

永磁同步电机的非奇异快速终端滑模控制

周硕^{1,2},王大志¹,高庆忠¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院,辽宁 沈阳 110004;
2. 辽宁轨道交通职业学院 机电工程系,辽宁 沈阳 110023)

摘要:为了改善永磁同步电动机调速系统的动态性能,提出了一种非奇异快速终端滑模控制策略,该控制策略首先给出了非奇异快速终端滑模面的具体数学表达式,然后采用带终端吸引子的趋近方式设计趋近律,实现了状态变量的全局快速收敛,有效地降低了收敛时间和克服了终端滑模的奇异性问题,最后将该控制方法应用于永磁同步电动机调速系统,并与普通终端滑模控制和PI控制进行了对比。仿真和实验结果表明,该控制器能够很好地提高系统的动态、稳态性能和鲁棒性。

关键词:永磁同步电动机;终端滑模控制;非奇异性;调速系统

中图分类号:TM351

文献标识码:A

Nonsingular Fast Terminal-sliding-mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor

ZHOU Shuo^{1,2}, WANG Da-zhi¹, GAO Qing-zhong¹

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China; 2. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Guidaojiaotong Polytechnic Institute, Shenyang 110023, Liaoning, China)

Abstract: To improve the dynamic performance of permanent magnet synchronous motor(PMSM) drive system, a nonsingular fast terminal - sliding - mode control strategy was proposed. In this control strategy, the mathematical expression of nonsingular fast terminal-sliding-mode surface and reaching law with terminal attractor were designed. The proposed scheme can guarantee the faster convergence speed of system state variables during the whole process. In addition, the problems of singular in terminal sliding mode was solved by this method. The novel control method was applied to the PMSM speed servo system, and compared with the traditional terminal-sliding-mode regulator and PI regulator. Simulation and experimental results show that the proposed control strategy can improve dynamic, steady performance and robustness.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); terminal-sliding-mode control; nonsingularity; speed servo system

1 引言

永磁同步电机(PMSM)是一个多变量、强耦合、非线性、变参数的复杂对象,采用常规的PID控制虽然在一定范围内能满足控制要求,但当电机内部参数发生变化以及受到外来扰动时,难以得到满意的控制性能^[1-5]。因此,近年来国内外学者在永磁同步电机调速控制方面做了大量研究^[6-10],如自适应控制、鲁棒控制、反演控制、直接转矩控制、智能控制等。

滑模变结构控制(SMC)因其对模型精度要求不高,对系统内部参数的变化及外部扰动具有强鲁棒性等优点而越来越受到学者们的关注^[11-15]。文献[11]结合趋近率法设计了一种变参数的滑模控制器,提高了调速系统快速性和稳定性。文献[12]将滑模控制与模糊神经网络控制相结合,设计了一种永磁同步电机调速系统的滑模混合控制器,来消弱滑模控制的抖振现象。文献[13-14]通过检测永磁同步电动机定子电压和电流,采用滑模观测器的方法观测电机的转速和转

子位置。文献[15]设计了永磁同步电机的无抖振滑模控制系统,利用普通终端滑模控制的思想消除了系统抖振。

为了提高滑模控制系统的动态响应性能,本文提出了一种非奇异快速终端滑模控制方法,该方法实现了状态变量的全局快速收敛,缩短到达时间,而且能有效克服终端滑模控制的奇异问题。为验证该方法在永磁同步电机调速系统中的有效性,分别与普通终端滑模控制器和PI控制器进行效果对比,仿真和实验结果表明,该方法设计的控制器能较好地提高系统的快速性,并且具有良好的鲁棒性和稳态性能。

2 非奇异快速终端滑模控制策略

2.1 非奇异快速终端滑模控制

2阶单输入非线性方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + b(x)u \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为系统状态变量, $x = [x_1, x_2]^T \in R^2$; $f(x)$, $b(x)$ 为 R^2 域中的光滑函数, $b(x) \neq 0$; $u \in R^1$ 。

本文提出非奇异快速终端滑模面如下式:

$$s = x_2 + cx_1 + \frac{1}{\beta}x_1^{\frac{p_0}{q_0}} \quad (2)$$

式中: $c \in R^+$, $\beta \in R^+$, $p_0, q_0 \in N$ 为奇数,且 $1 < p_0/q_0 < 2$ 。

为抑制滑模抖振问题,保证非奇异性,采用一种带终端吸引子的趋近方式设计趋近律:

$$\dot{s} = -\varphi s - \gamma s^{\frac{m}{n}} \quad (3)$$

式中: $\varphi \in R^+$, $\gamma \in R^+$, $m, n \in N$ 为奇数,要求满足 $0 < m/n < 1$ 。

由此得出非奇异快速终端滑模控制函数为

$$u = b^{-1}(x)[-(\varphi s + \gamma s^{\frac{m}{n}}) - (c + \frac{p_0}{\beta q_0} x_1^{\frac{p_0}{q_0}-1})x_2 - f(x)] \quad (4)$$

由式(4)可知,由于 $1 < p_0/q_0 < 2$,变量 x_1 的指数大于零,所以该控制方式完全避免了奇异问题,且无抖振。此外,当系统状态远离平衡点时,控制函数中的指数趋近律和变量 x_2 共同作用,增大了控制量的作用,状态离平衡点越远收敛速度越快,当系统状态离平衡点较近时,控制函数中的终端吸引趋近律起主要作用,保证了系统状态在有限的时间内迅速收敛到平衡状态。

2.2 非奇异快速终端滑模控制性能分析

以式(1)典型系统为例,对本文提出的非奇异快速终端滑模控制进行分析,状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -25x_2 + 133u \end{cases} \quad (5)$$

选择 $p_0=9, q_0=7, m=3, n=5, c=50, \beta=0.01, \varphi=10, \gamma=2$,系统初始状态 $x(0)=[10 \ 10]^T$,将本文控制方法与普通非奇异终端滑模控制做对比,仿真结果见图1。

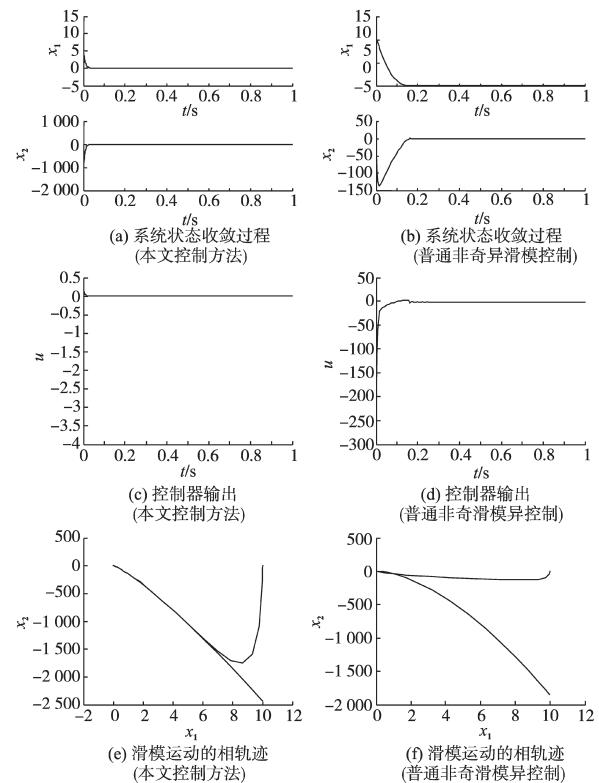


图1 本文控制方法与普通非奇异终端滑模控制性能对比

Fig.1 Performance comparisons of proposed method and traditional terminal-sliding-mode method

由图1知,本文提出的非奇异快速终端滑模控制方法的收敛速度明显快于普通非奇异控制,并且控制器输出响应快,控制信号更加平滑。

3 永磁同步电机调速系统非奇异快速终端滑模控制器设计

3.1 永磁同步电动机模型

为建立永磁同步电动机的 $d-q$ 轴数学模型,作如下假设:转子永磁磁场在气隙空间分布为正弦波,定子电枢绕组中的感应电动势也为正弦波;忽略定子铁心饱和,认为磁路为线性,电感参数不变;不计铁心涡流与磁滞损耗;转子上没有

阻尼绕组。其电压方程为

$$\begin{cases} u_d = ri_d - \omega L_q i_q + \frac{d\Psi_d}{dt} \\ u_q = ri_q + \omega L_d i_d + \frac{d\Psi_q}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (7)$$

PMSM转矩方程为

$$T_e = (3/2)p\Psi_f i_d \quad (8)$$

PMSM运动方程为

$$T_e - T_L = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

式中: u_d, u_q 分别为 d, q 轴电压; i_d, i_q 分别为 d, q 轴电流; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感; r 为定子电阻; p 为极对数; ω 为转子电角速度; J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; Ψ_f 为永磁体磁链。

3.2 调速系统控制器的设计

取PMSM系统的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω^* 为给定转速; ω 为实际转速。

结合式(9)得

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{d\omega}{dt} = -\frac{p}{J}(\frac{3}{2}p\Psi_f i_q - T_L) \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{d^2\omega}{dt^2} = -\frac{3p^2}{2J}\Psi_f \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

令 $D = \frac{3p^2}{2J}\Psi_f, U = \frac{di_q}{dt}$, 可得系统状态空间

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} U \quad (12)$$

选择式(2)为系统滑模面,并对 s 求偏导得

$$\dot{s} = (c + \frac{p_0}{\beta q_0} x_1^{\frac{p_0}{q_0}-1}) x_2 - D \frac{di_q}{dt} \quad (13)$$

由式(3)、式(13)得出PMSM快速非奇异终端滑模控制器如下:

$$i_q = \frac{1}{D} \int [(\varphi s + \gamma s^n) + (c + \frac{p_0}{\beta q_0} x_1^{\frac{p_0}{q_0}-1}) x_2] dt \quad (14)$$

PMSM调速系统的整体结构如图2所示。

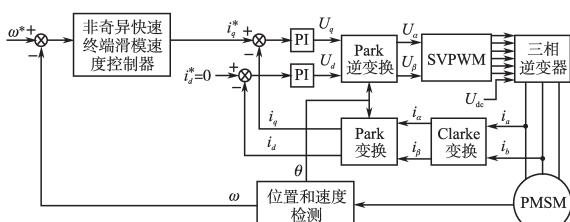


图2 调速系统框图

Fig.2 Structure of speed control system

4 仿真与实验研究

为了验证本文所设计的控制器的控制效果,在Matlab/Simulink环境下进行仿真研究,并以TI公司的专用电机控制器TMS320F2812 DSP搭建实物系统进行实验验证。采用的永磁同步电动机参数为:电枢绕组电阻 $r=2.46\Omega$;电枢绕组电感 $L_d=L_q=6.35\text{ mH}$;永磁磁链 $\Psi_f=0.175\text{ Wb}$;转子惯量 $J=1.02\times 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$;极对数 $p=4$;阻尼系数 $B=1\times 10^{-4}\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$;额定转速 $n_N=3000\text{ r/min}$;逆变器开关频率为10 kHz。

图3为本文提出的非奇异快速终端滑模控制策略与PI控制、普通非奇异滑模控制下的系统启动转速对比仿真曲线,由响应波形可以看出,采用PI控制策略的转速存在超调,并且有明显的波动,采用普通非奇异滑模控制策略的响应曲线达到给定转速所用的时间明显长于本文提出的控制方法。

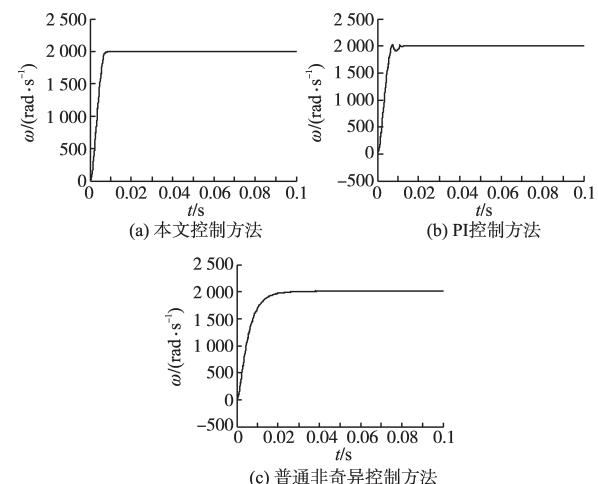


图3 系统启动时转速响应

Fig.3 Speed response when system starting

图4a~图4f为系统在0.05 s负载转矩从1 N·m突增到7 N·m时,两种控制策略下的转速、转矩和电流响应曲线。由图4可知,当转矩负载发生变化时,采用本文控制方法下的转速波动比PI控制方法的小、恢复时间短,并且PI控制方法的转矩响应和电流响应对负载变化敏感,而本文控制策略的动态性能相对较好。图5a~图5d为两种控制策略在系统以给定转速2000 r/min时的启动和突增负载时的动态响应实验结果,对比可以看出,PI控制方法有明显的超调,到达稳态的时间较长。

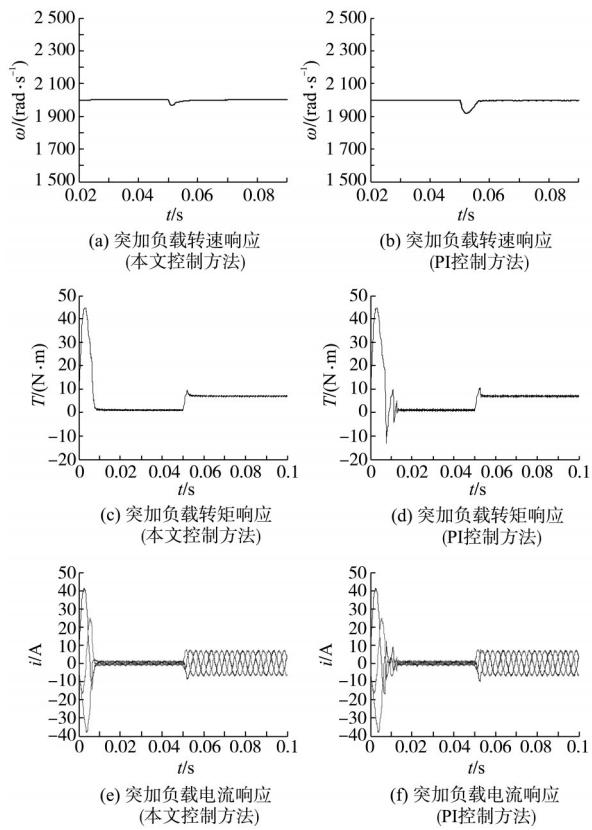


图4 系统突增负载时的动态响应仿真结果

Fig.4 Simulation results of system dynamic response to loading

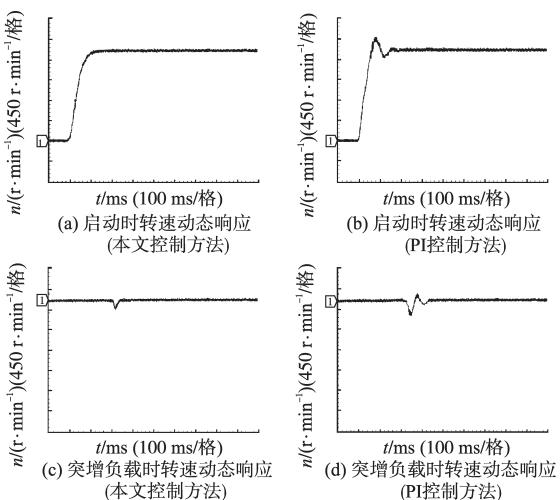


图5 系统启动和突增负载时转速动态响应实验结果

Fig.5 System dynamic response experimental results when system starting and torque loading

5 结论

本文针对永磁同步电动机调速系统的动态性能, 提出了一种非奇异快速终端滑模控制方案, 该方案不但保证了终端滑模控制系统的全局非奇异性, 而且解决了终端滑模中系统状态收敛

速度慢的问题, 使 PMSM 调速系统的动态性能得到了进一步的提高。最后通过与 PI 速度控制器进行比较, 仿真分析和实验研究结果均表明了该控制方案的可行性和有效性。

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.
- [2] 王江, 王静, 费向阳. 永磁同步电动机的非线性 PI 速度控制 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 125-130.
- [3] Uddin M N, Abido M A, Rahman M A. Development and Implementation of a Hybrid Intelligent Controller for Interior Permanent-magnet Synchronous Motor Drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(1): 68-76.
- [4] 王宝仁, 张承瑞, 贾磊. 永磁同步电机低脉动直接转矩控制建模与仿真 [J]. 电机与控制学报, 2007, 11(3): 221-225.
- [5] Miller C E, Van Zyl A W, Landy C F. Modeling a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Control Purposes [C]// IEEE Africon Conference, George, South Africa, 2002: 671-674.
- [6] 裴君, 赵光宙. 永磁同步电机磁链自适应控制 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6): 798-810.
- [7] 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): 84-90.
- [8] 周国荣, 李永丰. 永磁同步电机的自适应反演滑模变结构控制 [J]. 控制工程, 2009, 16(1): 49-51.
- [9] Zhang Yongchang, Zhu Jianguo. Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor with Reduced Torque Ripple and Commutation Frequency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(1): 235-248.
- [10] Cheng Stone, Li Chi-wei. Fuzzy PDFF-IIR Controller for PMSM Drive Systems [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(4): 828-835.
- [11] 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): 71-76.
- [12] Cetin Elmas, Oguz Ustun. A Hybrid Controller for the Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive [J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(6): 260-270.
- [13] 尚晶, 赵荣祥, 窦汝振. 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 23-27.
- [14] Liu Jun, Wang Gang, Yu Jin-shou. A Study of SMO Buffeting Elimination in Sensorless Control of PMSM [C]// Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan, China, 2010: 4948-4952.
- [15] 王艳敏, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电动机的无抖振滑模控制系统设计 [J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 514-519.

收稿日期: 2013-10-30

修改稿日期: 2014-05-05