DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.253 **中图分类号**：TM73 **文献标志码**：A

基于改进跳蛛算法的微电网经济优化调度

李子龙(中国电源学会学生会员)，匡洪海(中国电源学会会员)，
徐雨洢(中国电源学会学生会员)，杨慧娴(中国电源学会学生会员)，
李星宇(中国电源学会学生会员)，曾千城(中国电源学会学生会员)
(湖南工业大学交通与电气工程学院，株洲 412007)

摘要：为解决微电网分布式电源出力配合引起的经济性问题，提出一种改进跳蛛优化算法 IJSOA(improved jumping spider optimization algorithm)。首先引入佳点集策略增加初始化种群多样性，引入余弦相似度策略增强跳出局部最优解的能力，通过设置非线性收敛因子平衡全局搜索和局部搜索的能力，提出改进的信息素更新策略加快算法收敛速度、提高收敛性能；然后建立以发电维护费用和污染治理费用最低的并网型微电网经济优化调度模型及系统的优化运行策略；最后通过 IJSOA 在不同策略下进行仿真实验，并与其他算法进行对比分析。仿真结果表明，IJSOA 相较于传统跳蛛优化算法 JSOA(jumping spider optimization algorithm)、蚁群算法 ACO(ant colony optimization)等算法，经济性最大提高了 10.63%，验证了所提算法的经济性和有效性。

关键词：改进跳蛛算法 IJSOA；微电网；经济调度；余弦相似度；改进信息素

Economic Optimization Scheduling of Microgrid Based on Improved Spider Jumping Algorithm

LI Zilong, *Student Member*, *CPSS*, KUANG Honghai, *Member*, *CPSS*, XU Yuhao, *Student Member*, *CPSS*, YANG Huixian, *Student Member*, *CPSS*, LI Xingyu, *Student Member*, *CPSS*, ZENG Qiancheng, *Student Member*, *CPSS*
(School of Transportation and Electrical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: In order to solve the economic problems caused by the coordinated output of microgrid distributed power generation, an improved jumping spider optimization algorithm (IJSOA) is proposed. First, the best point set strategy is to increase the diversity of the initial population, and the cosine similarity strategy is introduced to enhance the ability to jump out of the local optimal solution, and a non-linear convergence coefficient is set that balances global and local search capabilities, and an improved pheromone update strategy is proposed to accelerate the convergence speed and improve the convergence performance of the algorithm. Then, the grid-connected microgrid economic optimization scheduling model and the optimal operation strategy of the system with the lowest power generation maintenance cost and pollution control cost are established. Finally, simulation experiments are conductes with IJSOA under different strategies, and the results are compared and analyzed with those of other algorithms. The simulation results show that the IJSOA improves the economy by 10.63% compared with the traditional algorithms such as jumping spider optimization algorithm (JSOA) and ant colony algorithm (ACO), which verifies the economy and effective-ness of the proposed method.

Keywords: Improved jumping spider optimization algorithm (IJSOA); microgrid; economic dispatch; cosine similarity; improved pheromone

收稿日期：2024-06-06；**修回日期**：2024-07-29，2024-09-02；
录用日期：2024-09-20；**网络首发日期**：2024-10-14
基金项目：湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ50176)；湖南省教育厅科学研究重点资助项目(23A0441)
This work is supported by Natural Science Foundation of Hunan Province under the grant 2023JJ50176; the Key Scientific Research Project of Hunan Province Education Bureau under the grant 23A0441

随着分布式电源在微电网中的占比越来越大[1-2]，越来越多的学者着手研究微电网优化调度，通过合理安排微电网中各微电源的出力计划，从而提高微电网经济性[3-5]。

目前已有大量文献从神经网络[6]、鲸鱼算法 WOA(whale optimization algorithm)[7]、蚁群算法 ACO(ant colony optimization)[8]等智能算法对微电网进行经济优化调度。文献[9]提出了一种考虑弹性恢复和经济性的多目标调度模型，该模型基于传统的微电网经济调度得到兼具弹性恢复力和经济性的电网系统；文献[10]提出了综合考虑碳排放和低碳需求响应的微电网低碳-经济协同双层优化调度模型，能有效兼顾系统的低碳性和经济性；文献[11]建立了分时电价优化模型，在分时电价的基础上，建立优化前、后的分布式发电负荷不平衡量进行模型调度，使得微电网中的能源利用率最高、经济效率最优。为降低独立微电网的综合发电成本、提高供电可靠性，文献[12]提出了改进灰狼优化算法，该算法为独立型微电网的安全可靠和经济运行奠定了基础；为提高微电网运行的经济性和稳定性，文献[13]提出了改进免疫粒子群算法，该算法有效降低了投资成本，为微电网的容量优化提供了参考价值。

综上，所述研究均未考虑环保成本，故本文针对并网型微电网运行经济性和环保性问题，建立了包含发电维护费用和污染治理费用的优化模型，并提出了改进跳蛛算法 IJSOA(improved jumping spider optimization algorithm)。该算法通过在传统跳蛛算法 JSOA(jumping spider optimization algorithm)[14]中引入佳点集策略、余弦相似度策略、非线性收敛因子、改进信息素更新这 4 种策略，有效加快了算法收敛速度、提升了收敛性能。本文通过算例仿真与算法测试验证了所提策略以及算法的可靠性与优越性。

1 并网型微电网供电系统

本文采用如图 1 所示的微电网系统，该系统主要由光伏 PV(photovoltaic)系统、柴油发电机 DE (diesel engine generator)、风力发电 WT(wind turbine)分布式清洁发电单元、电网、蓄电池储能 BAT (battery energy storage)、燃料电池 FC(fuel cell)及负荷构成。

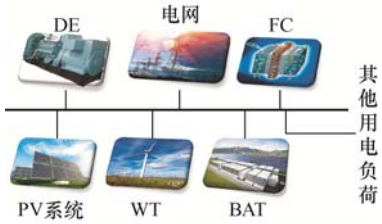


图 1 微电网的系统结构

Fig. 1 System structure of microgrid

1.1 分布式清洁发电单元

系统中 PV 的输出功率[15]受太阳光照强度影响，一般工作在最大功率点跟踪模式下；WT 的输出功率[16]受风速大小影响。二者的输出功率可分别表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{PV}}=\zeta\eta_{\mathrm{m}}\cos\theta \\ P_{\mathrm{WT}}=\begin{cases} 0 & v<v_{\mathrm{ci}},v>v_{\mathrm{co}} \\ \dfrac{v^3-v_{\mathrm{ci}}^3}{v_{\mathrm{r}}^3-v_{\mathrm{ci}}^3}P_{\mathrm{r}} & v_{\mathrm{ci}}\leqslant v\leqslant v_{\mathrm{r}} \\ P_{\mathrm{r}} & v_{\mathrm{r}}\leqslant v\leqslant v_{\mathrm{co}} \end{cases} \end{cases} \tag{1}$$

式中：P_{PV} 为 PV 实际出力；ζ 为太阳光照强度；η_{m} 为 PV 出力效率；θ 为光照与光伏板的夹角；P_{WT} 和 P_{r} 分别为 WT 的实际功率和额定功率；v、v_{ci}、v_{co}、v_{r} 分别为风机的实时风速、切入风速、切出风速、额定风速。

1.2 可控微电源机组

系统中的 DE、FC 属于可控微电源设备，其输出功率可有效控制，能够较好地提高系统的稳定性与可靠性，其燃料成本可分别表示为

$$M_{\mathrm{DE}}(t)=\eta_1P_{\mathrm{DE}}^2(t)+\eta_2P_{\mathrm{DE}}(t)=\sigma_1P_{\mathrm{DE}}(t) \tag{2}$$

$$M_{\mathrm{FC}}(t)=\frac{m_{\mathrm{fuel}}}{c_{\mathrm{fuel}}\eta_{\mathrm{FC}}}P_{\mathrm{FC}}(t)=\sigma_2P_{\mathrm{FC}}(t) \tag{3}$$

式中：$M_{\mathrm{DE}}(t)$ 为 DE 的燃料成本；η_1、η_2 为 DE 所用燃料的成本价格；$P_{\mathrm{DE}}(t)$ 为 DE 在 t 时刻的功率；$M_{\mathrm{FC}}(t)$ 为 FC 的燃料成本；m_{fuel} 为 FC 所用燃料的价格；c_{fuel} 为 FC 所用燃料的低热值；η_{FC} 为 FC 的

发电效率；$P_{\mathrm{FC}}(t)$ 为 FC 在 t 时刻的功率；σ_1、σ_2 分别为柴油发电机、燃料电池的燃料成本系数。

1.3 储能模块

BAT 是一种高效的能量存储方式，在需要时满足稳定的电力供应，不使用时也能进行充电，实现对负荷的削峰填谷，改善供电质量、降低运营费用。BAT 的数学模型为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{b}} = U_{\mathrm{b}t} I_{\mathrm{b}t} X_{\mathrm{b}} \\ S_{\mathrm{BAT,min}} \leqslant S_{\mathrm{BAT,ch}}(t) \leqslant S_{\mathrm{BAT,max}} \\ S_{\mathrm{BAT,min}} \leqslant S_{\mathrm{BAT,dis}}(t) \leqslant S_{\mathrm{BAT,max}} \\ S_{\mathrm{b,min}} \leqslant S_{\mathrm{b},t} \leqslant S_{\mathrm{b,max}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：P_{b} 为 BAT 的输出功率；$U_{\mathrm{b}t}$ 为 BAT 在 t 时刻的电压；$I_{\mathrm{b}t}$ 为 BAT 在 t 时刻的充放电电流；X_{b} 为 BAT 数量；$S_{\mathrm{BAT,ch}}(t)$、$S_{\mathrm{BAT,dis}}(t)$ 分别为蓄电池在 t 时刻的充、放电量；$S_{\mathrm{BAT,min}}$、$S_{\mathrm{BAT,max}}$ 分别为 BAT 的最小、最大输出电能；$S_{\mathrm{b},t}$ 为 BAT 在 t 时刻的电量状态；$S_{\mathrm{b,min}}$、$S_{\mathrm{b,max}}$ 分别为 BAT 的最低、最高电量状态。

2 微电网优化运行数学模型

本文建立以微电网系统发电维护成本最低、污染物治理费用最小为目标的微电网多目标优化运行模型。

2.1 分布式清洁发电单元

2.1.1 微电网总发电运行费用

微电网总发电运行费用的表达式为

$$F_1 = M_1 + M_2 + M_3 \tag{5}$$

式中：F_1 为微电网的总发电费用；M_1 为微电网的燃料费用；M_2 为微电网的运行维护费用；M_3 为微电网购能费用。

各费用的具体模型分别为

$$M_1 = \sum_{t=1}^{T} [M_{\mathrm{DE}}(t) + M_{\mathrm{FC}}(t)] \tag{6}$$

$$M_2 = \sum_{i=1}^{k} \beta_i P_i(t) \tag{7}$$

$$M_3 = m_{\mathrm{grid}} \left[\sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{buy}}(t) - \sum_{t=1}^{T} P_{\mathrm{sell}}(t) \right] \tag{8}$$

式中：T 为总时段数，取值为 24；k 为系统微电源的个数；β_i 为第 i 个微电源的维护费用系数；$P_i(t)$ 为第 i 个微电源在 t 时刻发出的功率；m_{grid} 为分时电价；$P_{\mathrm{buy}}(t)$、$P_{\mathrm{sell}}(t)$ 分别为微电网在 t 时刻向大电网的购电、售电功率。

2.1.2 环境和污染治理费用

环境和污染治理费用表达式为

$$\begin{cases} F_2 = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{k} [\psi(t)(\alpha_{i,\mathrm{CO_2}} + \alpha_{i,\mathrm{CO}} + \alpha_{i,\mathrm{SO_2}} + \alpha_{i,\mathrm{NO}_x})] \\ \psi(t) = \sum_{i=1}^{T} \sum_{n=1}^{N} P_i(t) \mu_{i,n} \end{cases} \tag{9}$$

式中：F_2 为环境污染治理费用；$\alpha_{i,\mathrm{CO_2}}$、$\alpha_{i,\mathrm{CO}}$、$\alpha_{i,\mathrm{SO_2}}$、α_{i,NO_x} 分别为第 i 个微电源产生的 $\mathrm{CO_2}$、CO、$\mathrm{SO_2}$、NO_x 污染气体的治理费用系数；$\psi(t)$ 为污染物的排放量；N 为污染气体的种类；$\mu_{i,n}$ 为第 i 个微电源产生的第 n 种气体排放系数。

2.2 约束条件

2.2.1 微电源出力约束及爬坡功率约束

微电源出力及爬坡功率约束可分别表示为

$$P_{i,\mathrm{min}} \leqslant P_i(t) \leqslant P_{i,\mathrm{max}} \tag{10}$$

$$\begin{cases} \dfrac{P_k(t) - P_k(t-1)}{\Delta t} \leqslant P_{k,\mathrm{up}} \\ \dfrac{P_k(t-1) - P_k(t)}{\Delta t} \leqslant P_{k,\mathrm{down}} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$P_{i,\mathrm{min}}$、$P_{i,\mathrm{max}}$ 分别为第 i 个微电源发出功率的最小、最大值；$P_k(t)$、$P_k(t-1)$ 分别为第 t 时刻与第 $t-1$ 时刻的第 k 个微电源发出的功率；$P_{k,\mathrm{up}}$、$P_{k,\mathrm{down}}$ 分别为第 k 个微电源的上、下坡率；Δt 为第 t 时刻与第 $t-1$ 时刻相差的时长；k 可用集合表示，具体为 $k = \{\mathrm{DE}, \mathrm{FC}\}$。

2.2.2 微电网与大电网的交换功率约束

微电网与大电网的交换功率约束可表示为

$$\begin{cases} U_{\mathrm{buy}}(t) + U_{\mathrm{sell}}(t) \leqslant 1 \\ 0 \leqslant P_{\mathrm{buy}}(t) \leqslant U_{\mathrm{buy}}(t) P_{\mathrm{buy,max}} \\ 0 \leqslant P_{\mathrm{sell}}(t) \leqslant U_{\mathrm{sell}}(t) P_{\mathrm{sell,max}} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$U_{\mathrm{buy}}(t)$、$U_{\mathrm{sell}}(t)$ 分别为系统在 t 时刻的购、售电状态(非 0 即 1)；$P_{\mathrm{buy,max}}$、$P_{\mathrm{sell,max}}$ 分别为微电网

与大电网进行功率交换时的最大购、售电功率。

2.2.3 功率平衡约束

在微电网运行过程中，其所发出的功率要与所有类型负荷的消耗功率相等，即

$$\sum_{i=1}^{k} P_i(t) + P_{\text{buy}}(t) + P_{\text{BAT,dis}}(t) = P_{\text{Load}}(t) + P_{\text{BAT,ch}}(t) + P_{\text{sell}}(t) \tag{13}$$

式中，$P_{\text{Load}}(t)$ 为第 t 时刻微电网中的负荷。

3 改进跳蛛算法

3.1 佳点集策略初始化种群

传统 JSOA 采用随机分布的方法初始化种群，该方法不仅难以保证种群的多样性，还易导致 JSOA 算法陷入局部最优。本文采用佳点集策略对跳蛛种群初始化，该策略的原理为通过构造具有低差异性的点集覆盖搜索空间，从而避免初始种群集中在搜索空间的某些特定区域，数学表达式为

$$\begin{cases} P_n(j) = \{(\{r_1^{(n)} \cdot j\}, \{r_2^{(n)} \cdot j\}, \cdots, \{r_S^{(n)} \cdot j\}) \\ \qquad 1 \leqslant j \leqslant n\} \\ \varphi(n) = C(r,\varepsilon) n^{-1+\varepsilon} \\ r \in G_S \end{cases} \tag{14}$$

式中：j 为索引；$P_n(j)$ 为佳点集；$\varphi(n)$ 为偏差；$C(r,\varepsilon)$ 为只与 r 和 ε（ε 为任意正数）有关的常数，r 为佳点，取 $r = \{2\cos(2\pi j / p),\ 1 \leqslant j \leqslant s\}$；$G_S$ 为 S 维欧氏空间中的单位立方体。

相对于随机分布的方法，佳点集策略使序列更加均匀、种群覆盖全局范围更广，有利于 IJSOA 的全局寻优，2 种方法的分布对比如图 2 所示。

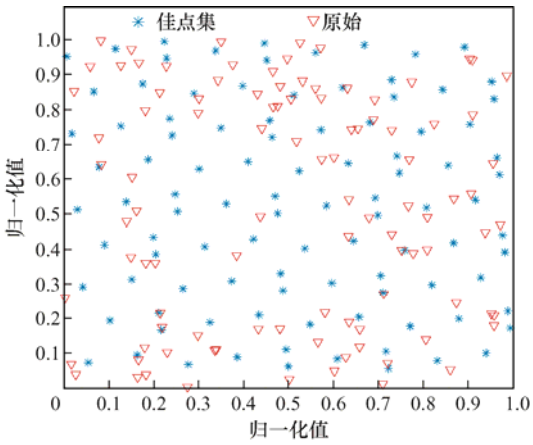


图 2 随机法与佳点集法分布对比图

Fig. 2 Comparison of the distribution of the random method and the best point set method

3.2 余弦相似度策略

JSOA 在中后期，种群容易集中在当前代最优个体附近，甚至出现过度聚集和重叠的情况，导致种群难以保持多样性，且算法易陷入局部最优，故本文引入余弦相似度策略避免这种情况的发生，该策略的示意如图 3 所示。从图 3 中可知，$\cos(\boldsymbol{a},\boldsymbol{b})$ 反映了向量 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{b}$ 的方向一致性关系：当 $\cos(\boldsymbol{a},\boldsymbol{b})=1$ 时，表示两向量方向相同；当 $\cos(\boldsymbol{a},\boldsymbol{b})=-1$ 时，表示两向量方向相反。

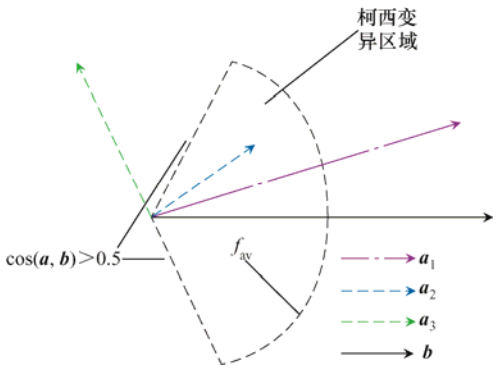


图 3 余弦相似度策略示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the cosine similarity strategy

通过当前代种群最优个体位置和个体位置构造向量 $\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$，然后通过余弦相似度策略更新相似度大 $(\cos(\boldsymbol{a},\boldsymbol{b}) > 0.5)$ 的个体，并与当前代平均适应度值 f_{av} 做比较。适应度大的个体($\boldsymbol{a}_1$)保持原算法更新策略，适应度小的个体($\boldsymbol{a}_2$)则通过柯西变异进行更新。柯西概率密度函数与正态分布相比，峰更低、尾部更厚、整体较为扁平，柯西分布可以使种群产生更多样化的个体。余弦相似度策略可表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{a} = x_{\text{best}}(l) \\ \boldsymbol{b} = x_i(l) \end{cases} \tag{15}$$

$$\cos(\boldsymbol{a},\boldsymbol{b}) = \frac{\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b}}{|\boldsymbol{a}| \times |\boldsymbol{b}|} \tag{16}$$

$$x_i(l+1) = x_i(l) + \zeta[x_{\text{best}}(l) - x_{\text{r}}(l)] \tag{17}$$

式中：l 为当前迭代次数；$x_{\text{best}}(l)$ 为当前代种群最优个体位置；$x_i(l)$ 为当前代个体位置；$x_i(l+1)$ 为更新后的下一代个体位置；ζ 为柯西算子；$x_{\text{r}}(l)$ 为

当前代随机个体位置。

3.3 非线性收敛因子

本文引入一种非线性变化的收敛因子 δ，当算法在迭代初期进行大规模搜索时，采用缓慢衰减的 δ 提高种群的寻优能力。在算法的迭代过程中种群会逐渐收敛，故采用快速衰减的 δ 帮助算法局部寻找最优解，同时引入控制因子 K 控制 δ 的衰减幅度。δ 的数学模型为

$$\delta=\delta_{\mathrm{m}}\cdot\left[1-\left(\frac{\mathrm{e}^{l/l_{\max}}-1}{\mathrm{e}-1}\right)^{K}\right] \tag{18}$$

式中：δ_{m} 为收敛因子的初始值，是最大适应度与最小适应度的差值，即适应度区间长度；$l_{\max}$ 为最大迭代次数。不同 K 的衰减幅度对比，如图 4 所示。

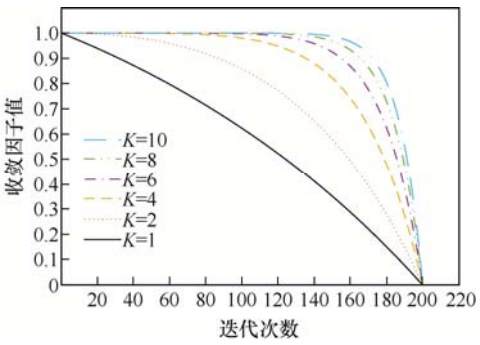


图 4　不同 K 的衰减幅度对比图

Fig. 4 Comparison of the attenuation amplitude of different K

3.4 信息素更新策略的改进

γ 为本文信息素期望程度，当参数取值过大时，更新个体较多，种群更具多样性，但会导致全局收敛速度变慢；当参数取值过小时，更新个体较少，且易造成算法局部收敛。为防止出现上述情况，本文将衰减参数引入到 γ 中，具体表示为

$$\gamma=\begin{cases}\dfrac{3}{4}(P_{\mathrm{h,max}}-P_{\mathrm{h,min}}) & 0<l\leqslant 20\%l_{\max}\\ \sqrt[(l/10)]{\dfrac{3}{16}(P_{\mathrm{h,max}}-P_{\mathrm{h,min}})^{2}}\cdot\gamma & 20\%l_{\max}<l\leqslant 40\%l_{\max}\\ \dfrac{1}{4}(P_{\mathrm{h,max}}-P_{\mathrm{h,min}}) & 40\%l_{\max}<l\leqslant l_{\max}\end{cases} \tag{19}$$

式中，$P_{\mathrm{h,max}}$、$P_{\mathrm{h,min}}$ 分别为第 l 代中的最大、最小信息素值。

在算法初期，采用改进的 γ 能有效保证种群多样性；在算法中期，由于采用了衰减策略并限制了衰减次数，使 γ 能在有效区间内变动，解的随机性得以加强；在算法后期，收敛速度得以加快。原信息素低的跳蛛个体进行的变异策略可表示为

$$\begin{cases}r_1=\mathrm{round}[1+(d_{\mathrm{im}}-1)\cdot r_{\mathrm{rand}}]\\ r_2=\mathrm{round}[1+(d_{\mathrm{im}}-1)\cdot r_{\mathrm{rand}}]\\ x_i(l)=x_{\mathrm{best}}(l)+[x_i(r_1)-(-1)^{\sigma}x_i(r_2)]/2\end{cases} \tag{20}$$

式中：r_1、r_2 为随机生成的整数；round(·)为取整函数；d_{im} 为维度；r_{rand} 为[0,1]的随机数；$\sigma\in\{0,1\}$。该策略的随机性太强，且收敛速度过慢，其示意如图 5 所示。

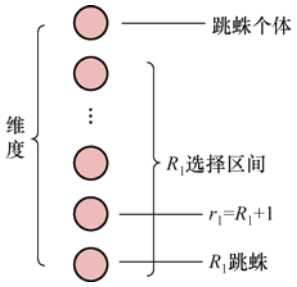


图 5　原变异策略示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the original mutation strategy

本文改进的变异策略可表示为

$$r_1=r_2$$
$$\begin{cases}\mathrm{round}(\kappa_1 r_{\mathrm{rand}}) & p_{\mathrm{h}}>2\cdot\mathrm{rank}(\psi)/3\\ \mathrm{round}(\kappa_2 r_{\mathrm{rand}}) & 2\cdot\mathrm{rank}(\psi)/3>p_{\mathrm{h}}>\mathrm{rank}(\gamma)/3\\ \mathrm{round}(\kappa_3 r_{\mathrm{rand}}) & p_{\mathrm{h}}<\mathrm{rank}(\psi)/3\end{cases} \tag{21}$$

式中：κ_1、κ_2、κ_3 分别为大于 $\gamma_{\max}$、γ 衰减、小于 $\gamma_{\min}$ 的区间；p_{h} 为当前个体信息数值，ψ 为 $p_{\mathrm{h}}<\gamma$ 的区间。

该策略首先对跳蛛适应度进行降序排列，此跳蛛序列被 γ 分成了 3 个区间，即大于 $\gamma_{\max}$、小于 $\gamma_{\min}$ 和 γ 衰减区间；然后对每一代中小于 γ 的个体进行降序排列，具体示意如图 6 所示。

每代均需变异个体中的前 1/3，使其在每代优秀个体中进行变异，加快收敛速度；中 1/3 个体使

其在中等个体中进行变异，增加种群多样性；后1/3 个体从 r_1 的每代优秀个体与 r_2 的尾部个体中选取，使其在大范围内进行变异，算法不易陷入局部最优。本文所提 IJSOA 的流程如图 7 所示。

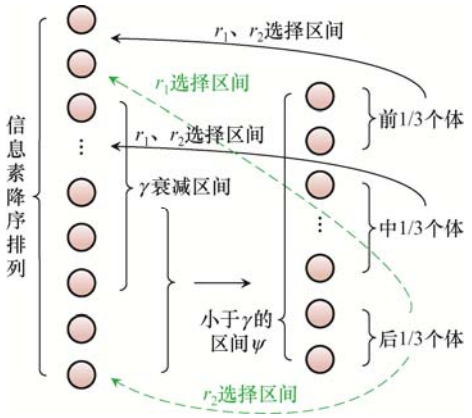


图 6 改进变异策略示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the improved variant strategy

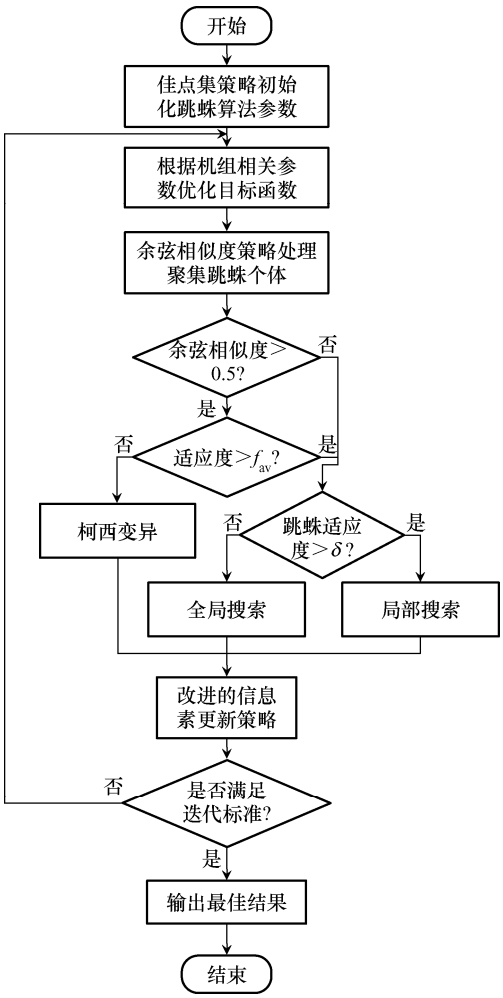


图 7 IJSOA 流程图

Fig. 7 Flowchart of the IJSOA

4 算例分析

4.1 运行策略

由于 PV 发电与 WT 均属于可再生能源发电技术，不会排放污染物，因此在运行过程中优先考虑 PV 和 WT 的消纳。在综合经济性能方面 FC 要优于 DE，所以在微电源出力方面优先选择 FC。本文采用如图 8 所示的运行策略，即策略一。策略二：在高峰时段率先由 BAT 为负荷供电，缺额功率再由微电源增补；平时段与低谷时段与策略一相同。策略三：在平时段提高 BAT 充电的优先级，为后续峰时段的填谷做准备；高峰时段与策略二相同；低谷时段与策略一相同。

4.2 算法测试

为了测试所提 IJSOA 的运算能力，本文采用表 1 中的测试函数来测试算法性能。Goldstein-price 函数的形状较为扁平，且函数的局部最优解与全局最优解相近，能有效测试算法的全局收敛能力；Ackley 函数的全局最优解与局部最优解相差较大，能有效测试算法达到全局最优解时的迭代速度。将本文 IJSOA 与传统 JSOA、ACO、WOA、灰狼算法 GWO(grey wolf optimization)进行对比，并将这 2 种测试函数分别运行 50 次，不同算法的对比结果见表 2，函数收敛对比曲线如图 9、图 10 所示。

由表 2 和图 9、图 10 可知，本文 IJSOA 与 JSOA、GWO 等算法相比，具有更优的运行速度与收敛性。

4.3 仿真参数

以玉溪某地内测得的风光出力和负荷为基础，如图 11 所示，采用本文提出的 IJSOA 进行微电网经济优化调度。分时电价[8]设置见表 3，各微电源相关参数[5]、污染物的排放系数和相应的治理费用[17-18]见表 4 和表 5。

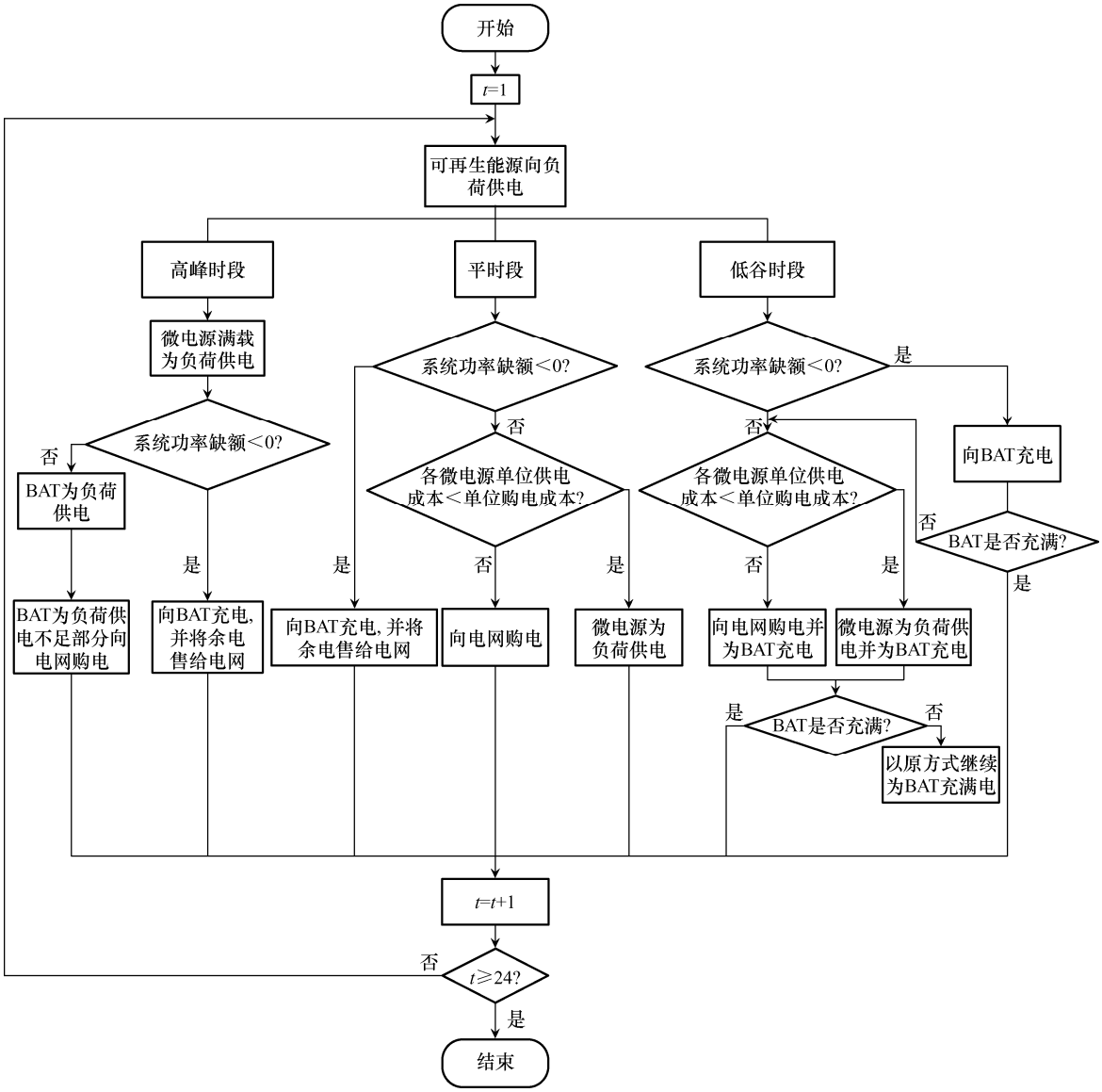


图 8　微电网系统基本运行策略

Fig. 8 Basic operation strategy of microgrid system

表 1　测试函数参数

Tab. 1 Test function parameters

函数	表达式	维度	区间	最小值
Goldstein-price	$f(x,y)=[1+(x+y+1)^2(19-14x+3x^2-14y+6xy+3y^2)]\cdot$ $[30+(18-32x+12x^2+48y-36xy+27y^2)(2x-3y)^2]$	2	[−2,2]	3
Ackley	$f(x)=f(x_1,\cdots,x_n)=-a\cdot\exp\left(-b\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i^2}\right)-$ $\exp\left(\frac{1}{d}\sum_{i=1}^{n}\cos(cx_i)\right)+a+\exp(1)\quad a=20,b=0.3,c=2$	10	[−32,32]	0

表 2 算法测试结果平均值对比

Tab. 2 Comparison of average test results of algorithm

算法	Goldstein-price	Ackley
IJSOA	3.017	5.25×10^{-11}
JSOA	3.180	1.25×10^{-10}
GWO	3.299	3.03×10^{-9}
ACO	3.413	1.06×10^{-7}
WOA	3.665	7.24×10^{-7}

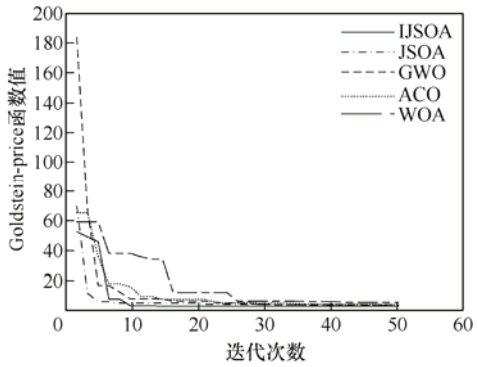


图 9 Goldstein-price 函数收敛曲线

Fig. 9 Goldstein-price function convergence curves

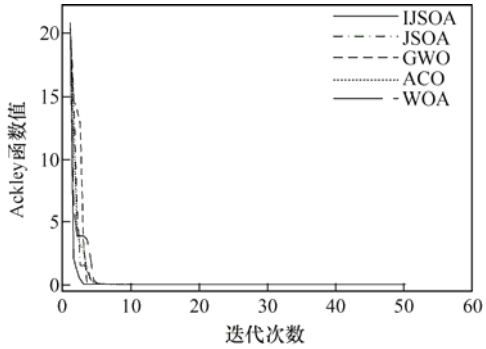


图 10 Ackley 函数收敛曲线

Fig. 10 Ackley function convergence curves

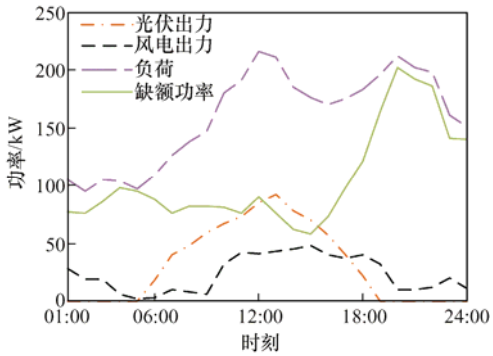


图 11 24 时刻功率

Fig. 11 24 hours of power

表 3 分时电价

Tab. 3 Time-of-use electricity prices

时段划分	具体时段	电价/(元/kW·h)
低谷时段	00:00—08:00	0.43
高峰时段	10:00—14:00 18:00—22:00	0.98
平时段	剩余时段	0.60

表 4 各微电源参数

Tab. 4 Parameters of each micro power supply

电源类型	燃料费用/(元/kW·h)	维护成本/(元/kW·h)
PV	0	0.080
WT	0	0.090
DE	0.251	0.055
FC	0.220	0.042
BAT	0	0.066

表 5 治理污染气体相关参数

Tab. 5 Parameters for pollutant gas control

气体种类	治理费用/(元/kg)	污染物的排放系数/(g/kW·h)	
		DE	FC
CO	10.290	0.030	0
CO_2	0.210	649.000	489.000
SO_2	14.842	0.206	0.030
NO_x	62.964	3.898	1.813

4.4 仿真分析

采用本文运行策略一和表 5，通过储能系统的削峰填谷作用以及大电网供电对该地区负荷进行优化，各微电源在 IJSOA 算法下的出力优化结果如图 12 所示。其中：大电网正值为系统向电网购电，负值为系统向电网售电；蓄电池充放功率正值为向系统供电，负值为系统向其充电。在 00:00—08:00 时段电价处于低谷时段，系统进行购电的同时将剩余电量存储在 BAT 中，为后续负荷高峰电量供应不足出力，这起到了削峰填谷作用；09:00、15:00—17:00、23:00—24:00 为平时段，微电源单位供电成本略低于单位购电成本，由微电源出力满足负荷需求；10:00—14:00、18:00—22:00 时段为高峰时段，单位购电成本远大于微电源单位供电成本，由微电源和 BAT 来出力，若仍然无法满足负荷需求再向电网购电；若满足负荷需求且

BAT 电量已存满时，则向电价高的电网售电来降低调度成本。

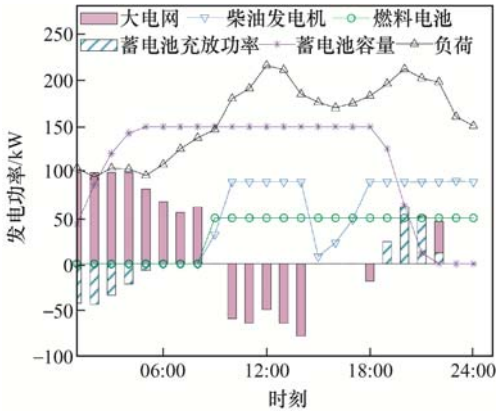


图 12　策略一并网微电网运行结果

Fig. 12 Operation results of grid-connected microgrid under strategy one

图 13 与图 14 分别为采用策略二、三，各微电源在 IJSOA 算法下的出力优化结果。

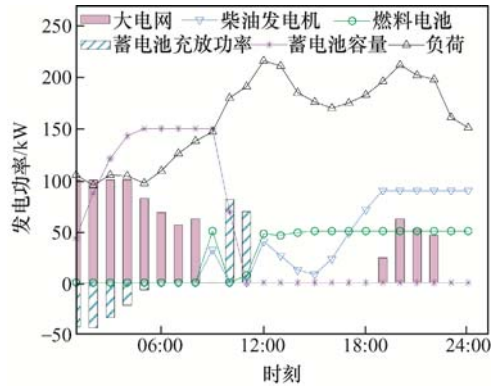


图 13　策略二并网微电网运行结果

Fig. 13 Operation results of grid-connected microgrid under strategy two

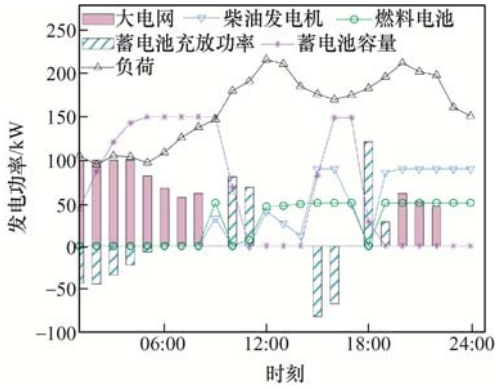


图 14　策略三并网微电网运行结果

Fig. 14 Operation results of grid-connected microgrid under strategy three

负荷曲线优化如图 15 所示，优化数据对比见表 6。图 15 中优化后的负荷曲线较原负荷曲线更为平缓，在可再生能源出力较低的头部谷和尾部峰进行了削峰填谷，而在中部则由可再生能源起削峰作用；表 6 中优化后的基荷提升了 5.64%、峰荷降低了 4.75%。这验证了所提算法削峰填谷的可行性，使负荷曲线更为平缓。

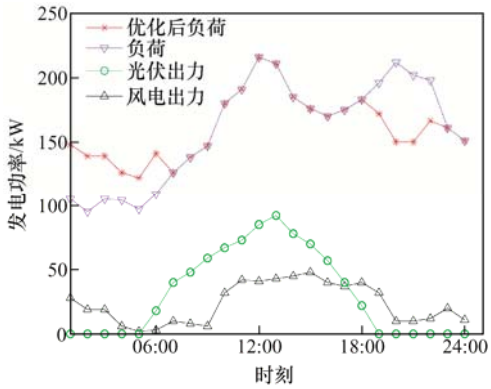


图 15　负荷曲线优化图

Fig. 15 Load curve optimization diagram

表 6　负荷优化数据对比

Tab. 6 Comparison of load optimization data

%

状态	基荷	腰荷	峰荷
优化前	59.48	29.56	10.96
优化后	65.12	28.67	6.21

采用本文所提运行策略将本文 IJSOA 与 JSOA、WOA、ACO、GWO 进行寻优对比，5 种算法的迭代曲线如图 16 所示。由图可知，本文 IJSOA 与其他算法相比，最先收敛且寻优结果优于其他算法。

表 7 为不同算法在策略一下的费用成本，可知本文 IJSOA 相较于 JSOA、WOA、ACO、GWO 在总成本上分别减少了 5.21%、10.63%、8.51%、6.63%；在发电维护费用上分别减少了 5.09%、14.00%、9.44%、6.69%；污染治理费用上分别减少了 5.35%、6.69%、7.48%、6.57%。这表明本文 IJSOA 相较于其他算法拥有更优的搜索能力，且不易陷入局部最优。

表 8 为本文 IJSOA 在不同策略下的费用成本，可知策略一相较于策略二、策略三在总成本上分别减少了 7.96%、9.94%；在发电维护费用上分别减少了 29.5%、30.44%。策略一虽然在污染治理费用上有所增加，但是总成本相较于其他策略更低。

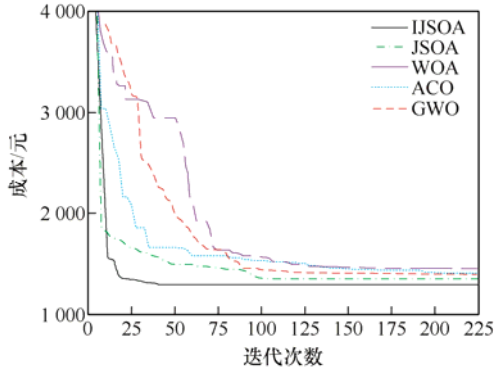


图 16 微电网总运行成本迭代曲线

Fig. 16 Iterative curve of the total operating cost of a microgrid

表 7 不同算法在策略一下的费用成本

Tab. 7 Cost comparison of different algorithms under strategy one

算法	发电维护费用/元	污染治理费用/元	总成本/元
IJSOA	684.352	632.537	1 316.889
JSOA	721.055	668.261	1 389.317
WOA	795.742	677.855	1 473.598
ACO	755.663	683.695	1 439.359
GWO	733.401	676.986	1 410.388

表 8 IJSOA 算法在不同策略下的费用成本

Tab. 8 Costs of the IJSOA under different strategies

策略	发电维护费用/元	污染治理费用/元	总成本/元
策略一	684.352	632.537	1 316.889
策略二	970.765	459.977	1 430.742
策略三	983.853	478.360	1 462.213

5 结论

本文对并网型微电网经济调度问题展开研究，通过构建微电网优化调度模型以及优化运行策略，提出 IJSOA 对系统优化模型进行求解，通过算例仿真分析得到如下结论。

(1)IJSOA 通过优化微电网中各分布式电源的输出，使得微电网在经济性方面的提升最大可达 10.63%。这种成本上的节约对实际的微电网运营具有直接的经济价值，能够帮助运营者减少开支、提高利润。

(2)本文所提算法不仅关注发电成本，还将污染治理费用纳入优化模型。这种同时考虑经济性和环保性的优化方法非常符合当前绿色经济的发展趋势，能够帮助微电网运营商在满足环保法规的同时，尽可能降低运营成本，提升运营商在市场中的竞争力。

(3)虽然仿真结果展示了本文所提算法与运行策略的优越性，但在实际应用中，微电网的运行环境可能更加复杂多变。因此，建议在实际的微电网调度过程中根据需求灵活调整本文所提算法，并且可以拓展其在各类微电网中应用的可能性。

参考文献：

[1] 杨森, 郭宁, 张寿明. 不确定性条件下农业微电网与灌溉系统相结合的鲁棒优化调度[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(9): 1432-1442.
Yang Sen, Guo Ning, Zhang Shouming. Robust optimal scheduling of agricultural microgrid combined with irrigation system under uncertainty conditions [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(9): 1432-1442. (in Chinese)

[2] 戎士敏, 王聪, 罗滇生, 等. 基于生态博弈思维的微电网优化调度模型分布设计及优化[J]. 电源学报, 2025, 23(7): 191-199.
Rong Shimin, Wang Cong, Luo Diansheng, et al. Distributed design and optimization of microgrid optimization scheduling model based on ecological game thinking [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(7): 191-199. (in Chinese)

[3] 余运俊, 杨林锋, 哈志蕊, 等. 考虑灵活性资源的微电网双层优化策略[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 115-124.
Yu Yunjun, Yang Linfeng, Ha Zhirui, et al. Two-layer optimal strategy for microgrid considering flexible resources [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 115-124. (in Chinese)

[4] 陈曦, 付文龙, 张海荣, 等. 考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 219-228.
Chen Xi, Fu Wenlong, Zhang Hairong, et al. Optimal dispatching strategy of shared energy storage with multi-microgrid considering uncertainty of new energy generation [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 219-228. (in Chinese)

[5] 李子龙, 匡洪海, 徐雨溟, 等. 碳交易机制下考虑液态 CO_2 储能的微电网双层优化调度[J]. 电源学报, 2026, 24(3): 100-110.
Li Zilong, Kuang Honghai, Xu Yuhao, et al. Double-layer optimal scheduling of microgrid considering liquid CO_2 energy storage under carbon trading mechanism [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(3): 100-110. (in Chinese)

[6] 季颖, 王建辉. 基于深度强化学习的微电网在线优化调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1675-1684.
Ji Ying, Wang Jianhui. Online optimal scheduling of a microgrid based on deep reinforcement learning [J]. Control and Decision, 2022, 37(7): 1675-1684. (in Chinese)

[7] Mousavi Y, Alfi A, Kucukdemiral I B. Enhanced fractional chaotic whale optimization algorithm for parameter identification of isolated wind-diesel power systems [J]. IEEE Access, 2020, 8: 140862-140875.

[8] 李圣清, 邓娜, 颜石, 等. 基于改进蚁群动态规划的光储微网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 468-476.
Li Shengqing, Deng Na, Yan Shi, et al. Optimal configuration optimization of PV energy storage microgrid using improved ant colony dynamic programming [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(2): 468-476. (in Chinese)

[9] 陈将宏, 时康昊, 胡佳慧, 等. 考虑弹性恢复的微电网经济优化调度[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(3): 623-634.
Chen Jianghong, Shi Kanghao, Hu Jiahui, et al. Economic optimal scheduling of microgrid considering elastic recovery [J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(3): 623-634. (in Chinese)

[10] 谭玲玲, 汤伟, 楚冬青, 等. 考虑电-氢一体化的微电网低碳-经济协同优化调度[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 137-148.
Tan Lingling, Tang Wei, Chu Dongqing, et al. Low-carbon-economic collaborative optimal dispatching of microgrid considering electricity-hydrogen integration [J]. Electric Power, 2024, 57(5): 137-148. (in Chinese)

[11] 陈莉伟, 姚方, 马光辉. 考虑源荷交互的独立微电网分层优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 83-91.
Chen Liwei, Yao Fang, Ma Guanghui. Hierarchical optimal scheduling of the independent microgrid considering source-charge interaction [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 83-91. (in Chinese)

[12] 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 Chao, Wang Bin, Sun Zhixin, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(1): 256-262. (in Chinese)

[13] 李练兵, 王兰超, 景睿雄, 等. 基于改进免疫粒子群算法的混合储能容量优化[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 208-215.
Li Lianbing, Wang Lanchao, Jing Ruixiong, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage based on improved immune particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 208-215. (in Chinese)

[14] Peraza-Vázquez H, Peña-Delgado A, Ranjan P, et al. A bio-inspired method for mathematical optimization inspired by Arachnida salticidade [J]. Mathematics, 2022, 10(1): 102.

[15] Rahman M H, Yamashiro S. Novel distributed power generating system of PV-ECaSS using solar energy

estimation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 358-367.

[16] Belfkira R, Nichita C, Reghem P, et al. Modeling and optimal sizing of hybrid renewable energy system [C]// 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, Poland, 2008: 1834-1839.

[17] 秦昌民, 马兆兴, 陈昊, 等. 双碳目标下的新型微电网优化运行问题研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 46-53.
Qin Changmin, Ma Zhaoxing, Chen Hao, et al. Research on optimal operation of novel micro-grid under dual-carbon target [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 46-53. (in Chinese)

[18] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
Ding Ming, Zhang Yingyuan, Mao Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14. (in Chinese)



李子龙

作者简介：

李子龙(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：微电网优化。E-mail：1315922386@qq.com。

匡洪海(1972—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力系统运行与优化。E-mail：khhzyz@163.com。

徐雨溪(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：微电网容量配置。E-mail：980786842@qq.com

杨慧娴(2000—)，女，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：微电网优化调度。E-mail：455096562@qq.com

李星宇(2002—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：综合能源系统研究。E-mail：1606284520@qq.com

曾千城(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：小水电站优化研究。E-mail：1179028089@qq.com

(责任编辑：郭凯凯)

关于《电源学报》2025 年度优秀论文的表彰(一)

标题	所有作者 (标*为通信作者)	作者单位	刊期信息	详细信息
开绕组电机驱动系统剩余矢量重构容错策略研究	朱月婷, 杨淑英*, 张禹风, 张兴, 王涵宇	合肥工业大学电气与自动化工程学院	2025,23(8):235-245	
应用于中压直流系统的零电流开关中频直流变换器	丁明进[1], 杜文珍[2], 侯鹏飞[3], 陈武[3*]	1.国电南京自动化股份有限公司 2.中国华电集团有限公司生技部 3.东南大学电气工程学院	2025, 23(4): 45-52	
MMC 子模块 IGBT 开路故障与电压传感器故障联合诊断方法	刘靖伟[1], 马建军[2], 陈阳[3], 朱淼[1*], 文书礼[1]	1.上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室 2.上海交通大学国家电投智慧能源创新学院 3.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院	2025,23(8):329-341	
植入式医疗设备无线供电技术综述	陈浩, 丘东元*, 肖文勋, 陈艳峰	华南理工大学电力学院	2025,23(1):188-199	

《电源学报》对优秀论文及其作者表示热烈祝贺！