

基于新型变速趋近律的永磁同步电机滑模控制^{*}

李中琴

(新乡学院 机电工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 为了改善永磁同步电机(PMSM)调速系统的动态品质,提出了一种基于变速趋近律方法的 PMSM 滑模速度控制策略。为了提高传统指数趋近律的收敛速度和消除系统抖阵现象的影响,在传统指数趋近律的基础上提出了一种新型变速趋近律方法,并应用该方法设计了一种 PMSM 调速系统的滑模速度控制器。通过仿真和试验结果对比分析,证明该算法不仅改善了系统的鲁棒性能,同时改善了系统的动态响应速度。

关键词: 永磁同步电机; PI 控制; 变速趋近律; 滑模控制

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0022-05

Sliding Mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Variable-Rate Reaching Law Method^{*}

LI Zhongqin

(Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: In order to improve the control performance of permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system, a sliding mode speed control strategy based on an improved reaching law method was proposed. To shorten the reaching time and weaken system chattering of the conventional exponential reaching law, a novel reaching law based on traditional reaching law was proposed, and the method was applied to PMSM drive system. Compared with traditional PI controller, simulation and experiment results showed that the proposed controller improve the system robustness and dynamic performance.

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

0 引言

目前,蓄电池电机车仍然是全国各煤矿使用的主要运输设备,且驱动装置多采用直流电机。但直流电机存在电刷损害率高、维护成本高等缺点,已成为制约煤矿现代化的重要因素。永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)由于具有结构简单、体积小、效率高和功率密度高等诸多优点,被广泛用于电力机车、空调压缩机及其他通用机电设备^[1-2]。但是,PMSM 是一个典型的复杂非线性系统,当速度控制器采用传统的 PI 控制式,虽然在一定程度上能满足控制性能的需要,当电机长时间运行或受到外界扰动

的影响时,电机的参数都会发生一定的变化,传统的 PI 控制并不能获得较好的控制性能。

为了进一步提高 PMSM 调速系统的控制性能,随着现代控制技术的不断发展,一些先进的控制算法逐步被应用于矿用 PMSM 调速系统。特别是滑模控制作为一类特殊的非线性控制,由于其鲁棒性强和动态响应速度快等诸多优点,在一定程度上得到了广泛应用^[3-6]。目前,滑模控制器的设计普遍采用指数趋近律方法,虽具有良好的控制性能,但对于一个指定的系统而言,指数趋近律的参数一般都是固定的,并不具有自调节功能。为了解决上述问题,本文首先设计了一种系统的状态变量可根据距离平衡点的远近而自适应调节

^{*} 基金项目: 河南省科技攻关项目(162102210068)

作者简介: 李中琴(1979—),女,硕士研究生,研究方向为自动控制技术与应用。

参数的变速指数趋近律方法,并将此方法应用到 PMSM 调速系统的设计。最后仿真和试验结果验证了该算法的可行性和有效性,提高了系统的动态品质。

1 PMSM 的数学模型

建立 dq 坐标系下表贴式 PMSM 的数学模型为^[7-8]

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_s \frac{di_d}{dt} - p\omega L_s i_q \\ u_q = Ri_q + L_s \frac{di_q}{dt} + p\omega L_s i_d + p\omega\psi_f \\ J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L = T_e \\ T_e = \frac{3}{2}p\psi_f i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q, i_d, i_q ——定子电压和电流;

L_s, R ——定子电感和电阻;

p ——电机的极对数;

ψ_f ——永磁体的磁链;

ω ——机械角速度;

T_L ——负载转矩;

J ——转动惯量。

当采用控制策略 $i_d = 0$ 时,表贴式 PMSM 矢量控制具有较好的控制效果。此时式(1)则可变为如下的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_s}i_q - \frac{p\psi_f}{L_s}\omega + \frac{1}{L_s}u_q \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J} + \frac{3p\psi_f}{2J}i_q \end{cases} \quad (2)$$

定义系统的状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega \\ x_2 = \dot{\omega}_{\text{ref}} - \dot{\omega} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω_{ref} ——电机的参考转速,并假定 ω_{ref} 存在二阶导数。

根据式(2)和式(3)可知:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \ddot{\omega}_{\text{ref}} - \ddot{\omega} = -\frac{B}{J}x_2 - \\ &\quad \frac{3p\psi_f}{2J}i_q + \frac{T_L}{J} + \ddot{\omega}_{\text{ref}} + \frac{B}{J}\dot{\omega}_{\text{ref}} \end{aligned} \quad (4)$$

由于电机在实际运行过程中会出现电机参数的变化。此时,式(4)可表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \left(-\frac{B}{J} + \Delta a\right)x_2 + \left(-\frac{3p\psi_f}{2J} + \Delta b\right)i_q + \\ &\quad \left(\frac{T_L}{J} + \dot{\omega}_{\text{ref}} + \frac{B}{J}\dot{\omega}_{\text{ref}} + \Delta c\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ ——对应项的参数不确定项。

假设 $g(t)$ 为系统总的不确定项,表达式为

$$g(t) = \Delta ax_2 + \Delta bi_q + \left(\frac{T_L}{J} + \dot{\omega}_{\text{ref}} + \frac{B}{J}\dot{\omega}_{\text{ref}} + \Delta c\right) \quad (6)$$

实际上,虽然电机参数会发生变化,但电机的变量都是有界的,即 $g(t)$ 也是有界的,且满足 $|g(t)| \leq l_g$, l_g 为一正常数。

将式(6)和式(5)代入式(3),可得系统的数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -Ax_2 - Bu + g(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中: $A = \frac{B}{J}$; $B = \frac{3p\psi_f}{2J}$; $u = i_q$ 。

2 基于趋近律方法的滑模控制器设计

2.1 新型趋近律方法

目前,常用的指数趋近律方法为

$$\dot{s} = -\mu s - k \text{sgn}(s) \quad k, \mu > 0 \quad (8)$$

在指数趋近律方法中,为保证快速趋近的同时削弱抖振,应在增大 μ 值的同时减小 k 值。该方法虽然可以通过减小 k , 增大 μ 加速趋近过程,并大大削弱了抖振,但等速项 $k \text{sgn}(s)$ 的存在使系统并不能从理论上消除抖振。

为了进一步提高趋近律的趋近速度,本文提出一种变指数趋近律方法,即:

$$\dot{s} = -\mu s - k |x_1|^2 \text{sgn}(s) \quad (9)$$

从式(9)可以看出,当系统的状态变量距离平衡点较远时,系统主要以指数方式快速趋近滑模面。随着距离平衡点越来越近,变速项 $\frac{ds}{dt} = -k |x_1|^2 \text{sgn}(s)$ 起关键作用。滑模运动的幅度随着 $|x_1|^2$ 的减小而逐渐衰减,最终稳定于原点,并可以削弱系统抖阵现象的影响。因此,该趋近律方法能够根据系统状态变量距离平衡点的远近而自适应调整参数。

为了说明文中所提趋近律方法的优越性,在

使用相同参数的条件下,得到了如图 1 所示的仿真结果。从图 1 可看出,系统的状态变量从初始值到达平衡点的过程中,相比其他两种算法,文中提出趋近律方法的收敛速度具有明显的优势,且系统的抖振现象也得到了抑制。

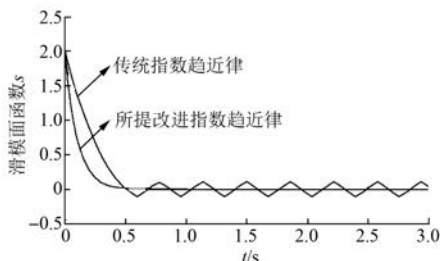


图 1 两种趋近律方法的性能比较

2.2 滑模变结构速度控制器设计

定义滑模面函数为

$$s = cx_1 + x_2 \quad (10)$$

式中: c ——设计参数, $c > 0$ 。

对于滑模控制器,通常包括等效控制 u_{eq} 和切换控制 u_{vs} , 即

$$u = u_{eq} + u_{vs} \quad (11)$$

求解等效控制 u_{eq} , 忽略总的不确定量的影响, 令 $g(t) = 0$ 即可求得。切换控制 u_{vs} 的主要作用就是抵消外界扰动的影响。采用文中的新型趋近律方法, 即可得到滑模控制器的表达式, 即

$$u = \frac{(c - A)}{B} x_2 + \mu s + (k |x_1|^2 + l_g) \operatorname{sgn}(s) \quad (12)$$

为了证明系统的稳定性, 定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (13)$$

对 Lyapunov 函数求导, 并将控制器代入, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = s\dot{s} &= s(cx_2 + \dot{x}_2) = \\ &= -k |x_1|^2 |s| - \mu s^2 - \\ &= (l_g - |g(t)|) |s| < 0 \end{aligned} \quad (14)$$

由于总的不确定量满足 $|d| \leq l_d$, 此时, 式 (14) 满足 $\dot{V} \leq 0$, 因此系统是稳定的。

由于速度控制器的输出为 q 轴的参考电流 i_q^* , 可得到 i_q^* 的表达式为

$$i_q^* = \int \left[\frac{(c - A)}{B} x_2 + \mu s + (k |x_1|^2 + l_g) \operatorname{sgn}(s) \right] dt \quad (15)$$

从式 (15) 可以看出, 由于积分器的作用, 一方面调高了系统的收敛速度, 另一方面削弱了系统的抖振现象。

3 仿真和试验结果分析

采用如图 2 所示的 PMSM 矢量控制技术验证上述控制算法的可行性和有效性。其中, 速度控制器采用上述滑模控制; dq 轴的电流控制器采用传统的 PI 控制。

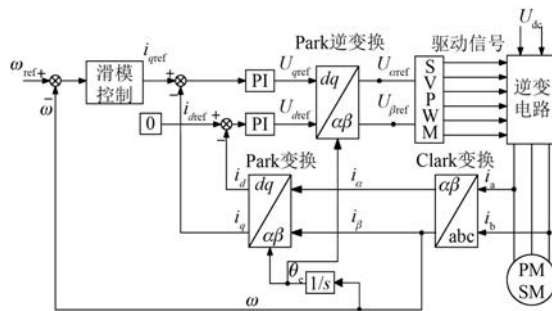


图 2 PMSM 调速系统控制框图

3.1 仿真结果分析

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建系统的仿真模型, 电机参数设置如下: 定子电阻为 $R = 2.46 \Omega$, 定子电感 $L_s = 6.35 \text{ mH}$, 永磁体磁链 $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 1.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 摩擦因数 $B = 0.0001 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$, 极对数 $p = 4$ 。

为了便于比较分析, 图 3 和图 4 分别给出了突加负载条件时 PI 控制和文中所提滑模控制作用下的仿真结果, 仿真条件转速值设定为 500 r/min 。从图 3、图 4 可以发现, 在 PI 控制作用下能够进入稳态状态, 且电机转速有超调; 在文中所提控制算法作用下能够在更短的调节时间内进入稳态状态, 且电机转速无超调。可见, 相比 PI 控制, 文中所提控制算法具有较快的动态性能。

3.2 试验结果分析

为了进一步验证算法的可行性和有效性, 图 5 和图 6 分别给出了同样采用图 2 所示的控制框图的试验结果, 其中参考转速与仿真中的参数设定相同, 并且是系统稳态运行后突加负载时的变化曲线。其中, 图 5(a) 和图 6(a) 分别为两种控制策略下转速的变化曲线, 而转矩的变化曲线如图 5(b) 和图 6(b) 所示。

从以上试验结果可发现, 相比采用 PI 速度控

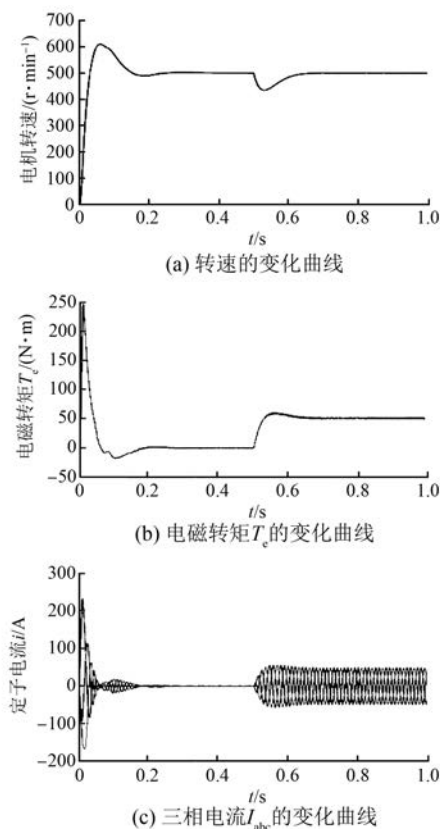


图3 基于PI速度控制器的仿真结果

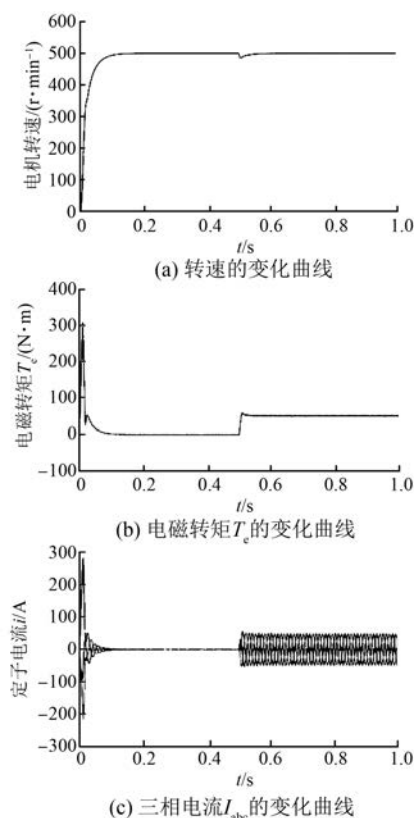


图4 基于滑模速度控制器的仿真结果图

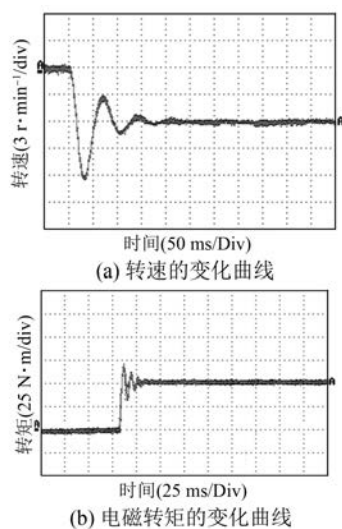


图5 基于PI速度控制器的试验结果

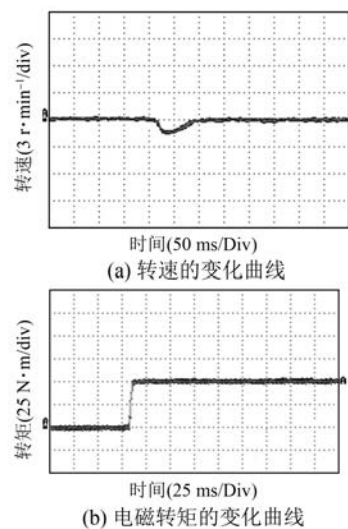


图6 基于滑模速度控制器的试验结果

制器时,采用文中所提滑模速度控制策略时,系统转速、转矩具有较好的动态响应速度,且转速波动小,抗外界扰动能力强,从而验证了算法的可行性和有效性。

4 结 语

为了提高PMSM调速系统的动态调速性能,本文首先给出了包含参数不确定性的数学模型。

为了提高传统指数趋近的控制性能,文中设计了一种具有自适应调节控制参数能力的变速率趋近律方法,并将此方法应用到 PMSM 速度控制器的设计中。通过与传统 PI 控制进行比较,仿真和试验结果验证了算法具有较好的动态性能,提高了系统的运动品质。

【参考文献】

- [1] 杨书生,钟宜生.永磁同步电机转速伺服系统鲁棒控制器设计[J].中国电机工程学报,2009,29(3): 84-89.
- [2] GHAFARI K A R, FAIZ J, YAZDANPANA M J. Integration of non-linear H_{∞} and sliding mode control techniques for motion control of a permanent magnet synchronous motor [J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(4): 267-280.
- [3] 钱荣荣,骆敏舟,赵江海,等.永磁同步电动机新型

自适应滑模控制[J].控制理论与应用,2013,30(13): 1414-1421.

- [4] 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.
- [5] 卢涛,于海生,山炳强,等.永磁同步电机伺服系统的自适应滑模最大转矩/电流控制[J].控制理论与应用,2015,32(2): 251-255.
- [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): 77-82.
- [7] 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.
- [8] 汪海波,周波,方斯琛.永磁同步电机调速系统的滑模控制[J].电工技术学报,2009,24(9): 71-77.

收稿日期: 2016-10-21

(上接第12页)

- [55] 李新华,李馨,黄启振,等.新型混合励磁 BSG 调压与转矩特性研究[J].汽车电器,2013(12): 33-35.
- [56] 李维亚,黄苏融,张琪.混合动力车用混合励磁爪极皮带式起动发电机多领域仿真分析[J].中国电机工程学报,2010,30(36): 7-15.
- [57] 王群京,倪有源,朱卫国,等.新型汽车用爪极发电机系统效率计算[J].系统仿真学报,2006,18(6): 1609-1611.
- [58] 吴赛飏,施小豹.测量爪极发电机转矩的试验系统设计[J].电机与控制应用,2015,42(8): 72-76.
- [59] 赵仁德,王永军,张加胜.直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J].中国电机工程学报,2009,29(27): 106-111.
- [60] 赵梅花,杨勇,钟沁宏.新型混合励磁直驱式风力发电系统 MPPT 控制[J].电工技术学报,2013,28(5): 30-36.
- [61] 张文秀,武新芳,孙娟.基于反馈线性化的直驱风力发电机组控制系统[J].电机与控制应用,2014,41(8): 46-50.
- [62] 叶斌英,阮毅,杨勇,等.基于混合励磁电机的直驱式风电系统[J].电机与控制应用,2010,37(5): 1-6.
- [63] 杨勇,朱彬彬,陶雪慧,等.混合励磁风力发电系统灵活功率控制[J].电工技术学报,2014,29(1): 246-254.
- [64] 赵梅花,阮毅,杨勇,等.直驱式混合励磁风力发电

系统控制策略的研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(12): 19-23.

- [65] PATIN N, VIDO L, MONMASSON E, et al. Control of a hybrid excitation synchronous generator for aircraft applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3772-3783.
- [66] 杨善水,张卓然,杨春源,等.基于多环调压控制的混合励磁航空变频交流发电系统[J].电工技术学报,2012,27(3): 176-180.
- [67] WANG Q, LIU C J, ZOU J B, et al. Numerical analysis and design optimization of a homopolar inductor machine used for flywheel energy storage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1290-1294.
- [68] 付兴贺,林明耀,徐姝,等.永磁-感应子式混合励磁发电机三维暂态温度场的计算与分析[J].电工技术学报,2013,28(3): 107-113.
- [69] 翟庆志.电机与新能源发电技术[M].北京:中国农业出版社,2010.
- [70] 苏士斌,史仪凯,袁小庆,等.横向磁通电机研究综述[J].电子学报,2013,41(11): 2290-2296.
- [71] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.高速电机发展与设计综述[J].电工技术学报,2016,31(7): 1-18.
- [72] 卢琴芬,谢舸,金勇,等.混合铁心横向磁通永磁电机的设计与分析[J].中国电机工程学报,2011,31(9): 66-70.

收稿日期: 2017-01-11