# 基于改进白鲸算法的分布式光储优化规划方法

姚建东<sup>1</sup>,吴 凡<sup>2</sup>,谢 波<sup>1</sup>,郝文斌<sup>1</sup>,杨毅强<sup>2</sup>,孟志高<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司,四川成都 610041;

2. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院,四川 宜宾 644000)

摘 要:针对分布式光伏接入配电网的选址定容规划问题,考虑并网带来的电压波动、电压越限等对电能质量的影响,通过引入储能系统来调节配电网节点电压。首先,采用迭代自组织数据分析算法,对分布式光伏出力数据进行聚 类划分,并以类间相似度和类内相似度对聚类效果进行评价;然后,构建配电网两阶段优化模型:第一阶段以总成本 最低为目标来考虑分布式光储的选址定容,并将规划参数代入下一阶段;第二阶段以节点电压偏移量最小和运维成 本最低为目标函数,动态调节储能系统荷电状态;接着,使用改进白鲸算法求解模型,该算法引入可变螺旋搜索策略 和纵横交叉策略使算法的局部寻优和全局寻优能力增强;最后,在 IEEE 33 节点下进行仿真验证。

关键词:聚类划分;分布式光储;选址定容;白鲸算法;优化配置

中图分类号:TM 715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2025)02-0016-08 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250203

# **Optimal Planning Method for Distributed Photovoltaic and Energy Storage Based on Improved Beluga Whale Optimization Algorithm**

YAO Jiandong<sup>1</sup>, WU Fan<sup>2</sup>, XIE Bo<sup>1</sup>, HAO Wenbin<sup>1</sup>, YANG Yiqiang<sup>2</sup>, MENG Zhigao<sup>1</sup>

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University

of Science & Engineering, Yibin 644000, Sichuan, China)

**Abstract**: Aiming at optimal siting and sizing for distributed photovoltaic (PV) access to distribution network, and considering the impacts of voltage fluctuation and voltage overlimit brought by grid connection on power quality, the voltage at distribution network nodes is regulated by introducing energy storage system. Firstly, an iterative self-organizing data analysis algorithm is employed to cluster the output data of distributed PV, and the clustering performance is evaluated based on between-class similarity and within-class similarity. Secondly, a two-stage optimization model for distribution network is established: the first stage aims to minimize the total cost by considering the siting and sizing of distributed PV and energy storage, and the planning parameters will be passed to the second stage; the second stage takes minimum node voltage deviation and minimum operation and maintenance costs as objective function. And then, the Beluga whale optimization algorithm is applied to solve the model, which incorporates variable spiral search strategy and crisscross strategy to enhance its local and global optimization capabilities. Finally, simulation verification is carried out on IEEE 33-node system.

Key words: cluster partition; distributed photovoltaic and energy storage; siting and sizing; Beluga whale algorithm; optimal configuration

0 引 言

"双碳"目标的推进为中国能源结构调整指明

基金项目:国网四川省电力公司科技项目"新型电力系统背景下虚 拟电厂控制策略及运行方法研究"(521904240005) 了方向,为了应对传统能源储量有限的问题,同时减 少温室气体的排放并保证清洁能源的可持续发展, 国家开始大力调整能源结构,分布式光伏也因此迅 速发展。分布式光伏并网规划和分布式光伏并网带 来的配电网电压波动<sup>[1]</sup>、电压越限<sup>[2]</sup>、谐波<sup>[3]</sup>等对 电能质量的影响成为当下研究热点。引入分布式储 能消纳光伏发电多余的电力,并在负荷高峰时段放 电起到电压调节的作用<sup>[4]</sup>,从而解决分布式光伏并 网造成的节点电压越限、电压偏差等问题。

尽管分布式储能能够有效缓解光伏发电带来的 电压问题,但光伏发电数据的复杂性和大规模数据 的处理仍是规划中的一大挑战,若直接调用这些数 据作为光伏规划的依据,易造成求解难度大、计算复 杂等问题<sup>[5]</sup>。所以需要对繁多的光伏数据进行聚 类划分。文献[6]通过改进的 K-means++算法将高 比例分布式光储聚合为数量较少的特征集群,有 效降低了光储变量繁多带来的数据量大的问题。文 献[7]通过改进迭代自组织数据分析方法(interative selforganizing data analysis techniques algorithm, ISODATA)算法对风光场景进行聚类分析,提高了 聚类的准确性和稳定性。上述文献通过对分布式光 伏场景进行聚类划分,有效简化了计算的复杂性,但 均未涉及分布式光伏储能系统的协调优化。

光储系统的选址定容需兼顾经济性与电网安全 性。文献[8]提出了一个两阶段重构方法,第一阶 段进行重构优化,第二阶段进行最优潮流优化,有 效减少了开关重构次数,降低了网络有功损耗。 文献[9]提出了一个双层规划方法,上层模型以配 电变压器全寿命周期成本最小为目标,下层模型计 及光伏与负荷的不确定性影响,提高了分布式光伏 消纳的经济性。文献[10]构建了一个综合考虑电 能质量、供电能力、光伏接入效果的多维度评价体 系,有效降低了节点电压偏差和线路传输压力。文 献[11] 通过改进蝴蝶优化算法,以配电网中的总网 损和电压偏差最小为目标,建立了光伏选址定容的 优化模型,提高了选址定容的优化精度。文献[12] 将蚁群算法和动态规划算法结合,以提高优化容量 配置性能为目标,将衰减参数引入调节因子,提高了 算法的优化性能。但上述文献模型在多目标协同与 算法收敛精度上仍有提升空间。

下面提出一种融合改进聚类算法与多目标优化 的分布式光储协调规划框架。首先,基于改进的 ISODATA 算法对分布式光伏场景聚类分析,提取不 同场景下的光伏出力特征;其次,构建两阶段优化模 型:第一阶段以投资成本最低为目标确定光储容量 与位置,第二阶段通过动态调节储能荷电状态优化 电压质量与运维成本;接着,采用改进白鲸优化算法 (improved Beluga whale optimization, IBWO)进行求 解;最后,采用 IEEE 33 节点验证优化算法的可行性 和准确性。

# 1 分布式光伏出力场景聚类划分

由于受光照强度、温度、组件角度和方位、阴影 遮挡等因素的影响,光伏出力是随机和波动的。为 了更好地掌握光伏出力的规律,需要对光伏出力的 数据进行聚类划分,形成不同场景下的典型特征,有 助于提高分布式光储系统选址定容的鲁棒性。

### 1.1 改进 ISODATA 聚类算法

K均值(K-means)聚类算法的原理简单,收敛 速度良好,需要调节的参数少,但是聚类数 K 值需 要预给定。ISODATA 算法虽在 K-means 算法的基 础上对聚类结果引人"合并"和"分裂",使 K 值能在 不同特征下变动,但对于初始聚类中心的随机选取 可能会导致收敛速度慢,聚类效果差。因此,提出采 用负荷曲线(load curve)与 ISODATA 算法相结合的 L-ISODATA 聚类算法对聚类中心的选取进行优化, 使当前聚类中心更远的点被选取为聚类中心的概率 更高,使各聚类中心尽可能远离让簇间差异最大化, 这一改进不仅加快了收敛速度,还对聚类效果进行 了优化。算法聚类过程如下:

首先,设定预期的聚类数目 c,后续的聚类数将 在[c/2,2c]中产生。输入初始光伏出力样本集 {x<sub>1</sub>,x<sub>2</sub>,…x<sub>i</sub>,…,x<sub>n</sub>},从中随机选取一个样本作为第 一个聚类中心,计算剩余样本中 x<sub>i</sub> 到当前聚类中心 的最短距离 d(x<sub>i</sub>)。通过式(1)计算样本 x<sub>i</sub> 被选取 为下一个聚类中心的概率为 g,再根据概率 g 选取 出下一轮的聚类中心,直到出现 c 个初始聚类中心 停止迭代。样本的 d(x<sub>i</sub>)越大,其被选取为下一个 聚类中心的概率也越高。

$$g = \frac{d^2(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} d^2(x_i)}$$
(1)

然后,通过式(2)计算出样本  $x_i = x_j$ 间的距离  $d(x_i, x_j)$ ,再将  $x_i$ 分配到最近的聚类样本簇  $C_{\tau}(\tau = 1, 2, \dots, C)$ ,如  $C_{\tau}$ 中的样本数量小于其余聚类样本 中最少的样本数  $n_{\min}$ ,则通过式(3)对聚类中心进行 更正,并将当前聚类中心数 c 减去 1。

$$d(x_{i}, x_{j}) = \sqrt{\sum_{u=1}^{N} (x_{iu} - x_{ju})^{2}} \quad i, j = 1, 2, \cdots, n$$
(2)

$$K_{\tau} = \frac{1}{D_{\tau}} \sum_{x_i \in C_{\tau}} x_i \quad \tau = 1, 2, \cdots, c$$
 (3)

式中: $x_i$  与 $x_j$  为输入的两个N 维样本; $x_{iu}$ 和 $x_{ju}$ 分别 为 $x_i$  与 $x_j$  的第u 维样本(u=1,2,...,N); $K_{\tau}$  为第 $\tau$  个 聚类中心; $D_{\tau}$  为在第 $\tau$  个聚类中心的样本。

对各聚类样本簇  $C_{\tau}$  计算其内样本  $D_{\tau}$  到其聚类 中心 $K_{z}$ 的平均距离  $D_{\tau}$  为

$$\overline{D}_{\tau} = \frac{1}{D_{\tau}} \sqrt{\sum_{x_i \in C_{\tau}} |x_i - K_{\tau}|^2}$$
(4)

全部样本到其对应聚类中心 $K_{\tau}$ 的总平均距离 $\overline{D}_{b}$ 为

$$\overline{D}_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_\tau \overline{D}_\tau \tag{5}$$

最后,在聚类结果稳定后停止迭代。如聚类中 心数大于 2*c*,则对现有聚类结果进行合并;如聚类 中心数小于 *c*/2,则对现有聚类结果进行分裂;如两 个聚类中心间的距离小于允许的最小距离,则这两 个聚类中心需进行合并。最终聚类簇划分得到 *K* 个簇 *C* = {*C*<sub>1</sub>,*C*<sub>2</sub>,...,*C*<sub>*p*</sub>...,*C*<sub>*k*</sub>},即 *K* 个光伏出力缩 减场景。将 *K* 个不同概率的典型场景代入规划模 型作为光伏出力数据。

#### 1.2 聚类评价指数

不同簇之间的距离越远,同一簇内样本距离越近,则表示聚类的效果越好。可用类间相似度戴维斯-博尔丁指数(Davies-Bouldin index,DBI)和类内相似度邓恩指数(Dunn index,DI)表示聚类效果的优劣。

DBI 指数的表达式为

$$I_{\rm DB} = \frac{1}{K} \sum_{p,q=1}^{K} \max_{p \neq q} \left[ \frac{D_{\rm avg}(C_p) + D_{\rm avg}(C_q)}{d_{\rm cen}(\omega_p, \omega_q)} \right] \quad (6)$$

式中: $I_{DB}$ 为计算得到的 DBI; $\omega_p$  为簇  $C_p$  的聚类中心 点; $D_{avg}(C_p)$ 为簇  $C_p$  中全部数据与中心点的平均距 离; $d_{cen}(\omega_p, \omega_q)$ 为簇  $C_p$  与簇  $C_q$  的聚类中心点之间 的距离。DBI 的值越小表明聚类效果越好<sup>[13]</sup>。

DI 指数的表达式为

$$I_{\rm D} = \min_{1 \le p \le K} \min_{p \ne q} \frac{d_{\min}(C_p, C_q)}{\max_{1 \le q \le K} d_{\max}(C_q)}$$
(7)

式中: $I_{\rm D}$ 为计算得到的 DI; $d_{\rm min}(C_p, C_q)$ 为簇  $C_p$  和簇

 $C_q$ 样本之间的最小距离; $d_{max}(C_q)$ 为簇  $C_q$ 中样本的最大距离。DI的值越大表面聚类效果越好<sup>[14]</sup>。

# 2 分布式光储两阶段规划模型

分布式光储的位置和容量影响着配电网的电压 波动、谐波、经济效益等问题,合理调节分布式光储 可以减小电压降落横分量,有效改善系统电压稳定 性<sup>[15]</sup>。在规划中,不同问题之间存在着相互约束和 制约的关系,使得规划成为一个复杂的多目标多维 度的难题。因此需要结合地区实际的负荷和分布式 光伏在不同场景下的出力情况,来配置光储系统的 容量和在配电网中接入的位置。

根据分布式光伏削减后的典型场景数据,将得 到的分布式光伏出力功率曲线代入规划模型进行求 解。其中第一阶段模型把分布式光伏和储能安装的 位置和容量作为控制变量,以系统总成本最低为目 标函数,通过使用 IBWO 对光储系统接入容量和位 置进行优化;第二阶段模型以系统的运维成本和配 电网节点电压偏移量最小为目标函数,通过输入规 划层结果,借助粒子群算法来调整光储系统的荷电 运行状态以降低运维成本和节点电压偏移量。

### 2.1 第一阶段模型

#### 2.1.1 目标函数

以分布式光储系统总成本 D 最低为目标函数, 其表达式为:

$$D = \sum_{k} \left( D_{\text{inv},k} + D_{\text{op},k} \right)$$
(8)

$$D_{\text{inv},k} = \frac{r (1+r)^{y}}{(1+r)^{y} - 1} (D_{\text{inv}}^{\text{PV}} P_{k}^{\text{PV}} + D_{\text{inv}}^{\text{ESS}} P_{k}^{\text{ESS}}) \quad (9)$$

式中: $D_{inv,k}$ 为第k个节点光储系统的投资成本; $D_{op,k}$ 为第k个节点光储系统的运维成本; $P_k^{PV}$ 和 $P_k^{ESS}$ 为第k个节点光伏系统和储能系统的安装容量;r为折现率;y为设备运行年限; $D_{inv}^{PV}$ 和 $D_{inv}^{ESS}$ 分别为分布式光伏和储能的单位投资成本。

### 2.1.2 约束条件

1)为保证配电网的平衡,需要进行潮流约束

$$\begin{cases} P_{k} - U_{k} \sum_{l=1}^{N_{j}} U_{l} (G_{kl} \cos \theta_{kl} + B_{kl} \sin \theta_{kl}) = 0 \\ Q_{k} - U_{k} \sum_{l=1}^{N_{j}} U_{l} (G_{kl} \cos \theta_{kl} - B_{kl} \sin \theta_{kl}) = 0 \end{cases}$$
(10)

式中: $P_k$ 和 $Q_k$ 分别为节点 k 的有功功率和无功功

率;U<sub>k</sub>为节点 k 的电压;G<sub>kl</sub>为节点 k 和节点 l 之间的 电纳;B<sub>kl</sub>为节点 k 和节点 l 之间的电导;θ<sub>kl</sub>为节点 k 和节点 l 之间的相角;N<sub>J</sub> 为系统节点数。

2)分布式光伏约束

$$E_{\rm PV,min} \le E_{\rm PV} \le E_{\rm PV,max} \tag{11}$$

$$P_{\rm PV,min} \leqslant P_{\rm PV} \leqslant P_{\rm PV,max} \tag{12}$$

式中: $E_{PV}$ 、 $E_{PV,min}$ 、 $E_{PV,max}$ 分别为分布式光伏的安装容量及其最小、最大安装容量; $P_{PV}$ 、 $P_{PV,min}$ 、 $P_{PV,max}$ 分别为分布式光伏的出力及其最小、最大出力。

3) 储能电池约束

$$\begin{cases} 0 \leq E^{\text{ESB}} \leq E^{\text{ESB}}_{\text{max}} \\ S_{\text{oc,start}}^{\text{ESB}} = S_{\text{oc,end}}^{\text{ESB}} \\ P_{\text{min}}^{\text{ESB}} \leq P^{\text{ESB}} \leq P_{\text{max}}^{\text{ESB}} \end{cases}$$
(13)

式中:  $E^{\text{ESB}} \, \langle E^{\text{ESB}}_{\text{max}} \, \langle \mathcal{H} \mathcal{H} \rangle \rangle$  储能电池容量及其可安装的 最大容量;  $S^{\text{ESB}}_{\text{oc,start}} \, \langle S^{\text{ESB}}_{\text{oc,end}} \, \langle \mathcal{H} \mathcal{H} \rangle \rangle$  储能电池开始和结束 时刻的荷电状态;  $P^{\text{ESB}} \, \langle P^{\text{ESB}}_{\text{min}} \, \pi P^{\text{ESB}}_{\text{max}} \, \langle \mathcal{H} \mathcal{H} \rangle \rangle$  储能电池的 运行功率及其允许的最小额定功率和最大额定功率。

4) 光伏接入位置约束

$$1 \le N_{\rm PV} \le N_{\rm PV,max} \tag{14}$$

式中, N<sub>PV</sub>、N<sub>PV,max</sub>分别为分布式光伏接入节点及其 最大接入节点。

5) 储能接入位置约束

$$1 \le N_{\rm ESS} \le N_{\rm ESS,max} \tag{15}$$

式中, N<sub>ESS</sub>、N<sub>ESS, max</sub>分别为储能接入节点及其最大接入节点。

2.2 第二阶段模型

2.2.1 目标函数

以分布式光储的运维成本 *D*<sub>op</sub>最低和配电网节 点电压偏移量 *D*<sub>ev</sub>最小为目标函数。

$$D_{\rm op} = D_{\rm gv} + D_{\rm bm} + D_{\rm pvq} + D_{\rm loss}$$
 (16)

$$D_{\rm ev} = \sum_{t} \sum_{k} \left| U_{k,t} - U_{\rm N} \right| \tag{17}$$

式中: $D_{gv}$ 为系统的购电成本; $D_{bm}$ 为光储系统的维修 成本; $D_{pvq}$ 为分布式光伏的弃光成本; $D_{loss}$ 为系统的 网损成本; $U_{k,t}$ 为节点  $k \neq t$  时刻的电压; $U_N$ 为额定 电压。

2.2.2 约束条件

1)为防止电压过低或过高,需要对节点电压 *U<sub>k</sub>* 进行约束

$$\begin{split} U_{\min} \leqslant U_k \leqslant U_{\max} \quad k = 1, 2, \cdots, N_{\rm J} \quad (18) \\ {\rm 式} \mathbf{P}_{:} U_{\min} {\rm \textbf{\textit{b}}} \bar{\rm \textbf{5}} {\rm \textbf{\textit{b}}} {\rm \textbf{E}} {\rm \textbf{F}} \mathbb{R}_{:} U_{\max} {\rm \textbf{\textit{b}}} \bar{\rm \textbf{5}} {\rm \textbf{b}} {\rm \textbf{E}} {\rm \textbf{L}} \mathbb{R}_{\circ} \end{split}$$

2) 支路电流约束

$$I_s \leqslant I_s^{\max} \tag{19}$$

式中, $I_s$ 、 $I_s^{max}$ 分别为支路s的电流及支路s允许通过的最大电流。

# 3 基于改进白鲸优化算法

白鲸优化算法(Beluga whale optimization, BWO)是一种受到自然界白鲸捕食的3个阶段行为 启发所提出的优化算法<sup>[16]</sup>,这3个阶段分别为:探 索阶段、开发阶段和鲸落行为阶段。BWO是一种启 发式算法,不需要计算梯度或其他二阶信息,它通过 模拟白鲸捕食猎物的行为,具备了强大的全局搜索 能力,特别是在面对复杂的多峰函数或高维度的优 化问题时,能够有效地避免陷入局部最优解,并最终 收敛到全局最优解或近似最优解。无论是连续优化、 离散优化,还是约束优化、无约束优化,BWO都可以 通过调整参数和更新策略来适应不同的优化环境。

#### 3.1 探索阶段

BWO的探索阶段是通过白鲸捕食的行为建立 的,假设光储系统的位置和容量为不同位置的白鲸 行为。随机初始化位置保证算法的全局搜索能力, 通过选择奇数、偶数维度更新位置,表达式为

$$\begin{cases} X_{w,u}^{(T+1)} = X_{w,pu}^{(T)} + (X_{v,p1}^{(T)} - X_{w,pu}^{(T)})(1 + r_1)\sin(2\pi r_2), \\ & u \text{ black} \\ \\ X_{w,u}^{(T+1)} = X_{w,pu}^{(T)} + (X_{v,p1}^{(T)} - X_{w,pu}^{(T)})(1 + r_1)\cos(2\pi r_2), \\ & u \text{ black} \end{cases}$$

(20)

式中:*T* 为当前的迭代次数; $X_{w,u}^{(T+1)}$ 为第 *w* 条白鲸在 第 *u* 维度更新后的位置; $X_{w,u}^{(T)}$ 为随机选取的 *u* 维度 下第 *w* 条白鲸的当前位置; $X_{v,p1}^{(T)}$ 为随机选取的第 *v* 条白鲸的当前位置; $r_1$ 和  $r_2$ 都为范围在(0,1)的随 机数;sin( $2\pi r_2$ )和 cos( $2\pi r_2$ )模拟鱼鳍朝向水面的镜 向运动。

#### 3.2 开发阶段

白鲸通过莱维(Levy)飞行策略捕捉猎物,更新白鲸位置 X<sub>w</sub><sup>(T+1)</sup>,使白鲸算法收敛性提高,其表达式为

$$X_{w}^{(T+1)} = r_{3}X_{\text{best}}^{(T)} - r_{4}X_{w}^{(T)} + J_{1}L_{\text{F}}(X_{v}^{(T)} - X_{w}^{(T)})$$
(21)

式中: $r_3$ 和 $r_4$ 为范围在(0,1)的随机数; $X_{\text{best}}^{(T)}$ 为当前 最好的位置; $X_w^{(T)}$ 为第w条白鲸的当前位置; $X_v^{(T)}$ 为随机的第v条白鲸位置; $J_1$ 为白鲸飞行中随机 的跳跃度; $L_F$ 为白鲸的飞行函数。 $J_1$ 和 $L_F$ 计算方 式为:

$$J_{1} = 2r_{4} \left( 1 - \frac{T}{T_{\text{max}}} \right)$$
 (22)

$$L_{\rm F} = 0.05 \, \frac{\mu \cdot \sigma}{|\gamma|^{-1/\zeta}} \tag{23}$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\zeta) \cdot \sin(\pi\zeta/2)}{\Gamma[(1+\zeta)/2] \cdot \zeta \cdot 2^{(\zeta-1)/2}}\right)^{1/\zeta} \quad (24)$$

式中: $T_{max}$ 为总迭代次数; $\mu$ 和 $\gamma$ 为正态分布的随机数; $\zeta$ 是一个值为 1.5 的常数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数。

3.3 鲸落行为阶段

为确保在鲸落行为中种群数量一致,利用白鲸 的坠落步长和位置来建立更新的位置,其表达式为

$$X_{w}^{(T+1)} = r_{5}X_{w}^{(T)} - r_{6}X_{v}^{(T)} + r_{7}X_{S}$$
(25)

式中: $r_s$ 、 $r_6$ 和 $r_7$ 为范围在(0,1)的随机数; $X_s$ 为白鲸 坠落的步长。 $X_s$ 计算方式为:

$$X_{\rm s} = (u_{\rm b} - l_{\rm b}) \exp\left(-\frac{2fnT}{T_{\rm max}}\right)$$
(26)

$$f = 0.1 - \frac{0.05T}{T_{\text{max}}}$$
(27)

式中: $u_b$  为变量上界; $l_b$  为变量下界;n 为白鲸种群数;f 为阶跃因子。

#### 3.4 改进白鲸优化算法

IBWO 在原有的 BWO 算法中引入可变螺旋搜 索策略,使白鲸的位置更新更加灵活,对未知位置的 选择增加,加强了跳出局部最优解和更新全局最优 解的能力。其更新策略如下:

$$X_{w}^{(T+1)} = r_{3}X_{\text{best}}^{(T)} - r_{4}X_{w}^{(T)} + J_{1}L_{\text{F}}(X_{v}^{(T)} - X_{w}^{(T)}) \cdot e^{zL} \cdot \cos(2\pi L)$$
(28)

$$z = \exp\left[a\cos\pi\left(1 - \frac{T}{T_{\max}}\right)\right]$$
(29)

式中:L为(-1,1)中的随机数;a为变化系数,这里 取5。通过可变螺旋搜索策略增大了更新位置的范 围,使白鲸的探索阶段有更充足的搜索范围,增加了 算法的灵活性。

为平衡算法局部最优解和全局最优解的能力, 在此基础上再加入纵横交叉策略,防止白鲸陷入局 部最优解中,提高了算法的准确性。横纵交叉策略 分为两个步骤,首先执行横向交叉,其表达式为:

$$M_{w1,u}^{(t+1)} = r_8 M_{w1,u} + (1 - r_8) M_{w2,u} + c_1 (M_{w1,u} - M_{w2,u})$$
(30)

$$M_{w2,u}^{(1+1)} = r_9 M_{w2,u} + (1 - r_9) M_{w1,u} + c_2 (M_{w2,u} - M_{w1,u})$$
(31)

式中: $M_{w1,u}^{(T+1)}$ 和 $M_{w2,u}^{(T+1)}$ 为 $M_{w1,u}$ 和 $M_{w2,u}$ 通过横向交叉 产生的下一代; $r_8$ 和 $r_9$ 为(0,1)中均匀分布的随机 数; $c_1$ 和 $c_2$ 为(-1,1)中的随机数,生成的个体与个 体进行竞争寻优。

再进行纵向交叉,其表达式为

 $M_{w,u1}^{(T+1)} = r_{10}M_{w,u1} + (1 - r_{10})M_{w,u2}$  (32) 式中: $M_{w,u1}^{(T+1)}$ 为 $M_{w,u1}$ 通过纵向交叉产生的下一代; $r_{10}$ 为(0,1)中的均匀分布的随机数,生成的个体与个体进行竞争寻优。

#### 3.5 求解流程

基于 IBWO 的配电网优化流程如图 1 所示。



# 4 算例分析

为验证模型的可行性,在 Matlab 2018a 中采用 如图 2 所示的 IEEE 33 系统对分布式光储的选址定 容进行仿真分析<sup>[17]</sup>。基准电压为 12.66 kV,假设选 择 1 个分布式光伏和 1 个储能接入 IEEE 33 系 统,分布式光伏允许的最大容量为 400 kW,储能 电池允许的最大容量为 600 kW,分布式光伏的 功率因素为 0.9,储能的容量不超过 90%。分布 式光伏和储能的使用年限为 10 年;折现率为 0.08; 网购电价为 0.6 元/kWh; 阿损电价为 0.4 元/kWh; 弃光电价为 0.6 元/kWh;单位容量下光伏和储能的 投资成本分别是 5000 元/kW 和 2000 元/kW,单位 容量下光伏和储能的运行成本分别为 0.05 元/kWh



#### 4.1 分布式光伏聚类分析

根据图 3 所示的某地一年的分布式光伏出力数 据,采用 L-ISODATA 算法进行整合聚类,得到典型 光伏出力场景,建立分布式光储多目标优化模型。 为了保证出力场景包含样本典型特征值,保留聚类 场景为 4 个,最终得到的聚类结果如图 4 所示。为 验证 L-ISODATA 算法在分布式光伏出力缩减中的合 理性,将 K-means、ISODATA 与 L-ISODATA 进行对比 分析,得到分布式光伏评价指标结果如表 1 所示。

| 7 | Ę | 1 | 不同 | 聚 | 类算 | [法  | 的   | 评 | 价 | 指 | 杺 |
|---|---|---|----|---|----|-----|-----|---|---|---|---|
| ſ | ₹ | I | 小回 | 衆 | 奀昇 | 」 法 | RÀ. | " | 们 | 脜 |   |

| 聚类算法      | DBI     | DI      |
|-----------|---------|---------|
| K-means   | 1.845 5 | 0.068 1 |
| ISODATA   | 1.250 3 | 0.070 4 |
| L-ISODATA | 1.210 9 | 0.074 3 |

根据表1的评价指标结果可得,通过L-ISODATA 算法对聚类中心选取进行优化后,使不同的簇相对 远离,同一簇内的样本相对接近,聚类的结果相对于 K-means 算法和 ISODATA 算法有所优化,DBI 和 DI 的指标相较于 K-means 算法和 ISODATA 算法有所 提升,提高了聚类的准确性和稳定性。通过对一年 的光伏出力数据进行聚类缩减后,将缩减后的场景 作为光伏出力数据代入分布式光储模型进行求解。







#### 4.2 配电网优化分析

为验证 IBWO 算法对多目标函数的计算能力, 采用测试函数分别对粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)、BWO 算法、IBWO 算法进行对比分 析,设置迭代次数为 100,函数的收敛曲线如图 5 所示。



通过图 5 的收敛曲线可以看出, IBWO 算法在 对多目标函数的求解中能用较少的迭代次数得到较 优的结果,且 IBWO 算法跳出局部最优解和获取全 局最优解的能力更强,能有效地平衡全局寻优和局 部寻优之间的关系, IBWO 算法相较于 BWO 算法和 PSO 算法具有更快的收敛速度和更优的收敛性能。

分别采用 PSO 算法、BWO 算法和 IBWO 算法对 分布式光储规划模型进行求解,得到对比结果如 表 2 所示。

| 规划方案      | PSO       | BWO       | IBWO      |  |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| 光伏接入容量/kW | 700       | 700       | 700       |  |
| 光伏接入节点位置  | 24        | 28        | 15        |  |
| 储能接入容量/kW | 1000      | 950       | 900       |  |
| 储能接入节点位置  | 9         | 10        | 17        |  |
| 运维成本/元    | 247 054   | 235 483   | 222 610   |  |
| 节点平均电压偏移量 | 0.173 7   | 0.159 4   | 0.151 3   |  |
| 总成本/元     | 1 066 554 | 1 040 083 | 1 012 466 |  |

表 2 不同算法下规划对比

由表 2 可以看出 IBWO 算法从分布式光储接入 的位置和容量上对模型进行了优化,其总成本比 PSO 算法和 BWO 算法分别降低了 5.07%和 2.66%,不仅 降低了储能的安装容量,使系统的投资成本减少,而 且运维成本也最少。同时,如图 6 所示,IBWO 算法能 有效降低了系统运行时的电压偏移量,达到电压控制 的目的。由此证明,所提 IBWO 算法能在确保配电 网平稳运行的前提下通过合理配置提高经济性。



# 5 结 论

为寻求分布式光储的选址定容最优方案,上面 使用了一种改进的 ISODATA 聚类算法用于分布式 光伏出力聚类,再结合 IBWO 通过两阶段优化模型 在 IEEE 33 节点下仿真分析,得到了以下结论: 1)相较于典型聚类算法,改进的 ISODATA 聚类 算法在面对繁多的光伏出力数据下具有更好的聚类 效果,得到的聚类场景更具有稳定性和典型特征。

2)配电网优化是一个多维度多目标的优化问题,从经济性和安全性的角度出发,构造的两阶段优化模型能够考虑多方面因素对配电网的影响,在安全性的前提下提高经济效益。

3)基于白鲸优化算法的优化模型具有更高的 计算准确性和寻优效果,在优化中能提高分布式光 伏的经济效益并增加配电网的稳定性。

#### 参考文献

- [1] 贾雨龙,米增强,刘力卿,等.分布式储能系统接入配电 网的容量配置和有序布点综合优化方法[J].电力自动 化设备,2019,39(4):1-7.
- [2] 王华佳,张岩,尹书林,等.分布式光伏并网系统电压越限风险及谐波影响[J].电网与清洁能源,2024,40(3):128-138.
- [3] 何宁辉,李文,李秀广,等.电网供电系统储能电源大 功率变换器的谐波控制研究[J].微型电脑应用,2023, 39(8):48-51.
- [4] 李军徽,孙大朋,朱星旭,等.光伏高渗透率下分布式储 能群间协同的电压控制策略[J].电力系统自动化, 2023,47(10):47-56.
- [5] 颜勤,余国翔,曾林俊.考虑光伏场景聚合的配电网光 储选址定容[J].湖南大学学报(自然科学版),2024, 51(8):117-126.
- [6] 武艺,姚良忠,廖思阳,等.一种基于改进 K-means++
   算法的分布式光储聚合调峰方法[J].电网技术,2022,
   46(10):3923-3931.
- [7] 姚明明,张新,杨培宏,等.基于改进风光场景聚类联合 虚拟储能的源网荷储低碳优化调度[J].电力系统保护 与控制,2024,52(15):115-130.
- [8] 靳攀润,宋汶秦,刘永成.考虑 DG 不确定性的有源配
   电网两阶段动态鲁棒重构方法[J].太阳能学报,2024,
   45(6):208-216.
- [9] 张勇军,张锶恒,刘斯亮,等.考虑分布式光伏与储能接入的配变双层规划[J].电力系统保护与控制,2020, 48(24):9-15.
- [10] 陈奇芳,李若凡,夏明超,等.计及多维性能评估的新型配电网光伏选址定容方法[J].中国电力,2024,57(10):172-178.
- [11] 刘柳,赵俊勇,马亮.基于改进蝴蝶算法的分布式 光伏选址定容[J].电力系统及其自动化学报,2023, 35(8):152-158.
- [12] 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.

- [13] 张辰睿.基于机器学习的短期电力负荷预测和负荷曲 线聚类研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [14] BEN NCIR C E, HAMZA A, BOUAGUEL W. Parallel and scalable Dunn Index for the validation of big data clusters[J].Parallel Computing, 2021, 102:102751.
- [15] 张师,李卫国,田蕾,等.分布式电源接入对配电网电 压稳定性的影响[J].分布式能源,2017,2(4):36-39.
- ZHONG C T, LI G, MENG Z. Beluga whale optimization:
   A novel nature-inspired metaheuristic algorithm [J].
   Knowledge-Based Systems, 2022, 251:109215.
- [17] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 1989,4(2):1401-1407.

(上接第15页)

引负荷提供可靠稳定的电能。这为提升薄弱电网供 电容量和保障牵引负荷供电提供了参考。

此外,牵引负荷和风光都具有不确定性,需进一步探究牵引负荷和风光不确定性对风光储选址定容 规划的影响。

#### 参考文献

- [1] 邓云川,林宗良. 川藏铁路电气化工程面临的挑战和 对策思考[J]. 电气化铁道, 2019, 30(增刊1):5-11.
- [2] 盛望群. 电源薄弱地区电气化铁路关键技术与接入系 统方案研究[J]. 电气应用, 2013, 32(6):18-21.
- [3] 解绍锋,方曼琪,夏国华,等.光伏接入牵引供电系 统对电能质量的影响[J].电力自动化设备,2018, 38(10):53-59.
- [4] 康龙云,郭红霞,吴捷,等.分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J].电网技术,2010, 34(11):43-47.
- [5] 张沈习,李珂,程浩忠.等.考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J].电力系统自动化,2015, 39(8):53-58.
- [6] 郑漳华,艾芊,顾承红,等.考虑环境因素的分布式 发电多目标优化配置[J].中国电机工程学报,2009, 29(13):23-28.
- [7] 初壮,李钊,白望望. 计及不确定性和环境因素的多
   类型分布式电源选址定容[J]. 电力系统保护与控制,
   2017,45(13):34-41.
- [8] 李相俊,王上行,惠东.电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J].电网技术,2017,41(10): 3315-3325.
- [9] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子 群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12):3405-3411.

作者简介:

姚建东(1972),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网 规划;

吴 凡(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统 规划与稳定;

谢 波(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为电力 系统规划:

郝文斌(1976),男,博士,高级工程师,研究方向为电力 系统规划设计;

杨毅强(1980),男,博士,副教授,研究方向为电力系统 规划与稳定;

孟志高(1990),男,博士,高级工程师,研究方向为电力 系统规划。

(收稿日期:2024-10-31)

[10] 程浩,秦文萍,韩肖清,等.基于功角稳定性的区域
 电网储能选址定容方法[J].电力自动化设备,2024,44(7):21-29.

- [11] 丁明,方慧,毕锐,等.基于集群划分的配电网分布 式光伏与储能选址定容规划[J].中国电机工程学 报,2019,39(8):2187-2201.
- [12] 孟源,樊小朝,史瑞静,等.基于机会约束及 N-1 安
   全约束的风光联合储能系统选址定容优化[J].电网
   技术,2021,45(5):1886-1893.
- [13] 刘炜,李群湛,唐兵,等.基于蒙特卡洛模拟的城市 轨道概率潮流分析[J].西南交通大学学报,2010, 45(4):561-567.
- [14] 朱恒恺. 薄弱电源条件下的牵引供电系统供电能力 评估方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
- [15] 徐迅,陈楷,龙禹,等.考虑环境成本和时序特性的 微网多类型分布式电源选址定容规划[J].电网技 术,2013,37(4):914-921.
- [16] 赵书强,刘大正,谢宇琪,等.基于相关机会目标规 划的风光储联合发电系统储能调度策略[J].电力系 统自动化,2015,39(14):30-36.
- [17] 苏福清, 匡洪海, 钟浩. 基于 AG-MOPSO 的含风电配 电网无功优化[J]. 电源学报, 2024, 22(4):192-199.
- [18] 杨俊杰,周建中,方仍存,等.基于自适应网格的多目 标粒子群优化算法[J].系统仿真学报,2008(21): 5843-5847.

作者简介:

姜晓锋(1989),男,博士,高级工程师,研究方向为新型 电力系统稳定控制及主动支撑关键技术;

王 豪(1994),男,博士,工程师,研究方向为考虑新能 源接入的新型控制保护技术及应用;

潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为电力电子 化电力系统建模、稳定性分析及控制。

(收稿日期:2024-05-10)