

# 电-碳市场下含电转气的碳捕集电厂 经济-环境-能源综合评价

李彦斌, 余熠薇, 张峰, 李贇  
(华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

**摘要:** 随着二氧化碳排放量的迅速攀升, 经济、环境和能源的矛盾日益突出, 发电行业作为典型的碳排放主体, 正面临着低碳转型的迫切要求。文章构建了含电转气 (power-to-gas, P2G) 的碳捕集电厂, 通过分析电厂的经济、环境和能源 (economy-environment-energy, 3E) 特性, 建立电厂的 3E 综合评价指标体系; 为获取 3E 评价指标的相关数据, 构建电厂的两阶段鲁棒优化调度模型, 并利用约束生成算法进行求解; 设计了组合赋权方法和基于灰色关联度分析的逼近理想解排序方法 (grey relational analysis-technique for order preference by similarity to ideal solution, GRA-POPSIS), 形成 3E 综合评价模型。通过实际数据进行仿真分析, 验证了在电-碳市场环境下, 含 P2G 的碳捕集电厂相较于 WT-GPPCC 系统和 WT-GFPP 系统具有更好的经济、环境和能源综合效益, 碳捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 技术为系统带来的综合效益足以弥补其较高的运行成本, 并且提出的 3E 综合评价模型具有良好的适用性。

**关键词:** 电-碳市场; 碳捕集电厂; 3E 评价; CCUS; P2G

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.003

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)03-0022-11

## Economy environment-energy comprehensive evaluation of carbon capture power plant containing power-to-gas under the electricity-carbon market

LI Yanbin, YU Yiwei, ZHANG Feng, LI Yun

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** With the rapid escalation of carbon dioxide emissions, the contradiction between economy, environment and energy is becoming more and more prominent, and the power generation industry, as a typical carbon emission subject, is facing the urgent requirement of low-carbon transformation. A carbon capture power plant with power-to-gas (P2G) was constructed, and the economy-environment-energy (3E) comprehensive evaluation index system of the power plant was established by analyzing the 3E characteristics of the power plant. In order to obtain the relevant data of the 3E evaluation indices, a two-stage robust optimal scheduling model of the power plant was constructed and solved using the constraint generation algorithm. Furthermore, the combination assignment method and technique for order preference by similarity to an ideal solution (GRA-TOPSIS) were designed to form the 3E comprehensive evaluation model. Simulation analyses were carried out with actual data to verify that the carbon capture power plant with P2G has better integrated economic, environmental and energy benefits compared with the WT-GPPCC system and the WT-GFPP system under the environment of the electricity-carbon market, and that the integrated benefits brought by the carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology to the system are sufficient to compensate for its high operating cost, and that the proposed 3E integrated evaluation model has good applicability.

**Keywords:** electricity-carbon market, carbon capture power plant, 3E evolution, CCUS, P2G

**基金项目:** 国家电网有限公司科技资助项目 (5200-2023564 90A-3-2-ZN); 教育部人文社科基金项目 (青年项目) (23YJ C630226)

## 0 引言

全球变暖不仅带来气候异常、生物系统紊乱等环境问题, 而且增加了能源消费和经济运行的风

险,同时,经济的非均衡发展 and 能源的粗放利用又加剧了环境的恶化,经济、能源和环境的矛盾日益突出<sup>[1]</sup>。基于此,“碳达峰”、“碳中和”、能源低碳转型等目标被相继提出<sup>[2]</sup>,降低二氧化碳排放量,促进经济、能源和环境的均衡发展势在必行。

近年来,P2G (power to gas) 和 CCUS (carbon capture, utilization and storage) 技术的发展为解决此问题提供了新思路。在电厂原有基础上加入 CCUS 技术,形成碳捕集电厂 (carbon capture power plant, CCPP),可以降低电厂的 CO<sub>2</sub> 封存成本,减少 CO<sub>2</sub> 泄漏风险<sup>[3]</sup>。同时,捕集的 CO<sub>2</sub> 可用于制天然气,降低 P2G 技术的碳源成本。已有研究显示,协调 CCPP 和 P2G 的运行对深入去碳化和减免碳税有巨大潜力<sup>[4]</sup>。目前中国首套天然气电厂烟气 CO<sub>2</sub> 捕集工业级示范装置已在大唐国际北京高井热电厂成功投产。

关于 CCPP 和 P2G 联合运行的研究,主要集中在低碳经济调度方面<sup>[5-6]</sup>。文献[7]设计了考虑碳捕集装置的电-气一体化系统的低碳经济调度方法,仿真验证了拟议模型的可行性和有效性。文献[8]提出了考虑碳捕集和氢气需求的综合能源低碳优化调度模型,并通过数值实例验证了其有效性。文献[9]建立了碳捕集-电转气协同运行的低碳经济调度模型,通过算例仿真验证了模型的有效性。文献[10]构建了集 P2G、碳捕集与封存 (carbon capture and storage, CCS) 技术于一体的热电联产模型和多微电网点对点低碳经济运行模型,结果表明将 P2G 的热电联产与 CCS 相结合,可有效减少微电网运行中的碳排放。上述研究通过建模仿真等方法揭示了 CCPP-P2G 的运行规律,为其调度优化提供了有益的参考。但是,研究大多停留在 CCS 技术上,鲜少考虑增加了碳利用环节的 CCUS 技术的潜力,更缺乏对 CCUS-P2G 耦合关系的深入研究。

CCPP-P2G 的联合运行,可以实现电-气转换和碳循环利用,具有显著的 3E 特性。文献[11]提出了综合能源系统双层次优化调度模型,仿真结果表明同时考虑碳捕集和 P2G 可以提高综合能源系统的经济性和风能、太阳能的消纳能力。文献[12]构建了 P2G、CCS 和电动汽车的协同运行框架,案例研究发现,其可有效减少 CO<sub>2</sub> 排放、提高风能利用率和降低总运行成本。文献[13]提出了一个基于 P2G、CCS 和氢燃料电池的联合运营框架以及考虑碳交易机制的低碳经济调度模型,多场景仿真表明,该

系统在风电消纳、碳排放和运行成本等方面均具有良好表现。以上研究主要从技术、经济、环境和能源等角度出发,探讨降低碳排放量、减少运行成本和促进绿电消纳等单个或多个目标<sup>[14-15]</sup>,指标选择单一固定,难以充分、全面地反映 CCPP-P2G 的 3E 特性和电-碳-氢耦合特性,具有进一步研究的空间。

基于以上背景,文章设计了含 P2G 的碳捕集电厂,并进行 3E 综合评价,以期全面地反映该电厂的综合效益,并评估 CCUS 技术的潜力。首先,文章构建了 3E 综合评价指标体系。其次,为获得准确的指标数据,设计了电厂的两阶段鲁棒优化模型,确立了约束生成算法的求解方法。再次,构建了基于分析指标间相关性显示指标重要性 (criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC) 法和灰色-决策实验室 (grey-decision making trial and evaluation laboratory, Grey-DEMATEL) 法的组合赋权方法,以及 GRA-TOPSIS 评价方法。最后,通过实例仿真和场景对比,评估了含 P2G 的碳捕集电厂的 3E 综合效益。

## 1 含 P2G 的碳捕集电厂 3E 特性分析及优化

### 1.1 电厂 3E 特性分析

文章设计了一个由燃气机组和风电机组共同发电,CCUS 技术捕集、利用和封存 CO<sub>2</sub>,P2G 技术重整 CO<sub>2</sub> 制天然气的电厂,即含 P2G 的碳捕集电厂。其运行结构如图 1 所示,可以看出,电厂具有显著的 3E 特性。

经济方面。燃气机组和风电机组共同发电,获得售电收入。当风电机组发电超过燃气机组的调节能力时,多余电量可通过碳捕集、P2G 设备消纳,减少风电弃能,增加发电收入。并且,CCUS-P2G 的联合运行形成了系统内部的碳循环和气循环,可以降低燃料成本和碳排放成本。此外,CO<sub>2</sub> 还可出售给制造企业进行工业利用,获得 CO<sub>2</sub> 交易收入。

环境方面。电厂通过 CCUS 技术实现碳利用、碳交易和碳封存,大大地减少了系统的碳排放量,具有显著的减排效益。并且,P2G 和储气罐等设备可以灵活调节负荷水平,扩大风电的消纳空间,通过促进绿电使用也能带来环境效益。

能源方面。电厂通过 CCUS-P2G 和储气罐的协调运行,可以平衡源荷供需,提高风电的消纳能力,有助于能源结构的调整。并且,电厂通过内部“电-气”、“电-碳”转化,扩大不同能源的供需空间,可以实现多种能源的协同效益。

综上,含 P2G 的碳捕集电厂通过电-碳-氢耦合作用,能够促进风电的消纳,降低系统的燃料成本

和 CO<sub>2</sub> 的排放、运输和封存成本,实现了经济、环境和能源的协同效益,具有显著的 3E 特性。

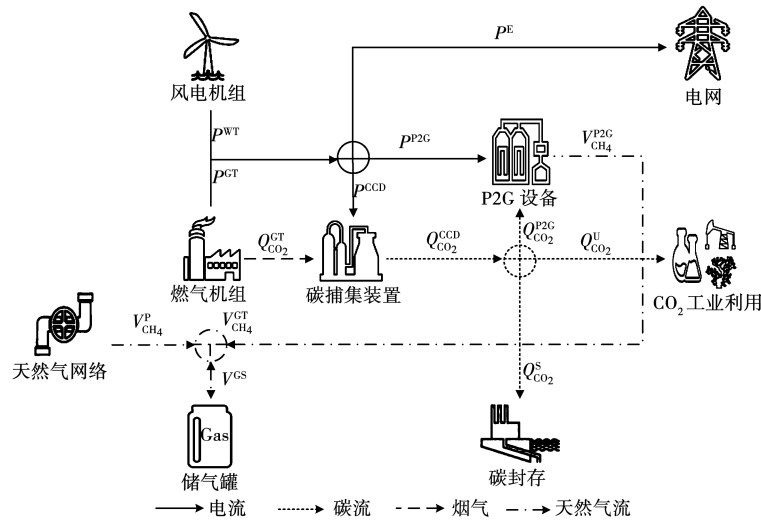


图 1 含 P2G 的碳捕集电厂的运行结构

Fig. 1 Operational structure of CCPP with P2G

文章在文献查阅、资料收集等<sup>[16-18]</sup>基础上,结合以上分析和电-碳市场环境的影响,构建了 3E 综合评价指标体系,如图 2 所示。

### 1.2 电厂优化模型构建

为收集评价指标数据,文章需先对电厂进行仿真优化。本节在考虑电-碳市场的基础上建立优化调度模型,优化目标为电厂运行成本最小,目标函数包括成本项和收入项两部分。此外,考虑到风电输出误差,优化模型分为日间和实时两个阶段,具体公式如下<sup>[19]</sup>:

$$\min \sum_{t=1}^T [C_{su,t}^{GT} u_{su,t}^{GT} + C_{sd,t}^{GT} u_{sd,t}^{GT} + \pi_t^{CH_4} V_{CH_4,t}^P + \pi_t^{CCD} Q_{CO_2,t}^{CCD} + \pi_t^S Q_{CO_2,t}^S + \pi_t^{CEA} (Q_{CO_2,t}^N - Q_{CO_2,t}^{CEA}) - \pi_t^E P_t^E - \pi_t^{CO_2} Q_{CO_2,t}^U] + \max_{\zeta \in U} \{ \min_{y \in \Omega(x,\zeta)} g(y) \} \quad (1)$$

$$\min \{ g(y) \} = \sum_{t=1}^T [\pi_t^{CH_4} \Delta V_{CH_4,t}^P + \pi_t^{WT} \Delta P_{cut,t}^{WT}] \quad (2)$$

式中:  $C_{su,t}^{GT}$  和  $C_{sd,t}^{GT}$  分别为  $t$  时刻燃气机组的开机、关机成本;  $u_{su,t}^{GT}$  和  $u_{sd,t}^{GT}$  分别为燃气机组的开机、关机指示变量;  $\pi_t^{CH_4}$  为天然气价格;  $V_{CH_4,t}^P$  为外购天然气量;  $\pi_t^{CCD}$  为捕捉一吨 CO<sub>2</sub> 的成本;  $\pi_t^S$  为封存一吨 CO<sub>2</sub> 的成本;  $Q_{CO_2,t}^{CCD}$ 、 $Q_{CO_2,t}^S$  分别为 CO<sub>2</sub> 的捕集量和封存量;  $\pi_t^{CEA}$  为碳市场价格;  $Q_{CO_2,t}^N$  为燃气机组的净 CO<sub>2</sub> 排放量;  $Q_{CO_2,t}^{CEA}$  为电厂的碳排放权限制;  $\pi_t^E$  为电力市场价格;  $P_t^E$  为电厂输送功率;  $\pi_t^{CO_2}$  为工业用 CO<sub>2</sub> 市场价格;  $Q_{CO_2,t}^U$  为工业用 CO<sub>2</sub> 量;  $\zeta$  为风力输出误差;  $\pi_t^{WT}$  为弃风成本系数;  $P_{cut,t}^{WT}$  为弃风功率。

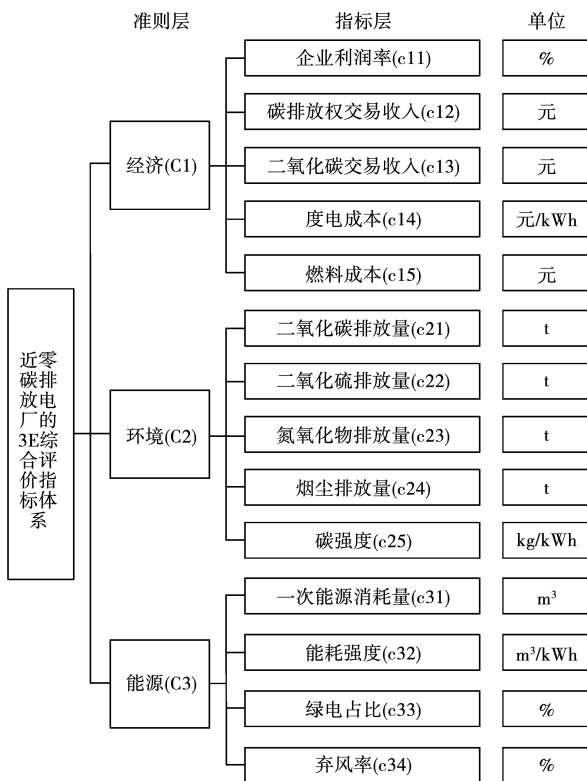


图 2 含 P2G 的碳捕集电厂 3E 综合评价指标体系

Fig. 2 Integrated 3E evaluation index system for CCPP containing P2G

电厂进行优化调度时会受到不同设备的运行约束和能量平衡约束<sup>[20-21]</sup>,例如功率平衡约束、碳平衡约束、气平衡约束、机组运行约束、弃风约束、设备约束等,由于篇幅限制,在此就不过多赘述。后续通过约束生成算法进行求解。

## 2 含 P2G 的碳捕集电厂的 3E 综合评价模型构建

本节首先设计了 3E 综合评价的组合赋权方法,在确定指标数据和权重的计算方法的基础上,设计了各场景的评价方法,具体流程如图 3 所示。

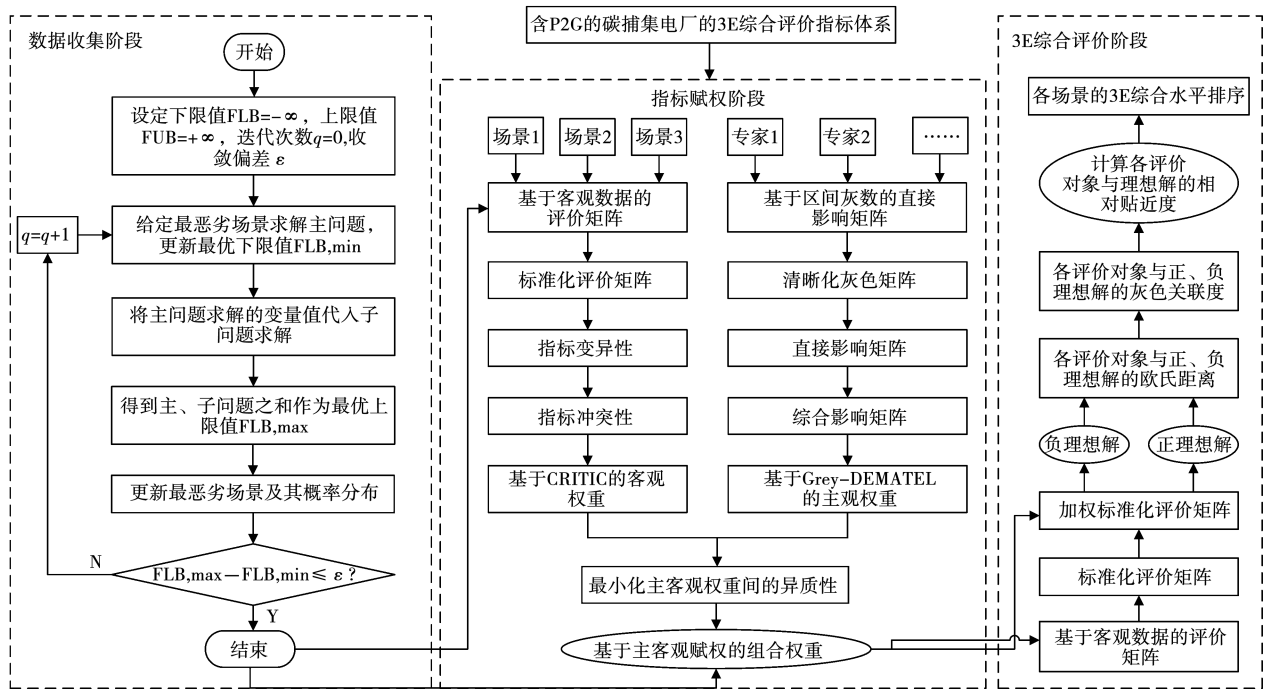


图 3 含 P2G 的碳捕集电厂 3E 综合评价流程

Fig. 3 Integrated 3E evaluation process for CCPP containing P2G

### 2.1 组合赋权方法

#### 2.1.1 组合赋权法

指标赋权方法主要包括客观赋权法和主观赋权法两类。前者刻画的是评价指标包含的客观信息量,但由于所获数据的模糊性与随机性,权重的稳定性要弱于主观权重;后者基于专家打分结果得到权重,更具有可解释性,但主观性较强。组合赋权方法既可避免专家打分过于主观的情况,又可避免客观加权忽视指标属性的情况,提高了赋权的可靠性。因此,文章采用此方法确定指标的权重,通过最小化主客观权重的异质性进行组合赋权,具体如下<sup>[22]</sup>:

$$\min \sum_{j=1}^n [(\omega_j - \omega_j^1)^2 \times (\omega_j - \omega_j^2)^2] \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \quad (4)$$

式中:  $\omega_j$ 、 $\omega_j^1$ 、 $\omega_j^2$  分别为组合权重、客观权重和主观权重;  $j$  代表指标个数。

#### 2.1.2 CRITIC 法

文章采用 CRITIC 法确定指标的客观权重,其能综合考虑评价指标间的相关性和所含信息量,因此优于变异系数法、熵权法等客观赋权法。

在构建评价矩阵的基础上,文章使用 min-max 法对矩阵进行标准化处理,得到标准化矩阵  $X_{ij}^* = (x_{ij}^*)_{m \times n}$ 。由此,计算指标的变异性  $S_j$  和冲突性  $R_j$ <sup>[23]</sup>:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij}^* - \bar{x}_j^*)^2}{m - 1}} \quad (5)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (6)$$

式中:  $x_{ij}^*$  为第  $i$  个评价对象的第  $j$  个标准化指标值;  $\bar{x}_j^*$  为第  $j$  个指标的平均值;  $r_{ij}$  为评价指标  $i$  和  $j$  之间的皮尔逊线性相关系数。

结合指标的变异性 and 冲突性计算指标的信息量  $C_j$ , 归一化处理后得到客观权重  $\omega_j^1$ :

$$C_j = S_j \times \sum_{j=1}^n (1 - r_{ij}) = S_j \times R_j \quad (7)$$

$$\omega_j^1 = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (8)$$

### 2.1.3 Grey-DEMATEL 法

文章采用 Grey-DEMATEL 法确定指标的主观权重。DEMATEL 法可以反映复杂系统中因素的相互作用,引入灰数理论后,可建造出更柔性的决策模型,获得可靠的评估结果。其具体步骤如下<sup>[24]</sup>:

1) 构建直接影响矩阵。基于 3E 综合评价指标体系,邀请 12 位相关领域的专家、企业高管和技术人员填写调查问卷,对各指标间的相互影响关系进行打分。根据表 1 将专家评价的语义变量转化为灰数区间,并构建基于区间灰数的直接影响矩阵,  $\otimes x_{ij}^k = [\underline{\otimes} x_{ij}^k, \overline{\otimes} x_{ij}^k]$ 。其中,  $\otimes x_{ij}^k$  为灰数,表示第  $k$  位专家评分中指标  $i$  对指标  $j$  的影响程度,  $\underline{\otimes} x_{ij}^k$ 、 $\overline{\otimes} x_{ij}^k$  分别为  $\otimes x_{ij}^k$  的上、下限。

表 1 专家评价的语义变量

Tab. 1 Semantic variables for expert evaluation

数值	语义变量	区间灰数
0	无直接影响	[0, 0]
1	较弱影响	[0, 0.25]
2	中等影响	[0.25, 0.5]
3	较强影响	[0.5, 0.75]
4	非常强的影响	[0.75, 1]

2) 清晰化灰色矩阵。进行清晰化和标准化处理:

$$\underline{\otimes} x_{ij}^{\sim k} = \frac{(\underline{\otimes} x_{ij}^k - \min \underline{\otimes} x_{ij}^k)}{\Delta_{\min}^{\max}(k)} \quad (9)$$

$$\overline{\otimes} x_{ij}^{\sim k} = \frac{(\overline{\otimes} x_{ij}^k - \min \overline{\otimes} x_{ij}^k)}{\Delta_{\min}^{\max}(k)} \quad (10)$$

$$y_{ij}^k = \frac{\underline{\otimes} x_{ij}^{\sim k} (1 - \underline{\otimes} x_{ij}^{\sim k}) + \overline{\otimes} x_{ij}^{\sim k} \times \overline{\otimes} x_{ij}^{\sim k}}{1 + (\underline{\otimes} x_{ij}^{\sim k} - \overline{\otimes} x_{ij}^{\sim k})} \quad (11)$$

$$z_{ij}^k = \min_j \underline{\otimes} x_{ij}^k + y_{ij}^k \Delta_{\min}^{\max}(k) \quad (12)$$

$$\Delta_{\min}^{\max}(k) = \max_j \overline{\otimes} x_{ij}^k - \min_j \underline{\otimes} x_{ij}^k \quad (13)$$

式中:  $\underline{\otimes} x_{ij}^{\sim k}$ 、 $\overline{\otimes} x_{ij}^{\sim k}$  分别为灰数  $\otimes x_{ij}^k$  清晰化后的上下限;  $y_{ij}^k$  是标准化后的清晰值;  $z_{ij}^k$  为清晰化灰色矩阵  $\mathbf{Z} = [z_{ij}^k]_{n \times n}$  中的元素,表示经过灰色系统处理后第

$k$  位专家认为指标  $i$  对指标  $j$  的影响程度;  $\Delta_{\min}^{\max}(k)$  是第  $k$  位专家的灰色判断矩阵的范围。

3) 计算直接影响矩阵。综合 12 位专家的清晰化矩阵  $\mathbf{Z}$ , 可得到直接影响矩阵  $\mathbf{X} = [x_{ij}^k]_{n \times n}$ :

$$x_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K z_{ij}^k \quad (14)$$

4) 计算综合影响矩阵。将矩阵  $\mathbf{X}$  进行标准化处理,得到标准化矩阵  $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ ,进一步得到综合影响矩阵  $\mathbf{T} = [t_{ij}]_{n \times n}$ :

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_{0 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x_{ij}}, n = 14 \quad (15)$$

$$\mathbf{T} = \lim_{k \rightarrow \infty} (\mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \dots + \mathbf{A}^k) = \mathbf{A} (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (16)$$

式中:  $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{A}^k = \mathbf{0}$  (零矩阵);  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

5) 计算中心度和原因度。中心度  $M_j$  和原因度  $N_j$  可通过以下公式计算:

$$M_j = f_j + e_j (j = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

$$N_j = f_j - e_j (j = 1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

其中,  $f_j$ 、 $e_j$  分别为影响度和被影响度:

$$f_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

$$e_j = \sum_{i=1}^n t_{ji} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

式中:  $t_{ij}$  和  $t_{ji}$  均为综合影响矩阵中的元素。

6) 计算指标的主观权重。根据各指标的中心度,计算主观权重  $\omega_j^2$ :

$$\omega_j^2 = \frac{M_j}{\sum M_j} \quad (21)$$

### 2.2 GRA-TOPSIS 评价方法

在对指标进行赋权的基础上,文章对多个场景的 3E 综合效益进行评价,因此基于评价对象差异的 TOPSIS 方法具有良好的适用性。然而,如果各评价指标间普遍存在线性关系,欧氏距离就会失效。并且 TOPSIS 法无法在与两种理想解的欧式距离均相近的情况对评价对象进行排序。故文章将灰色关联分析法与 TOPSIS 法结合,采用 GRA-TOPSIS 方法进行 3E 评价分析。

1) 构建加权标准化评价矩阵。利用组合赋权法确定的权重,构建加权标准化评价矩阵  $\mathbf{U} (u_{ij})_{m \times n}$ :

$$u_{ij} = \omega_j x_{ij}^* \quad (22)$$

2) 计算欧氏距离。确定正理想解  $U^+$  与负理想解  $U^-$  的集合, 从而得到第  $i$  个评价对象到正、负理想解的欧氏距离  $D_i^+$  和  $D_i^-$  [25]:

$$U^+ = \max u_{ij} \quad (23)$$

$$U^- = \min u_{ij} \quad (24)$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^+ - u_{ij})^2} \quad (25)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^- - u_{ij})^2} \quad (26)$$

3) 计算灰色关联度。计算第  $i$  个评价对象与正理想解和负理想解关于第  $j$  个指标的灰色关联系数  $g_{ij}^+$ 、 $g_{ij}^-$ , 进一步可得到灰色关联度  $G_i^+$ 、 $G_i^-$  [26]:

$$g_{ij}^+ = \frac{\min_j |u_j^+ - u_{ij}| + \zeta \max_j |u_j^+ - u_{ij}|}{|u_j^+ - u_{ij}| + \zeta \max_j |u_j^+ - u_{ij}|} \quad (27)$$

$$g_{ij}^- = \frac{\min_j |u_j^- - u_{ij}| + \zeta \max_j |u_j^- - u_{ij}|}{|u_j^- - u_{ij}| + \zeta \max_j |u_j^- - u_{ij}|} \quad (28)$$

$$G_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_{ij}^+ \quad (29)$$

$$G_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_{ij}^- \quad (30)$$

式中:  $\zeta \in (0, 1)$  为分辨系数, 一般取 0.5。

4) 无量纲化处理。将  $D_i^+$ 、 $D_i^-$  和  $G_i^+$ 、 $G_i^-$  进行无量纲化处理, 依次得到  $d_i^+$ 、 $d_i^-$ 、 $\xi_i^+$ 、 $\xi_i^-$ :

$$d_i^+ = \frac{D_i^+}{\max D_i^+} \quad (31)$$

$$d_i^- = \frac{D_i^-}{\max D_i^-} \quad (32)$$

$$\xi_i^+ = \frac{G_i^+}{\max G_i^+} \quad (33)$$

$$\xi_i^- = \frac{G_i^-}{\max G_i^-} \quad (34)$$

5) 计算相对贴近度。将欧式距离和灰色关联度进行综合计算, 最后得到第  $i$  个评价对象与理想解的相对贴近度  $\delta_i$ :

$$\gamma_i^+ = \alpha d_i^- + \beta \xi_i^+ \quad (35)$$

$$\gamma_i^- = \alpha d_i^+ + \beta \xi_i^- \quad (36)$$

$$\delta_i = \frac{\gamma_i^+}{\gamma_i^+ + \gamma_i^-} \quad (37)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  是偏好度,  $\alpha + \beta = 1$ ,  $\alpha, \beta \in (0, 1)$ , 默认取值各为 0.5;  $\gamma_i^+$  和  $\gamma_i^-$  分别反映了与理想方案的

接近程度和远离程度。

### 3 实证结果与分析

#### 3.1 参数设置及对比场景构建

文章根据优化调度模型和 3E 综合评价模型进行算例分析, 所需的参数如表 2 所示。交割日的时间跨度为 24 h。碳市场交易价格来自上海环境能源交易所, 取 2023 年 10 月 10 日最高成交价格 80 CNY/t。每小时的电力清算价格数据来源于北京市燃气发电实际交易数据。历史每小时风能和电力负荷情况来源于某电厂实际发电数据。风能预测误差由风能预测值与实际数据生成的预测误差百分比相乘得到。此外,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和烟尘排放量根据《环境保护实用数据手册》[27] 换算。此外, 所有后续仿真通过 Matlab R2022b 和 Excel 软件实现。

表 2 含 P2G 的碳捕集电厂参数

Tab. 2 Carbon capture plant parameters containing P2G

参数	值	参数	值
$V_{\max}^{\text{CH}_4}$	300 m <sup>3</sup>	$\pi_{\text{WT}}$	733 CNY / MW·h
$P_{\min}^{\text{P2G}}$	0 MW	$\beta_{\text{GT}}$	0.392 t·CO <sub>2</sub> / MW·h
$P_{\max}^{\text{P2G}}$	200 MW	$\mu_{\text{CCD}}$	0.43 MWh / t·CO <sub>2</sub>
$P_{\text{GT}, \max}$	300 MW	$\eta_{\text{CCD}}$	0.9
$P_{\text{GT}, \min}$	100 MW	$\eta_{\text{P2G}}$	0.7
$v_{\text{GT}}$	100 MW	$\eta_{\text{in}}^{\text{GS}}$	1
$\eta_{\text{GT}}$	0.45	$\eta_{\text{out}}^{\text{GS}}$	1
LHV	9.7 kW·h / m <sup>3</sup>	$\pi_{\text{CH}_4}$	2.5 CNY / m <sup>3</sup>
$V_0^{\text{GS}}$	100 m <sup>3</sup>	$\pi_{\text{CCD}}$	343 CNY / t
$V_{\max}^{\text{GS}}$	400 m <sup>3</sup>	$\pi_{\text{S}}$	177 CNY / t
$V_{\min}^{\text{GS}}$	50 m <sup>3</sup>	$\pi_{\text{CO}_2}$	500 CNY / t
$V_{\text{in}, \max}^{\text{GS}}$	100 m <sup>3</sup>	$\beta_{\text{CEA}}$	0.7
$V_{\text{out}, \max}^{\text{GS}}$	100 m <sup>3</sup>	—	—

文章设置 3 种场景进行对比分析。场景 1: 考虑电-碳市场交易的含 P2G 的碳捕集电厂, 即 P2G-CCPP 系统。场景 2: 考虑电-碳市场交易的 WT-GP-PCC 系统(即从场景 1 中去除 P2G)。场景 3: 考虑电-碳市场交易的风电与燃气联合发电系统(即从场景 1 中去除 CCUS 和 P2G)。其中, 场景 1 是文章提出的场景, 场景 2、场景 3 为对比场景, 用于分析不同设备组合下的 3E 综合效益。

需要说明的是, 相较于 CCUS-P2G, CCS-P2G 的联合运行中仅减少了碳利用环节, 运行成本、碳捕集量等情况都相同, 但额外增加了碳封存成本和电转气阶段的碳源成本, 显然耦合效果会更差, 因此没有设置 CCS-P2G 联合运行的对比场景。

### 3.2 指标加权结果分析

文章根据 Critic 法和 Grey-DEMATEL 法分别得到主客观权重,优化求解后得到组合权重如下:

$$\omega_j = [0.111\ 2, 0.079\ 7, 0.059\ 7, 0.081\ 5, 0.070\ 9, 0.049\ 4, 0.049\ 1, 0.049\ 1, 0.049\ 1, 0.089\ 5, 0.049\ 2, 0.127\ 0, 0.065\ 2, 0.069\ 6]$$

图 4 显示了各赋权方法下指标权重的比较结果。由一级指标的比较结果可知:1) 三种赋权方法下,C1 的权重均最大,C2 的权重均最小。说明在 3E 综合评价中,经济因素会显著影响整体评价结果,环境因素则对评价结果的影响较小;2) CRITIC 法下,C1、C2、C3 的权重相差较大,Grey-DEMATEL 法下,三者的权重更为接近。

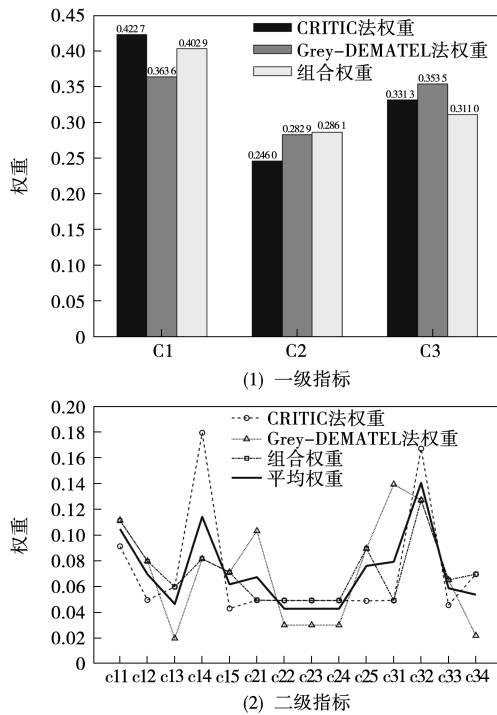


图 4 各赋权方法下指标权重比较结果

Fig. 4 Comparison result of indicator weights under each weighting method

其次,由二级指标的比较结果可知:1) CRITIC 法下各指标权重的差异较大,Grey-DEMATEL 法和组合赋权法下各指标的权重分配更为平均;2) 三种赋权方法下,C32 能耗强度和 C11 企业利润率均排在前三名,说明 C32 和 C11 是系统 3E 综合效益的重要体现;3) 三种赋权方法下,C22、C23 和 C24 基本都排在后三名,说明在 3E 综合效益评价中,C22、C23 和 C24 的影响力较弱。

综上所述,同一指标的主客观加权结果存在显

著差异,因此文章通过组合赋权方法分配权重更加科学合理,提高了评价模型的可靠性。此外,指标体系中权重较大的是能耗强度和企业利润率,符合当前节能减碳、能源转型的管控环境,也符合企业追求经济效益的目标。

### 3.3 3E 评价结果分析

文章通过 GRA-TOPSIS 法对各场景进行 3E 综合评价,结果如表 3 所示。

表 3 GRA-TOPSIS 法下各场景 3E 评价结果

Tab. 3 3E evaluation results of each scenario under the GRA-TOPSIS method

	场景 1		场景 2		场景 3	
	$\delta_i$	排序	$\delta_i$	排序	$\delta_i$	排序
3E	0.587 8	1	0.486 0	2	0.410 8	3
经济	0.586 9	1	0.552 0	2	0.406 1	3
环境	0.817 0	1	0.183 0	3	0.242 7	2
能源	0.510 9	2	0.601 6	1	0.488 9	3

可以看出:场景 1 的相对贴近度最高,说明其 3E 表现最好;场景 3 的相对贴近度最低,说明其 3E 表现最差。

结合图 5,分维度分析 3 个场景,可以得出:

1) 经济维度下,场景 1 表现最好,场景 3 表现最差。场景 1 加入 CCUS 和 P2G 设备,系统运行成本增加,故在利润率和度电成本指标上表现普通,但场景 1 通过“电-碳-气”转化实现了资源的高效循环利用,因此在其他三个指标上表现最佳。场景 2 由于 P2G 设备孤立运行,CO<sub>2</sub> 购买成本较高,并且从表 4 可看出,场景 2 中 P2G 的设备利用率较场景 1 更低,制天然气量也更少,并未有效地降低燃料成本,此外碳排放权成本也较高,因此经济效益略低于场景 1。场景 3 未加入 CCUS 和 P2G 技术,大部分指标均表现最差,故经济效益最低。综上,场景 1 加入 CCUS 和 P2G 技术虽然提高了系统的运行成本,但能实现减排效益、绿电效益与发电效益的有效衔接,故经济效益最佳。

2) 环境维度下,场景 1 的表现最好,相对贴近度远高于场景 2 和场景 3,场景 2 的表现最差。从环境指标来看,场景 1 的五个指标均表现最佳,说明利用 CCUS 技术能显著提升系统的环境效益。场景 2 的五个指标均表现最差,特别是权重最高的碳强度,明显高于其他两个场景,主要是 P2G 运行增加了系统能耗,燃气机组等量碳排放下输出的电量

减少,较大地影响了系统的环境效益。场景 3 也未加入 CCUS 技术,故各环境指标表现较差,总体环境效益也较差。综上,场景 1 通过 CCUS 技术能大幅降低 CO<sub>2</sub> 等污染物的排放量,显著提高系统的环境效益,弥补 P2G 设备孤立运行时环境效益差的缺陷。

3) 能源维度下,场景 2 的表现最好,场景 3 的表现最差。场景 1 由于系统运行能耗较大,故在权重最大的能耗强度指标上表现最差,能耗强度值远高于场景 2,说明碳捕集设备是系统能耗增加的主要原因。在权重较大的弃风率和绿电占比指标上,场景 1 表现最好,场景 2 次之,并且场景 1 的负荷方差(表 4)远低于场景 2 和场景 3,说明相较于 P2G

设备的孤立运行,CCUS-P2G 的联合运行能更有效地拓宽风电的消纳空间,提升系统的绿电占比。综上,场景 2 通过 P2G 技术实现了能源的高效利用,具有最佳的能源效益,场景 1 中碳捕集设备显著增加了系统能耗,故带来的能源效益低于场景 2,但促进了绿电的消纳和天然气的循环使用,效益仍高于场景 3。

综上所述,场景 1 通过 CCUS-P2G 的联合运行能实现化石能源的大规模低碳利用和电力负荷的灵活调度,能实现内部资源更有效、灵活的利用并优化能源结构,故相比其他场景具有更高的 3E 综合效益。CCUS 技术虽然会带来较高的运行成本,但其实现的综合效益足以弥补此不足。

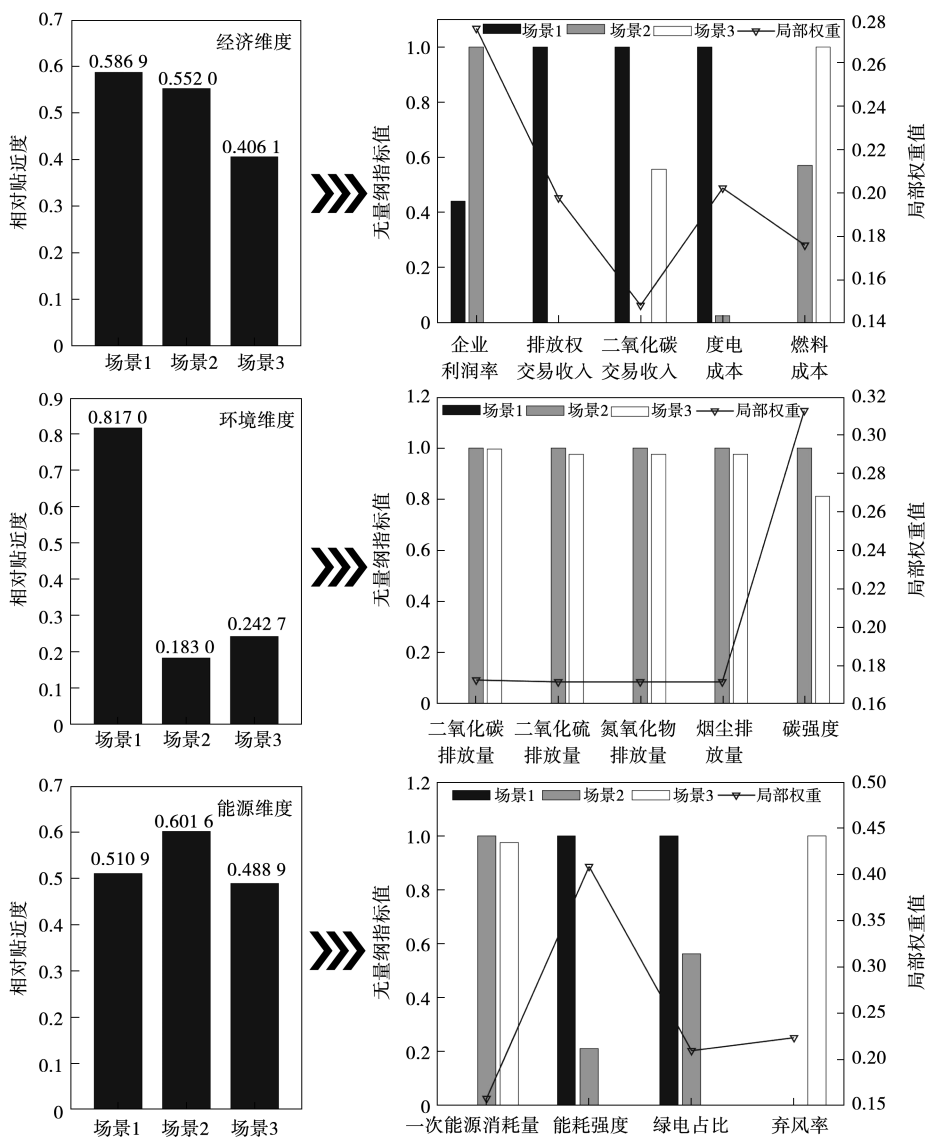


图 5 各赋权方法下指标权重比较结果

Fig. 5 Comparison result of indicator weights under each weighting method

表 4 P2G 优化调度结果  
Tab. 4 P2G optimized scheduling results

指标	场景 1	场景 2	场景 3
制天然气量/m <sup>3</sup>	459 878.22	249 402.06	—
P2G 设备利用率/%	36.88	20.00	—
负荷方差	1.14	11.49	12.99

### 3.4 排序有效性检验

为保证评价结果的科学性和有效性,文章建立了 3 个对比模型对评价结果进行比较,如表 5 所示。由于样本量小,单独使用 CRITIC 法的结果具有很大的随机性,不具备参考意义,故未考虑此方法。

表 5 排序有效性检验模型  
Tab. 5 Sorting validity test model

模型	模型描述
模型 1	基于 Grey-DEMATEL 法赋权的 GRA-TOPSIS 分析
模型 2	基于 CRITIC-Grey-DEMATEL 法组合赋权的 TOPSIS 分析
模型 3	基于 Grey-DEMATEL 法赋权的 TOPSIS 分析

3E 评价结果如表 6 所示。3 个对比模型的结果和文章模型的结果高度一致,在改变赋权方法和评价方法后,总体排名都未发生变化,表明相较于 WT-GFPP 系统和 WT-GPPCC 系统,含 P2G 的碳捕集电厂具有更佳的 3E 综合效益。模型 1、模型 2 和模型 3 在能源维度上的排序不尽相同,文章模型和对比模型在经济维度上的排序也略有差异,说明不同的加权方法和评价方法会影响子系统的排序结果,但不影响总体的 3E 评价结果,即文章的 3E 综合评价模型具有良好的鲁棒性。

表 6 对比模型下各场景 3E 评价结果  
Tab. 6 3E evaluation results of each scenario under the comparison model

		场景 1		场景 2		场景 3	
		$\delta_i$	排序	$\delta_i$	排序	$\delta_i$	排序
3E 评价	模型 1	0.596 4	1	0.454 8	2	0.401 3	3
	模型 2	0.382 6	1	0.342 3	2	0.275 0	3
	模型 3	0.424 2	1	0.311 8	2	0.264 0	3
经济	模型 1	0.569 6	2	0.583 3	1	0.407 1	3
	模型 2	0.377 9	2	0.379 9	1	0.242 2	3
	模型 3	0.361 2	2	0.405 7	1	0.233 2	3
环境	模型 1	0.794 1	1	0.205 9	3	0.257 2	2
	模型 2	0.890 4	1	0.000 0	3	0.109 6	2
	模型 3	0.900 5	1	0.000 0	3	0.099 5	2
能源	模型 1	0.551 9	1	0.457 9	2	0.444 2	3
	模型 2	0.274 1	3	0.400 6	1	0.325 3	2
	模型 3	0.383 5	1	0.299 3	3	0.317 3	2

## 4 结 论

文章探究了电-碳市场下含 P2G 的碳捕集电厂的经济、环境和能源综合效益,通过三个场景的对比分析,得到了以下结论:

1) P2G 技术通过电-气转化能降低系统燃料成本,但孤立运行时设备利用率较低,还会减少系统的环境效益;

2) CCUS 技术能有效地减少碳排放,实现碳利用,其与 P2G 联合运行时,能有效提高碳循环利用率和 P2G 的设备利用率,并扩大风电的消纳空间,带来的综合效益足以弥补其较高的运行成本;

3) 算例结果表明,在电-碳市场环境,含 P2G 的碳捕集电厂相较于 WT-GPPCC 系统和 WT-GFPP 系统具有更好的 3E 综合效益,并且文章的 3E 综合评价模型具有较好的适用性。

在所述 3E 综合评价模型中,评价指标均为定量指标,未来还可以进一步加入定性指标,通过对定性指标进行赋值、量化和评估,进一步完善研究结果。文中仅探究了风电机组的接入情况,未来还可以进一步考虑接入光伏等其他可再生能源的情景。此外,文章并不适用于评估只有一个备选方案的情形,在此情况下,通常采用模糊综合评价等方法。

## 参 考 文 献

- [1] 崔勇, 韩一春, 郑谦, 等. 多能联盟低碳运营决策方法研究框架与展望[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 10-19.  
CUI Yong, HAN Yichun, ZHENG Qian, et al. Research framework and prospect of multi-energy alliance low-carbon operation decision-making method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 10-19.
- [2] 贾俊国, 陈晓楠, 房鑫炎, 等. 基于多源融合的船岸供电系统协调运行优化策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 108-114.  
JIA Junguo, CHEN Xiaonan, FANG Xinyan, et al. Research on coordinated operation optimization of ship-shore power supply system based on multi-source fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 108-114.
- [3] 寇洋, 武家辉, 江欢, 等. 计及碳捕集和旋转备用配置的低碳优化运行[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 102-111.  
KOU Yang, WU Jiahui, JIANG Huan, et al. Low carbon optimized operation considering carbon capture and spinning reserve capacity[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 102-111.
- [4] ZHANG X, BAI Y, ZHANG Y. Collaborative optimization

- for a multi-energy system considering carbon capture system and power to gas technology[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 49: 101765.
- [5] 张安安, 周奇, 李茜, 等. “双碳”目标下火电厂CO<sub>2</sub>计量技术研究现状与展望[J]. *发电技术*, 2024, 45(1): 51-61.  
ZHANG Anan, ZHOU Qi, LI Qian, et al. Research status and prospect of CO<sub>2</sub> accounting technology in thermal power plants under the goal of dual carbon[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(1): 51-61.
- [6] 朱群波, 郝思鹏. 基于运行成本的园区综合能源系统优化调度[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(2): 34-40.  
ZHUN Qunbo, HAO Sipeng. Collaborative optimal dispatching of integrated energy system in industrial park[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(2): 34-40.
- [7] WEISHANG G, YIHUA M, XUEXING Z, et al. Internal benefit optimization model of gas-thermal power virtual power plant under China's carbon neutral target[J]. *Energy Science & Engineering*, 2022, 10(4): 1227-1239.
- [8] 吕金玲, 王小君, 窦嘉铭, 等. 考虑运行状态信息的综合能源系统图强化学学习优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(2): 1-14.  
LV Jinling, WANG Xiaojun, DOU Jiaming, et al. Optimal dispatch of an integrated energy system based on graph reinforcement learning considering operation state information[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(2): 1-14.
- [9] 徐慧慧, 田云飞, 赵宇洋, 等. 考虑绿证-碳交易的多虚拟电厂混合博弈优化调度[J]. *智慧电力*, 2024, 52(3): 1-7, 16.  
XU Huihui, TIAN Yunfei, ZHAO Yuyang, et al. Optimal scheduling of multiple virtual power plants mixed game considering green certificate and carbon trading[J]. *Smart Power*, 2024, 52(3): 1-7, 16.
- [10] 吕振宇, 丁磊, 吴在军, 等. 考虑电-氢-热多能互补的微网多目标优化配置[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 11-20.  
LV Zhenyu, DING Lei, WU Zaijun, et al. Multi-objective optimization configuration of microgrid considering electricity-hydrogen-heat multi-energy complementation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 11-20.
- [11] ZHANG Z, DU J, LI M, et al. Bi-Level Optimization dispatch of integrated-energy systems with P2G and carbon capture[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 9: 784703.
- [12] 张叶青, 陈文彬, 徐律军, 等. 面向多虚拟电厂的分层分区多层互补动态聚合调控策略[J]. *发电技术*, 2024, 45(1): 162-169.  
ZHANG Yeqing, CHEN Wenbin, XU Jianjun, et al. Multi-virtual power plant-oriented dynamic aggregation control strategy based on hierarchical partition and multi-layer complementation[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(1): 162-169.
- [13] WANG J, MAO J, HAO R, et al. Multi-energy coupling analysis and optimal scheduling of regional integrated energy system[J]. *Energy*, 2022, 254: 124482.
- [14] 王若谷, 常小强, 高欣, 等. 并网型风光氢储微电网容量优化配置研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2024, 45(2): 151-159.  
WANG Ruogu, CHANG Xiaoqiang, GAO Xin, et al. Research on capacity optimization configuration of grid-connected wind/pv/hydrogen/storage micro grid[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2024, 45(2): 151-159.
- [15] 张佳辉, 张洪福, 牛玉广, 等. 考虑新能源出力不确定性的风-光-柴-储系统调度策略[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(3): 20-25.  
ZHANG Jiahui, ZHANG Hongfu, NIU Yuguang, et al. Dispatching strategy of wind-solar-diesel-battery hybrid power generation considering renewable energy output uncertainty[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(3): 20-25.
- [16] 高建伟, 黄宁泊, 高芳杰, 等. 基于改进信息间隙决策理论的考虑决策者风险态度的社区虚拟电厂经济-能源-环境调度策略选择[J]. *电力建设*, 2024, 45(3): 39-57.  
GAO Jianwei, HUANG Ningbo, GAO Fangjie, et al. Selection of economics-energy-environment scheduling strategy for a community virtual power plant considering decision-makers' risk attitudes based on improved information gap decision theory[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(3): 39-57.
- [17] 冯天天, 李晏, 孙晓琪, 等. 大数据驱动下电-碳市场耦合及协同发展研究综述[J]. *智慧电力*, 2024, 52(1): 55-64.  
FENG Tiantian, LI Yan, SUN Xiaoqi, et al. Review on electricity-carbon market coupling and synergistic development driven by big data[J]. *Smart Power*, 2024, 52(1): 55-64.
- [18] 陈典, 杨楠, 孙晓强, 等. 基于改进聚类算法的电力系统运行方式识别方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2024, 45(2): 91-99.  
CHEN Dian, YANG Nan, SUN Xiaoqiang, et al. Identification method of power system operation mode based on improved clustering algorithm[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2024, 45(2): 91-99.
- [19] 岑增光, 耿斌, 高明海, 等. 考虑天然气混氢的园区综合能源系统电制氢优化配置[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 55-64.  
CEN Zengguang, GENG Bin, GAO Minghai, et al. Opti-

- mal configuration of P2H in the park integrated energy system considering natural gas mixed with hydrogen[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 55-64.
- [20] 林顺富, 张琪, 沈运帷, 等. 面向灵活爬坡服务的高比例新能源电力系统可调节资源优化调度模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(2): 90-100.
- LIN Shunfu, ZHANG Qi, SHEN Yunwei, et al. Optimal dispatch model of adjustable resources in a power system with high proportion of renewable energy for flexible ramping product[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(2): 90-100.
- [21] 程韧俐, 李江南, 周保荣, 等. 含碳捕集-电转气的风光火储一体化系统优化运行[J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-21 [2024-04-24]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.270>.
- CHENG Renli, LI Jiangnan, ZHOU Baorong, et al. Operation optimization for integrated system of wind- PV- thermal-storage with CC-P2G[J/OL]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*: 1-21 [2024-04-24]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.270>.
- [22] 闫书天, 张江传, 焦爱全. 基于 CRITIC-TOPSIS 法的河北省地级市工业科研能力研究[J]. *中国集体经济*, 2023(36): 35-38.
- YAN Shutian, ZHANG Jiangchuan, JIAO Aiquan. Research on industrial scientific research capacity of prefecture-level cities in Hebei Province based on CRITIC-TOPSIS method[J]. *China Collective Economy*, 2023(36): 35-38.
- [23] ZHAO H, LI B, LU H, et al. Economy-environment-energy performance evaluation of CCHP microgrid system: A hybrid multi-criteria decision-making method[J]. *Energy*, 2022, 240: 122830.
- [24] 郭莉, 董军, 陈正鹏, 等. 基于熵权-TOPSIS-灰色关联法的能源大数据增值服务商业模式评价研究[J]. *科技管理研究*, 2022, 42(4): 73-80.
- GUO Li, DONG Jun, CHEN Zhengpeng, et al. Research on the evaluation of value-added energy big data service business models based on entropy weight-TOPSIS-grey Correlation approach[J]. *Science and Technology Management Research*, 2022, 42(4): 73-80.
- [25] 张泽亚, 安佳坤, 周兴华, 等. 基于 AHP 和 TOPSIS 法的电采暖综合效益评价方法研究[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(8): 92-96, 104.
- ZHANG Zeya, AN Jiakun, ZHOU Xinghua, et al. Research on comprehensive benefit evaluation of electric heating based on AHP and TOPSIS method[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(8): 92-96, 104.
- [26] 李欣, 许谱名, 崔建华, 等. 基于灰色模型的局部放电智能感知终端评估方法研究[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(7): 28-33.
- LI Xin, XU Puming, CUI Jianhua, et al. Research on evaluation method of PD intelligent sensing terminal based on grey model[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 28-33.
- [27] 胡名操. 环境保护实用数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- Hu Mingcao. *Practical data book on environmental protection* [M]. Beijing: China Machine Press, 1990.
- 
- 收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2024-04-20
- 作者简介:
- 李彦斌(1967—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力企业管理和能源管理。  
E-mail: liyb@ncepu.edu.cn
- 余熠薇(1999—),女,硕士研究生,研究方向为电力企业化管理。E-mail: yuyiwei991@163.com
- 张峰(1994—),男,博士,讲师,研究方向为能源管理。  
E-mail: ncepuzf@ncepu.edu.cn
- 李赟(1991—),女,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为能源战略及政策。  
E-mail: 55002462@ncepu.edu.cn
- (编辑 杜景飞)