

永磁同步电机的改进快速终端滑模控制*

吴 飞, 王 杰, 李鹏瀚

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对线性滑模控制永磁同步电机不能实现有限时间控制以及终端滑模控制不能实现快速收敛的问题, 提出了一种改进快速终端滑模控制方法。所提控制方法经理论证明能实现更快的收敛速度。滑模控制律通过 Lyapunov 稳定性定理计算得出。对所提方法进行了仿真验证, 并与终端滑模控制作对比, 结果证明了所提改进快速终端滑模控制能有效地提高系统的起动性能和抗扰动性能。

关键词: 改进快速终端滑模; 永磁同步电机; 起动性能; 抗扰动性能

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)09-0009-05

Improved Fast Terminal Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor*

WU Fei, WANG Jie, LI Penghan

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An improved fast terminal sliding mode control method for permanent magnet synchronous motor was proposed. Different from the traditional sliding mode control and terminal sliding mode control methods, finite time control and fast convergence could be achieved by the proposed control method. The control law of the proposed controller was designed according to Lyapunov stability theorem. Simulation results demonstrated that the proposed improved fast terminal sliding mode control method could enhance the starting performance and disturbance rejection ability effectively.

Key words: improved fast terminal sliding mode control; permanent magnet synchronous motor (PMSM); starting performance; disturbance rejection ability

0 引 言

永 磁 同 步 电 机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有结构简单、体积小、可靠性高等优点, 在众多领域都得到了广泛的应用^[1]。现阶段, 由于 PI 控制器算法简单、易于实现的特性, PMSM 系统控制多采用 PI 控制, 可满足一定范围内的控制要求。然而, PI 控制器的性能易受系统参数变化、外部扰动等影响, 并不能满足高性能控制的要求^[2]。

为了解决上述问题, 国内外学者提出滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC) 方法。SMC 因其优良的鲁棒性、对参数变化和外界扰动的不敏感性以及较快的动态响应而被广泛研究应用于 PMSM 系统中。滑模控制器的设计包含 2 个步骤: 第 1 步是设计合适的滑模面; 第 2 步是设计合适的控制率^[3-4]。文献[5]设计了 1 个传统 SMC 控制 PMSM, 证明了相比 PI 控制, SMC 具有更好的抗扰动性能。针对传统 SMC 可能存在的稳态误差问题, 文献[6-7]在滑模面中引入了积分项, 设计

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61374155)

作者简介: 吴 飞(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析和控制。

王 杰(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制, 智能电网, 复杂系统分析和控制方法。

李鹏瀚(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析和控制。

了一个积分滑模控制器,有效地消除了稳态误差。针对上述线性滑模不能实现有限时间控制的问题,文献[8-9]设计了终端滑模控制器(Terminal SMC, TSMC),实现了系统的有限时间收敛,但其存在收敛时间长的问题。

针对 TSMC 收敛时间长的问题,文献[10]提出了一种快速终端滑模控制(Fast TSMC, FTSMC)方法,显著地提高了系统的收敛速度,但是会引起 PMSM 起动过程中超调量偏大的问题。为解决此问题,本文进一步提出了改进快速终端滑模控制(Improved FTSMC, IFTSMC)方法。从理论上证明了本文所提控制方法能有效减小系统的收敛时间。同时,仿真结果进一步证明了 FTSMC 能在 TSMC 的基础上有效加快系统的收敛速度和提高系统的抗扰动性能,而 IFTSMC 能在 FTSMC 基础上减小系统超调量。

1 PMSM 数学模型

为简化模型,假设 PMSM 转子永磁磁场在气隙空间分布为正弦波,忽略定子铁心饱和,不计涡流和磁滞损耗。在上述假设下,PMSM 在 d - q 轴参考坐标下的状态方程^[11-12]为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & p\omega & 0 \\ -p\omega & -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{p\varphi_f}{L_q} \\ 0 & \frac{1.5p\varphi_f}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{u_q}{L_q} \\ -\frac{T_1}{J} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i_d, i_q —— d, q 轴定子电流;
 ω ——电机转子机械角速度;
 R_s ——定子电阻;
 L_d, L_q —— d, q 轴定子电感;
 p ——电机极对数;
 φ_f ——转子磁势;
 J ——转动惯量;
 B ——黏性摩擦因数;
 u_d, u_q —— d, q 轴定子电压;
 T_1 ——负载转矩。

对于表贴式 PMSM, $L_d = L_q$ 。由状态方程可知 PMSM 系统电流间存在耦合关系,难以实现转速线性化控制。在实际控制过程中,通常采用直轴参考电流为零的控制策略。PMSM 基于矢量控制的解耦控制结构图如图 1 所示,其中, ω^* 为参考转速。

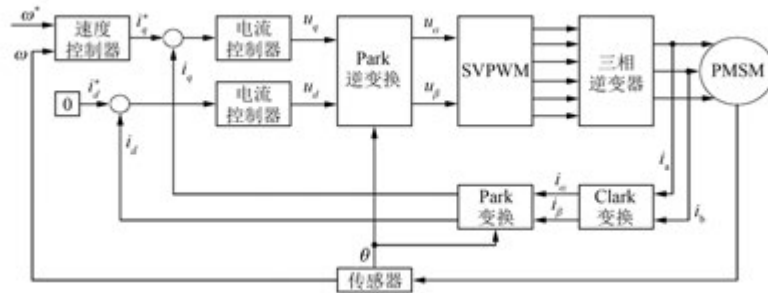


图 1 PMSM 基于矢量控制的解耦控制结构图

本文将在 2 个电流环控制器上采用 PI 控制器,其传递函数为

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (2)$$

式中: k_p, k_i ——比例增益和积分增益, $k_p > 0$, $k_i > 0$;

s ——Laplace 中的变量。

在电流环采用 PI 控制的情况下,可以推导出系统的速度方程。推导如下。

根据图 1, i_q 可表示为

$$i_q(s) = i_q^*(s) - \frac{u_q(s)}{k_p + (k_i/s)} \quad (3)$$

从式(1)可得 i_q 与 ω 的关系为

$$s\omega = \frac{1.5p\varphi_f}{J} i_q(s) - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_1}{J} \quad (4)$$

结合式(3)和式(4)可得:

$$\begin{aligned} \omega'' = & \frac{1.5p\varphi_f}{J} \left(i_q^* + \frac{k_i}{k_p} i_q^* \right) - \frac{B}{J} \dot{\omega} - \frac{k_i}{k_p} \dot{\omega} - \\ & \frac{k_i B}{k_p J} \omega - \frac{T_1}{J} - \frac{k_i T_1}{k_p J} - \frac{1.5p\varphi_f}{J k_p} \dot{u}_q \end{aligned} \quad (5)$$

定义

$$U = \frac{1.5p\varphi_f}{J} \left(i_q^* + \frac{k_i}{k_p} i_q^* \right) \quad (6)$$

$$f(t) = \frac{B}{J} \dot{\omega} + \frac{k_i}{k_p} \dot{\omega} + \frac{k_i B}{k_p J} \omega \quad (7)$$

$$d(t) = \frac{T_l}{J} + \frac{k_i T_l}{k_p J} + \frac{1.5p\varphi_f}{Jk_p} \dot{u}_q \quad (8)$$

式中: $d(t)$ ——系统参数不确定和外部扰动项。

因此 PMSM 系统的速度方程式 (5) 可以简写为

$$\omega'' = U - d(t) - f(t) \quad (9)$$

2 滑模控制器的设计

2.1 改进快速终端滑模

在 PMSM 系统的速度环设计了滑模控制。SMC 是一种非线性控制方法,具有对外界扰动及系统参数不确定鲁棒性强等优点。滑模面设计为速度误差 $e = \omega^* - \omega$ 的函数。根据式 (9) 可得系统误差方程为

$$e'' = \omega^{*''} - U + d(t) + f(t) \quad (10)$$

为了实现 PMSM 系统的有限时间控制,相关学者提出了终端滑模面:

$$s = e + c_1 |e|^\alpha \text{sign}(e) \quad (11)$$

其中, c_1 为正常数, $0 < \alpha < 1$ 。

当速度误差运行到滑模面上 ($s=0$) 后,求解微分方程可得 TSMC 的收敛时间为

$$t_1 = t_r + \frac{1}{c_1} \frac{|e_0|^{1-\alpha}}{1-\alpha} \quad (12)$$

式中: t_r ——速度误差到达滑模面的时间,由滑模控制趋近律决定;

e_0 ——速度误差到达滑模面上的初始值。

虽然 TSMC 能实现有限时间控制,但收敛时间较长。为了提高收敛速度,本文提出快速终端滑模面为

$$s = e + c_2 |e|^\alpha \text{sign}(e) + c_2 e \quad (13)$$

其中, c_2 为正常数。

解微分方程 $s=0$ 可得 FTSMC 的收敛时间为

$$t_2 = t_r + \int_0^{e_0} \frac{de}{e^\alpha + e} = t_r + \frac{\ln(1 + |e_0|^{1-\alpha})}{c_2} \quad (14)$$

比较式 (12) 和式 (14) 的大小,当 $c_1(1-\alpha) < c_2$ 时,可得 $t_2 < t_1$ 。因此 FTSMC 的收敛时间更短。当

误差 e 远离平衡点时,动态方程近似为 $\dot{e} = c_2 e$, 可以实现快速收敛;当误差 e 接近平衡点时,动态方程近似为 $\dot{e} = c_1 |e|^\alpha \text{sign}(e)$, 实现有限时间收敛。

为进一步提高收敛速度,本文在 FTSMC 的基础上提出了 IFTSMC,其滑模面设计为

$$s = \dot{e} + c_3 |e|^\alpha \text{sign}(e) + c_3 |e|^\beta \text{sign}(e) \quad (15)$$

其中, c_3 为正常数, $\beta > 1$ 。

式 (15) 的微分式为

$$\dot{s} = e'' + c_3 \alpha |e|^{\alpha-1} + c_3 \beta |e|^{\beta-1} \quad (16)$$

令式 (16) 等于零并结合式 (10) 可求得系统的控制律为

$$U_{eq} = \omega^{*''} + f(t) + (c_3 \alpha |e|^{\alpha-1} + c_3 \beta |e|^{\beta-1}) e \quad (17)$$

$$U_{sw} = k \text{sign}(s) \quad (18)$$

$$U = U_{eq} + U_{sw} \quad (19)$$

其中,式 (18) 为滑模控制的趋近律函数, $k > 0$ 是切换增益。

2.2 系统稳定性分析

定理:若切换增益 k 满足式 (20),那么当系统控制律为式 (19) 时,所设计的 IFTSMC 控制系统 Lyapunov 稳定。

$$k > |d(t)| \quad (20)$$

证明:定义 Lyapunov 能量函数

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (21)$$

结合式 (16) 和式 (17),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \dot{s} = s(e'' + c_3 \alpha |e|^{\alpha-1} + c_3 \beta |e|^{\beta-1}) = \\ &= s[d(t) - k \text{sign}(s)] \leq |s|(|d(t)| - k) \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论可知,所设计滑模控制器控制的 PMSM 系统速度误差能在任何初始状态下到达滑模面。

3 仿真验证

为了证明所提控制器的有效性,在 Simulink 环境下对 PMSM 系统进行了仿真。分别设计了 TSMC、FTSMC 和 IFTSMC 3 个控制器来进行对比分析。仿真中 PMSM 系统所用参数如下:额定功率 750 W,极对数 4,定子电阻 1.5 Ω ,交直流电感 0.004 H,转子磁链 0.4 Wb,黏性摩擦因数 $7.403 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$,转动惯量 $1.74 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

3.1 空载起动

给定 PMSM 系统参考转速为 700 r/min。图 2、图 3 和图 4 分别为 3 种控制器下 PMSM 起动过程中的转速曲线、 I_q 电流曲线和三相电流曲线。

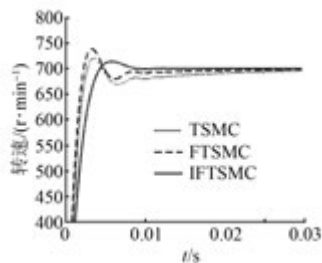


图 2 PMSM 起动时转速曲线图

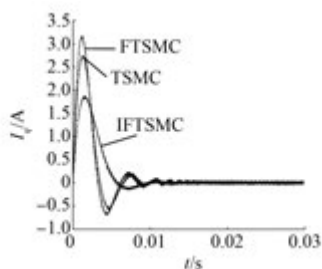


图 3 PMSM 起动时 I_q 电流曲线图

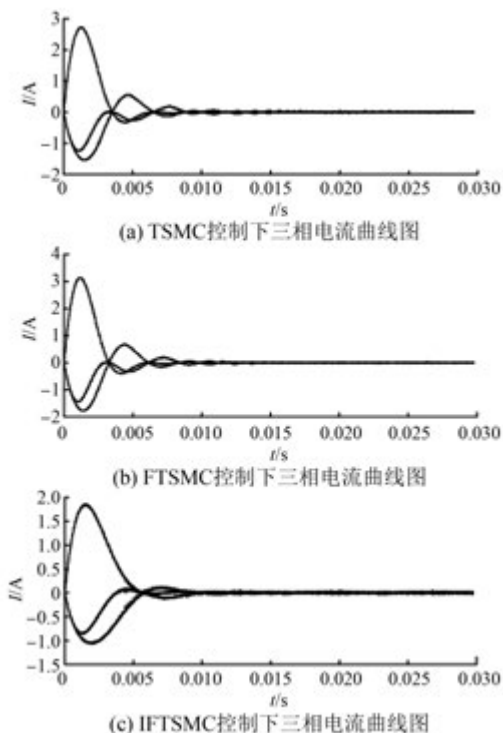


图 4 PMSM 起动时三相电流曲线图

由图 2 可知,FTSMC 能在 TSMC 的基础上提

高系统转速的收敛速度,但会引起超调量偏高。IFTSMC 能在保证快速收敛的基础上减小超调量。由图 3 和图 4 可知,在 FTSMC 控制下,PMSM 系统的 I_q 电流和三相电流达到稳态值的时间略低于 TSMC,但也存在起动电流大于 TSMC 的问题。IFTSMC 能在降低电流调整时间的同时有效地降低起动电流峰值,有利于保护电机。

3.2 负载突变

除了对比系统的起动性能外,本节将证明所提出的 IFTSMC 能在 TSMC 的基础上增强系统的抗干扰性能。仍给定 PMSM 系统参考转速为 700 r/min。当系统起动稳定后,在 0.05 s 时,给系统突加 1 个 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的负荷。图 5、图 6 和图 7 分别给出了 3 种控制器下 PMSM 负载突变过程中的转速曲线、 I_q 电流曲线和三相电流曲线。

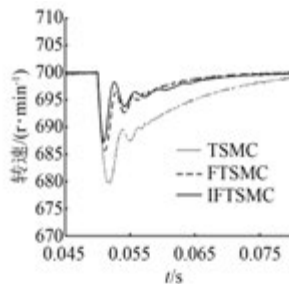


图 5 PMSM 负载突变时转速曲线图

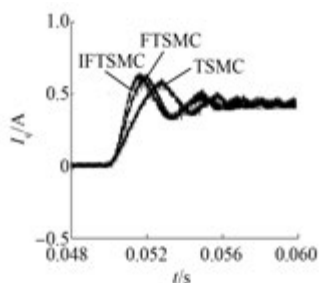


图 6 PMSM 负载突变时 I_q 电流曲线图

由图 5 可知,当系统发生负载突变时,FTSMC 和 IFTSMC 控制器下系统速度降落量明显小于 TSMC,能更快地跟踪给定转速,其中,IFTSMC 受系统扰动影响略小于 FTSMC。从图 6 和图 7 可知,负荷突变时 IFTSMC 控制下电流响应速度更快,能更快达到新稳态值。

从以上仿真结果可知,本文所提控制算法具有更好的控制性能和抗扰动性能。

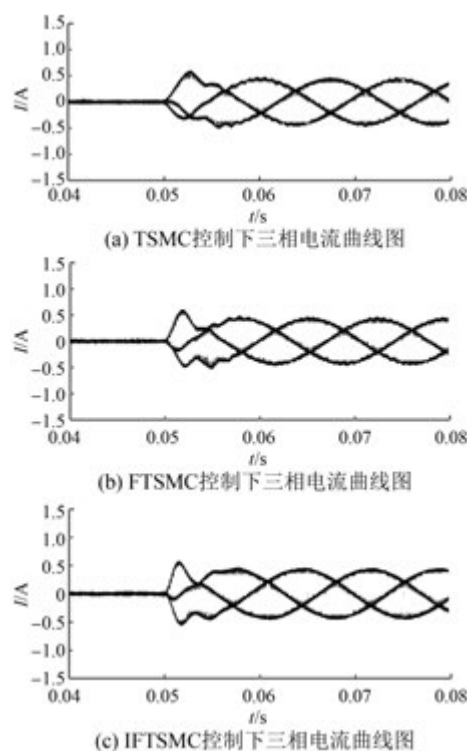


图7 PMSM 负荷突变时三相电流曲线图

4 结 语

为了在实现有限时间控制的同时提高滑模控制的收敛速度,本文在 TSMC 的基础上提出了一种 FTSMC 方法,针对 FTSMC 存在的超调量偏大的问题,对其进行改进,提出了 IFTSMC 方法。理论证明了所提控制算法能有效地加快系统的收敛速度。通过仿真将 TSMC、FTSMC 和 IFTSMC 作对比,验证了 IFTSMC 能提高控制性能和抗扰动性能。

【参考文献】

[1] 郑美茹,王圣,王丰,等.基于分数阶次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.

[2] 樊英,周晓飞,张向阳,等.基于新型趋近律和混合速度控制器的 IPMSM 调速系统滑模变结构控制[J].电工技术学报,2017,32(5): 9-18.

[3] 李宁臻,徐政,唐庚,等.基于滑模鲁棒控制器的有功功率调制在多端直流输电的应用[J].中国电机工程学报,2016,36(3): 664-673.

[4] 全宇,年珩.不平衡及谐波电压下双馈感应电机谐振滑模控制技术[J].中国电机工程学报,2015,35(2): 465-476.

[5] 李中琴.基于新型变速趋近律的永磁同步电机滑模控制[J].电机与控制应用,2017,44(5): 22-26.

[6] 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.

[7] 朱晓虹,张广明,梅磊,等.基于滑模速度控制器的 PMSM 无速度传感器控制研究[J].电机与控制应用,2016,43(1): 1-6.

[8] LI S, ZHOU M, YU X. Design and implementation of terminal sliding mode control method for PMSM speed regulation system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 1879-1891.

[9] 童灵华.永磁同步电机快速高阶终端滑模控制[J].电机与控制应用,2016,43(12): 1-5.

[10] GUDEY S K, GUPTA R. Recursive fast terminal sliding mode control in voltage source inverter for a low-voltage microgrid system [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(7): 1536-1543.

[11] 张碧陶,皮佑国.永磁同步电机伺服系统模糊分数阶滑模控制[J].控制与决策,2012,27(12): 1776-1780.

[12] XU W, JIANG Y, MU C. Novel composite sliding mode control for PMSM drive system based on disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.

收稿日期: 2018-04-25

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部