

李飞, 陈勇弟, 魏小城, 等. 基于改进麻雀搜索算法的微电网优化调度[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(5): 150-156. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240520

基于改进麻雀搜索算法的微电网优化调度

李飞, 陈勇弟, 魏小城, 张建华

(江苏师范大学 电气工程及自动化学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对微电网优化调度问题, 提出一种混合策略改进的麻雀搜索算法。首先, 将微电网优化调度问题变成多维函数优化问题, 并建立约束条件。其次, 利用 Sin 混沌序列初始化种群; 然后在位置更新阶段引入学习系数和变异算子; 最后引入自适应 t 分布和动态选择概率, 来改善麻雀搜索算法的搜索能力。通过标准测试函数仿真实验和对微电网优化调度模型求解, 验证了所提算法具有更高的精度和更快的收敛速度。

关键词: 学习系数; 混合策略改进的麻雀搜索算法; 微电网; 优化调度

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)05-0150-07

Optimized dispatch of microgrid based on improved sparrow search algorithm

LI Fei, CHEN Yongdi, WEI Xiaocheng, ZHANG Jianhua

(College of Electrical Engineering and Automation, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: The optimal dispatch of microgrid is essential to improve the efficiency of renewable clean energy production and ensure the stable performance of the power system. Aiming at the optimal scheduling problem of microgrid, this paper proposes a mixed strategy improved sparrow search algorithm. Firstly, the microgrid optimization dispatch problem is converted into a multidimensional function optimization problem, and the constraints are established. Secondly, the population is initialized by using the sinusoidal chaotic sequence, and then the learning coefficient and variation operator are introduced in the position update stage. Finally, the adaptive t -distribution and dynamic selection probability are imported to improve the search ability of the sparrow search algorithm. Through the simulation experiment of standard test function and the solution of the optimized dispatching model of microgrid, this paper verifies that the proposed algorithm has higher accuracy and faster convergence speed.

Key words: learning factors; mixed strategy improved sparrow search algorithm; microgrid; optimal scheduling

0 引言

微电网在满足用户用电需求、保证电能质量和供电可靠性等方面起着重要作用^[1-2]。然而风、光等分布式能源出力的随机性、间歇性等不确定因素, 会导致微电网运行不稳定, 因此对微电网进行优化调度是十分必要的。微电网的优化调度是在满足负荷需求和相关约束的条件下, 对各分布式电源出力进行合理分配, 从而降低微电网的运行成本和环境成本^[3-5]。

考虑到微电网优化调度的非线性、多约束问题, 目前研究多采用智能优化算法进行求解。文献[6]提

出了一种基于新型生物地理学优化算法含 PG2 系统的微电网优化调度模型, 建立了包含设备运维成本、能量交互成本和碳处理成本的目标函数, 但该算法寻优精度较差, 收敛速度较慢。文献[7]提出了一种结合需求响应的微电网经济优化调度模型, 并用改进的蝙蝠算法对模型进行求解, 降低了微电网的运行成本, 但该模型中缺少环境效益建模。文献[8]提出了基于改进黑洞算法的微电网优化调度方法, 利用差分进化算法交叉、变异操作和粒子群算法惯性参量的概念, 对基本黑洞算法进行改进, 优化结果的成本效益有所提升。文献[9]提出了基于遗传算法的多目标优

基金项目: 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室开放基金项目(GPKLI0CNEPS-2023-KF-02); 江苏师范大学研究生科研与实践创新计划项目(2022XKT0159)。

作者简介: 陈勇弟(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电气工程及自动化; 魏小城(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电气工程及自动化; 张建华(1980-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 电气工程及自动化。

通讯作者: 李飞(1982-), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向: 电力电子与驱动, 谐波抑制和无功补偿。Email: lifei_cumt@126.com

收稿日期: 2023-04-22

化调度方法,以微电网运行的经济性和环保性为目标函数,但该算法存在求解时间长,参数多等缺点。

对于麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)的研究中,文献[10]引入精英反向学习策略,对种群初始化进行改进,增加了种群的数量,但没有增加种群的多样性。文献[11]结合鸟群算法的飞行思想优化麻雀搜索算法,对其搜索方式进行改进,但没有很好地平衡全局最优与局部最优。文献[12]加入非线性变化权重因子来避免算法陷入局部最优,但收敛速度过慢,影响寻优结果。文献[13]提出了一种基于精英反向学习策略和萤火虫算法变异策略的改进型麻雀搜索算法优化的微电网能量管理模型,可有效避免早熟,但优化结果的搜索速度和准确性有待提升。

针对微电网调度模型所用求解算法的问题,本文提出了一种基于Sin混沌序列、变异算子、自适应 t 分布和动态选择概率等多策略混合的改进麻雀搜索算法(Mixed Strategy to Improve Sparrow Search Algorithm, MI-SSA)。这种改进算法在提高种群多样性的同时也提供了优质解,又可以很好地平衡麻雀算法的局部和全局寻优能力。多种策略结合不仅可以减少算法收敛时间,而且避免算法陷入局部最优。最后通过标准测试函数和微电网算例分析,验证了改进的SSA算法在微电网优化调度上的优越性,可以有效提高微电网的经济效益。

1 麻雀搜索算法的改进

1.1 Sin混沌序列

种群初始多样化可以增加种群的寻优范围,从而增加初始解的质量^[14]。Sin混沌具有遍历性和随机性的优点,可以有效解决这一问题。Sin混沌一维映射表达式为^[15]:

$$\begin{cases} X_{n+1} = \sin\left(\frac{\alpha^2 \pi}{e X_n}\right), & n = 0, 1, \dots, N \\ -1 \leq X_n \leq 1, & X_n \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, X_n 的取值范围为 $(-1, 1)$, 且初始值不能为0。将Sin混沌序列映射到解空间,得到种群 $X = \{X_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, $X_j = \{X_j, j = 1, 2, \dots, dim\}$ 。种群个体表达式为:

$$X_{i+1,j} = \sin\left(\frac{\alpha^2 \pi}{e X_{i,j}}\right) \quad (2)$$

其中, $X_{i+1,j}$ 为第 $i + 1$ 个种群的第 j 维值。

1.2 基于学习系数和变异算子的位置更新

针对SSA容易过早收敛,陷入局部最优的问题,本文将学习系数引入到发现者的位置更新公式

中,以增强其全局搜索能力^[16];将变异算子引入到加入者的位置更新公式中,以增强其跳出局部最优的能力。

改进后的发现者位置更新公式为:

$$x_{id}^{t+1} = \begin{cases} v(t)x_{id}^t \cdot \exp\left(\frac{\alpha - i}{e \alpha \cdot T}\right), & R_2 < ST \\ v(t)x_{id}^t + Q \cdot L, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (3)$$

其中, $v(t)$ 是学习系数。

$v(t)$ 的表达式为:

$$v(t) = v_{\min} + (v_{\max} - v_{\min}) \times \sin\left(\frac{\alpha}{e T}\right) \pi \frac{\pi}{\theta} \quad (4)$$

其中, v_{\max} 和 v_{\min} 分别是最大和最小学习系数。

改进后的加入者位置更新公式为:

$$x_{id}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{\alpha^t_{\text{worstd}} - x_{id}^t}{e i^2}\right) + \delta \text{Cauchy}(t), & i > \frac{N}{2} \\ x_{\text{bestd}}^{t+1} + \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D (\text{rand}(-1,1) \cdot |x_{id}^t - x_{\text{bestd}}^{t+1}|), & i \leq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (5)$$

其中, δ 是控制变化的程度; $\text{Cauchy}(t)$ 是服从柯西分布的随机变量。

改进后的警戒者位置更新公式为:

$$x_{id}^{t+1} = \begin{cases} x_{\text{bestd}}^t + \beta(x_{id}^t - x_{\text{worstd}}^t), & f_i \neq f_g \\ x_{\text{bestd}}^t + \beta(x_{\text{worstd}}^t - x_{\text{bestd}}^t), & f_i = f_g \end{cases} \quad (6)$$

1.3 自适应 t 分布和动态选择策略

t 标准高斯分布和Cauchy分布是 t 的2个主要边界分布^[17],三者的关系如图1所示。

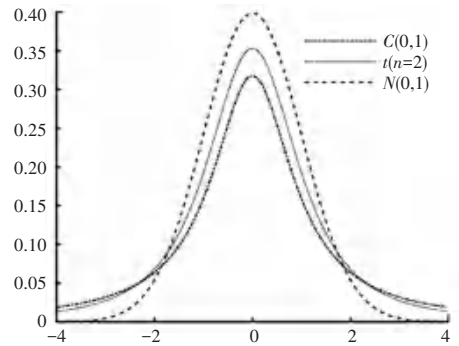


图1 t 分布概率密度函数

Fig. 1 Probability density function of t distribution

本文采用 t 分布对麻雀位置进行变异,提高了算法的收敛速度。然而,当变异程度过大时会导致局部寻优精度不高,因此本文加入自适应变量 θ 来控制 t 分布的变异程度,公式如下:

$$\theta = A \frac{\alpha}{e} - \frac{T}{T_{\text{iter}} + e^{\frac{1}{T}}} \quad (7)$$

其中, A^T 表示限制因子, 为避免因初始阶段变异过大而导致算法陷入局部最优, 文中取 $A = 0.5$ 。

根据定义, 文中对麻雀位置 $X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{id}]$ 进行自适应 t 分布变异:

$$X'_i = X_i + \theta X_i t (T_{iter}) \quad (8)$$

其中, X'_i 表示变异后麻雀的位置; X_i 表示原始麻雀的位置; 在 X_i 基础上增加了干扰项 $\theta X_i t (T_{iter})$, 充分利用当前种群信息进行扰动。让算法能平衡局部和全局搜索能力, 从而提高算法搜索精度。

引入自适应 t 分布变异可以提高算法的搜索能力, 但用于所有个体时, 不仅会增加算法的收敛时间, 而且会增加算法计算的复杂度。所以, 本文加入动态选择概率 p 来对 t 分布变异进行调整。计算过程如下:

$$p = w_1 - w_2 \times (\maxiter - iter) / \maxiter \quad (9)$$

其中, \maxiter 表示最大迭代数; $iter$ 表示当前迭代数; w_1, w_2 表示自适应权重。

MI-SSA 解决了 SSA 过早收敛以及陷入局部最优的问题, 其基本思路是: 利用 Sin 混沌序列产生初始化种群并进入迭代计算; 本次迭代结束后, 根据动态选择概率 p 来执行 t 分布变异, 对当前种群位置进行扰动, 防止其陷入局部最优, 同时也提高了算法的寻优能力。MI-SSA 的具体流程如图 2 所示。

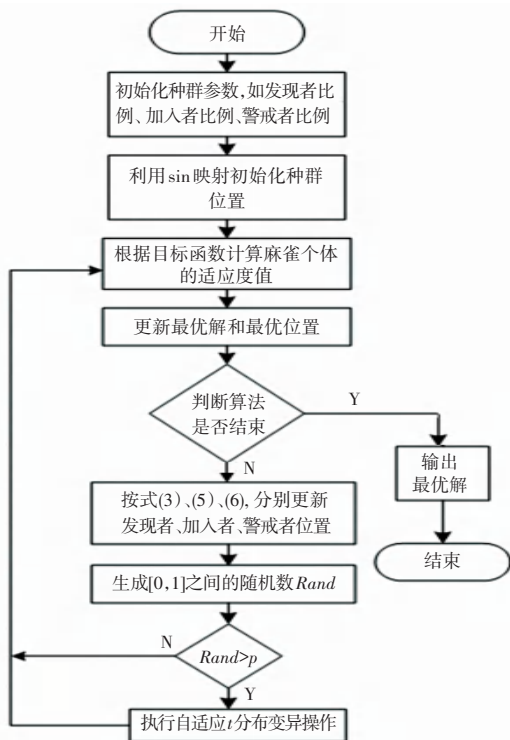


图 2 MI-SSA 的算法流程

Fig. 2 Flow chart of MI-SSA algorithm

2 微电网优化调度模型

微电网的主要设备包括光伏 (photovoltaic, PV)、风力发电机 (wind turbine, WT)、燃料电池 (fuel cell, FC)、蓄电池 (battery, BT)、微型燃气轮机^[18] (micro gas turbine, MT), 系统结构如图 3 所示。

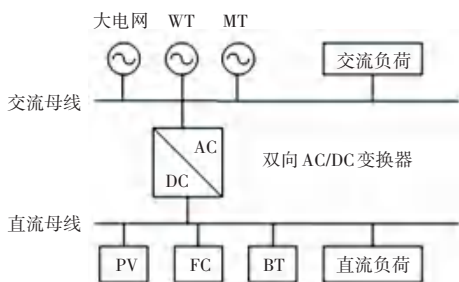


图 3 微电网系统基本结构

Fig. 3 Basic structure of the microgrid system

2.1 分布式电源模型

(1) WT 发电模型。风力发电机的输出功率与风速有关, 其输出功率表示为:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) < v_i, v(t) > v_c \\ \frac{P_r(v^w(t) - v_i^w)}{v_r^w - v_i^w}, & v_i \leq v(t) \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v(t) \leq v_c \end{cases} \quad (10)$$

其中, $P_{WT}(t)$ 、 P_r 分别表示 WT 的输出功率和额定功率; v_i 、 v_c 、 v_r 分别表示风机的切入风速、切出风速、额定风速。

(2) PV 发电模型。光伏电池的输出功率表示为:

$$P_{PV}(t) = P_{STC} f [1 + \alpha_p (T_c - T_{STC})] \frac{G_{AC}}{G_{STC}} \quad (11)$$

其中, f 表示 PV 的输出效率, 文中取 0.95; α_p 表示光伏板的温度系数。

(3) MT 发电模型。MT 输出功率与燃料投放量有关, 其数学模型表示为:

$$C_{MT}(t) = \frac{Q_g}{L_{HVg}} \cdot \frac{P_{MT}(t)}{\eta_{MT}} \Delta t \quad (12)$$

其中, $C_{MT}(t)$ 表示周期 t 内微型燃气轮机的燃料成本; Q_g 表示天然气的价格; L_{HVg} 表示天然气的低热值; $P_{MT}(t)$ 表示周期 t 内微型燃气轮机的输出功率; η_{MT} 表示燃气轮机的输出效率。

(4) BT 充放电模型。BT 可以对系统电能进行存储, 从而对电网负荷起到削峰填谷的作用。BT 储能容量和充放电功率之间的关系可以表示为:

$$C_{SOC}(t) = \begin{cases} C_{SOC}(t - \Delta t)(1 - \delta) - \frac{P_{BT}(t)\Delta t}{\eta_d E_{BT}} \\ P_{BT}(t) \geq 0 \\ C_{SOC}(t - \Delta t)(1 - \delta) - \frac{\eta_c P_{BT}(t)\Delta t}{E_{BT}} \\ P_{BT}(t) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, δ 表示 BT 的自放电率; E_{BT} 表示 BT 的额定容量; η_c, η_d 表示 BT 充放电效率。

(5) FC 发电模型。FC 是一种将化学能转换为电能的装置, FC 燃料成本的数学模型表示为:

$$C_{FC}(t) = \frac{Q_g}{L_{HVg}} \cdot \frac{P_{FC}(t)}{\eta_{FC}} \Delta t \quad (14)$$

2.2 目标函数

以微电网运行的燃料成本、维护成本、能量交互成本和环境成本的总和建立目标函数。时间间隔为 24 h (每个优化周期为 1 h)。

燃料成本 C_F 只考虑 MT 和 FC, 因为 PV 和 WT 不消耗燃料。计算公式如下:

$$C_F = \sum_{t=1}^T (C_{FC}(t) + C_{MT}(t)) \quad (15)$$

分布式发电维护成本为:

$$C_M = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (K_n P_n(t) \Delta t) \quad (16)$$

其中, N 表示分布式电源种类数; K_n 表示第 n 种设备的维护成本系数。

污染气体处理成本为:

$$C_E = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K b_k \left(\sum_{i=1}^N a_{i,k} \cdot P_i \right) \quad (17)$$

其中, k 表示污染物的种类数; b_k 表示处理 k 类污染物的成本; $a_{i,k}$ 表示第 i 个分布式电源排放 k 类污染物的重量。

与电网交互成本为:

$$C_1 = \sum_{t=1}^T (P_{grid}(t) C_{grid}(t) \Delta t) \quad (18)$$

考虑到微电网并网运行的最高经济效益, 建立了经济优化模型。优化目标函数为:

$$f = \min(C_F + C_M + C_E + C_1) \quad (19)$$

2.3 约束条件

为了提高微电网运行经济性, 需对各发电单元进行一定的约束处理, 该约束包括出力平衡、功率上下限、储能装置充/放电以及与电网交互等。对此将展开论述如下。

(1) 功率平衡约束:

$$P_{load}(t) = \sum_{n=1}^N P_n(t) + P_{grid}(t) \quad (20)$$

(2) 交互功率约束:

$$P_{grid, \min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid, \max} \quad (21)$$

(3) 分布式发电装置输出功率限制:

$$P_{n, \min} \leq P_n(t) \leq P_{n, \max} \quad (22)$$

(4) BT 充放电约束:

$$C_{SOC, \min} \leq C_{SOC}(t) \leq C_{SOC, \max} \quad (23)$$

(5) 爬坡速率约束:

$$\begin{cases} |P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1)| \leq P_{MT}^{\max} \\ |P_{FC}(t) - P_{FC}(t-1)| \leq P_{FC}^{\max} \end{cases} \quad (24)$$

其中, P_{MT}^{\max} 和 P_{FC}^{\max} 分别表示 MT 和 FC 的爬坡功率上限。

3 算法性能测试

3.1 比较对象和参数设置

本文选取基本粒子群算法 (PSO)、灰狼优化算法 (GWO)^[19]、基本麻雀算法 (SSA)^[20] 与本文所提的 MI-SSA 进行比较。由 Matlab2019b 编写和完成。在测试中, 每个算法的种群大小设置为 30 个, 迭代次数设置为 500 次, 其他参数见表 1。

表 1 实验参数设置

算法	参数
PSO	$C_1 = C_2 = 2, w = 0.9$
GWO	a 从 2 递减到 0
SSA	$ST = 0.8, PD = 0.2, SD = 0.2$
MI-SSA	$ST = 0.8, PD = 0.2, SD = 0.2$ $V_{\max} = 1, V_{\min} = -1$

3.2 实验结果与分析

本文在表 2 给出的基准测试函数上将每个算法分别独立运行 30 次, 其结果见表 3。

表 2 基准测试函数

类型	函数	维数	范围	最优值
F1	Sphere		$[-100, 100]^{30}$	0
F2	Schweffel2.22	高维	$[-10, 10]^{30}$	0
F3	Schweffel1.2	单峰	$[-100, 100]^{30}$	0
F4	Schweffel2.21		$[-100, 100]^{30}$	0
F5	quartic		$[-1.28, 1.28]^{30}$	0
F6	Rastrigin	高维	$[-5.12, 5.12]^{30}$	0
F7	Ackley	多峰	$[-32, 32]^{30}$	0
F8	Griewank		$[-600, 600]^{30}$	0
F9	Kowalik	低维	$[-5, 5]^4$	0.000 3
F10	Shekel	多峰	$[0, 10]^4$	-10.153 2

表3 函数测试结果

Table 3 Functions test results

统计量	函数	GWO	PSO	SSA	MI-SSA
平均值	F1	1.39E-27	4.32E+02	7.41E-33	6.16E-270
	F2	9.58E-17	4.10E+01	4.71E-30	3.15E-145
	F3	2.51E-05	1.31E+04	1.18E-15	5.02E-272
	F4	5.10E-07	9.54E+00	1.00E-08	1.43E-137
	F5	1.95E-03	6.91E-01	5.69E-04	1.36E-04
	F6	1.95E+00	2.23E+02	0.00E+00	0.00E+00
	F7	1.05E-13	9.17E+00	1.72E-15	8.88E-16
	F8	2.18E-03	7.31E+00	0.00E+00	0.00E+00
	F9	5.21E-03	1.02E-02	4.05E-04	3.12E-04
	F10	-8.798 27	-8.758 782	-6.924 33	-10.153 17
标准差	F1	1.89E-27	2.13E+02	3.54E-32	0.00E+00
	F2	7.46E-17	2.25E+01	1.92E-29	1.62E-144
	F3	4.81E-05	6.68E+03	3.12E-15	0.00E+00
	F4	4.65E-07	2.69E+00	5.11E-08	7.71E-137
	F5	9.80E-04	1.76E+00	3.69E-04	1.12E-04
	F6	2.96E+00	2.95E+01	0.00E+00	0.00E+00
	F7	1.64E-14	5.30E+00	1.50E-15	3.94E-31
	F8	5.88E-03	1.61E+01	0.00E+00	0.00E+00
	F9	8.41E-03	9.11E-03	1.57E-04	1.75E-05
	F10	2.24E+00	2.55E+00	2.46E+00	1.80E-04

从表3可以看出,在高维单峰测试函数中,本文提出的MI-SSA标准差小、稳定性高,优化效果优于其他算法。在高维多峰测试函数中,MI-SSA与SSA的寻优能力相当,都可以找到最佳值。在F9函数中,MI-SSA比其他算法有更好的稳定性和寻优能力;在F10函数中,对比其他算法MI-SSA可以直接找到最优值,标准差最小、稳定性更强。

本文根据迭代次数和适应度大小绘制了测试函数寻优曲线,如图4所示。从函数F1和F4的收敛曲线可以看出MI-SSA的收敛速度快,寻优能力强;对于F8函数来说,GWO、SSA和MI-SSA经过一定的迭代都能找到最优值,但是MI-SSA在迭代30次左右就找到了最优值,所以有更快的寻优速度;对于测试函数F10,所有算法的收敛曲线最后都逐渐稳定,但是GWO、SSA、MI-SSA的收敛效果更好,MI-SSA与SSA相比,在收敛速度上有很大提升。

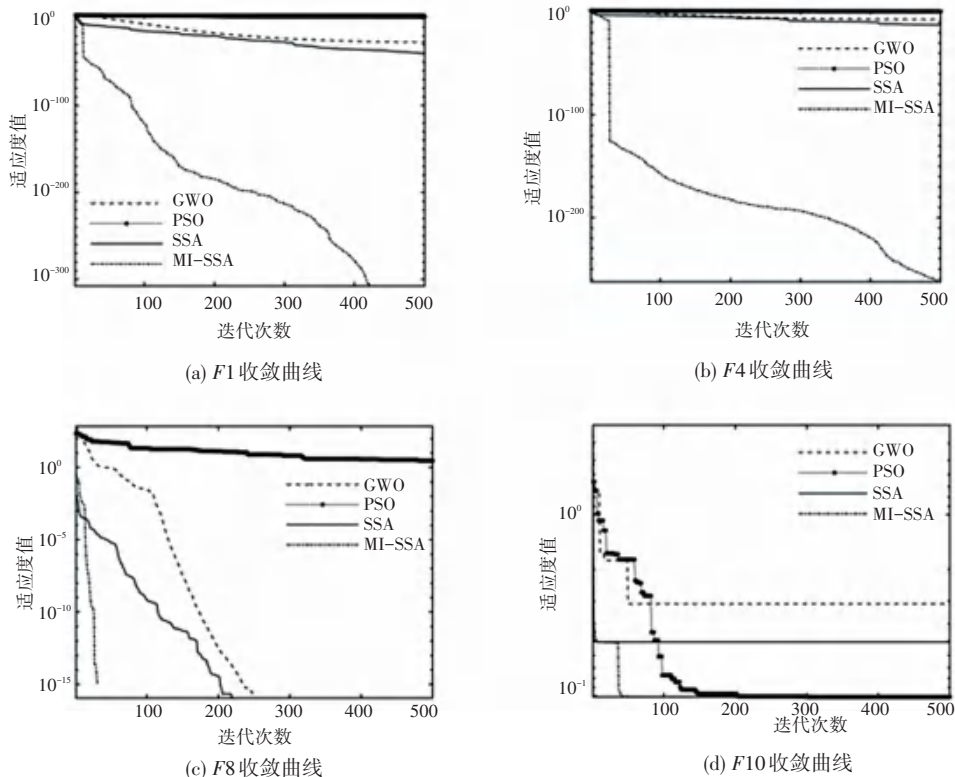


图4 测试函数收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve of the test functions

4 算例仿真

4.1 微电网的基本参数

微电网与电网的交互功率约束为20 kW。表4和表5列出了某地区微电网系统各单元的运行参数和相应的各污染物排放系数。表6为该地区微电网

分时电价。根据负荷用电,将一天分为3个时段来进行优化调度:22:00~7:00为谷时、10:00~14:00与19:00~22:00为峰时、7:00~10:00与14:00~19:00为平时。风、光作为可再生能源,消耗成本较低,在微电网调度中应优先考虑。微电网的日负荷曲线、WT出力曲线和PV出力曲线如图5所示。

表4 各分布式电源有关参数

Table 4 Relevant parameters of each distributed power source

微电源类型	额定功率/kW	出力上限/kW	出力下限/kW	爬坡约束/(kW·min ⁻¹)	运行维护费用/(元·kW ⁻¹)
PV	20	40	0	—	0.010 0
WT	40	20	0	—	0.298 0
MT	65	65	0	10	0.031 0
FC	40	50	0	2	0.087 0
BT	40	20	-20	—	0.001 2

表5 污染物排放系数

Table 5 Pollutant emission coefficients

污染物种类	处理成本/(元·g ⁻¹)	污染物排放量/(g·(kW·h) ⁻¹)	
		MT	FC
CO	0.011	0.048	0.001
NO	0.063	0.200	0.015
SO ₂	0.027	0.013	0.002

表6 分时电价参数

Table 6 Time-of-use electricity price parameters 元·(kW·h)⁻¹

时期	购电价	售电价
谷时	0.49	0.28
峰时	1.10	0.85
平时	0.83	0.58

表7 麻雀种群初始参数

Table 7 Initial parameters of sparrow population

参数	数值
种群个体数	100
迭代次数	1 000
预警值	0.6
发现者比例	0.8
警戒者比例	0.2

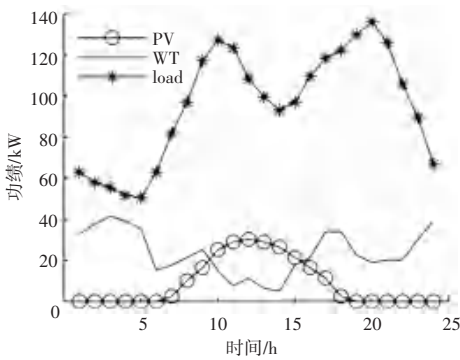


图5 WT、PV及负荷出力

Fig. 5 WT, PV and load output

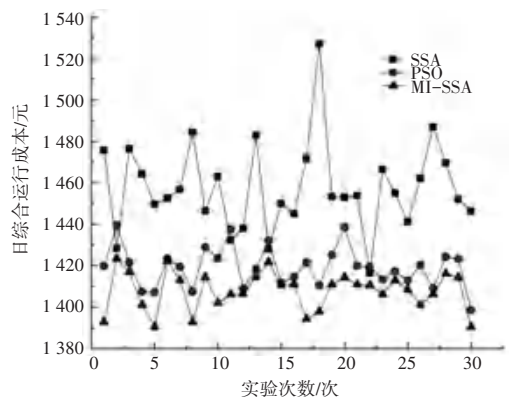


图6 成本曲线对比

Fig. 6 Cost curve comparison

4.2 仿真结果与分析

设置麻雀种群的初始参数,见表7。采用MI-SSA对微电网模型求解,设置相同的种群和迭代次数,并将结果绘制成曲线与SSA、PSO进行对比分析,结果如图6所示;得到的平均值、标准差、最小值和中位数的比较结果见表8;FC、MT和BT出力曲线图如图7所示;微电网与电网的电能交互情况如图8所示。

表8 成本结果对比

Table 8 Cost results comparison

算法	日综合运行成本			
	平均值	标准差	最小值	中位数
SSA	1 457.58	21.31	1 416.41	1 453.51
PSO	1 411.72	15.78	1 378.45	1 410.58
MI-SSA	1 395.37	12.47	1 368.59	1 397.55

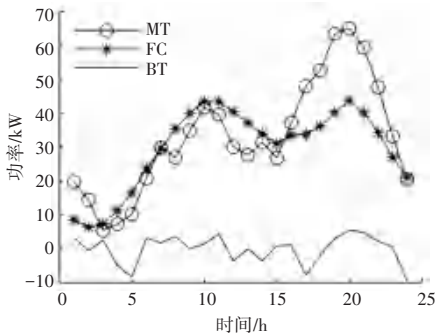


图7 FC、MT和BT出力曲线

Fig. 7 FC, MT and BT output curves

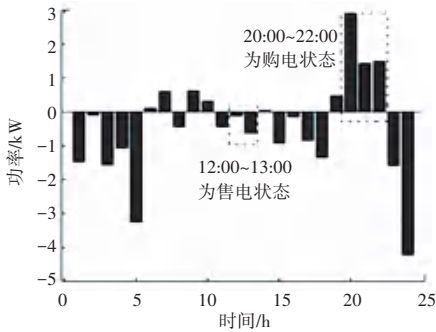


图8 电能交互

Fig. 8 Power interaction

由图6和表8可以发现,SSA的曲线波动最大,求解结果最差;PSO的求解结果和稳定性与SSA相比有所提高;而MI-SSA在平均值、标准差、最小值和中值等方面具有优势,稳定性好,求解精度高。由图7、图8可知,当风电充足时,以12:00~13:00为例,风光发电和电池放电可以满足大部分负荷用电需求,且FC和MT的总出力比较大,可将多余电量给电池充电并进行售卖获利。由于夜间光照较弱,风、光输出功率偏低,以20:00~22:00为例,此时负荷较大,微电网中各电源总出力已不能满足负荷需求,此时需向电网购买一定电量。

从以上分析得出,本文提出的MI-SSA可以根据负荷用电的需求,合理地分配各微电源的出力,从而降低微电网的运行成本。

5 结束语

针对传统SSA收敛速度慢,寻优能力差等问题,本文在SSA的基础上提出了MI-SSA。并通过标准测试函数仿真实验和微电网算例求解,得到以下结论:

(1) 10个基准测试函数表明,MI-SSA在求解精

度、收敛速度及算法稳定性方面都优于SSA、GWO、PSO,验证了改进算法的优越性。

(2) MI-SSA能够有效降低微电网的运行经济成本,验证了微电网运行模型的有效性。

参考文献

- [1] ALOTAIBI I, ABIDO M A, KHALID M, et al. A comprehensive review of recent advances in smart grids: A sustainable future with renewable energy resources[J]. *Energies*, 2020, 13(23): 6269.
- [2] 宋扬, 石勇, 刘宝泉, 等. 基于反向变异麻雀搜索算法的微电网优化调度[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(2): 163-170.
- [3] 王尧, 谭彩霞, 王佳伟, 等. 分时电价机制下计及用户需求响应的微网优化调度模型[J]. *智慧电力*, 2020, 48(10): 9-15.
- [4] 滕德云, 滕欢, 刘鑫, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的多目标无功优化调度[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2019, 40(3): 123-128.
- [5] 王亚东, 崔承刚, 钱申晟, 等. 基于深度强化学习的微电网储能调度策略研究[J]. *可再生能源*, 2019, 37(8): 1220-1228.
- [6] 魏利胜, 杨奔奔, 孙瑞霞. 基于新型BBO算法的微电网优化调度研究[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(5): 1075-1085.
- [7] 沈艳军, 杨博. 需求响应的微电网优化调度及改进的蝙蝠算法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 120-125.
- [8] 全年, 李燕青, 申宏威, 等. 基于改进黑洞算法的微电网优化调度[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(5): 113-119.
- [9] 李家鑫. 基于遗传算法的多目标微电网优化调度研究[J]. *中国设备工程*, 2022(3): 137-139.
- [10] 冯增喜, 李诗妍, 赵锦彤, 等. 基于精英反向学习策略的麻雀搜索算法[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(1): 378-381, 393.
- [11] 吕鑫, 慕晓冬, 张钧. 基于改进麻雀搜索算法的多阈值图像分割[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(2): 318-327.
- [12] 宋扬, 石勇, 刘宝泉, 等. 基于改进麻雀搜索算法的机场微电网优化调度策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(3): 33-40.
- [13] NGUYEN T T, NGO T G, DAO T K, et al. Microgrid operations planning based on improving the flying sparrow search algorithm[J]. *Symmetry*, 2022, 14(1): 168.
- [14] DOKEROGLU T, SEVINC E, KUCUKYILMAZ T, et al. A survey on new generation metaheuristic algorithms[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 137: 106040.
- [15] 罗仕杭, 何庆. 融合Sin混沌和分段权值的阿基米德优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(14): 63-72.
- [16] MA Bing, LU Pengmin, ZHANG Lufan, et al. Enhanced sparrow search algorithm with mutation strategy for global optimization[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 159218-159261.
- [17] 周方俊, 王向军, 张民. 基于t分布变异的进化规划[J]. *电子学报*, 2008, 36(4): 667-671.
- [18] 杨欢红, 唐芑芑, 黄文焘. 考虑用户满意度的基于需求侧管理的微电网多目标优化调度[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(6): 110-116.
- [19] 裴立冠, 刘经东, 马春波. 基于灰狼算法的笛条幕干扰构造方法研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2024, 46(2): 437-445.
- [20] XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.