

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416261

PMSM 自适应分数阶滑模控制器设计*

席隆兴¹ 敖邦乾² 马家庆¹ 何志琴¹ 吴钦木¹

(1. 贵州大学电气工程学院 贵阳 550025; 2. 遵义师范学院工学院 遵义 563006)

摘要: 针对传统滑模控制的控制性能随着永磁同步电机运行参数的变化而急剧恶化,导致转速抖振大、电流谐波和转矩脉动等问题,设计一种新颖的模糊自适应分数阶趋近律滑模速度控制器。首先,结合分数阶理论和一般幂次趋近律函数设计了一种新颖的自适应分数阶趋近律,并通过正交实验来分析自适应参数的水平。其次,利用模糊控制器在线调整参数,增强了控制器的鲁棒性。由于模糊控制的引入会带来了更大的电流谐波,使用最优占空比的电流预测控制代替传统电流内环 PI 控制器。最后,搭建仿真模型并与传统幂次趋近律滑模控制器进行对比,仿真结果表明,本文提出控制器的三相电流谐波降低了 7.93%,突加负载后的转速降落减小了 31.2%,鲁棒性更强。

关键词: 永磁同步电机;分数阶滑模控制;模糊理论;电流预测;正交实验

中图分类号: TM341;TN63 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Design of a PMSM adaptive fractional order sliding mode controller

Xi Longxing¹ Ao Bangqian² Ma Jiaqing¹ He Zhiqin¹ Wu Qinmu¹

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Zunyi Teachers College of Engineering, Zunyi 563006, China)

Abstract: To address the problems that the control performance of conventional sliding mode speed control deteriorates drastically with the changes of the operating parameters of permanent magnet synchronous motor, resulting in large speed jitter, current harmonics and torque pulsations, a novel adaptive fractional-order reaching law sliding mode controller is designed. Firstly, a novel fuzzy adaptive fractional-order reaching law is designed by combining the fractional-order theory and the general power convergence law function, and the level of the adaptive parameters is analysed by orthogonal experiment. Secondly, the parameters are adjusted online using a fuzzy controller to improve the robustness of the controller. Since the introduction of the fuzzy control introduces more current harmonics, the current predictive control with optimal duty cycle is used instead of the traditional current inner loop PI controller. Finally, the simulation model is built and compared with the traditional power reaching law sliding mode controller, and the simulation results show that the three-phase current harmonics of the proposed controller in this paper are reduced by 7.93%, and the speed landing after sudden load addition is reduced by 31.2%, which makes the robustness stronger.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; fractional order sliding mode control; fuzzy theory; current prediction; quadrature experiments

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)由于其体积小、效率高等优点在工业领域得到了广泛的应用^[1]。滑模控制器具有动态响应速度快、对模型精度要求低以及实现简单等优势,是 PMSM 控制中常用的控制策略^[2]。但随着 PMSM 在数控机床、电子设备制造、电动汽车等众多行业应用的不断扩大,对电机控制系

统的快速响应能力以及抗干扰能力有了更高的要求^[3],且在实际的应用场景中系统很容易受到外界干扰和电机内部扰动而造成系统出现抖振现象,导致固定参数的新型趋近律滑模控制远远达不到期望的控制效果^[4]。

传统削弱滑模抖振的方法主要有 3 种,其分别是基于观测器的调节方法(使用状态观测器来观察抖振,实现滑模控制器参数的自适应调节^[5-6])、边界层内的正侧化方法、高阶滑模控制算法^[7]。而以上方法都只是降低扰动带来的影

收稿日期:2024-06-19

* 基金项目:国家自然科学基金(62163006,52267003)、贵州省科技厅(黔科合支撑[2022]一般 244,[2023]一般 096,[2023]一般 179)项目资助

响,因此需要设计一种有强鲁棒性的滑模控制器来削弱扰动本身^[8]。模糊控制对于系统参数变化和外界干扰具有较强的鲁棒性,能够在一定范围内保持良好的控制性能^[9]。张懿等^[10]为了解决传统滑模控制中存在的抖振以及系统鲁棒性差问题,将模糊理论与滑模控制相结合,设计了一种基于自适应模糊滑模软切换的永磁同步电机鲁棒无源控制方法,通过估计集成不确定边界,有效削弱滑模抖振,但边界的不确定也带来了更大的电流谐波。杨城健等^[11]通过将分数阶理论引入传统滑模趋近率中,设计了一种新型分数阶幂次趋近率,提高了系统的控制精度,一定程度上抑制了系统抖振,但在持续运行时抵抗外界负载扰动的性能较差。陈珂等^[12]为解决滑模观测器(sliding mode observer, SMO)的角度观测偏差设计了一种改进的分数阶SMO,并使用双曲正切函数代替符号函数,有效提高转子位置及转速估计的准确性,对负载波动也有较强的鲁棒性,而转矩的变化带来了更大的位置估计误差,造成反馈电流出现明显的畸变。因此,在综合性能的提升方面还需深入研究。

本文设计了一种新颖的模糊自适应分数阶趋近律滑模速度控制器(adaptive fractional order reaching law sliding mode speed controller, FAFOSMSC)。先利用分数阶滑模面较整数阶能量传递慢的优势来削弱转速存在的抖振现象,然后采用模糊自适应控制在线调整滑模结构参数,克服因系统运行过程中电机参数摄动带来的转矩脉动大的问题。此外,设计了最优占空比的电流预测(optimum duty cycle with current prediction, ODCCP)来抑制因模糊控制引入带来的三相电流谐波。最后将设计的控制器与传统滑模控制(conventional sliding mode control, CSMC)以及新型趋近律滑模控制器(new reaching law sliding mode controller, NRLSMC)进行仿真对比实验,最终验证了本文设计的控制器在抑制系统抖振、转矩脉动等综合控制性能的优势。

1 模糊分数阶滑模控制

1.1 PMSM分数阶数学模型

为了便于分析,这里使用标贴式PMSM作为被控对象,并且忽略铁心饱和、涡流和磁滞损耗^[13]。分数阶微积分是一种数学工具,用于处理非整数阶的导数和积分。它能够更灵活地描述系统的动态特性。常用的分数阶导数定义有Riemann-Liouville和Caputo定义^[14]。本文使用后者的定义如下:

$${}_0^C D_t^\alpha f(t) = \frac{\int_0^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} \frac{d^n f(\tau)}{d\tau^n} d\tau}{\Gamma(n-\alpha)} \quad (1)$$

式中: ${}_0^C D_t^\alpha$ 为分数阶微分算子, t 为自变量, α 为分数阶阶次($\alpha > 0$ 表示分数阶微分, $\alpha = 0$ 表示整数阶, $\alpha < 0$ 表示分数阶积分), $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数, n 为使得 $n-1 < \alpha < n$ 最小的整数。根据分数阶理论,在同步旋转坐标系下的

电流以及转速分数阶方程可以表示为:

$$\begin{cases} {}_0^C D_t^q i_d = \frac{1}{L_d} (-R_s i_d + L_q i_q \omega + u_d) \\ {}_0^C D_t^q i_q = \frac{1}{L_q} (-R_s i_q + L_d i_d \omega - \psi_f \omega + u_q) \\ {}_0^C D_t^q \omega = \frac{1}{J} (1.5 n_p \psi_f i_q - T_L) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $q > 0$, u_{dq} 、 i_{dq} 分别表示 $d-q$ 轴电压和电流分量; L_{dq} 表示定子电感分量; R_s 为定子电阻; ω 表示转子电角速度; ψ_f 为永磁体磁链; J 为转动惯量; T_L 表示负载转矩; n_p 表示电机极对数。

1.2 分数阶滑模速度控制器设计

分数阶滑模速度控制(fractional order sliding mode speed control, FOSMSC)通过在滑模面中引入分数阶积分,从而利用分数阶微积分的灵活性来提高控制系统的性能。这里采用连续sigmoid函数代替文献^[15]中新型幂次趋近律滑模控制器的切换函数sgn,提出一种分数阶幂次趋近律,其形式如下:

$$\begin{cases} {}_0^C D_t^\delta s = -(c_1 e_1^2 |s|^{\frac{1}{\alpha}} + c_2 |e_1|^\lambda |s|^{\frac{1}{\beta}}) \text{sigmoid}(s) \\ \text{sigmoid}(s) = \frac{2}{1+e^{-\delta s}} - 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: c_1 、 c_2 、 α 、 β 、 λ 以及 δ 为待确定参数, e_1 为系统的状态变量。根据式(2)定义系统的状态变量如下:

$$\begin{cases} e_1 = \omega^* - \omega \\ e_2 = {}_0^C D_t^\eta e_1 = -{}_0^C D_t^\eta \omega \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω^* 和 ω 分别代表期望转速和实际转速,对式(4)求分数阶导数得:

$$\begin{cases} {}_0^C D_t^\eta e_1 = \frac{1}{J} (T_L - 1.5 n_p \psi_f i_q) \\ {}_0^C D_t^\eta e_2 = -1.5 n_p \psi_f {}_0^C D_t^\eta i_q \end{cases} \quad (5)$$

设计的滑模面如下:

$$s = c e_1 + e_2 \quad (6)$$

式中: c ($c > 0$) 表示滑模面增益,对上式求分数阶导数并整理得到:

$${}_0^C D_t^\eta s = c e_2 - 1.5 n_p \psi_f i_q \quad (7)$$

结合式(3)和(7),令 $H = 1/1.5 n_p \psi_f$, 得到本文的分数阶幂次趋近律滑模速度控制器为:

$$i_q^* = H {}_0^C D_t^{-\eta} (c e_2 + c_1 e_1^2 |s|^{\frac{1}{\alpha}} + c_2 |e_1|^\lambda |s|^{\frac{1}{\beta}}) \text{sigmoid}(s) \quad (8)$$

为了证明提出的滑模控制器的有效性,这里需要对其进行稳定性分析,选取Lyapunov函数如下:

$$L = \frac{1}{2} s^2 \quad (9)$$

根据Lyapunov稳定判据,若要保证所设计的滑模面能够满足控制器稳定的要求,则需满足滑模可达条件 ${}_0^C D_t L =$

${}^c_0 D_t^r s s \leq 0 (r > 0)$, 对式(9)求导并将式(3)代入有:

$${}^c_0 D_t L = {}^c_0 D_t s s = -s(c_1 e_1^2 |s|^{\frac{1}{\alpha}} + c_2 |e_1|^{\lambda} |s|^{\frac{1}{\beta}}) \text{sigmoid}(s) \quad (10)$$

式中: s 与 $\text{sigmoid}(s)$ 同号, 现在只需要参数设计满足 $c_1 \geq 0$ 且 $c_2 \geq 0$ 的约束条件, 该趋近律就能满足可达条件, 即使得 ${}^c_0 D_t L \leq 0$ 成立。此时控制系统是趋于稳定的。

1.3 DOE 设计

在实际控制中, 多个待确定参数因子影响了最终的性能指标, 所以需要涉及性能指标的多因子进行考察, 降低控制器的设计难度。多因子实验问题远比单因子实验问题复杂得多, 为了减少实验次数, 本实验将逐个确定每个待确定参数因子的水平, 并进行反复实验, 找出最好的水平组合。

本实验设计选定滑模控制律中 4 个影响系统输出特性的待确定参数 $\alpha, \beta, \lambda, \delta$ (式(10)中) 作为因子, 其中 $\alpha = [2, 18], \beta = [1, 1.4], \lambda = [0.5, 2.5], \delta = [1, 5]$, 分别为这些影响因子取 A、B、C、D、E 五个等差水平。使用 MATLAB 仿真平台对 PMSM 滑模控制系统进行搭建模型并仿真, 以电流的 THD 值为评价指标来确定因子的水平。对最终的数据处理如图 1 所示。

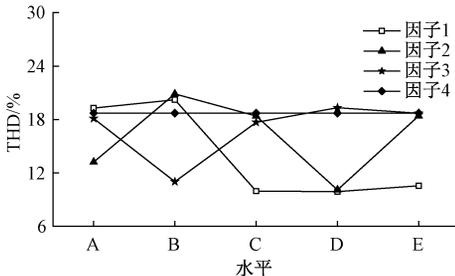


图 1 各因子水平下的 THD

Fig. 1 THD at the levels of each factor

在 4 个影响因子综合影响下, 系统三相电压的 THD 值最小时因子 $\alpha, \beta, \lambda, \delta$ 的取值水平分别为: C、D、B、任意水平。同时可以看出, 因子 δ 对谐波的产生没有影响, 属于不显著因子。最终通过仿真确定各因子在其最佳水平附近具体的取值分别为 $\alpha = 10, \beta = 1.25, \lambda = 1.6, \delta = 5$, CSMC 和 FOSMSC 的 THD 值分别如图 2(a)、(b) 所示。

1.4 FAFOSMS 控制策略设计

对于系统运行过程中电机标称参数变化带来的干扰, 固定的滑模控制器结构参数无法满足性能要求, 为了提高系统的鲁棒性^[16], 减小转矩脉动, 使用模糊控制对影响控制器性能的主要影响参数进行在线调整, 这些自适应参数为 c, c_1, c_2 。

现以转速误差 e 和误差的变化率 ec 作为控制器的输入, 其模糊论域均为 $[-3, 3]$, 参数 c, c_1, c_2 作为模糊控制器的输入, 其中 c 的模糊论域为 $[-6, 6]$, c_1, c_2 的模糊论域均为 $[-0.06, 0.06]$ 。在各自的论域上定义 7 个模糊子集, 分别为 $[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB]$, 并且均选择三角形

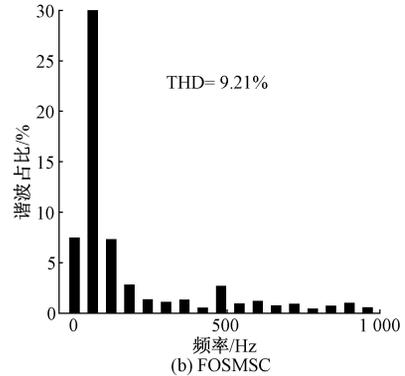
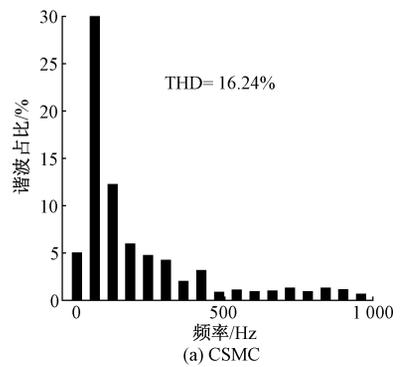


图 2 不同控制策略的 THD

Fig. 2 THD for different control strategies

隶属度函数。可以得到以下模糊规则:

规则 x : 如果 e 是 A_i 且 ec 是 B_j , 则 c 是 C_{ij} 和 c_1 是 D_{ij} 和 c_2 是 E_{ij} (其中: $x = 1, 2, \dots, 49, i, j = 1, 2, \dots, 7$)。

为使用模糊子集表征的隶属度函数。使用 Mamdani 方法用作模糊推理算法。重心法用于对输出变量进行去模糊化。图 3 和 4 显示了输入变量 e 和输出变量 c_1 的隶属度

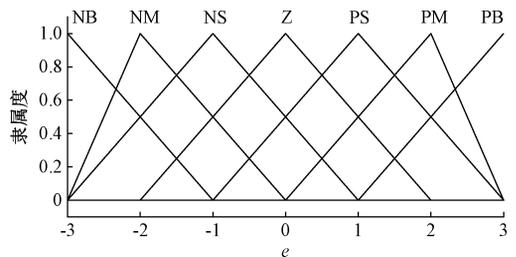


图 3 e 的隶属度函数

Fig. 3 The affiliation function of e

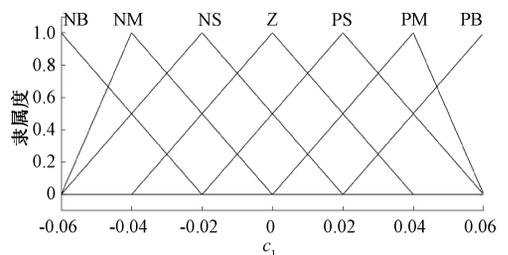


图 4 c_1 的隶属度函数

Fig. 4 Affiliation function for c_1

函数,其他输入输出与之一致。

通过仿真分析,得出表1中本文建立的模糊规则。

表1 模糊规则表
Table 1 Table of fuzzy rules

$c/c_1/c_2$	e							
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/Z	PM/NM/Z	PS/NM/Z	PS/Z/PB	Z/Z/PB	
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/Z	Z/Z/PS	Z/Z/PM	
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	Z/Z/Z	NS/PS/PS	NM/PS/PM	
ec	Z	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/Z	NNM/PS/PS	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z	NM/PM/PS	NM/PM/PS	
PM	Z/Z/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/Z	NM/PB/PS	NB/PB/PS	
PB	Z/Z/PS	NS/Z/Z	NS/PS/NM	NM/PM/Z	NM/PB/Z	NB/PB/PB	NB/PB/PB	

2 ODCCP 控制

为了降低因模糊控制引入带来的电流谐波,本文引入了最优占空比电流预测控制方法来抑制谐波,该方法通过 q 轴的电流无差拍计算方式确定占空比。将式(2)中的电流方程使用一阶欧拉法展开得到电流无差拍的计算公式^[17]:

$$\begin{cases} i_d^p(k+1) - i_d(k) = \frac{T_s}{L_d}(-R_s i_d(k) + L_q i_q(k)\omega(k) + u_d(k)) \\ i_q^p(k+1) - i_q(k) = \frac{T_s}{L_q}(-R_s i_q(k) + L_d i_d(k)\omega(k) - \psi_f \omega(k) + u_q(k)) \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_s 为采样周期,通过在一个采样周期中分配最优电压矢量和零电压矢量的作用时间,使得 i_q 能够在下一个采样周期到来时更接近期望值 i_q^* ,从而降低电流的波动,一定程度上抑制了电流谐波。因此可以得到电流的最优占空比预测输出的表达式为:

$$i_q^p(k+1) = i_q(k) + s_{op} D_c T_s + s_0 (T_s - D_c T_s) \quad (12)$$

式中: $i_q(k)$ 为当前时刻的电流测量值, s_{op} 为最优电压矢量作用时 i_q 的变化率, s_0 为零电压矢量作用时 i_q 的变化率, D_c 为占空比。结合式(2)、(11)和(12)可以将 s_0 和 s_{op} 算出:

$$s_0 = \frac{di_q}{dt} \Big|_{u_q} = -\frac{1}{L} (R i_q + L \omega_e i_d + \psi_f \omega_e) \quad (13)$$

$$s_{op} = \frac{di_d}{dt} \Big|_{u_q = u_{qm}} = s_0 + \frac{u_{qm}}{L} \quad (14)$$

式中: u_{qm} 为最优电压矢量在 q 轴的分量。结合式(11)~(14)可以得到最优电压矢量的占空比为:

$$J = |i_d^* - i_d^p(k+1)|^2 + |i_q - i_q^p(k+1)|^2 \quad (15)$$

在实际的控制过程中,通过计算6个有效电压矢量分别作用时的代价,选择其中使得代价函数取得最小值的电压矢量作为最优电压矢量。最终得到如图5所示的控制系统框图。

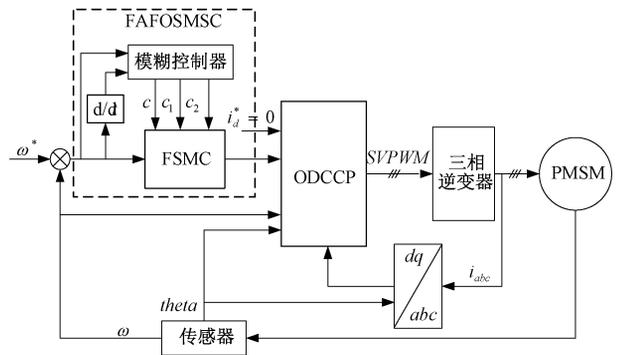


图5 控制系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of control system structure

3 仿真实验分析

为了验证本文提出转速控制器的可行性,在MATLAB/SIMULINK中搭建相应的模型进行仿真实验,采用 $i_d^* = 0$ 的矢量控制。表2给出了仿真过程中的电机标称参数。

表2 电机仿真参数

Table 2 Motor simulation parameters

参数	数值
直流母线电压 U_{DC}/V	311
定子电阻 R/Ω	2.875
d - q 轴电感分量 L_s/mH	8.5
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.003
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.175
电机极对数	4

根据给出的电机标称参数,对比CSMC和NRLSMC以及本文提出的FAFOSMSC-ODCCP策略的仿真数据,以此来验证本文提出的控制器在减小转速抖振,抑制转矩脉动和电流谐波的综合性能。设置仿真时间为0.2s,给

定电机转速设为 1 000 r/min。图 6 和 7 对比了两种控制策略的转速阶跃跟踪性能,其中为了验证模糊控制的鲁棒特性,在电机速度稳定之后施加 10 N·m 的负载干扰,本文提出的 FAFOSMSC-ODCCP 策略相比于 CSMC 能够更有效的抑制因突加负载而带来的转速降落,从原来的 63 r/min 降低至 44 r/min。

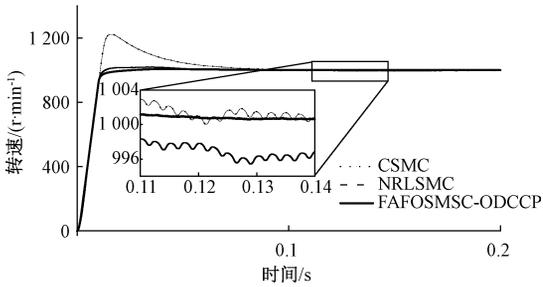


图 6 抖振抑制

Fig. 6 Jitter suppression

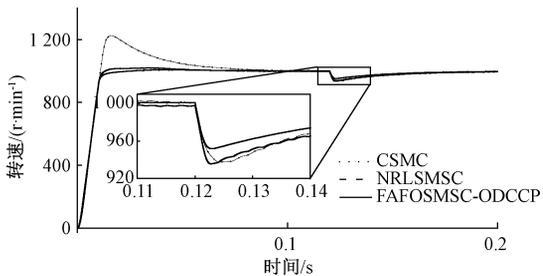
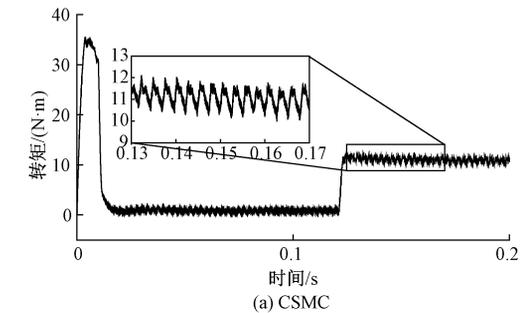


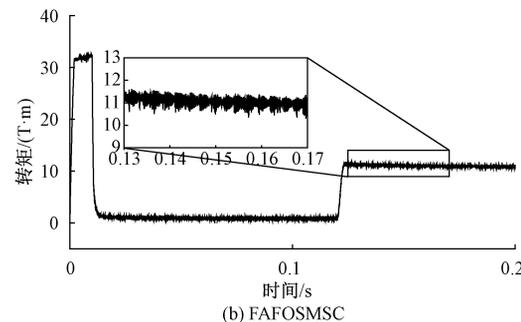
图 7 负载扰动

Fig. 7 Load disturbance

从图 8~10 的转矩仿真波形和三相电流的 THD 分析可以看出,CSMC 策略有着较大的转矩脉动,引入模糊控



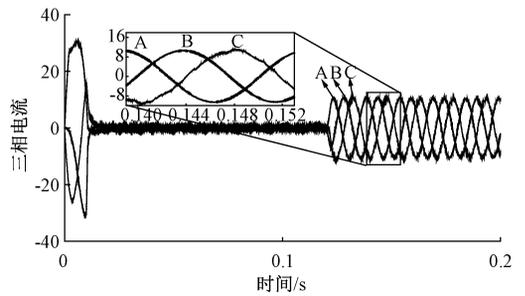
(a) CSMC



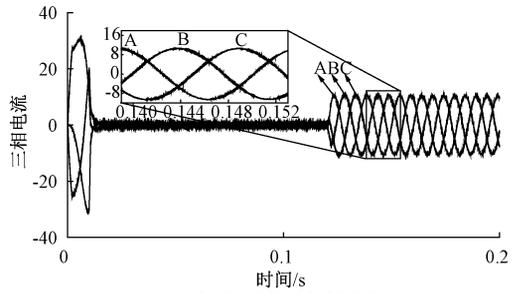
(b) FAFOSMSC-ODCCP

图 8 电磁转矩波形

Fig. 8 Electromagnetic torque waveform



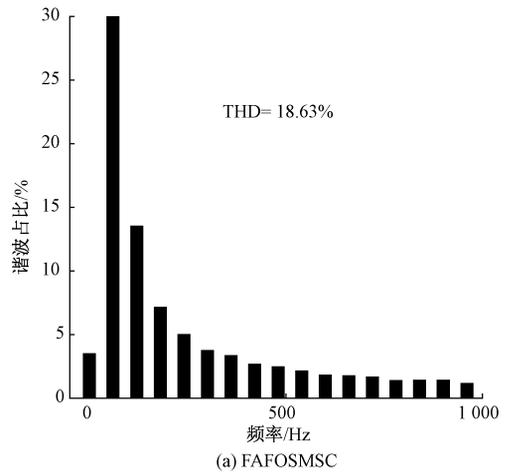
(a) FAFOSMSC



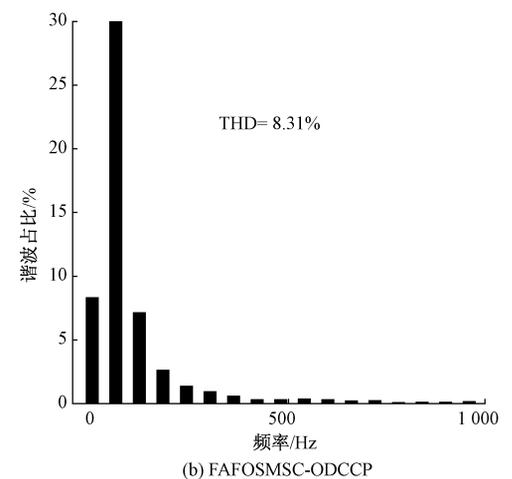
(b) FAFOSMSC-ODCCP

图 9 定子三相电流波形

Fig. 9 Stator three-phase current waveforms



(a) FAFOSMSC



(b) FAFOSMSC-ODCCP

图 10 三相电流 THD

Fig. 10 Three-phase current THD

制后的 FAFOSMSC 策略能够有效降低转矩脉动并提高系统鲁棒性,但同时也带来了一定的电流谐波,由 9.21% 升高至 18.63%。如图 9(a)和(b)所示,C 相的谐波比较明显,为了抑制这部分谐波,在 FAFOSMSC 后级联了最优占空比电流预测控制。通过进一步的仿真实验,从图 10(a)和(b)可以看出,级联后的控制策略有效降低了电流谐波,THD 值由原来的 16.24% 降低至 8.31%。

4 结 论

设计了新颖的自适应分数阶趋近律滑模控制器,通过模糊自适应控制在线调整趋近律参数,有效抑制了转矩脉动和转速抖振。为了减小因模糊控制带来的电流谐波,设计了基于最优占空比电流预测控制的模糊自适应分数阶滑模控制器方案,将设计的控制器代替原来的 PI 串级控制器。通过仿真实验对比了传统滑模控制和新型幂次趋近律滑模控制以及本文设计的控制器,最终结果表明,三相电流谐波相比于传统滑模控制降低了 7.93%,突加负载后的转速降落减小了 31.2%,证明了本文设计的控制器在抑制转矩脉动和减小转速抖振上的优势,具有优异的综合控制性能。

参考文献

- [1] 许馨尹,孙光. 基于自适应模糊 PID 的 PMSM 矢量控制系统研究[J]. 中国高科技, 2019(10): 18-21.
- [2] 李昂,袁佳俊,赵峰,等. 永磁同步电机改进滑模观测器矢量控制[J]. 电子测量技术, 2023, 46(6): 37-43.
- [3] 赵希梅,王超,金鸿雁. 基于 NDO 的永磁同步电动机自适应分数阶滑模控制[J]. 中国机械工程, 2023, 34(9): 1093-1099,1119.
- [4] REN N N, FAN L, ZHANG Z. Sensorless PMSM control with sliding mode observer based on sigmoid function[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(2): 933-939.
- [5] 许元威. 基于模糊滑模观测器的永磁同步电机无位置控制[J]. 科学技术创新, 2023(19): 73-76.
- [6] 赵志华,张明文,许爱华. 参数模糊整定的永磁同步电机滑模控制研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024(6): 1-7.
- [7] 廖磊,刘细平,杨彬. 基于高阶滑模的 PMSM 无传感器控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(3): 129-132.
- [8] 任金霞,何明晏,姚广辉. PMSM 的新型分数阶滑模调速控制系统设计[J]. 制造技术与机床, 2023(8): 108-112.
- [9] 禹聪,康尔良. 永磁同步电机模糊滑模无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 87-94.
- [10] 张懿,韦汉培,魏海峰,等. 永磁同步电机自适应模糊滑模鲁棒无源控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 101-107.
- [11] 杨城健,李白雅,王锦涛,等. 基于分数阶滑模转速控制器的永磁同步电机矢量控制[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 51-59.
- [12] 陈珂,宋保业. 永磁同步电机无传感器矢量控制系统的分数阶滑模观测器设计[J]. 中国科技论文, 2020, 2023(19): 73-76.

- 15(7): 793-798.
CHEN K, SONG B Y. Design of fractional-order sliding-mode observer for permanent magnet synchronous motor sensorless vector control system[J]. China Sciencepaper, 2020, 15(7): 793-798.
- [13] 兰志勇, 李延昊, 罗杰, 等. 一种自适应扩展卡尔曼滤波的永磁同步电机无位置传感器矢量控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(3): 141-148.
LAN ZH Y, LI Y H, LUO J, et al. Sensorless vector control of permanent magnet synchronous motor based on adaptive extended Kalman filter [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(3): 141-148.
- [14] MANI P, RAJAN R, SHANMUGAM L, et al. Adaptive fractional fuzzy integral sliding mode control for PMSM model[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(8): 1674-1686.
- [15] 谭舒丹, 马家庆. PMSM 的新型趋近律滑模调速控制器设计[J]. 制造技术与机床, 2023(1): 97-101.
TAN SH D, MA J Q. A novel reaching law sliding mode speed controller design for PMSM [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023(1): 97-101.
- [16] 魏东辉, 汪霭廷, 计京鸿, 等. 永磁直线同步电机自适应模糊分数阶滑模精密运动控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2295-2303.
WEI D H, WANG AI T, JI J H, et al. Adaptive fuzzy fractional-order sliding mode precise motion control of permanent magnet linear synchronous motor[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2295-2303.
- [17] 张利国, 厉风, 李宇剑, 等. 基于电池功率的永磁同步电机预测电流控制[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1): 126-131.
ZHANG L G, LI F, LI Y J, et al. Predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on battery power[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 126-131.

作者简介

席隆兴, 硕士研究生, 主要研究方向为交流电机控制。

E-mail: 2803338117@qq.com

敖邦乾(通信作者), 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能控制系统。

E-mail: aobangqian@zync.edu.cn