#### DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.03.016

# 基于改进 ISODATA 风电场景削减的 IES 低碳经济调度

黄元根<sup>1,2</sup>, 刘兴宇<sup>1,2</sup>, 李天然<sup>1,2</sup>, 季振亚<sup>1,2</sup>, 徐伟<sup>3</sup>

(1.南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏南京210023;2.江苏省综合能源设备及集成国际联合 实验室,江苏南京210023;3.南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏南京211106)

摘 要:随着风电并网规模的不断增长,其出力不确定性给综合能源系统(integrated energy system, IES)的稳定经济 运行带来了巨大挑战。对此,文中提出基于改进风电场景削减算法的 IES 低碳经济调度方法。首先,采用改进的迭 代自组织数据分析算法(iterative self-organizing data analysis technique algorithm, ISODATA)对大量历史风电场景进 行聚类削减,克服传统聚类算法在聚类中心确定和数据内在特征考虑上的不足。然后,以改进阶梯碳价模型计算碳 交易成本,针对含电转气-碳捕集(power to gas and carbon capture system, P2G-CCS)耦合设备的 IES,建立以提升其 经济性、低碳性为目标的 IES 优化调度模型。最后,仿真结果表明,该模型在保证系统低碳排放的同时可有效降低 综合运行成本。

关键词:综合能源系统(IES);风电场景削减;碳交易;碳捕集;低碳;经济调度

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)03-0170-09

#### 0 引言

随着社会经济的快速发展,环境问题和能源问题日益加重,急需整个电力行业向低碳和多能耦合方向发展<sup>[1]</sup>。综合能源系统(integrated energy system, IES)通过电、气、热等多种能量耦合,实现了能源之间的互补,促进了系统低碳经济发展,能够有效应对上述问题<sup>[2-3]</sup>,特别是电转气(power to gas, P2G)<sup>[4-7]</sup>与碳捕集(carbon capture system, CCS)<sup>[8-9]</sup>等技术的引入,更加有效地减少了系统运行碳排放。

风电以其环保无污染和可持续发展的特性,已 在我国能源结构中占据重要位置,截至2023年 11月底,全国风电装机总容量约4.1亿kW·h,同比 增长17.6%<sup>[10]</sup>。然而,受自然条件的影响,风电出 力具有不确定性,给IES的稳定经济运行带来了巨 大挑战<sup>[11]</sup>。场景削减法在保证新能源出力原有特 征的情况下,选取出少量典型出力场景,是解决该 问题的主要手段之一<sup>[12]</sup>。其中,一部分研究聚焦于 确定聚类数目以及选取合适的聚类中心,如文献 [13-14]采用改进的*K*-medoids 算法进行风电典型 场景削减,通过相似程度计算选取初始聚类中心; 文献[15]利用肘部法则与轮廓系数判断风电类别 个数并进行聚类,最终通过粒子群算法生成风电的 典型场景,改进了原始*K*-means 算法聚类中心随机

收稿日期: 2024-08-13;修回日期: 2024-11-05 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107100) 选取的缺点。另一部分研究则聚焦于考虑风电出 力的相关特征,如文献[16]基于深度信念网络的新 能源出力时间序列场景生成方法,充分挖掘出新能 源出力特性;文献[17]通过蒙特卡洛算法随机模拟 风电场景,采用改进的场景削减技术最大限度地保 证样本特征,但效率有限;文献[18]采用序贯蒙特 卡洛法,建立风电出力场景,保留了风电的时序出 力特征,效率有一定改善。然而,上述方法因分别 独立优化聚类中心的选择或者风电场景的特征表 征,导致可能遗漏将风电出力时间相关性与聚类中 心的选取有效结合的机会,最终致使场景削减的结 果未能最大程度上反映风电的真实运行模式。

典型的风电场景选取能够有效促进 IES 中新 能源的消纳从而减少碳排量。但是,为了进一步明 确碳排放的责任,促进 IES 的低碳经济运行,需要 更为有效的碳减排策略来优化 IES。随着碳排放市 场的开展,在 IES 优化调度中考虑碳交易成本也成 为当前的研究热点之一。文献[19]采用固定碳价 考虑碳成本,在一定程度上减少了碳排放量。但固 定碳价难以有效体现碳配额对高排放机组的抑制 效果。因此,文献[20-24]采用阶梯式碳价模式进行 改进,但阶梯碳价也存在价格跃变、交易区间内价 格固定等问题,难以有效反映碳市场交易的特点, 对系统的经济运行分析产生了一定影响。

针对上述问题,文中采用改进迭代自组织数据 分析算法(iterative self-organizing data analysis technique algorithm, ISODATA)进行风电场景削减,建

170

立 IES 低碳经济调度模型。用改进的聚类算法来 处理风电的不确定性,提升聚类效果,选取出具有 特征相关性的典型风电出力场景。随后采用改进 的阶梯碳价模型,考虑碳交易成本,针对含 P2G-CCS 的 IES,对比不同算法下的综合成本以及碳排 放量。结果表明文中模型在确保低碳排放的同时 可有效降低系统综合运行成本。

### 1 基于 ISODATA 的风电场景削减方法

文中对历史风电出力数据进行聚类处理,选取 每个聚类的中心作为代表,以此实现场景的有效削 减。这种方法旨在简化分析过程,同时保留关键信 息,以更高效地处理和分析大规模风电数据。

相比于 K-means 算法, ISODATA 最大的不同 就是允许改变类别数, 并通过合并和分裂类来更好 地处理噪声和异常值。但是, 与 K-means 算法一 样, ISODATA 的初始聚类中心是随机选取的, 所使 用的传统欧式距离不能有效表征数据上的内在联 系, 因此须对 ISODATA 进行改进。

对于初始聚类中心的选取,首先从数据集 X 中随机选取第一个初始聚类中心,并对下一个聚类中心,并对下一个聚类中心进行概率计算,公式如下:

$$P = \frac{d^2(\boldsymbol{x}_i)}{\sum_{\boldsymbol{x}_i \in \boldsymbol{X}} d^2(\boldsymbol{x}_i)} \tag{1}$$

式中: P 为样本  $x_i$  被选为下一个聚类中心的概率; 向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ , 为属于数据集 X 的数据样 本;  $d(x_i)$  为样本  $x_i$  到目前聚类中心的距离,  $d(x_i)$  越 大, 则  $x_i$  被选为下一个聚类中心的概率越大, 重复 此步骤直至确定所有聚类中心。

为了改进传统欧式距离的不足,文中采用一种 混合度量方法来计算样本距离。这种方法将 *K*means 算法中常用的欧氏距离与余弦相似度相结 合。不同于仅依赖数据点间的空间距离,这种混合 度量法同时考虑了数据点的内在属性,使得分析更 加全面。简而言之,混合度量方法不仅关注点与点 之间的位置差异,还重视点与点之间的属性相似 性,公式如下:

$$d(\mathbf{x}'_{i}, \mathbf{x}'_{j}) = \sqrt{\sum_{y=1}^{n} (x'_{iy} - x'_{jy})^{2}} - \frac{\sum_{y=1}^{n} x'_{iy} \cdot x'_{jy}}{\|\mathbf{x}'_{i}\| \cdot \|\mathbf{x}'_{j}\|}$$
(2)

式中:  $d(\mathbf{x}'_i, \mathbf{x}'_j)$ 为向量间的混合度量距离;  $\mathbf{x}'_i = (x'_{i1}, x'_{i2}, \dots, x'_{in})$ 、 $\mathbf{x}'_j = (x'_{j1}, x'_{j2}, \dots, x'_{jn})$ 分别为向量  $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 的归一化向量。式(2)等号右侧前半部分为 欧式距离计算值,后半部分为余弦相似度计算值。 具体流程如图1所示,其中N。为聚类数目。



图 1 算法流程 Fig.1 Algorithm flow chart

改进后的算法步骤如下。

(1)分配数据样本x<sub>i</sub>。计算x<sub>i</sub>到第k个聚类中 心的混合度量距离,将x<sub>i</sub>分配给距离最小的聚类中 心,并判断样本的数量是否小于最少样本数量阈值 θ<sub>N</sub>,如果小于则舍弃该类。

(2) 更新聚类中心。

$$\boldsymbol{u}_{j} = \frac{1}{|C_{j}|} \sum_{\boldsymbol{x} \in C_{j}} \boldsymbol{x}$$
(3)

式中: $u_j$ 为第j个聚类中心, $j = 1, 2, \dots, k; C_j$ 为聚簇  $j; |C_j|$ 为聚簇j所包含的向量数目;x为聚簇内的向量。

(3) 计算平均混合度量距离。公式如下:

$$D = \frac{1}{|C_j|} \sum_{j=1}^{k} |C_j| D_j$$
 (4)

式中: *D<sub>i</sub>*为每个聚类里的样本到其聚类中心的平均 混合度量距离; *D*为所有的样本到其聚类中心的平均 均混合度量距离。

(4) 合并与分裂操作。若聚类数目N<sub>c</sub>≤k/2或 者满足条件D<sub>j</sub>>D则进行分裂操作; 若N<sub>c</sub>为偶数次 或N<sub>c</sub>>2k, 且聚类中心数小于阈值则进入合并操

#### 作,重复上述步骤直至迭代完成。

改进的聚类算法通过捕捉风电出力数据的关键特征,优化初始聚类中心的选取,调整聚类过程, 保证考虑场景削减的准确性和代表性。此算法在 确保减少计算复杂度的同时,能够反映风电出力的 波动特性,有助于电网运营商更有效地规划和调度 资源,应对风电出力不确定性带来的挑战。

### 考虑碳交易成本的 P2G-CCS 耦合 IES 模型

#### 2.1 P2G-CCS 耦合的 IES

文中所构建的 IES 如图 2 所示。能量供给侧主 要由风电、电力网络、天然气网络构成;能量转换 设备有 P2G-CCS 设备、热电联产(combined heat and power, CHP)机组, CHP 机组由燃气轮机(gas turbine, GT)与余热锅炉(waste heat boiler, WHB)、 燃气锅炉(gas boiler, GB)组成;负荷侧配备有储电、 储热、储气装置。此处仅给出 P2G-CCS 耦合模型 和碳排放模型,其他设备模型同文献[24]。



Fig.2 Schematic diagram of IES

#### 2.1.1 P2G-CCS 耦合模型

P2G 技术将风电转化为天然气进行存储,从而 消纳风能并减少资源浪费。在工作过程中, P2G 设 备吸收 CO<sub>2</sub> 以进行甲烷化,模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_{P2G}^{g}(t) = \eta_{pg} P_{P2G}(t) \\ V_{CO_{2}}(t) = 3.6 P_{P2G}^{g}(t) / H_{g} \\ E_{POC}^{CO_{2}}(t) = \rho_{CO_{2}} V_{CO_{2}}(t) \end{cases}$$
(5)

式中:  $P_{P2G}(t)$ 为t时段输入 P2G设备的电功率;  $P_{P2G}^{s}(t)$ 为t时段 P2G设备输出的天然气功率; $\eta_{Pg}$ 为 P2G设备的转化效率; $V_{CO_2}(t)$ 为t时段 P2G设备吸 收的 CO<sub>2</sub>量;  $H_{g}$ 为天然气的热值,取 39 MJ/m<sup>3</sup>;  $E_{P2G}^{CO_2}(t)$ 为t时段 P2G设备吸收的碳量; $\rho_{CO_2}$ 为 CO<sub>2</sub> 密度。

CCS 装置吸收的 CO<sub>2</sub> 部分用于 P2G 装置,实现设备耦合,部分被封存,以减少碳排放,模型如式

(6)所示。

$$\begin{cases}
P_{\text{CCS}}(t) = P_{\text{CCS}}^{\text{p}}(t) + P_{\text{CCS},0} \\
P_{\text{CCS}}^{\text{p}}(t) = \lambda_{\text{CCS}} E_{\text{CCS}}(t) \\
E_{\text{CCS}}(t) = \eta_{\text{CCS}} P_{\text{C}}(t)
\end{cases}$$
(6)

式中:  $P_{ccs}(t)$ 为t时段 CCS 设备所耗费的总功率;  $P_{ccs}^{o}(t)$ 为t时段 CCS 设备运行耗能;  $P_{ccs,0}$ 为 CCS 设备的固定耗能, 为常数;  $\lambda_{ccs}$ 为捕集单位碳所耗费 的电能;  $P_{c}(t)$ 为t时段内运行的燃煤或者燃气机组 所产生的电功率;  $\eta_{ccs}$ 为单位电功率所捕集的碳量;  $E_{ccs}(t)$ 为t时段内的碳捕集量。

2.1.2 碳排放模型

IES 的碳排放配额为:

$$\begin{cases} E_{c,\text{ES}}^{*} = E_{c,\text{buy}}^{*} + E_{c,\text{GT}}^{*} + E_{c,\text{GB}}^{*} + E_{c,\text{L}}^{*} \\ E_{c,\text{buy}}^{*} = \sigma_{e}^{*} \sum_{t=1}^{T} P_{G}(t) \\ E_{c,\text{GT}}^{*} = \sigma_{h}^{*} \sum_{t=1}^{T} (\varphi_{e,h} P_{\text{GT}}(t) + H_{\text{GT}}(t)) \\ E_{c,\text{GB}}^{*} = \sigma_{h}^{*} \sum_{t=1}^{T} H_{\text{GB}}(t) \\ E_{c,\text{L}}^{*} = \sigma_{h}^{*} \sum_{t=1}^{T} P_{gl}(t) \end{cases}$$
(7)

式中:  $E_{e,IES}^*$ 、 $E_{e,buy}^*$ 、 $E_{e,GT}^*$ 、 $E_{e,GB}^*$ 、 $E_{e,L}^*$ 分别为 IES、上 级电网、GT、GB、消耗气负荷所产生的碳排放配 额;  $\sigma_e^*$ 、 $\sigma_h^*$ 、 $\sigma_1^*$ 分别为发出单位电功率、热功率、消 耗单位气负荷所产生的碳排放配额;  $\varphi_{e,h}$ 为 CHP 的 电向热转化系数;  $P_G(t)$ 、 $P_{GT}(t)$ 、 $P_{gl}(t)$ 分别为 t 时 段向上级电网的购电功率、GT 输出的电功率以及 气负荷需求;  $H_{GT}(t)$ 、 $H_{GB}(t)$ 分别为 t 时段 GT、 GB 发出的热功率; T为系统的调度周期。

IES 的实际碳排放量为:

$$\begin{cases} E_{c,IES} = E_{c,buy} + E_{c,GT} + E_{c,GB} + E_{c,L} - E_{c,CCS} \\ E_{c,buy} = \sum_{t=1}^{T} (r_1 + r_2 P_G(t) + r_3 P_G^2(t)) \\ E_{c,GT} = \sigma_h \sum_{t=1}^{T} (\varphi_{e,h} P_{GT}(t) + H_{GT}(t)) \\ E_{c,GB} = \sigma_h \sum_{t=1}^{T} H_{GB}(t) \\ E_{c,L} = \sigma_1 \sum_{t=1}^{T} P_{gl}(t) \\ E_{c,CCS} = \sum_{t=1}^{T} E_{CCS}(t) \end{cases}$$
(8)

式中:  $E_{c,IES}$ 、 $E_{c,buy}$ 、 $E_{c,GT}$ 、 $E_{c,GB}$ 、 $E_{c,L}$ 分别为 IES、上 级电网、GT、GB、消耗气负荷所产生的实际碳排

放; *E*<sub>e,ccs</sub>为 CCS 装置周期内的碳捕集量: *r*<sub>1</sub>、*r*<sub>2</sub>、 *r*<sub>3</sub>为煤电机组的实际碳排放参数; *σ*<sub>h</sub>、*σ*<sub>1</sub>分别为发 出单位热功率和消耗单位气负荷所产生的实际碳 排放量。

#### 2.2 改进的阶梯碳价模型

阶梯式碳价模型以阶梯形式价格计算碳交易 成本,用实际碳排放量减去配额排放量,当碳排放 量超过一定程度时进入到下一阶段计算成本,如果 差值为负则可出售碳配额以获取收益<sup>[20]</sup>。文中针 对文献[20]的阶梯碳价模型进行改进,建立碳交易 成本模型,如式(9)所示。

$$f_{\rm CO_2}^{\rm tan} = \begin{cases} \lambda E_{\rm cs} & 0 \le E_{\rm cs} \le d \\ \lambda (1+a) E_{\rm cs} & d \le E_{\rm cs} \le 2d \\ \lambda (1+2a) E_{\rm cs} & 2d \le E_{\rm cs} \le 3d \\ \lambda (1+3a) E_{\rm cs} & 3d \le E_{\rm cs} \le 4d \\ \lambda (1+4a) E_{\rm cs} & 4d \le E_{\rm cs} \end{cases}$$
(9)

式中: f<sup>an</sup><sub>CO2</sub>为碳交易成本; λ为碳交易的基准价格; d为碳交易量的区间长度; a为碳交易的价格增长幅 度; E<sub>cs</sub>为碳交易量。

$$E_{\rm cs} = E_{\rm c,IES} - E_{\rm c,IES}^* \tag{10}$$

阶梯式碳价模型改进前后对比如图 3 所示。 图中f<sub>1</sub>、f<sub>2</sub>、f<sub>3</sub>分别为式(9)中区间长度为d、2d、 3d时所对应的碳交易成本。在碳市场中,碳交易价 格根据前一天的市场交易量日常波动,传统的阶梯 式碳交易机制由于其在固定配额区间内的不灵活 性,导致碳交易成本增加,难以产生预期的经济效 益。随着市场的成熟,改进这一机制以适应价格的 日常波动将使碳交易更加精确和合理,从而提高经 济效益。



Fig.3 Comparison of two modes

改进模型可有效体现碳市场中配额需求量对 碳价的影响,可作为当前碳市场的简化模型,以反 映碳交易成本。

#### 3 IES 低碳经济调度模型

#### 3.1 目标函数

IES 低碳经济调度模型以购能成本、碳成本以

及弃风惩罚费用为优化目标。

$$F_{s,\min} = \sum_{t=1}^{T} \left( f_{ebuy} + f_{CO_2}^{c} + f_{wp} \right) + f_{CO_2}^{tan}$$
(11)

式中: *F*<sub>s,min</sub>为典型风电出力场景*s*下的最小综合成本; *f*<sub>ebuy</sub>、*f*<sup>c</sup><sub>CO2</sub>、*f*<sub>wp</sub>分别为上级购能成本、碳捕集成本、弃风惩罚成本。

$$\begin{cases} f_{ebuy} = C_{et} P_{G}(t) + C_{gt} P_{gas}(t) \\ f_{CO_{2}}^{c} = C_{et} P_{CCS}(t) + C_{s} (E_{CCS}(t) - E_{P2G}^{CO_{2}}(t)) \\ f_{wp} = \lambda_{wp} P_{wp}(t) \end{cases}$$
(12)

式中:  $C_{\text{et}}$ 、 $C_{\text{gt}}$ 、 $C_{\text{s}}$ 、 $\lambda_{wp}$ 分别为t时段的电价、天然气价格、碳封存成本系数和单位弃风功率的惩罚成本;  $P_{\text{gas}}(t)$ 为t时段的购气功率;  $P_{wp}(t)$ 为t时段的弃风功率。

- 3.2 约束条件
- 3.2.1 设备运行约束

关于碳捕集设备的约束条件为:

$$0 \leq P_{\rm CCS}(t) \leq P_{\rm CCS}^{\rm max} \tag{13}$$

式中: *P*<sub>CCS</sub>为碳捕集装置运行功率的上限。对于其他设备,具体运行约束条件见文献[24]。

3.2.2 功率平衡约束

(1) 电功率平衡约束。

$$P_{\rm G}(t) + P_{\rm GT}(t) + P_{s,\rm W}(t) = P_{\rm el}(t) + P_{\rm P2G}(t) + P_{\rm CCS}(t) + P_{\rm cha}(t) - P_{\rm dis}(t)$$
(14)

式中:  $P_{s,W}(t)$ 为典型场景  $s \, \overline{r} \, t$ 时段风电发出的功率;  $P_{el}(t)$ 为 t时段的电负荷;  $P_{cha}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 分别为储能设备在 t时段的充、放电功率。

(2) 气功率平衡约束。

$$P_{gas}(t) + P_{P2G}^{g}(t) = P_{gl}(t) + P_{GT}^{gas}(t) + P_{GB}^{gas}(t) + P_{gcha}(t) - P_{gdis}(t)$$
(15)

式中:  $P_{GT}^{gas}(t)$ 、 $P_{GB}^{gas}(t)$ 分别为t时段下 GT 与 GB 所吸 收的气功率;  $P_{gcha}(t)$ 、 $P_{gdis}(t)$ 分别为 t 时段储气设 备的充、放气功率。

(3) 热功率平衡约束。

 $H_{CHP}(t) + H_{GB}(t) = P_{hl}(t) + P_{hcha}(t) - P_{hdis}(t)$  (16) 式中:  $H_{CHP}(t)$ 为t时段 CHP 机组输出的热功率;  $P_{hl}(t)$ 为t时段的热负荷;  $P_{hcha}(t)$ 、 $P_{hdis}(t)$ 分别为t时段储热设备的充、放热功率。

#### 4 算例分析

#### 4.1 风电典型场景生成

选取我国北方某地区一年的风电出力数据为 样本,采用改进的 ISODATA 对风电场景进行削 减。为验证算法优越性,将其与 K-means 算法和传 统 ISODATA 进行比较,并用戴维森堡丁指数 (Davies-Bollin index, DBI)和邓恩指数(Dunn index, DI)作为评估标准。DBI(-)衡量聚类内紧密度与间分离度的比率,目标是内紧外松;DI(+)比较聚类内最近与最远点距离,强调紧密且分明的聚类。

不同算法的比较结果如表 1 所示。在比较 3 种 聚类算法前,首先通过试验不同的 k 值(4~8)来确 定 K-means 算法的最佳聚类数。结果表明,当 k 为 6 时,其表现最佳,此时 DBI(-)值最小, DI(+)值最 大。对于 ISODATA 及其改进算法,初始聚类数设 为 5,通过算法运行后,两者的最优聚类数均为 6。

表 1 不同算法的效果比较 Table 1 Comparison of the effectiveness of different algorithms

算法	DBI(-)	DI(+)
<i>K</i> -means算法( <i>k</i> =4)	1.729 8	3.811 2
<i>K</i> -means算法( <i>k</i> =5)	1.675 6	3.724 3
<i>K</i> -means算法( <i>k</i> =6)	1.418 3	3.990 6
<i>K</i> -means算法( <i>k</i> =7)	1.531 7	3.698 9
<i>K</i> -means算法( <i>k</i> =8)	1.735 2	3.527 1
ISODATA	1.310 8	4.170 9
改进ISODATA	1.123 6	4.892 4

其次对不同算法的聚类效果进行比较,改进算 法相较于传统 ISODATA 和 *K*-means 算法在评价指 标上表现更佳,主要因为改进算法在初始聚类中心 选择上更合理且考虑了特征相关性,体现出更好的 聚类效果。

图 4 为 3 种算法所形成典型场景的聚类中心。 图 4 中,不同算法生成的场景集在波动性、峰谷值 上表现均有不同。可以看出,采用改进的 ISOADATA 生成的聚类中心在风电出力的波动性和极值表现 上具有区分能力,能够同时捕捉到风电出力与时间 的相关性。具体来说,风电出力总体在0时--6时 逐渐降低,白天处于低值,夜间升高,这一变化趋势 揭示了风电出力的日周期性特征。由图 4(c)可知, 风电出力场景展示了风电出力的季节性变化特征, 其中场景2和场景6的出力较高,与北方冬季强风 的特点相符,而场景1和场景4的出力相对较低, 反映了夏季较弱的风力特征,场景3和场景5的出 力水平处于中等,体现了春秋两季的过渡性特征。 这种季节性和日周期性的特征表征,强调了在选 择聚类中心时考虑风电出力的时间相关性的重 要性。

综上,改进后的 ISOADATA 在聚类中心的选择上,能够有效结合风电出力的时间相关性,更好地表征某地区一年中风电出力场景的区分,有利于系统规划调度,最大程度满足各种情况,确保系统





的经济可靠运行。

#### 4.2 考虑碳交易的 P2G-CCS 耦合 IES 调度分析

针对图 2 所示 IES,以我国北方某地区风电数据生成冬季典型场景,分析系统优化调度。设备参数及储能参数分别见表 2、表 3;优化调度时间为 24 h,时间单位间隔为 1 h;电、气、热负荷曲线见图 5;分时电价与气价分别参考文献[22]与文献[25];碳排放参数及碳交易基准价格(0.25 元/kg)参考文献[26],设定碳交易的区间长度 d 为 2 t,价格增长幅度 a 为 25%。

将 P2G-CCS 耦合的低碳经济优化调度模型分 段线性化转化为混合整数线性模型,然后使用 MATLAB+YALMIP,调用 CPLEX 对模型进行优化 求解。

表 2 设备参数				
	Table 2	Device paramet	ers	
设备	容量/kW	能量转换效率	爬坡约束/%	
P2G	500	0.65	20	
GT	1 000	0.25(电)、0.7(热)	20	
WHB	600	0.8	20	

表 3 储能参数 Table 3 Energy storage parameters

0.8

20

	_	_	-	-		
设备	容量/kW	容量限值	爬坡约束/%	最大功率/kW	充放率	自耗
电储	450	0.1~0.9	20	150	0.95	0.02
气储	300	0.1~0.9	20	60	0.95	0.02
热储	500	0.1~0.9	20	200	0.95	0.02



Fig.5 Load curves

为验证改进阶梯碳价下 P2G-CCS 耦合模型的 效果, 文中分析并对比以下 4 种情景。

情景1:使用固定碳价(0.25元/kg),不采用 P2G-CCS耦合模型。

情景2:在情景1基础上使用阶梯碳价。

情景3:在情景2基础上使用 P2G-CCS 耦合 模型。

情景4:在情景3上采用改进阶梯碳价模型。 4.2.1 调度结果分析

不同情景运行结果见表4。

表	4	不同情景运行结果
Table 4	Re	sults of different scenarios

参数	情景1	情景2	情景3	情景4
碳排放量/kg	40 046.4	38 129.3	34 735.6	36 316.5
碳捕集量/kg	0	0	2 152.9	3 235.8
购能成本/元	15 276.2	16 432.6	17 432.2	16 237.6
碳交易成本/元	7 012.3	9 202.8	6 935.4	4 921.5
弃风电成本/元	52.1	0	0	0
综合成本/元	22 440.6	25 635.4	25 349.2	22 305.3

对比情景2和情景1,结果显示在阶梯碳价

下,综合成本上涨了2994.8元,碳排放量减少了 1917.1kg。采用固定碳价时,企业没有足够的激励 来采取额外的措施减少排放或提高能源效率,采 用阶梯碳价策略时,碳交易成本的增加引导企业更 多地使用风电,没有出现弃风现象,有效促进了低 碳排放,但也导致系统整体运行成本上升,反映了 在追求碳排放减少的同时,需要考虑经济成本的 平衡。

对比情景 3 和情景 2,结果表明采用 CCS 装置 后,碳排量下降了 3 393.7 kg,降幅为 8.9%,证明 CCS 装置不仅能保证风电的利用率,而且还通过碳捕捉 有效降低了碳排放量,虽然增加了购能成本,但也 大幅降低了碳交易成本,整体而言, P2G-CCS 耦合 装置提高了 IES 的经济性和低碳性。

对比情景 4 和情景 3,数据显示采用改进阶梯 碳价后增加了 1 580.9 kg 碳排放量(增加 4.6%),但 IES 的综合成本降低 3 043.9元(减少 12%)。这是 因为改进碳价模式使得碳交易成本下降,并且系统 中高排放但经济性高的机组出力增加,进一步优 化了能源系统的运行,能够确保风电被有效利用。 同时, CCS 加大了碳捕集量,使得碳排放量的增 加被控制在很小范围内。综合来看, IES 系统的经 济性得到显著提升,显示出改进阶梯碳价模型的合 理性。

情景 4 优化调度结果见图 6。在 0 时—5 时,风 电出力处于高位,为了进行风电消纳,将多余电力 通过 P2G 以及储能装置进行消纳,以供供暖和其他 需求,同时,储电装置开始存储电能,以供其他时段 需求;在 5 时—11 时,风电出力处于低位,此时主要 通过 CHP 机组和购电满足电力需求。在 12 时— 14 时,电价升高,此时通过储能放电来降低购电成 本。在 15 时—18 时,电价降低,加大购电,此时储 能装置开始工作,以供其他时段的负荷需求,同时 CCS 装置进一步增加工作量,减少碳排放。在 19 时—24 时,气、热需求升高以及电、气价格上 升,储能装置开始工作,以降低购能成本。

4.2.2 碳交易基价对 IES 影响

在考虑碳交易的系统中,碳交易成本是目标函数的权重,其变化会对系统的运行总成本产生一定的影响。图7展示了碳交易基准价格改变对 IES 碳排放量和综合成本的影响。

当碳交易基准价格低于 0.3 元/kg 时,随着碳价 上升,系统的碳排放量减少,总成本增加,其中,当 价格大于 0.1 元/kg 时碳减排较为明显,这是因为基

GB

800



图 6 情景 4 优化调度结果



36.0

35.5

0

0.10

2.0 综

1.9

1.8

1.7

0.40

不同基准价格下的碳排放量和综合成本 图 7 Carbon emissions and integrated costs under Fig.7 different baseline prices

碳交易基准价格/(元·kg-1)

0.20

0.30

准碳价的提高使碳交易成本上升。此时,为了控制 碳交易成本, CCS 系统加大碳捕集量, 但同时耗能 增加,导致购能成本上升,系统综合成本增大。当 基准碳价超过 0.3 元/kg 时, CCS 系统达到最大捕集 能力,设备处于平衡状态,碳排放量趋于稳定,此 时,基准碳价的进一步上涨继续推高综合成本。

#### 结论 5

文中提出一种基于改进 ISODATA 风电场景削 减的 IES 低碳经济优化调度方法,并将改进阶梯碳 价模型引入 P2G-CCS 耦合的 IES 模型中,分析了碳 价对系统运行的影响,得出以下结论:

(1) 通过 DBI 与 DI 指标验证了所提改进 ISODATA 的有效性,可以解决传统聚类算法在选 择初始聚类中心时的随机性和欧式距离在数据特 征表示上的局限性等问题。

(2) P2G-CCS 耦合的 IES 模型可促进碳的回收 与利用,能够有效降低碳排放量并提高整个系统的 经济性。

(3)所提改进阶梯碳价模型与传统阶梯碳价模 型相比,更符合碳市场实际情况。在仿真算例中, 前者与后者相比,在碳排放量相差不大的情况下 (增加4.6%),综合成本减少了12%,证明了改进碳 价模型在促进 IES 实施低碳经济调度方面的有效 性和合理性。

(4) 当碳交易基准价格为 0.1~0.3 元/kg 时, 价 格的增加带来碳排放的显著下降,而当其超过 0.3 元/kg 时,价格的增加无法进一步促进碳减排。 参考文献:

- [1] 邱玥, 陆帅, 陆海, 等. 综合能源系统灵活性: 基本内涵、数学 模型与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 16-43. QIU Yue, LU Shuai, LU Hai, et al. Flexibility of integrated energy system: basic connotation, mathematical model and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 16-43.
- [2] 吕佳炜,张沈习,程浩忠,等.考虑互联互动的区域综合能源系 统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4001-4021

LYU Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4021.

- [3] 王丙文,付明,黄堃.基于强化学习的多园区综合能源系统经 济调度[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9): 32-39. WANG Bingwen, FU Ming, HUANG Kun. Economic dispatch of multi-area integrated energy system based on reinforcement learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(9): 32-39.
- [4] 董帅, 王成福, 梁军, 等. 计及电转气运行成本的综合能源系统

多目标日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 8-15, 121.

DONG Shuai, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 8-15,121.

[5] 朱西平,刘明航,江强,等.考虑需求响应和碳交易的含 P2G综合能源系统低碳经济调度[J].电测与仪表,2024, 61(10):1-7.

ZHU Xiping, LIU Minghang, JIANG Qiang, et al. Low carbon economic scheduling of P2G integrated energy system considering demand response and carbon trading[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 1-7.

 [6] 潘崇超,侯孝旺,金泰,等. 计及阶梯碳交易和可再生能源不确 定性的综合能源系统低碳研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 8-16.

PAN Chongchao, HOU Xiaowang, JIN Tai, et al. Low carbon research on integrated energy system considering the tiered carbon trading and the uncertainties of renewable energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 8-16.

- [7] ISKOV H, RASMUSSEN N B. Global screening of projects and technologies for power-to-gas and bio-SNG[R]. Horsholm: Danish gas Technology Centre, 2013.
- [8] 赵振宇,包格日乐图,李炘薪.基于信息间隙决策理论的含碳 捕集-电转气综合能源系统优化调度[J].发电技术,2024, 45(4):651-665.

ZHAO Zhenyu, BAO Geriletu, LI Xinxin. Optimization and scheduling of integrated energy systems with carbon capture and storage-power to gas based on information gap decision theory [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 651-665.

- [9] 赵振宇,李炘薪. 基于阶梯碳交易的碳捕集电厂-电转气虚拟 电厂低碳经济调度[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 769-780. ZHAO Zhenyu, LI Xinxin. Low-carbon economic dispatch based on ladder carbon trading virtual power plant considering carbon capture power plant and power-to-gas[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 769-780.
- [10] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2023-12-20) [2024-11-05]. https://www.nea.gov.cn/2023-12/20/c1310756286.htm.

National Energy Administration. National Energy Administration releases 2023 national electric power industry statistics[EB/OL] (2023-12-20) [2024-11-05].https://www.nea.gov. cn/2023-12/20/c1310756286.htm.

- [11] 吴孟雪, 房方. 计及风光不确定性的电-热-氢综合能源系统 分布鲁棒优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3473-3485.
  WU Mengxue, FANG Fang. Distributionally robust optimization of electricity-heat-hydrogen integrated energy system with wind and solar uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3473-3485.
- [12] 王义军, 胡一鸣, 许家豪. 计及风能-碳捕集运行模式下的区 域综合能源低碳经济调度[J/OL]. 电测与仪表, 2023: 1-11.

(2023-02-10) [2024-11-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23. 1202.TH.20230210.1102.006.html.

WANG Yijun, HU Yiming, XU Jiahao. Low-carbon economic dispatch of RIES considerating wind energy-carbon capture operation mode[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023: 1-11. (2023-02-10)[2024-11-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230210.1102.006.html.

- [13] 王华勇, 傅强, 徐昱, 等. 基于场景削减的网源协同规划研究
  [J]. 自动化仪表, 2021, 42(5): 69-74.
  WANG Huayong, FU Qiang, XU Yu, et al. Research on generation and transmission expansion planning based on scenario reducing[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(5): 69-74.
- [14] 王 群, 董 文 略, 杨 莉. 基 于 Wasserstein 距离和改进 K-medoids 聚类的风电/光伏经典场景集生成算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2654-2661.
   WANG Qun, DONG Wenlue, YANG Li. A wind power/photo-

voltaic typical scenario set generation algorithm based on Wasserstein distance metric and revised K-medoids cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2654-2661.

- [15] 白斌,韩明亮,林江,等. 含风电和光伏的可再生能源场景削 减方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 141-149.
  BAI Bin, HAN Mingliang, LIN Jiang, et al. Scenario reduction method of renewable energy including wind power and photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (15): 141-149.
- [16] 史昭娣, 黄越辉, 李湃, 等. 计及深度信念网络场景生成的风/ 光/储协同优化规划方法[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1331-1342.

SHI Zhaodi, HUANG Yuehui, LI Pai, et al. Collaborative optimization planning for wind/PV/storage based on scenario generated by deep belief network[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1331-1342.

- [17] BLUDSZUWEIT H, DOMINGUEZ-NAVARRO J A, LLOM-BART A. Statistical analysis of wind power forecast error[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 983-991.
- [18] 马志程,李维俊,周强,等. 含光热电站的风光联合发电系统 互补效益评估[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(2): 1-9.
  MA Zhicheng, LI Weijun, ZHOU Qiang, et al. Evaluation on the complementary benefit of a wind-solar combined power generation system with a photothermal power station[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(2): 1-9.
- [19] 卫志农,张思德,孙国强,等.基于碳交易机制的电—气互联综合能源系统低碳经济运行[J].电力系统自动化,2016,40(15):9-16.

WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16.

[20] 卢志刚, 郭凯, 闫桂红, 等. 考虑需求响应虚拟机组和碳交易的含风电电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017,

41(15): 58-65.

LU Zhigang, GUO Kai, YAN Guihong, et al. Optimal dispatch of power system integrated with wind power considering virtual generator units of demand response and carbon trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 58-65.

[21] 王利猛,刘雪梦,李扬,等.阶梯式碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统低碳优化调度[J].电力建设,2024, 45(2):102-114.

WANG Limeng, LIU Xuemeng, LI Yang, et al. Low-carbon optimal dispatch of integrated energy system considering demand response under the tiered carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 102-114.

[22] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈嘉滨, 等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活 双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3094-3106.

CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3094-3106.

[23] 罗其华,李平,张少迪.考虑需求响应和阶梯碳交易的虚拟电 厂低碳经济调度[J].浙江电力,2023,42(6):51-59.

LUO Qihua, LI Ping, ZHANG Shaodi. Low-carbon and economic scheduling of virtual power plant considering demand response and stepwise carbon trading[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6): 51-59.

[24] 陈志, 胡志坚, 翁菖宏, 等. 基于阶梯碳交易机制的园区综合 能源系统多阶段规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 148-155.

CHEN Zhi, HU Zhijian, WENG Changhong, et al. Multi-stage planning of park-level integrated energy system based on ladder-type carbon trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148-155.

- [25] 龚承柱, 贾维东, 吴德胜, 等. 碳中和目标下天然气发电产业发展前景优化[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 144-151.
  GONG Chengzhu, JIA Weidong, WU Desheng, et al. Optimization of the development prospect of gas power industry under the goal of carbon neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 144-151.
- [26] 喻鑫, 胡志坚, 陈锦鹏, 等. 阶梯碳下考虑 P2G-CCS 与供需灵 活响应的 IES 优化调度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(10): 1360-1371.

YU Xin, HU Zhijian, CHEN Jinpeng, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering P2G-CCS and supplydemand flexible response under stepped carbon[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(10): 1360-1371.

#### 作者简介:



黄元根(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为 综合能源优化运行(E-mail: hyg6662000@ 163.com);

刘兴宇(2000),男,硕士在读,研究方向为 电力市场;

李天然(1975),男,博士,副教授,研究方向 为电力系统优化运行。

## Low-carbon economic dispatch based on improved ISODATA scenario reduction for wind power in IES

HUANG Yuangen<sup>1,2</sup>, LIU Xingyu<sup>1,2</sup>, LI Tianran<sup>1,2</sup>, JI Zhenya<sup>1,2</sup>, XU Wei<sup>3</sup>

(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Provincial International Joint Laboratory for Integrated Energy Equipment and Systems, Nanjing 210023, China;

3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: As wind power integration increases, its unpredictability challenges the integrated energy system (IES). A lowcarbon, economic dispatch method for IES using an enhanced wind power scenario reduction algorithm is introduced in this paper. It employs an improved iterative self-organizing data analysis technique algorithm (ISODATA) for clustering historical wind power scenarios, addressing the limitations of traditional clustering algorithms in determining cluster centers and analyzing inherent data features. Then, an integrated energy model is established and it optimized using an improved stepwise carbon trading and power to gas and carbon capture system (P2G-CCS) coupling model. Finally, an IES model is developed with the goals of improving economic efficiency, reducing carbon emissions. Simulation results demonstrate that this model reduces comprehensive operational costs while ensuring low carbon emissions in the system.

Keywords: integrated energy system (IES); wind power scenario curtailment; carbon trading; carbon capture; low-carbon; economic dispatch

(编辑 方晶)