文章编号:1674-2974(2024)08-0117-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024284

# 考虑光伏场景聚合的配电网光储选址定容

颜勤[1†],余国翔[1],曾林俊[2]
(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114;
2. 长沙理工大学 能源与动力工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘 要**:研究光伏场景聚合是实现区域电网分布式光伏与储能联合规划的前提和基础,对促进配电网分布式光伏的充分消纳具有重要作用.通过基于改进的K-means++算法对历史光伏数据进行聚合分析,得到光伏出力的典型场景聚合,从配电网的经济性出发,兼顾系统运行的可靠性、环保性,建立考虑光伏场景聚合的光储选址定容规划模型,引入层次分析法(analytic hierarchy process,AHP)将多目标优化问题转化为单目标问题,并利用粒子群算法(particle swarm optimization,PSO)进行求解.算例结果表明,提出的光伏场景聚合模型更准确刻画光伏出力的不确定性,验证了该模型的有效性和可行性.

**关键词**:光伏聚合;分布式光伏;储能电池;选址定容;配电网
**中图分类号**:TM73 **文献标志码**:A

# Distribution Grid Siting and Capacity Sizing for Distributed PV and Storage Considering PV Scenario Aggregation

YAN Qin[1†], YU Guoxiang[1], ZENG Linjun[2]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract**: The research on PV aggregation scenarios is the basis and premise for realizing the joint planning of distributed PV and energy storage in regional power grids. It plays a significant role in promoting the full consumption of distributed PV in regional power grids. By analyzing the historical PV data based on the improved K-means++ algorithm aggregation, the typical PV output scenarios were generated. Starting from the distribution network economy, environmental protection and reliability, a PV and energy storage siting and capacity planning model considering the aggregation of photovoltaic scenarios was established. And an analytic hierarchy process (AHP) was introduced to transform the multi-objective optimization problem into a single-objective problem. The multi-objective optimization problem was transformed into a single-objective problem and solved by particle swarm

* **收稿日期**:2024-01-12
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(52307080),National Natural Science Foundation of China(52307080);湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ6057), Natural Science Foundation of Hunan Province (2024JJ6057);湖南省教育厅优秀青年项目(22B0318);长沙市自然科学基金资助项目(kq2208230)
**作者简介**:颜勤(1988—),女,湖南长沙人,博士
† 通信联系人,E-mail:qin.yan@csust.edu.cn

optimization (PSO). The results of the case study show that the proposed PV-scenario aggregation model more accurately depicts the uncertainty of PV output, verifying the effectiveness and feasibility of the model.

**Key words**: photovoltaic aggregation; distributed photovoltaic generation; energy storage battery; site selection and capacity planning; distribution network

随着我国逐步实施“碳达峰、碳中和”节能减排战略,高渗透率新能源并网将成为电力系统的主要特征和发展趋势[1].在当前光伏广泛运用的背景下,可能出现峰时消纳难、谷时保供难等问题[2],储能技术的双向功率传输特性和灵活调节能力,可以有效解决能源供需在时间和空间上不匹配的问题[3].因此针对光伏场景聚合下的光储规划研究具有重要意义.

由于光伏的历史数据数量多,若直接调用作为光伏规划的依据,容易造成求解难度大、计算时间长等问题.文献[4]基于典型调峰特征量将高比例分布式光储聚合为少量的特征集群,大大降低参与电力系统调峰的求解难度,解决了决策变量维数爆炸等问题;文献[5]基于权重配置原则分群聚类分布式光伏、储能与可中断柔性负荷的可调资源控制优先级,实现基于资源聚合的功率波动平抑;文献[6]从集中趋势和离散趋势描述数据分布特征,聚类分析分布式光伏日出力曲线.由此可见,通过光伏场景聚类来简化光伏历史数据带来的计算复杂度是可行的,但上述文献主要利用光伏聚类来实现调峰,较少应用于光伏电站和储能的选址定容规划上.

针对配电网中分布式电源和储能系统的选址定容问题,目前已有大量学者进行了研究.文献[7]通过布谷鸟搜索算法优化分配分布式电源,有效降低电网损耗,提高母线电压值;文献[8]以综合投资最优为目标函数,建立考虑环境成本的选址定容规划模型;文献[9]考虑到分布式电源和负荷功率时序随机性,建立以分布式电源投资商收益、配电网公司收益最大化为优化目标的规划模型,并采用非支配排序遗传算法进行求解;文献[10]使用概率函数描述负载和可再生能源的随机性;文献[11]考虑孤岛运行风/光/储配电网联合规划问题,以净社会效益最大为目标函数,形成混合整数线性问题.上述文献从不同角度解决分布式电源和储能系统选址定容问题,但均未将配电网环保性和可靠性因素综合纳入考虑之中,也未对光伏出力进行聚合分析.

虽然有部分文献利用光伏聚合来处理分布式电源选址定容问题[9, 12],但仍未对光伏出力进行多维度指标的聚合分类以及配套储能设施的规划,并且在传统规划中光伏场景的确定方法是根据四季等分法,具有较强的主观性.鉴于此,本文提出一种考虑光伏场景聚类的光储选址定容方法,首先基于光伏出力特征进行场景聚合分析,从不同维度提取光伏出力的特征量,采用改进的K-means++算法得到典型的光伏聚合场景以及对应场景所占比重,然后根据典型的光伏出力场景,构建综合考虑配电网经济性、可靠性、环保性多目标优化的光储选址定容模型,再利用AHP确定光储选址定容多目标权重,将多目标优化问题转化为单目标问题,使用PSO求解选址定容模型以此得到最优的光储选址定容方案.

## 1 基于光伏发电出力特征场景聚合

由于受阴天、雨雪天气下云层的遮挡,光伏出力特性具有波动性与随机性,科学地描述光伏电站的出力特性,有利于更好地把握光伏电站的波动规律,提高光储选址定容的精确性[13].本文针对光伏电站出力特性提取如下典型特征,以形成光伏出力聚合指标.

### 1.1 光伏发电出力聚合指标

#### 1.1.1 日平均光伏出力

考虑日平均光伏出力特征,计算一个周期内的平均光伏出力情况:

$$P_{\text{mean}} = \sum_{t=1}^{T} \frac{P_t}{T} \tag{1}$$

式中:$P_{\text{mean}}$为日平均光伏出力;$P_t$为第$t$时间段内的光伏出力;$T$为一个周期,取24 h.

1.1.2　日光伏出力波动率

利用日光伏出力波动率描述光伏出力的波动水平.该特征值越小,则表示当日的光伏出力波动越小,出力越平稳.

$$P_{\mathrm{diff}}=\sqrt{\frac{1}{T-1}\sum_{t=1}^{T}(P_t-P_{\mathrm{mean}})^2} \tag{2}$$

式中:$P_{\mathrm{diff}}$为日光伏出力波动率.

1.1.3　日光伏出力分布偏度

日光伏出力分布偏度可用来描述光伏出力的日偏斜程度.当偏度值处于[-0.5,0.5]之间时,光伏出力分布相对对称;当偏度值处于[0.5,+∞)之间时,光伏出力分布是正偏态,光伏出力集中于均值的右侧;当偏度值处于(-∞,-0.5]之间时,光伏出力分布是负偏态,光伏出力集中于均值的左侧.

$$\mathrm{SK}_{P_{\mathrm{day}}}=\frac{T}{(T-1)(T-2)}\sum_{t=1}^{T}\left(\frac{P_t-P_{\mathrm{mean}}}{P_{\mathrm{diff}}}\right)^3 \tag{3}$$

式中:$\mathrm{SK}_{P_{\mathrm{day}}}$为日光伏出力分布偏度.

**1.2　改进的K-means++光伏聚合算法**

K-means算法在面对海量的光伏数据时,具有良好的聚合能力,可以有效解决历史光伏数据多、随机性大的问题.但传统K-means算法对初始聚类中心的选择是随机的,初始聚类中心选择不佳易陷入局部最优解,且需要事先指定聚类数量.因此,本文采用一种改进的K-means++算法,用于解决光伏场景聚合的问题,以达到更好的聚合效果,算法流程如图1所示.

1.2.1　指标归一化

由于选取的聚合指标具有不同的含义与大小,需要进行指标归一化.选取的指标可分为正、逆指标,其归一化值的计算如式(4)所示,正指标值越高,或逆指标值越低,则其归一化值越高.日平均光伏出力属于正指标,日光伏出力波动率、日光伏出力分布偏度属于逆指标.

$$\begin{cases}X_i^{+}=\dfrac{X_i-X_{i,\min}}{X_{i,\max}-X_{i,\min}}\\[2ex] X_i^{-}=\dfrac{X_{i,\max}-X_i}{X_{i,\max}-X_{i,\min}}\end{cases} \tag{4}$$

式中:$X_i^{+}$、$X_i^{-}$分别为归一化后的正、逆指标;$X_i$为原始指标值;$X_{i,\max}$、$X_{i,\min}$分别为原始指标值中的最大、最小值.

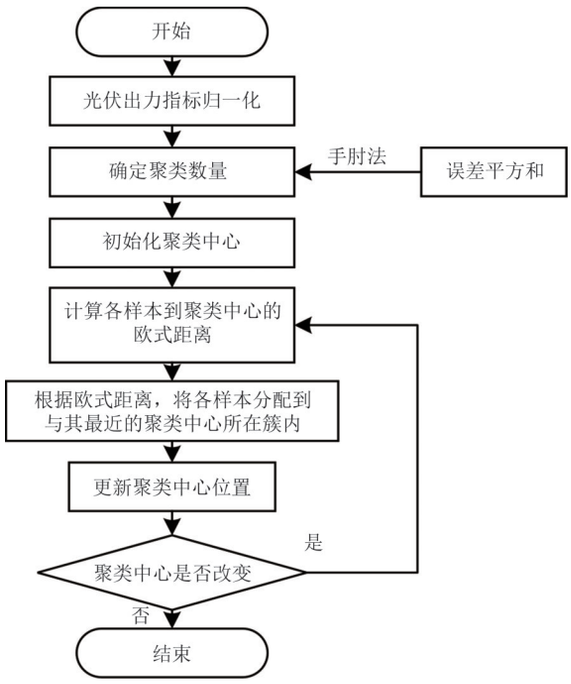



图1　改进的K-means++算法流程

Fig.1　Flowchart of improved K-means++ algorithm

1.2.2　确定聚类数量

本文引入一种度量聚类效果的指标:误差平方和(sum of squared error, SSE).SSE值越小,表示数据点越接近聚类中心,聚类效果越好.然后利用手肘法,根据聚类数量与SSE之间的关系图,观察曲线的拐点.这个拐点所对应的聚类数量,即为最佳聚类数量.

$$S_{\mathrm{SSE}}=\sum_{i=1}^{K}\sum_{x\in C_i}\left\|x-\mu_i\right\|^2 \tag{5}$$

式中:$S_{\mathrm{SSE}}$为聚类的误差平方和;$K$为聚类簇数的总和;$C_i$为划分后的第$i$个簇;$x$为$C_i$内归一化后的指标数值;$\mu_i$为所选取的聚类中心对应的指标值.

1.2.3　初始化聚类中心

K-means++算法是对K-means算法的改进,主要体现在原来随机选取$K$个数据点作为初始聚类中心的基础上,使用概率分布的方式选取聚类中心,尽可能地分散聚类中心的数值选取.具体过程如下.

步骤1:从数据集中随机选取一个数据点作为第一个聚类中心.

步骤2:对于数据集的每个数据点,计算其与聚类中心的最短距离.

步骤3:对于每个数据点,将其与已选定聚类中心的最短距离进行归一化,得到距离的概率分布.

$$P\left(x_i\right)=\frac{D\left(x_i\right)^2}{\sum_j D\left(x_j\right)^2} \tag{6}$$

式中:$P\left(x_i\right)$为第$i$个样本被选择为下一个聚类中心的概率;$D\left(x_i\right)^2$为第$i$个样本与聚类中心之间的距离.

步骤4:根据计算得到的距离概率分布,以加权概率的方式选择下一个聚类中心[4].距离较远的数据点在概率分布中具有较高的权重,从而保证初始聚类中心分布更加分散.

步骤5:重复步骤3和步骤4,直至选出$K$个聚类中心.

1.2.4 更新聚类中心

计算各个聚合指标到聚类中心的欧式距离,即

$$D_{ij}=\sqrt{\sum_{k=1}^{N}\left(x_{ik}-\mu_{jk}\right)^2} \tag{7}$$

式中:$D_{ij}$为样本点$x_i$和聚类中心$\mu_j$之间的欧式距离;$x_{ik}$为样本点$x_i$第$k$个维度的特征值;$\mu_{jk}$为聚类中心$\mu_j$第$k$个维度的特征值;$N$为数据集中每个样本点的维度,也就是选取聚合指标的个数.

将每个样本点归于欧式距离最小的聚类中心所在的簇中.在完成分群后更新簇内的聚合中心,即

$$\mu_{jk}=\frac{1}{N_k}\sum_{i\in C_k}x_{ik} \tag{8}$$

式中:$C_k$为更新分群后$x_{ik}$所属的簇;$N_k$为更新分群后$C_k$簇内样本点的数量.

重复上述步骤直至聚类中心位置不再发生变化,聚类结束.

## 2 多目标光储选址定容模型

### 2.1 模型架构

整体研究框架如图2所示,外层光伏场景聚合通过NASA POWER网站获取单位小时太阳辐照数据,根据光伏发电模型得到全年历史光伏发电功率数据[14].然后根据光伏出力聚合指标,利用改进的K-means++算法得到光伏最佳场景数;在当前聚合场景确定下,内层选址定容模型根据电压平稳度等指标参数,依据九级标度法比较两两指标之间的重要性程度,利用AHP确定各指标的权重;根据权重确定PSO算法的目标函数.最后利用PSO算法求解选址定容模型,确定最佳选址定容方案.

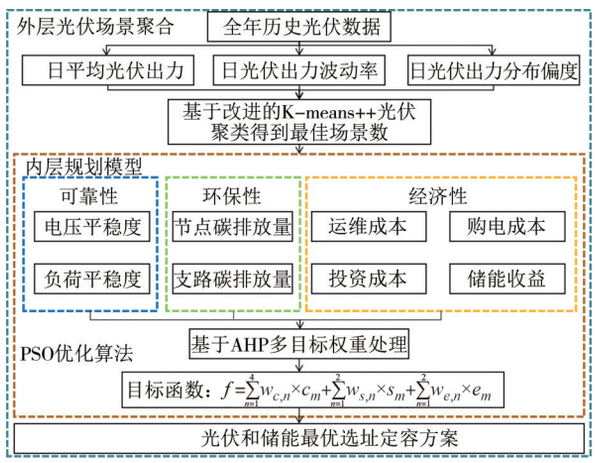



图2 整体研究框架图

Fig.2 Overall research framework diagram

### 2.2 目标函数

2.2.1 经济性

分布式光伏和储能电池在配电网中的经济性主要考量建设投资成本、运维成本、光伏弃光成本以及储能收益.由此,体现光储选址定容模型经济性$C_{\mathrm{eco}}$的公式表达为:

$$C_{\mathrm{eco}}=w_{c,1}C_{\mathrm{inv}}+w_{c,2}C_{\mathrm{op}}+w_{c,3}C_{\mathrm{buy}}-w_{c,4}C_{\mathrm{pro}} \tag{9}$$

式中:$C_{\mathrm{inv}}$、$C_{\mathrm{op}}$分别为分布式光伏和储能的投资成本、运维成本;$C_{\mathrm{buy}}$为购电成本;$C_{\mathrm{pro}}$为储能收益;$w_{c,n}$为第$n$个经济性指标对应的权重,将在后文对应的AHP多目标权重处理中求解得到.

1)投资成本:

$$\begin{cases}C_{\mathrm{inv}}=C_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{PV}}+C_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{ESB}}\\ C_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{PV}}=\dfrac{r^{\mathrm{PV}}\left(1+r^{\mathrm{PV}}\right)^{y^{\mathrm{PV}}}}{\left(1+r^{\mathrm{PV}}\right)^{y^{\mathrm{PV}}}-1}\xi_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{PV}}E_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{PV}}\\ C_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{ESB}}=\dfrac{r^{\mathrm{ESB}}\left(1+r^{\mathrm{ESB}}\right)^{y^{\mathrm{ESB}}}}{\left(1+r^{\mathrm{ESB}}\right)^{y^{\mathrm{ESB}}}-1}\xi_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{ESB}}E_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{ESB}}\end{cases} \tag{10}$$

式中:$C_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{PV}}$、$C_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{ESB}}$分别为分布式光伏、储能的投资成本;$r^{\mathrm{PV}}$、$r^{\mathrm{ESB}}$分别为分布式光伏、储能的贴现率;$y^{\mathrm{PV}}$、$y^{\mathrm{ESB}}$分别为分布式光伏、储能的使用年限;$\xi_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{PV}}$、$\xi_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{ESB}}$分别为分布式光伏、储能的单位容量投资成本;$E_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{PV}}$为分布式光伏规划建设容量;$E_{\mathrm{inv}}^{\mathrm{ESB}}$为储能并网容量.

2) 运维成本:

$$\begin{cases} C_{\text{op}} = \lambda C_{\text{inv}} + C_{\text{ab}} + k_{\text{re}}^{\text{ESB}} \xi_{\text{inv}}^{\text{ESB}} E_{\text{inv}}^{\text{ESB}} \\ C_{\text{ab}} = \zeta_{\text{ab}} \sum_{t=1}^{8\,760} \left( P_{t,\text{f}}^{\text{PV}} - P_t^{\text{PV}} \right) \end{cases} \tag{11}$$

式中:$\lambda$ 为运维成本的折算比例,根据工程经验,通常取 10%;$C_{\text{ab}}$ 为分布式光伏弃光成本;$\zeta_{\text{ab}}$ 为分布式光伏单位弃光成本;$k_{\text{re}}^{\text{ESB}}$ 为储能的更换率(考虑储能电池老化更换);$P_{t,\text{f}}^{\text{PV}}$、$P_t^{\text{PV}}$ 分别为分布式光伏在 $t$ 时刻的预测发电功率、实际发电功率.

3) 购电成本:

$$C_{\text{buy}} = \xi_{\text{price}} \sum_{t=1}^{8\,760} P_t^{\text{buy}} \tag{12}$$

式中:$\xi_{\text{price}}$ 为从主网购电单位容量的分时电价;$P_t^{\text{buy}}$ 为 $t$ 时刻的主网购电量.

4) 储能收益:

$$C_{\text{pro}} = \xi_{\text{price}} \sum_{t=1}^{8760} \left( P_t^{\text{l}} - P_t^{\text{r}} \right) \tag{13}$$

式中:$P_t^{\text{l}}$、$P_t^{\text{r}}$ 分别为在储能充放电作用前后的负荷量.

2.2.2　环保性

考虑配电网在运行过程中产生的碳排放量 $E_{\text{emis}}$,其计算公式如下:

$$\begin{cases} E_{\text{emis}} = w_{e,1} E_b + w_{e,2} E_l \\ E_b = \lambda_c \sum_{t=1}^{8\,760} P_{j,t} \\ E_l = \lambda_c \sum_{t=1}^{8\,760} P_{\text{loss},t} \end{cases} \tag{14}$$

式中:$E_b$、$E_l$ 分别为节点、支路上产生的碳排放量;$\lambda_c$ 为碳排放转换因子;$P_{j,t}$ 为 $t$ 时刻节点 $j$ 的用电量;$P_{\text{loss},t}$ 为 $t$ 时刻的网损用电量;$w_{e,n}$ 为第 $n$ 个环保性指标对应的权重.

2.2.3　可靠性

分布式光伏大规模并网,其自身的波动性和随机性,会造成节点负荷的波动进而加剧节点电压波动,降低系统的电能质量.由此采用节点电压平稳度和负荷平稳度来表征系统电能质量稳定性水平 $S_{\text{rel}}$.

$$\begin{cases} S_{\text{rel}} = w_{s,1} \text{SSD}_{\text{U}} + w_{s,2} \text{SSD}_{\text{l}} \\ \text{SSD}_{\text{U}} = \sum_{i \in N} \left| U_{i,t} - \bar{U}_i \right| \\ \text{SSD}_{\text{l}} = \sum_{\text{l}} \left| P_{\text{l},t} - \bar{P}_{\text{l}} \right| \end{cases} \tag{15}$$

式中:$\text{SSD}_{\text{U}}$、$\text{SSD}_{\text{l}}$ 分别为电压平稳度、负荷平稳度;$U_{i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时刻的电压值;$\bar{U}_i$ 为节点 $i$ 在整个时间周期内的电压平均值;$P_{\text{l},t}$ 为 $t$ 时刻的负荷功率值;$\bar{P}_{\text{l}}$ 为在整个时间周期内的负荷功率平均值;$w_{s,n}$ 为第 $n$ 个可靠性指标对应的权重.

### 2.3　约束条件

2.3.1　潮流约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{N} U_j \left( G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij} \right) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N} U_j \left( G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij} \right) \end{cases} \tag{16}$$

式中:$P_i$、$Q_i$ 分别为节点 $i$ 的有功功率和无功功率;$U_i$、$U_j$ 分别为节点 $i$、$j$ 的电压;$G_{ij}$、$B_{ij}$ 分别为节点 $i$、$j$ 之间的电纳、电导;$\theta_{ij}$ 为节点 $i$、$j$ 之间的电压相角.

2.3.2　电压约束

$$U_{i,\min} \leqslant U_i \leqslant U_{i,\max} \tag{17}$$

式中:$U_{i,\max}$、$U_{i,\min}$ 分别为节点 $i$ 电压的上下限.

2.3.3　分布式光伏安装容量约束

$$0 \leqslant E^{\text{PV}} \leqslant E_{\max}^{\text{PV}} \tag{18}$$

式中:$E_{\max}^{\text{PV}}$ 为分布式光伏安装容量的上限.

2.3.4　储能电池约束[15, 16]

$$\begin{cases} \eta^{\text{ESB}} \left( E_t^{\text{ESB}} - E_{t-\Delta t}^{\text{ESB}} \right) = -P_t^{\text{ESB}} \Delta t \\ \left| P_{\min}^{\text{ESB}} \right| \leqslant \left| P_t^{\text{ESB}} \right| \leqslant \left| P_{\max}^{\text{ESB}} \right| \\ 0 \leqslant E^{\text{ESB}} \leqslant E_{\max}^{\text{ESB}} \\ S_{\text{SOC, min}} \leqslant E_t^{\text{ESB}} / E^{\text{ESB}} \leqslant S_{\text{SOC, max}} \\ S_{\text{SOC, start}} = S_{\text{SOC, end}} \end{cases} \tag{19}$$

式中:$\eta^{\text{ESB}}$ 为储能电池充放电效率;$E_t^{\text{ESB}}$、$E_{t-\Delta t}^{\text{ESB}}$ 分别为储能电池在 $t$、$t-\Delta t$ 时刻的电池容量;$P_t^{\text{ESB}}$ 为储能电池在 $t$ 时刻的充放电功率,正值为放电功率,负值为充电功率;$P_{\min}^{\text{ESB}}$、$P_{\max}^{\text{ESB}}$ 分别为储能电池充放电功率的上下限;$E^{\text{ESB}}$ 为储能电池安装的容量;$E_{\max}^{\text{ESB}}$ 为储能电池安装容量的上限;$S_{\text{SOC, max}}$、$S_{\text{SOC, min}}$ 分别为储能电池荷电状态的上下限;$S_{\text{SOC, start}}$、$S_{\text{SOC, end}}$ 分别为储能电池在时间周期始末时刻的荷电状态.

### 2.4　基于AHP的多目标权重处理

层次分析法具有处理多目标、定性与定量相结合的决策分析方式[17].该方法在进行多目标决策引入定量的分析,并根据决策者在多目标之间进行两两比较的结果给出相应的优劣评分,然后按层分析,利用判断结果来综合计算各指标的权重[18].

基于AHP的光储多目标权重确定步骤如下.

1) 建立评估模型.本文为了评估光储选址定容的合理性,通过分析光储规划过程中各指标之间的作用,从可靠性、经济性、环保性3个角度建立评估指标.再从这3大评估指标下,细分具体的评估指标,光储选址定容评估模型如图3所示.

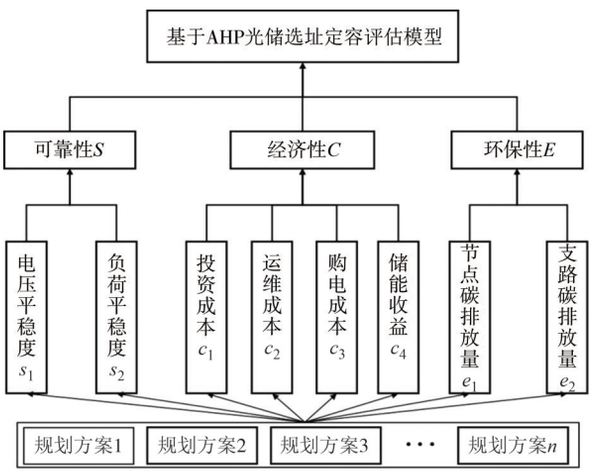



图3 基于AHP光储选址定容评估模型

Fig.3 AHP-based assessment model for PV storage siting and capacity determination

2) 构造判断矩阵.针对评估过程中定性分析的主观性,采用专家经验法和九级标度法对两两元素的相对重要程度进行量化修正,从而有效提高评估过程的可靠性,再通过对各个指标进行两两比较,得到相应的标度,获得判断矩阵$\boldsymbol{A}$:

$$\boldsymbol{A}=\left(a_{ij}\right)_{n\times n}=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn}\end{bmatrix} \tag{20}$$

式中:$a_{ij}$为指标$i$与指标$j$之间的标度值,表示指标间相对重要程度,其具体数值参考九级标度法,如表1所示.

根据图3所示的指标体系,建立各层指标的判断矩阵.首先建立一级指标的判断矩阵$\boldsymbol{B}$:

**表1 九级标度法**

**Tab.1 Nine-level scale method**

| 标度$a_{ij}$ | $a_i$与$a_j$相比的重要性程度 |
|---|---|
| 1 | 具有同样重要性 |
| 3 | 稍微重要 |
| 5 | 明显重要 |
| 7 | 强烈重要 |
| 9 | 极端重要 |
| 2、4、6、8 | 上述两相邻判断的中值 |
| 倒数 | $a_{ji}=1/a_{ij}$ |

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}1 & 5 & 4\\ \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3}\\ \frac{1}{4} & 3 & 1\end{bmatrix} \tag{21}$$

对经济性指标下的二级指标建立相应的判断矩阵$\boldsymbol{C}$:

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}1 & 3 & \frac{1}{5} & 2\\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{2}\\ 5 & 7 & 1 & 6\\ \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{6} & 1\end{bmatrix} \tag{22}$$

对可靠性指标下的二级指标建立相应的判断矩阵$\boldsymbol{S}$:

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}1 & \frac{1}{3}\\ 3 & 1\end{bmatrix} \tag{23}$$

对环保性指标下的二级指标建立相应的判断矩阵$\boldsymbol{E}$:

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}1 & 9\\ \frac{1}{9} & 1\end{bmatrix} \tag{24}$$

3)一致性检验.得到的判断矩阵还需进行一致性检验,以此判断矩阵的科学合理性.对判断矩阵进行一致性检验的方法如下.

$$\begin{cases}\mathrm{CR}=\dfrac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}}\\ \mathrm{CI}=\dfrac{\lambda_{\max}-n}{n-1}\end{cases} \tag{25}$$

式中:CR为一致性比率,当一致性比率CR < 0.1时,判断矩阵通过一致性检验,否则需重新构造合理的判断矩阵;CI为一致性指标;RI为随机一致性指标,其值与判断矩阵阶数$n$有关;$\lambda_{\max}$为判断矩阵$\boldsymbol{A}$的最大特征值.

4) 确定各指标的权重.根据各级指标的判断矩阵,计算指标的权重矩阵.计算方法有3种:算术平均法、几何平均法和特征值法.本文采用算数平均法.具体计算公式如下:

$$w_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n}a_{kj}}\left(i=1,2,\cdots,n\right) \tag{26}$$

二级指标的综合权重为二级指标权重与其归属一级指标权重的乘积,各级指标权重如表2所示.

表 2　各级指标权重表

Tab.2　Table of weights of indicators at various levels

| 一级指标 | 一级权重 | 二级指标 | 二级权重 | 综合权重 |
|---|---|---|---|---|
| $C$ | 0.665 1 | $c_1$ | 0.178 3 | 0.118 6 |
| | | $c_2$ | 0.067 2 | 0.044 7 |
| | | $c_3$ | 0.645 6 | 0.429 4 |
| | | $c_4$ | 0.108 9 | 0.072 4 |
| $S$ | 0.231 1 | $s_1$ | 0.75 | 0.173 3 |
| | | $s_2$ | 0.25 | 0.057 8 |
| $E$ | 0.103 8 | $e_1$ | 0.9 | 0.093 4 |
| | | $e_2$ | 0.1 | 0.010 4 |

表 3　光伏储能参数表

Tab.3　Photovoltaic energy storage parameters table

| | 参数 | 数值 |
|---|---|---|
| 光伏 | 单位容量投资成本/[元·(kW·h)$^{-1}$] | 6 000 |
| | 并网容量范围/kW | [0,2 000] |
| | 单位容量弃光成本/[元·(kW·h)$^{-1}$] | 0.5 |
| | 寿命周期/a | 20 |
| | 贴现率 | 0.06 |
| 储能 | 单位容量投资成本/[元·(kW·h)$^{-1}$] | 1 000 |
| | 额定装机容量/(kW·h) | 2 000 |
| | 充放电功率范围/kW | [0,1 000] |
| | 寿命周期/a | 15 |
| | 运维更换率 | 0.05 |
| | 充放电效率 | 0.9 |
| | 荷电状态范围 | [0.1,0.9] |
| | 贴现率 | 0.065 |
| 碳排放转换因子/[kg·(kW·h)$^{-1}$] | | 0.471 5 |

表 4　分时电价

Tab.4　Time-of-use ariffs

| | 时段 | 价格/[元·(kW·h)$^{-1}$] |
|---|---|---|
| 高峰期 | 09:00—14:00<br>18:00—21:00 | 0.975 |
| 平时期 | 07:00—09:00<br>14:00—18:00<br>21:00—23:00 | 0.510 |
| 低谷期 | 00:00—07:00<br>23:00—24:00 | 0.195 |

## 3　算例分析

### 3.1　模型参数

本文采用经典 IEEE-33 节点配电网系统为例,其拓扑结构如图 4 所示.

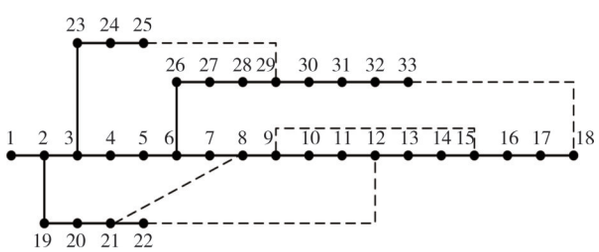



图 4　IEEE-33 节点配电网

Fig.4　IEEE-33 bus distribution network

光伏储能相关参数,参考文献[19]和文献[20],如表 3 所示,分时电价见表 4. 系统总负荷为 3 715 kW+j2 300 kvar,典型日负荷曲线如图 5 所示,基准电压为 12.66 kV,节点电压允许范围为 0.9~1.1 p.u.. 由于地理位置等条件限制,设置光伏电站和储能可选择安装的节点为 4、7、8、14、18、19、20、21、22、23、24、25、29、30、31、32.

### 3.2　光伏场景聚类及求解结果

选取某地区全年光伏数据为本文算例数据,光伏数据采样间隔为 1 h. 根据文中第 1 节内容,以 3 个不同的指标进行光伏场景聚类,利用改进后的 K-means++算法建立光伏聚合模型 .SSE 下降曲线如图 6 所示,并利用手肘法确定最佳聚类中心的 $K$ 值,由图 6 可知:当聚合集群数选取 4 时,SSE 变化过程中出现拐点,下降率变缓,此时可以作为最优的聚合效果.

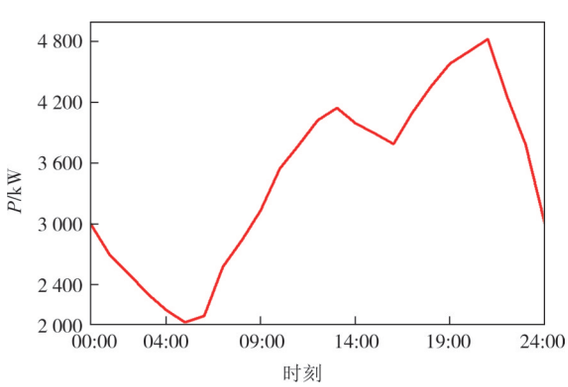



图 5　典型日负荷曲线

Fig.5　Typical daily load curve

聚类结果如图 7 所示,日平均光伏出力、日光伏出力波动率和日光伏出力分布偏度作为聚合特征量,利用改进后的 K-means++算法将年光伏数据聚合为 4 类 .其中黄、蓝两种颜色分别代表不同的聚合集群,红色圆圈代表不同集群对应的聚合中心,聚合中心对应的光伏出力如图 8 所示,各场景比重如图 9 所示.

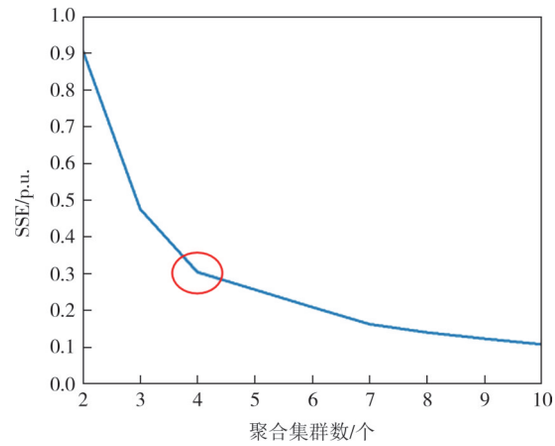



图6 SSE下降曲线

Fig.6 SSE descent curve

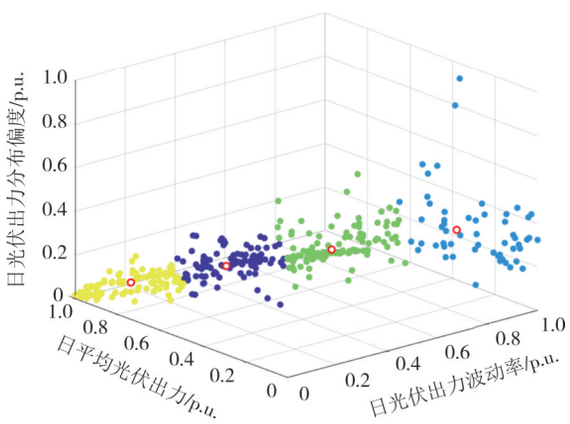



图7 光伏场景聚类结果

Fig.7 PV scenario clustering results

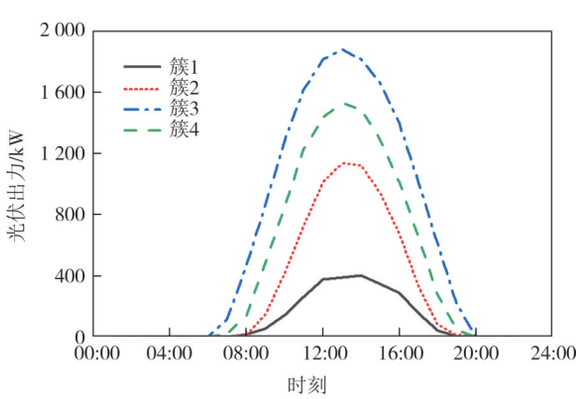



图8 光伏出力曲线

Fig.8 Photovoltaic output curve

图9为全年光伏数据聚类后各场景的比重,各场景中各日数据所属的簇比重是不同的,反映全年光伏数据的不确定性,比传统的四季等分法更能准确描述全年的光伏数据.

设置3种方案进行对比分析:方案1,不考虑光伏场景聚类,采用传统四季划分的方式,方案结果具有不确定性,缺乏合理性;方案2,不考虑AHP指标权重,仅考虑经济性成本的PSO进行求解;方案3,基于光伏场景聚类的光储选址定容模型.

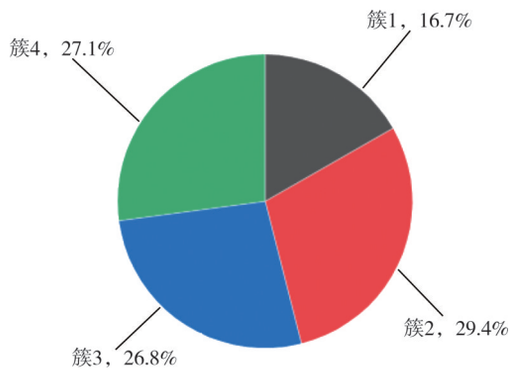



图9 各场景比重

Fig.9 Weighting of scenarios

根据聚合中心对应的光伏出力以及典型日负荷,结合第2节内容,得到多目标权重,利用PSO算法求解选址定容模型,得到各模式下的规划方案如表5所示,规划结果如表6所示.

**表5 规划方案**

**Tab.5 Planning program**

| 规划 | 光伏电站 | | 储能电池 | |
|---|---|---|---|---|
| 方案 | 安装节点 | 安装容量/kW | 安装节点 | 安装容量/kW |
| 1 | 29、30 | 1 897.59 | 23、25 | 1 349.86 |
| 2 | 19、24、25 | 97.91 | 23、24、25 | 1 038.95 |
| 3 | 21、24、25 | 1 632.95 | 8、22、24 | 1 360.36 |

由表6可知,方案3和方案1相比,降低了86.46%的运维成本,提高了储能收益,证明了光储协同在系统中的经济价值.相反,传统的四季等分法得到的光伏出力与实际光伏出力存在偏差,光伏出力的时序情况不匹配,导致光储协同效果不佳.而本文提出的光伏场景聚类方法更好地反映了实际的光伏出力,有效地抑制了光伏发电引起的功率和电压波动,从而提升了系统的可靠性指标;方案2在仅考虑经济性成本的情况下,光伏电站规划容量大幅减少,其所产生的经济成本也得到了相应的降低,但总经济成本仅比方案3降低了0.57%,而可靠性与环保性指标均不如方案3,在现代配电网中以牺牲系统可靠性和环保性的方式来降低系统的经济成本,这显然是不合理的.因此证明了考虑光伏场景聚类的光储选址定容模型可以有效提高电网的经济性、可靠性、环保性.

表6　规划结果

Tab.6　Planning results

| 规划方案 | 投资成本/万元 | 运维成本/万元 | 购电成本/万元 | 储能收益/万元 | 负荷平稳度 | 电压平稳度 | 节点碳排放量/kg | 支路碳排放量/kg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 111.52 | 28.14 | 1 828.73 | 10.08 | 7 616.76 | 2 243.68 | 13 868.57 | 748 469.07 |
| 2 | 14.71 | 1.20 | 1 892.36 | 9.38 | 7 747.41 | 2 262.93 | 14 284.84 | 794 866.94 |
| 3 | 97.22 | 3.81 | 1 818.97 | 10.24 | 7 491.99 | 2 229.54 | 13 922.01 | 785 748.38 |

## 4　结 论

本文对光伏出力历史数据聚类分析,采用改进的K-means++对特征指标进行聚类,得到典型光伏出力场景,建立光储选址定容多目标模型,采用AHP确定各目标权重,以此更准确地量化各指标之间的相对重要程度,用PSO算法求解选址定容模型.本文的模型能够简化对光伏历史数据的计算,且能够综合考虑配电网的经济性、可靠性和环保性,主要结论如下.

1)基于光伏发电出力特征量场景聚合,能够有效简化历史光伏数据的计算量,同时出于多指标聚类光伏场景可以更好地体现全年光伏出力的不确定性,聚类效果更可靠.

2)基于AHP的多目标光储选址定容模型,可以有效降低配电网的经济成本,同时兼顾供电可靠性以及环保性,符合现代配电网规划的发展趋势.

本文目前只针对光伏出力进行分析,暂未考虑其他分布式电源选址定容规划问题,下一步研究将不同类型的分布式电源与储能共同纳入配电网的联合规划中去.

## 参考文献


[1] LIU J Y, ZHANG Y J. Has carbon emissions trading system promoted non-fossil energy development in China?[J]. Applied Energy, 2021,302:117613.

[2] 颜勤, 余国翔.光储充建一体站微电网研究综述[J].电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 1-12.
YAN Q, YU G X. Review on "PV-storage-charging-building" integrated station microgrid [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 1-12. (In Chinese)

[3] GRISALES-NOREÑA L, RESTREPO-CUESTAS B, CORTÉS-CAICEDO B, et al. Optimal location and sizing of distributed generators and energy storage systems in microgrids: a review[J]. Energies,2022,16(1):106.

[4] 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.
WU Y, YAO L Z, LIAO S Y, et al. A peak shaving method of aggregating the distributed photovoltaics and energy storages based on the improved K-means++algorithm[J]. Power System Technology,2022,46(10):3923-3931.(in Chinese)

[5] 邰彬, 黄杨珏, 沈开程, 等.基于指标加权K-means++算法的分布式光伏功率波动平抑控制方法[J].武汉大学学报(工学版), 2023, 56(11): 1413-1424.
TAI B, HUANG Y J, SHEN K C, et al. Smoothing control method of distributed photovoltaic power fluctuation based on the index weighted K-means++algorithm [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2023,56(11):1413-1424.(in Chinese)

[6] 鲁思棋. 考虑场景聚类的分布式光伏布点规划研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
LU S Q. Location and size planning of distributed photovoltaic generations considering scene clustering[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2018.(in Chinese)

[7] MIRSAEIDI S, LI S R, DEVKOTA S, et al. A power loss minimization strategy based on optimal placement and sizing of distributed energy resources [J]. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2022,35(4):e3000.1-e3000.15.

[8] 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.
XU X, CHEN K, LONG Y, et al. Optimal site selection and capacity determination of multi-types of distributed generation in microgrid considering environment cost and timing characteristics [J]. Power System Technology, 2013, 37 (4): 914-921. (in Chinese)

[9] 卢光辉,滕欢,廖寒逊. 基于变量相关性特征聚类的多场景分布式电源规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(12):95-101.
LU G H, TENG H, LIAO H X. Multi-scenario distributed generation planning based on clustering of variable correlation features[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(12): 95-101.(in Chinese)

[10] ZHOU S Y, HAN Y, CHEN S H, et al. Joint expansion planning of distribution network with uncertainty of demand load and renewable energy[J]. Energy Reports,2022,8:310-319.

[11] ASENSIO M, MENESES DE QUEVEDO P, MUÑOZ-DELGADO G, et al. Joint distribution network and renewable energy expansion planning considering demand response and energy storage: part Ⅰ: stochastic programming model [J]. IEEE

Transactions on Smart Grid,2018,9(2):655-666.

[12] 李国梁, 韩军峰, 马平. 基于场景聚类的主动配电网分布式风电的优化配置[J]. 广东电力, 2021, 34(4): 53-58.
LI G L, HAN J F, MA P. Optimal allocation of distributed wind power in active distribution network based on scenario clustering [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(4): 53-58. (in Chinese)

[13] 苏适, 陆海, 严玉廷, 等. 光伏发电出力特征提取及区域集群聚合特性[J]. 云南电力技术, 2018, 46(1): 86-94.
SU S, LU H, YAN Y T, et al. Research on solar PV power output feature extraction and regional cluster aggregation characteristics analysis[J]. Yunnan Electric Power, 2018, 46(1): 86-94. (in Chinese)

[14] 陈柯蒙, 肖曦, 田培根, 等. 一种建筑集成光储系统规划运行综合优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5001-5011.
CHEN K M, XIAO X, TIAN P G, et al. Comprehensive optimization method for planning and operation of building integrated optical storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(13):5001-5011. (in Chinese)

[15] 郑伟民,王蕾,孙可,等. 考虑多能流广义储能作用的配电网协调规划[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):22-30.
ZHENG W M, WANG L, SUN K, et al. Coordinated planning of distribution network considering function of multi-energy flow generalized energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):22-30. (in Chinese)

[16] GRISALES-NOREÑA L F, MONTOYA O D, GIL-GONZÁLEZ W. Integration of energy storage systems in AC distribution networks: optimal location, selecting, and operation approach based on genetic algorithms [J]. Journal of Energy Storage, 2019, 25: 100891.

[17] 陈厚合, 刘丽娜, 姜涛, 等. 提升配电网电压质量的分布式储能经济优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2127-2135.
CHEN H H, LIU L N, JIANG T, et al. Optimal economic configuration of distributed energy storage systems for improving voltage quality in distribution network [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2127-2135. (in Chinese)

[18] 邓铭, 黄际元, 吴东琳, 等. 基于层次分析法的“源-网-荷-储”互动方案汇聚潜力评估[J]. 供用电,2022,39(9):83-92.
DENG M, HUANG J Y, WU D L, et al. Assessment of the convergence potential of the “source-network-load-storage\” interactive scheme based on the analytic hierarchy process [J]. Distribution & Utilization,2022,39(9):83-92. (in Chinese)

[19] 赵立军, 张秀路, 韩丽维, 等. 基于多场景的配电网分布式光伏及储能规划[J]. 现代电力,2022, 39(4): 460-468.
ZHAO L J, ZHANG X L, HAN L W, et al. Distributed photovoltaic generation and energy storage planning of distribution network based on multi scenarios [J]. Modern Electric Power, 2022,39(4):460-468. (in Chinese)

[20] 刘自发,于普洋,李颉雨. 计及运行特性的配电网分布式电源与广义储能规划[J]. 电力自动化设备,2023,43(3):72-79.
LIU Z F, YU P Y, LI J Y. Planning of distributed generation and generalized energy storage in distribution network considering operation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 72-79. (in Chinese)