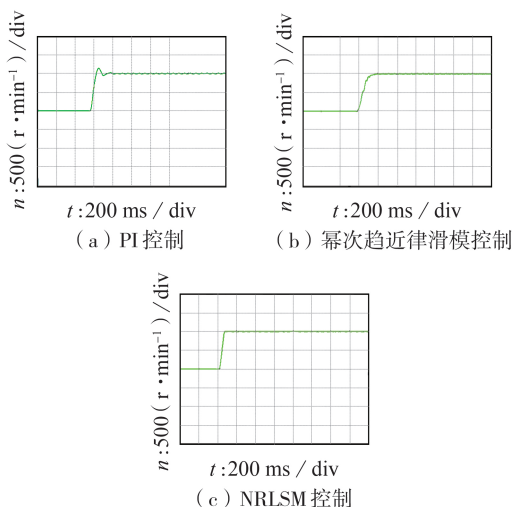


图3 系统起动响应实验结果

Fig.3 Experimental results of system start response

图4为系统在基于幂次趋近律的滑模控制和NRLSM控制下进入稳态后的 q 轴电流。由图可知,相比基于幂次趋近律的滑模控制,NRLSM控制下 q 轴电流脉动幅度更小,削弱了系统抖振。

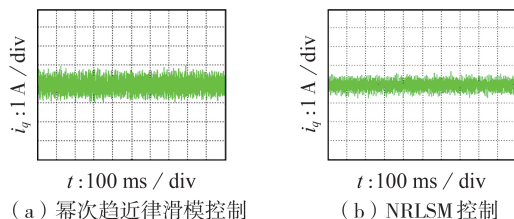


图4 稳态 q 轴电流波形

Fig.4 Waveform of steady-state q -axis current

图5为系统在PI控制、NRLSM控制和NRLASM控制下突增负载时的动态响应实验结果。由图5可

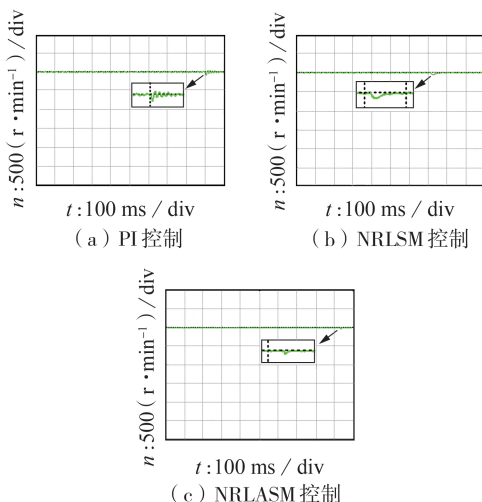


图5 系统突增负载时动态响应实验结果

Fig.5 Experimental results of dynamic response under sudden increase of load torque

知,突增负载时,PI控制下转速波动明显,动态稳定时间约为80 ms;NRLSM控制下转速波动比PI控制下小,动态恢复时间短;而所提NRLASM控制下转速波动小于前2种控制策略,系统抗扰性较好。

4 结论

本文在基于传统幂次趋近律的滑模控制PMSM调速系统的基础上,提出了一种新型趋近律,该趋近律与传统幂次趋近律相比提高了趋近速度,并有效抑制了滑模运动固有抖振。另外,针对负载扰动问题,引入基于双曲正切函数的ESO来观测负载扰动,并将观测值前馈补偿至滑模控制器,构成抗扰动滑模控制器代替传统PI控制。仿真与实验对比结果表明所提NRLASM控制策略能有效改善PMSM调速系统的动态性能,且具有对外部扰动不敏感的优点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孙强,程明,周鹏,等. 新型双凸极永磁同步电机调速系统的变参数PI控制[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):117-123.
SUN Qiang, CHENG Ming, ZHOU E, et al. Variable PI control of a novel doubly salient permanent magnet motor drive [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 117-123.
- [2] 朱磊,温旭辉,赵峰,等. 永磁同步电机弱磁失控制制及其应对策略研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(18):67-72.
ZHU Lei, WEN Xuhui, ZHAO Feng, et al. Control policies to prevent PMSMs from losing control under field-weakening operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 67-72.
- [3] MOON H, KIM H, YOUN M. A discrete-time predictive current control for PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 464-472.
- [4] 史婷娜,张典林,夏长亮,等. 基于遗传整定的永磁交流伺服系统模糊免疫PID控制器[J]. 电工技术学报,2008,23(7):45-50.
SHI Tingna, ZHANG Dianlin, XIA Changliang, et al. Fuzzy-immune-PID controller based on genetic tuning for permanent magnet AC servo control system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 45-50.
- [5] DU Bocho, WU Shaopeng, HAN Shouliang, et al. Application of linear active disturbance rejection controller for sensorless control of internal permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3019-3027.
- [6] 肖烨然,刘刚,宋欣达,等. 基于改进滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器I/F启动方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):99-106.
XIAO Yiran, LIU Gang, SONG Xinda, et al. Sensorless I/F startup based on modified sliding mode observer for PMSM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 99-106.
- [7] ZHOU Zhanqing, XIA Changliang, YAN Yan, et al. Torque ripple minimization of predictive torque control for PMSM with extended control set [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 6930-6939.
- [8] FALLAHA C J, SAAD M, KANAAN H Y, et al. Sliding-mode robot control with exponential reaching law [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 600-610.
- [9] 郭磊磊,王华清,代林旺,等. 基于超螺旋滑模观测器的永磁同

- 步电机无速度传感器控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 21-31, 34.
- GUO Leilei, WANG Huaqing, DAI Linwang, et al. Speed-sensorless control method for permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode observer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 21-31, 34.
- [10] MOZAYAN S M, SAAD M, VAHEDI H, et al. Sliding mode control of PMSG wind turbine based on enhanced exponential reaching law[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6148-6159.
- [11] FAN Ying, ZHANG Li, CHENG Ming, et al. Sensorless SVPWM-FADTC of a new flux-modulated permanent magnet wheel motor based on a wide-speed sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3143-3151.
- [12] 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): 77-82.
- ZHANG Xiaoguang, ZHAO Ke, SUN Li, et al. A PMSM sliding mode control system based on a novel reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 77-82.
- [13] 郑美茹, 王圣, 王丰, 等. 基于分数阶符号函数的永磁同步电机滑模控制技术[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 56-62.
- ZHENG Meiru, WANG Sheng, WANG Feng, et al. Sliding mode control technology of permanent magnet synchronous motor based on fractional order symbol function[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 56-62.
- [14] 童克文, 张兴, 张昱, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 102-106.
- TONG Kewen, ZHANG Xing, ZHANG Yu, et al. Sliding mode variable structure control of permanent magnet synchronous motor based on a novel reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 102-106.
- [15] WANG Yaoqiang, FENG Yutao, ZHANG Xiaoguang, et al. A new reaching law for anti-disturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4117-4126.
- [16] 王要强, 冯玉涛, 秦明, 等. 表贴式永磁同步电机全阶滑模观测与控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5688-5699.
- WANG Yaoqiang, FENG Yutao, QIN Ming, et al. Full-order sliding mode observation and control strategy for surface permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5688-5699.
- [17] 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): 80-85.
- LIU Ying, ZHOU Bo, FANG Sichen. Sliding mode control of PMSM based on a novel disturbance observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 80-85.
- [18] ZHANG Xiaoguang, HOU Benshuai, MEI Yang. Deadbeat predictive current control of permanent-magnet synchronous motors with stator current and disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3818-3834.
- [19] MIKLOSOVIC R, GAO Z. A robust two-degree-of-freedom control design technique and its practical application[C]//IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Seattle, WA, USA: IEEE, 2004: 1495-1502.

作者简介:



王要强

王要强(1982—),男,河南郑州人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子变换与控制技术及其在可再生能源发电、交直流灵活配电、电机驱动等方面的应用(E-mail: WangyqEE@163.com);

朱亚昌(1993—),男,河南新乡人,硕士研究生,主要研究方向为电机驱动及其控制技术(E-mail: 331814132@qq.com);

田兵(1989—),男,河南驻马店人,博士,主要研究方向为电力电子及其储能、电机驱动应用(E-mail: tianbing_hit@163.com)。

(编辑 李莉)

New reaching law sliding mode control strategy for permanent magnet synchronous motor

WANG Yaoqiang¹, ZHU Yachang¹, FENG Yutao¹, TIAN Bing²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to improve the dynamic performance of PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) speed regulation system, a new reaching law sliding mode control strategy is proposed. Based on the power reaching law, an exponential term is added, and the system state variable is introduced into the power term index to associate the power term index with the system state, so as to solve the problem of slow approaching speed when the system state is far from the sliding surface, and meanwhile make the system enter the sliding surface smoothly. Then, the extended state observer is applied to observe the load disturbance, and the feedforward compensation of the observation value is employed to the sliding mode controller, which can reduce the impact of load disturbance on the system and improve the system robustness. The simulative and experimental results show that the proposed new reaching law sliding mode control strategy can improve the dynamic performance and robustness of the system effectively.

Key words: permanent magnet synchronous motor; sliding mode control; new reaching law; robustness

附录

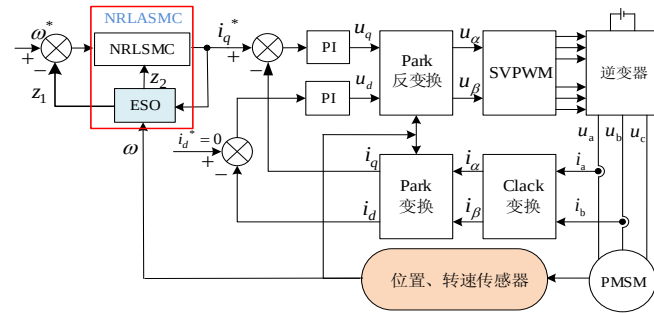


图 A1 PMSM 调速系统控制框图

Fig.A1 Block diagram of PMSM speed regulation system