

三相 PMSM 群智能优化滑模稳速控制研究

朱跃莉¹, 刘夜雨¹, 朱跃玲², 唐君山¹, 马家庆^{1*}

(1. 贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州大学 大数据工程学院, 贵州 贵阳 550025)

Swarm Intelligence-Optimized Sliding Mode Speed Control for Three-Phase PMSM

ZHU Yueli¹, LIU Yeyu¹, ZHU Yueling², TANG Junshan¹, MA Jiaqing^{1*}

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

2. College of Big Data Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] Permanent magnet synchronous motor (PMSM) is widely adopted in industrial applications due to their high power density, superior efficiency, and excellent dynamic performance. However, conventional control strategies, often exhibit degraded performance when confronted with system parameter variations and external disturbances. To address these challenges, this paper proposes a novel sliding mode variable structure control (SMVSC) strategy optimized by the marine predators algorithm (MPA), aiming to enhance system robustness and steady-state accuracy. [Methods] Within the vector control framework of PMSM, the conventional proportional integral controller in the speed outer loop was replaced with SMVSC controller. The inherent robustness of SMVSC was leveraged to mitigate the adverse effects of parameter uncertainties and external disturbances. To further refine the SMVSC design, a double-power reaching law was introduced to optimize the approaching process. During the initial phase of converging to the sliding mode surface, a high gain was employed to accelerate convergence speed. Subsequently, the gain was dynamically reduced in the later phase to suppress chattering phenomena, thereby balancing rapid dynamic response with control smoothness. Additionally, the MPA was utilized to optimize critical parameters of the SMVSC, including reaching rate coefficients and sliding surface parameters, avoided local optima and ensures the adaptability of controller

parameters under diverse operating conditions. Finally, the simulation model of PMSM speed regulation system was built by Matlab/Simulink, and experiments were carried out on the physical platform, verified the effectiveness of the proposed method. [Results] Simulation and experimental results showed that the MPA-optimized double-power reaching law SMVSC significantly improves PMSM speed regulation performance, with enhanced stability, reduced overshoot, and shorter settling time. Compared to traditional methods, the optimized controller exhibits superior dynamic response and robustness under varying conditions. [Conclusion] The proposed MPA-optimized SMVSC strategy effectively enhances PMSM control performance under parameter uncertainties and external disturbances, offering a new solution for high-performance of PMSM.

Key words: permanent magnet synchronous motor; sliding mode variable structure control; marine predators algorithm; double power reaching rate

摘 要: 【目的】永磁同步电机(PMSM)因其高功率密度、高效率等优势在工业中广泛应用。然而传统控制方法在面对系统参数改变和外部扰动时,存在控制性能下降的问题。本文提出一种基于海洋捕食者算法(MPA)优化的滑模变结构控制(SMVSC)策略,旨在增强系统的鲁棒性和稳态精度。【方法】首先,在PMSM的矢量控制框架中,将转速外环的传统比例积分控制器替换为SMVSC控制器,利用SMVSC的强鲁棒性抑制系统参数变化和外部扰动的影响。随后,采用双幂次趋近律进一步改进SMVSC,在趋近滑模面初期采用高增益加速收敛,后期切换为低增益抑制抖振,兼顾动态响应速度与控制平滑性。同时引入MPA对SMVSC趋近律系数、滑模面参数进行优化,避免局部最优,确保控制器参数适用于不同工况需求。

基金项目: 国家自然科学基金(62163006,52267003); 贵州省科技厅支撑计划项目(QKHZ[2023]G179)

National Nature Science Foundation of China (62163006, 52267003); Guizhou Science and Technology Department Support Program Project(QKHZ[2023]G179)

最后,通过 Matlab/Simulink 搭建 PMSM 调速系统仿真模型,同时在实验平台上开展试验,验证所提方法的有效性。【结果】仿真和试验结果表明,经过 MPA 优化的双幂次趋近律 SMVSC 提升了 PMSM 的调速性能,使系统的稳定性及鲁棒性得到有效改善,超调量与调节时间缩短。与传统控制方法相比,优化后的控制器在不同的工况下表现出良好的动态响应能力,验证了所提方法的有效性。【结论】本文提出的基于 MPA 优化的双幂次趋近律 SMVSC 策略,能够有效提升 PMSM 在参数变化和外部负载扰动下的控制性能,为 PMSM 的高性能控制提供了新的解决方案。

关键词: 永磁同步电机;滑模控制;海洋捕食者算法;双幂次趋近律

0 引言

工业领域对高性能电机驱动系统的需求日益增长,永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Machine, PMSM)因具有结构简单、运行可靠、质量轻及效率高等优点,被广泛应用于风电行业、新能源汽车行业以及机械设备行业^[1-3]。PMSM 传统的控制方法如比例积分(Proportional Integral, PI)控制因其简单易实现、可减小稳态误差而得到广泛应用^[4-5]。但由于 PI 控制易受电机内部参数变化影响、对外部扰动敏感,在恶劣的工业环境中无法提供最佳的动态性能,因此在高性能或高精度应用场景中,需采用更先进的控制策略以提升系统鲁棒性^[6-7]。

随着模糊控制^[8-9]、自抗扰控制^[10-12]及神经网络控制^[13-14]等现代控制理论的不断演进, PMSM 展现出卓越的性能^[15-16]。然而,上述控制方法因复杂特性与硬件实施上的技术挑战,制约其在 PMSM 中的应用。滑模变结构控制(Sliding Mode Variable Structure Control, SMVSC)因具有响应速度快、对外部干扰与内部参数变化具有较强的鲁棒性、无需系统在线识别且物理实现简单等优点,在电机控制中备受关注^[17-18]。文献[19]通过在桥式起重机系统的防摆定位控制中引入新型 SMVSC 策略来减少系统抖振。文献[20]通过引入高阶 SMVSC 策略来控制变速风力涡轮机系统两个区域的稳定性。

此外,智能算法^[21-23]也被广泛应用于电机控制中。海洋捕食者算法(Marine Predators

Algorithm, MPA)^[24-25]作为一种新兴的元启发式优化算法,其原理简单、参数设置少、容易实现,在低维参数优化其求解精度和速度方面明显优于粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法、引力搜索算法和布谷鸟搜索算法^[25]。本文通过参数优化 MPA,旨在通过训练找出电机实际转速与给定转速之间误差最小的速度控制器参数。

在 PMSM 的矢量控制框架中,将转速外环的传统 PI 控制器替换为 SMVSC 控制器,利用 SMVSC 的强鲁棒性抑制系统参数变化和外部扰动的影响^[26]。随后,采用双幂次趋近律进一步改进 SMVSC,同时引入 MPA 对 SMVSC 趋近律系数、滑模面参数进行优化,避免局部最优,确保控制器参数适用于不同工况需求。最后,通过 Matlab/Simulink 搭建 PMSM 调速系统仿真模型,验证了所提 MPA 优化双幂次趋近律 SMVSC 的有效性。

1 三相 PMSM 数学模型

PMSM 的基本结构示意图如图 1 所示,其中,三相绕组以 UVW、RST 作为标识区分。

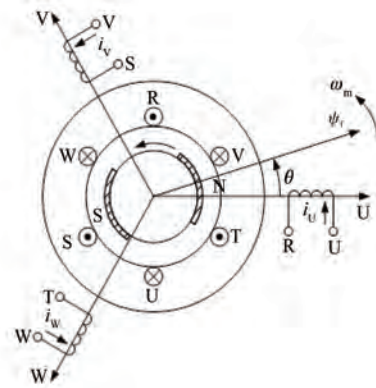


图 1 三相永磁同步电机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of three-phase PMSM

图 1 中, i_u 、 i_v 、 i_w 分别为定子 U 相、V 相、W 相电流; θ 为电角度; ψ_r 为永磁体磁链; ω_m 为转子旋转角速度。

由于 PMSM 具有高耦合性,需通过坐标解耦方法实现有效控制。三种坐标系中的向量关系示意图如图 2 所示。将三相静止坐标系下的数学模型利用 Clark 变换为两相旋转坐标系,如式(1)所示:

$$[f_\alpha \ f_\beta \ f_0]^T = \mathbf{T}_{3s/2s} [f_u \ f_v \ f_w] \quad (1)$$

式中: f 为通用物理量; f_u, f_v, f_w 为该物理量在 uvw 坐标系下的分量; f_α, f_β 为该物理量在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量; f_0 为零序分量; $T_{3s/2s}$ 为 Clark 变换矩阵, 其表达式为

$$T_{3s/2s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用 Park 变换将 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系参数转换到 $d-q$ 两相旋转坐标系, 在此基础上建立了时不变参数模型, 实现 PMSM 电磁参数的解耦。Park 转换的表达式为

$$\begin{bmatrix} f_d & f_q \end{bmatrix}^T = T_{2s/2r} \begin{bmatrix} f_\alpha & f_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

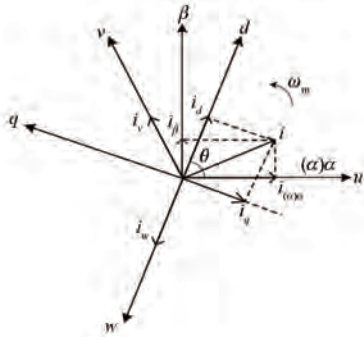


图 2 三种坐标体系中的向量关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vector relationships in three coordinate systems

理想条件下, PMSM 在 $d-q$ 旋转坐标系中的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \dot{i}_d - p\omega_m \psi_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \dot{i}_q + p\omega_m \psi_d \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_d, u_q, i_d, i_q, \psi_d, \psi_q$ 和 L_d, L_q 分别为 $d-q$ 轴上的电压、电流、等效磁链分量和电感; R_s 为定子绕组电阻; p 为电机极对数。

PMSM 的磁力链关系式与动力学方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \\ J \dot{\omega}_m = \frac{3}{2} p \psi_q i_q - T_L \end{cases} \quad (6)$$

式中: J 为转动惯量; T_L 为负载转矩。

通过不同的控制策略来调控 $d-q$ 轴上的电流。传统的矢量控制策略涵盖了 $i_d=0$ 控制、最大转矩电流控制以及恒转矩控制等。本文选取表贴

式三相 PMSM 作为研究对象, 并采用了 $i_d=0$ 的转子磁场定向控制方法, 则式(4)~式(6)可转换为式(7):

$$\begin{cases} \dot{i}_q = \frac{1}{L_q} [-R_s i_q - p\omega_m (\psi_f + L_d i_q) + u_q] \\ \dot{\omega}_m = -\frac{T_L}{J} + \frac{3}{2} \frac{p\psi_f i_q}{J} \end{cases} \quad (7)$$

2 滑模速度控制器设计

2.1 SMVSC

与线性控制器相比, 变结构系统的内在运动更为复杂, 会影响系统达到稳态时的平衡位置, 导致无法解出系统平衡状态的精确解。采用 SMVSC 技术, 能够有效解决该问题。假设非线性控制体系表达式为

$$\frac{dx}{dt} = f(n, r, t) \quad (8)$$

式中: n 为状态变量; r 为控制输入。

切换函数向量 $s(n)$ 明确, 则所用变结构控制策略为

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x), & s_i(x) > 0 \\ u_i^-(x), & s_i(x) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $u_i^-(x) \neq u_i^+(x)$ 。

2.2 滑模速度环控制器的设计

SMVSC 技术的核心特征为其控制律与控制系统架构在切换面处的非连续性。稳定性条件本身并不直接揭示状态轨迹逼近滑模面的具体路径。为了实现状态向量在滑模面上的迅速切换并收敛至原点的精确调控, 引入了趋近律^[27-28]。幂次趋近律与双幂次趋近律的表达式分别如式(10)、式(11)所示:

$$\dot{s} = -k_1 |s|^a \text{sgn}(s) \quad (10)$$

$$\dot{s} = -k_1 |s|^a \text{sgn}(s) - k_2 |s|^b \text{sgn}(s) \quad (11)$$

式中: $k_1 > 0; k_2 > 0; 0 < a < 1; 0 < b < 1$ 。

本文以双幂次趋近律为理论基础, 引入转速误差作为状态变量, 提出一种新的趋近律, 如式(12)所示:

$$\dot{s} = (-k_1 |X|^{a_1} |s|^a - k_2 |X|^{b_1} |s|^b) \text{sgn}(s) \quad (12)$$

式中: X 为状态变量; a_1, b_1 均大于 0。

通过对式(12)描述的趋近行为进行分析得出,

在 SMVSC 框架下,系统状态轨迹朝滑模面的收敛速率与状态变量存在着紧密的联系。当系统状态显著偏离滑模面时,由于 $|s|$ 和 X 的取值较大,系统状态轨迹将以 $(-k_1 |X|^{a_1} |s|^a - k_2 |X|^{b_1} |s|^b) \text{sgn}(s)$ 的速率加速向滑模面靠近。通过将状态变量 X 引入幂函数中,所提趋近律相较于传统的双幂次趋近律,提升了系统向滑模面的趋近速度。

PMSM 系统的状态参数为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{pre}} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 - \dot{\omega}_m \end{cases} \quad (13)$$

式中: ω_{pre} 为预设转速; ω_m 为实测转速。

联立式(7)、式(8)及式(13)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(T_L - \frac{3}{2} p \psi_f i_q \right) \\ \dot{x}_2 = -\dot{\omega}_m = -\frac{3}{2} p \psi_f i_q \end{cases} \quad (14)$$

假设 $A = \frac{3}{2} p \psi_f$, $u = i_q$, 据此,系统的空间表征表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u \quad (15)$$

构建一个滑模面: $s = cx_1 + x_2$ 。其中, c 为滑模面的参数集合。通过对该滑模进行微分操作,并将式(16)代入,得到:

$$\dot{s} = cx_2 - Au \quad (16)$$

基于新的趋近律,联立式(12)和式(16),得出优化后的滑模控制策略为

$$u(t) = \frac{1}{A} \int_0^t [cx_2 + k_1 |X|^{a_1} |s|^a \text{sgn}(s) + k_2 |X|^{b_1} |s|^b \text{sgn}(s)] dt \quad (17)$$

2.3 新型趋近律稳定性分析

为了保证滑模速度控制器的稳定性能,构建 Lyapunov 函数为 $V = s^2/2$ 。依据 Lyapunov 稳定性原理,当条件符合式(18)时,具备稳定性。

$$\dot{V} = \dot{s}s \leq 0 \quad (18)$$

由式(12)、式(18)可得:

$$\dot{V} = \dot{s}s = s(-k_1 |X|^{a_1} |s|^a - |k_2 X^{b_1} s^b|) \text{sgn}(s) \quad (19)$$

式中: k_1, k_2 取值均大于 0,由此可推导出 $\dot{V} \leq 0$,进而验证了所设计的控制器符合 Lyapunov 稳定性判据的要求。

2.4 基于 MPA 的速度控制器参数优化分析

优化速度控制器参数时,同时采用了 MPA、PSO 算法、灰狼优化 (Grey Wolf Optimizer, GWO) 算法以及麻雀搜索算法 (Sparrow Search Algorithm, SSA) 四种群智能算法进行对比分析。仿真结果显示,MPA 在解精度和收敛速度方面展现出优势。

MPA^[29] 是一种模拟海洋生物的捕食行为和捕食策略的智能优化算法,其寻找最优解主要通过初始化、优化以及鱼群聚集装置效应 (Fish Aggregating Devices effect, FADs) 三个阶段来完成。

算法初始化阶段,捕食者和猎物矩阵可表示为

$$X_i = X_{\min} + \text{rand} \cdot (X_{\max} - X_{\min}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

式中: X_i 为第 i 个猎物的位置; $X_{\max}, X_{\min}$ 为求解问题中变量解空间的上界、下界; rand 为 $(0, 1)$ 之间的随机数。

定义两个矩阵, E_p 矩阵表示捕食者, P 矩阵则表示猎物。

$$E_p = \begin{bmatrix} X'_{1,1} & X'_{1,2} & \cdots & X'_{1,d} \\ X'_{2,1} & X'_{2,2} & \cdots & X'_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X'_{n,1} & X'_{n,2} & \cdots & X'_{n,d} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$P = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,d} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & X_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & \cdots & X_{n,d} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: n 为种群数量; d 为问题维度; X' 为捕食者向量。

MPA 的优化过程分为三个阶段:第一阶段 $\text{Iter} < \frac{1}{3} \text{Max_Iter}$, 即模拟高速比阶段,猎物的速度比捕食者更快,捕食者放弃猎捕不移动,猎物执行布朗运动,通过猎物群体的分散式随机探索,扩大搜索范围,避免算法过早陷入局部最优。该阶段的数学模型为

$$P_i = P_i + w \cdot \text{rand} \otimes [R_B \otimes (E_{pi} - R_B \otimes P)] \quad (23)$$

式中: R_B 为布朗运动; $w = 0.5$ 为一个常量; $\otimes$ 为矩阵之间的点乘。

第二阶段: $\frac{1}{3} \text{Max_Iter} < \text{Iter} < \frac{2}{3} \text{Max_Iter}$, 即模拟单位速度比阶段, 在此期间捕食者和猎物速度基本相同, 该阶段的数学模型为

$$P = \begin{cases} P_i + w \cdot \text{rand} \otimes \\ [R_L \otimes (E_p - R_L \otimes P)], i \leq \frac{1}{2}n \\ E_p = w \cdot CF \otimes \\ [R_B \otimes (R_B \otimes E_p - P)], \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

式中: R_L 为模拟莱维运动的随机数向量; $CF = \left(1 - \frac{\text{Iter}}{\text{Max_Iter}}\right)^{\left(\frac{2\text{Iter}}{\text{Max_Iter}}\right)}$ 为自适应参数。

第三阶段: $\text{Iter} > \frac{2}{3} \text{Max_Iter}$, 即模拟低速比阶段, 在此期间猎物移动速度比捕食者慢, 该阶段的数学模型为

$$P_i = E_{pi} + w \cdot CF \otimes [R_L \otimes (R_L \otimes E_{pi} - P_i)] \quad (25)$$

涡流形成或 FADs 生成随机扰动, 可以避免过早收敛并探索区域的局部最优。FADs 效应通过改变 P 来实现的, 其数学表达式为

$$P_i = \begin{cases} P_i + CF[X_{\min} + \text{rand} \otimes (X_{\max} - X_{\min})] \otimes U, r \leq C \\ P_i + [C(1 - r) + r](P_{r1} - P_{r2}), r > C \end{cases} \quad (26)$$

式中: $C = 0.2$ 为 FADs 效应发生的概率; U 为 $[0, 1]$ 之间的随机数向量通过阈值处理得到的二进制向量; r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, 当 r 大于 0.2 时 $U = 1$, 当 r 小于 0.2 时 $U = 0$; r_1, r_2 为 E_p 矩阵的随即索引。

3 仿真分析

该系统的架构图如图 3 所示, 在 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型, 对调速系统的控制策略进行仿真分析。PMSM 模块的各项具体参数如表 1 所示。在本调速系统中, 转速外环使用基于 MPA 优化的双幂次趋近律 SMVSC 控制器, 替代了传统的 PI 控制器。在仿真过程中, 采用 $i_d = 0$ 的转子磁场定向控制方法。

仿真试验的总时长设定为 0.4 s。模拟开始

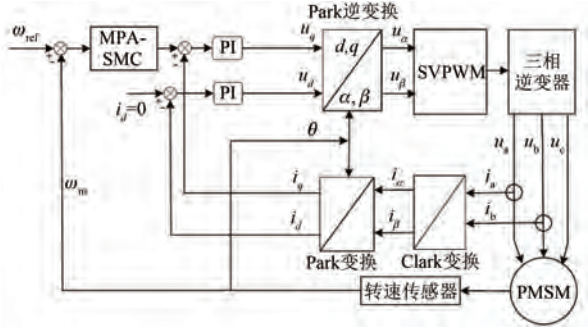


图 3 PMSM 的 SMVSC 调速仿真结构图

Fig. 3 Simulation structure of SMVSC regulation of PMSM

时, 电机的转速为 0, 目标转速设定为 1 000 r/min, 为了深入探究负载变化时对系统动态性能的影响, 0.2 s 时施加一个 10 N·m 的负载转矩。

表 1 PMSM 模块参数

Tab. 1 Module parameters of PMSM

参数名称	参数值
$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.003
L_q/mH	8.2
L_d/mH	8.2
R_s/Ω	2.875
ψ_f/Wb	0.175
p	4

使用 MPA、GWO 算法、PSO 算法和 SSA 四种群智能算法, 同时对双幂次趋近律的 7 个参数 k_1 、 k_2 、 a 、 a_1 、 b 、 b_1 和 c 进行协同优化。设置迭代次数 $\text{Iter} = 120$, 每代的种群数为 11。迭代收敛图仿真结果如图 4 所示。

仿真结果标明, 在收敛速度、参数优化精度和

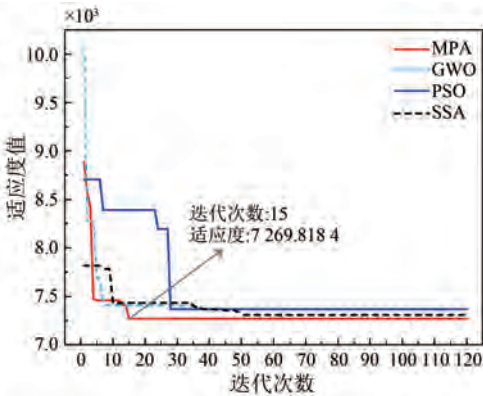


图 4 迭代收敛图

Fig. 4 Iterative convergence diagram

系统响应特性等性能指标上,MPA 算法的综合优化效果强于其他三种群体智能算法。

使用 MPA 进行优化,收敛时 7 个参数分别为: $k_1=399.998\ 3$ 、 $k_2=255.028\ 2$ 、 $a=0.769\ 8$ 、 $a_1=1.452\ 1$ 、 $b=0.772\ 4$ 、 $b_1=0.802\ 0$ 、 $c=60.099\ 4$ 。

PMSM 的转速跟踪效果如图 5 所示。由图 5 可知, PMSM 的响应速度快, 调节时间 $t_s=0.010\ 4\ s$, 超调量 $\sigma=0.35\%$, 系统能快速稳定在给定转速; 在 $0.2\ s$ 受到 $10\ N\cdot m$ 的干扰时, 转速有轻微下降, 但经过 $0.04\ s$ 的调整后又恢复到给定转速并稳定运行。

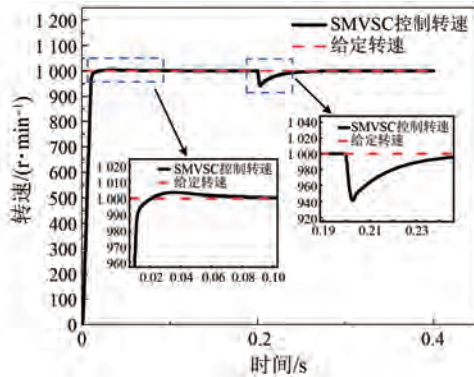


图 5 PMSM 转速跟踪效果

Fig. 5 PMSM speed tracking effect

双幂次趋近律 SMVSC 控制策略下 PMSM 启动阶段的三相电流如图 6 所示。

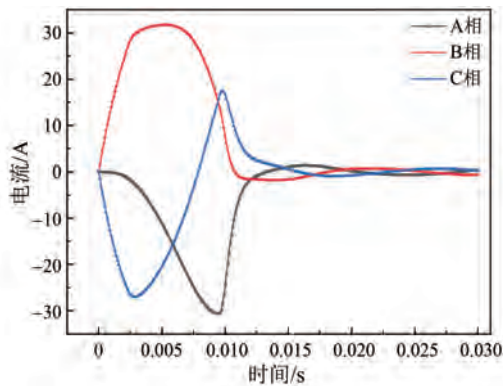


图 6 PMSM 三相起动电流

Fig. 6 PMSM three-phase current comparison

由图 6 可知, 在电机启动初期, A、B、C 三相电流有明显瞬态振荡, 这主要是由于 PMSM 从静止状态开始加速, 系统需要克服机械惯性导致的转速滞后以及定转子磁场耦合的动态过程等。但 $0.02\ s$ 后, 电流迅速达到稳定状态, 表明 MPA 优化的双幂次趋近律 SMVSC 能在 PMSM 的启动阶

段快速平衡电磁转矩需求与系统惯性, 实现电流的高精度跟踪。

PMSM 突加负载时的三相电流如图 7 所示。PMSM 三相电流动态响应波形如图 8 所示。

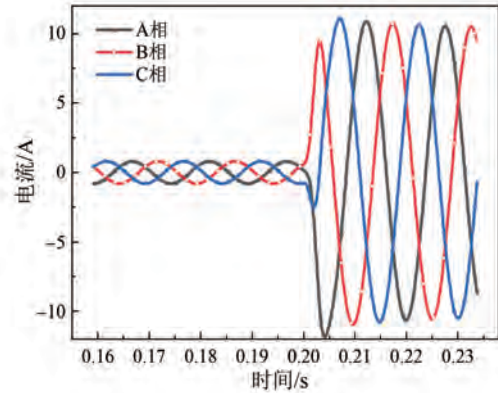


图 7 PMSM 突加负载时的三相电流

Fig. 7 PMSM three-phase current under sudden

由图 7 可知, $0.2\ s$ 时, 突加 $10\ N\cdot m$ 的负载, 此时的三相电流幅值显著增大以满足电磁转矩需求。尽管电流波形在暂态过程中出现小幅振荡, 但 MPA 优化的双幂次趋近律 SMVSC 通过调整 q 轴电流分量, 迅速收敛至新的稳态。SMVSC 的强鲁棒性有效抑制了负载扰动引起的跟踪误差, 其小幅电流脉动被趋近律参数优化所限制, 从而在保证动态响应速度的同时, 维持了电流波形的整体稳定性。

由图 8 可知, 三相电流在负载施加后能够迅速恢复稳定, 表现出优异的抗负载扰动能力。这表明 SMVSC 控制策略下的系统在面对外部低转矩扰动时, 能够调整三相电流以补偿负载扰动引起的转矩缺口, 确保动态过程中电磁转矩的快速跟踪与稳态精度。

4 试验验证

为了进一步验证 MPA 优化的双幂次趋近律 SMVSC 控制策略对 PMSM 稳速运行中的抗扰动能力与动态响应性能, 本文基于图 9 所示的试验平台, 通过实测 PMSM 在稳速状态下磁粉制动器突加负载的三相电流波形, 分析电流的总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 以验证该控制方案的有效性。PMSM 试验参数如表 2 所示。

在电机控制系统的脉冲宽度调制周期中, 通过嵌入式中断服务程序实时执行 MPA 参数优化

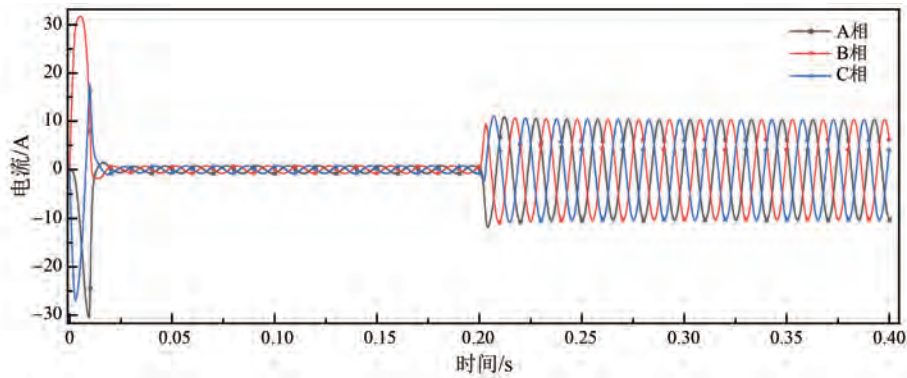


图 8 PMSM 三相电流动态响应波形

Fig. 8 Dynamic response waveforms of three-phase current in PMSM

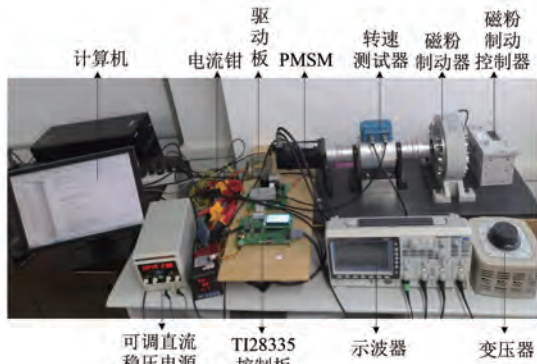


图 9 PMSM 试验平台图

Fig. 9 Experimental platform diagram of PMSM

表 2 PMSM 试验参数

Tab. 2 Experimental parameters of PMSM

参数名称	参数值
额定功率/W	750
额定电压/V	220
额定电流/A	4.2
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 000
额定转矩/($N \cdot m$)	2.4
最大转矩/($N \cdot m$)	7.2
永磁体磁链/Wb	0.175

的 SMVSC 策略,其核心流程如图 10 所示。相较于传统参数整定方法,MPA 优化的 SMVSC 策略通过智能搜索机制实现了滑模增益与切换函数的协同匹配,在保持强鲁棒性的同时有效抑制了高频抖振现象。

PMSM 采样频率 250 kHz,在 1 000 r/min 稳速运行工况下,通过数据采集系统,实时记录了经 MPA 优化的 SMVSC 策略作用下的三相电流动态

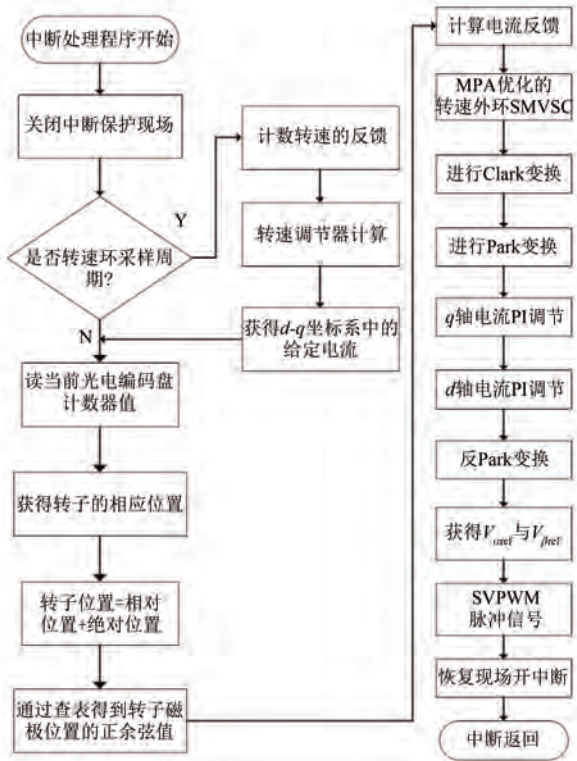


图 10 PWM 中断协同处理流程图

Fig. 10 PWM interrupt co-processing flowchart

波形,如图 11 所示。优化前后三相电流的 THD 如表 3 所示。

表 3 优化前后三相电流 THD

Tab. 3 THD of three-phase current before and after optimization

参数名称	优化前 THD/%	优化后 THD/%
A 相	26.73	19.28
B 相	27.08	22.62
C 相	27.49	18.28

由表 3 可知,优化后的控制策略相比传统 PI

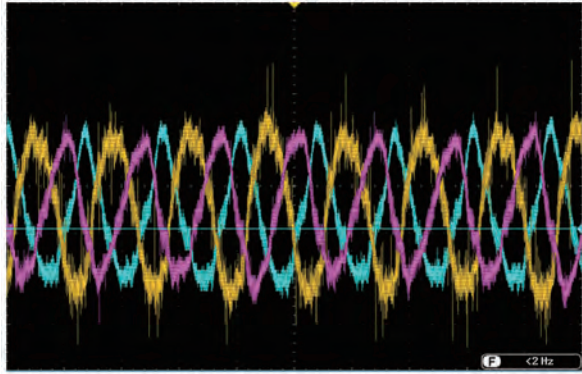


图 11 优化后的三相电流波形图

Fig. 11 Optimized three-phase current waveforms

控制优势明显,三相电流 THD 均呈现降低趋势,证实优化后的控制策略能更高效抑制电流谐波,快速响应负载变化,提升电机运行的平稳性。

5 结语

本文针对 PMSM 在稳速运行过程中因负载突变及参数波动引发的控制性能下降的问题,提出了一种基于 MPA 优化的双幂次趋近律 SMVSC 策略,并通过引入自适应参数整定机制,对滑模面参数及趋近律参数进行协同优化,增强了控制系统的动态响应能力,降低了传统 PI 控制器对高频振荡的敏感性。仿真分析与试验结果表明,MPA 优化的双幂次趋近律的 SMVSC 控制策略在应对电机内部参数波动和外部负载扰动时,展现出更强的鲁棒性和稳定性。本文所提控制策略具有一定的应用价值和发展前景。

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

马家庆、朱跃莉进行了方案设计、内容总结与论文撰写,刘夜雨、朱跃玲进行了试验研究,唐君山参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Ma Jiaqing and Zhu Yueli. The experiment was conducted by Liu

Yeyu and Zhu Yueling. The manuscript was revised by Tang Junshan. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 1-13.
ZHANG G Q, DU J H. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 1-13.
- [3] 郭昕. 基于 LQR 模型的永磁同步电机模型预测控制策略研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2024.
GUO X. Research on predictive control strategy of permanent magnet synchronous motor model based on LQR model [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2024.
- [4] 赵南南, 杨旭, 邹琳, 等. 基于鲸鱼优化算法的风力发电机组变桨模糊控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 80-89.
ZHAO N N, YANG X, ZOU L, et al. Pitch fuzzy control strategy for wind turbine based on whale optimisation algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 80-89.
- [5] CHOI J W, LEE S C. Antiwindup strategy for PI-type speed controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2039-2046.
- [6] 宋建国, 李子豪, 刘小周. 永磁同步电机改进型全阶滑模观测器无传感控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 14-21.
SONG J G, LI Z H, LIU X Z. Improved full order sliding mode observer without sensing control of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 14-21.

- [7] 张立, 张苑晴, 吴宇深, 等. 基于滑模变结构控制的感应电动机调速系统研究[J]. 机电工程技术, 2024, 53(11): 67-70.
ZHANG L, ZHANG Y Q, WU Y S, et al. Research of induction motor speed regulation system based on sliding mode variable structure control [J]. Electromechanical Engineering Technology, 2024, 53 (11): 67-70.
- [8] WANG T L, TAN N L, YU Y J, et al. Global-equivalent sliding mode control method for bridge crane [J]. IEEE Access, 2021, (9): 160372-160382.
- [9] BELTRAN B, AHMED-ALI T, BENBOUZID B M E H. High-order sliding-mode control of variable-speed wind turbines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3314-3321.
- [10] YAN Y, HAI P D, QING L H, et al. Discrete multi-objective switching topology sliding mode control of connected autonomous vehicles with packet loss [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8 (4): 2926-2938.
- [11] MUHAMMAD S R, JIN-W J. A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4747-4758.
- [12] BAI C, YIN Z, LIU J, et al. Integrated sliding mode velocity control of linear permanent magnet synchronous motor with thrust ripple compensation [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2023, 7(1): 100-109.
- [13] 姜嘉祺, 丁学明. 基于电流约束的非串级 PMSM 非奇异快速积分终端滑模控制[J/OL]. 控制工程, 2024-9-23. <https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20240330>.
JIANG J Q, DING X M. Non-cascaded PMSM non-singular fast integral terminal sliding mode control based on current constraints [J/OL]. Control Engineering, 2024-9-23. <https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20240330>.
- [14] 朱玉冰, 姚善化. 基于改进变速度双幂次趋近律的 PMSM 滑模控制[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024-10-5. <https://link.cnki.net/urlid/50.1155.n.20240531.1700.002>.
ZHU Y B, YAO S H. PMSM sliding mode control based on improved variable speed double power convergence law [J/OL]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024-10-5. <https://link.cnki.net/urlid/50.1155.n.20240531.1700.002>.
- [15] 李慧洁, 蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 498-502.
LI H J, CAI Y L. Sliding mode control with double power reaching law [J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 498-502.
- [16] 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 S D, MA J Q. A novel reaching law sliding mode speed controller design for PMSM [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023, (1): 97-101.
- [17] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真: 基本理论与设计方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
LIU J K. MATLAB Simulation of Sliding Mode Variable Structure Control: Basic Theory and Design Methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
- [18] 张文宇, 袁永斌, 高雪, 等. 求解大规模优化问题的改进海洋捕食者算法[J]. 运筹与管理, 2024, 33(6): 14-21.
ZHANG W Y, YUAN Y B, GAO X, et al. Improved marine predators algorithm for large-scale optimization problems [J]. Operations Research and Management Science, 2024, 33(6): 14-21.
- [19] AFSHIN F, MOHAMMAD H, SEYEDALI M, et al. Marine predators algorithm: A nature-inspired metaheuristic [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 152: 113377.
- [20] WANG N, WANG J S, ZHU L F, et al. A novel dynamic clustering method by integrating marine predators algorithm and particle swarm optimization algorithm [J]. IEEE Access, 2021, 9: 3557-3569.
- [21] 付华, 刘尚霖, 管智峰, 等. 阶段化改进的海洋捕食者算法及其应用[J]. 控制与决策, 2023, 38 (4): 902-910.
FU H, LIU S L, GUAN Z F, et al. Phased-improvement marine predators algorithm and its application [J]. Control and Decision, 2023, 38 (4): 902-910.
- [22] 张宏, 周大伟, 陆丽, 等. 基于改进的樽海鞘群算

- 法的永磁同步电机多目标优化设计[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 221-230.
- ZHANG H, ZHOU D W, LU L, et al. Multi-objective optimization design of permanent magnet synchronous motor based on improved salp swarm algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 221-230.
- [23] 刘澎澎, 王仲根, 王珊珊, 等. 基于改进双幂次趋近律的 SPMSM 滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 201-209.
- LIU P P, WANG Z G, WANG S S, et al. Sliding mode control of SPMSM using an improved double-power reaching law [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 201-209.
- [24] JIN C P, ZHU W L, ZHI P F, et al. Direct torque control of dual three phase permanent magnet synchronous motor based on sliding mode variable structure [C] // Chinese Control Conference, Kunming, 2024.
- [25] WANG J L, WANG Z D, ZHU D L, et al. Reinforcement learning marine predators algorithm for global optimization [J]. Cluster Computing, 2024, 27(7): 9137-9190.
- [26] 徐训, 林巧梅, 周君, 等. 基于幂次趋近率的机械手滑模控制系统[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(1): 23-26.
- XU X, LIN Q M, ZHOU J, et al. Sliding mode control system of manipulator based on approaching rate [J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(1): 23-26.
- [27] JIANG X J, ZHAN H F, YU J H, et al. Multi-stage manufacturing process parameter optimization method based on improved marine predator algorithm [J]. Engineering Research Express, 2024, 6(2): 025501.
- [28] 张伟刚, 周红生. 基于改进海洋捕食者算法的电力巡检机器人避障技术研究[J]. 现代制造工程, 2024, (10): 60-66.
- ZHANG W G, ZHOU H S. Research on obstacle avoidance technology of electric inspection robot based on improved marine predator algorithm [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2024, (10): 60-66.
- [29] GU G Q, LI H T, ZHAO C S. A multi-strategy enhanced marine predator algorithm for global optimization and UAV swarm path planning [J]. IEEE Access, 2024, 12(1): 112095-112115.

收稿日期:2025-03-27

收到修改稿日期:2025-07-19

作者简介:

朱跃莉(2004-),女,本科在读,研究方向为交流电机矢量控制,ca.ylzu22@gzu.edu.cn;

* 通信作者:马家庆(1981-),男,博士,副教授,研究方向为交流电机非线性控制,357287962@qq.com。