

基于新型积分自适应滑模控制策略的 永磁同步电机控制 *

柯希彪^{1,2}, 郭琳^{1,2,3}, 袁训锋^{1,2}, 陈垚^{1,2}, 徐晓龙^{1,2}, 张商州^{1,2}, 王换民^{1,2}

(1. 商洛学院 电子信息与电气工程学院, 陕西 商洛 726000;

2. 商洛市分布式新能源应用技术研究中心, 陕西 商洛 726000;

3. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 设计了一种永磁同步电机(PMSM)参数扰动和负载扰动的新型控制策略。通常 PMSM 控制是通过 PI 控制设计的, 控制效果不佳, 因此提出一种新型积分滑模控制(SMC)策略进行转速控制器设计。积分 SMC 具有较强的抗干扰性, 不仅可以抑制控制系统的高频微分扰动, 而且可以降低系统稳态误差, 使控制更精确。设计趋近律函数对滑模控制器进行优化, 使 SMC 参数自适应调节, 提高系统响应速度。考虑到系统参数和负载扰动对控制性能的影响, 将自抗扰环节引入 SMC, 提高了系统的抗扰性。最后通过仿真试验验证了控制系统良好的控制性能。

关键词: 永磁同步电机; 滑模控制; 趋近律; 自抗扰

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)11-0020-05

Permanent Magnet Synchronous Motor Control Based on New Integral Adaptive Sliding Mode Control Strategy *

KE Xibiao^{1,2}, GUO Lin^{1,2,3}, YUAN Xunfeng^{1,2}, CHEN Yao^{1,2}, XU Xiaolong^{1,2},
ZHANG Shangzhou^{1,2}, WANG Huanmin^{1,2}

(1. Electronic Information and Electrical Engineering College, Shangluo University, Shangluo 726000, China;

2. Shangluo Distributed New Energy Application Technology Research Center, Shangluo 726000, China;

3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new control strategy for permanent magnet synchronous motor (PMSM) parameter disturbance and load disturbance was designed. The PMSM control was usually designed by PI control, but the control effect was not good. A new integral sliding mode control (SMC) strategy for the speed controller design was proposed. The integral SMC had strong anti-interference ability, which could not only suppress the high-frequency differential disturbance of the control system, but also reduce the system steady-state error and make the control more accurate. The sliding mode controller was optimized by designing the reaching law function in which the switching parameters of the SMC could be adjusted adaptively, and the system response speed was improved. Taking into account the influence of system parameters and load disturbance on control performance, the active disturbance rejection control was introduced into the SMC, which improved the immunity of the system. Finally, simulation experiments verified that the control performance of the control system was excellent.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); sliding mode control (SMC); reaching law; active disturbance rejection

* 基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK0244); 陕西省自然科学基金项目(2019SF-246)

作者简介: 柯希彪(1989—), 男, 硕士, 研究方向为现代控制理论和电机控制。

郭琳(1980—), 男, 副教授, 研究方向为自动化装置与智能检测。

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有功率密度高、效率高、结构简单等特点,在数控机床、汽车、航空航天等领域应用广泛^[1]。PMSM 控制应用最多的控制方法主要是矢量控制和直接转矩控制。矢量控制通过坐标变换理论将定子电流矢量分解成转矩电流矢量和励磁电流矢量,对电流的励磁分量和转矩分量分别进行控制,可以像控制直流电机一样对交流电机进行控制,其控制原理相似。但是,矢量控制定子电流解耦非常依赖电机系统参数,对于大功率电机,由于工作环境复杂,参数稳定性不高,一旦系统参数发生变化,将会破坏解耦关系,使得电枢电流解耦不完全或解耦失败,严重影响电机控制效果甚至使系统控制失效。传统控制器是通过 PI 控制设计的,其控制响应速度慢、抗干扰性差,达不到较高的控制要求。

滑模控制(SMC)作为一种新型控制方法,对外界干扰及系统参数扰动具有较强鲁棒性。SMC 基于数学理论设计,结构灵活多变,实现简单,因此广泛应用于复杂非线性控制系统。随着国内外学者对 SMC 研究的不断深入,越来越多的新方法新理论被提出,呈现出百花齐放的势态,比传统 SMC 在某些控制方面均有所改善。

文献[2-3]设计了一种基于积分 SMC 策略,将状态变量的积分引入常规滑模面,可以有效消除转速和转矩的稳态误差,加快系统响应速度,同时对负载扰动具有较强鲁棒性。文献[4]将积分 SMC 策略与分数阶 SMC 策略相结合。文献[5]将积分环节引入反步滑模控制策略,有效抑制了传统滑模变结构中的固有抖振现象,增强了系统鲁棒性。文献[6-8]对 SMC 的趋近律函数进行设计,选用连续函数和饱和函数代替 SMC 的符号函数,提高了控制系统的抗扰性,较好地实现了电机的速度跟踪。文献[9]针对 PMSM 控制系统参数扰动和负载扰动的现象,提出了一种线性自抗扰控制策略,降低了扰动对控制系统的影响。文献[10]通过积分 SMC 设计六相 PMSM 控制器,提高了系统的稳定性。文献[11]设计了一种 SMC,在等速趋近律的基础上引入积分型趋近律,增加了 SMC 趋近过程的增益,增强了系统的抗干

扰能力。

根据自适应控制原理,结合积分 SMC 策略,本文设计了一种新型积分自适应 SMC 策略。设计了一种线性连续函数代替 SMC 的符号函数,有效抑制了系统抖振,使系统快速收敛至稳定状态。设计的积分 SMC,有效抑制系统中高频扰动,提高了系统稳定性,减小了稳态控制误差。将线性自抗扰控制引入 SMC,减小了系统参数扰动和负载扰动对控制系统的影响,提高了系统鲁棒性。仿真结果表明:该控制系统相比 PI 控制,具有响应速度快、超调量小、抗干扰能力强等优势,可以较好地满足电机在复杂工况下高精度的控制要求。

1 PMSM 数学模型

建立 PMSM 数学模型前,为了简化分析过程,突出控制系统的主要影响因素,作以下假设:PMSM 转子产生的磁场和三相绕组产生空间磁场在气隙中均按正弦规律分布;忽略定子铁心磁阻;不计铁心和绕组涡流损耗和磁滞损耗;磁路为线性;交直流电感参数不变;转子无阻尼绕组^[12-14]。

在 d - q 坐标系下的 PMSM 数学模型,电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega_{re} L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + \omega_{re} L_d i_d + \omega_{re} \psi + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程为

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

式中: u_d 、 u_q —— d 、 q 轴电压分量;

R ——定子绕组电阻;

i_d 、 i_q —— d 、 q 轴电流分量;

ω_{re} ——电机的电角速度;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴电感;

ψ ——永磁体磁链;

ψ_d 、 ψ_q —— d 、 q 轴磁链分量。

PMSM 转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

式中: T_e ——PMSM 电磁转矩;

p ——电机极对数。

将定子磁链方程式(2)代入式(3)得:

$$T_e = \frac{3}{2}p[\psi i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (4)$$

对于隐极式 PMSM, 由于 $L_d = L_q = L$, 因此转矩方程可表示为

$$T_e = \frac{3}{2}p\psi i_q \quad (5)$$

电机的机械运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

式中: T_L ——负载转矩;

B ——轴承的黏滞系数;

ω ——机械角频率;

J ——电机转动惯量。

由式(1)和式(6)可得 PMSM 状态方程:

$$\begin{cases} \dot{i}_d = \frac{1}{L}u_d - \frac{R}{L}i_d + p\omega i_q \\ \dot{i}_q = \frac{1}{L}u_q - \frac{R}{L}i_q - p\omega i_d - \frac{p\psi}{L}\omega \\ \dot{\omega} = \frac{3p\psi}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega - \frac{1}{J}T_L \end{cases} \quad (7)$$

采用矢量控制策略, 将定子电流矢量进行交直轴解耦。目的是将定子电流矢量始终控制在 q 轴上, 电流无 d 轴分量(即 $i_d = 0$)。根据式(5)可知, 电磁转矩与 q 轴电流成正比, 则通过控制定子电流可以达到控制电机转矩和转速的目的。

2 控制器设计

2.1 滑模面设计

取 PMSM 系统变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_d - \omega \\ x_2 = \int_0^t x_1 dt \end{cases} \quad (8)$$

式中: ω_d ——电机期望转速;

ω ——实际转速。

对式(8)求导可得:

设计积分滑模面为

$$s = x_1 + cx_2 \quad (9)$$

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + c\dot{x}_2 = -\frac{3p\psi}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega +$$

$$\frac{1}{J}T_L + cx_1 \quad (10)$$

其中: c 必须满足 Hurwitz 条件, 即 $c > 0$ 。

令 $s = 0$, 得:

$$\dot{x}_1 = -cx_1 \quad (11)$$

式(11)表明, 系统状态误差 x_1 是一个以 $-c$ 为时间常数的指数函数, 以时间常数 $-c$ 为指数函数收敛于零。状态误差 x_1 的值从边界层到达滑模面的理论时间是无穷大, 当状态误差减小到工程允许范围时, 可以近似认为状态变量到达滑模面, 收敛速率取决于常数 c 的值。

2.2 控制律设计

定义 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}s^2 \quad (12)$$

则:

$$\dot{V}_1 = s\dot{s} = s\left(-\frac{3p\psi}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}T_L + cx_1\right) \quad (13)$$

取控制律为

$$i_q = \frac{2J}{3p\psi}\left[\frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}T_L + cx_1 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks\right] \quad (14)$$

则:

$$\dot{V}_1 = -\varepsilon|s| - ks^2 \leq 0 \quad (15)$$

SMC 满足 Lyapunov 稳定条件。当 $\dot{V}_1 \equiv 0$ 时, $s \equiv 0$, 根据 LaSalle 不变性原理, 闭环系统渐近稳定, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$, 且 s 收敛速率取决于 ε 和 k 。

在实际控制中, SMC 存在高频抖振, 为了使状态变量快速趋近滑模面, 设计线性连续饱和函数改善 SMC 特性:

$$\operatorname{st}(s) = \frac{s}{|s| + \varepsilon_0} \quad (16)$$

式中: ε_0 ——一个较小的正常数。

使状态变量更平滑趋近原点, 趋近律函数设计为指数趋近律函数:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{st}(s) |s|^\alpha - k|s|^\beta s \quad (17)$$

控制器为

$$i_q = \frac{2J}{3p\psi}\left(\frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}T_L + cx_1 + |s|^\alpha \varepsilon \operatorname{st}(s) + |s|^\beta ks\right) \quad (18)$$

其中: $0 < \alpha < 1, \beta > 0$ 。

通过调整 α, β 值, 当状态变量距滑模面较远 ($|s|$ 较大) 时, 保证系统能够快速到达滑模面。当状态变量到达滑模面 ($|s|$ 较小) 时, 保证状态变量 x_1 以较小速率平滑到达原点, 以减小系统抖动, 使控制系统达到稳定状态。

3 积分自适应 SMC 律设计

由式(18)可以看出, 积分 SMC 中包含负载转矩 T_L 和黏滞系数 B , 而 T_L 为未知变量, B 随着运行状态的不同存在一定幅度的扰动。设计一种线性自抗扰控制减小负载扰动和参数扰动对控制效果的影响。

3.1 自抗扰控制律设计

假设系统负载和参数扰动等效为 F , 且 F 有界, 则:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = -\frac{3p\psi}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}F \\ \dot{x}_2 = x_1 = \omega_d - \omega \end{cases} \quad (19)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V_2 = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{F}^2 \quad (20)$$

其中: $\tilde{F} = F - \hat{F}$ 。

式中: $\hat{F}$ —— F 的预估值;

γ ——一个常数, $\gamma > 0$ 。

假设系统系数和负载变化缓慢, 则:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{F}} = 0 \\ \dot{V}_2 = s\dot{s} - \frac{1}{\gamma}\tilde{F}\dot{\tilde{F}} \end{cases} \quad (21)$$

自适应律设计为

$$\dot{\tilde{F}} = \frac{1}{J}s\gamma \quad (22)$$

自适应 SMC 设计为

$$i_q = \frac{2J}{3p\psi} \left[\frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}\hat{F} + cx_1 + |s|^\alpha \text{est}(s) + |s|^\beta ks \right] \quad (23)$$

综上所述可得:

$$\dot{V}_1 \leq ks^2 \leq 0 \quad (24)$$

SMC 趋于稳定。

3.2 PMSM 控制

PMSM 滑模自适应控制矢量控制原理如图 1 所示。

矢量控制电枢电流只有交轴分量, 定子电流

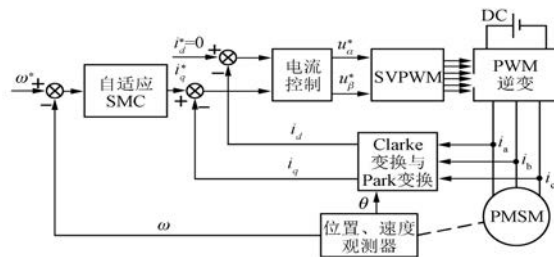


图 1 PMSM 滑模自适应控制矢量控制原理图

矢量与转子磁场矢量正交, 控制定子电流实现转矩控制, 进而实现电机转速控制。这种控制系统算法简单, 转速转矩特性好。

4 仿真验证

对 PMSM 调速系统进行仿真分析, 搭建 MATLAB 仿真模型。将 PMSM PI 控制与积分自适应 SMC 进行仿真比较, 以验证设计方案的控制性能。

控制器参数设置: $\gamma = 0.01$, $c = 2$, $\varepsilon = 0.1$, $k = 10$, $\alpha = 0.2$, $\beta = 1.2$ 。PMSM 模型参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	2.875
定子 d 轴电感 L_d/H	0.000 835
定子 q 轴电感 L_q/H	0.000 835
极对数 p	2
永磁体磁链 ψ/Wb	0.175
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.000 8
黏滞系数 $B/(N \cdot m \cdot s)$	0.01

对 PMSM 调速系统分别搭建 PI 控制模型和积分自适应 SMC 模型, 在 $t=0$ 时, 给定电机转速 $n=1\ 000$ r/min, 同时为控制系统加入负载扰动 $\tilde{F}=0.1 \sin(0.01t)$ 。在 $t=0.06$ s 时, 使电机转速增加到 2 000 r/min。在 $t=0.14$ s 时, 为电机加入负载转矩 $T_L=4$ N·m。系统仿真时间为 0~0.2 s, 仿真波形分别如图 2、图 3 所示。

通过对比图 2(a) 和图 3(a) 可知, 在起动阶段 ($t=0$) 及电机加速阶段 ($t=0.06$ s) 时, PI 控制仿真波形的转速超调量和转速波动较大, 控制系统经过一个相对较长的调节时间才到达相对稳定状态。图 2(a) 中, PI 控制达到稳态, 电机转速依然

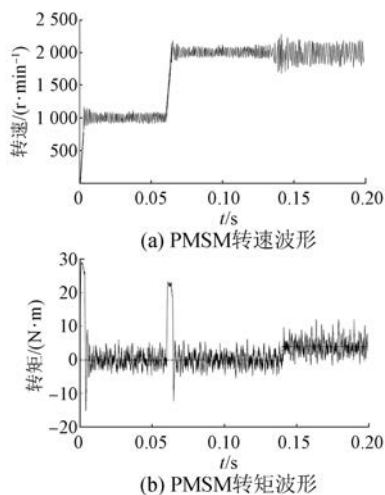


图2 PMSM PI 控制仿真波形

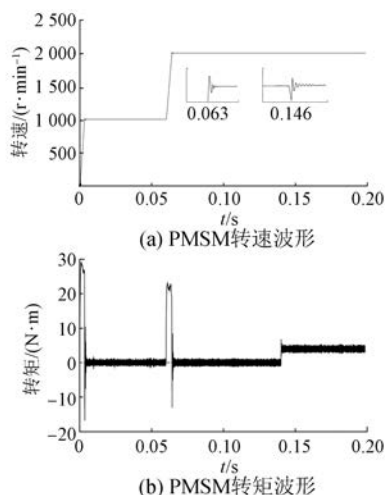


图3 PMSM 积分自适应 SMC 仿真波形

会持续大幅度的振荡,当负载出现大幅度的扰动($t=0.14\text{ s}$)时,由于控制系统无自适应调节机制,电机转速波动会进一步增加,难以达到预期转速。

图3中,在电机起动阶段及加速阶段,电机转速可以迅速达到稳定状态,且转速超调量和稳态误差较小。当负载出现大幅扰动($t=0.14\text{ s}$)时,电机转速出现几个周期的较大波动之后快速趋于稳态,转速跟踪快速达到给定值。

通过对比图2(b)和图3(b)可知,积分自适应 SMC 具有较好的转矩特性,为电机转速跟踪提供了保障。

由仿真结果可知,积分自适应 SMC 的 PMSM 调速系统在转速调节误差和抗干扰性方面性能更

优良。

5 结 语

为了实现 PMSM 的高精度控制和提高控制系统的抗干扰能力,本文设计了一种基于积分自适应 SMC 的 PMSM 控制系统。SMC 的积分环节增强了系统的稳定性,有效地抑制了控制系统的高频谐振分量,同时对于减小系统稳态误差也起到一定作用。线性连续趋近律函数的设计,有效地抑制了 SMC 的抖振,使控制变量可以快速平滑地到达滑模面。为了减小系统参数扰动和负载扰动对控制系统的影响,将线性自抗扰控制策略引入 SMC,有效提高了系统的鲁棒性和抗外界干扰能力,使控制系统在复杂的工况下也可以较高的控制精度保持工作。仿真结果验证了该控制策略的有效性。

【参考文献】

- [1] 朱儒,刘鲲鹏,赵志锋,等.永磁同步电机滑模控制研究[J].微电机,2014,47(12): 52.
- [2] 陈振,耿洁,刘向东.基于积分时变滑模控制的永磁同步电机调速系统[J].电工技术学报,2011,26(6): 56.
- [3] 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.
- [4] 黄家才,施昕昕,李宏胜,等.永磁同步电机调速系统的分数阶积分滑模控制[J].吉林大学学报(工学版),2014,44(6): 1736.
- [5] 孙华,戴跃洪,唐传胜.基于积分反步控制的永磁直线同步电动机滑模速度控制[J].组合机床与自动化加工技术,2015(3): 101.
- [6] 郭小定,柏达,周少武,等.一种新型趋近律的永磁同步电机滑模控制[J].控制工程,2018,25(10): 1865.
- [7] 张宏达,贾贵玺,郭锦波,等.永磁同步电机的趋近律滑模控制[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2015,29(3): 89.
- [8] 茅靖峰,吴爱华,吴国庆,等.永磁同步电机幂次变趋近律积分滑模控制[J].电气传动,2014,44(6): 50.
- [9] 沈德明,姚冰,祖利辉,等.基于线性自抗扰控制技术的 PMSM 仿真研究[J].控制工程,2016,23(增刊1): 51.

(下转第 74 页)

行温度监测方面,且可以扩展到电气设备运行的各种运行状态和参数,对实现设备全寿命周期内的参数全监督。对于预测设备故障,保障设备安全运行具有极其重要意义。

【参考文献】

- [1] 王庆,张蓬鹤,赵海森,等.基于可测电气量鼠笼式异步电机能效在线监测方法[J].微特电机,2013,41(12): 26.
- [2] 林飞,张春朋,宋文超,等.感应电机定子温度监测的一种新方法[J].电力系统自动化,2003,27(3): 58.
- [3] SABAGHI M, FARAHANI H F, HAFEZI H R, et al. Stator winding resistance estimation for temperature monitoring of induction motor under unbalance supplying by DC injection method [C] // 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference, 2007.
- [4] ZHANG P, LU B, HABETLER T G. An active stator temperature estimation technique for thermal Protection of inverter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46 (5) : 1873.
- [5] POPOV N Z, VUKOSAVIC S N, LEVI E. Motor temperature monitoring based on impedance estimation at PWM frequencies [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29 (1) : 215.
- [6] 刘琳.物联网技术在企业安全生产监管中的应用探讨[J].网络安全技术与应用,2019(5): 87.
- [7] SHEN X, CAO M. Internet of things for power transmission and distribution intelligent monitoring and full lifecycle management [C] // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CIGED), 2014.
- [8] XU X, ZUO Y B, WU G X. Design of intelligent internet of things for equipment maintenance [C] // 2011 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2011.
- [9] 张超羽.基于模型参考自适应的感应电机温度辨识方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [10] 赵海森,杜中兰,刘晓芳,等.基于递推最小二乘法与模型参考自适应法的鼠笼式异步电机转子电阻在线辨识方法[J].中国电机工程学报,2014,34(30): 5386.

收稿日期: 2019-07-14

(上接第24页)

- [10] 李永恒,刘陵顺,闫红广.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[J].电机与控制应用,2018,45(12): 1.
- [11] 向凡,许鸣珠.基于改进滑模速度控制器的永磁直线同步电机直接推力控制[J].电机与控制应用,2019,46(6): 38.
- [12] 方一鸣,于晓,牛犇,等.永磁同步电机的自适应模糊终端滑模速度控制[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(12): 4855.
- [13] 邓艳艳,林旭梅.永磁同步电机滑模自适应控制[J].计算机仿真,2015,32(2): 337.
- [14] 华志广,窦满峰,赵冬冬,等.基于改进型滑模观测器的PMSM无位置传感器控制[J].西北工业大学学报,2018,36(4): 754.

收稿日期: 2019-08-06