

基于滑模控制器的 PMSM 的矢量控制系统研究^{*}

谢 涛¹, 高桂革¹, 王 杰²
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘 要: 为了提高三相 PMSM 调速系统的动态品质, 利用滑模控制对扰动和参数不敏感, 相应速度快等优点, 设计了一种基于滑模控制的速度控制器。利用 MATLAB/Simulink 仿真软件, 搭建控制系统模型并进行仿真分析。仿真验证了所提永磁同步电机速度控制器的有效性, 获得很好的速度跟踪精度和抗负载扰动能力。

关键词: 滑模控制; 永磁同步电机; 稳定性; 矢量控制系统

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0006-05

Research on Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Based on Sliding Mode Controller^{*}

XIE Tao¹, GAO Guige¹, WANG Jie²

(College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to improve the dynamic quality of the three-phase PMSM speed control system. A speed controller based on sliding mode control was designed, and the control system model was built and simulated by MATLAB/Simulink simulation software. The simulation results show the effectiveness of the permanent magnet synchronous motor speed controller proposed, and obtain good speed tracking accuracy and anti-load disturbance capability.

Key words: sliding mode control (SMC); permanent magnet synchronous motor (PMSM); stability; vector control system

0 引 言

永 磁 同 步 电 机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 以其单机容量不受限制、体积小、重量轻、可靠性高等突出优点被广泛应用在航空领域、汽车制造、机器人以及数控机床等行业^[1-2]。与传统的感应电机相比, 其超高的功率密度和较大的输出转矩很受行业欢迎。传统的 PI 控制方法虽然可以满足 PMSM 一定范围的调速需求, 但是在对速度跟踪精度和转矩响应方面有着明显缺陷, 并且极易受到环境影响。因此研究如何替代 PI 速度控制从而精准地达到期望控制效果具有重要意义。

为解决 PI 控制所存在的问题, 以提升电机动态性能, 获得良好的速度跟踪精度, 国内外学者致力于现代控制理论的研究并得到一些实际成果, 如神经网络控制^[3]、遗传算法^[4]、自适应速度控制^[5]、反馈线性控制^[6]和滑模变结构控制^[7]等。其中, 自适应速度控制容易使系统高速运行时产生抖动, 不利于系统的抗干扰能力; 反馈线性控制是将负载的非线性系统的 PMSM 通过坐标变化转化为非线性, 但目前还停留在理论研究上; 神经网络控制、遗传算法等需要复杂的设计和强大的硬件电路支撑, 不易于实现。文献[8]采用的是 PI 控制和迭代思想相结合的速度控制方式来抑制转速脉动, 效果良好但计算复杂。文献[9]采

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61374136, 11304200); 上海市自然科学基金项目(14ZR1417200)

作者简介: 谢 涛(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机调速控制。

用了反推公式设计了一种基于 Lyapunov 稳定性的速度控制器,是一种较为先进的非线性控制算法,利用负载转矩、定子电阻、转速差等参数计算定子电流,易于实现。但是该方法没有考虑实际电机运行时温度变化会使得定子电阻发生变化情况。文献[10-11]中提到采用查表法估算负载转矩,一定程度上抑制了转矩脉动,但是增加了系统响应时间。文献[12-13]中通过对输出变量进行微分,让系统的前后输出量呈线性,依旧没有考虑到非线性扰动。文献[14]设计了一种非奇异终端滑模控制算法可以有效提升收敛速度,但是无法削弱系统中存在的高频振动。

为了改善 PMSM 的动态响应和提高系统稳定性,本文设计了一种基于滑模控制器的 PMSM 矢量控制系统。其采用滑模变结构理论设计速度控制器,与传统的 PI 速度控制器相比,在基于滑模控制器的控制速度方法下,可以发现 PMSM 启动转速很快上升到给定速度并几乎没有超调量;负载突变的试验中在应对负载突然增大和减小的情况中,由于滑模控制器的控制速度的引入,无论是电机转速还是转矩响应波动更小,都反映出了很好的动态性能,抗外界扰动能力强,鲁棒性好。

1 PMSM 数学模型

本文对表贴式永磁同步电机 (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM) 建模,由于结构特征,故直轴电感和交轴电感相同,即 $L_d = L_q = L_s$, 并作如下假设:

- (1) 忽略铁心饱和;
- (2) 不计磁滞和涡流损耗;
- (3) 转子上没有阻尼绕组,永磁体也没有阻尼作用;

- (4) 感应电动势是正弦波。

则 PMSM 的 dq 轴数学模型为

定子电压方程:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\varphi_d - \omega_e\varphi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\varphi_q + \omega_e\varphi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程:

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt}i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt}i_q + \omega_e (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (3)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2}p\varphi_f i_q \quad (4)$$

机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (5)$$

式中: u_d, u_q ——定子电压交直轴分量;

i_d, i_q ——定子电流交直轴分量;

R ——定子绕组电阻;

φ_d, φ_q ——定子磁链交直轴分量;

ω_e ——电角速度;

ω_m ——机械角速度;

L_d, L_q ——定子 d, q 电感分量;

L_s ——定子电感;

φ_f ——永磁体磁链;

p ——极对数;

J ——转动惯量;

T_e ——电磁转矩;

T_L ——负载转矩;

B ——粘滞摩擦因数。

2 滑模变结构原理

滑模控制是变结构控制系统中的控制策略。这种控制最本质特点就是控制的不连续性,即是一种系统结构随时间不断变化的开关特性。这种特性实际上就是使系统在一定的条件下沿规定的轨迹做小幅度、高频率的振荡,即滑动模态。该控制的优点在于与系统的参数和扰动无关,系统具有很好的鲁棒性。滑模控制的原理如下。

考虑一般情况下的非线性系统:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (6)$$

式中: x ——系统的状态, $x \in R^n$;

u ——控制变量, $u \in R^m$ 。

使用滑模面函数:

$$s(x, t), s \in R^m \quad (7)$$

求解控制器函数:

$$u(x, t) = \begin{cases} u_i^+(x, t), s_i(x, t) > 0 \\ u_i^-(x, t), s_i(x, t) < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (8)$$

其中, $u_i^+(x, t) \neq u_i^-(x, t)$, 使得:

- (1) 滑动模态存在;
- (2) 满足可达性条件, 在滑模面 $s(x, t) = 0$ 以外的运动点都将在有限的时间内到达滑模面, 即 $\dot{s} s < 0$;

- (3) 保证滑模运动的稳定性;
- (4) 达到控制系统动态品质要求。

3 滑模速度控制器设计

采用 $i_d=0$ 的转子磁场定向控制方法,根据式(3)、式(5)得:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s}(-Ri_q - p\varphi_f\omega_m + u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}\left(-T_L + \frac{3p\varphi_f}{2}i_q\right) \end{cases} \quad (9)$$

定义 PMSM 系统的状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_{\text{m}} \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_{\text{m}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω_{ref} ——电机的参考转速,为一常量;

 ω_m ——实际转速。

根据式(9)、式(10)可知:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(T_L - \frac{3p\varphi_f}{2} i_q \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\frac{3p\varphi_{f,i}}{2J} i_q \end{cases} \quad (11)$$

定义 $u = \ddot{i}_q, D = \frac{3p\varphi_f}{2J}$, 则式(11)可变为

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

定义滑模面函数为

$$s = cx_1 + x_2 \quad (13)$$

其中, $c > 0$ 为待设计参数。

对式(13)求导,可得:

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 + \dot{x}_2 = cx_2 - Du \quad (14)$$

为了保证 PMSM 驱动系统具有较好的品质, 采用指数趋近率方法, 可得控制器表达式为

$$u = \frac{1}{D} [c x_2 + \varepsilon \text{sgn}(s) + qs] \quad (15)$$

从而可得 q 轴参考电流为

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs] d\tau \quad (16)$$

从式(16)可以看出,由于控制器包含积分项,一方面可以削弱抖振现象,另一方面也可以削弱系统稳态误差,提高系统的控制品质。根据滑模到达条件 $s\dot{s} < 0$,可以得到系统是渐进稳定的。

4 基于 MATLAB 的系统仿真与分析

为了验证本文方法的有效性,以 SPMSM 为研究对象,采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略,速度控制器是基于滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)原理的速度控制器,电流控制器是传统 PI 控制器,系统采用一个速度环和两个电流环的结构,利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真系统。其系统结构控制框图如图 1 所示。

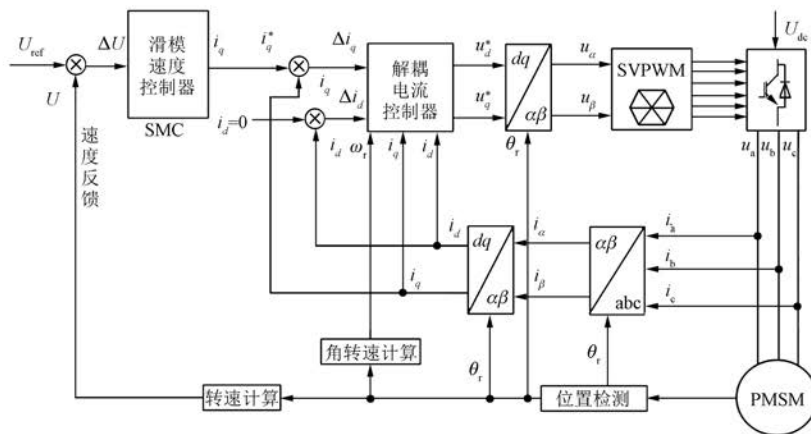


图 1 系统结构控制框图

为了验证本文所设计的滑模速度控制器的有效性,根据文中所设计的系统控制框图,通过 MATLAB/Simulink 仿真软件进行系统仿真。仿真条件为:参考转速 $n=1\ 000\ \text{r/min}$,初始负载转矩设置 $T_L=0$,在 $t=0.2\ \text{s}$ 时突加 $T_L=5\ \text{N}\cdot\text{m}$;滑模控制器参数设置为 $c=60$, $\varepsilon=200$, $q=300$ 。仿真所用电机参数如下:定子电阻 $R=0.331\ \Omega$,定子电感 $L_s=0.002\ 1\ \text{H}$,永磁体磁链 $\varphi_f=0.353\ 7\ \text{Wb}$,转动惯量 $J=0.000\ 8\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$,粘滞摩擦因数 $B=0.001$,极对数 $p=4$ 。SMC 控制器对速度的控制波形如图 2 所示。

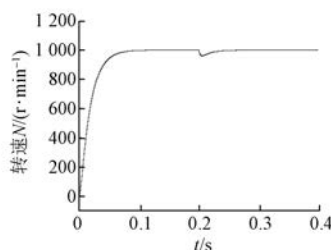


图 2 SMC 控制器对速度的控制波形

从图 2 仿真结果可以看出,基于 SMC 的转速控制器在 $t=0.12\ \text{s}$ 的时间就可以控制在给定速度上,具有很好的跟随性能,且可以看出该控制器没有超调,对于不允许有超调的工程应用具有很好的优势;在 $t=0.2\ \text{s}$ 时,给定电机负载 $5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 的突变,虽然电机速度些许突变,但是在经历了 $0.05\ \text{s}$ 很短的响应时间后,该控制器依然能快速且稳定地跟随到给定转速 $1\ 000\ \text{r/min}$,速度逐渐趋稳。这显示该 SMC 速度控制器对于电机转速具有很好的控制性能。

对于传统的 PI 控制器,为体现 PI 控制器出现负载突变后有明显的转速跟踪误差,反证 SMC 速度控制器的优良性。下面做相应的仿真,仿真各项参数相同,仿真结果如下。

图 3 为 PI 控制器对扰动的控制效果,图 4 为 SMC 控制器对扰动的控制效果。从图 3 和图 4 可以看出,在空载时,虽然传统 PI 控制器和 SMC 控制都能将速度控制在给定值上并稳定下来,但传统的 PI 控制器明显出现超调量。当负载突变时,传统 PI 控制器速度下降后,又迅速升高稳定在 $995\ \text{r/min}$,不能恢复到给定转速 $N=1\ 000\ \text{r/min}$,误差率为 0.5% ;而 SMC 控制器在负载发生突变时,转速下降后,也同样升高并稳定在给定转速

$N=1\ 000\ \text{r/min}$,误差率基本为 0 。可以看出该控制器具有很好的抗干扰能力和恢复能力。同时可以看到,当 $t=0.2\ \text{s}$ 时,负载从 0 突变到 $5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 时,PI 控制器的转速下降至 $930\ \text{r/min}$,下降了 7% ;而对比 SMC 控制器,在负载突变成 $5\ \text{N}\cdot\text{m}$ 时,转速下降至 $960\ \text{r/min}$,下降了 4% 。明显地,在应对负载突变方面,传统 PI 速度控制器出现的突变更大、恢复能力较弱;而 SMC 速度控制器以显而易见的优越性说明了该控制器具有很好的抗干扰能力和鲁棒性。

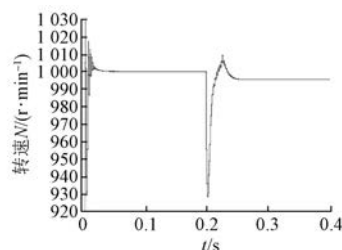


图 3 PI 控制器对扰动的控制效果

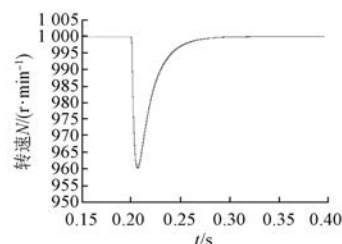


图 4 SMC 控制器对扰动的控制效果

图 5 是在 SMC 控制器下控制的转矩响应曲线,可以看出该控制器在 $t=0.2\ \text{s}$ 时负载突变的时候有很好的响应,且基本没有转矩波动,体现了 SMC 速度控制器良好的转矩响应能力。图 6 是 SMC 速度控制器下的三相电流变化曲线,可以发现转矩突变前后该曲线具有很好的正弦度,也从侧面反映该控制器具有很好的控制性能。

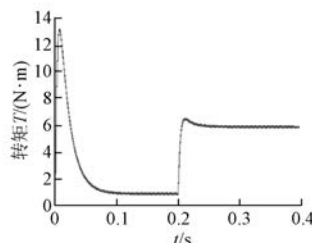


图 5 SMC 控制器控制下的转矩波形

5 结 语

以 SPMSM 为研究对象,本文设计了基于滑

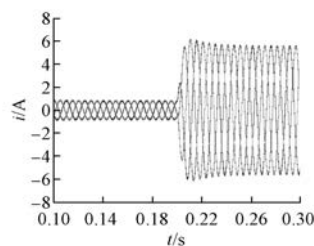


图6 SMC 控制器控制下的电流波

模控制器的 PMSM 矢量控制系统。仿真结果表明基于滑模控制的速度控制器具有无超调量,速度跟踪精度较高,抗负载突变恢复能力强,对扰动和系统参数变化具有很好的鲁棒性等优点。从仿真结果中可知,SMC 控制器能很好地控制速度,对于负载的扰动有较强的抗扰动能力和恢复能力,对转矩脉动也有很好的抑制作用。

【参考文献】

- [1] 王鑫,李伟力,程树康.永磁同步电动机发展展望[J].微电机,2007,40(5): 70-72.
- [2] 郑泽东,李永东.永磁同步电机控制系统综述[J].伺服控制,2009,1(1): 23-25.
- [3] 马素君,谢武斌.基于 RBF 神经网络的永磁同步直线电机全局滑模控制[J].组合机床与自动化加工技术,2012(7): 82-84.
- [4] 曹先庆,朱建光,唐任远.基于模糊神经网络的永磁同步电动机矢量控制系统[J].中国电机工程学报,2006,26(1): 137-141.
- [5] 赵彤,余洋.平方转矩负载下基于自适应反推理论的 PMSM 速度控制器设计[J].河北师范大学学报,2014,38(3): 264-265.

- [6] 孙宜标,郭庆鼎.基于滑模观测器的直线伺服系统反馈线性化速度跟踪控制[J].控制理论与应用,2004,21(3): 391-397.
- [7] 张志伟,张天一.永磁同步电机的滑模速度控制器建模研究仿真[J].计算机仿真,2016,33(12): 380-382.
- [8] ANDON V T, GIUSEPPE L C, VINCENZO G, et al. Sliding mode neuron-adaptive control of electronic drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 671-679.
- [9] 狄可可,赵光宙.基于自适应 Back-stepping 的 PMSM 速度控制器设计[J].江南大学学报,2008,10(8): 579-581.
- [10] ANGELO C D, BOSSIO G, GARCIA G O, et al. Speed control of PMSMS with interconnection and damping assignment or feedback linearization comments about their performance [C] // IEEE ISIE, Montreal, Canada, 2006: 2182-2187.
- [11] 郑剑飞,冯勇,陆启良.永磁同步电机的高阶终端滑模控制方法[J].控制理论与应用,2009,26(6): 697-700.
- [12] 苏良昱.基于 PCHD 模型和滑模控制的表贴式永磁同步电机控制系统设计[J].电机与控制应用,2015,42(8): 39-40.
- [13] 罗志伟,谷爱昱,洪俊杰,等.基于改进型速度滑模控制器的永磁直线同步电机伺服系统[J].电机与控制应用,2016,43(12): 39-41.
- [14] 张月玲,党选举.基于死区迟滞函数的永磁同步直线电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2011,31(3): 67-74.

收稿日期: 2017-07-10

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发售,邮发代号 4-

199。在半个多世纪的岁月中,该杂志为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的影响。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。