

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802308

基于滑模自抗扰的永磁同步电机电流环控制方法研究

任丽媛 张旭秀

(大连交通大学电气信息工程学院 大连 116028)

摘要: 为了提高永磁同步电机控制系统的稳定性,针对滑模控制存在的抖振现象以及系统运行时的扰动问题,给出了一种基于线性滑模自抗扰控制的电流控制器,所谓线性滑模自抗扰控制就是滑模控制与自抗扰控制的结合,其核心为扩张状态观测器,扩张状态观测器可观测系统的状态及扰动并对扰动进行补偿,能有效抑制系统扰动、提高系统的动、静态性能。搭建永磁同步电机滑模自抗扰矢量控制仿真模型,仿真结果表明,与传统滑模控制相比,该方法提高了永磁同步电机控制系统的稳定性,削弱了系统抖振,改善了系统扰动问题。

关键词: 永磁同步电机;滑模控制;自抗扰控制;扩张状态观测器;系统扰动

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on current loop control of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode auto-disturbance rejection

Ren Liyuan Zhang Xuxiu

(School of Electrical Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian116028, China)

Abstract: In order to improve the stability of permanent magnet synchronous motor control system, a novel current controller based on linear sliding mode active disturbance rejection is presented, the so-called linear sliding mode active disturbance rejection control is the combination of sliding mode control and active disturbance rejection control, which is based on the chattering phenomenon of sliding mode control and the disturbance of the system. Extended state observer is the core of active disturbance rejection control (ADRC), which can effectively suppress system disturbance and improve the dynamic and static performance of the system. The simulation model of permanent magnet synchronous motor (PMSM) sliding mode active disturbance rejection vector control is built. The simulation results show that compared with the traditional sliding mode control, this method improves the stability and disturbance problem of PMSM control system.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; sliding mode control; active disturbance rejection control; extended state observe; system disturbance

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有体积小、效率高、响应快等优点,伴随着研究的深入,从20世纪80年代起便被广泛地应用到如数控机床、航空航天等控制领域中^[1-3],应用场合越来越多。PMSM调速普遍采用PI控制来实现,PI控制器具有简单的控制结构、稳定的控制性能、易理解的控制算法等特点,但PI控制器参数的设置对系统性能影响很大,PI控制算法是利用误差比例和积分来减小和消除误差,虽缩短了跟踪时间,但超调却增大^[4],所以PI控制不能满足高要求控制场合的控制系统^[5-7]。根据系统对控制性能的高要求,需

要找到更先进的控制算法控制永磁同步电机,这也是近年来专家研究的热点问题。自抗扰控制技术由韩京清提出,依据先进的现代控制理论和PID控制中误差消除的精髓,是一种不依赖系统数学模型的控制技术^[5]。自抗扰控制器可以提高系统性能,即在电机运行时实时的估计和补偿系统扰动量。在经典自抗扰控制中有个复杂的问题即整定参数个数多^[8-9],而滑模变结构控制具有很强的鲁棒性,滑模控制是一种非线性控制,在系统运行时,具有对系统的参数变化和扰动不敏感的特性^[7],且具有良好的跟随性。文献[10]提出了在传统的滑模控制模糊线性切换函数的基础上引入了非线性切换函数,并进行了平稳切换,满足了系统的动态响应,增强了鲁棒性,解决了抖振问题。文献[11]提

收稿日期:2018-11-09

出了一种永磁同步电机线性自抗扰控制器的设计方法,使得电机无超调启动,当系统负载转矩突然变化时电机能快速响应。文献[12]提出终端滑模控制,即在一定范围内设计终端滑模面,仿真结果表明该优化方法能够对于系统运行时的扰动因素做出快速调节,提高了系统的稳定性。文献[13]提出一种复合控制策略,将负载扰动滑模观测器与模糊控制相复合,不仅改善了滑模控制的趋近速度,还削弱了滑模控制时的抖振现象。文献[14]提出了一种线性化自抗扰控制器的方法,针对速度控制中负载扰动的问题,设计负载转矩观测器和相应的前馈控制器,对负载扰动进行补偿。文献[15]提出了电流内环与外环相联系的滑模控制与自抗扰控制结合的方法,改善了系统控制时的性能,削弱了系统抖振,系统扰动精度有所提高。文献[16]提出了负载转矩补偿和自抗扰控制相结合的方案,提高了永磁同步电机的动、静态性能。文献[17]提出了运用饱和函数的二阶自抗扰滑模观测器,可以有效地观察永磁同步电动机的转子位置和转速,同时削弱了抖振问题。

本文以永磁同步电机为研究对象,采用矢量控制技术,结合自抗扰控制和滑模控制设计复合电流控制器。依据自抗扰控制理论,将自抗扰控制中扩张状态观测器与滑模控制结合,滑模面采用观测值和实际值的差值,估计误差沿着设计的滑模面平滑运动最终趋向原点。搭建了系统仿真模型,将仿真结果与传统PI控制和滑模控制对比,结果表明本文设计的滑模自抗扰控制提高了系统抗扰性,改善了系统运行性能。

1 永磁同步电机数学模型

在不影响系统控制性能的前提下经常作如下假设:忽略磁路饱和、忽略磁滞和涡流损耗、忽略高次谐波。直流电流可根据弱磁运行时的具体要求和实际情况来定,由于本文不考虑弱磁,令 $i_d^* = 0$,定子电流全部是转矩电流分量,用来产生较大的转矩,此时控制结构相对简单且降低了铜耗。实现了定子电流 i_d 、 i_q 的近似线性解耦。此时永磁同步电机在 $d-q$ 两相旋转坐标系下的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & -p_n\psi_f \\ L & L \\ 3p_n\psi_f & 0 \\ 2J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_q}{L} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (1)$$

电机转矩方程为:

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

式中: i_d 、 i_q 分别为定子电流 d 、 q 轴分量; u_d 、 u_q 分别为定子电压 d 、 q 轴分量; R_s 为定子电阻; L_d 、 L_q 分别为定子 d 、 q 轴电感; p_n 为永磁同步电机极对数; ψ_f 为转子永磁体磁链; ω 为电机转子角速度; T_L 为负载转矩; B 为运动阻尼系数; J 为转动惯量。

由式(1)可知,永磁同步电机是一个多变量的系统,由

于 i_d 、 i_q 、 ω 三者之间的非线性关系使电机参数不能单独调节,这就需要将 i_d 、 i_q 解耦,这里采用表贴式永磁同步电机,有 $L_d = L_q = L_s$,得:

$$T_e = \frac{3}{2}p_n\psi_f i_q \quad (3)$$

2 滑模控制及自抗扰控制技术

2.1 滑模变结构控制

滑模变结构控制(sliding mode control, SMC)在系统中控制的不连续性在解决非线性问题时扮演着重要的角色。被控系统的切换面会按照特定的轨迹在原点附近做切换运动,此时切换面的参数决定了系统的性能,与被控对象自身的参数无关,在控制系统中具有很强的鲁棒性,这种特性决定了滑模控制的特殊性,简化了控制方式。因此,滑模变结构控制对非线性、强耦合、高阶的永磁同步电机控制系统具有重要的意义。定义设一控制系统,确定切换函数:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, t) \\ x &\in R^n, t \in R^n \end{aligned} \quad (4)$$

求解控制函数:

$$\begin{aligned} s(x, t) \\ s &\in R^m \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)满足:

$$\begin{aligned} u^+(x, t) &\neq u^-(x, t) \\ u(x, t) &= \begin{cases} u^+(x, t), & s(x, t) > 0 \\ u^-(x, t), & s(x, t) < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

控制函数需要满足的条件为滑动模态存在即系统所有的状态量最终都是终止量(到达终止点);可达性即切换面外的点最终都要在一定时间内到达切换面;滑模运动的稳定性即进入到滑动模态区的点将不再运动到此区域外,而是在此区域运动到终止点;满足控制系统动态品质要求。

满足以上前三点控制要求的系统控制方式为滑模变结构控制, $u(x)$ 的作用类似于切换开关, $u(x)$ 在系统运行时进行高频率的动作,使系统外的点快速运动到切换面,直到系统稳定^[18]。

2.2 自抗扰控制

文献[19]从控制策略的角度出发,深度研究PID控制和先进的现代控制理论,根据系统给定与实际响应之间的误差作为控制的精髓,提出一种观测加补偿的新型控制技术,即自抗扰控制技术(active disturbance rejection control, ADRC)。自抗扰控制技术由3个部分组成,分别是跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性状态误差反馈控制律(NLSEF),其作用分别为:跟踪微分器在系统中提取微分信号,对系统跟踪具有快速性,解决了系统快速性与超调量之间的矛盾^[20];扩张状态观测器是自抗扰控制技术最重要的组成部分,观测被控对象的所有运行状态以及系统运行过程中的内外扰动,并对扰动进行相应补偿,在一定程度上提高了系统的稳定性;非线性状态误差反

馈控制律可实时反馈非线性信号,实现小误差大增益,大误差小增益^[21]。

非线性的自抗扰控制较线性自抗扰控制具有更强的控制性能,更高的控制精度,但是在控制过程中需要调节参数多,给控制过程带来了困难,所以高志强提出了线性化的自抗扰控制^[22],即将有关参数转化为和系统带宽相关的量,全部用带宽表示,减少了所需调节参数,简化了控制方式。本文采用的即为线性自抗扰控制方式。

3 永磁同步电机滑模自抗扰控制器的设计

自抗扰控制对外部扰动量进行自发、直接的观测与实时抵消,这使 ADRC 具备很强的抗扰能力,永磁同步电机的非线性、强耦合的特性,因此得到了良好的控制效果。滑模变结构控制器的设计简单,不依赖系统数学模型,灵活的参数设计使得滑模控制被广泛的应用在永磁同步电机调速系统中。

二阶 ADRC 交流永磁同步电机控制系统需整定参数 16 个,ESO 需要调节的参数为 7 个,可知在控制过程中由于需要调节的参数过多,给参数整定带来了巨大困难。高阶 ADRC 系统需要调节参数更多,永磁同步电机在选择控制方式时,对于控制系统所需调节参数越少越好。基于此,本文采用线性自抗扰控制,即控制系统省去跟踪微分器环节,同时 ESO、NLSEF 环节线性化处理。

本文结合滑模控制和自抗扰控制两种控制算法设计内环复合电流控制器,以此可以克服单一控制算法存在的不足,复合控制算法以扩张状态观测器环节为基础,扩张状态观测器可以观测系统的状态及扰动并对扰动进行补偿,能有效抑制系统扰动、提高系统的动、静态性能。结合 SMC 控制将 ESO 观测值与系统实际值的差值作为设计滑模面的状态量,使误差沿着滑模面平滑运动,最终趋向于原点为零。此种设计方法优化了调速系统,提高了电流的控制精度,发挥了 SMC 和 ADRC 各自独有的特点。

在采用 $i_d^* = 0$ 矢量控制策略时,旋转 d 轴电流状态方程为:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(-R_s i_d + \omega L_q i_q) + \frac{1}{L_d} u_d \quad (7)$$

其中, u_d 为旋转 d 轴电流环控制量,总扰动可设为:

$$D_d(t) = \frac{1}{L_d}(-R_s i_d + \omega L_q i_q) \quad (8)$$

令控制系数 $b_2 = \frac{1}{L_d}$, 电机调速系统扰动量估计的近似表示为:

$$\begin{cases} i_{dz1} \rightarrow i_d \\ i_{dz2} \rightarrow D_d \end{cases} \quad (9)$$

由于扰动量是有极限的,由式(9)可知,令:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = i_{dz1} - i_d \\ \epsilon_2 = i_{dz2} - D_d \\ g(\epsilon) = -g_2(\epsilon_1) - g_1^{(1)}(\epsilon_1) \end{cases} \quad (10)$$

联立式(7)、(8)、(10)得:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_2 \\ \dot{\epsilon}_2 = g(\epsilon) - d(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $g(\epsilon)$ 为最优控制函数,通过设计合适的 $g(\epsilon)$ 最优函数可以对系统的总扰动进行估计,根据系统的估计值对扰动进行相应的补偿,使观测器系统稳定性得到保证,从而提高了系统整体的稳定性和抗干扰能力。与式(10)中 $g(\epsilon)$ 最优控制函数进行滑模面的结合,设计控制函数为:

$$s = c\epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (12)$$

其中 c 为系统控制系数,控制系统运行时,适当选取 c 值($c > 0$)和稳定裕度值使 $p + c = 0$ 为 Hurwitz 稳定,即 p 的特征值实部为负, p 为 Laplace 算子, $g(\epsilon)$ 函数设计为带切换控制的开关函数,此控制函数中控制量随时间是变化的,表达式为:

$$g(\epsilon) = -c\epsilon_2 - h \text{sign}(s) \quad (13)$$

式中: h 为改进的等速趋近相系数, $h = h_1 + h_2 \int_0^t \epsilon_1 dt$, h_1 为比例环节, $h_2 \int_0^t \epsilon_1 dt$ 为积分环节,系统状态变量 ϵ_1 较大时,切换项在经典比例积分环节的作用下使系统快速趋近滑模面,系统抖振通过调节 h_1 、 h_2 会得到削弱。针对一阶 d 轴电流环,比例控制表达式为:

$$u^* = k_1 e - i_{dz2} / b_2 \quad (14)$$

由此最终得到 d 轴电流环 SM-ESO 控制方程为:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = i_{dz1} - i_d \\ \dot{i}_{dz1} = i_{dz2} + b_2 u_d^* \\ \dot{i}_{dz2} = -c\epsilon_2 - h \text{sign}(s) \end{cases} \quad (15)$$

q 轴电流环的设计与 d 轴电流环设计完全相同,只需将 d 轴改为 q 轴即可,在此将不再赘述。

4 仿真分析

对永磁同步电机电流环滑模自抗扰控制模型在 MATLAB 环境下进行仿真,系统仿真结构如图 1 所示,系统运行时永磁同步电机参数如表 1 所示。

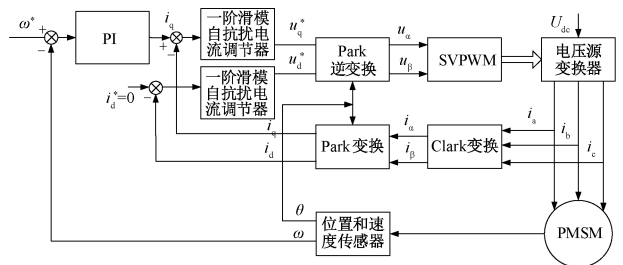
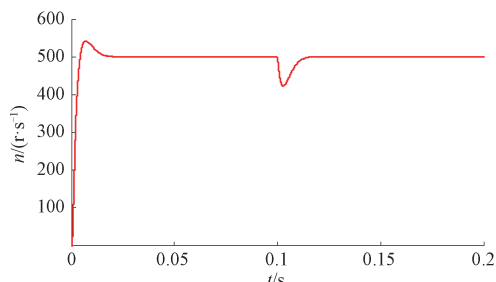


图 1 基于滑模自抗扰控制的 PMSM 系统结构

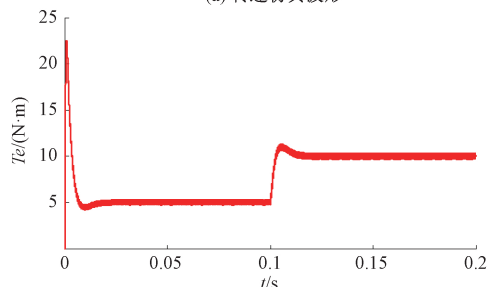
恒转速、恒负载启动,负载在 0.1 s 时由 5 N·m 突变到 10 N·m,滑模控制与滑模自抗扰控制方式的转速和转矩波形分别如图 2(a)~(d)所示。

表1 永磁同步电机参数

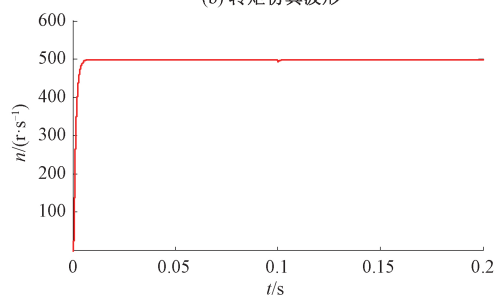
参数	单位	数值
转动惯量	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.000 8
永磁磁链	Wb	0.175
交、直轴绕组电感	H	0.008 5
定子电阻	Ω	2.875
电机极对数	P	4



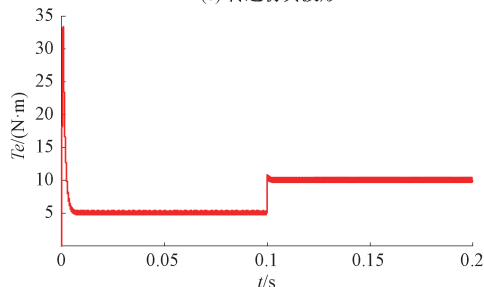
(a) 转速仿真波形



(b) 转矩仿真波形



(c) 转速仿真波形



(d) 转矩仿真波形

图2 滑模自抗扰控制仿真

图2(a)所示为传统滑模控制仿真速度波形,从仿真结果可以看出系统在控制初始时转速有超调,突加负载存在明显的转速速降。

图2(b)所示为传统滑模控制转矩仿真波形,从仿真结果可以看出,系统运行时转矩存在波动,突加负载时,转矩有一定程度的波动后继续有波动运行。

图2(c)为滑模自抗扰控制方式转速仿真波形,从仿真结果可以看出,系统启动过程快速、平稳、且无超调,突加负载时,转速变化微小并很快跟随系统给定稳定运行,由此可以得出,滑模自抗扰控制方式削弱了系统抖振现象。

图2(d)为滑模自抗扰控制方式转矩仿真波形,从图仿真结果可以看出转矩波动小,突加负载时转矩小幅度的波动后便恢复到给定转矩,由此可以得出,滑模自抗扰方式改善了系统的稳定性,提高了系统抗扰动能力。

从仿真波形结果和分析可看出,转速恒定时,传统滑模控制在初始时转速有超调,突加负载滑模控制出现速降,且转矩波形存在波动现象;而采用滑模自抗扰控制时,系统启动过程快速、平缓、无超调,且突加负载转速速降很小,在一定程度上削弱了滑模控制的抖振现象,转矩波动现象变弱并很快跟踪给定继续运行。由此可以得出,本文所提出的滑模自抗扰控制方式在一定程度上提高了系统的抗扰动能力,改善了系统鲁棒性,提高了系统稳定性能。

5 结 论

本文设计了一种结合滑模控制和自抗扰控制技术的电流环复合控制策略,利用各自控制优势实现速度调节,滑模自抗扰复合控制算法克服了传统滑模控制快速性与超调量间的矛盾,提高了系统的自适应能力,削弱了滑模控制单独控制时的抖振问题,仿真结果验证了滑模自抗扰控制方式与传统滑模控制相比系统负载突变后恢复到稳态的时间变短,有更好地动、静态性能,电机启动无超调,与传统滑模控制相比,该方法提高了永磁同步电机控制系统的稳定性,削弱了系统抖振,改善了系统扰动问题。

参考文献

- [1] 卢琴芬,孔浩,石佳蒙,等.高速列车永磁同步牵引电机基于联合仿真模型的单脉冲控制研究[J].电工技术学报,2015,30(14):61-66.
- [2] 代颖,乔金秋,郑江,等.电动汽车牵引用永磁同步电机的多物理场分析[J].电机与控制应用,2016,43(5):73-78.
- [3] 张明辉,杨家强,陈磊,等.基于扩张状态观测器的永磁同步电机电流预测控制[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(7):1387-1392.
- [4] XU D G,GAO Y. A simple and robust speed control scheme of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Control Theory and Applications,2004(2):165-168.
- [5] 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):2-5.

- [6] LAI C K, SHYU K K. A novel motor drive design for incremental motion system via sliding-mode control method[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2005, 52(2):499-507.
- [7] 王磊, 张振国, 沈素素. 基于全局非奇异快速终端滑模结构作用下的永磁同步电机的研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(3):28-31.
- [8] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1):24-31.
- [9] 吴猛, 朱喜林, 鄂世举, 等. 自抗扰控制器参数整定方法[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(2):121-123, 127.
- [10] ZHU J T, WANG L N, XUE F. Fuzzy logic control by combining SMC and PI for PMSM[J]. Electric Drive, 2013, 43(7):43-47.
- [11] 周凯, 孙彦成, 王旭东, 等. 永磁同步电机的自抗扰控制调速策略[J]. 电机工程学报, 2018, 22(2):58-63.
- [12] 王磊, 张振国, 沈素素. 基于全局非奇异快速终端滑模结构作用下的永磁同步电机的研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(3):28-31.
- [13] 张宇慧, 丁德锐, 董晓光. 基于滑模观测器与模糊 PID 的 PMSM 无位置传感器控制系统[J]. 电子测量技术, 2018, 41(5):6-12.
- [14] 崔晓光. 基于自抗扰控制技术的永磁同步电机速度控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [15] 孟祥偲, 于海生, 于金鹏, 等. 永磁同步电机的线性自抗扰与滑模协调控制[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [16] ZHANG X X, LU M Y. Research on ADRC of Permasyn Motor [J]. Electrical Automation, 2018, 40(2):14-16, 20.
- [17] LI C C, YUN X R, ZHOU X F, et al. PMSM sensorless control based on ADRC and SMO[J]. Small & Special Electrical Machines, 2018(1): 32-35.
- [18] 彭康. 交流传动系统的滑模控制算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [19] 韩京清. 控制理论是模型论还是控制论[J]. 系统科学与数学, 1989, 9(4):328-335.
- [20] WU C, QI R. The Simplified active disturbance rejection control for PMSM drive system [C]. 32nd Chinese Control Conference, 2013:4172-4176.
- [21] 周斌. 永磁同步电机伺服系统自抗扰控制的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [22] Gao Z. Scaling and bandwidth parameterization based controller tuning [C]. Proceedings of the American Control Conference, 2016, 6:4989-4996.

作者简介

任丽媛, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制理论与应用。

张旭秀, 博士, 教授, 主要研究方向为信号处理与智能控制。

E-mail: zhangxuxiu@163.com