

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415932

基于改进麻雀搜索算法分数阶PI的PMSM调速策略*

刘维莎 石荣亮 周其锋 钟志贤

(桂林理工大学广西高校先进制造与自动化技术重点实验室 桂林 541006)

摘要: 永磁同步电机调速系统采用传统比例积分双闭环控制结构存在抗扰性能差与响应速度慢的问题。为此,文中在建立PMSM数学模型和分析传统PI参数设计方法的基础上,提出一种基于改进麻雀搜索算法分数阶比例积分的PMSM调速优化策略,通过在常规SSA中引入佳点集初始化策略和黄金正弦更新策略,解决了SSA易陷入局部最优的问题,提高了收敛速度和精度,以进一步改善PMSM调速系统的响应性能。最后通过MATLAB仿真对比结果可知,所述ISSA-FOPI调速改进策略在4种工况下具有最短的调节时间分别为1.2、0.9、9.9与12.1 ms,和最小的超调量分别为0.16%、0.16%、0.05%与0.6%,这充分体现了所述策略的有效性与优越性。

关键词: 永磁同步电机;改进麻雀搜索算法;分数阶PI;调速优化策略;佳点集;黄金正弦策略

中图分类号: TM341;TN830 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Speed regulation strategy of PMSM based on fractional order proportional integral with improved sparrow search algorithm

Liu Weisha Shi Rongliang Zhou Qifeng Zhong Zhixian

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology,

Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: The speed control system of permanent magnet synchronous motor with the traditional proportional integral dual closed-loop control structure has drawbacks on anti-interference performance and response speed. Therefore, under the research of PMSM mathematical model and analysis of traditional PI parameter design methods, this article proposes a PMSM speed control optimization strategy based on the fractional order proportional integral with improved sparrow search algorithm. By introducing good point set initialization strategy and golden sine update strategy into conventional SSA, the problem of SSA easily falling into local optima is solved, which improves the convergence speed and accuracy, leading to better response performance of the PMSM speed control system. Finally, the MATLAB simulation results show that the ISSA-FOPI speed regulation improvement strategy has the shortest adjustment time of 1.2, 0.9, 9.9 and 12.1 ms respectively under the four working conditions, and the minimum overshooting is 0.16%, 0.16%, 0.05% and 0.6% respectively. This fully embodies the effectiveness and superiority of the strategy.

Keywords: permanent magnet synchronous motor(PMSM); improved sparrow search algorithm(ISSA); fractional order proportional integral(FOPI); speed control strategy; good point set; golden sine strategy

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有功率密度高、运行效率高、控制简单等优点,在电动汽车、风力发电、现代电梯曳引驱动等领域得到了广泛应用^[1]。PMSM调速系统通常采用基于传统比例积分(proportional integral, PI)调节器的双闭环控制结构,具有控制简单、易于实现的优点,但存在抗扰性能差与

响应速度慢的问题^[2]。因此,如何提升PMSM调速系统的响应性能已成为国内外研究的热点。

文献[3]在传统PI双闭环调速控制的基础上引入电网电压前馈解耦环节,虽然在一定程度上改善了PMSM的调速性能,但是改善效果仍不够明显。文献[4]将转速给定值前馈与转速反馈环节同时引入至传统PI双闭环调速系统中,解决了传统PI难以兼顾良好的抗扰性和跟随性的问题,但该策略新增4个控制参数,造成系统的控制结构及其参数

收稿日期:2024-04-25

* 基金项目:广西自然科学基金(2021GXNSFAA220038)、广西壮族自治区研究生教育创新计划项目(YCSW2024372)资助

设计复杂。文献[5]提出基于鲸鱼优化算法的小波神经网络PID的转速控制策略,虽然所提控制策略具有良好的动态性能和稳态精度,但在稳定时间、转速超调和施加扰动后所存在的转速和转矩的误差方面仍然需要进一步的改进和提高。

上述文献主要对传统一自由度PI/PID控制器进行改进以提升PMSM调速系统的响应性能,但存在控制自由度较少的问题。为此,文献[6]应用了分数阶比例积分(fractional order proportional integral, FOPI)控制器,通过引入分数阶积分阶次 λ ,相较于PI控制器增加了一个控制自由度使得系统的设计更加灵活。文献[7]将PMSM的传统滑模控制器替换为分数阶滑模控制器,有效解决了传统滑模控制器存在稳态误差与抖振较大的问题。文献[8]提出了一种基于分数阶的自抗扰控制方法,提高了PMSM调速系统的抗扰性能。文献[9]在常规分数阶调速器的基础上引入校正传递函数,改进后的PMSM分数阶调速器能够满足更高截止频率的应用要求。然而,文献[7-9]较少涉及分数阶控制器参数如何取得最优解的问题。

鉴于此,国内外学者通过将智能控制算法引入至FOPI控制器的参数设计过程中,以保证FOPI控制器参数取值获得最优解。文献[10]利用麻雀算法对PMSM调速系统外环的FOPI控制器进行参数优化,相较于人工经验法与试凑法具有更高的参数寻优效率,但未改进的传统麻雀算法的收敛速度较慢且控制精度较低。文献[11-12]在传统麻雀搜索算法的基础上进行改进以寻求FOPI控制器的最优解,改进后的麻雀搜索算法与现有的一些智能算法对比后具有良好的鲁棒性和控制性能,但未对算法初始化环节进行改进,算法搜索性能还有待提升。文献[13]利用水循环算法对FOPI控制器的参数进行寻优,改善了控制系统的动态性能和抗扰性能,但未考虑算法易陷入局部最优的问题。文献[14]提出一种基于改进鲨鱼算法的非线性自抗扰控制器,保证了PMSM较好的转速性能与转矩抖振抑制效果,但控制器结构设计较为复杂。文献[15]通过基于强化学习的神经网络对分数阶滑模控制器进行参数优化,提高了PMSM调速系统的速度跟踪精度,但该控制方法在设计复杂且算法实现难度较大的缺点。

在上述文献的基础上,文中提出一种基于改进麻雀搜索算法(Improved sparrow search algorithm, ISSA)FOPI(下文简称ISSA-FOPI)的PMSM调速优化策略。ISSA-FOPI通过利用佳点集初始化策略和黄金正弦位置更新策略协同改进SSA算法,提高了算法的全局搜索能力,解决了传统SSA算法易陷入局部最优、精度低、收敛慢的问题,以进一步改善PMSM调速系统的响应性能。最后通过MATLAB仿真对比结果验证了所述ISSA-FOPI调速改进策略的有效性与优越性。

1 PMSM的数学模型及其PI参数设计

1.1 PMSM的数学模型及其控制结构

建立PMSM的数学模型是实现其调速优化控制的基础,

也是分析其系统响应性能的重要途径。其中,PMSM在 dq 旋转坐标系下的电压方程为^[16]:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_m L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_m (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电压; i_d 、 i_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电流; L_d 、 L_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电感; R 为定子绕组等效电阻; ω_m 为转子的电角速度; ψ_f 为定子绕组磁链。

PMSM在 dq 旋转坐标系下的电磁转矩方程为:

$$T_e = 1.5P\psi_f i_q \quad (2)$$

式中: T_e 为电磁转矩; P 为极对数。PMSM在 dq 旋转坐标系下的转子运动方程为:

$$T_e = T_l + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3)$$

式中: T_l 为负载转矩; J 为转动惯量; B 为阻尼系数; ω_r 为转子转速。式(1)~(3)即为PMSM在 dq 旋转坐标系下的数学模型。

在定子电流 i_d 与 i_q 实现解耦控制的前提下,PMSM调速系统通常采用基于 $i_d^* = 0$ 的传统PI双闭环矢量控制策略,如图1所示^[4]。根据图1可知,转速给定 ω_{ref} 和由光电编码器测得的PMSM实际转速 ω_r 进行作差运算后,经过传统PI控制器调节得到定子电流 q 轴的指令信号 i_q^* ,PMSM的定子三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 依次经过Clark和Park变化后得到 i_d 、 i_q ,并对其进行PI解耦控制得到调制电压指令信号 u_d^* 、 u_q^* ,再经过Park反变换得到空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)的调制波 u_a^* 、 u_b^* ,随即完成PMSM调速系统的传统PI双闭环矢量控制。

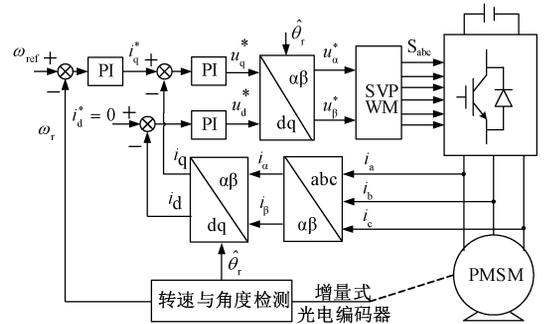


图1 PMSM调速系统的传统PI双闭环矢量控制结构

Fig. 1 Traditional PI double closed-loop vector control structure for PMSM speed control system

1.2 PMSM的传统PI参数设计

根据图1可得到PMSM调速系统的传统PI双闭环矢量控制结构框图,如图2所示。图中: G_{ACR} 、 G_{ASR} 分别为电流内环、转速外环的控制器; T_C 、 T_S 分别为电流检测、转速检测的延迟时间; T_T 、 T_P 分别为转矩输出滤波时间、

SVPWM 输出延迟时间; $D(s)$ 为外部负载转矩扰动; K_s 、 K_c 分别为转速、定子电流的标么化转换系数; K_T 为 PMSM 的转矩系数; K_U 为等效电压放大倍数。

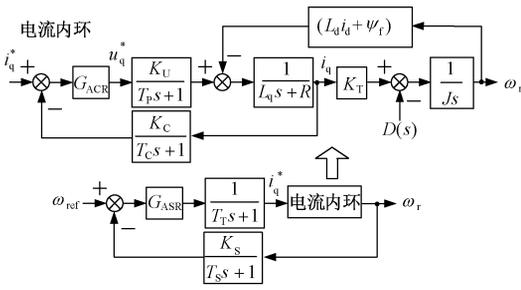


图 2 PMSM 调速系统的传统 PI 双闭环矢量控制结构框图

Fig. 2 Block diagram of traditional PI double closed loopvector control structure of PMSM speed control system

当电流内环采用传统 PI 控制器时,即令 $G_{ACR}(s) = K_{pc} (1 + 1/T_{eq}s)$, 其中, K_{pc} 与 T_{eq} 分别为电流 PI 控制器的比例系数与积分时间常数。根据图 2, 可得到 q 轴电流内环的开环传函 $G_{co}(s)$ 为:

$$G_{co}(s) = (1 + \frac{1}{T_{eq}s}) \frac{K_U}{(1 + T_p s)} \frac{K_c}{(1 + T_c s)} \frac{K_{pc}}{(L_q + R)} \quad (4)$$

利用基于阻尼系数最优的西门子最佳参数设计原则对式(4)进行参数整定, 令 $T_{ceq} = T_p + T_c$, 得:

$$K_{pc} = \frac{L_q}{2K_U K_c T_{ceq}} \quad (5)$$

那么, q 轴电流内环的闭环传函 $G_{cc}(s)$ 可等效变换为:

$$G_{cc}(s) = \frac{1}{K_c (1 + 2T_{ceq}s)} \quad (6)$$

同理, 令 PMSM 的转速外环控制器 $G_{ASr}(s) = K_{ps} (1 + 1/T_{sq}s)$, 其中, K_{ps} 与 T_{sq} 分别为转速 PI 控制器的比例系数与积分时间常数。又根据图 2, 得到 PMSM 转速外环的开环传函 $G_{so}(s)$ 为:

$$G_{so}(s) = (1 + \frac{1}{T_{sq}s}) \frac{K_{ps}}{(1 + T_p s)} \frac{K_s}{(1 + T_{s,s})} \frac{K_T}{J s} G_{cc}(s) \quad (7)$$

又利用基于闭环幅频特性峰值最小的参数设计原则, 对式(7)进行参数整定, 令 $T_{seq} = 2T_{ceq} + T_T + T_S$, $T_{sq} = hT_{seq}$, h 为中频带宽且取值范围通常为 3~10, 则得:

$$K_{ps} = \frac{K_c J (1 + h)}{2h K_T K_s T_{seq}} \quad (8)$$

值得指出的是, 利用如图 2 所示的基于传统 PI 双闭环矢量控制结构可简单实现对 PMSM 调速系统的转速跟踪控制, 但该传统控制结构属于一自由度 PI 控制, 使得若对其 PI 调节器参数进行调整将会同时影响调速系统的跟踪性能与抗负载扰动性能。具体而言, 如果按照跟踪性能最佳的原则整定 PI 参数, 则其抗负载扰动性能将难以得到兼顾; 如果按照抗负载扰动性能最佳的原则整定 PI 参数, 则

其跟踪性能将难以得到兼顾, 故只能通过折中考虑 PMSM 调速系统的跟踪性能与抗扰性能的方式来合理整定 PI 参数^[9]。鉴于此, 文中提出一种基于 ISSA-FOPI 的 PMSM 调速优化策略, 同时引入 ISSA 算法实现对 FOPI 控制参数优化整定。

2 基于 ISSA-FOPI 的 PMSM 调速优化策略

2.1 FOPI 控制器结构及原理

将图 2 中的 PMSM 转速外环控制器 G_{ASr} 由传统 PI 控制器替换为 FOPI 控制器, 即可得到一种如图 3 所示的基于 FOPI 的 PMSM 调速优化策略。

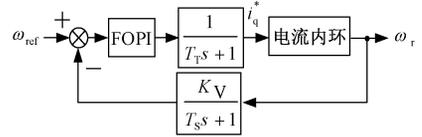


图 3 基于 FOPI 的 PMSM 转速外环控制结构框图

Fig. 3 Block diagram of PMSM speed outer loop control structure based on FOPI

FOPI 控制器的传函 $G_{FOPI}(s)$ 为:

$$G_{FOPI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \quad (9)$$

式中: K_p 与 K_i 分别为 FOPI 控制器的比例系数与积分系数; λ 为 FOPI 控制器的分数阶阶次, $\lambda \in (0, 1)$ 。FOPI 控制器相较于 PI 控制器而言, 前者增加了一个控制自由度 λ , 故将前者应用在 PMSM 调速系统中将更具灵活性。然而, 经验法很难对 FOPI 控制器的参数进行最优整定, 故文中通过引入 SSA 算法对其参数进行寻优设计。

2.2 常规 SSA 算法的实现步骤

常规 SSA 算法是一种模拟麻雀行为的新颖群智能算法, 且麻雀的种群主要按比例分为搜索者、追随者^[17]。常规 SSA 算法中的种群又有部分比例的预警者, 预警者意识到危险信息时可以发出警告, 带领种群飞往安全区域。常规 SSA 算法的具体实现步骤如下。

步骤 1) 利用式(10)进行种群初始化并计算初始适应度。

$$\mathbf{X}_{i, \dim} = \mathbf{lb}_{i, \dim} + rand \times (\mathbf{ub}_{i, \dim} - \mathbf{lb}_{i, \dim}) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, N \\ \dim = 1, 2, \dots, D \end{matrix} \quad (10)$$

式中: \mathbf{X}_i 代表第 i 个种群且维度为 $N \times D$, 此处为 FOPI 的输入参数值。 N 与 D 分别为种群数与待解参数值的数量。 ub_i 与 lb_i 分别代表上界和下界, 此处为各参数的边界值。同时, 将误差性能指标作为适应度函数:

$$fitness(\mathbf{X}_i) = \sum |e(t)| \Delta t \quad (11)$$

式中: $e(t)$ 为转速指令值与实际值的误差; Δt 为采样间隔时间。

步骤 2) 利用式(12)实现搜索者位置更新并计算各种

群适应度。

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{X}_i^t \exp(-\frac{i}{\alpha T_{\max}}), & R_2 < ST \\ \mathbf{X}_i^t + \mathbf{QL}, & R_2 > ST \end{cases} \quad (12)$$

式中: t 为当前迭代次数; T_{\max} 为最大迭代次数; $\alpha \in (0, 1]$ 为一个随机数; $R_2 \in [0, 1]$ 为麻雀种群的预警值; $ST \in [0.5, 1]$ 为种群的安全阈值; $\mathbf{Q} \sim (0, 1)$ 为满足正态分布的随机数; \mathbf{L} 为一个 $1 \times D$ 的矩阵, 且其元素均为 1。

步骤 3) 根据式 (13) 实现其余麻雀作为跟随者的位置更新。

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{Q} \exp(-\frac{\mathbf{X}_{\text{worst}} - \mathbf{X}_i^t}{i^2}), & i > n/2 \\ \mathbf{X}_{\text{Pbest}}^{t+1} + |\mathbf{X}_i^t - \mathbf{X}_{\text{Pbest}}^{t+1}| \mathbf{A}^+ \mathbf{L}, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{X}_{\text{worst}}$ 为麻雀种群全局最差位置; $\mathbf{X}_{\text{Pbest}}$ 为搜索者中最优的位置; $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1}$, 其中矩阵 \mathbf{A} 中元素为随机的 1 或 -1, 维度为 $1 \times D$ 。

步骤 4) 根据式 (14) 实现部分麻雀作为预警者的位置更新。

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{X}_{\text{best}}^t + \beta \times |\mathbf{X}_i^t - \mathbf{X}_{\text{best}}^t|, & f_i > f_g \\ \mathbf{X}_i^t + K \times \left[\frac{|\mathbf{X}_i^t - \mathbf{X}_{\text{worst}}^t|}{f_i - f_w + \epsilon} \right], & f_i = f_g \end{cases} \quad (14)$$

式中: \mathbf{X}_{best} 为全局最优位置; $\beta \sim (0, 1)$ 为满足正态分布的步长控制参数; $K \in [-1, 1]$ 为一个代表搜索方向随机数; f_i 为种群 i 的适应度值; f_g, f_w 分别为全局最优适应度与最差适应度; $\epsilon = \text{eps}$, 用以避免奇异值出现。虽然常规 SSA 算法实现较为简单, 但存在全局搜索性能差、易陷入局部最优、收敛速度慢、收敛精度低等缺点。为此, 文中通过在常规 SSA 中引入佳点集初始化策略和黄金正弦更新策略构成 ISSA 算法, 以克服常规 SSA 算法存在的缺点。

2.3 ISSA 算法的实现步骤

步骤 1) 种群初始化。优秀的初始化策略能使种群分布更均匀, 多样性更丰富。常规 SSA 算法通过 rand 函数生成初始种群, 然而该方法不能很好地覆盖解空间, 有可能导致种群个体多样性差, 算法易陷入局部最优的问题。针对该问题, 文中利用文献[18]中的佳点集方法优化初始化种群, 具体如式 (15) 所示。

$$\begin{cases} r_{i, \text{dim}} = \text{bmod}(2i \cos(2\pi \times \text{dim}/k), 1) \\ \mathbf{X}_{i, \text{dim}} = \mathbf{lb}_{i, \text{dim}} + r_{i, \text{dim}} \times (\mathbf{ub}_{i, \text{dim}} - \mathbf{lb}_{i, \text{dim}}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: k 为满足 $(k-3)/2 \geq D$ 的最小素数; mod 为取模运算。

步骤 2) 搜索者位置更新。常规 SSA 算法中, 搜索者之间的交流较少, 也易导致算法易陷入局部最优。黄金正弦策略使用黄金分割系数进行迭代缩小搜索范围以逼近最优解, 帮助常规 SSA 算法跳出局部最优, 提升全局搜索能力并改善收敛精度。改进的搜索者位置更新公式如式 (16)

所示。

$$\mathbf{X}_i^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{X}_i^t |\sin(r_1)| - r_2 \sin(r_1) |c_1 \mathbf{X}_{\text{Pbest}}^t - c_2 \mathbf{X}_i^t|, & R_2 < ST \\ \mathbf{X}_i^t + \mathbf{QL}, & R_2 > ST \end{cases} \quad (16)$$

式中: $r_1 \in [0, 2\pi]$ 为控制迭代种群变化幅度的随机数; $r_2 \in [0, \pi]$ 为控制迭代种群移动方向的随机数; c_1 与 c_2 均为黄金分割系数, $c_1 = -\pi(1-\tau) + \pi\tau$, $c_2 = -\pi\tau + \pi(1-\tau)$, 且黄金分割数 $\tau = (-1 + \sqrt{5})/2$ 。

将 ISSA 算法应用至 PMSM 转速外环 FOPI 控制器的 K_p, K_i, λ 三个参数的优化设计过程中, 以保证 PMSM 调速系统具有更优良的控制性能, 并通过寻找到目标适应度函数最小值的方式, 改善 PMSM 调速系统的响应指标。图 4 为基于 ISSA 算法优化 FOPI 控制器参数的流程图。

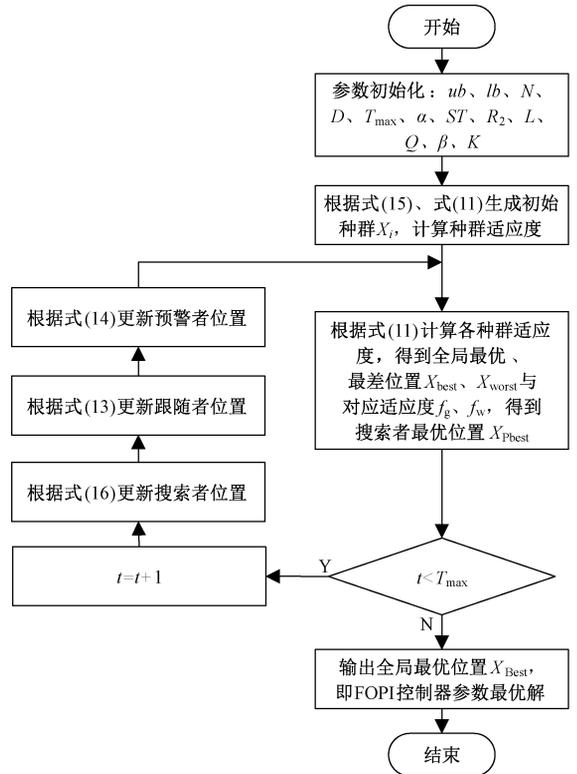


图 4 基于 ISSA 算法优化 FOPI 控制器参数的流程图
Fig. 4 Flow chart of optimizing FOPI controller parameters based on ISSA algorithm

3 测试对比结果

为验证文中所述策略的有效性与优越性, 利用 MATLAB 仿真软件搭建如图 1 所示的基于转速-电流双闭环的 PMSM 调速系统模型。仿真中 PMSM 所采用的主要参数如表 1 所示, 且设定算法最大迭代次数为 30, 麻雀种群数为 20, FOPI 控制器参数 K_p, K_i 的取值范围均为 $(0, 30)$, λ 取 $(0, 1)$ 。

表 1 PMSM 的仿真主要参数

Table 1 Main simulation parameters of PMSM

参数	数值	参数	数值
定子电感 L_q/mH	13.3	定子电感 L_d/mH	13.3
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.09	永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.35
负载转矩 $T_l/(N \cdot m)$	0/20	定子电阻 R/Ω	0.67
电流检测延迟时间 T_c/ms	0.1	转速检测延迟时间 T_s/ms	5
转矩输出滤波时间 T_T/ms	2	SVPWM 输出延迟时间 T_p/ms	0.1
转速标么化转换系数 K_s/s	0.03	定子电流标么化转换系数 K_c/A^{-1}	0.28
转矩系数 $K_T/(V \cdot s)$	10	等效电压放大倍数 K_U/V	310
中频带宽 h	6	极对数 P	10
电机额定转速 $/(r \cdot \min^{-1})$	300	电机额定功率/kW	10

设置 4 种仿真工况:1)初始给定 PMSM 的转速为 $300 r \cdot \min^{-1}$,空载稳定运行后,在 0.4 s 时刻投入 $20 N \cdot m$ 的阶跃负载。2)初始给定 PMSM 的转速为 $300 r \cdot \min^{-1}$,拖动 $20 N \cdot m$ 负载稳定运行后,在 0.5 s 时刻恢复至空载。3)初始给定 PMSM 的转速为 $300 r \cdot \min^{-1}$,空载稳定运行后,在 0.4 s 时刻将转速由 $300 r \cdot \min^{-1}$ 阶跃至 $350 r \cdot \min^{-1}$ 。4)初始给定 PMSM 的转速为 $350 r \cdot \min^{-1}$,空载稳定运行后,在 0.4 s 时刻转速由 $350 r \cdot \min^{-1}$ 阶跃至 $300 r \cdot \min^{-1}$ 。

对于上述 4 种工况,SSA-FOPI 和 ISSA-FOPI 两种参数设计方法下的适应度曲线如图 5 所示。当适应度值取得最小值时,对应种群为 FOPI 控制器的最优参数。此时,SSA-FOPI 控制器的最优参数分别为 $K_p=3.15, K_i=6.3, \lambda=0.3$;ISSA-FOPI 控制器的最优参数分别为 $K_p=5.61, K_i=2.18, \lambda=0.56$ 。由图 5 可知,SSA-FOPI 在迭代次数为 25 时收敛,而 ISSA-FOPI 在第 16 次迭代时就完成收敛,且具有更小的适应度值。图 5 的对比结果充分表明了 ISSA-FOPI 相较于 SSA-FOPI 收敛速度更快且收敛精度更高。

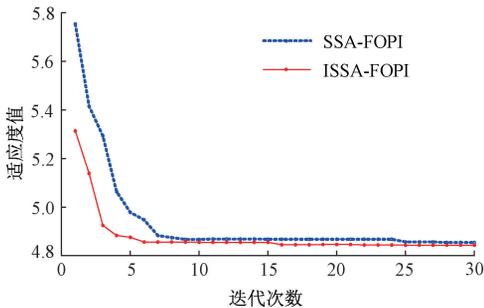


图 5 SSA 算法与 ISSA 算法的适应度迭代曲线

Fig. 5 Iterative curves of SSA and ISSA fitness

根据 1.2 节的参数设计过程并结合表 1 所给出的参数,可得到电流内环的 PI 控制器参数分别为 $K_{pc}=0.38, T_{eq}=11.9$;转速外环的 PI 控制器参数分别为 $K_{ps}=5.83, T_{sq}=0.05$ 。基于上述参数,可得到如图 6 所示的 PMSM 转速外环分别采用传统 PI、SSA-FOPI 和 ISSA-FOPI 控制

器下的开环 Bode 图。

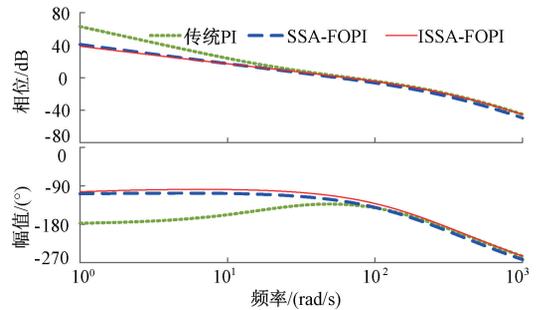


图 6 不同控制器下的 PMSM 转速开环 Bode 图

Fig. 6 PMSM speed open loop Bode diagram of speed under different controllers

根据图 6 可得,采用所述 ISSA-FOPI 控制器时 PMSM 调速系统的相位裕度为 61.6° 、幅值裕度为 18.2 dB,分别高于 SSA-FOPI 控制器所对应的 56° 相位裕度与 18.1 dB 幅值裕度,且高于传统 PI 控制器下的 45.6° 相位裕度与 16.7 dB 幅值裕度。这表明所述 ISSA-FOPI 的 PMSM 调速系统相较于 SSA-FOPI 与传统 PI 控制器具有更好的抗负载扰性能与更快的动态响应速度。

当 PMSM 的转速外环分别采用传统 PI 控制器、SSA-FOPI 控制器、IMPA-FOPI 控制器^[19]与上述 ISSA-FOPI 控制器应对 4 种工况时的转速动态响应对比结果分别如图 7~10 所示。

由图 7 可知,在突增负载工况下,采用 ISSA-FOPI 控制器时的 PMSM 转速超调量为 0.16%,相较于 IMPA-FOPI、SSA-FOPI、传统 PI 控制器分别下降了 0.04%、0.17%、0.34%;且 ISSA-FOPI 控制器对应的调节时间为 1.2 ms,相较于 IMPA-FOPI、SSA-FOPI、传统 PI 控制器分别减少了 1.1、12.3、81.5 ms;ISSA-FOPI、IMPA-FOPI、SSA-FOPI 控制器的转速稳定值分别为 299.5、299.4、 $299 r \cdot \min^{-1}$,对应的稳态误差分别为 0.16%、0.2%、0.33%,均在合理范围内^[20];这表明采用 ISSA-FOPI 控制器可以在保持超调量最小,调节时间最短的同时,稳态误

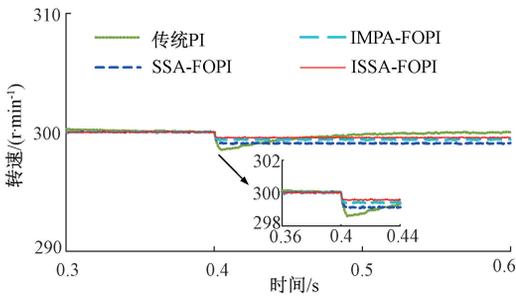


图7 工况1下的PMSM转速动态响应对比结果
Fig. 7 Comparison results of PMSM speed dynamic response under simulation condition 1

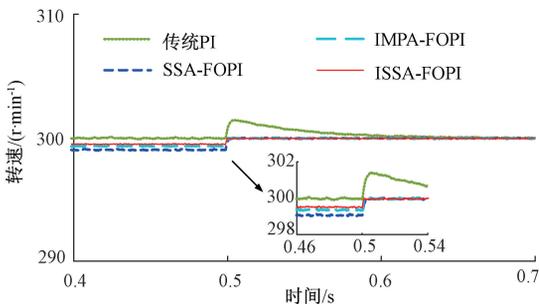


图8 工况2下的PMSM转速动态响应对比结果
Fig. 8 Comparison results of PMSM speed dynamic response under simulation condition 2

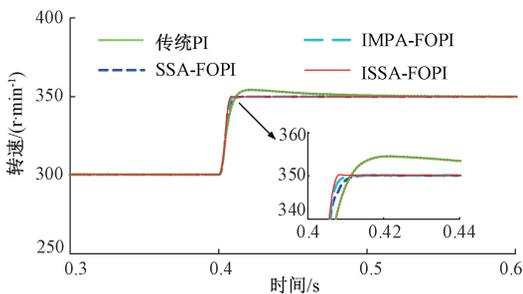


图9 工况3下的PMSM转速动态响应对比结果
Fig. 9 Comparison results of PMSM speed dynamic response under simulation condition 3

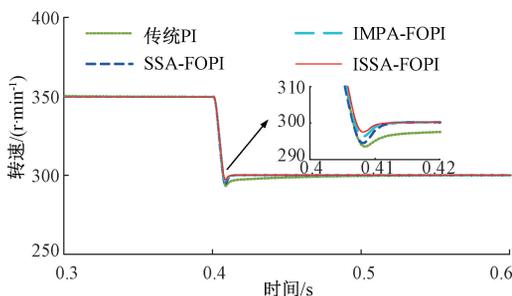


图10 工况4下的PMSM转速动态响应对比结果
Fig. 10 Comparison results of PMSM speed dynamic response under simulation condition 4

差最小,系统动静态性能最优。

由图8可知,在突减负载工况下,ISSA-FOPI控制器对应的调节时间为0.9 ms,相较于IMPA-FOPI、SSA-FOPI、传统PI控制器分别减少了0.9、1.5、42.5 ms;而4种不同控制器的超调量和稳态误差均与突增负载工况下数值保持一致。这表明ISSA-FOPI在保持超调量最小,调节时间最短的同时,稳态误差最小,系统动静态性能最优。

由图9可知,在转速指令突增工况下,4种控制器均无稳态误差,调速精度高;采用ISSA-FOPI、IMPA-FOPI与SSA-FOPI控制器时的PMSM转速相较于传统PI控制器几乎无超调,而所述ISSA-FOPI控制器对应的调节时间为9.9 ms,相较于IMPA-FOPI、SSA-FOPI、传统PI控制器分别下降了2.8、5.5、67.4 ms;即采用ISSA-FOPI控制器时,PMSM的转速在应对转速指令突增扰动下具有更小的超调量与更短的调节时间。

由图10可知,在转速指令突减的工况下,4种控制器均可实现无静差跟踪,系统稳态性能优良;ISSA-FOPI控制器对应的PMSM转速超调量为0.4%,相较于IMPA-FOPI、SSA-FOPI、传统PI控制器分别下降了0.5%、0.9%、1.9%;ISSA-FOPI控制器对应的调节时间为12.1 ms,相较于SSA-FOPI、传统PI控制器分别减少了0.6、2、80.7 ms;即采用ISSA-FOPI控制器时,PMSM的转速在应对转速指令突减扰动下亦具有更小的超调量与更短的调节时间。

综上,PMSM的转速外环采用所述ISSA-FOPI控制器时在负载突增、突减扰动下以及转速指令突增、突减的扰动下,其转速均具有更小的超调量与更短的调节时间,即所述ISSA-FOPI控制器相较于IMPA-FOPI、SSA-FOPI和传统PI控制器具有更优良的抗负载扰动能力与动态响应性能。

4 结 论

针对PMSM调速系统采用传统PI双闭环控制方法存在抗负载扰动能力差与响应速度慢的问题,文中提出一种基于ISSA-FOPI的PMSM调速优化策略,通过在常规SSA中引入佳点集初始化解策略和黄金正弦更新策略,解决常规SSA易陷入局部最优的问题,提高了参数寻优的收敛速度和精度。最后利用MATLAB仿真对比结果验证了PMSM的转速外环采用所述ISSA-FOPI控制器时相较于IMPA-FOPI、SSA-FOPI与传统PI控制器具有更好的抗负载扰动能力与更快的动态响应速度。

参考文献

- [1] SONG J, WANG Y K, ZHENG W X, et al. Adaptive terminal sliding mode speed regulation for PMSM under neural-network-based disturbance estimation: A dynamic-event-triggered approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8):

- 8446-8456.
- [2] CHEN P C, LUO Y. Analytical fractional-order PID controller design with Bode's ideal cutoff filter for PMSM speed servo system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(2): 1789-1793.
- [3] 阎涛. 永磁同步电机双闭环调速 PI 控制器及其改进设计[J]. *船舶工程*, 2023, 45(3): 106-111.
YAN T. Dual closed-loop speed control PI controller for permanent magnet synchronous motor and its improving design[J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(3): 106-111.
- [4] 石荣亮, 黄冀, 张烈平, 等. 基于二自由度 PID 的永磁同步曳引机调速策略[J]. *桂林理工大学学报*, 2022, 42(4): 996-1001.
SHI R L, HUANG J, ZHANG L P, et al. Optimized speed regulation strategy based on two-degree-of-freedom PID regulator for permanent magnet synchronous tractor[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2022, 42(4): 996-1001.
- [5] 高宇星, 景会成, 葛超, 等. 基于鲸鱼算法小波神经网络 PID 的 PMSM 转速控制[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(23): 161-167.
GAO Y X, JING H CH, GE CH, et al. Speed control of PMSM based on WOA wavelet neural network PID[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(23): 161-167.
- [6] SATEESH K V, SHAEED S, JAWAHAR B J. Performance comparison of the integer order and fractional order controllers[J]. *Journal of Computer Science & Control Systems*, 2023, 16(1): 16-21.
- [7] 匡萃璋, 汪华章. 一种非线性自抗扰控制的 PMSM 速度控制策略研究[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(8): 35-40.
KUANG C ZH, WANG H ZH. Research on PMSM speed control strategy of nonlinear active disturbance rejection control [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(8): 35-40.
- [8] WU Z B, ZHUANG J L, LIU B Y, et al. Control method for permanent magnet synchronous motor based on fractional active disturbance rejection[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2023, 45(12): 2352-2363.
- [9] 何栋炜, 陈钟臻, 刘丽桑, 等. 一种改进的永磁同步电机分数阶速度控制器[J]. *控制工程*, 2022, 29(1): 46-53.
HE D W, CHEN ZH ZH, LIU L S, et al. An improved fractional-order speed controller for permanent magnet synchronous motor [J]. *Control Engineering of China*, 2022, 29(1): 46-53.
- [10] 韩耀辉, 曾国辉. 基于麻雀搜索优化算法分数阶 PI 的 PMSM 矢量控制[J]. *上海工程技术大学学报*, 2023, 37(1): 55-60.
HAN Y H, ZENG G H. PMSM vector control based on fractional-order PI of sparrow search optimization algorithm [J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2023, 37(1): 55-60.
- [11] CU W, FANG J, YUAN Q, et al. Optimization and design of fractional-order PID controller based on an improved sparrow search algorithm[J]. 2022. doi.org/10.21203/rs.3.rs-1897616/v1.
- [12] SHAO S, LIU C, DING J, et al. Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved FO[PI] Algorithm[C]. 2023 42nd Chinese Control Conference(CCC). IEEE, 2023: 607-612.
- [13] 蒋德珍, 陈璐, 石荣亮. 基于分数阶 PI 的三相并网整流器调压优化策略[J]. *桂林理工大学学报*, 2023, 43(2): 318-325.
JIANG D ZH, CHEN L, SHI R L, et al. DC voltage regulation optimization strategy of three-phase grid-connected rectifier based on fractional-order PI regulator [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2023, 43(2): 318-325.
- [14] 王龙达, 徐传芳, 鞠艳杰. 永磁同步电机改进鲨鱼优化非线性自抗扰控制[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(6): 303-312.
WANG L D, XU CH F, JU Y J. Nonlinear auto disturbance rejection control via the improved shark smell optimization for permanent magnet synchronous motor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(6): 303-312.
- [15] ZAHRAOUI Y, ZAIHIDE F M, KERMADI M, et al. Optimal tuning of fractional order sliding mode controller for PMSM speed using neural network with reinforcement learning[J]. *Energies*, 2023, 16(11): 1143-1151.
- [16] 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 A, YUAN J J, ZHAO F, et al. Improved sliding mode observer vector control for permanent magnet synchronous motors [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(6): 37-43.
- [17] SHEN X J. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. *Systems Science Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [18] RUN L, MING L, JOHANNES T, et al. Constraint trajectory planning for redundant space robot [J].

- Neural Computing and Applications, 2023, 35 (34): 24243-24258.
- [19] 周燕华, 韩耀辉, 曾国辉, 等. 基于改进海洋捕食者算法的PMSM调节器设计[J/OL]. 电气工程学报, 1-7 [2024-08-01] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20240206.1102.002.html>.
- ZHOU Y H, HAN Y H, ZENG G H, et al. Design of PMSM Regulator Based on Improve Marine Predator Algorithm [J/OL]. Journal of Electrical Engineering, 1-7 [2024-08-01] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20240206.1102.002.html>.
- [20] 张晓超, 李虹, 苏文哲, 等. DC-DC变换器分数阶PI~ λ 控制与稳定性分析研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(5): 21-31.
- ZHANG X CH, LI H, SU W Z, et al. Study on fractional-order PI~ λ control and stability analysis of DC-DC [J]. converter. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38 (5): 21-31.

作者简介

刘维莎, 硕士研究生, 主要研究方向为电梯能量回馈及其利用控制技术。

E-mail: 1293655434@qq.com

石荣亮(通信作者), 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为新能源利用与分布式发电技术。

E-mail: shirl163@163.com