

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417086

基于 SMA 优化的 PMSM 模型预测控制*

吴刚琴 马家庆 陈昌盛 何志琴 吴钦木

(贵州大学电气工程学院 贵阳 550025)

摘要: 针对永磁同步电机使用传统控制动态响应慢、电流脉动大等问题,改进了一种基于黏菌优化算法的新型双幂次滑模积分速度控制器的模型预测控制算法。首先,速度环采用一种新型双幂次趋近律的滑模速度控制器,使其更加准确的控制电机的运转,并通过 Lyapunov 函数验证其稳定性。其次,利用黏菌优化算法优化 dq 轴 PI 控制器的参数,可以快速找到最优的 PI 参数。同时通过电流模型预测控制,使电流脉动减小。最后,从微观的角度绘制了 dq 轴电流与电机转速 n 的三维相图,进一步验证了控制器的有效性。仿真结果表明,与传统 PI-MPC、SMC-MPC 及 NSMC 方法相比,所提方法 NSMC-MPC 在动态响应速度、调速稳定性和抗干扰能力方面具有显著优势,能显著减小超调和电流脉动,提升动态性能及负载适应能力。

关键词: 永磁同步电机;黏菌优化算法;滑模控制;模型预测控制;趋近律

中图分类号: TM351;TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Model predictive control of PMSM based on SMA optimization

Wu Gangqin Ma Jiaqing Chen Changsheng He Zhiqin Wu Qinmu

(School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To address the issues of slow dynamic response and large current ripple in traditional control of permanent magnet synchronous motors, an improved model predictive control algorithm is proposed based on a novel dual-power sliding mode integral speed controller optimized by the slime mold algorithm. First, the velocity loop adopts a new double power convergence law sliding mode velocity controller to control the motor more accurately. The stability of this method is validated using the Lyapunov function. Second, the slime mold optimization algorithm is applied to optimize the parameters of the dq-axis PI controller, enabling rapid determination of the optimal PI parameters. At the same time, current model predictive control is employed to reduce current ripple. Finally, from a microscopic perspective, a 3D phase diagram of dq-axis current and motor speed (n) is drawn to further verify the effectiveness of the controller. Simulation results show that compared with the traditional PI-MPC, SMC-MPC and NSMC methods, the proposed method NSMC-MPC has significant advantages in dynamic response speed, speed stability and anti-interference ability, which can significantly reduce the overshooting and current pulsation, and improve the dynamic performance and load adaptability.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; slime mold optimization algorithm; sliding mode controller; model predictive control; convergence law

0 引言

随着国民经济的持续增长,以电机为核心的控制领域得到了快速发展并且已广泛应用于自动化、机器人、电动汽车等领域,传统控制方法在动态响应和电流脉动方面的局限性影响系统效率和稳定性。提高 PMSM 系统的动态

响应速度和控制精度,将能够在降低能耗、延长设备寿命方面提供实质性帮助。

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有结构简单,体积小,运行可靠,高功率密度,高效率等显著优势^[1-2]。合适的控制策略对实现 PMSM 的高性能控制具有非常重要的作用,目前最主要的

收稿日期:2024-10-11

* 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[2021]G442, QKHZ[2022]G264, QKHZ[2023]G096, QKHZ[2023]G179)、贵州省科技厅计划项目(QKHCG-LH[2024]Z028)资助

控制方法有矢量控制^[3-4] (field oriented control, FOC) 和直接转矩控制^[5] (direct torque control, DTC), 虽然已取得了一定的控制效果, 但仍面临一些挑战。例如, 动态响应较慢和电流脉动较大, 这在实际应用中对系统的效率和稳定性产生了不利影响。

PMSM 控制系统是一个具有多变量, 强耦合的非线性控制系统, 为了进一步提高系统的控制精度, 许多研究者提出并发展了一些控制理论, 例如模糊控制^[6], 自适应控制^[7], 滑模控制^[8-10], 自抗扰控制^[11] 和模型预测控制^[12-14] (model predictive control, MPC)。其中模型预测控制结构简单容易实现, 具有非线性约束和多变量同时控制的能力, 响应速度快等优点受到了广泛的关注。一种改进型无差拍预测电流控制方法结合改进型滑模控制的策略被田艳丰等^[15] 提出, 以解决系统抗干扰能力不足和响应速度慢的问题。研究表明, 该策略有效提升了系统的抗干扰能力和响应速度。为了改善模型预测中参数鲁棒性不足的问题, 另一种针对电流预测误差的补偿策略也被罗波等^[16] 提出。该方法首先利用滑模观测器获得局部模型变量, 然后在一个控制周期内计算所有电压矢量对应的电流预测误差, 最后通过在线修正预测模型的方式补偿估计的电流预测误差。研究表明, 该方法在保证控制性能的同时显著提高了参数的鲁棒性。

随着群智能优化算法迅速发展, 群智能算法被用于电机中去求解各种优化问题^[17]。常用的群智能算法有遗传算法, 差分进化算法等等。一种基于遗传算法的飞轮电机多工况效率优化方法被朱迪等^[18] 提出, 用于解决飞轮电机在全工作周期内运行效率低和热泵能耗损失大的问题, 从而提升飞轮储能系统的经济性。此外, 陈强等^[19] 还提出了一种克隆选择差分进化 (DE-ICSA) 算法, 该算法能够同时辨识定子电阻、dq 轴向电感和转子磁链等电磁参数, 并表现出较好的收敛性和可靠性。

黏菌算法^[20] (slime mould algorithm, SMA) 是 Li 等人通过模拟多头绒泡菌觅食过程中的行为和形态变化于 2020 年设计的一种新型群智能算法。相比其他智能优化算法 (如粒子群算法、遗传算法等), SMA 具有较好的开发和探索平衡能力, 能有效提升 PMSM 系统在动态工况下的响应和稳定性。通过采用群智能优化算法提高系统性能, 也为其他工业控制领域的应用提供了参考。

近年来, 滑模控制器的改进研究层出不穷, 常见的方法包括变速趋近律和滑模观测器等。这些方法虽然在一定程度上提高了控制精度, 但在应对复杂工况时, 仍存在抖振较大、动态误差高等问题。

为克服动态响应较慢和电流脉动较大等问题, 本文提出了一种基于双幂次趋近律的滑模控制方法, 相较于变速趋近律和滑模观测器等方法, 双幂次趋近律能够在不同的控制阶段自动调整趋近速度, 使系统在快速趋近的同时保持平稳, 大幅降低了抖振问题。同时, SMA 实现了参数的

动态调整, 使系统能够在复杂工况下自适应优化, 提高电机响应速度和减少电流脉动, 进一步减小抖振, 显著提升了响应速度、减少电流脉动、超调量和抗干扰能力。仿真结果显示, 与 PI-MPC、SMC-MPC 和 NSMC 等方法相比, 本文提出的 NSMC-MPC 方法在系统动态性能方面表现更为优越, 有效验证了该方法的实际应用价值。

1 PMSM 数学模型

在 dq 坐标系下, PMSM 的数学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{i}_d = (-R_s i_d + \omega L_q i_q + u_d) / L_d \\ \dot{i}_q = (-R_s i_q + \omega L_d i_d - \omega \psi_f + u_q) / L_q \\ \dot{\omega} = (1.5 n_p \psi_f i_q - T_L) / J \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q, i_d, i_q , 分别代表 d 轴、q 轴电压和电流; ω 为电角速度; ψ_f 为永磁体磁链; R 为定子电阻。采用表贴式永磁同步电机 (SPMSM), 交轴与直轴电感近似相等, $L = L_d = L_q$ 。采用 $i_d = 0$ 控制策略, 电机所有的电流都用来产生电磁转矩。

基于式 (1) 表示的数学模型, 可以利用前向欧拉离散方程来预测下一时刻的电流 $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$, 具体电流预测方程如下:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(1 - \frac{TR}{L}\right) i_d(k) + T\omega_e i_q(k) + \frac{T}{L} u_d(k) \\ i_q(k+1) = \left(1 - \frac{TR}{L}\right) i_q(k) - T\omega_e i_d(k) + \frac{T}{L} u_q(k) - \frac{T\omega_e \psi_f}{L} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$ 代表 d 轴和 q 轴的下一时刻的电流预测值, T 为系统的控制周期, $i_d(k)$ 和 $i_q(k)$ 为当前时刻 d, q 轴电流的测量值, $u_d(k)$ 和 $u_q(k)$ 为当前时刻所施加的电压值。

根据电流预测方程式可预测 $k+1$ 时刻 8 种不同电压矢量作用下的 8 组电流值, 将预测后的电流值分别带入到电流误差代价函数中, 选择具有最小代价函数的电压矢量作为 $k+1$ 时刻的最优电压矢量, 并通过逆变器作用于电机。由于 PMSM 采用 $i_d = 0$ 的控制策略, 电流误差代价函数为:

$$g = |-i_d(k+1)| + |i_q^* - i_q(k+1)| \quad (3)$$

2 速度环控制器设计

2.1 滑模控制器

传统的幂次趋近律为:

$$\dot{s} = -\alpha |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) \quad q > 0, 1 > \alpha > 0 \quad (4)$$

本文在传统幂次趋近率的基础上提出了一种改进的双幂次趋近律, 如式 (5) 所示。

$$\dot{s} = -k_1 x_1^2 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 x_2 |x_2|^\beta \operatorname{sgn}(s) \quad (5)$$

式中: $k_1, k_2, \alpha, \beta, \varepsilon$ 为设计参数, k_1, k_2 均大于 0, $0 < \alpha < 1$, $0 < \alpha < 1, \varepsilon > 1, x_1$ 和 x_2 为系统状态变量。

定义 PMSM 的状态变量为:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω_{ref} 为电机的参考转速, ω 为电机的实际转速。

根据式(1)和式(6)可知:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = (T_L - 1.5n_p\psi_f i_q)/J \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega} = -1.5n_p\psi_f \dot{i}_q \end{cases} \quad (7)$$

令 $D = 1.5n_p\psi_f, u = i_q$, 式(7)可变为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u \quad (8)$$

定义滑模面函数为:

$$s = cx_1 + x_2 \quad (9)$$

式中: $c > 0$ 为待设计参数。

对式(9)求导, 可得:

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 + \dot{x}_2 = cx_2 - Du \quad (10)$$

为了获得较好的动态品质, 采用新型双幂次趋近律, 可得 SMC 的表达式为:

$$u = \frac{1}{D} [cx_2 + k_1 x_1^\alpha |s|^\varepsilon \text{sgn}(s) + k_1 k_2 |x_2|^\varepsilon |s|^\beta \text{sgn}(s)] \quad (11)$$

可得 q 轴参考电流为:

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + k_1 x_1^\alpha |s|^\varepsilon \text{sgn}(s) + k_1 k_2 |x_2|^\varepsilon |s|^\beta \text{sgn}(s)] d\tau \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 由于控制器包含积分项, 不仅可以削弱抖振现象, 而且可以消除系统的稳态误差, 从而提高系统的控制品质。

2.2 稳定性分析

选取 Lyapunov 函数:

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2 \quad (13)$$

则:

$$\dot{V}(s) = s\dot{s} = s[-k_1 x_1^\alpha |s|^\varepsilon \text{sgn}(s) - k_1 k_2 |x_2|^\varepsilon |s|^\beta \text{sgn}(s)] \quad (14)$$

由于 $k_1, k_2, \alpha, \beta, \varepsilon$ 均大于 0, 所以 $\dot{V}(s) = s\dot{s} < 0$, 满足滑模到达的条件, 系统是趋于渐近稳定的。

3 基于 SMA 的模型预测电流优化算法

SMA 是模拟黏菌捕食行为的一种仿生算法。SMA 算法以多头绒泡菌的觅食行为和形态变化行为进行模拟, 主要分为搜索食物、包裹食物和振荡过程 3 个阶段, 其数学模型如下:

3.1 搜索食物:

黏菌根据空气中的气味接近食物收缩模式如下:

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{cases} \mathbf{X}_b(t) + \mathbf{v}_b \cdot (\mathbf{W} \cdot \mathbf{X}_A(t) - \mathbf{X}_B(t)), & r < p \\ \mathbf{v}_c \cdot \mathbf{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (15)$$

式中: \mathbf{v}_b 是 $[-a, a]$ 的参数, \mathbf{v}_c 随着迭代次数的增加逐渐从 1 到 0 递减, t 代表当前迭代次数, \mathbf{X}_b 代表目前发现的气味浓度最高的个体位置, 即最好个体的位置, \mathbf{X} 代表当前位置, \mathbf{X}_A 和 \mathbf{X}_B 代表从黏菌当中随机选择的两个个体, \mathbf{W} 为黏菌的权重。

p 的计算公式如下:

$$p = \tanh |S(i) - DF| \quad (16)$$

式中: $i \in 1, 2, \dots, n, S(i)$ 为黏菌个体 \mathbf{X} 的适应度值, DF 代表当前的到的黏菌个体的最佳适应度值。

\mathbf{v}_b 的计算公式如下:

$$\mathbf{v}_b = [-a, a] \quad (17)$$

$$a = \arctanh \left(- \left(\frac{t}{\max_t} \right) + 1 \right) \quad (18)$$

其中, \max_t 为最大迭代次数。

\mathbf{W} 的计算公式如下:

$$\mathbf{W}(\text{SmellIndex}(i)) = \begin{cases} 1 + r \cdot \log \left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1 \right), & \text{condition} \\ 1 - r \cdot \log \left(\frac{bF - S(i)}{bF - \omega F} + 1 \right), & \text{others} \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{SmellIndex} = \text{sort}(S) \quad (20)$$

式中: r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, bF 和 ωF 分别表示当前迭代下获得的最佳和最差适应度值, condition 为 $S(i)$ 在种群中排序前一半的部分, SmellIndex 表示根据适应度值排序的序列(在最小值问题中为升序)。

3.2 包裹食物

根据黏菌包裹食物时的行为, 黏菌的位置更新公式如式(21)所示。

$$\mathbf{X}^* = \begin{cases} \text{rand} \cdot (UB - LB) + LB, & \text{rand} < z \\ \mathbf{X}_b(t) + \mathbf{v}_b \cdot (\mathbf{W} \cdot \mathbf{X}_A(t) - \mathbf{X}_B(t)), & r < p \\ \mathbf{v}_c \cdot \mathbf{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (21)$$

式中: rand 和 r 表示 $[0, 1]$ 之间的随机值, UB 和 LB 为搜索空间的上界和下届, z 的值为 0.03。

3.3 振荡过程

\mathbf{v}_b 在 $[-a, a]$ 之间随机振荡, 并随着迭代次数的增加而逐渐趋于 0, 其振荡过程模拟了黏菌决定接近食物还是寻找其他食物源。 \mathbf{v}_c 在 $[-1, 1]$ 之间振荡, 最终趋于零。 \mathbf{v}_b 和 \mathbf{v}_c 之间的协同交互模拟了黏菌选择食物的过程。

本文利用黏菌优化算法来离线优化速度 PI 和电流环 PI 控制器, 将电流误差作为代价函数, 通过电流无差拍控制去预测下一个时刻的电流值, 将电流的差值作为电流 i_d 和电流 i_q 的返回值, 采取 $i_d = 0$ 控制策略, 使速度环输出的电流 i_q 作为 q 轴电流的实际输入, 使得 $i_q = i_q^*, i_d = i_d^* = 0$,

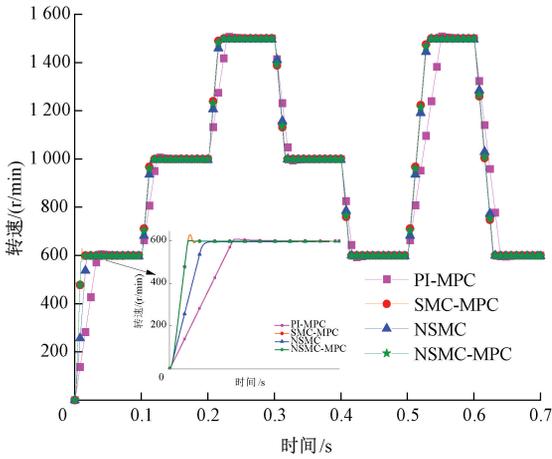


图 3 恒定负载速度响应曲线

Fig. 3 Constant load speed response curve

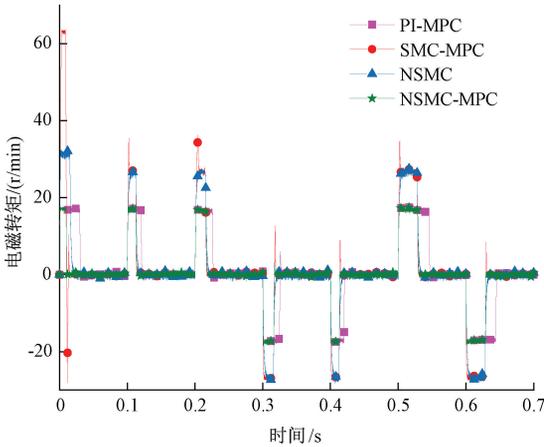


图 4 空载电磁转矩波形图

Fig. 4 Waveform of no-load electromagnetic torque

NSMC 的波动相对最小,效果最好。在驱动负载时,主要是通过电机颤振和增加电机能量消耗。因此,通过仿真验证,比较 4 种控制器下电机的转速和电磁转矩,得出 NSMC-MPC 方案能有效抑制抖振,减少超调,提高电机性能。

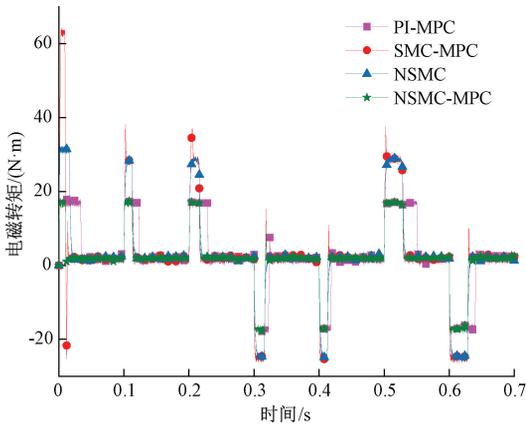


图 5 恒定负载转矩波形图

Fig. 5 Constant load torque waveforms

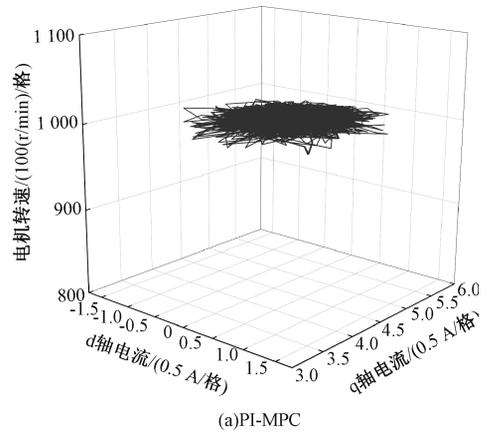
带负载仿真中取载波频率为 1 000 Hz 和基频为 100 Hz 时,对三相电流分别进行 FFT 分析。在仿真中,选择了 0.25 s 后的一个周期。4 种控制器的总谐波失真 (THD)结果如表 2 所示,NSMC-MPC 控制方法的 THD 值最低(A 相为 15.74%,B 相为 17.58%,C 相为 16.59%),优于 PI-MPC 和 SMC-MPC,NSMC 控制方法。

表 2 不同控制方法下三相电流 THD 值比较

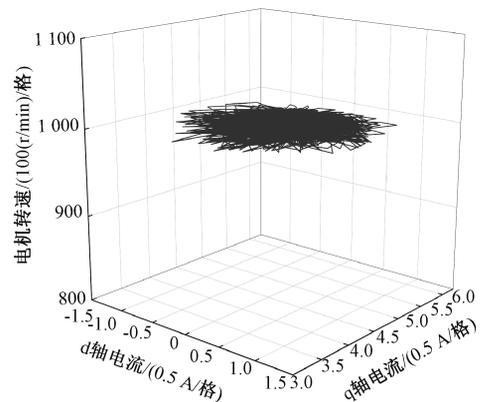
Table 2 Comparison of THD values of three-phase currents under different control methods

相位	PI-MPC	SMC-MPC	NSMC	NSMC-MPC
A 相	33.92	26.41	27.96	15.74
B 相	36.56	25.68	26.95	17.58
C 相	33.87	25.54	27.89	16.59
均值	33.87	25.54	27.89	16.59

为了更直观地了解此处的仿真结果,提出从微观角度进行分析,绘制了如图 6 所示的 $i_d - i_q$ 电流和电机速度 n 的三维相图,从相图中可以看到图 6(d)的相图轨迹范围明显小于图 6(a)~(c),说明在 NSMC-MPC 控制方法下的系统较稳定。以上结果表明提出的 NSMC-MPC 速度控制器能够有效抑制系统抖振,减小电流脉动,且在加负载扰动时,速度受到的影响更小。



(a)PI-MPC



(b)SMC-MPC

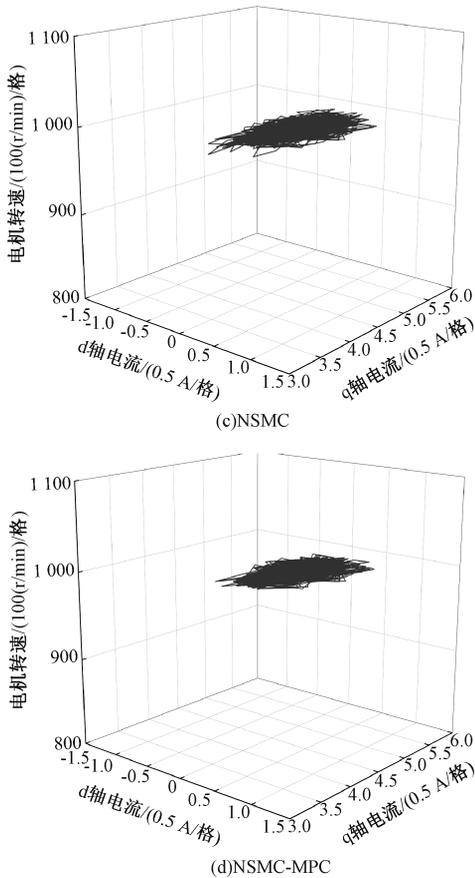


图6 三维相图

Fig. 6 Three-dimensional phase diagram

5 结 论

针对PMSM传统控制存在的动态响应慢、电流脉动大等问题,提出了一种基于SMA和双幂次滑模积分速度控制器的模型预测控制算法。设计了一种基于幂次趋近率的双幂次趋近滑模速度控制器。仿真结果表明,所改进的控制策略显著提高了永磁同步电机系统的动态响应速度与调速稳定性,显著降低了电流脉动,并增强了系统的抗干扰能力。此外,SMA优化算法的应用显著增强了系统的动态调节能力和负载适应性,为永磁同步电机控制系统的优化提供了有效的解决方案。本文提出的NSMC-MPC方法具有更广阔的实际应用前景,在机器人、电动汽车等对响应速度和稳定性要求较高的领域具有良好的应用潜力。未来研究中,可以进一步将该方法应用到更复杂的多变量系统中,以验证其广泛适用性和鲁棒性。

参考文献

[1] 薛大伟,常九健,王晓林. 永磁同步电机自适应弱磁控制策略研究[J]. 汽车工程学报, 2024,14(5):858-867.
XUE D W, CHANG J J, WANG X L. Research on adaptive weak magnetism control strategy of

permanent magnet synchronous motor[J]. Automotive Engineering, 2024, 14(5):858-867.

- [2] 尹诗荀,郑志安,朱俊杰. 基于延迟补偿的永磁同步电机并行自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 275-285.
YIN SH X, ZHENG ZH AN, ZHU J J. Parallel self-immunity control of permanent magnet synchronous motor based on delay compensation[J]. Journal of Instrumentation, 2024, 45(3):275-285.
- [3] 乔禹淇,杨瑞峰,郭晨霞. 永磁同步电机速度-电流预测的直接速度控制[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6):1-5.
QIAO Y Q, YANG R F, GUO CH X. Direct speed control for speed-current prediction of permanent magnet synchronous motor[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(6):1-5.
- [4] 王向恩,黄平林. 永磁同步电机FOC控制下相电流直流分量影响与抑制策略研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2):61-68.
WANG X EN, HUANG P L. Research on the influence and suppression strategy of phase current DC component under FOC control of permanent magnet synchronous motor [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(2): 61-68.
- [5] 田淳,胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制系统理论及控制方案的研究[J]. 电工技术学报, 2002(1):7-11.
TIAN CH, HU Y W. Research on the theory and control scheme of direct torque control system for permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Electrotechnology, 2002(1):7-11.
- [6] LI H, WANG SH T, XIE Y L, et al. Virtual reference-based fuzzy noncascade speed control for PMSM systems with unmatched disturbances and current constraints[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2023, 31(12): 4249-4261.
- [7] YIN Y F, LIU L, VAZQUEZ S, et al. Disturbance and uncertainty attenuation for speed regulation of PMSM servo system using adaptive optimal control strategy[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 3410-3420.
- [8] 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), 1-9[2024-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.n.20240531.1700.002.html>.
ZHU Y B, YAO SH H. PMSM sliding mode control based on improved variable speed double power convergence law [J/OL]. Journal of Chongqing Gongshang University(Natural Science Edition), 1-9 [2024-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/>

- 50.1155.n.20240531.1700.002.html.
- [9] 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.
LI ANG, YUAN J J, ZHAO F, et al. Improved sliding mode observer vector control for permanent magnet synchronous motor[J]. Electronic Measurement Technology,2023, 46(6): 37-43.
- [10] TAN SH D, MA J Q. Study on influence of switching frequency on sliding mode control performance of permanent magnet synchronous motor[J]. IET Power Electronics, 2022, 15(16): 1858-1867.
- [11] 阎馨,李文磊,屠乃威,等.基于改进金枪鱼群算法PMSM自抗扰控制[J].电力电子技术,2024,58(1):27-31,35.
YAN X, LI W L, TU N W, et al. Improved tuna swarm algorithm based PMSM self-immunity control[J]. Power Electronics Technology, 2024, 58(1):27-31,35.
- [12] 颜朝斌,杨公德,杨明发.永磁同步电机新型模型预测电流控制[J].电机与控制学报,2024,28(5):91-100.
YAN CH B, YANG G D, YANG M F. Novel model predictive current control for permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Electrical Machines and Control,2024,28(5):91-100.
- [13] 王艳阳,胡海林,杨杰,等.永磁同步电机模糊自适应低开关频率模型预测电流控制[J].国外电子测量技术,2024,43(6):191-200.
WANG Y Y, HU H L, YANG J, et al. Fuzzy adaptive low switching frequency model predictive current control of permanent magnet synchronous motor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(6):191-200.
- [14] 蔡宏越,马家庆,何志琴,等.基于SSA优化的永磁同步电机级联模型预测控制研究[J].组合机床与自动化加工技术,2024(7):79-82,88.
CAI H Y, MA J Q, HE ZH Q, et al. Research on predictive control of permanent magnet synchronous motor cascade model based on SSA optimization[J]. Combined Machine Tools and Automatic Machining Technology,2024(7):79-82,88.
- [15] 田艳丰,李欢,张冉,等.预测控制与滑模控制结合的永磁同步电机控制[J].微特电机,2024,52(4):55-59.
TIAN Y F, LI H, ZHANG R, et al. Predictive control combined with sliding mode control for permanent magnet synchronous motor control [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024, 52 (4): 55-59.
- [16] 罗波,周羽,李明贤,等.基于预测误差补偿的PMSM预测电流控制[J].组合机床与自动化加工技术,2024(2):99-102,109.
LUO B, ZHOU Y, LI M X, et al. PMSM predictive current control based on prediction error compensation[J]. Combined Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2024(2): 99-102,109.
- [17] 王一琛.基于群智能优化算法的永磁同步电动机模型预测控制[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022.
WANG Y CH. Predictive control of permanent magnet synchronous motor model based on swarm intelligent optimization algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2022.
- [18] 朱迪,赵杨阳,艾邓鑫,等.基于遗传算法的飞轮储能电机多工况效率优化[J].储能科学与技术,2024,13(10):3582-3592.
ZHU D, ZHAO Y Y, AI D X, et al. Multi-condition efficiency optimization of flywheel energy storage motor based on genetic algorithm[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024,13(10): 3582-3592.
- [19] 陈强,傅煜,蔡琦盼.基于克隆选择差分进化算法的永磁同步电机参数辨识[J].传感器与微系统,2022,41(1):135-137,141.
CHEN Q, FU Y, CAI Q P. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on differential evolutionary algorithm with clonal selection[J]. Sensors and Microsystems, 2022, 41(1): 135-137,141.
- [20] LI SH M, CHEN H L, WANG M J, et al. Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization [J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 111: 300-323.

作者简介

吴刚琴,硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机控制。

E-mail:1485904630@qq.com

马家庆(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为交流电机控制、电力电子技术。

E-mail:357287962@qq.com