

基于积分滑模控制的对称六相永磁同步电机调速系统研究*

李永恒, 刘陵顺, 闫红广

(海军航空大学 航空基础学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了提高对称六相永磁同步电机对参数变化和负载扰动的鲁棒性, 在积分滑模面的基础上, 提出一种基于积分滑模控制算法的对称六相永磁同步电机调速系统。通过 Lyapunov 定理证明了积分滑模控制器的稳定性, 并进一步分析了控制器的性能。仿真结果表明: 相比于 PI 控制算法, 所提算法具有更好的抗干扰能力和稳定性。

关键词: 对称六相永磁同步电机; 积分滑模控制; 调速系统

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)12-0001-05

Research on Speed System of Symmetrical Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Integral Sliding Mode Control*

LI Yongheng, LIU Lingshun, YAN Hongguang

(Aviation Basics Institute, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to improve the robustness of symmetrical six-phase permanent magnet synchronous motor to parameter variation and load disturbance, a symmetrical six-phase permanent magnet synchronous motor speed system was proposed based on integral sliding mode surface. The stability of integral sliding mode controller was proved by Lyapunov theorem, and the performance of the controller was further analyzed. Simulation results showed that, the proposed algorithm had better anti-interference ability and stability compared with PI control algorithm.

Key words: symmetrical six-phase permanent magnet synchronous motor; integral sliding mode control; speed system

0 引言

对称六相永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有多变量、强耦合等特点, 在航空航天、数控机床等方面得到了广泛的应用。PI 控制具有控制简单、易于实现等优点, 被广泛应用, 但对称六相 PMSM 作为一种典型的非线性控制系统, 在系统受到外部干扰的情况下, PI 控制鲁棒性不强, 难以满足高性能系统的要求^[1-4]。

随着控制理论的飞速发展, 国内外专家学者

针对 PMSM 控制系统进行了大量的研究, 提出了许多具有代表性的非线性控制方法, 包括模糊控制、神经网络控制、滑模变结构控制 (Sliding Mode Variable Structure Control, SMC) 等^[5-7]。滑模变结构控制方法以对参数和外部扰动不敏感、鲁棒性强等优点成为研究热点^[8-9]。文献[10]设计了电流环和转速环一体化的滑模调速控制器。试验结果表明, 该控制器提高了系统的动态性能和鲁棒性。但因为一体化设计的原因, 控制器参数不易选取, 给控制器设计带来了困难。文献[11]提出

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51377168); 国家博士后特别项目(201104769)

作者简介: 李永恒(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为电机控制。

刘陵顺(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机控制与电磁兼容。

闫红广(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为电机控制。

一种位置、速度滑模控制器一体化设计方法,并利用状态变量之间的关系改进传统的滑模面,消除了系统抖振,提高了系统动态性能和鲁棒性。文献[12]提出一种以负载转矩和转速为观测对象的滑模观测器。负载转矩观测值由负载转矩实际值和抖振信号组成,随着滑模运动,负载转矩观测值逐渐收敛到零点,克服了负载时变对控制系统的影响,试验结果表明系统的鲁棒性得到了提高。文献[13-14]提出一种滑模观测器,构建了PMSM无位置传感器调速系统,减小了速度观测误差。文献[15]针对传统滑模控制器需要对速度信号进行微分这一缺点,设计了一种积分型滑模变结构控制器。试验表明,所设计的控制器具有快速、无超调等优点,且对负载扰动具有较强的鲁棒性。文献[16]设计了一种二阶滑模控制器,用以解决不连续的控制增益与有限的切换频率所带来的抖振问题。但二阶滑模控制器增加了系统的复杂性,难以达到理想的控制效果。

为了提高对称六相 PMSM 对参数变化和负载扰动的鲁棒性,本文提出了一种基于积分滑模控制算法的电机调速系统,有效增强了系统的抗干扰能力和稳定性。

1 对称六相 PMSM 数学模型

本文所研究的对称六相 PMSM 转子结构为表贴式,每相绕组相差 60°,其结构如图 1 所示。

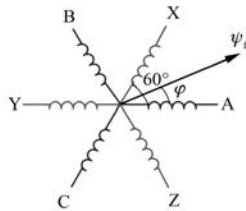


图 1 电机结构图

假设转子上没有阻尼绕组,忽略定子、转子铁心磁阻,不计磁滞损耗和涡流损耗,励磁磁场和电枢反应磁场在气隙中均为正弦分布。可得对称六相 PMSM 在自然坐标系下的数学模型为

$$u_s = R i_s + L \frac{di_s}{dt} - \omega \psi_f f(\varphi) \quad (1)$$

其中: $u_s = [u_{AN} \ u_{BN} \ u_{CN} \ u_{XN'} \ u_{YN'} \ u_{ZN'}]^T$;

$$i_s = [i_A \ i_B \ i_C \ i_X \ i_Y \ i_Z]^T; f(\varphi) =$$

$$\begin{bmatrix} \sin\varphi & \sin\left(\varphi - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\left(\varphi - \frac{1}{3}\pi\right) & \sin(\varphi - \pi) & \sin\left(\varphi - \frac{5}{3}\pi\right) \end{bmatrix}^T$$

式中: φ ——转子磁链与定子侧 A 相轴线的夹角。

根据式(1),建立基于 $d-q$ 坐标系的电机模型,可得定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = R_s i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d, u_q —— d, q 轴电压分量;

R_s ——定子电阻;

i_d, i_q —— d, q 轴电流分量;

ω_e ——转子电角速度;

L_d, L_q —— d, q 轴定子电感;

ψ_f ——转子磁链。

$d-q$ 坐标系下的电磁转矩表达式为

$$T_e = 3p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中: T_e ——电磁转矩;

p ——电机极对数。

所研究的电机为表贴式结构, $L_d = L_q$, 可得:

$$T_e = 3p\psi_f i_q \quad (4)$$

运动方程为

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

式中: T_L ——负载转矩;

J ——转动惯量;

ω_m ——转子机械角速度;

B ——阻尼系数。

根据式(4)、式(5),可得机械运动方程为

$$\dot{\omega}_m + a\omega_m + d = b i_q \quad (6)$$

其中: $a = \frac{B}{J}; b = \frac{3p\psi_f}{J}; d = \frac{T_L}{J}$ 。

2 积分滑模控制器设计

考虑到电机实际运行时,存在参数变化和负载扰动,机械运动方程可改写为

$$\dot{\omega}_m + (a + \Delta a)\omega_m + d + \Delta d = (b + \Delta b) i_q \quad (7)$$

式中: $\Delta a, \Delta d, \Delta b$ ——参数 a, d, b 的干扰量。

控制器的目标是寻找合适的控制律,使得转子

机械角速度 ω_m 能够严格跟随参考机械角速度 ω_{ref} 。

定义跟踪误差:

$$e(t) = \omega_{ref} - \omega_m \quad (8)$$

对式(8)求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega}_m = \\ &\dot{\omega}_{ref} + (a + \Delta a)\omega_m - (b + \Delta b)i_q + d + \Delta d = \\ &\dot{\omega}_{ref} + a\omega_m - bi_q + d + \Delta a\omega_m - \Delta bi_q + \Delta d = \\ &-a(\omega_{ref} - \omega_m) + \dot{\omega}_{ref} + a\omega_{ref} - bi_q + d + \\ &\Delta a\omega_m - \Delta bi_q + \Delta d = -ae(t) + \varphi(t) + \delta(t) + \Delta d \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $\varphi(t) = \dot{\omega}_{ref} + a\omega_{ref} - bi_q + d$; $\delta(t) = \Delta a\omega_m - \Delta bi_q$ 。

2.1 无干扰滑模控制器设计

忽略参数变化和负载扰动,式(9)可变为

$$\dot{e}(t) = -ae(t) + \varphi(t) \quad (10)$$

定义积分滑模面:

$$s(t) = e(t) + c \int_0^t e(t) dt \quad (11)$$

式中: c ——滑模面常数。

定理 1 对于式(6)的机械运动方程,设计式(11)的积分滑模面,令控制律

$$i_q = \frac{1}{b} [(c-a)e(t) + \dot{\omega}_{ref} + a\omega_{ref} + d + k \operatorname{sgn}(s)] \quad (12)$$

其中: k 为正常数。则,系统能在有限时间内到达滑模切换面。

证明 选取 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2}s^2$, 对其求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s[\dot{e}(t) + ce(t)] = \\ &s[(c-a)e(t) + \dot{\omega}_{ref} + a\omega_{ref} - bi_q + d] \end{aligned} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13),可得:

$$\dot{V} \leq -k|s| \leq 0 \quad (14)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论,系统能由初始状态在有限时间内到达滑模切换面。定理 1 得证。

当系统进入滑动模态时,系统状态满足:

$$e(t) + c \int_0^t e(t) dt = 0 \quad (15)$$

此时式(15)是渐进稳定的,即积分滑模控制系统能渐进稳定地收敛到零点。

2.2 带干扰滑模控制器设计

系统参数变化和负载扰动时,对于式(9)所示方程,由于转子机械角速度 ω_m 和电流 i_q 有界,则 $\delta(t)$ 有界。设

$$|\delta(t)| < \theta_1, \quad |\Delta d| < \theta_2 \quad (16)$$

其中: θ_1, θ_2 为未知常数。记 $\hat{\theta}_1$ 为 θ_1 的估计值, $\hat{\theta}_2$ 为 θ_2 的估计值。

定理 2 对于式(9)方程,参数 $\delta(t)$ 和 Δd 满足式(16)条件,估计值 $\hat{\theta}_1$ 和 $\hat{\theta}_2$ 满足下列条件:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_1 = \mu_1 |s| \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = \mu_2 |s| \end{cases} \quad (17)$$

其中: μ_1, μ_2 为正常数。

设计式(11)的积分滑模面,令控制律:

$$i_q = \frac{1}{b} [(c-a)e(t) + \dot{\omega}_{ref} + a\omega_{ref} + d + (\hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 + k) \operatorname{sgn}(s)] \quad (18)$$

其中: k 为正常数。则,系统能在有限时间内到达滑模切换面。

证明 选取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \left[s^2 + \frac{1}{\mu_1} (\hat{\theta}_1 - \theta_1)^2 + \frac{1}{\mu_2} (\hat{\theta}_2 - \theta_2)^2 \right] \quad (19)$$

对式(19)求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{\mu_1} (\hat{\theta}_1 - \theta_1) \dot{\hat{\theta}}_1 + \frac{1}{\mu_2} (\hat{\theta}_2 - \theta_2) \dot{\hat{\theta}}_2 = \\ &s[(c-a)e(t) + \varphi(t) + \delta(t) + \Delta d] + \\ &\frac{1}{\mu_1} (\hat{\theta}_1 - \theta_1) \dot{\hat{\theta}}_1 + \frac{1}{\mu_2} (\hat{\theta}_2 - \theta_2) \dot{\hat{\theta}}_2 \end{aligned} \quad (20)$$

将式(17)代入式(20),可得:

$$\dot{V} = s[(c-a)e(t) + \varphi(t) + \delta(t) + \Delta d] + (\hat{\theta}_1 - \theta_1)|s| + (\hat{\theta}_2 - \theta_2)|s| \quad (21)$$

将式(18)代入式(21),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s[\delta(t) + \Delta d - (\hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 + k) \operatorname{sgn}(s)] + \\ &(\hat{\theta}_1 - \theta_1)|s| + (\hat{\theta}_2 - \theta_2)|s| \leq \\ &|s| [|\delta(t)| + |\Delta d|] - (\hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 + k)|s| + \\ &(\hat{\theta}_1 - \theta_1)|s| + (\hat{\theta}_2 - \theta_2)|s| \leq \\ &|s| [|\theta_1 + \theta_2| - (\hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 + k)|s| + \\ &(\hat{\theta}_1 - \theta_1)|s| + (\hat{\theta}_2 - \theta_2)|s|] = -k|s| \leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论,系统能由初始状

态在有限时间内到达滑模切换面。定理 2 得证。

当系统进入滑动模态时, 系统状态满足式 (15) 的渐近稳定条件, 即积分滑模控制系统能渐近稳定地收敛到零点。

3 仿真验证

采用基于矢量空间解耦的 SVPWM 算法, 对如图 2 所示的调速系统进行仿真验证。

对称六相 PMSM 参数为: 定子电阻 $R_s = 1 \Omega$, 定子漏感 $L_s = 0.83 \text{ mH}$, 主电感平均值 $L_{sm} = 1.17 \text{ mH}$, 主电感二次谐波幅值 $L_{rs} = -0.46 \text{ mH}$, 转子磁链 $\psi_f = 0.1 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^2$, 极对数 $p = 2$, 负载转矩 $T_L = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$, 直流侧母线电压 $U_{dc} = 300 \text{ V}$ 。滑模面参数 $c = 10, \mu_1 = \mu_2 = 0.001, k = 0.01$ 。

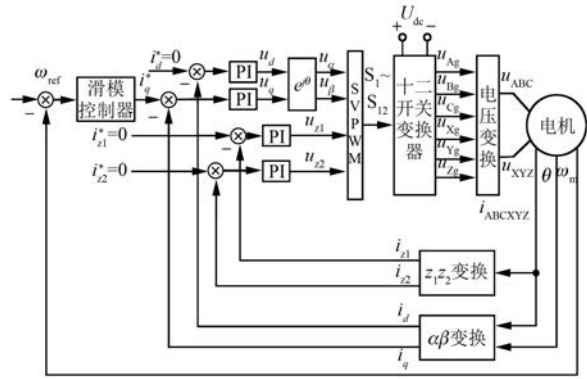


图 2 电机调速系统框图

在系统参数变化和负载扰动情况下, 将本文所提算法与传统 PI 控制算法进行比较, 可得系统启动时的动态响应仿真结果, 分别如图 3、图 4 所示。

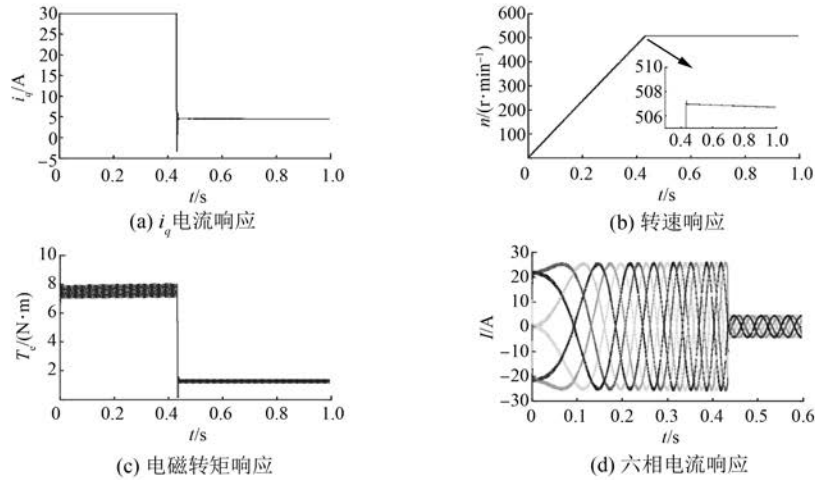


图 3 PI 控制下的动态响应仿真结果

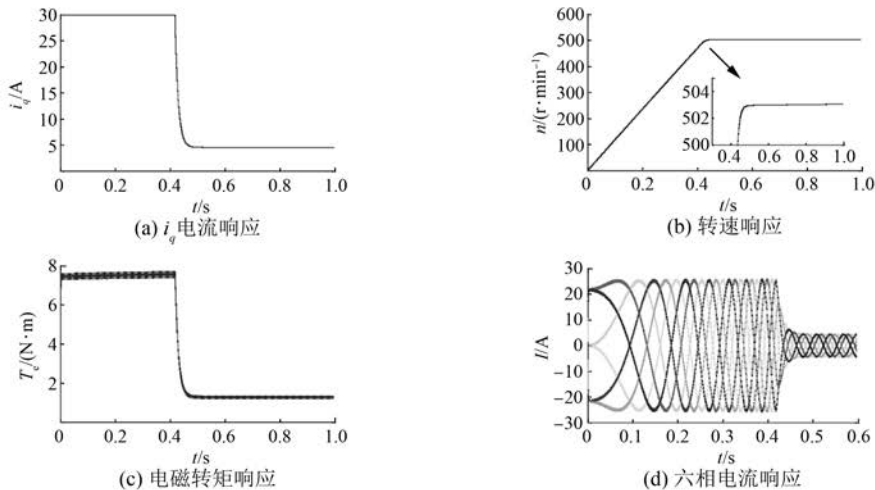


图 4 滑模变结构控制下的动态响应仿真结果

从以上仿真结果可知,当系统参数变化和负载扰动时,PI 控制器电流 i_q 超调量较大,且到达稳态后波动较大;转速动态调节时间相同,但到达稳态后转速波动较大;电磁转矩波动较大,六相电流稳态性能略显不足。滑模变结构控制器电流 i_q 超调量较小,到达稳态时过渡光滑,电流波动较小,因此转速、电磁转矩、六相电流稳态性能良好。

4 结 语

本文设计的基于积分滑模控制算法的电机调速系统,克服了参数变化和负载扰动不确定性对控制器的影响。通过 Lyapunov 定理证明了控制器的稳定性,并进一步分析了控制器的性能。该算法具有比传统 PI 控制算法更强的抗干扰能力和稳态性能。

【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] 肖曦,张猛,李永东.永磁同步电机永磁体状况在线检测[J].中国电机工程学报,2007,27(24): 44-47.
- [3] MOON H, KIM H, YOUN M. A discrete-time predictive current control for PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18 (1): 464-472.
- [4] 田艳丰,郭庆鼎.永磁直线同步电动机的滑模- H_∞ 鲁棒跟踪控制[J].电工技术学报,2004,19(4): 1-5,11.
- [5] 刘贤兴,卜言柱,胡育文,等.基于精确线性化解耦的永磁同步电机空间矢量调制系统[J].中国电机工程学报,2007,27(30): 56-59.
- [6] 张昌凡,王耀南,何静.永磁同步伺服电机的变结构智能控制[J].中国电机工程学报,2002,22(7): 13-17.
- [7] WAI R. Total sliding-mode controller for PM synchronous servo motor drive using recurrent fuzzy neural network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(5): 926-944.
- [8] 葛宝明,郑琼林,蒋静坪,等.基于离散时间趋近率控制与内模控制的永磁同步电动机传动系统[J].中国电机工程学报,2004,24(11): 106-111.
- [9] ROY A M C, MOHAMMAD S I. Application of a sliding mode observer for position and speed estimation in switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37 (1): 51-58.
- [10] CHEOL I B, KIM K H. Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer integral sliding mode control technique [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8 (1): 47-54.
- [11] 方斯琛,周波.滑模控制的永磁同步电机伺服系统一体化设计[J].中国电机工程学报,2009,29(3): 96-101.
- [12] 张晓光,孙力,赵克.基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2012,32(3): 111-116.
- [13] PAPONPEN K, KONGHIRUN M. An improved sliding mode observer for speed sensorless vector control drive of PMSM [C] // Power Electronics and Motion Control Conference, 2006: 1-5.
- [14] HAN Y, CHOI J, KIM Y. Sensorless PMSM drive with a sliding mode control based adaptive speed and stator resistance estimator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3588-3591.
- [15] 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.
- [16] LAGHROUCHE S, PLESTAN F, GLUMINEAU A, et al. Robust second order sliding mode control for a permanent magnet synchronous motor [C] // Proceedings of the American Control Conference, 2003: 4071-4076.

收稿日期: 2018-07-01