

基于改进樽海鞘群算法的区域 综合能源系统优化调度

万 锴¹, 刘 闯², 陈 磊²

(1. 国网湖北超高压公司, 湖北 武汉 430000; 2. 国网湖北省电力有限公司荆门供电公司,
湖北 荆门 448000)

摘要:为降低区域综合能源的碳排放量,提高其经济性,文中建立了以运行成本和环境成本最小为目标函数的区域综合能源系统优化调度模型。利用莱维飞行和非线性收敛因子策略对樽海鞘群算法进行改进,得到改进樽海鞘群算法,提升了算法的全局搜索性能和收敛能力。采用改进樽海鞘群算法对区域综合能源系统优化调度模型进行求解,结果表明,改进樽海鞘群算法在经过47次迭代后就找到了最优解为2536.24元,相比其他算法,迭代次数和收敛时间更少,求解精度更高。根据改进樽海鞘群算法的调度方案,各设备出力合理,系统运行的经济性和环保性较好,验证了所提区域综合能源系统优化调度模型和求解方法的实用性。

关键词:区域综合能源系统; 优化调度; 改进樽海鞘群算法; 莱维飞行; 收敛因子

中图分类号: TM 721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)02-0039-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230207

Optimal Dispatching of Regional Integrated Energy System Based on Improved Salp Swarm Algorithm

WAN Kai¹, LIU Chuang², CHEN Lei²

(1. State Grid Hubei Extra High Voltage Company, Wuhan 430000, Hubei, China; 2. State Grid
Jingmen Electric Power Supply Company, Jingmen 448000, Hubei, China)

Abstract: In order to reduce the carbon emissions of regional integrated energy and improve its economy, an optimal dispatching model of regional integrated energy system is established with the objective function of minimizing the operating cost and environmental cost. Levy flight and nonlinear convergence factor strategy are used to improve salp swarm algorithm, and an improved salp swarm algorithm is obtained, which improves the global search performance and convergence ability of the algorithm. Then, the improved salp swarm algorithm is used to solve the optimal dispatching model of regional integrated energy system. The results show that the improved salp swarm algorithm finds the optimal solution of 2536.24 yuan after 47 iterations. Compared with other algorithms, the number of iterations and the convergence time are less, and the solution accuracy is higher. According to the dispatching scheme based on the improved salp swarm algorithm, the output of each equipment is reasonable, and the economy and environmental protection of system operation are good, which verifies the practicability of the proposed optimal dispatching model and solution method of regional integrated energy system.

Key words: regional integrated energy system; optimal dispatching; improved salp swarm algorithm; Levy flight; convergence factor

0 引言

随着经济的发展和人们环保意识的提高,化石能源过量消耗带来的环境问题已不容忽视。世界各国专家学者就如何提高不同能源的互补性和可再生能源的利用率进行了大量研究^[1-2]。区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES)由电、热、气等多种能源构成,该系统不仅能够满足负荷需求,还具有较好的经济性和灵活性,有利于提升清洁能源的消纳能力^[3-5]。但 RIES 内部能源种类众多,各能源出力特点各不相同,为了提升 RIES 经济性和稳定性,需要对其进行优化调度。

区域综合能源系统优化调度是一个非线性优化问题,常用的方法有启发式算法、非线性规划法和人工智能法^[6-7]。相比其他算法,人工智能法效率更高,计算结果更准确,目前得到了广泛应用。文献[8]以 RIES 运行成本最小为目标函数,综合考虑各类约束条件,建立了基于粒子群算法的 RIES 优化调度模型,并采用实际算例验证了模型的正确性和粒子群算法的有效性。文献[9]对含有燃气轮机、光伏、电锅炉、电制冷剂 and 溴化锂制冷机的综合能源系统优化调度进行了研究,建立了以系统总运行成本和二氧化碳惩罚成本最小的 RIES 优化调度模型,采用模拟退火粒子群算法对模型进行了求解,获得了最优调度方案。文献[10]根据综合能源系统内部各设备的运行特点分别建立出力模型,以园区综合能源系统运行成本最小为目标函数,并考虑各类运行约束,建立了基于运行成本的综合能源系统优化调度模型,并采用改进蚱蜢算法对模型进行了求解,结果表明该调度模型能够降低运行成本,提高风光消纳能力,提升经济效益和环保效益。现有研究对冷热电联供的综合能源系统研究较少,考虑冷热电联供的 RIES 优化调度有待进一步研究。

下面以区域综合能源系统运行成本和环境成本最小为目标函数,综合考虑各类运行约束,建立基于改进樽海鞘群算法(improved salp swarm algorithm, ISSA)的 RIES 优化调度模型,运用实际算例验证模型的正确性和实用性。

1 RIES 优化调度模型

所建 RIES 的负荷有电、热、冷 3 种,具体如图 1

所示。其中,供给电负荷的设备有风电、光伏、大电网、微型燃气轮机和蓄电池;供给热负荷的设备有电锅炉、储热装置和热回收装置;供给冷负荷的设备有电制冷机、储冷装置、吸收式制冷机。

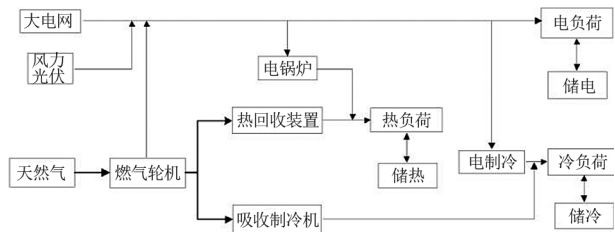


图 1 RIES 结构

1.1 目标函数

RIES 在运行过程中的成本主要包括两部分:一部分是系统内各设备正常运行产生的运行维护成本;另一部分是消耗化石能源产生二氧化碳带来的环境惩罚成本^[11]。

运行维护成本的表达式为

$$C_F = \sum_{t=1}^T C_p(t) P_{\text{grid}}(t) + \sum_{t=1}^T C_g(t) P_{\text{gas}}(t) + \sum_{i=1}^8 C_i P_i \quad (1)$$

式中: C_F 为系统总运行维护成本; T 为调度周期; $C_p(t)$ 为 t 时刻的电价; $P_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻 RIES 向大电网的购电功率; $C_g(t)$ 为 t 时刻天然气的单价; $P_{\text{gas}}(t)$ 为 t 时刻的购气量; C_i 为调度周期内第 i 台设备单位功率的维护成本; P_i 为调度周期内第 i 台设备的总输出功率。

环境惩罚成本的表达式为

$$C_E = W \cdot \sum_{t=1}^T [\delta \cdot P_{\text{grid}}(t) + \varepsilon \cdot P_{\text{gas}}(t)] \quad (2)$$

式中: C_E 为系统环境惩罚成本; W 为二氧化碳惩罚系数; δ 为向大电网购电产生二氧化碳的排放因子; ε 为使用天然气产生二氧化碳的排放因子。

综上所述,RIES 优化调度的总成本目标为

$$\min C = \min(C_F + C_E) \quad (3)$$

式中, C 为综合能源系统优化调度的总成本。

1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

功率平衡约束 RIES 的电、热、冷设备功率之间的平衡,电功率平衡的表达式为

$$P_{\text{grid}} + P_{\text{MT}} + P_{\text{BAT}} + P_{\text{PV}} + P_{\text{WT}} - P_{\text{boi}} - P_{\text{EC}} - P_{\text{load}} = 0 \quad (4)$$

式中: P_{MT} 为燃气轮机输出功率; P_{BAT} 为蓄电池充放

电功率,充电为正,放电为负; P_{PV} 为光伏输出功率; P_{WT} 为风电输出功率; P_{boi} 为电锅炉的耗电功率; P_{EC} 为电制冷机的耗电功率; P_{load} 为系统用电负荷。

热功率平衡约束的表达式为

$$Q_{boi} + Q_{WH} + Q_{HOT} - Q_{load} = 0 \quad (5)$$

式中: Q_{boi} 为电锅炉的热功率; Q_{WH} 为热回收装置的热功率; Q_{HOT} 为储热装置的热功率,放热为正,储热为负; Q_{load} 为系统热负荷。

冷功率平衡约束的表达式为

$$I_{AC} + I_{EC} + I_{COOL} - I_{load} = 0 \quad (6)$$

式中: I_{AC} 为吸收式制冷机的制冷功率; I_{EC} 为电制冷机的制冷功率; I_{COOL} 为储冷装置的冷功率,放冷为正,储冷为负; I_{load} 为系统冷负荷。

2) 设备出力约束

$$P_{grid.min} \leq P_{grid} \leq P_{grid.max} \quad (7)$$

$$P_{MT.min} \leq P_{MT} \leq P_{MT.max} \quad (8)$$

$$Q_{boi.min} \leq Q_{boi} \leq Q_{boi.max} \quad (9)$$

$$I_{EC.min} \leq I_{EC} \leq I_{EC.max} \quad (10)$$

$$I_{AC.min} \leq I_{AC} \leq I_{AC.max} \quad (11)$$

式中: $P_{grid.max}$ 、 $P_{grid.min}$ 分别为购电功率上限和下限; $P_{MT.max}$ 、 $P_{MT.min}$ 分别为燃气轮机输出功率上限和下限; $Q_{boi.max}$ 、 $Q_{boi.min}$ 分别为电锅炉热功率上限和下限; $I_{EC.max}$ 、 $I_{EC.min}$ 分别为吸收式制冷机制冷功率的上限和下限; $I_{AC.max}$ 、 $I_{AC.min}$ 分别为电制冷机制冷功率的上限和下限。

3) 储能约束

储能约束包括蓄电池、储热装置和储冷装置各类约束,蓄电池储能约束的表达式为

$$\begin{cases} E_{BAT.min} \leq E_{BAT} \leq E_{BAT.max} \\ P_{BAT.min} \leq P_{BAT} \leq P_{BAT.max} \\ E_{start}^{BAT} = E_{end}^{BAT} \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_{BAT} 为蓄电池容量; $E_{BAT.max}$ 、 $E_{BAT.min}$ 分别为蓄电池容量的上限和下限; $P_{BAT.max}$ 、 $P_{BAT.min}$ 分别为蓄电池输出功率的上限和下限; E_{start}^{BAT} 、 E_{end}^{BAT} 分别为蓄电池在调度周期开始时和结束时的容量。

储热装置储热约束的表达式为

$$\begin{cases} E_{HOT.min} \leq E_{HOT} \leq E_{HOT.max} \\ Q_{HOT.min} \leq Q_{HOT} \leq Q_{HOT.max} \\ E_{start}^{HOT} = E_{end}^{HOT} \end{cases} \quad (13)$$

式中: E_{HOT} 为储热装置的容量; $E_{HOT.max}$ 、 $E_{HOT.min}$ 分别为储热装置容量的上限和下限; $Q_{HOT.max}$ 、 $Q_{HOT.min}$

分别为储热装置热功率的上限和下限; E_{start}^{HOT} 、 E_{end}^{HOT} 分别为蓄电池在调度周期开始时和结束时的容量。

储冷装置储冷约束的表达式为

$$\begin{cases} E_{COOL.min} \leq E_{COOL} \leq E_{COOL.max} \\ I_{COOL.min} \leq I_{COOL} \leq I_{COOL.max} \\ E_{start}^{COOL} = E_{end}^{COOL} \end{cases} \quad (14)$$

式中: E_{COOL} 为储冷装置的容量; $E_{COOL.max}$ 、 $E_{COOL.min}$ 分别为储冷装置容量的上限和下限; $I_{COOL.max}$ 、 $I_{COOL.min}$ 分别为储冷装置热功率的上限和下限; E_{start}^{COOL} 、 E_{end}^{COOL} 分别为蓄电池在调度周期开始时和结束时的容量。

2 改进樽海鞘群算法

2.1 樽海鞘群算法

樽海鞘群算法(salp swarm algorithm, SSA)是近年来由数学家 Mirjalili 等人提出的一种元启发式算法^[12],原理是模仿海洋中樽海鞘的群体觅食行为。在觅食过程中,樽海鞘群分为领导者和追随者,领导者领导追随者向食物源靠拢。设食物源为 G ,在 d 维空间中,樽海鞘群体所在位置矩阵定义为 $S_{n \times d}$; 矩阵 S 中元素 $s_{i,j}$ 表示在第 j 维搜索空间中第 i 个樽海鞘的位置; n 为樽海鞘种群的数量。

樽海鞘群算法在优化过程中,根据食物源的位置对领导者的位置进行更新,其表达式为

$$s_{1,j} = \begin{cases} G_j + r_1[(u_j - l_j)r_2 + l_j], r_3 \geq 0.5 \\ G_j - r_1[(u_j - l_j)r_2 + l_j], r_3 < 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

式中: G_j 为樽海鞘群领导者的位置; u_j 为第 j 维的上限; l_j 为第 j 维的下限; r_1 、 r_2 、 r_3 均为系数,其中 r_1 、 $r_2 \in [0,1]$ 。 r_1 的计算方法为

$$r_1 = 2e^{-\left(\frac{4t}{T}\right)^2} \quad (16)$$

式中: t 为迭代次数; T 为算法设置的最大迭代次数。

追随者向领导者移动,其位置更新公式的表达式为

$$s_{i,j} = \frac{1}{2}(s_{i,j} + s_{i-1,j}) \quad (17)$$

式中: $s_{i,j}$ 为第 j 维搜索空间中第 i 个樽海鞘的位置; $s_{i-1,j}$ 为第 j 维搜索空间中第 $i-1$ 个樽海鞘的位置; $2 \leq i \leq n$ 。

从樽海鞘群算法的寻优过程可以看出,SSA 原理

简单,容易实现,但在寻优过程中容易陷入局部极值。

2.2 改进樽海鞘群算法

针对 SSA 算法中存在的不足,采用莱维飞行和非线性收敛因子等策略对其进行改进。

1) 莱维飞行^[13]

莱维飞行能够提高樽海鞘种群的多样性,为此在樽海鞘群领导者的位置更新过程中引入莱维飞行策略,以增强算法的全局搜索性能,有效避免算法陷入局部最优解。具体改进如下:

$$s_{1,j} = \begin{cases} G_j + L_{\text{evy}}(d) \times [(u_j - l_j)r_2 + l_j], r_3 \geq 0.5 \\ G_j - L_{\text{evy}}(d) \times [(u_j - l_j)r_2 + l_j], r_3 < 0.5 \end{cases} \quad (18)$$

$$L_{\text{evy}}(d) = 0.01 \times \frac{r_4 \times \sigma}{|r_5|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (19)$$

$$\sigma = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (20)$$

式中: L_{evy} 为莱维飞行; r_4 、 r_5 均为随机数,取值区间为 $[0,1]$; Γ 为 Gamma 函数,其概率分布的方差与均值都是无界的。

莱维飞行的步长采用大量短距离步长和少量长距离步长交替的方式变化,能够增大搜索空间,提高优化性能。

2) 非线性收敛因子^[14]

在 SSA 算法中,樽海鞘群追随者的位置是由上一个体和当前个体的位置决定的,这样不利用算法收敛,为此,在这一过程中引入非线性收敛因子,以提高算法的收敛能力。具体改进为

$$s_{i,j} = \frac{1}{2}(s_{i,j} + D \times s_{\text{best}}) \quad (21)$$

式中: s_{best} 为当前最优个体位置; D 为非线性收敛因子,其作用是调整最优值的比重,使算法快速收敛,其表达式为

$$D = \frac{1}{2} \left[\tan\left(\pi \times \frac{T}{t}\right) + c_{\min} + c_{\max} \right] \quad (22)$$

式中, c_{\min} 、 c_{\max} 均为学习因子。

仿真分析表明,采用莱维飞行和非线性收敛因子等策略改进的樽海鞘群算法的全局搜索性能和收敛能力大大提升,使算法能够快速收敛至全局最优解。

3 模型求解

考虑 RIES 优化调度模型目标函数和约束条件的复杂性,采用 ISSA 算法对模型进行求解,求解流

程如图 2 所示,详细步骤为:

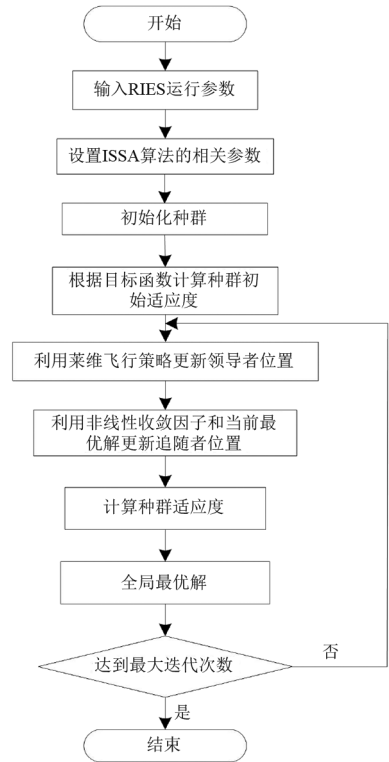


图 2 求解流程

- 1) 设置调度周期和综合能源系统运行参数,包括各设备出力上下限、分时电价、天然气价等;
- 2) 设置改进樽海鞘群算法的相关参数,包括种群数量、最大迭代次数、学习因子等;
- 3) 初始化樽海鞘种群,并根据式(3)目标函数计算个体初始适应度值;
- 4) 利用式(18)莱维飞行策略更新樽海鞘种群中领导者的位置;
- 5) 利用式(21)非线性收敛因子和当前最优解更新樽海鞘种群中追随者的位置;
- 6) 计算种群适应度值并输出全局最优解;
- 7) 判断算法是否达到最大迭代次数,若“是”结束计算,否则返回步骤 4。

4 算例分析

为了验证所提的 RIES 优化调度模型和改进樽海鞘群的正确性,以图 1 中的区域综合能源系统为例进行算例分析,系统中各设备运行参数可参考文献[15-16]。设置调度为 24 h,天然气单价为 3.15 元/m³,图 3 中给出了光伏、风电及电、热、冷负荷的预测曲线。

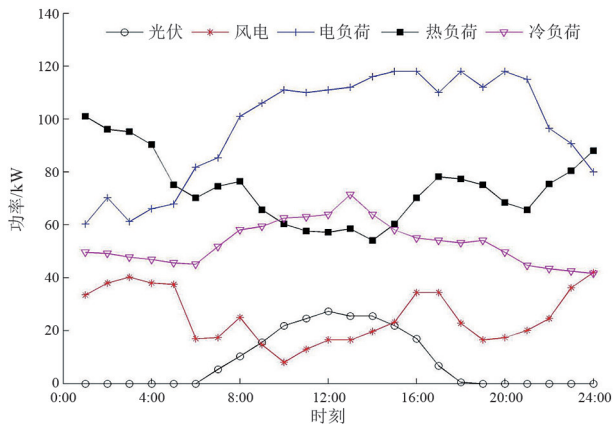


图 3 光伏、风电及电、热、冷负荷的预测曲线

系统向大电网购电采用分时电价,具体如表 1 所示。

表 1 分时电价

时间范围	时段	电价/(元·(kWh) ⁻¹)
10:00—15:00, 18:00—21:00	峰时	1.066
0:00—7:00, 23:00—24:00	谷时	0.295
7:00—10:00, 15:00—18:00, 21:00—23:00	平时	0.632

ISSA 算法的参数设置为:樽海鞘种群 $n = 30$;最大迭代次数 $T = 300$;学习因子 $c_{\min} = 0.004$ 、 $c_{\max} = 1$ 。

在 Matlab 中进行仿真计算,采用 ISSA 算法对区域综合能源系统优化调度模型进行求解,燃气轮机输出功率、电锅炉输出功率、电制冷机输出功率、购电功率和吸收式制冷机输出功率的变化曲线如图 4 所示。蓄电池、储热装置和储冷装置的功率变化曲线如图 5 所示。

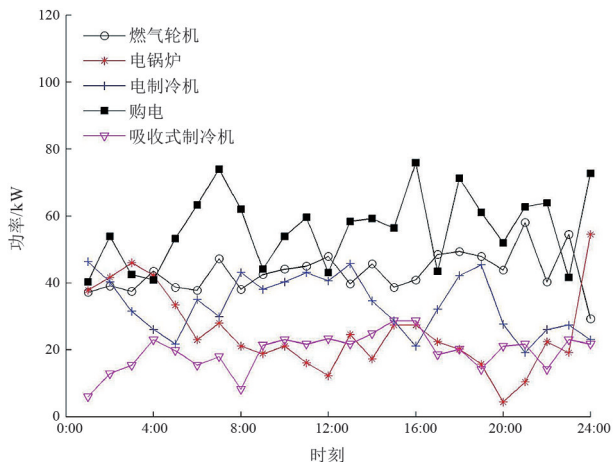


图 4 各设备出力曲线

结合图 3—图 5 可以看出,在 0:00—7:00 时,电负荷相对较大,热负荷相对较小,冷负荷最小。在这一时段,燃气轮机和电制冷机以较小的输出功率工作,为了满足系统热负荷需求,电锅炉输出功率较

大。由于这一时段电价较低,RIES 向大电网购电以满足系统用电需求,蓄电池也利用购电功率进行充电,储热装置和储冷装置分别处于放热状态和储冷状态。

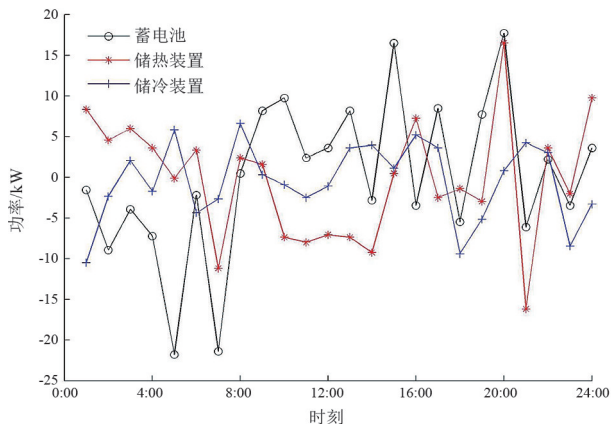


图 5 各储能装置功率变化曲线

在 7:00—15:00 时:电负荷逐渐增大,在 15:00 时近乎达到峰值;热负荷逐渐降低,在 14:00 时达到最小;冷负荷先增大后减小,在 13:00 时达到峰值。在这一时段,燃气轮机以较大的输出功率工作,并产生较大的余热,此时电锅炉输出功率较小,热负荷由热回收装置和电锅炉一起提供,电制冷机输出功率较小,吸收式制冷机输出功率较大,冷负荷由二者共同提供。这一时段中的 7:00—10:00 时,电价处于平时电价,为了满足电负荷需求,RIES 的购电功率逐渐增大。在 10:00—15:00 时,电价处于峰时电价,为了降低购电成本,购电功率相对较小,蓄电池释放电能供系统使用,储热装置和储冷装置分别处于储热状态和放冷状态。

在 15:00—21:00 时,电负荷整体较大,热负荷整体较大,冷负荷整体较小。此时,微型燃气轮机仍输出较大功率并产生较高热量,电锅炉输出功率较小,蓄电池整体呈放电状态。

为了对比 ISSA 算法的优化效果,分别采用 SSA 算法、粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 和灰狼优化算法 (grey wolf optimization, GWO) 进行对比分析。SSA 算法的参数设置同 ISSA 算法,PSO 算法和 GWO 算法相关参数设置可参考文献 [17] 和文献 [18]。设置最大迭代次数为 300,在 Matlab 中进行仿真计算。采用 4 种算法分别对目标函数进行优化求解,4 种算法分别实验 30 次的迭代结果如图 6 所示。由图 6 可知,ISSA 算法优化结果的波动范围区间为 [2500, 2700],整体优化效果稳定性好于其他 3 种算法。

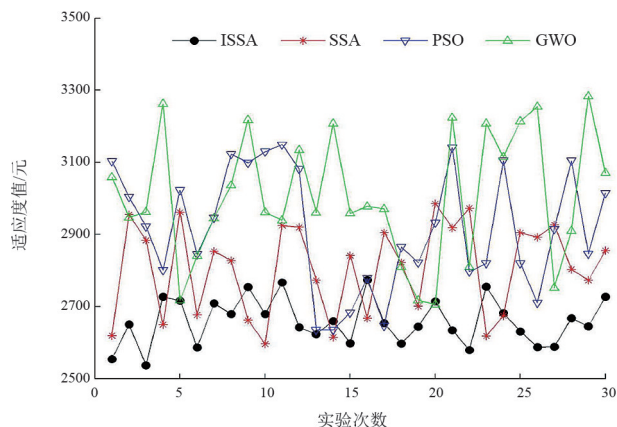


图 6 4 种优化算法迭代效果对比

表 2 给出了 4 种优化算法在图 6 中取得最小适应度值的相关参数。由表 2 可知:在迭代次数方面,ISSA 算法的收敛次数为 47 次,相比其他算法的收敛次数减少一半以上;在收敛时间方面,ISSA 算法的收敛时间为 2.74 s,相比其他算法明显缩短;从最优解上看,ISSA 算法计算的总成本为 2 536.24 元,低于其他算法。由此可见,ISSA 算法能够缩短收敛时间,提高计算精度。

表 2 4 种算法对比

优化算法	收敛次数	收敛时间/s	最优解/元
ISSA 算法	47	2.74	2 536.24
SSA 算法	102	4.45	2 595.75
PSO 算法	97	5.25	2 634.56
GWO 算法	122	5.74	2 704.85

5 结 论

以区域综合能源系统运行成本和环境成本最小为目标函数,采用莱维飞行和非线性收敛因子策略对樽海鞘群算法进行改进,建立基于改进樽海鞘群算法的区域综合能源系统优化调度模型,采用实际算例进行仿真分析,并与其他优化算法对比。结果表明,ISSA 算法在收敛次数、收敛时间和计算精度方面均优于其他算法,验证了所提区域综合能源系统优化调度模型正确性和实用性。

参考文献

- [1] 朱浩昊,朱继忠,李盛林,等.电-热综合能源系统优化调度综述[J].全球能源互联网,2022,5(4):383-397.
- [2] 李楠,柳玉宾,王恒涛,等.综合能源系统优化调度研究综述[J].能源与节能,2021(10):58-59.
- [3] 马喜平,沈渭程,甄文喜,等.基于低碳目标的电气综合

能源系统优化调度策略研究[J].电网与清洁能源,2021,37(12):116-122.

- [4] 林威,靳小龙,叶荣.面向区域综合能源系统的分布式优化调度方法[J].电力建设,2021,42(11):44-53.
- [5] 郁丹,杨鹏,唐人,等.基于随机微分方程的区域综合能源系统优化调度方法[J].供用电,2022,39(5):89-95.
- [6] 姜涛,许真,张劲松,等.考虑源-储协同优化的区域综合能源系统经济调度[J].浙江电力,2022,41(2):20-28.
- [7] 刘自发,谭雅之,李炯,等.区域综合能源系统规划关键问题研究综述[J].综合智慧能源,2022,44(6):12-24.
- [8] 李聪,秦立军,段惠.基于改进群搜索算法的含光伏发电的配电网优化重构研究[J].太阳能学报,2022,43(4):213-218.
- [9] 姚健,刘爱军.基于粒子群算法的区域综合能源优化调度方法[J].电力需求侧管理,2022,24(4):67-72.
- [10] 陈克文,撤奥洋,周生奇,等.含冷热电联供的综合能源系统优化调度[J].电子设计工程,2022,30(5):46-50.
- [11] 李良余,马守达,盛晏.基于经济性和环保性的区域综合能源系统优化调度研究[J].上海电力学院学报,2019,35(5):503-509.
- [12] 张凡,王雷,赵娟,等.樽海鞘群算法在电力系统最优潮流计算中的应用[J].分布式能源,2021,6(1):35-43.
- [13] 张严,秦亮曦.基于 Levy 飞行策略的改进樽海鞘群算法[J].计算机科学,2020,47(7):154-160.
- [14] 郑洪清,彭石燕,周永权.融合收敛因子和樽海鞘群的蝴蝶优化算法[J].微电子学与计算机,2021,38(10):28-34.
- [15] 王文静,于立涛,撤奥洋,等.基于 MOABC 算法的冷热电联供系统优化调度研究[J].电力需求侧管理,2019,21(4):48-53.
- [16] 侯旭倩.电-气-热型微能源网多目标优化运行研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [17] 邹琦琦,杨国华,郑豪丰,等.基于改进小生境 PSO 算法的综合能源系统调度[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(7):47-52.
- [18] 张靖一,于永进,李昱君.基于改进灰狼算法的综合能源系统优化调度[J].科学技术与工程,2021,21(19):8048-8056.

作者简介:

万 锴(1989),男,工程师,从事电气设备运行与维护工作;

刘 闯(1991),男,硕士,工程师,从事电气设备运行与维护工作;

陈 磊(1992),男,硕士,工程师,从事电气设备运行与维护工作。

(收稿日期:2022-08-23)