

文章编号: 1674-5566(2023)05-0986-11

DOI: 10.12024/jsou.20230604217

“渔光互补”下的微电网多目标能量优化调度策略

杨琛¹, 杨雨静¹, 郭锋¹, 张泽扬²

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 上海城市电力发展有限公司, 上海 200123)

摘要: 针对“渔光互补”下的微电网系统, 为平衡能源“不可能三角”, 提出一种多目标优化的能量优化调度方法。首先, 基于“渔光互补”背景建立光-蓄-荷微电网系统模型, 提出包含经济性、环保性及综合性的多维动态目标函数。其次, 考虑麻雀搜索算法存在多样性不足和易陷入局部最优的缺陷, 提出基于模拟退火算法及混合策略改进的麻雀搜索算法(SA-ISSA)的微电网能量优化调度策略。最后, 针对上海崇明璞叶小镇“渔光互补”工厂化养殖基地进行实例验证, 采用SA-ISSA算法对微电网模型求解, 获得最优能量调度方案。实验结果表明, SA-ISSA算法在解决微电网能量优化调度问题上具有更好的性能和应用价值, 可为“渔光互补”下微电网能量优化调度策略提供参考。

关键词: 渔光互补; 微电网; 优化调度; SA-ISSA算法

中图分类号: TM 73; TP 18 **文献标志码:** A

随着智慧渔业发展进入关键时期, 新能源渔业智能装备的研发、推广和应用对于推进渔业转型升级、促进智慧渔业可持续发展具有重要意义^[1-2]。新能源渔业智能装备与“渔光互补”相结合, 可实现光伏发电与水产养殖的互惠共赢, 通过微电网系统(Microgrid system, MGS)对能量进行优化调度, 可实现更高效、环保和安全的能源供应, 满足智慧渔业养殖设备供电需求^[3-4]。目前的“渔光互补”微电网能源管理系统存在不稳定、供需不平衡以及能源分配不合理等问题, 容易导致资源浪费。因此, 采用更加高效的方法进行微电网电能优化调度对于实现清洁、可靠、高效的能源供应, 以及推动能源转型和智慧渔业发展, 具有重要意义和作用。

近年来, 粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)、遗传算法(Genetic algorithm, GA)等群智能优化算法因易于实现、计算效率高等优点, 被广泛应用于微电网能量优化调度研究^[5-6]。MOGHADDAM等^[7]使用PSO算法解决MGS多目标能量调度问题, 以平衡功率不匹配, 并与GA算法对比, 证实了PSO算法收敛速度更

快。SURESH等^[8]针对经济目标, 在Wroclaw科技大学MGS上对比多种智能优化算法的性能, 结果表明蚁群算法具有最好的收敛时间及最优解决方案。DOU等^[9]将levy飞行与飞蛾扑火算法相结合, 结果验证了该算法在鲁棒性和收敛速度方面有明显优势。赵超等^[10]结合Tent混沌映射、非线性收敛因子和柯西变异算子等3种策略改进灰狼算法进行求解, 结果表明改进后算法优化结果更优。FATHY等^[11]使用麻雀搜索算法(Sparrow search algorithm, SSA)求解微电网优化管理中的单目标和多目标问题, 并与鲸群优化算法、PSO算法等进行实验对比, SSA算法均具有更好的效果。群智能优化算法在微电网能量优化调度问题中应用较为广泛, 但目前存在收敛速度慢、结构复杂、优化参数多等缺点。SSA算法采用了启发式搜索策略和随机游走机制, 可以在面对复杂的非凸优化问题时进行全局搜索, 具有收敛速度快、优化参数少等特点^[12-14], 但在解决该问题时易陷入局部最优, 其优化能力及收敛速度仍有改进空间。

针对光-蓄-荷非凸优化微电网能量优化调

收稿日期: 2023-06-12 修回日期: 2023-07-10

基金项目: 崇明区科委2023年度可持续发展科技创新行动计划项目(CKST 2023-01)

作者简介: 杨琛(1978—), 女, 副教授, 研究方向为物联网大数据和智能控制技术、物联网技术、渔光互补技术。E-mail: cyang@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

度问题,本文提出一种基于模拟退火算法(Simulated annealing, SA)及混合策略改进的麻雀搜索算法(Simulated annealing improved sparrow search algorithm, SA-ISSA)。针对SSA算法^[15]和其他智能优化算法存在种群多样性不足,易陷入局部最优的问题,SA-ISSA算法在SSA算法的基础上引入使用轮盘赌策略改进的模拟退火算法解决了原始算法易陷入局部最优的问题,引入Logistic-Tent混沌映射解决了生成种群质量低、影响算法收敛速度及优化结果问题,引入自适应T分布与动态自适应权重改进了原始算法的发现者,位置更新公式解决了原始算法前期搜索范围较小、全局搜索能力差、后期易受局部最优解影响问题,引入人工蜂群算法(Artificial bee colony algorithm, ABC)改进了原始算法的跟随者,位置更新公式解决了原始算法在原点聚集易陷入局部最优的问题,最后对原始算法中的警戒者数量实现动态变化改进解决了警戒者数量多会导致麻雀位置突变,不利于算法快速收敛的问题。SA-ISSA算法有效改善了原始算法的缺陷,提高了全局寻优能力、收敛速度及鲁棒性。最后,根据光-蓄-荷MGS建立了包含经济性、环保性及综合性的多维动态目标函数下的微电网优化调度模型,并基于上海崇明璞叶小镇“渔光互补”工厂化养殖的数据,采用SA-ISSA算法对微电网模型进行求解,获得最优能量调度方案。

1 光-蓄-荷微电网数学模型

1.1 光伏发电模型

光伏组件输出功率受实际环境温度、辐照度影响较大。光伏组件输出功率 P_{pv} 表达式^[16]:

$$P_{pv} = P_{N-pv} \frac{G}{G_{ref}} \left[1 + k_t \left((T_{amb} + (0.0256 \cdot G)) - T_{ref} \right) \right] \quad (1)$$

式中: P_{N-pv} 为额定功率,kW; G 为实际辐照度, kW/m^2 ; G_{ref} 为标准辐照度,取 $1 \text{ kW}/\text{m}^2$; k_t 为功率温度系数,取 $-0.35\%/K$; T_{amb} 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{ref} 为参考温度,取 25°C 。

1.2 储能设备模型

蓄电池荷电状态SOC(State of charge)表达式^[17]:

$$SOC(t) = \begin{cases} SOC(t-1) + \frac{\eta P_{ess}(t) \Delta t}{S_{ess}}, P_{ess}(t) > 0 \\ SOC(t-1), P_{ess}(t) = 0 \\ SOC(t-1) + \frac{P_{ess}(t) \Delta t}{\zeta S_{ess}}, P_{ess}(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: η 、 ζ 为充放电效率; P_{ess} 为充放电功率,kW; Δt 为采样时间,h; S_{ess} 为额定容量,Ah。

1.3 负荷用电模型

本文针对工厂化养殖模式^[18],依据崇明地区渔业养殖经验,选择自动投饵设备、增氧机及水质调控设备等3种重要典型负荷建立负荷用电模型:

$$\begin{cases} W_{fee} = P_{fee} k_f \frac{S_f}{V_f} \\ W_{oxy} = P_{oxy} t_o \\ W_{pum} = P_{pum} k_p \frac{n_{ac} h_p}{y_p} \end{cases} \quad (3)$$

式中: W_{fee} 、 W_{oxy} 、 W_{pum} 为投饵、增氧及水质调控设备用电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; P_{fee} 、 P_{oxy} 、 P_{pum} 为投饵、增氧及水质调控设备总功率,kW; S_f 为投饵轨迹,m; V_f 为投饵速度,m/s; k_f 为投饵次数; t_o 为增氧设备使用时间,h; y_p 为水泵流量, m^3/h ; n_{ac} 为养殖规格, m^2 ; k_p 为换水频次; h_p 为换水量高度,m。

2 微电网能量优化调度模型

2.1 目标函数

为平衡能源“不可能三角”:可靠性、可持续性和经济性^[19]。“渔光互补”背景下的光-蓄-荷MGS能量优化配置需要充分考虑养殖、经济、生态多方面因素来合理分配大电网和蓄电池的能量调度。

“渔光互补”下,MGS运行以成本最小化为目标函数,建立经济目标:

$$C_{J,\min} = C_S - C_E - C_0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_S = \sigma_{sell}(t) P_{sell}(t) - \sigma_{pur}(t) P_{pur}(t) \\ C_E = C_{E,PV} + C_{E,ess} \\ C_0 = C_{0,PV} + C_{0,ess} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_{J,\min}$ 为经济成本最小化,元; C_S 为上网效益,元; C_E 为购置成本,元; C_0 为运维成本,元; P_{sell} 、 P_{pur} 为售购电功率,kW; σ_{sell} 、 σ_{pur} 为售购电价格,元; $C_{0,PV}$ 、 $C_{E,PV}$ 为光伏运维购置成本,元。 $C_{0,ess}$ 、 $C_{E,ess}$ 为蓄电池运维购置成本,元。

环境目标是指在能量调度过程中尽可能减

少污染物及碳排放^[20],即微电网环境治理成本最低,建立环境目标:

$$C_{EN, \min} = \sum_{m=1}^{N_{ap}} E_{pur} \gamma_m (v_m + \psi_m) \quad (6)$$

式中: $C_{EN, \min}$ 为环境治理成本最小化,元; E_{pur} 为大电网购电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; N_{ap} 为污染物种类个数; γ_m 为第 m 种污染物的排放系数, $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; v_m 为环境价值,元/ kg ; ψ_m 为罚款,元/ kg 。

在渔业养殖过程中,为了动态平衡经济目标和环境目标,采用权重系数法制定综合目标。本文对经济目标及环境目标进行动态加权,建立综合目标:

$$C_{\min} = aC_J + bC_{EN} \quad (7)$$

式中: C_{\min} 为综合目标最小化,元; a 、 b 为经济、环境目标权重系数。

2.2 约束条件

为求解光-蓄-荷 MGS 能量优化调度策略,本文考虑功率平衡约束、蓄电池能量约束及 MGS 能量交互约束等3个约束条件。

为确保负荷用电稳定性, MGS 输出功率应为负荷提供充足电能。功率平衡约束:

$$P_{pv}(t) + P_{ess}(t) + P_{pur}(t) - P_{sell}(t) - \sum_{l=1}^{N_k} P_{load}(t) = 0 \quad (8)$$

式中: N_k 为负荷数量; $\sum_{l=1}^{N_k} P_{load}$ 为负荷 l 电能需求, kW 。

为降低蓄电池寿命损耗,对其充放电功率及剩余容量上下限进行限制。蓄电池能量约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ess}(t) \leq P_{ch, \max}, P_{ess}(t) > 0 \\ 0 \leq |P_{ess}(t)| \leq P_{dis, \max}, P_{ess}(t) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (10)$$

式中: $P_{ch, \max}$ 、 $P_{dis, \max}$ 为最大充放电功率; SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 为电荷状态上下限, V 。

为确保养殖系统的稳定性, MGS 与大电网并网。MGS 能量交互约束:

$$\begin{cases} P_{sell} \leq P_{sell, \max} \\ P_{pur} \leq P_{pur, \max} \end{cases} \quad (11)$$

$$x_{n+1} = \begin{cases} \left[r_0 x_n (1 - x_n) + \frac{(4-r)}{2} x_n \right] \bmod 1, x_n < 0.5 \\ \left[r_0 x_n (1 - x_n) + \frac{(4-r)(1-x_n)}{2} \right] \bmod 1, x_n \geq 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{sell, \max}$ 、 $P_{pur, \max}$ 为售购电最大功率, kW 。

3 基于SA-ISSA算法的微电网能量优化调度策略

SSA算法模拟麻雀觅食行为,有发现者、跟随者和警戒者等3种类型个体,根据位置更新公式寻找最优值。SSA算法具有局部寻优能力强、结构简单和优化参数少等优点。但存在初始化种群多样性少、种群质量低,前期麻雀搜索范围小,全局搜索能力差且缺乏变异麻雀扰动机制易陷入局部最优的问题。

3.1 改进麻雀搜索算法(SA-ISSA)

3.1.1 结合轮盘赌策略与SA算法

针对SSA算法易陷入局部最优的缺点,本文将轮盘赌^[21]与SA算法^[22]相结合。该方法使用轮盘赌策略确定新位置,即局部最优替代位置,并根据Metropolis准则更新位置,从而避免陷入局部最优。

第 i 只麻雀被选中参与轮盘赌策略的概率 $P(x_i)$:

$$P(x_i) = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (12)$$

式中: p_i 为第 i 只麻雀被选择的概率, $p_i = e^{-\frac{f_{new} - f_{old}}{T_{emp}}}$; 当 $P(x_i) \geq \text{rand}(0, 1)$ 时,则将第 i 只麻雀的位置信息确认为新位置。

Metropolis准则确定接受新位置的概率 p :

$$p = \begin{cases} 1, f_{new} - f_{old} \leq 0 \\ e^{-\frac{f_{new} - f_{old}}{T_{emp}}}, f_{new} - f_{old} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

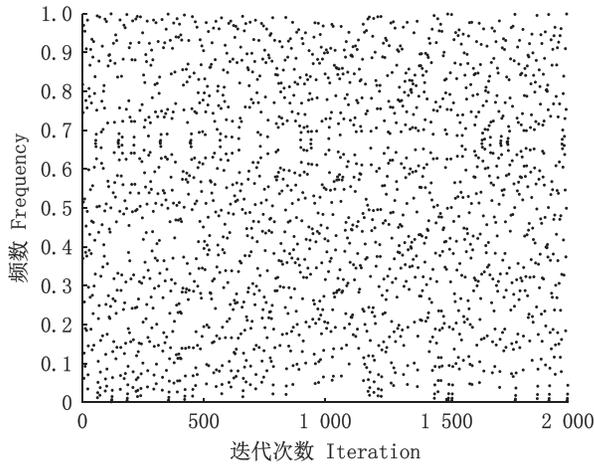
式中: f_{new} 、 f_{old} 为新旧位置的适应度值;当 $f_{new} - f_{old} > 0$ 时,若 $p \geq \text{rand}(0, 1)$,则接受新位置,反之保持原位置。

3.1.2 Logistic-Tent混沌映射

SSA算法随机生成初始种群,生成种群质量低,影响算法收敛速度及优化结果。本文在初始化种群时引入Logistic-Tent混沌映射^[23],提高种群质量和收敛速度。映射方程如下:

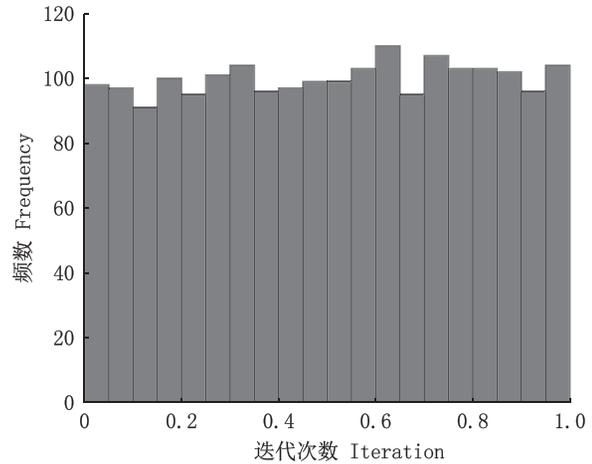
式中: n 为迭代次数; r_0 为控制参数,取 $r_0 = 0.1$ 。

当 $n = 2\ 000$ 时,Logistic-Tent混沌序列分布



(a) 分布图 Distribution

图如图1所示,结果分布密度均匀,可有效增强算法收敛速度和全局搜索能力。



(b) 直方图 Histogram

图1 Logistic-Tent混沌序列分布

Fig. 1 Logistic-Tent chaotic sequence distribution

3.1.3 发现者位置更新公式改进

当 $n = 1\ 000$ 时,原始算法发现者位置更新仿真结果如图2a所示。迭代范围由(0, 1)逐渐收缩为(0, 0.4),前期搜索范围较小,全局搜索能力差,后期易受局部最优解影响。

为解决此问题,本文引入自适应T分布和线性动态自适应权重 w 。T(n)为以 n 为自由度的自适应T分布函数,当 n 较小时搜索范围大,随着 n 增加搜索范围逐渐减小,提高计算效率。 w 在迭代前期增大全局搜索范围,迭代后期使算法趋于收敛,加快算法迭代速度。线性动态自适应权重 w :

$$w = \frac{w_{\max} + w_{\min}}{2} + (w_{\max} - w_{\min}) \cos\left(\frac{\pi n}{iter_{\max}}\right) \quad (15)$$

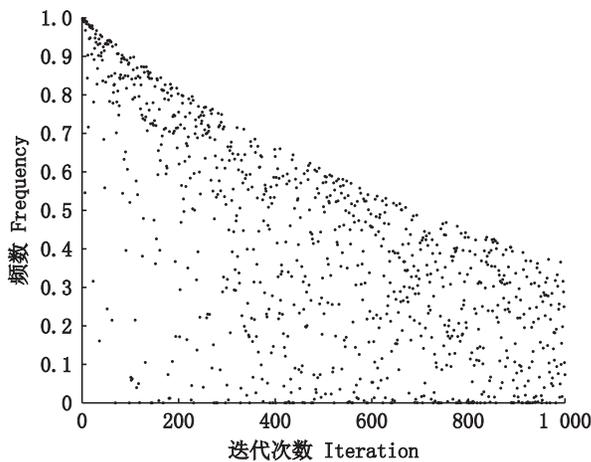
式中: w_{\max} 、 w_{\min} 为迭代开始、结束的惯性权重,当 $w_{\max} = 0.9$, $w_{\min} = 0.4$ 时,改进SSA算法性能最佳; $iter_{\max}$ 为最大迭代次数。

发现者位置 $X_{i,j}^{n+1}$ 改进后更新公式:

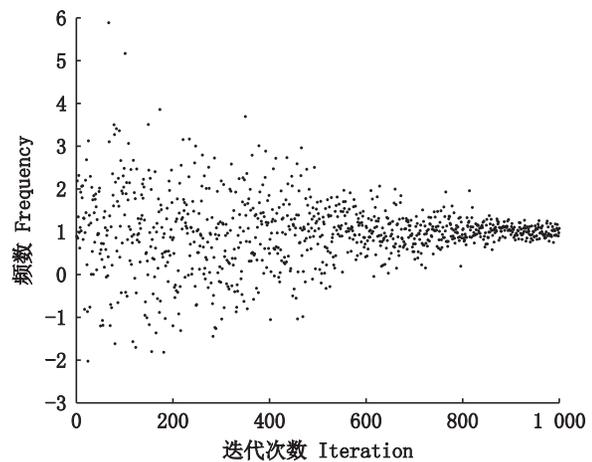
$$X_{i,j}^{n+1} = \begin{cases} X_{i,j}^n(1 + wT(n)), & R_2 < ST \\ X_{i,j}^n + T(n)L, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (16)$$

式中: i 为第 i 只麻雀; j 为维度, $j = 1, 2, 3, \dots, d$; R_2 为预警值, $R_2 \in [0, 1]$; ST 为安全值, $ST \in [0.5, 1]$,取值为0.8; L 为元素全为1的 $1 \times d$ 的矩阵。

改进后发现者位置更新仿真结果如图2b所示



(a) 原始算法 Original algorithm



(b) 本文算法 The algorithm in this paper

图2 发现者位置更新结果图

Fig. 2 Result map of the finder's location update

示。改进后SSA算法迭代前期加大全局搜索范围,避免陷入局部最优;迭代后期搜索范围逐渐减小并趋于收敛,加快算法收敛速度。

3.1.4 跟随者位置更新公式改进

当跟随者没有获得食物时,需扩大搜索范围,而原始公式会在原点聚集易陷入局部最优。

因此,引入ABC算法^[24]改进跟随者位置更新公式。ABC算法引领蜂位置公式:

$$X_{i,j}^{n+1} = X_{i,j}^n + \varphi(X_{r,j}^n - X_{i,j}^n) \quad (17)$$

式中: φ 为随机数, $\varphi \in [-1, 1]$; r 为任意第 r 只蜜蜂,且 $r \neq i$ 。

结合ABC算法改进跟随者位置更新公式,使跟随者充分利用第 n 代个体位置信息进行迭代,不再收敛于原点,避免陷入局部最优。改进后跟随者位置更新公式:

$$\begin{cases} X_{i,j}^{n+1} = X_{i,j}^n + \varphi(X_{k,j}^n - X_{i,j}^n), i > N/2 \\ X_{i,j}^{n+1} = X_p^{n+1} + |X_{i,j}^n - X_p^{n+1}|A^+L, i \leq N/2 \end{cases} \quad (18)$$

式中: k 为任意第 k 只麻雀,且 $k \neq i$; X_p 为发现者最优位置; N 为麻雀种群个数; A 为元素为1或-1的

$1 \times d$ 的矩阵,且 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。

3.1.5 警戒者数量动态变化

迭代后期,警戒者数量多会导致麻雀位置突变,不利于算法快速收敛。因此,本文将警戒者数量改为随 n 增加而减小,提高算法收敛速度。警戒者数量 num^n :

$$num^n = \left\lfloor 0.1N \frac{c \sin\left(\frac{\pi n}{iter_{max}}\right)}{n + \varepsilon} \right\rfloor \quad (19)$$

式中: c 为放大系数,取值为95。

3.2 基于SA-ISSA算法的微电网能量优化调度流程

SA-ISSA算法求解光-蓄-荷微电网能量优化调度策略的过程中,优化参数为大电网和蓄电池的能量调度,优化变量为麻雀群体位置,适应度值反映该位置的优劣。麻雀种群通过不断更新,找到最佳适应度值位置,即为MGS最优出力调度策略。基于SA-ISSA算法的微电网能量优化调度的求解流程如图3所示。

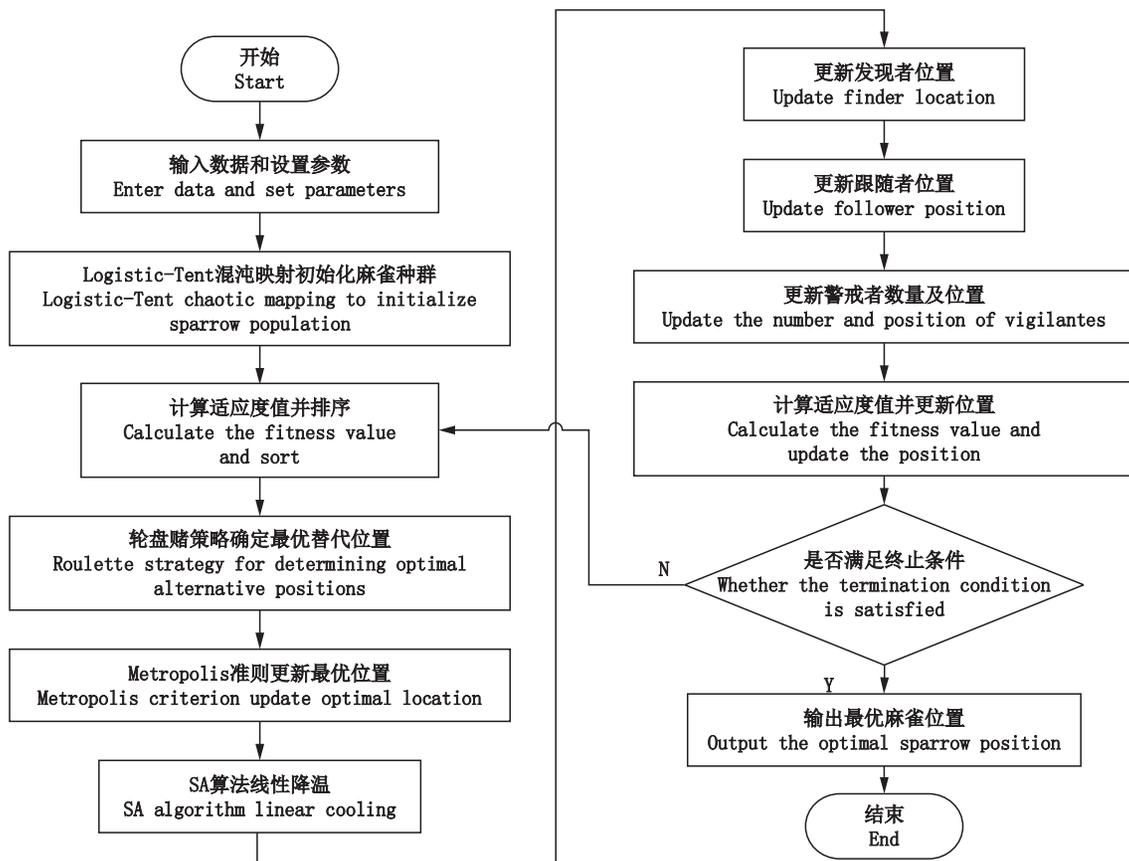


图3 SA-ISSA算法求解流程图

Fig. 3 SA-ISSA algorithm solution flow chart

算法主要步骤如下:(1)输入数据和设置系统参数。输入电网分时售购电价格、负荷用电和光伏出力逐时数据,设定麻雀种群规模 N 、最大迭代次数 $iter_{max}$ 、问题维度 j 、麻雀群体占比、警戒阈值、安全阈值、退火温度 T_{emp} 、退火系数 δ 、蓄电池出力上下限、MGS与大电网交互功率上下限和污染物排放指标等参数。(2)利用Logistic-Tent混沌映射初始化种群。(3)计算麻雀个体适应度值,并从小到大排序,确定种群最优、最差位置。(4)根据轮盘赌策略确定全局最优替代位置, Metropolis准则更新位置。(5)更新麻雀种群发现者、跟随者、警戒者位置及警戒者数量。(6)计算新种群适应度值,与原种群适应度值比较,选择更佳适应度值种群并更新位置。(7)判断是否满足终止条件。若满足则循环终止,反之,则返回(3)继续循环。(8)结束。输出最优麻雀位置及适应度值。

4 养殖基地案例实验

4.1 算例系统及相关参数

以上海崇明璞叶小镇“渔光互补”工厂化养殖为基础,提取6月份典型日光伏出力及渔业养殖负荷用电数据,采用SA-ISSA算法进行微电网能量优化调度研究。数据采样间隔为1 h,运行周期为24 h。典型日光伏出力及负荷数据如图4所示。

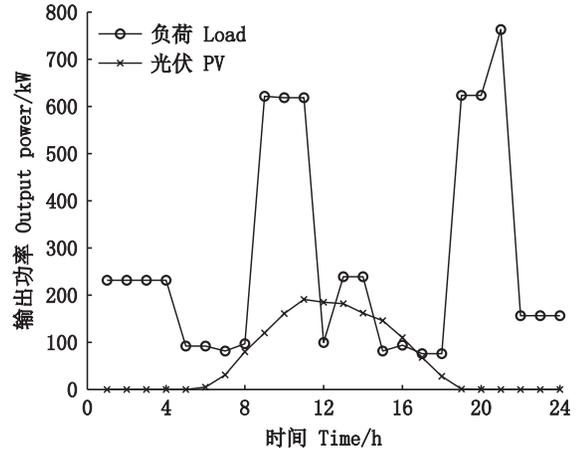


图4 典型日光伏出力及负荷数据

Fig. 4 Typical daily photovoltaic output and load data

仿真实验中选取光伏组件、蓄电池组件相关参数如表1所示。仿真实验中选取蓄电池相关参数如表2所示。大电网污染物排放评价指标参数如表3所示。基于上海崇明地区渔业养殖背景下,大电网分时电价如表4所示。

4.2 结果分析

为验证SA-ISSA算法的有效性,针对本文提出的3种目标函数微电网能量优化调度问题,将PSO算法、SSA算法、基于SA算法改进的SSA算法(Simulated annealing sparrow search algorithm, SA-SSA)、SA-ISSA算法的求解结果进行比较。在求解的过程中,4种算法的种群规模设为100,

表1 分布式电源参数

Tab. 1 Distributed power parameters

电源类型 Power supply type	出力下限 Lower output limit/kW	出力上限 Upper output limit/kW	运维成本 Maintenance cost/(元/W)	购置成本 Purchase cost/(元/W)
光伏 photovoltaic	-100	800	0.009	3.2
蓄电池 storage battery	-200	200	0.045	8

表2 蓄电池参数

Tab. 2 Battery parameters

电池容量 Battery capacity/(kW·h)	初始 Initial SOC/%	最小 Minimal SOC/%	最大 Maximum SOC/%
400	50	25	75

表3 污染物排放评价指标

Tab. 3 Evaluation indicators of pollutant discharge

污染物 Pollutant	排放系数 Emission coefficient/g/(kW·h)	环境价值 Environmental value/(元/kg)	罚款 Fine/(元/kg)
NO _x	3.093	6.479	1.619
CO ₂	86	0.018	0.008
CO	-	0.809	0.129
SO ₂	3.945	4.859	0.809

表4 大电网分时电价
Tab. 4 Time-of-use electricity price of large power grid

时段划分 Time slot division	具体时段 Particular time frame	购电电价 Electricity purchase prices/[元/(kW·h)]	售电电价 Electricity selling price/[元/(kW·h)]
峰时段 Peak period	06:00—22:00	0.709	0.584
谷时段 Off-peak period	22:00—次日06:00	0.343	0.584

最大迭代次数为300,退火系数为0.99,发现者占比20%,跟随者占比80%,初始警戒者占比10%。

4.2.1 经济目标分析

针对经济目标,结合光伏、蓄电池组件安装运维成本和大电网分时电价,使用SA-ISSA算法求解,各微电源出力优化如图5所示。

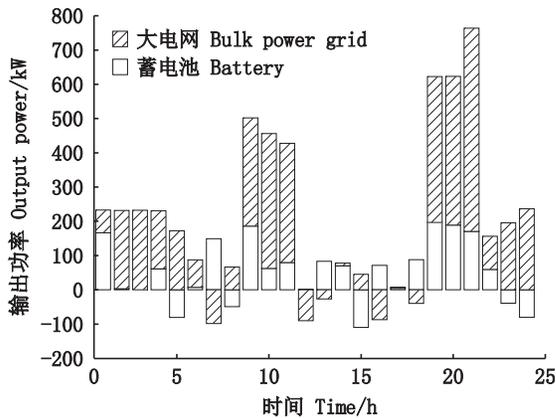


图5 SA-ISSA算法求解各微电源出力优化结果
Fig. 5 SA-ISSA algorithm to solve the output optimization results of each micro power supply

由图5可知:当光伏系统出力不足以满足负荷需求时,谷时时段系统优先从大电网购电,并将多余的电力用于给蓄电池充电,峰时时段优先蓄电池给负荷提供电能;当光伏系统出力多于负荷用电需求时,剩余电能优先存储于蓄电池中。

PSO算法、SSA算法、SA-SSA算法与SA-ISSA算法收敛曲线对比如图6所示。

由图6可知:PSO算法迭代159次趋向稳定,优化结果为11 968 00元;SSA算法迭代222次趋向稳定,优化结果为139 390元;SA-SSA算法迭代224次趋向稳定,优化结果为62 034元;SA-ISSA算法迭代154次趋向稳定,优化结果为30 008元,优化结果明显优于其他3种算法。因此,在针对经济目标优化时,SA-ISSA算法比其他3种算法收敛速度更快、精度更高,能够稳定求解微电网能量优化调度模型,获得微电网最优经济成本。

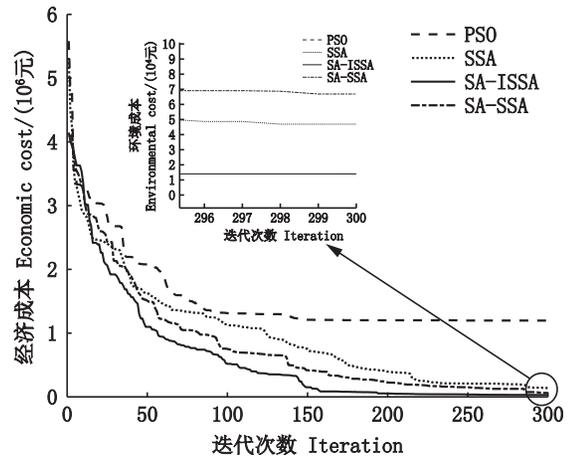


图6 不同算法收敛曲线
Fig. 6 Convergence curves of different algorithms

4.2.2 环境目标分析

针对环境目标,结合大电网污染物排放量,使用SA-ISSA算法求解各微电源出力优化如图7所示。

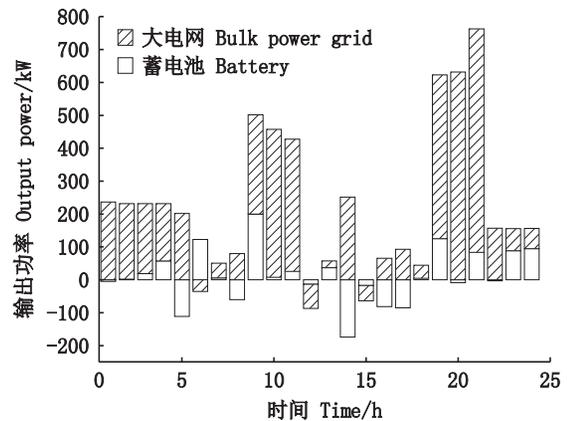


图7 SA-ISSA算法求解各微电源出力优化
Fig. 7 SA-ISSA algorithm to solve the output optimization of each micro power supply

由图7可知:当光伏系统出力不足以满足负荷需求时,优先由蓄电池供电,以减少大电网污染物排放;当蓄电池降至临界值时,从大电网购电并给蓄电池充电;当光伏系统出力足以满足负荷需求时,优先由光伏系统给负荷供电,余电优先存储于蓄电池中;当蓄电池充满时,余电通过

向大电网售电的方式进行利用。

PSO 算法、SSA 算法、SA-SSA 算法与 SA-ISSA 算法收敛曲线对比如图 8 所示。

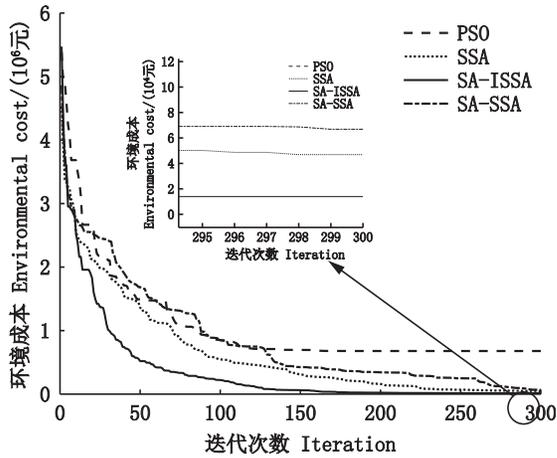


图 8 不同算法收敛曲线
Fig. 8 Convergence curves of different algorithms

由图 8 可知:PSO 算法迭代 136 次趋向稳定,优化结果为 67 8570 元;SSA 算法迭代 222 次趋向稳定,优化结果为 46 905 元;SA-SSA 算法迭代 224 次趋向稳定,优化结果为 66 867 元;SA-ISSA 算法迭代 154 次趋向稳定,优化结果为 13 977 元,优化结果明显优于其他 3 种算法。因此,在针对环境目标优化时,SA-ISSA 算法在收敛速度和计算精度上均优于其他 3 种算法。

4. 2. 3 综合目标分析

针对综合目标,以环境目标为主要侧重点,设置 $a : b = 0.4 : 0.6$,使用 SA-ISSA 算法求解,各微电源出力优化如图 9 所示。

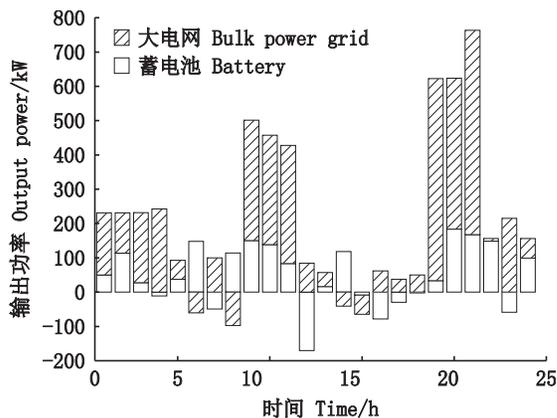


图 9 SA-ISSA 算法求解
Fig. 9 SA-ISSA algorithm to solve the output optimization of each micro power supply

由图 9 可知:当光伏系统出力不足以满足负荷需求时,若处于谷时时段,优先从大电网购电;若处于峰时时段,优先由蓄电池供电。当光伏系统出力足以满足负荷需求时,优先由光伏系统给负荷供电,余电优先存储于蓄电池中;当蓄电池充满时,余电通过向大电网售电的方式进行利用。

PSO 算法、SSA 算法、SA-SSA 算法与 SA-ISSA 算法收敛曲线对比如图 10 所示。

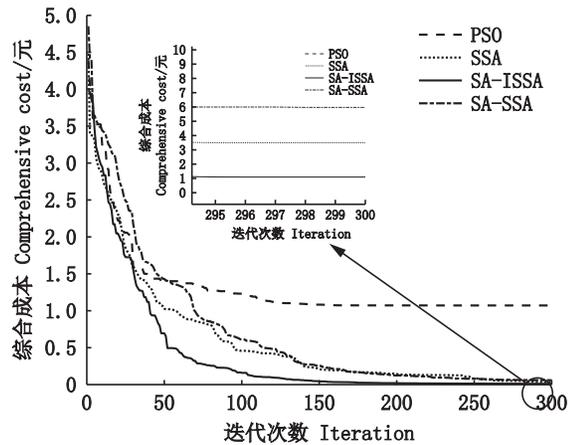


图 10 不同算法收敛曲线
Fig. 10 Convergence curves of different algorithms

由图 10 可知:PSO 算法迭代 127 次趋向稳定,优化结果为 1 071 600 元;SSA 算法迭代 168 次趋向稳定,优化结果为 34 911 元;SA-SSA 算法迭代 140 次趋向稳定,优化结果为 59 709 元;SA-ISSA 算法迭代 104 次趋向稳定,优化结果为 10 949 元,优化结果明显优于其他 3 种算法。因此,在针对综合目标优化时,本文提出的 SA-ISSA 算法相比其他 3 种算法有着初始种群质量高、收敛速度快、优化结果好等优点,证明本文改进策略有效改进了 SSA 算法存在的缺陷,提高了算法全局寻优能力,收敛速度和优化能力。

设置不同权重系数 $a、b$,综合目标优化结果如表 5 所示。

权重系数 $a、b$ 是决策者对经济目标和环境目标侧重程度的量化。从表 5 可以看出,系统在随着 a 增大、 b 逐渐减小的情况下,更加注重经济效益,但也导致环境效益受损,污染排放成本增加。然而,由于 MGS 可再生能源比例较高,污染排放较少,环境成本较低,运维成本为主要费用,总成本逐渐增加。因此,应根据实际需求设

定合适的权重值,以实现经济目标 and 环境目标的平衡。

表5 不同权重系数下的综合目标优化结果
Tab. 5 Comprehensive objective optimization results under different weight coefficients

<i>a</i>	<i>b</i>	综合成本		<i>a</i>	<i>b</i>	综合成本	
		Comprehensive cost/元	Comprehensive cost/元			Comprehensive cost/元	Comprehensive cost/元
0	1.0	22 378		0.6	0.4	38 245	
0.1	0.9	25 022		0.7	0.3	40 890	
0.2	0.8	27 667		0.8	0.2	43 534	
0.3	0.7	30 311		0.9	0.1	46 179	
0.4	0.6	32 956		1.0	0	48 824	
0.5	0.5	35 601		-	-	-	

4.2.4 总体分析

针对3种不同的目标函数,使用PSO算法、SSA算法、SA-SSA算法和SA-ISSA算法求解。运

行100次迭代结果取平均值、最优值和标准差,优化结果对比如表6所示。

由表6可知,在解决光-蓄-荷微电网系统能量优化调度问题时,SA-ISSA算法在经济成本、环境成本和综合成本等多个指标上都取得了更优的结果,其平均值和最优值均低于其他3种算法。此外,SA-ISSA算法的标准差也更小,说明算法的鲁棒性更强,能够有效地控制算法的波动性。

相比SSA算法,本文提出的SA-ISSA算法在经济目标下,平均值降低11.14%,标准差降低7.26%;在环境目标下,平均值降低19.07%,标准差降低11.84%;在综合目标下,平均值降低12.7%,标准差降低14.61%。综上所述,SA-ISSA算法比其他3种算法收敛速度更快,精度更高,能够稳定求解微电网能量优化调度模型,获得微电网最优能源调度方案。

表6 不同算法100次迭代优化结果对比
Tab. 6 Comparison of optimization results of 100 iterations of different algorithms

算法 Algorithm	经济成本 Economic costs/元			环境成本 Environmental costs/元			综合成本 Comprehensive cost/元		
	平均值 Mean value	最优值 Optimal value	标准差 Standard deviation	平均值 Mean value	最优值 Optimal value	标准差 Standard deviation	平均值 Mean value	最优值 Optimal value	标准差 Standard deviation
PSO	691 530	235 900	255 130	626 730	121 790	245 740	648 090	219 540	241 030
SSA	91 436	28 189	89 944	67 466	8 276	74 952	65 532	20 436	48 165
SA_SSA	91 490	24 896	98 116	77 551	11 624	90 291	85 424	17 395	106 990
SA-ISSA	81 251	20 939	83 410	54 602	4 132	66 077	57 208	10 814	41 126

5 结论

本文针对“渔光互补”背景下的工厂化养殖系统微电网能量优化调度问题进行研究,建立光-蓄-荷微电网系统,提出包含经济目标、环境目标及综合目标的多维动态目标函数,并针对SSA算法多样性不足的问题及易陷入局部最优的局限性,创造性地提出了SA-ISSA算法。从算法优化结果数据可知,相较于PSO算法、SSA算法和SA_SSA算法,SA-ISSA算法具有初始种群质量好、全局寻优能力强、迭代速度快、优化结果好等优点。通过该优化算法得到的经济目标、环境目标及综合目标函数的适应度值结果更好,调度方案更优,对于智能养殖设备能量调度问题具有指导意义。

参考文献:

- [1] 杨震飞,曹海月,王建国,等. 水产养殖智慧渔业研究进展[J]. 农业工程技术, 2022, 42(24): 44-45, 64.
YANG Z F, CAO H Y, WANG J G, et al. Research progress of aquaculture smart fishery [J]. Agricultural Engineering Technology, 2022, 42(24): 44-45, 64.
- [2] FU X Q, NIU H S. Key technologies and applications of agricultural energy internet for agricultural planting and fisheries industry [J]. Information Processing in Agriculture, 2022.
- [3] MA C, LIU Z. Water-surface photovoltaics: Performance, utilization, and interactions with water eco-environment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112823.
- [4] THIRUNAVUKKARASU G S, SEYEDMAHMOUDIAN M, JAMEI E, et al. Role of optimization techniques in microgrid energy management systems: A review [J]. Energy Strategy Reviews, 2022, 43: 100899.
- [5] ZHANG H, LI G H, WANG S T. Optimization dispatching of isolated island microgrid based on improved particle

- swarm optimization algorithm[J]. *Energy Reports*, 2022, 8(3): 420-428.
- [6] TORKAN R, ILINCA A, GHORBANZADEH M. A genetic algorithm optimization approach for smart energy management of microgrids[J]. *Renewable Energy*, 2022, 197: 852-863.
- [7] MOGHADDAM A A, SEIFI A, NIKNAM T, et al. Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source[J]. *Energy*, 2011, 36(11): 6490-6507.
- [8] SURESH V, JANIK P, JASINSKI M, et al. Microgrid energy management using metaheuristic optimization algorithms [J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 134: 109981.
- [9] DOU C X, ZHOU X H, ZHANG T F, et al. Economic optimization dispatching strategy of microgrid for promoting photoelectric consumption considering cogeneration and demand response [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(3): 557-563.
- [10] 赵超,王斌,孙志新,等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1): 256-262.
- ZHAO C, WANG B, SUN Z X, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(1): 256-262.
- [11] FATHY A, ALANAZI T M, REZK H, et al. Optimal energy management of micro-grid using sparrow search algorithm[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 758-773.
- [12] WANG Z W, SUN G K, ZHOU K P, et al. A parallel particle swarm optimization and enhanced sparrow search algorithm for unmanned aerial vehicle path planning [J]. *Heliyon*, 2023, 9(4): e14784.
- [13] XUE Z L, YU J Q, ZHAO A J, et al. Optimal chiller loading by improved sparrow search algorithm for saving energy consumption [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 67: 105980.
- [14] ZHANG Z, HAN Y. Discrete sparrow search algorithm for symmetric traveling salesman problem [J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 118: 108469.
- [15] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [16] 朱兰,严正,杨秀,等. 风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. *电网技术*, 2012, 36(12): 26-31.
- ZHU L, YAN Z, YANG X, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(12): 26-31.
- [17] 周京华,翁志鹏,宋晓通. 兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微电网容量配置方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 166-174.
- ZHOU J H, WENG Z P, SONG X T. Capacity configuration method of islanded microgrid with photovoltaic and energy storage system considering reliability and economy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 166-174.
- [18] 胡庆松,朱皓,李俊. 虾蟹养殖池塘机械化研究现状及发展趋势[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(5): 1216-1223.
- HU Q S, ZHU H, LI J. Research progress and development trend of mechanization of shrimp and crab breeding pond [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(5): 1216-1223.
- [19] 鲁刚,徐沈智,王芑. 立足能源-经济-环境关系对电力碳达峰碳中和路径的战略思考[J]. *石油科技论坛*, 2022, 41(1): 57-62, 107.
- LU G, XU S Z, WANG P. Strategic thinking of the path for electric power carbon peak and carbon neutrality on basis of energy-economy-environment relations [J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2022, 41(1): 57-62, 107.
- [20] 黄伟,黄婷,周欢,等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(9): 211-217.
- HUANG W, HUANG T, ZHOU H, et al. Dynamic economical dispatch for microgrid based on improved differential evolution algorithm [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(9): 211-217.
- [21] BEŞKIRLI M. Solving continuous optimization problems using the tree seed algorithm developed with the roulette wheel strategy [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 170: 114579.
- [22] AIT-SAAD A, MERAIHI Y, SOUKANE A, et al. A novel hybrid chaotic Aquila optimization algorithm with simulated annealing for unmanned aerial vehicles path planning [J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, 104: 108461.
- [23] 秦秋霞,梁仲月,徐毅. 基于 Logistic-Tent 混沌映射和位平面的图像加密算法[J]. *大连民族大学学报*, 2022, 24(3): 245-252.
- QIN Q X, LIANG Z Y, XU Y. Image encryption algorithm based on Logistic-Tent chaotic mapping and bit plane [J]. *Journal of Dalian Minzu University*, 2022, 24(3): 245-252.
- [24] TAO X R, PAN Q K, GAO L. An efficient self-adaptive artificial bee colony algorithm for the distributed resource-constrained hybrid flowshop problem [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169: 108200.

Multi-objective energy optimization scheduling strategy of microgrid under "Fisheries and Light Complementarity"

YANG Chen¹, YANG Yujing¹, GUO Feng¹, ZHANG Zeyang²

(1. School of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Urban Electric Power Development Co., Ltd., Shanghai 200123, China)

Abstract: For the microgrid system under the "fish-light complementarity", a multi-objective optimization energy scheduling method is proposed to balance the "impossible triangle" of energy. Firstly, based on the background of "fish-light complementarity", a light-storage-load microgrid system model is established, and multidimensional dynamic objective functions that include economic, environmental, and comprehensive aspects are proposed. Secondly, considering the shortcomings of the sparrow search algorithm, such as insufficient diversity and easy trapping in local optima, an improved sparrow search algorithm (SA-ISSA) based on simulated annealing algorithm and hybrid strategy is proposed for microgrid energy optimization scheduling. Finally, a case study was conducted on the "fish-light complementarity" factory breeding base in Puyue Town, Chongming, Shanghai, where the SA-ISSA algorithm is applied to solve the microgrid model and obtain the optimal energy scheduling scheme. The experimental results demonstrate that the SA-ISSA algorithm performs better and has higher application value in solving the microgrid energy optimization scheduling problem, providing reference for energy optimization scheduling strategies in microgrid systems under the "fish-light complementarity".

Key words: fisheries and light complementarity; microgrid; optimization scheduling; SA-ISSA algorithm