

永磁同步电机的积分型滑模变结构控制

侯勇, 赵姗姗, 王勇

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 在永磁同步电机(PMSM)的控制中,传统PI调节器存在动态性能和鲁棒性较差的问题.针对永磁同步电机控制的电流环和转速环,设计了采用带有积分控制项的滑模变结构控制方法(ISMC),不仅可以减少速度控制稳态误差,还能提高系统的响应速度.利用Matlab分别对PI控制和积分型滑模变结构控制进行了仿真分析.仿真结果表明,永磁同步电动机的积分型滑模变结构控制方法具有良好的动态性能和抗干扰能力.

关键词: 永磁同步电机; 矢量控制; 积分型滑模变结构控制; PI控制

中图分类号: TM341; TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2013)02-0055-04

Integral Sliding Mode Variable Structure Control for Permanent Magnet Synchronous Motor

HOU Yong, ZHAO Shanshan, WANG Yong

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In the control of permanent magnet synchronous motor(PMSM), Conventional PI regular has some shortcomings in the system robustness and dynamic response. Focusing on this problem, a new method using sliding mode variable structure control with an integral action(ISMC) is proposed for the PMSM speed loop and current loop. It can not only reduce the steady error of speed control, but also improve the responding speed. The performance of the PMSM based on PI controller and ISMC controller were compared by using Matlab. The simulation results show that the PMSM drive system with the integral sliding mode controller has better dynamic and strong robustness.

Key words: permanent magnet synchronous motor; vector control; integral sliding mode control; PI control

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有结构简单、功率密度高、高效节能的特性,在国防、工农业生产和日常生活等方面逐步得到广泛的应用.控制定子电流是实现PMSM控制的关键,常见的控制方法有滞环电流控制、预测电流控制等^[1].滞环电流控制具有动态响应快、不需负载信息和容易实现等优点,但稳态电流波动较大,容易产生噪声.预测电流控制方法尽管可以获得良好的电流控制性能,但计算复杂,不易实现.并且由于永磁同步电机电流变化具有一定的不确定性,传统的PI控制理论不能保证动态时的鲁棒性^[2].近年来有许多学者将滑模变结构控制理念引入到电机控制领域当中,并对其进行了更为深入的研究.其中文献[3-4]

将积分型滑模变结构控制(integral sliding mode control, ISMC)应用于永磁同步电机转速环或者电流环控制中,得到良好的控制效果.

本文考虑到电机在实际运行中参数会出现扰动情况,因此在常见的积分型滑模变结构控制方法的基础上,采用了等效控制加切换控制的积分型滑模变结构控制,该方法不仅具有良好的动态性能,而且能够对电机参数扰动具有自适应能力,使系统具有很强的鲁棒性.

1 永磁同步电机的数学模型

d - q 旋转坐标系中的 PMSM 电压方程为

收稿日期: 2012-04-23; 修回日期: 2012-12-11

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金项目(20110410)

作者简介: 侯勇(1965—),男,吉林人,教授,houyong@tust.edu.cn.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于表面式 PMSM, 有

$$L_d = L_q = L \quad (2)$$

电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (3)$$

机械运动方程为

$$T_e - T_l = \frac{J}{p} \frac{d\omega_e}{dt} \quad (4)$$

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; ψ_f 为永磁体磁链; ω_e 为转子电角速度; T_e 、 T_l 为电磁转矩和负载转矩; J 为转动惯量。

将式(1)改写成

$$\begin{cases} u_d = u'_d + \Delta u_d \\ u_q = u'_q + \Delta u_q \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} u'_d = (R + pL_d) i_d, \Delta u_d = -\omega_e L_q i_q \\ u'_q = (R + pL_q) i_q, \Delta u_q = \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (6)$$

式中: u'_d 、 u'_q 分别为与 i_d 、 i_q 存在一阶微分关系的电压分量; Δu_d 、 Δu_q 分别为消除 d 、 q 轴电压以及电流相互交叉耦合的补偿项, 通过此项进行前馈补偿可以实现 d 、 q 轴电流 i_d 、 i_q 的解耦控制。

2 基于积分型滑模变结构控制的系统控制策略

从本质上讲, 变结构控制属于非线性控制, 其非线性特征体现为控制的不连续性, 即系统“结构”随着时间变化呈现为一种开关特性, 由此, 系统的运动被引导进入到超面 $S: C^T X = 0$ 上, 或更一般讲, 进入到一个流形 $s(X) = 0$ 上, 系统在 $s(X) = 0$ 上的运动是逐渐稳定的。滑模运动的显著优点是具有对各种扰动的完全鲁棒性^[5]。

针对永磁同步电机控制中, 对其电流环进行滑模变结构控制, 选择 d 、 q 轴电流的偏差作为系统的状态变量, 即

$$x_d = i_d - i_d^*, \quad x_q = i_q - i_q^*$$

式中: i_d^* 、 i_q^* 分别为 d 、 q 轴电流的参考值。

首先, 将式(1)中转子 d 、 q 轴电流的微分方程转化为偏差的微分方程, 有

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{R}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* + x_d \\ i_q^* + x_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d' \\ u_q' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{i}_d^* \\ \dot{i}_q^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

对于一阶系统, 滑模变结构控制中的切换函数通常选择为

$$s = cx \quad (8)$$

滑动模态仅出现在 $s = 0$ 时, 这样, 仅在 $x = 0$ 时才会出现滑动模态, 在状态 x 未达到原点前, 系统以线性状态反馈方式运行^[6], 如图 1(a) 所示。这表明预先规定的滑动模态无法保证系统动态时的鲁棒性。因此, 式(8)所定义的切换线就不适合应用于类似电流控制的一阶系统。

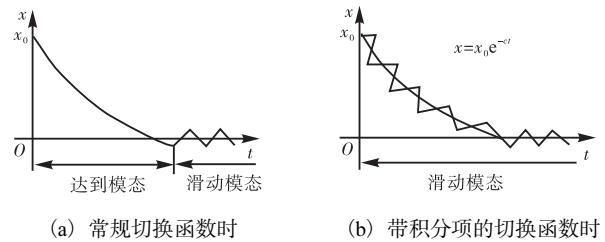


图1 一阶系统状态的时间响应

Fig. 1 Time responses of the state in the first order system

鉴于上述分析, 可在切换函数的定义中引入跟踪误差的积分项, 设计切换函数

$$s = x + c \int_{-\infty}^t x(\eta) d\eta \quad (9)$$

由 $s = \dot{s} = 0$, 可解式(9)得到

$$x = x_0 e^{-ct} \quad (10)$$

这样, 状态变量 x 将以指数形式趋近于零, 时间常数为 c^{-1} , 如图 1(b) 所示。因此, 可以通过选择系数 c 来预先设定滑模运动的动态特性。并且, 式(9)还表明, 如果积分项初始值不同, 系统的动态响应也会随之变化。积分项的初始值

$$h_0 = \int_{-\infty}^0 x(\eta) d\eta \quad (11)$$

为使系统在初始时刻就进入滑动模态, 即满足 $t = 0$ 时 $s = 0$, 应满足

$$x_0 + ch_0 = 0 \quad (12)$$

由式(12)解得

$$h_0 = -x_0 / c \quad (13)$$

这样, 当 $t=0$ 时 $s=0$, 即在初始时刻系统就处于滑动模式, 保证了系统在整个动态过程中的完全鲁棒性. 通常, 初始状态 x_0 均为已知的, 所以可以实现积分型滑模变结构的完全鲁棒性. 通常在滑模变结构控制方法中, 采用饱和函数替代继电器型切换控制, 尽管其可以减小抖振, 但也会引起系统的稳态误差, 而积分项的引入可有效地减少这些误差^[5-6].

考虑实际应用中电机的参数会随温度和磁路饱和的变化而变化, 采用等效控制的基础上加入切换控制的方式可以在非线性和外部扰动的前提下满足可达性条件 $ss < 0$, 保证系统在切换面上滑动运动区的存在, 准确跟踪电流变化, 使系统鲁棒性增强.

控制 u'_d 、 u'_q 设计为

$$\begin{cases} u'_d = u'_{deq} + \Delta u'_d \\ u'_q = u'_{qe} + \Delta u'_q \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta u'_d = k_{d1}x_d + k_{d2} \\ \Delta u'_q = k_{q1}x_q + k_{q2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: u'_{deq} 、 u'_{qe} 为等效控制项, 它能够保证系统在切换面上的滑动运动; $\Delta u'_d$ 、 $\Delta u'_q$ 为切换控制项, 它能够保证滑动运动区的存在. 当滑动运动时, 系统符合方程 $\dot{s} = 0$, 即

$$\dot{x} + cx = 0 \quad (16)$$

将式(5)代入式(16)得等效控制

$$\begin{cases} u'_{deq} = Rx_d + Ri_d^* - L_d c_d x_d \\ u'_{qe} = Rx_q + Ri_q^* - L_q c_q x_q \end{cases} \quad (17)$$

通过电机参数变化的上下界来设计切换控制

$$\begin{cases} R_{\min} < R + \Delta R < R_{\max} \\ L_{\min} < L + \Delta L < L_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: ΔR 、 ΔL 分别为温度变化和磁路饱和引起的转子相应电阻、电感的变化量. 为满足滑模运动的广义存在条件 $ss < 0$, 应有

$$s(\dot{x} + cx) < 0 \quad (19)$$

将式(15)、(16)、(17)代入式(14), 由式(19)化简得

$$\begin{cases} (k_{d1} + \Delta Lc_d - \Delta R)s_d x_d + (k_{d2} - \Delta Ri_d^* - \Delta Li_d^*)s_d < 0 \\ (k_{q1} + \Delta Lc_q - \Delta R)s_q x_q + (k_{q2} - \Delta Ri_q^* + \Delta Li_q^*)s_q < 0 \end{cases} \quad (20)$$

为使式(20)不等式严格成立, 切换控制增益必须满足以下条件:

$$k_{d1} = \begin{cases} k_{d1}^+ < \min(\Delta R - \Delta Lc_d) & s_d x_d > 0 \\ k_{d1}^- > \max(\Delta R - \Delta Lc_d) & s_d x_d < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$k_{d2} = \begin{cases} k_{d2}^+ < \min(\Delta Ri_d^* + \Delta Li_d^*) & s_d > 0 \\ k_{d2}^- > \max(\Delta Ri_d^* + \Delta Li_d^*) & s_d < 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$k_{q1} = \begin{cases} k_{q1}^+ < \min(\Delta R - \Delta Lc_q) & s_q x_q > 0 \\ k_{q1}^- > \max(\Delta R - \Delta Lc_q) & s_q x_q < 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$k_{q2} = \begin{cases} k_{q2}^+ < \min(\Delta Ri_q^* + \Delta Li_q^*) & s_q > 0 \\ k_{q2}^- > \max(\Delta Ri_q^* + \Delta Li_q^*) & s_q < 0 \end{cases} \quad (24)$$

在系统综合控制方案中, 转速环用传统的 PI 控制. 依照 $i_d = 0$ 的 PMSM 转子磁场定向控制原理, 有 $i_d^* = 0$, i_q^* 为转速环的输出.

系统的控制框图如图 2 所示.

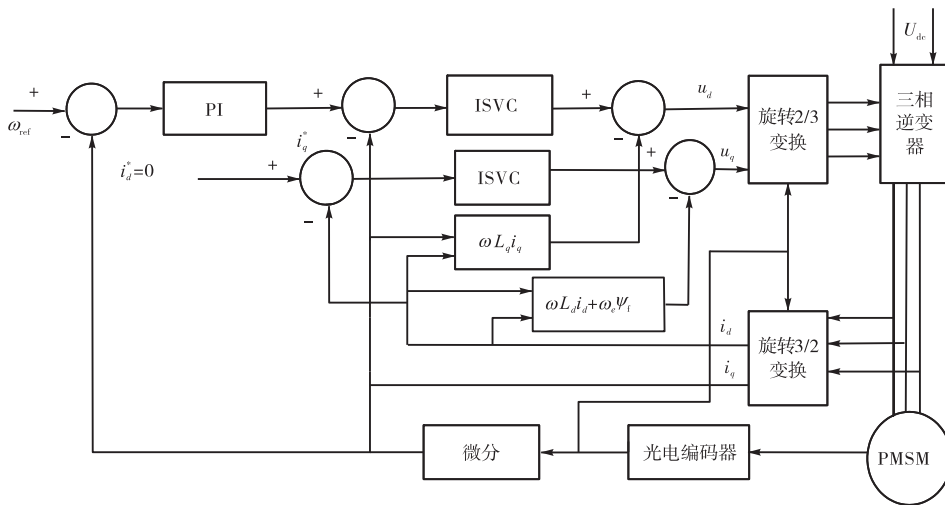


图 2 系统控制框图

Fig. 2 System control diagram

3 仿真实验

利用 Matlab/Simulink 仿真工具,分别采用本文控制方法和传统的 PI 控制方法对永磁同步电机的运行进行仿真. 永磁同步电机的参数选择如下: $R = 2.8758 \Omega$, $L_d = L_q = 0.0085 \text{ H}$, $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$.

仿真中,假定电机所带负载为 $T_L = 5 \text{ N}\cdot\text{m}$,角速度 ω 的初始参考值为 200 rad/s ;在 0.2 s 时负载突变为 $T_L = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$;在 0.3 s 时 ω 的参考值由 200 rad/s 变为 100 rad/s .

仿真结果见图 3—图 5. 由仿真结果可见,在启动、负载突变和调速的动态响应过程中,传统的 PI 控制产生较明显的波动和超调,而积分型滑模变结构控制使波形得到显著的改善,表明积分型滑模变结构控制具有更好的动态性能,且对负载的变化不敏感,鲁棒性好.

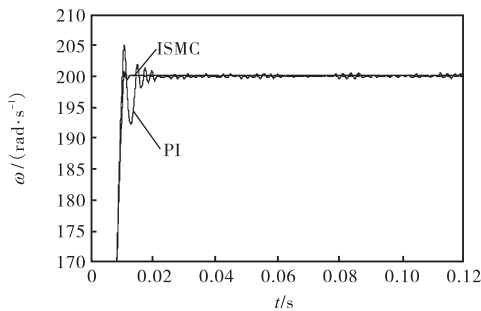


图 3 启动过程的转速响应
Fig. 3 Speed response during starting process

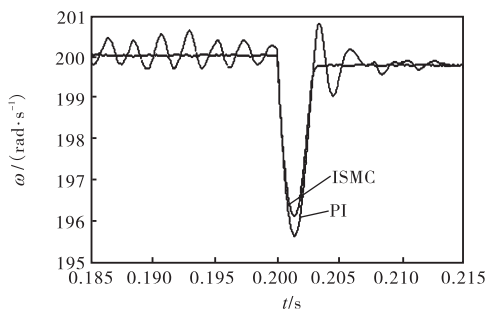


图 4 负载突变后转速响应
Fig. 4 Speed response after sudden load change

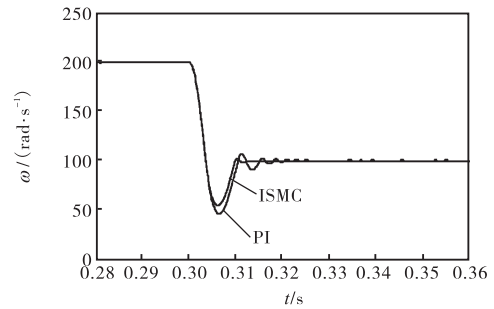


图 5 调速时的转速响应
Fig. 5 Speed regulation response

4 结 语

本文在永磁同步电机的电流环控制中,采用一种积分型滑模变结构控制方法,并考虑到实际中电机参数的变化,采用等效控制加切换控制的设计方式. 相对于传统的 PI 控制方法,本文方法的系统响应超调小,具有良好的动态、稳态性能和鲁棒性.

参考文献:

- [1] Li Shihua, Zong Kai, Liu Huixian. A composite speed controller based on a second-order model of permanent magnet synchronous motor system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2011, 33(5): 522-541.
- [2] 舒志兵. 交流伺服运动控制系统[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [3] 汪小翠. 积分型滑模控制算法在永磁同步电机调速系统中的应用[D]. 南京:东南大学, 2009.
- [4] 曹玲芝, 张晓峰. 永磁同步电机矢量控制系统设计[J]. 微特电机, 2011(5): 32-38.
- [5] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1998: 21-51.
- [6] 杨文强, 蔡旭, 姜建国. 矢量控制系统的积分型滑模变结构速度控制[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(3): 428-432.
- [7] 侯勇, 童建东. 变速恒频双馈风力发电机并网积分型变结构控制[J]. 电机与控制学报, 2008, 13(3): 260-265.

责任编辑: 常涛