

基于改进快速幂次趋近律的永磁同步电机滑模控制

张惠智, 王 英

(大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116021)

摘 要: 针对永磁同步电机(PMSM)滑模控制指数趋近律中趋近速度与抖振之间的矛盾问题, 基于快速幂次趋近律提出一种幂次项系数自适应调节的新型趋近律。所提趋近律将系统状态引入幂次项系数中, 实现了系统状态由远处到滑模面附近的趋近过程中加入幂次项的作用, 在保证幂次项特点的前提下, 动态响应过程的收敛速度大大提高。负载转矩是滑模速度控制器中的一个扰动项, 设计了带有幂次项的滑模观测器, 将观测值作为转矩前馈补偿。仿真结果表明, 与快速幂次趋近律相比, 所提趋近律具有更快的收敛速度, 负载观测器能准确跟踪负载变化, 提升了系统抗扰性能。

关键词: 永磁同步电机; 滑模控制; 趋近律

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)03-0022-05

doi: 10.12177/emca.2020.220

Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Fast Power Reaching Law

ZHANG Huizhi, WANG Ying

(School of Electrical and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116021, China)

Abstract: There is a complex relationship between reaching speed and chattering in exponential reaching law of sliding mode control for permanent magnet synchronous motor (PMSM). Based on fast power reaching law, a new reaching law with adaptive adjustment of power coefficient is proposed. The proposed reaching law introduces the system state into the coefficient of power term, and the effect of adding power term in the reaching process of the system state from far to near the sliding surface is realized. On the premise of guaranteeing the characteristics of power term, the convergence speed of the dynamic response process is greatly improved. The load torque is a disturbance term in the sliding mode speed controller. A sliding mode observer with power term is designed, and the observed value is used as the torque feedforward compensation. The simulation results show that: compared with the fast power law, the proposed reaching law has faster convergence speed, and the load observer can accurately track the change of load and improve robustness of the system.

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

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、损耗小、响应速度快等特点, 在机器人、轨道交通等工业领域应用广泛^[1-2]。国内外研究人员对PMSM调速系统中控制器进行了大量研究, 采用了如神

经网络^[3]、模糊控制^[4]、自适应控制^[5]、滑模控制^[6]等先进控制算法。

滑模控制具有响应速度快、鲁棒性强等特点, 但是其控制不连续, 在切换面附近作高频切换运动会产生电磁转矩抖振问题。为了抑制滑模控制中的抖振现象, 文献[7]结合积分和高阶滑模的

收稿日期: 2020-12-01; 收到修改稿日期: 2021-01-16

作者简介: 张惠智(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力传动及其控制技术。

王 英(1962—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电机及其驱动控制。

特点,提出了一种基于高阶积分的滑模控制器,具有削弱抖振、鲁棒性较强等特点。文献[8]基于传统指数趋近律,引入了变指数函数,采用双曲正切函数替代开关函数,提高了抖振抑制能力。文献[9]采用双幂次趋近律设计了滑模变结构姿态控制算法,用于柔性运载火箭姿态控制问题中,缩短了系统响应时间。文献[10]讨论了采用双幂次趋近律的滑模控制收敛时间与滑模初始状态的关系,指出双幂次趋近律具有特定时间收敛的特点。文献[11]根据系统状态对双幂次趋近律中幂次项系数进行调节,提升了系统状态在逼近滑模面过程中的动态品质。考虑负载扰动问题,文献[12]应用一种改进的龙伯格观测器对电机负载转矩进行观测,使滑模控制器在负载变化时能有效维持转速的稳定性。文献[13]提出一种扩展滑模负载转矩观测器,将观测值前馈补偿,进一步改善系统抖振,加强控制系统的抗扰性。

本文在快速幂次趋近律的幂次项中引入自适应调节的幂次项系数,设计 PMSM 直接转矩控制系统中滑模速度控制器,既保证幂次项优点,又加快了转速趋近速度,提升了控制系统动态特性。引入滑模观测器对负载转矩准确跟踪,在滑模控制律中增加幂次项,提升了跟踪精度。将观测的负载转矩作为转矩前馈补偿,有效提升了控制系统抗扰性。

1 新型趋近律

1.1 新型趋近律

为了改进快速幂次趋近律^[14]中的幂次项,设计新型趋近律如下:

$$\dot{s} = -k_1 s - k_2 |s|^{s \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) + \varepsilon} \operatorname{sgn}(s) \quad (1)$$

其中: $k_1 > 0, k_2 > 0, \varepsilon \rightarrow 0^+$ 。

反正切函数的定义域为所有实数,且在定义域内单调递增,因此幂次项 $\arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right)$ 在定义域内单调递增。当 $s > 0, \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) > 0; s < 0, \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) < 0$, 幂次项系数 $s \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) \geq 0$ 。因为 $\arctan\left(\frac{\pi}{2}\right) \rightarrow 1$, 当系统状态距滑模面较

远时,即 $|s| > 1$, 所以幂次项系数 $s \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) + \varepsilon > 1$, 依据双幂次趋近律中指数大于 1 的幂次项在距滑模面较远时起主导作用^[15], 本文提出的方法在远离滑模面时可与指数项共同作用,加快了趋近速度;当系统状态接近滑模面时,即 $0 < |s| < 1$, 幂次项系数 $s \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) + \varepsilon < 1$, 可根据系统状态自适应调节系数,在幂次项起主导作用下保留了幂次趋近律抖振小的优点。

选取 Lyapunov 函数:

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

对式(2)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} = & s[-k_1 s - k_2 |s|^{s \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) + \varepsilon} \operatorname{sgn}(s)] = \\ & -k_1 s^2 - k_2 |s|^{s \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) + \varepsilon + 1} < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)证明了本文提出的新型趋近律满足 Lyapunov 稳定性判定,证明了控制系统是渐进稳定的。

1.2 趋近时间分析

设系统采用新型趋近律从 $s(0)$ 到达 $s=1$ 指数项单独作用下的趋近时间为 t_1 。 t_1 既为快速幂次趋近律从 $s(0)$ 趋近到 $s=1$ 的趋近时间,也是新型趋近律从 $s(0)$ 趋近到 $s=1$ 指数项单独作用下的趋近时间。忽略趋近律中第 2 项的作用,对式(1)指数项求积分,得:

$$\int_{s(0)}^1 s^{-1} ds = \int_0^{t_1} -k_1 dt \quad (4)$$

其中: $t_1 = \frac{\ln s(0)}{k_1}$ 。

趋近的平均速度为

$$v_1 = \frac{s(0) - 1}{t_1} \quad (5)$$

设系统采用新型趋近律从 $s(0)$ 到达 $s=1$ 幂次项单独作用下的趋近时间为 t_2 。忽略趋近律中第一项的作用,令 $\alpha = s \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{2} \cdot s\right) + \varepsilon$, 对式(1)幂次项求积分,得:

$$\int_{s(0)}^1 s^{-\alpha} ds = \int_0^{t_2} -k_2 dt \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{1 - s(0)^{1-\alpha}}{k_2(\alpha - 1)} \quad (7)$$

趋近律的平均速度为

$$v_2 = \frac{s(0) - 1}{t_2} \quad (8)$$

采用新型趋近律下,系统状态从 $s(0)$ 到 $s=1$ 的趋近时间为 t , 则:

$$t = \frac{s(0) - 1}{v_1 + v_2} = \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2} \quad (9)$$

$$t_1 - t = t_1 - \frac{t_1 t_2}{t_1 + t_2} = \frac{t_1^2}{t_1 + t_2} > 0 \quad (10)$$

式(10)证明了本文所提出的新型趋近律趋近速度更快。

2 滑模速度控制器设计

2.1 PMSM 数学模型描述

本文研究对象为表贴式永磁同步电机 (SPMSM), d, q 轴电感分量相等, 即 $L_d = L_q = L_s$, SPMSM 在 $\alpha\text{-}\beta$ 轴静止坐标系下的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_s & 0 \\ 0 & R + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_e \Psi_f \sin \theta_e \\ \omega_e \Psi_f \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: u_α, u_β 为 α, β 轴电压; R 为定子电阻; p 为微分算子; L_s 为电感; i_α, i_β 为 α, β 轴电流; e_α, e_β 为反电动势; ω_e 为转子电角速度; Ψ_f 为永磁体磁链; θ_e 为 $\alpha\text{-}\beta$ 与 $d\text{-}q$ 两个坐标系的空间位置角。

电机机械运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (13)$$

式中: T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转子转动惯量; ω_m 为转子机械角速度; B 为黏滞摩擦因数。

2.2 控制器设计

首先定义 PMSM 控制系统的转速误差变量为

$$e = \omega_m - \omega_m^* \quad (14)$$

式中: e 为转速误差; ω_m 为电机机械角速度; ω_m^* 为电机的给定机械角速度, 常数值。

本文采用积分滑模面, 定义滑模面函数表达式:

$$s = e + k_e \int_0^t e dt \quad (15)$$

式中: $k_e > 0$ 为待设计参数。

对式(15)求导可得:

$$\dot{s} = \dot{\omega}_m + k_e(\omega_m - \omega_m^*) \quad (16)$$

将式(16)代入式(13)可得:

$$T_{e1}^* = J[\dot{s} - k_e(\omega_m - \omega_m^*)] + B\omega_m + T_L \quad (17)$$

采用新型趋近律, 将式(1)代入式(17)可得:

$$T_{e1}^* = J[-k_1 s - k_2 |s|^{\frac{\pi}{2} + \varepsilon} \text{sgn}(s) - k_e(\omega_m - \omega_m^*)] + B\omega_m + T_L \quad (18)$$

3 滑模负载转矩观测器

本文设计的速度控制器中带有负载转矩补偿项, 应用负载转矩观测器对负载转矩进行观测, 并将观测值作为转矩前馈补偿项, 增强了控制系统的抗扰特性, 减小了突增负载对转速的影响。所采用的负载转矩观测器在滑模控制律中加入幂次项, 提高了跟踪速度。

负载转矩变化的速度远不及控制器的采样频率, 可认为在一个控制周期内负载转矩变化量为零, 即: $T_L' = 0$ 。

选取 PMSM 转速和负载转矩为状态变量, 状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\mathbf{x} = [\omega_m \ T_L]^T$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} =$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{J} & 0 \end{bmatrix}^T; u = T_e; \mathbf{C} = [1 \ 0]^T。$$

基于状态方程, 建立系统的滑模观测器方程:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{K}S \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\omega}_m \ \hat{T}_L]^T$ 为 $\mathbf{x}$ 的估计值; $\mathbf{K}$ 为反馈增益, $\mathbf{K} = [1 \ k]^T$; S 为滑模控制律。

式(20)减去式(19)可得观测误差状态方程:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{K}S \quad (21)$$

其中: $\mathbf{e} = [e_1 \ e_2]^T$; $e_1 = \hat{\omega}_m - \omega_m$; $e_2 = \hat{T}_L - T_L$ 。

令滑模切换面 $s = e_1$, 为了减小抖振现象, 在控制律中加入幂次项, 有滑模控制律 $S = -\alpha |s|^a \text{sgn}(s) - \beta s$ 。由滑模到达条件 $\dot{s}s \leq 0$, 有:

$$\dot{s}s = e_1\dot{e}_1 = e_1\left[-\frac{B}{J}e_1 - \frac{1}{J}e_2 - \alpha\text{sgn}(e_1) - \beta e_1\right] \leq 0 \tag{22}$$

由于本文阻尼系数 $B = 0$, 则有 $\alpha \geq -\beta|e_1| - \frac{|e_2|}{J}$ 。

系统轨迹到达滑模面并沿着滑模面运动时, $s = \dot{s} = 0$, 代入式(21)可得:

$$\dot{e}_2 - \frac{k}{J}e_2 = 0 \tag{23}$$

求解 $e_2 = c_e e^{\frac{k}{J}t}$, 只有满足 $k < 0$, 才能使 e_2 趋近于零。

4 仿真验证

为了验证新型趋近律的快速性与负载转矩观测器的准确性, 基于 MATLAB/Simulink 搭建 PMSM 直接转矩控制系统, 如图 1 所示。对所提基于新型趋近律的滑模速度控制器进行仿真分析, 与快速幂次趋近律进行比较。

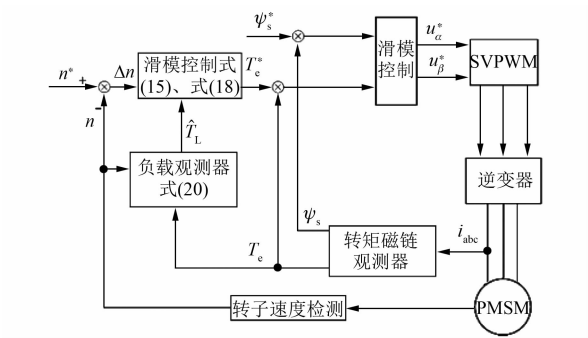


图 1 PMSM 直接转矩控制系统框图

仿真系统 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数	
参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	1.2
极对数 p	4
电感 L_s/mH	8.5
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 8
磁链 Ψ_f/Wb	0.175

设置电机的给定转速为 500 r/min, 空载启动, 电机稳定运行后, 0.1 s 加入负载转矩 1.5 N·m。负载转矩的实际值与观测值如图 2 所

示。引入负载转矩补偿后基于 2 种趋近律的滑模控制作用下的电机转速如图 3 所示。加入负载后放大的转速波形如图 4 所示。

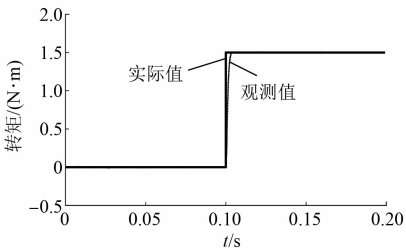


图 2 负载转矩的实际值与观测值

由图 2 可以看出, 负载转矩观测器能快速跟踪实际值, 由于采用滑模控制, 观测结果有抖振现象。

观察图 3 可知, 系统在 2 种控制律下均能较快收敛到给定转速且无超调。本文对系统状态从 $s(0)$ 收敛到 $s=1$ 的趋近速度进行研究, 对比可发现新型趋近律下的趋近速度更快, 转速收敛到 $s=1$ 的时间为 0.009 5 s; 而快速幂次趋近律下收敛到 $s=1$ 的时间为 0.028 2 s。仿真验证了本文提出趋近律的快速性。

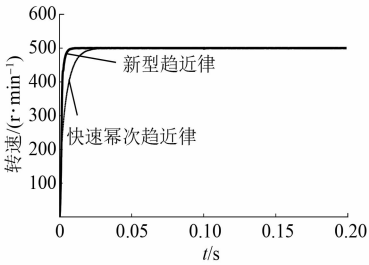


图 3 电机转速波形图

观察图 4 可知, 应用负载转矩观测器的控制系统负载变化时转速可以快速恢复到给定值, 提升了系统抗扰性。采用新型趋近律下的系统能在更短时间内恢复到平稳, 验证了所提趋近律的快速性。

控制系统响应速度加快意味着定子电流变大, 采用本文所提趋近律动态响应速度加快, 与快速幂次趋近律相比, 定子电流应变大, 考虑采用本文所提趋近律是否出现启动过电流的问题, 需对比趋近律变化前后的定子电流波形图。

图 5 为 2 种趋近律下的定子电流。

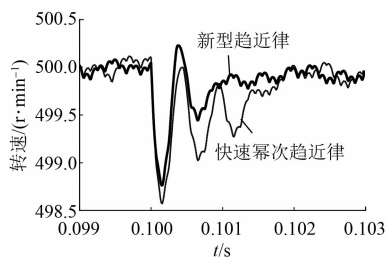


图4 加入负载后放大的转速波形

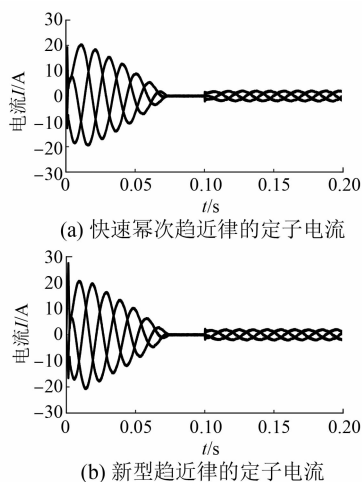


图5 2种趋近律下的定子电流

分析图5可知,采用快速幂次趋近律下电机的定子电流峰值为20.5 A,采用本文所提趋近律下定子电流峰值为27.5 A,起动电流增加了34%,增幅不大,未出现起动过流现象。

5 结 语

为了加快滑模控制趋近速度,减小抖振,本文提出了一种新型趋近律,并基于新型趋近律设计了滑模速度控制器。应用负载转矩观测器跟踪负载变化,将观测值补偿到速度控制器中,提升了控制系统抗扰性。通过仿真验证了所提新型趋近律趋近速度的快速性,观测器准确观测实际负载,并将观测值前馈补偿到速度控制器,使得控制系统抗干扰能力更强。

【参考文献】

[1] 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.

- [2] 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.
- [3] 王同旭,马鸿雁,聂沐晗. 电梯用永磁同步电机 BP 神经网络 PID 调速控制方法的研究[J]. 电工技术学报,2015,30(增刊1): 43.
- [4] 李耀华,秦玉贵,赵承辉,等. 永磁同步电机直接转矩控制双模糊控制系统[J]. 电机与控制应用,2020,47(7): 9.
- [5] 邓永停,李洪文,王建立,等. 基于卡尔曼滤波器的交流伺服系统自适应滑模控制[J]. 光学精密工程,2014,22(8): 2088.
- [6] 苗敬利,周重霞,郑大伟. 永磁同步电机调速系统变指数趋近律控制[J]. 电气传动,2019,49(11): 18.
- [7] 王鑫,陈欣,李继广. 一种新型滑模控制器的设计及其应用[J]. 科学技术与工程,2017,17(16): 321.
- [8] 林城美,杨静. 基于变指数趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 电机与控制应用,2020,47(5): 18.
- [9] 于亚男,吴颀,王海鹰,等. 基于双幂次趋近律柔性火箭滑模变结构控制[J]. 航天控制,2018,36(2): 20.
- [10] 李慧洁,蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J]. 控制与决策,2016,31(3): 498.
- [11] KANG Z, YU H, LI C. Variable-parameter double-power reaching law sliding mode control method[J]. Automatika,2020,61(3): 345.
- [12] 金鹏飞,谢源,王杰,等. 基于负载转矩观测器的永磁同步电机积分滑模控制[J]. 微特电机,2018,46(8): 62.
- [13] 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.
- [14] 苗敬利,郑大伟,周重霞. 基于新型趋近律的永磁同步电机模糊滑模控制[J]. 电气传动,2019,49(3): 3.
- [15] 侯孝涵,杨兴华,杨喜军,等. 基于新型趋近律的PMSM 反馈线性化滑模控制[J]. 微电机,2019,52(12): 45.