

带全阶观测器的永磁同步电机电流滑模控制器研究

刘小俊^{1,2*}

(1. 南京交通职业技术学院 运输管理学院, 江苏 南京 211188;

2. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

Research on Current Sliding Mode Controller with Full-Order Observer for PMSM

LIU Xiaojun^{1,2*}

(1. Transportation Management College, Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: [Objective] In order to improve the disturbance resistance and robustness of the current controller of permanent magnet synchronous motor (PMSM), and to solve the overshoot and dq axis current ripple problems of traditional proportional integral (PI) control under speed and load changes, a PMSM current controller based sliding mode control with full-order observer (FO) is proposed.

[Methods] Firstly, considering the inevitable disturbances such as dead time in the inverter, parameter changes, and abrupt changes, an actual mathematical model of the PMSM was established. Secondly, a FO was used to calculate the disturbance of the dq axis current model, and analyzed the influence of parameters on the observer. Furthermore, considering the observation disturbance, a PMSM dq axis current controller was designed based on sliding mode control. In addition, the stability of the FO was analyzed, and the stability of the controller was analyzed using Lyapunov functions. **[Results]** To verify the effectiveness of the method, Matlab/Simulink simulation platform and TMS320F28035 experimental platform were built. Comparative results demonstrated that the proposed method features a simpler structure and lower steady-state error than the other two controllers. The simulation and experimental results showed that compared with traditional PI controllers,

the current controller of this method exhibits good robustness in dealing with parameter changes, load or speed changes, and can suppress dq axis current pulsation, ensuring the stability of the system. **[Conclusion]** The sliding mode controller with FO proposed in this paper improves the system's disturbance resistance ability and enhances its dynamic response performance. This study provides technical support for the application of PMSM in new energy vehicles, rail transit, and related fields.

Key words: sliding mode control; full-order observer; permanent magnet synchronous motor; disturbance

摘要: [目的] 为了提升永磁同步电机(PMSM)电流控制器的抗扰动能力和鲁棒性,解决传统比例积分(PI)控制在转速和负载变化下的超调及 dq 轴电流脉动问题,提出了一种带全阶观测器(FO)的PMSM电流滑模控制器。**[方法]** 首先,考虑逆变器死区时间、参数变化和突变等不可避免的扰动,建立了PMSM的实际数学模型。其次,使用FO计算 dq 轴电流模型扰动,并分析了参数对观测器的影响。然后,考虑到观测扰动,基于滑模控制设计了PMSM的 dq 轴电流控制器。此外,分析了FO的稳定性,并用李雅普诺夫函数对控制器进行了稳定性分析。**[结果]** 为了验证该方法的有效性,搭建了Matlab/Simulink仿真平台和TMS320F28035的试验平台。通过与其他两种控制器进行对比,本文所提的方法具有结构简单、稳态误差更小的优点。仿真与试验结果表明,与传统的PI控制器相比,本文所提方法的电流控制器在应对参数变化、负载或速度突变时表现出较好的鲁棒性,同时可以抑制 dq 轴电流脉动,保证了系统的稳

基金项目: 南京交通职业技术学院科研基金重点项目 (JZ2407)

Key Research Project of the Scientific Research Fund of Nanjing Vocational Institute of Transportation Technology (JZ2407)

定性。【结论】本文提出的带 FO 的滑模控制器,改善了系统抗扰动能力,提升了系统的动态响应性能,为 PMSM 在新能源汽车、轨道交通等相关领域的应用提供了技术支持。

关键词: 滑模控制; 全阶观测器; 永磁同步电机; 扰动

0 引言

在工业制造中,电机因可实现机电一体化,在能量转换中起着至关重要的作用。永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 由于具备可靠性高、结构简单、体积小、速度范围广、功率密度高及效率高等优点,发展迅速^[1],被广泛应用于航空航天、车床和交通运输等领域^[2-5]。目前,PMSM 在工业领域多采用矢量控制、直接转矩控制等成熟控制策略。其中,矢量控制通过解耦 d 、 q 轴电流,构建电流环+速度环的双闭环结构。闭环控制通常采用比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器,其结构简单、具有良好的稳态性能,但动态响应较慢、抗干扰能力较弱。

由于 PMSM 的强耦合性和非线性,传统的 PI 控制无法满足增加死区时间、参数时变、负载和速度突变等特殊场合的控制要求。随着现代控制理论的发展,很多先进的控制技术已被应用于 PMSM 驱动系统中,如滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC)^[6]、自适应控制^[7]和模型预测控制^[8]等。

由于死区时间和采样误差,可能会导致驱动系统中转矩脉动等周期性干扰,并降低 PMSM 的控制性能。文献[9]采用了一种增强周期性扰动衰减的双闭环预测控制结构。为了抑制电流脉动,文献[10]提出了一种功率电流闭环控制。文献[11]考虑了单个电流传感器中的采样延迟误差,并提出了一种基于 dq 参考系的新型补偿方法。文献[12]提出了一种基于离散时间重复控制的主动干扰抑制控制。为了补偿电流测量误差,文献[13]设计了一种改进的具有电流测量误差校正功能的滑动模式观测器,用于估计速度和位置。文献[14]提出了一种特殊的控制方法,通过控制器将转矩脉动和相电流失真最小化。文献[15]提出谐波注入方法的直接

增强。为了提高直流总线的电压利用率,降低电压矢量跟踪误差,文献[16]提出了一种有限控制集调制模型预测控制方法。文献[17]提出了一种简化的电流控制策略,该策略可以补偿转子通量扭曲对转矩性能的影响。文献[18]提出一种基于自抗扰预测模型的占空比控制集模型预测控制策略。针对模型预测电流控制在电机参数失配工况下控制性能下降,文献[19]提出了一种在设计过程中无需使用电机参数的 PMSM 无模型控制策略。

除了改变电流环的控制器外,速度环的改进也引起了研究者的广泛关注,以应对不同的干扰和不确定性。文献[20-21]都采用了 SMC 控制器和扰动观测器的策略,文献[22-24]都设计了带有扰动观测器的速度和电流新控制器。文献[25]通过引入增量电感设计了自适应鲁棒控制器,可以确保在速度和 PMSM 参数变化时具有良好的动态响应、稳态误差和鲁棒稳定性。文献[26]将预设性能控制与 SMC 方法相结合,提出了一种基于时变扰动观测器的预设性能 SMC。文献[27]提出了一种具有固定开关频率的带扰动补偿的预测速度控制策略。文献[28]提出了一种改进型超螺旋滑模线性自抗扰控制策略。

为了提高 PMSM 驱动器的跟踪性能和动态响应,本文提出了带全阶观测器 (Full-Order Observer, FO) 的 PMSM 电流 SMC 控制器。该控制基于 SMC,通过 FO 观测扰动值,控制结构简单。

1 PMSM 数学模型

PMSM 的 d 、 q 轴数学模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L_d}i_d + \frac{u_d}{L_d} + \omega_e i_q \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q}i_q + \frac{u_q}{L_q} - \omega_e \left(i_d + \frac{\psi_f}{L_q} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 为定子电阻; u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电压和电流; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴定子电感,对于表贴式 PMSM, $L_d = L_q = L$; ω_e 为电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

PMSM 的机械运动方程如式(2)所示:

$$\frac{d\omega_e}{dt} = -\frac{B}{J} + \frac{3p^2\psi_f}{2J}i_q - \frac{p}{J}T_L \quad (2)$$

式中: T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; B 为粘性摩擦因数; p 为极对数。此外, $\omega_e = p\omega_r$, ω_r 为机械角速度。

在电机运行期间,电阻值会发生变化。同时,在某些特殊场合,负载和速度可能会突变。考虑到参数变化、负载或速度突变,提出了一种扩展模型,以 d 轴电流方程为例,推导如式(3)所示:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R + \Delta R}{L}i_d + \frac{u_d}{L} + (\omega_e + \Delta\omega_e)(i_q + \Delta i_q) \quad (3)$$

将式(3)简化为

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d}{L} + D_d \quad (4)$$

式中: $D_d = -\frac{R + \Delta R}{L}i_d + (\omega_e + \Delta\omega_e)(i_q + \Delta i_q)$; ΔR 为电阻值扰动; $\Delta\omega_e$ 、 Δi_q 分别为电角速度突变、负载突变。

此外,需要考虑 u_d 和 u_d^* 之间的误差, d 轴电流方程如式(5)所示:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d^*}{L} + D_d \quad (5)$$

式中: $D_d = d_d - \frac{u_d^*}{L} + \frac{u_d}{L}$; u_d^* 为给定 d 轴电压,即 d 轴电流控制器的输出值。

同样, q 轴电流类似,则 PMSM 的 d 、 q 轴电流扩展方程如式(6)所示:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_d^*}{L} + D_d \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_q^*}{L} + D_q \end{cases} \quad (6)$$

2 电流控制算法

基于 PI 控制器的矢量控制如图 1 所示, ω_r

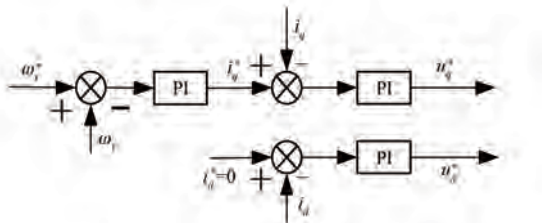


图 1 基于 PI 控制器的矢量控制框图

Fig. 1 Vector control structure based PI controller

可以通过速度传感器获取,当然也可以用无感算法获得; i_d 和 i_q 可以通过三相电流经过 Clark 和 Park 变换得到。目前,三相电流的获取方法通常采用单电阻采样。对于表贴式 PMSM,磁场定向控制 $i_d^* = 0$ 是普遍采用的做法,因其结构简单。

2.1 电流扰动观测器设计

以式(6)的 d 轴电流方程为例,由于电流回路的采样周期很小,可以认为在一个采样周期内, D_d 没有变化,即 $\frac{dD_d}{dt} = 0$ 。因此,新的 d 轴电流方程如式(7)所示:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_d^*}{L} + D_d \\ \frac{dD_d}{dt} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)写成空间向量形式,则:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_d \\ D_d \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$; $y = i_d$; $u = u_d^*$ 。

式(8)的可观测性矩阵的秩为

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \end{bmatrix} = 2 \quad (9)$$

由此可以说明系统可观,因此,可以设计 FO。在 FO 中,通过比较估计量与测量量,调整估计量,观测器的设计如式(10)所示:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{H}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}$ 为观测器的增益; $\hat{\mathbf{x}}$ 为 $\mathbf{x}$ 的估计值; $\hat{\mathbf{y}}$ 为 $\mathbf{y}$ 的估计值。

观测器的特征根方程如式(11)所示:

$$\alpha(s) = \det(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{H}\mathbf{C}) = s^2 + h_1s + h_2 \quad (11)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; h_1 、 h_2 为观测器增益。

状态误差 $\tilde{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}$ 可表示为

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C})\tilde{\mathbf{x}} \quad (12)$$

原则上, $(A-HC)$ 的特征值可以通过 H 配置在任何位置, 这样 $\hat{x}$ 就可以快速近似 x 。一般来说, $(A-HC)$ 的期望特征值被设置为复共轭特征值。因此, 预期的特征多项式可写为

$$\alpha(s) = (s + \beta + \beta j)(s + \beta - \beta j) = s^2 + 2\beta s + 2\beta^2 \quad (13)$$

因此, $H = \begin{bmatrix} 2\beta \\ 2\beta^2 \end{bmatrix}$, 式(10)可改写为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_d}{dt} = \frac{u_d^*}{L} + \hat{D}_d + 2\beta(i_d - \hat{i}_d) \\ \frac{d\hat{D}_d}{dt} = 2\beta^2(i_d - \hat{i}_d) \end{cases} \quad (14)$$

类似的, q 轴电流观测器设计为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_q}{dt} = \frac{u_q^*}{L} + \hat{D}_q + 2\beta'(i_q - \hat{i}_q) \\ \frac{d\hat{D}_q}{dt} = 2\beta'^2(i_q - \hat{i}_q) \end{cases} \quad (15)$$

在实际应用中, 观测器的逼近速度很难快于系统的响应速度。为了加快观测器的逼近速度, H 的值必须大, 然而这又受到系统非线性饱和和特性的限制。此外, 系统的输出 y 中总是会有各种噪声。如果观测器的响应速度太快, 这些噪声将增加。因此, 在选择 H 的值时, 应该同时考虑观测器的逼近速度和观测器的通带, 这样观测器才能获得一定的抗干扰能力。

2.2 电流控制器设计

SMC 是一种非线性控制, 其可使系统按照预定的滑模状态轨迹移动。由于滑模可设计且不受对象参数和干扰的影响, SMC 具有响应快、对参数变化和干扰不敏感、无需系统识别和物理实现简单等的优点。

同样, 以式(6)的 d 轴电流方程为例, d 轴电流跟踪误差定义如式(16)所示:

$$e = i_d^* - i_d \quad (16)$$

式中: i_d^* 为 d 轴电流给定值, 则 d 轴电流参考值和反馈值的动态变化如式(17)所示:

$$\dot{e} = i_d^* - \dot{i}_d = i_d^* - \frac{u_d^*}{L} - D_d \quad (17)$$

本文将 d 轴电流跟踪误差 e 作为自变量, 选择如式(18)所示的积分滑模面:

$$s = e + c \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (18)$$

式中: c 必须满足 Hurwitz 条件, 即 $c > 0$ 。

此外, 有必要设计趋近律, 即 $s \rightarrow 0$ 的过程。好的趋近律可以提高系统的动态响应质量, 考虑到系统的简单性和有效性, 本文选择了一种恒速趋近律, 如式(19)所示:

$$\dot{s} = -\eta \operatorname{sgn}(s), \eta > 0 \quad (19)$$

式中: η 为系统运动点到达滑模面的速率, η 越小, 到达速度越慢, η 越大, 到达速度越快, 但抖动也大。

综上所述, 将式(19)与式(17)和式(18)相结合, 得到 d 轴电流环控制器的输出信号即 d 轴电压参考值, 如式(20)所示:

$$u_d^* = L[i_d^* - D_d + \eta \operatorname{sgn}(s) + ce] \quad (20)$$

类似地, q 轴电流环控制器设计如式(21)所示:

$$u_q^* = L[i_q^* - D_q + \eta' \operatorname{sgn}(s) + c'e] \quad (21)$$

2.3 稳定性分析

根据现代控制理论, SMC 的稳定性可以通过李雅普诺夫判断来证明, 构造李雅普诺函数如式(22)所示:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (22)$$

由式(22)可以看出 $V \geq 0$ 。结合式(17)、式(18)和式(20), 得到式(22)的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(\dot{e} + ce) = \\ &s\{i_d^* - [i_d^* - D_d + \eta \operatorname{sgn}(s) + ce] - D_d + ce\} = \\ &-s\eta \operatorname{sgn}(s) = -\eta |s| \end{aligned} \quad (23)$$

因为 $\eta > 0$, 所以 $\dot{V} \leq 0$ 。当 $\dot{V} = 0, s = 0$, 根据李雅普诺夫稳定性定理, 闭环系统是渐近稳定的, 收敛速度取决于 η 。同样, q 轴的稳定性也可以通过上述分析来证明。

3 仿真和试验分析

考虑如式(24)所示的受控对象:

$$\frac{dx(t)}{dt} = u(t) + d(t) \quad (24)$$

式中: $x(t)$ 为状态变量; $u(t)$ 为控制输入; $d(t) = 3 + 5\sin(100t)$ 为外部扰动。

系统给定的电流信号 $i_{ideal}(t)$ 设置为振幅为 5 的阶跃函数, 即 $i_{ideal}(t) = 5\varepsilon(t)$ 。文献[18]、文献[20]和本文 3 种控制器下的阶跃响应和误差分别如图 2 和图 3 所示, 可以看出, 文献[20]的响应

更快,但其稳定误差劣于本文方法。与文献[18]相比,本文方法的稳定时间更快,稳态误差更小。此外,文献[18]中的滑模面设计过于复杂,不利于实际应用。

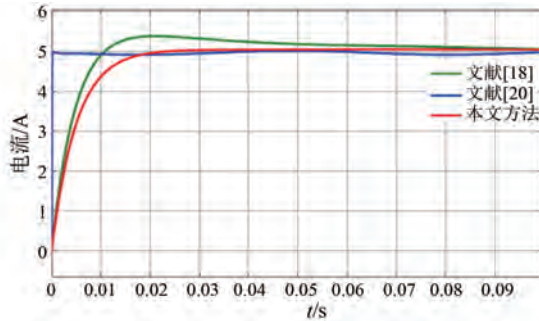
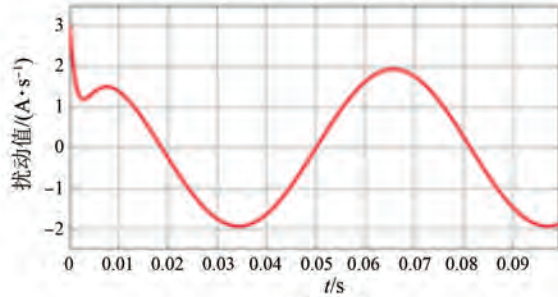
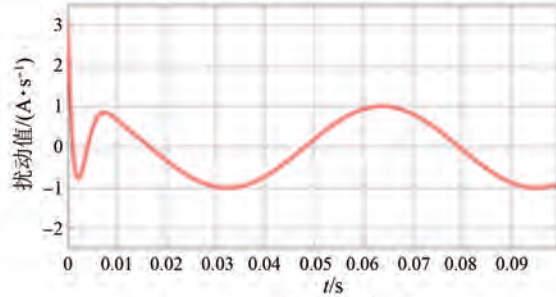


图2 三种控制器的阶跃响应

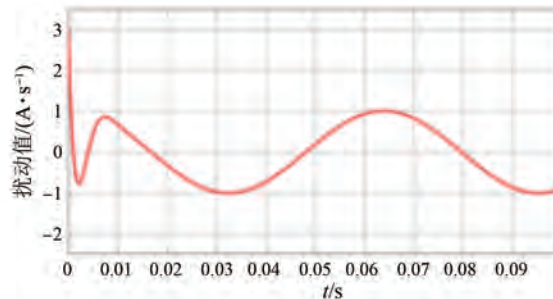
Fig. 2 Step response of three controllers



(a) 文献[18]



(b) 文献[20]



(c) 本文方法

图4 三种控制器的观测扰动误差

Fig. 4 The observation disturbance errors of three controllers

3.1 仿真分析

基于 $i_d = 0$ 的矢量控制,在 Matlab/Simulink 中建立了仿真模型,基于 SMC 和 FO 的仿真如图 5 所示。在图 5 中,可以发现 FO 作为 dq 轴电流控制器估计外部干扰并补偿到 SMC,取代了 PI 控制器。仿真中使用的电机参数、控制器参数分别如表 1、表 2 所示。

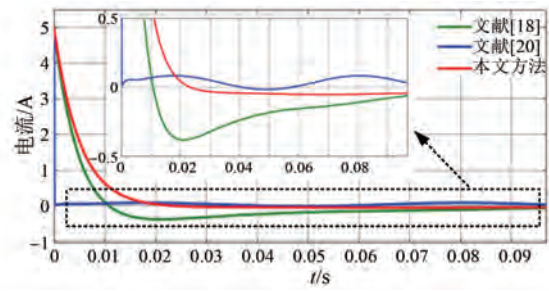


图3 三种控制器的阶跃响应误差

Fig. 3 Step response errors of three controllers

为了进一步分析 3 种控制器的观测性能,3 种观测器的观测干扰误差如图 4 所示。由图 4 可知,文献[18]的观测误差在 $(-2, 2)$ 范围内,但文献[20]和本文方法的观测误差在 $(-1, 1)$ 范围内,表明本文方法的观测干扰误差优于文献[18]。

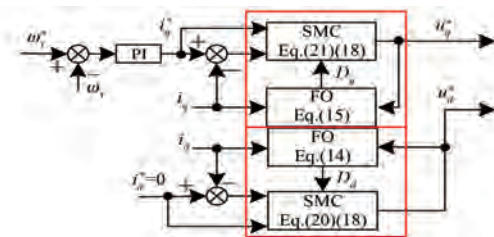


图5 PMSM 电流控制器框图

Fig. 5 Block diagram of PMSM current controller

表 1 仿真时的电机参数

Tab. 1 The motor parameters in simulation

参数名称	参数值
直流侧电压/V	48
定子电阻/ Ω	0.2
电感/mH	0.245
永磁体磁链/Wb	0.09

为了验证速度和负载突变时电流调节的 PI 控制和本文方法之间的差异。仿真参数设置:时间为 0.3 s、给定转速为 286 r/min、起动转矩为 1 N·m、0.15 s 施加 2 N·m 的负载。仿真结果如图 6 和图 7 所示。

表 2 仿真时的控制参数

Tab. 2 The control parameters in simulation

参数名称	参数值
PI 控制下速度环比例系数	50
PI 控制下速度环积分系数	500
PI 控制下 d 轴电流环比例系数	0.1
PI 控制下 d 轴电流环积分系数	50
PI 控制下 q 轴电流环比例系数	0.1
PI 控制下 q 轴电流环积分系数	5
本文方法下速度环比例系数	60
本文方法下速度环积分系数	4 000
本文方法下 dq 轴电流环 β	1 000
本文方法下 dq 轴电流环 c	0.01
本文方法下 dq 轴电流环 η	3 000

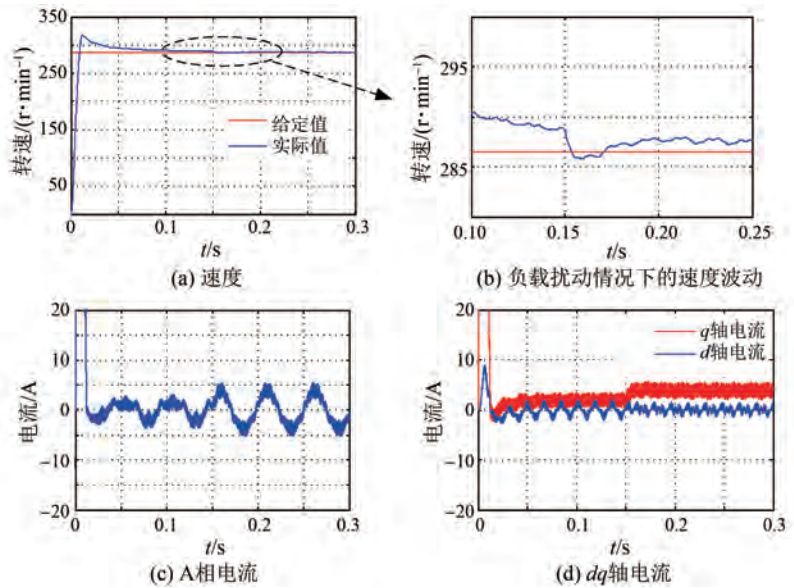


图 6 当 $R=0.1\ \Omega$ 时 PI 控制的仿真结果

Fig. 6 Simulation results based on PI control when $R=0.1\ \Omega$

由图 6(a) 和 7(a) 所示,与 PI 控制的电流调节系统相比,可以发现本文方法可以快速达到给定的速度,并且几乎达到稳定的状态,没有变化。相比之下,基于 PI 控制的电流调节在开始时波动较大。

由图 6(b) ~ (d) 可知,当负载转矩在 0.15 s 增加时,A 相电流、速度和 dq 轴电流波动明显。由图 7(b) ~ (d) 可知,使用本文方法控制时,系统具有更好的动态性能, dq 轴电流可以快速达到给定值,0.15 s 负载变化情况下电机转速波动较小。同时,在 PI 控制下,A 相电流有明显的畸变,其正弦度不如本文控制方法;PI 控制下的 dq 轴电流脉动明显,而在本文控制方法下,电流脉动有明显

的改善。

3.2 试验分析

为了验证本文所提控制方法的性能,搭建了一个基于 TMS320F28035 的 PMSM 驱动控制试验平台,主要验证电流调节系统在 PI 控制和本文控制方法下的动态响应。试验中使用的电机参数如表 1 所示。

试验硬件平台如图 8 所示。为了验证 SMC+FO 的动态性能,试验旨在展示速度分别为 300 rpm 和 600 rpm 时的起动和速度突变。PI 控制和 SMC+FO 下无负载转矩的起动和速度突变结果如图 9 所示。此外,SMC+FO 在无负载转矩下的结果如图 10 所示。PI 控制和 SMC+FO 在

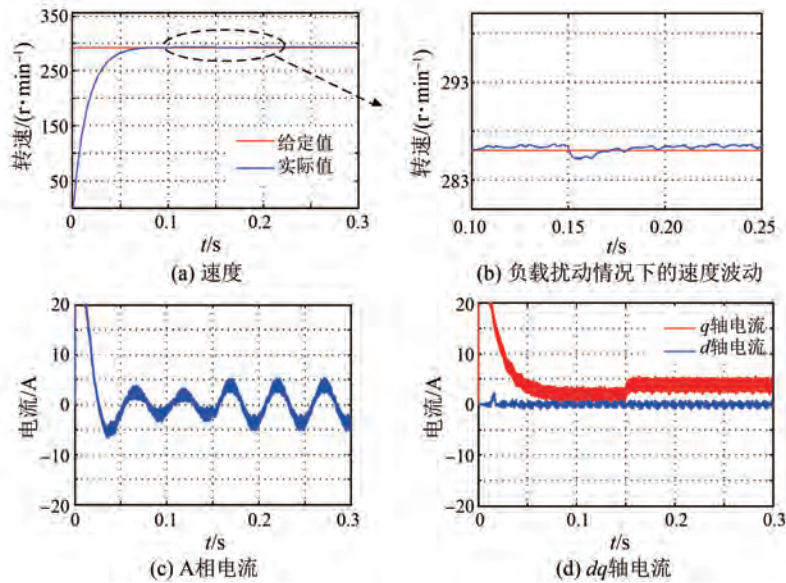


图 7 当 $R=0.1\ \Omega$ 时本文方法的仿真结果

Fig. 7 Simulation results based on the proposed method when $R=0.1\ \Omega$

0.2 N·m 的起动和突然速度变化结果如图 11 所示。此外,SMC+FO 在 0.2 N·m 的结果如图 12 所示。试验时的控制器参数如表 3 所示。

表 3 试验时的控制参数

Tab. 3 The control parameters in experiment

参数名称	参数值
PI 控制下速度环比例系数	1.5
PI 控制下速度环积分系数	0.002 5
PI 控制下 dq 轴电流环比例系数	1.5
PI 控制下 dq 轴电流环积分系数	0.005
本文方法下速度环比例系数	1.5
本文方法下速度环积分系数	0.002 5
本文方法下 dq 轴电流环 β	800
本文方法下 dq 轴电流环 c	0.05
本文方法下 dq 轴电流环 η	2 000

由图 9(a)与图 10(a)可知,在 PI 控制下,起动和速度突变过程中的速度超调非常明显;而本文所提控制方法下,系统速度突变过程几乎没有超调。

由图 9(b)与图 10(b)可知,本文所提控制方法的 dq 电流脉动小于 PI 控制,证明对于 dq 轴电流控制器,本文 FO 的跟踪性能优于 PI 控制。此外,本文控制器的抗干扰特性强于 PI 控制。

由图 11(a)和图 12(a)可知,在 PI 控制下,从 300 rpm 到 600 rpm、600 rpm 到 300 rpm 变速过程

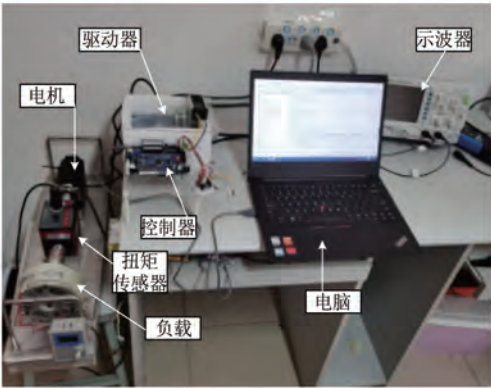


图 8 试验平台

Fig. 8 Experimental hardware platform

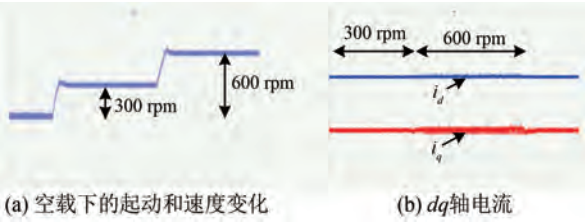


图 9 PI 控制下的试验结果

Fig. 9 Experimental results under PI control

中的速度超调非常明显;而本文所提控制方法几乎没有超调,且从 600 rpm 到 300 rpm 过程中的超调要小于 PI 控制。

由图 11(b)与图 12(b)可知,本文所提控制方法的 dq 电流脉动小于 PI 控制,且本文所提控制方法在速度变化下的 dq 轴电流的超调及稳定

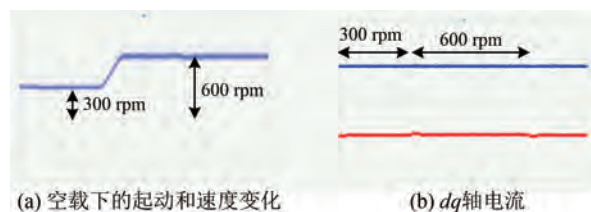


图 10 本文方法下的试验结果

Fig. 10 Experimental results under the proposed method

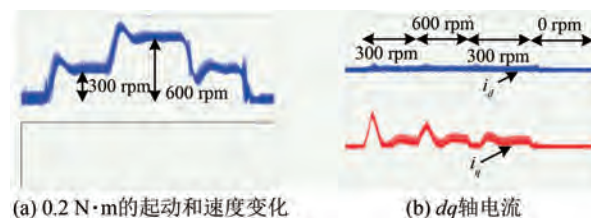


图 11 PI 控制下的试验结果

Fig. 11 Experimental results under PI control

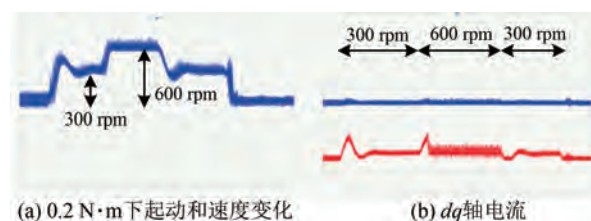


图 12 本文方法下的试验结果

Fig. 12 Experimental results under the proposed method

时间都优于 PI。这充分证明,对于 dq 轴电流控制,本文控制器的跟踪性能优于 PI。此外,本文控制器的抗干扰特性比 PI 强。

值得注意的是,本文控制器在处理速度突变方面具有良好的性能,这证明了本文所提控制方法的有效性。

4 结语

本文提出了一种带 FO 的 PMSM 电流 SMC 方法,通过 FO 观察外部干扰。此外,本文所提方法与其他文献方法的比较结果表明,本文所提方法具有良好的稳态误差和观测误差,简单易行,更有利于实际应用。通过仿真和试验验证了本文所提方法在速度和负载突变时,可以实现良好的性能和较强的鲁棒性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of

interests.

作者贡献

刘小俊进行了方案设计、仿真、试验验证、内容总结与论文撰写。刘小俊阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, simulation and experimental validation, and content summary were conducted by Liu Xiaojun. The manuscript was drafted and finalized by Liu Xiaojun. Liu Xiaojun has read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] SONG Z, YANG J, MEI X, et al. Harmonic current suppression method with adaptive filter for permanent magnet synchronous motor [J]. International Journal of Electronics, 2021, 108(6): 983-1013.
- [2] 鲍旭聪, 王晓琳, 彭旭衡, 等. 高速电机驱动关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6856-6871.
- [3] BAO X C, WANG X L, PENG X H, et al. Review of key technologies of high-speed motor drive [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6856-6871.
- [4] HUANG W T, ZHU X F, ZHANG H L, et al. Generalized fault-tolerant model predictive control of five-phase PMSM drives under single/two open switch faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 7569-7579.
- [5] HUANG W T, DU J C, HUA W, et al. A hybrid model-based diagnosis approach for open-switch faults in PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3728-3732.
- [6] 蒋钱, 卢琴芬, 李焱鑫. 双三相永磁直线同步电机的推力波动及抑制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 883-892.
- [7] JIANG Q, LU Q F, LI Y X. Thrust ripple and depression method of dual three-phase permanent magnet linear synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 883-892.
- [8] 王鹏康, 李鑫帅, 梁庭福, 等. 基于新型趋近律和超螺旋算法的 PMSM 滑模控制[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(2): 204-210.

- WANG P K, LI X S, LIANG T F, et al. PMSM synovial membrane control based on new reaching law and superhelical algorithm [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2025, 46(2): 204-210.
- [7] 徐古轩, 赵峰. 基于自适应同步频率跟踪观测器的高速永磁同步电机无传感器控制[J]. *兵工学报*, 2025, 46(2): 357-370.
- XU G X, ZHAO F. Sensorless control of high-speed permanent magnet synchronous motor based on adaptive synchronous-frequency tracking observer [J]. *Acta Armamentarii*, 2025, 46(2): 357-370.
- [8] 储伟, 林黄达, 易新强. 基于三重旋转坐标变换的双三相永磁同步电机模型预测电流控制策略[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(增刊1): 51-63.
- CHU W, LIN H D, YI X Q. Model predictive current control strategy for dual three-phase permanent magnet synchronous motors based on triple rotating coordinate transformation [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(S1): 51-63.
- [9] SONG Z F, WANG Y Q, SHI T N. A dual-loop predictive control structure for permanent magnet synchronous machines with enhanced attenuation of periodic disturbances [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 35(1): 760-774.
- [10] LIU J L, ZHANG Y C. Current pulsation suppression method based on power current closed-loop control for a PMSM under fluctuating DC-link voltage [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(1): 761-770.
- [11] WANG W J, YAN H, WANG X J. Analysis and compensation of sampling-delay error in single current sensor method for PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(5): 5918-5927.
- [12] TIAN M, WANG B, YU Y. Discretetime repetitive control-based ADRC for current loop disturbances suppression of PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 37(5): 3138-3149.
- [13] YE S, YAO X. An enhanced SMO-based permanent-magnet synchronous machine (PMSM) sensorless drive scheme with current measurement error compensation [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4407-4419.
- [14] AGORO S, HUSAIN I. Robust deadbeat finiteset predictive current control with torque oscillation and noise reduction for PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 2022, 58(1): 365-374.
- [15] WU Z Q, YANG Z J, DING K, et al. Transfer mechanism analysis of injected voltage harmonic and its effect on current harmonic regulation in FOC PMSM [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(1): 820-829.
- [16] YU F, LI K K, ZHU Z H, et al. An over modulated model predictive current control for permanent magnet synchronous motors [J]. *IEEE Access*, 2022, (10): 40391-40401.
- [17] WANG K, WU Z. Simplified current control strategy for permanent magnet synchronous motors with rotor flux distortion [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(4): 3407-3417.
- [18] 陈再发, 刘彦呈. 基于抗扰预测模型的表贴式永磁同步电机占空比控制集模型预测控制[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(2): 171-180.
- CHEN Z F, LIU Y C. Model predictive control of duty cycle control set for surface-mounted permanent magnet synchronous motor based on anti-disturbance prediction model [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(2): 171-180.
- [19] 蔡舒迟, 张志锋. 基于非线性扩张状态观测器的低参数敏感度 PMSM 无模型控制研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(2): 192-200.
- CAI S C, ZHANG Z F. Research on model-free control of PMSM with low parameter sensitivity based on nonlinear extended state observer [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(2): 192-200.
- [20] MA Y X, LI D, LI Y S, et al. A novel discrete compound integral terminal sliding mode control with disturbance compensation for PMSM speed system [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(1): 549-560.
- [21] WANG Y Q, FENG Y T, ZHANG X G, et al. A new reaching law for antidisturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 4147-4166.
- [22] APTE A, JOSHI VA, MEHTA H, et al. Disturbance-observer- based sensorless control of PMSM using integral state feedback controller [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35

- (6): 6082-6090.
- [23] HE L, WANG F X, WANG J X, et al. Zynq implemented Luenberger disturbance observer based predictive control scheme for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1770-1778.
- [24] WANG Y, YU H T, LIU L Y. Speed-current single-loop control with overcurrent protection for PMSM based on time-varying nonlinear disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 179-189.
- [25] YI P, WANG X J, CHEN D L, et al. PMSM current harmonics control technique based on speed adaptive robust control [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2): 1794-1806.
- [26] 陈勇志, 张立嘉, 刘旭东. 基于时变扰动观测器的永磁同步电机预设性能滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 148-158.
- CHEN Y Z, ZHANG L J, LIU X D. Preset performance sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on time-varying disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 148-158.
- [27] 洪俊杰, 赵明郎, 黄龙蛰, 等. 带扰动补偿的永磁同步电机预测速度控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 94-105.
- HONG J J, ZHAO M L, HUANG L Z, et al. Predictive speed control for permanent magnet synchronous motors with disturbance compensation [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 94-105.
- [28] 马雨新, 雷子奇, 顾萍萍, 等. 基于改进型超螺旋滑模线性自抗扰的永磁同步电机速度控制研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 103-112.
- MA Y X, LEI Z Q, GU P P, et al. Research on PMSM speed control based on improved super-twisting sliding mode linear active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 103-112.

收稿日期:2025-02-25

收到修改稿日期:2025-04-11

作者简介:

刘小俊(1993-),男,博士研究生,讲师,研究方向为永磁同步电机控制,z694537959@live.com;

*通信作者:刘小俊(1993-),男,博士研究生,讲师,研究方向为永磁同步电机控制,z694537959@live.com。