

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.008

# 基于积分滑模控制器的 PMSM 调速系统

李大伟, 张学毅

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对传统 PI 调节器鲁棒性差、抗干扰能力弱、容易受诸多因素影响以及永磁同步电机存在不确定性和负载扰动等问题, 通过对永磁同步电机数学模型的分析, 并结合滑模变结构控制理论, 在永磁同步电机矢量控制系统的基础上, 设计了一种积分滑模控制器。分析表明, 在常规滑模面中引入状态量的积分量, 可增强系统的抗扰动能力。仿真结果表明, 所提方法具有较好的抗扰动能力, 提高了调速系统的鲁棒性, 改善了系统的动态性能。

**关键词:** 永磁同步电机; 矢量控制; 滑模控制器; 调速系统; 鲁棒性

**中图分类号:** TM351

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2018)01-0044-05

## PMSM Speed Regulation System Based on the Integral Sliding Mode Controller

LI Dawei, ZHANG Xueyi

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the fact that the traditional PI regulator has such flaws as poor robustness, weak anti-interference ability and liability to be affected by other factors, uncertainty and load disturbance in permanent magnet synchronous motor, combined with the analysis of mathematical model of PMSM and sliding mode variable structure control theory, an integral sliding mode controller has thus been designed based on PMSM vector control system. The analysis shows that the introduction of the integration of the state quantity into the conventional sliding mode surface will help to enhance the anti-disturbance ability of the system. The simulation results show that the proposed method exhibits better anti-disturbance performance, which improves the robustness of the speed control system, as well as the dynamic performance of the system.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; vector control; sliding mode controller; speed regulating system; robustness

## 1 研究背景

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)由电励磁三相同步电机发展而来, 具有高效率、高功率密度等优点<sup>[1]</sup>, 逐步被应用在交流伺服系统中<sup>[2]</sup>。目前, 交流伺服系统的调节器广泛采用传统的比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制, 具有结构简单、调整方便、

稳定可靠等优点。但永磁同步电机是非线性系统, 难以用精确的数学模型描述, 且在实际控制系统中存在着诸多不确定因素, 加之PID控制器是一种线性控制器, 鲁棒性较差, 易受扰动影响, 很难满足高性能调速要求<sup>[3]</sup>。滑模控制(sliding mode control, SMC)理论在20世纪60年代初被首次提出, 其实质是一种特殊的非线性控制方法, 是不连续的。与其他控制方法的不同之处在于系统的结构是变化的, 且

收稿日期: 2017-06-06

作者简介: 李大伟(1991-), 男, 湖北黄冈人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电机控制技术,

E-mail: 192719858@qq.com

通信作者: 张学毅(1966-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学教授, 主要从事电工理论与新技术方面的教学与研究,

E-mail: 774970930@qq.com

滑动模态的设计与对象参数及扰动无关。这使得滑模变结构控制具有较强的鲁棒性, 并具有响应速度快、设计简单、易实现等特点。因此, 一些学者致力于将 SMC 引入交流调速系统中<sup>[4-5]</sup>, 以满足高性能调速系统的要求。

张涌松等<sup>[6]</sup>利用 SMC 设计了一种速度调节器, 并将其应用在 PMSM 矢量控制系统中, 仿真分析结果验证了该方法的可行性。范炳奎等<sup>[7]</sup>针对永磁同步电机设计了一种新型趋近律的滑模变结构控制器, 仿真结果表明该方法克服了 PI 控制的诸多不足, 削弱了滑模变结构控制的抖振。周硕等<sup>[8]</sup>提出了一种非奇异快速终端滑模控制方法, 有效降低了系统的收敛时间, 克服了终端滑模的奇异性问题。张晓光等<sup>[9]</sup>设计了一负载转矩扩展滑模观测器, 研究结果表明该观测器能有效削弱电机系统的抖振, 并提高系统的抗扰动能力。苗英恺等<sup>[10]</sup>设计了快速终端滑模控制器和自适应控制器, 发现将二者结合能有效消除未知因素对电流控制的影响, 解决了 PMSM 的电流耦合问题, 并以仿真和实验结果验证了该方法的有效性。

为改善永磁同步电机调速系统的动态性能, 本文基于文献 [6-8] 的研究成果, 依据电机的数学模型, 从应用角度设计了一种积分滑模控制器, 并将其应用在 PMSM 矢量控制系统中。相比 PI 控制器, 所设计的积分滑模控制器具有对扰动与参数不敏感、响应速度快等优点。为了验证该方法在永磁同步电机调速系统中的有效性, 对基于 PI 调节器和滑模控制器的 PMSM 矢量控制进行了对比仿真, 结果表明所提积分滑模控制器可实现良好的速度跟踪控制, 与传统 PID 方法相比有较好的动态性能和抗扰动能力。

## 2 永磁同步电机的数学模型

PMSM 的定子与三相同步电动机基本上无差别, 但是转子由电励磁系统变成了永磁体。为了方便分析, 对永磁同步电机作如下假设:

- 1) 忽略铁芯饱和, 不计涡流和磁滞的损耗<sup>[11]</sup>;
- 2) 永磁材料的电导率为 0<sup>[12]</sup>, 永磁体内部的磁导率与空气相同;
- 3) 转子无阻尼绕组;
- 4) 电机中的电流为对称的三相正弦波电流;
- 5) 电机稳态运行时, 相绕组中的感应电动势波形为正弦曲线。

基于上述假设, 可得同步旋转坐标系  $d-q$  (直轴-交轴) 下的三相 PMSM 数学模型, 其电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega\psi_q, \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\psi_q + \omega\psi_d; \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f, \\ \psi_q = L_q i_q; \end{cases} \quad (2)$$

转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_0 [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]。 \quad (3)$$

对于表贴式 PMSM, 有  $L_d=L_q=L_s$  ( $L_s$  为同步电感), 所以转矩方程可简化为

$$T_e = \frac{3}{2} p_0 \psi_f i_q。 \quad (4)$$

电机的运动方程为

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

式 (1)~(5) 中:  $u_d$ 、 $i_d$  分别为  $d$  轴电压和电流分量;  $u_q$ 、 $i_q$  分别为  $q$  轴电压和电流分量;  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的电感;  $\psi_d$ 、 $\psi_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的磁链;  $R$  为定子电阻;  $\psi_f$  为永磁体与定子交链的磁链;  $T_e$  为电磁转矩;  $p_0$  为电机的极对数;  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为转动惯量;  $B$  为阻尼系数;  $\omega$  为转子的电角速度。

## 3 PMSM 矢量控制系统

矢量控制作为 PMSM 高性能控制策略, 其基本思想是在旋转的  $d-q$  坐标系内将定子交变电流变换为两个直流量, 并且二者相互垂直, 实现互不干扰的控制。目前, 矢量控制的方法有励磁电流  $i_d=0$  控制和最大转矩/电流 (maximum torque per ample, MTPA) 控制。对于面装式三相 PMSM,  $i_d=0$  控制与最大转矩/电流控制是等价的。图 1 所示为采用  $i_d=0$  的矢量控制框图。

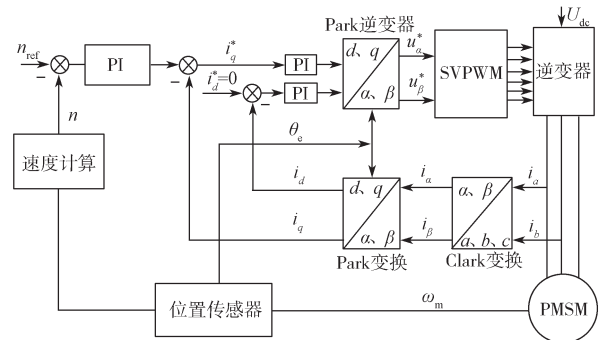


图 1 三相 PMSM 矢量控制系统框图

Fig. 1 Diagram of three-phase PMSM vector control system

三相 PMSM 矢量控制系统采用转速环和电流环<sup>[13]</sup>组成的双闭环控制。其中,速度环采用滑模控制器,与传统的 PI 调节器相比,电流环用 PI 调节器。转子角速度  $\omega_m$ 、位置信号  $\theta_e$  由安装在电动机侧的光电编码器获取。直、交轴电流  $i_d$ 、 $i_q$  经检测电机相电流  $i_{abc}$  经 Clark 和 Park 变换,获得给定转速  $n_{ref}$  与经过速度计算后的实际转速  $n$  的差值,再经积分滑模控制器后,得到  $q$  轴电流  $i_q^*$  参考值、 $d$  轴电流参考值  $i_d^*=0$ 。将  $i_d^*$ 、 $i_q^*$  分别与坐标变换得到的  $i_d$ 、 $i_q$  作差,得到的偏差经 PI 调节器后输出  $u_d^*$  和  $u_q^*$ 。 $u_d^*$  和  $u_q^*$  经过 Park 反变换得到  $u_\alpha^*$  和  $u_\beta^*$ , 根据  $u_\alpha^*$  和  $u_\beta^*$  进行空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM), 产生电压源逆变器信号,实现对电机的运行控制。

## 4 滑模控制器设计

以表贴式 PMSM 为例,重写电机在同步旋转坐标系下的数学模型,为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_s \frac{di_d}{dt} - p_0 \omega_m L_s i_q, \\ u_q = Ri_q + L_s \frac{di_q}{dt} + p_0 \omega_m L_s i_d + p_0 \omega_m \Psi_f, \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} p_0 \Psi_f i_q - T_L - B\omega. \end{cases} \quad (6)$$

定义 PMSM 系统的状态变量如下:

$$\begin{cases} x_1 = \Delta\omega = \omega_{ref} - \omega_m, \\ x_2 = \int_{-\infty}^t x_1(t) dt. \end{cases} \quad (7)$$

式(6)(7)中: $\omega_m$ 为实际角速度; $\omega_{ref}$ 为给定角速度,一般为常数。

结合式(5),对  $x_1$ 、 $x_2$  求导可得

$$\begin{cases} x_1' = -\omega_m' = -\frac{3p_0\Psi_f}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega + \frac{T_L}{J}, \\ x_2' = x_1 = \omega_{ref} - \omega_m. \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)的第一个等式改写为

$$x_1' = -\frac{3p_0\Psi_f}{2J}(i_q - i_q^*) - \frac{3p_0\Psi_f}{2J}i_q^* + \frac{B}{J}\omega + \frac{T_L}{J}. \quad (9)$$

定义扰动  $a(t)$  为  $a(t) = \frac{3p_0\Psi_f}{2J}(i_q - i_q^*) - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J}$ 。

令  $u=i_q^*$ ,  $D=3p_0\Psi_f/2J$ , 则式(9)可以表示为

$$x_1' = -Du - a(t).$$

常规滑模面容易引入高频噪声,故本研究在此基础上加入状态变量的积分量,以抑制高频噪声,同时消除系统的稳态误差。

定义一阶滑模面<sup>[14]</sup>函数  $s$  为  $s=x_1+cx_2$ , 式中  $c$  为滑模面参数,且  $c>0$ 。

积分初始值  $f_0$  为  $f_0 = \int_{-\infty}^0 x_1(t) dt = -\frac{x_0}{c}$ , 式中  $x_0$

为  $x_1$  的初始值。

当  $t=0$  时,  $s=0$ , 系统处于滑模面上<sup>[15]</sup>, 因而系统具备全局鲁棒性。

合适的控制函数,能够使系统在有限的时间内到达指定的滑模面,并且在滑模面上保持稳定的运行状态<sup>[16]</sup>。为了实现这一目标,本文选择切换函数为  $u=u_{eq}+u_{swo}$  的变结构控制方案。其中,  $u_{eq}$  为等效部分的滑模控制,它是系统在满足  $s'=0$ ,  $a(t)=0$  时的控制量,因而不难推导出  $u_{eq} = \frac{c}{D}x_1 = \delta x_1$ , 其中  $\delta=c/D$  为正数,  $\delta$  变化时,系统的动态性能随之变化。

$u_{swo}$  为切换部分的滑模控制,其保证系统经过高频切换控制能到达滑模面,并且达到稳定<sup>[17]</sup>。取  $u_{swo}=\varepsilon \text{sign}(s)$ , 其中  $\varepsilon>0$ ,  $\text{sign}(s)$  为符号函数。

由此可得 SMC 的控制函数为  $u=i_q^*=\delta x_1+\varepsilon \text{sign}(s)$ 。根据滑模到达条件可知系统是逐渐趋于稳定的。

实际控制中,为进一步削弱抖振,常采用饱和函数  $\text{sat}(s)$  代替符号函数  $\text{sign}(s)$ , 饱和函数表达式为

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s > \lambda; \\ s/\lambda, & |s| \leq \lambda; \\ -1, & s < -\lambda. \end{cases}$$

则  $i_q^*$  的表达式为  $i_q^*=\delta x_1+\varepsilon \text{sat}(s)$ 。

## 5 仿真结果与分析

根据图1所示的系统框图,用 SMC 代替 PI 调节器,在 Matlab/Simulink 中搭建了基于积分滑模控制器的 PMSM 矢量控制系统的仿真模型。仿真中所用电机的参数设置如下:极对数  $p_0=4$ , 定子电感  $L_s=8.5$  mH, 定子电阻  $R=2.875 \Omega$ , 磁链  $\Psi_f=0.175$  Wb, 转动惯量  $J=0.003$  kg·m<sup>2</sup>, 阻尼系数  $B=0.008$  N·m·s。仿真条件设置如下:直流侧电压  $U_{dc}=311$  V; 参考转速  $n_{ref}=800$  r/min; 初始时刻,负载转矩  $T_L=5$  N·m; 在  $t=0.3$  s 时,负载转矩  $T_L=20$  N·m; 仿真时间设置为 0.6 s。以上参数设置条件下,所得仿真结果如图 2~4 所示。

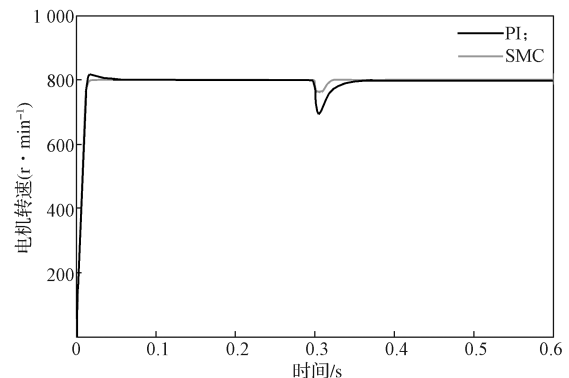


图2 两种控制方法下的转速变化曲线

Fig. 2 Curves of speed variation under two control methods

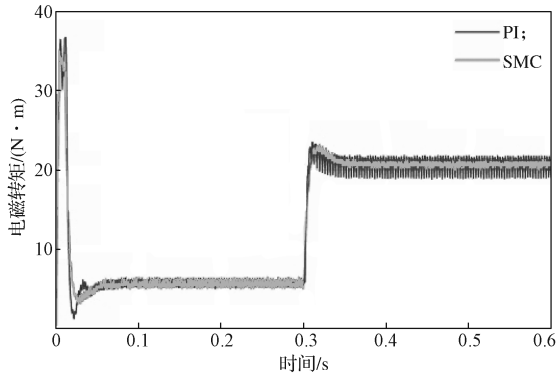
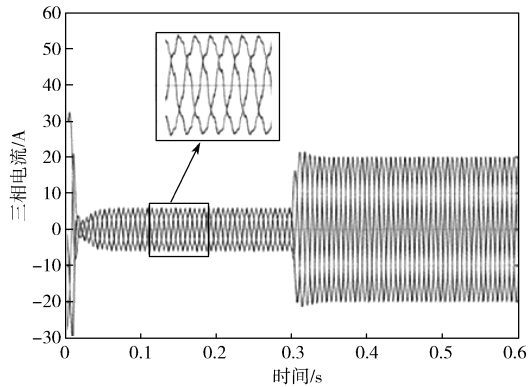
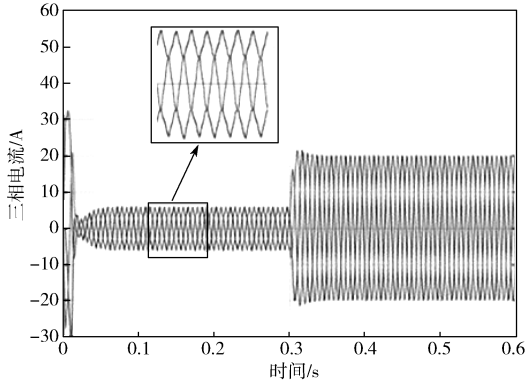


图 3 两种控制方法下的转矩变化曲线

Fig. 3 Torque variation curves under two control methods



a) 传统 PI 控制



b) 滑模控制

图 4 两种控制方法下的电流变化曲线

Fig. 4 Current variation curves under two control methods

图 2 和图 3 中稍深的曲线是使用 PI 调节器得到的, 稍浅的曲线是使用滑膜控制得到的。从图 2 中的转速曲线可看出, 当初始负载为 5 N·m, 电机转速从零上升到参考转速  $n_{ref}=800$  r/min 时, 两种控制方法都能快速达到给定转速, 但 PI 控制具有一定的超调量, 而滑模控制器基本没有, 并且滑模控制比 PI 控制能更快地达到给定速度并趋于稳定。在  $t=0.3$  s 时, 负载转矩加到  $T_L=20$  N·m, 滑模控制的速度偏差较小, 抗扰动性能明显优于 PI 控制, 而且恢复到给定转速的时间也比 PI 控制短。

对比图 3 中的转矩变化曲线可以看出, 初始负

载为 5 N·m 时, 滑模控制比 PI 控制更快达到稳定, 当负载转矩增加到  $T_L=20$  N·m 时, 滑模控制比 PI 控制的调整时间更短, 转矩脉动更小, 曲线更平滑, 对负载的跟踪能力更强。

对比图 4a、b 中的电流变化曲线可看出, 从给定初始负载转矩到趋于稳定时, 根据放大图所示波形, PI 控制的三相电流波形畸变较大, 而滑模控制的波形比较光滑, 更加接近正弦波。然后增加负载转矩, 两种控制方法下三相定子电流均能快速达到稳定。

综合以上分析可知, 相较于传统 PI 控制, 采用积分滑模控制器的系统响应速度更快、抗干扰能力更强、稳定性更好, 系统响应快速性得到了提高。

## 6 结语

本文在永磁同步电机矢量控制的基础上, 对三相永磁同步电机的数学模型进行了分析, 针对传统 PI 速度调节器存在的缺陷, 将速度环改进为滑模控制。通过在常规滑模面中引入状态量的积分量, 增强了调速系统的抗扰动能力和鲁棒性, 并在 Matlab/Simulink 环境下建立了该系统的仿真模型, 验证了该方法的有效性, 提高了 PMSM 调速系统的动态性能。

## 参考文献:

- [1] 郭新华, 温旭辉, 赵峰, 等. 基于电磁转矩反馈补偿的永磁同步电机新型 IP 速度控制器 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 7-13.  
GUO Xinhua, WEN Xuhui, ZHAO Feng, et al. A Novel IP Speed Controller for PMSM Based on Electromagnetic Torque Feedback Compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 7-13.
- [2] 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.  
LI Zheng, HU Guangda, CUI Jiarui, et al. Sliding-Mode Variable Structure Control with Integral Action for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 431-437.
- [3] LAI C K, SHYU K K. A Novel Motor Drive Design for Incremental Motion System Via Sliding Mode Control Method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(2): 499-507.
- [4] 李鸿儒, 顾树生. 基于神经网络的 PMSM 速度和位置自适应观测器的设计 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 32-35.  
LI Hongru, GU Shusheng. Neural-Network-Based Adaptive Observer of Position and Speed of PMSM[J].

- Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 32-35.
- [5] 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.  
ZHANG Changfan, WANG Yaonan, HE Jing. Variable Structure Intelligent Control of Permanent Magnet Synchronous Servo Motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 13-17.
- [6] 张涌松, 舒志兵. 基于永磁同步电机的滑模变结构仿真研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(7): 288-292.  
ZHANG Yongsong, SHU Zhibing. Simulation Research of Sliding Mode Control Based on Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(7): 288-292.
- [7] 范炳奎, 李颖晖, 柳艳丽, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电机滑模变结构矢量控制[J]. 微计算机信息(测控自动化), 2010, 26(8-1): 42-44.  
FAN Bingkui, LI Yinghui, LIU Yanli, et al. Sliding Mode Variable Structure Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Based on a Novel Reaching Law [J]. Control & Automation, 2010, 26(8-1): 42-44.
- [8] 周 硕, 王大志, 高庆忠. 永磁同步电机的非奇异快速终端滑模控制[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 51-54.  
ZHOU Shuo, WANG Dazhi, GAO Qingzhong. Nonsingular Fast Terminal-Sliding-Mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Electric Drive, 2014, 44(11): 51-54.
- [9] 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.  
ZHANG Xiaoguang, SUN Li, ZHAO Ke. Sliding Mode Control of PMSM Based on a Novel Load Torque Sliding Mode Observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 111-116.
- [10] 苗英恺, 田相军. 基于自适应滑模控制器的永磁同步电机电流控制方法研究[J]. 微特电机, 2015, 43(5): 66-69.  
MIAO Yingkai, TIAN Xiangjun. Research on Current Control Method of PMSM Based on Adaptive Sliding Mode[J]. Small & Special Electrical Machines, 2015, 43(5): 66-69.
- [11] 贾 涛. 基于双曲正切函数的永磁同步电机无传感器速度位置辨识[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- JIA Tao. Sensorless Speed Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Hyperbolic Tangent Function[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [12] 王成元, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 120-124.  
WANG Chengyuan, XIA Jiakuan, SUN Yibiao. Modern Motor Control Technology[M]. 2nd ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2014: 120-124.
- [13] 王庆龙, 张 兴, 张崇巍. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 897-902.  
WANG Qinglong, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. Double Sliding-Mode Model Reference Adaptive System Speed Identification for Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 897-902.
- [14] 童克文, 张 兴, 张 昱, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 102-106.  
TONG Kewen, ZHANG Xing, ZHANG Yu, et al. Sliding Mode Variable Structure Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Based on a Novel Reaching Law[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 102-106.
- [15] 王 文, 郑恩让. 基于干扰观测器的专家积分 Terminal 滑模 SPMSM 控制[J]. 微特电机, 2015, 43(4): 58-61.  
WANG Wen, ZHENG Enrang. Sliding-Mode Variable Structure Control with Integral Action and Expert Control for SPMSM Based on Disturbance Observer[J]. Small & Special Electrical Machines, 2015, 43(4): 58-61.
- [16] 刘 超, 安群涛, 张晓光, 等. 滑模控制永磁同步电机的矢量控制技术[J]. 变频器世界, 2010(4): 61-63.  
LIU Chao, AN Quntao, ZHANG Xiaoguang, et al. Sliding Mode Control for Vector Strategies of PMSM[J]. The World of Inverters, 2010(4): 61-63.
- [17] 吕明琪, 袁宇浩, 陈青峰. 基于滑模变结构的永磁同步电机矢量控制研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(8): 311-316.  
LÜ Mingqi, YUAN Yuhao, CHEN Qingfeng. Vector Control System Researching of PMSM Based on Sliding Mode Control[J]. Computer Simulation, 2016, 33(8): 311-316.

(责任编辑: 廖友媛)