

引用格式:刘稼瑾,冯华,丁宁,等.电碳协同的园区分布式资源集群综合效益评估方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):181-191.

Citation: LIU Jiajin, FENG Hua, DING Ning, et al. Comprehensive benefit evaluation method for park with distributed resource clusters by electrical and carbon synergy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 181-191.

# 电碳协同的园区分布式资源集群综合效益评估方法

刘稼瑾<sup>1</sup>, 冯华<sup>2</sup>, 丁宁<sup>3</sup>, 叶吉超<sup>2</sup>, 张程翔<sup>3</sup>, 许银亮<sup>1</sup>

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518000; 2. 国网浙江省电力有限公司丽水供电公司, 浙江 丽水 323000;

3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 基于电碳协同的园区各资源集群效益评估是实现园区综合效益评估的关键。首先, 从经济效益、环境效益和技术效益 3 个方面对影响园区中各集群效益的关键因素展开分析, 并构建包含目标层、基础层以及指标层的影响综合效益评估的综合指标体系以及效益评估的计算模型。相关的经济、环境和技术类专家为各个指标打分并利用模糊层次分析法确定指标体系中各指标的重要程度和权重; 其次, 通过投资评价模型确定各集群的指标效益评分; 最后, 通过各项指标的得分与其对应的权重系数加权计算可得出各个项目的综合效益总分。算例的仿真分析表明: 该评估方法对于电碳协同的园区分布式资源集群的综合效益评估具有现实指导意义。通过该评价体系, 园区的投资者可以选择在财务盈利能力、低碳可持续发展能力及技术可行性这 3 个方面提供最佳平衡的可再生能源技术。

**关键词:** 分布式资源集群; 指标体系; 效益评估; 模糊层次分析法

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.019 **中图分类号:** TM73 **文章编号:** 1673-9140(2024)05-0181-11

## Comprehensive benefit evaluation method for park with distributed resource clusters by electrical and carbon synergy

LIU Jiajin<sup>1</sup>, FENG Hua<sup>2</sup>, DING Ning<sup>3</sup>, YE Jichao<sup>2</sup>, ZHANG Chengxiang<sup>3</sup>, XU Yinliang<sup>1</sup>

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518000, China; 2. Lishui Power Supply Company,

State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Lishui 323000, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid

Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Assessing the clustered benefits of various resources in parks based on electrical and carbon synergy is crucial for achieving comprehensive benefit evaluation of the parks. Firstly, key factors influencing the benefits of each cluster within the park are analyzed from three aspects: economic, environmental, and technical benefits. A comprehensive index system and a calculation model for evaluating the overall benefits are constructed, encompassing the target level, foundation level, and indicator level. Relevant economic, environmental, and technical experts score each indicator, and the fuzzy analytic hierarchy process is used to determine the importance and weights of each indicator in the index system. Secondly, an investment evaluation model is employed to determine the benefit scores for each cluster's indicators. Finally, the overall benefit scores for each project are calculated by weighting the scores of each indicator with their corresponding weight coefficients. The simulation analysis of the case study demonstrates that this evaluation method has practical significance for the comprehensive benefit evaluation of distributed resource clusters in parks with electrical and carbon synergy. Through this evaluation system, park investors can select renewable energy technologies that provide the best balance in terms of financial profitability, low-carbon sustainable development capabilities, and

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-10-01

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5100-202219501A-3-0-SF)

通信作者: 许银亮(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统优化运行等方面的研究; E-mail: xu.yinliang@sz.tsinghua.edu.cn

technical feasibility.

**Key words:** distributed resource cluster; indicator system; benefit evaluation; fuzzy analytic hierarchy process

随着经济的持续快速发展,世界各国对各类能源的需求日益增加。目前,中国的能源供应仍以化石能源为主。其中,占比最高的煤炭主要用于发电。由于煤电已经是中国碳排放的最大来源,减少碳排放量的关键在于通过合理调整能源结构,减少煤炭发电的碳排放量。当前,中国以石油和煤炭为主的能源供应结构正逐渐向加大可再生能源占比的方向改革。与传统的集中式能源相比较,分布式能源具有开发潜力大、生产方式灵活、清洁高效、污染少等发展特点。在电碳市场背景下对分布式资源集群参与的配电网综合效益展开综合评估有助于明确配电网的成本及收益要素,为投资者提供投资潜力分析及投资决策的科学指导。

在“双碳”背景下,园区及配电网的高质量转型主要集中在低碳化、经济化与技术化等多个方面。文献[1-2]考虑了促进新能源消纳的基于信息间隙决策理论的经济调度模型,降低了系统运行成本。文献[3-4]设计了一种综合考量能源成本和可再生能源协同消纳的多目标优化调度模型。文献[5]建立了一种在低成本模式与低碳模式下的园区综合能源系统日前优化模型。文献[6-7]构建了综合需求响应与设备增建的园区综合能源系统经济性优化模型,充分考虑了居民用户参与综合需求响应,有效地提升了园区经济性。文献[8]则是在经济效益分析的基础上,综合考虑了实时环境约束来限定碳排放约束。

目前,中国电碳市场背景下分布式能源的发展处于探索时期,与发达国家相比,中国的投资市场机制不够成熟。分布式能源项目的投资决策及其效益是影响其发展的关键因素之一。因此,探索投资效益评价与优化模式对促进分布式能源市场化发展具有重要的现实意义。基于经济性指标的经济效益评估是对配电网的综合效益进行分析的基础,经济性评价主要是通过对动态经济评估指标进行分析和计算。文献[9]考虑了配电网的多种成本和收益模型,并分别就各种动态经济指标展开了计算和分析。文献[10]构建了以电网公司为主体的配电网收益模型,并基于收益模型和经济指标计算了电网公司的实际收益。文献[11]基于对配电网的显性投资和隐形投资,对其成本及收益要素展开了分析,并就其经济效益展开了评价。文献[12]基

于配电网全寿命周期的成本与收益要素进行了分析,对配电网的多主体成本与收益进行了评价。文献[13]设计了含分布式电源、网架及变电站等经济主体的经济性与可靠性的主动配电网规划。文献[14]对风、光储微网内经济性影响因素的关键程度进行了量化分析,并建立了经济运行评价指标。文献[15]综合考虑配电网在新一轮投资后的投资效益,构建了配电网投资效益层次化综合评价指标体系。文献[16]基于分布式电源这一重要发电方式对配电网的影响,综合分析了配电网投资与经济效益的关联性问题。然而,电碳市场协同下园区分布式资源集群效益受多方面因素共同影响,单一的经济性评价难以满足园区的综合评估需求,因此,亟待构建完善的指标体系并就指标体系展开综合效益分析。文献[17]基于评分法和优选法对影响配电网的指标体系进行了构建和评价。文献[18]提出一种基于可靠性和经济性的配电网项目投资评价模型。文献[19]通过云物元模型对指标的不确定性进行了定义和分析。文献[20]利用模糊层次分析法建立综合指标体系,并确定了各指标的影响权重。文献[21]针对配电网构建了多维度、多主体效益评价体系,并利用改进层次分析法对各指标权重进行了计算。文献[22]建立了兼顾低碳性和经济性的低碳运行模糊综合评价模型。文献[23]综合考虑电能供应能力、用户满意度、平台安全性等方面,建立了多维度绩效评价指标体系,并分析了分布式电能交易绩效评价的关键因素。

然而,当前大多研究主体建立在配电网和微电网的基础上,主要针对整体的综合能源系统评价指标进行研究,缺乏对不同类型分布式能源投资评估指标的深入调查。且部分研究对电碳因子等低碳效益指标的挖掘力度不够。针对这些问题,本文从经济效益、环境效益和技术效益三个角度出发,采用层次分析法对不同类型的分布式资源的投资效益指标进行了定量分析,得出综合效益得分。构建了电碳市场下园区分布式资源集群综合效益评估的指标体系,如图1所示。通过该体系,园区的投资者可以全面了解与投资项目相关的财务盈利能力、低碳可持续化发展能力与技术可行性,并从中选择最佳方案。

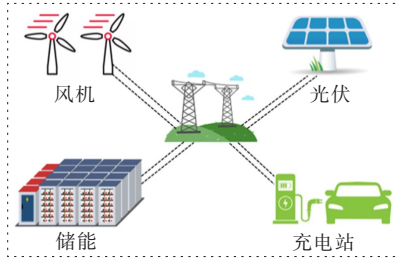


图1 分布式资源集群园区架构

Figure 1 Park architecture of distributed resource cluster

## 1 投资效益评估指标体系

在规划投资园区时,需要综合考虑经济、环境和社会的可持续发展目标,实现最大的综合效益。园区的投资效益可分为社会、经济及技术效益3类。园区的投资可以带来社会低碳效益,如通过新建可再生能源设备来降低碳排放与减少环境污染。园区的投资可增加经济效益。如通过经济性效益指标来选择最合适的投资方案,促进企业利润的提高和当地经济的增长。此外,园区的投资还可带来技术效益,促进创新和技术进步。基于此,本文通过构建包含指标层、基础层与目标层的三层指标体系框架,结合定性与定量指标,构建了电碳市场协同下分布式资源集群参与的园区投资效益评估指标体系,见表1。

表1 园区分布式资源集群综合效益评估指标体系

Table 1 Comprehensive benefit evaluation indicator system for park with distributed resource clusters

一级指标 (目标层)	二级指标 (基础层)	三级指标 (指标层)
项目效益 B	经济指标 B <sub>1</sub>	投资成本 B <sub>11</sub>
		年投入成本 B <sub>12</sub>
		年运营收益 B <sub>13</sub>
		净现值 B <sub>14</sub>
		投资回收期 B <sub>15</sub>
	环境指标 B <sub>2</sub>	电碳因子 B <sub>21</sub>
		低碳效益指数 B <sub>22</sub>
		空气污染物年平均浓度减少值 B <sub>23</sub>
	技术指标 B <sub>3</sub>	安全性 B <sub>31</sub>
		稳定性 B <sub>32</sub>
		紧迫性 B <sub>33</sub>
		先进性 B <sub>34</sub>

### 1.1 经济效益评估指标

#### 1.1.1 分布式发电集群成本及收益模型

##### 1) 分布式发电集群成本模型。

本文从初始投资期、建设期、运营期与退出运

营4个阶段入手,对分布式发电集群的全寿命周期成本进行建模,该模型为

$$C_{IDG} = \begin{cases} C_{DG}^{se}, & y = 1 \\ 0, & 1 < y \leq y_{DG0} \\ C_{DG}^{fn} + C_{DG}^{om}, & y_{DG0} < y < y_{DG0} + N_{DG} \\ C_{DG}^{fn} + C_{DG}^{om} - C_{DG}^{re}, & y = y_{DG0} + N_{DG} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $y$ 为建设或运营年度; $C_{IDG}$ 为分布式发电单元的年支出; $C_{DG}^{se}$ 为分布式发电集群的初始自筹资金; $C_{DG}^{fn}$ 为分布式发电集群的年财务成本; $C_{DG}^{om}$ 为分布式发电集群的年运营成本; $C_{DG}^{re}$ 为分布式发电集群的回收价值; $N_{DG}$ 为分布式发电单元的寿命周期; $y_{DG0}$ 为分布式发电单元的建设年限。其定义分别如下:

$$C_{DG}^{se} = (1 - i_{DG}) c_{DG} P_{DG}, y = 1 \quad (2)$$

式中, $i_{DG}$ 为贷款比例; $c_{DG}$ 为分布式发电单元的单位容量装机成本; $P_{DG}$ 为装机容量。

$$C_{DG}^{fn} = \frac{12i_{DG}P_{DG}\frac{i_1\epsilon_1}{12}\left(1 + \frac{i_1\epsilon_1}{12}\right)^{12y_{DGa}}}{\left(1 + \frac{i_1\epsilon_1}{12}\right)^{12y_{DG0}} - 1}, y_{DG0} < y \leq y_{DG0} + y_{DGa} \quad (3)$$

式中, $y_{DGa}$ 为分布式发电单元的还款年限; $i_1$ 为分布式发电单元的年利率; $\epsilon_1$ 为贷款优惠比例。

$$C_{DG}^{om} = r_{DG,om} c_{DG} P_{DG}, y_{DG0} < y \leq y_{DG0} + N_{DG} \quad (4)$$

式中, $r_{DG,om}$ 为年运营率,是年运营成本占总投资成本的比例。

$$C_{DG}^{re} = \gamma_{DG} c_{DG} P_{DG}, y = y_{DG0} + N_{DG} \quad (5)$$

式中, $\gamma_{DG}$ 为回收价值系数。

##### 2) 分布式发电集群收益模型。

分布式发电集群每年的直接收益  $B_{IDG}$  来自于向电力用户售电的总收益,即

$$B_{IDG} = \begin{cases} 0, & 1 < y \leq y_{DG0} \\ \sum_{t=1}^I [(\varphi_{DG} \rho_{s,t} - \rho_d) k E_{DG,t}], & y_{DG0} < y \leq y_{DG0} + N_{DG} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\varphi_{DG}$ 为电价折扣; $\rho_d$ 为分布式市场化交易过网费; $k$ 为供给园区的电量比例; $\rho_{s,t}$ 为分布式发电设备在  $t$  时间的电价; $E_{DG}$  为分布式发电单元的总发电量; $I$  为总时段数。

园区企业的收益  $B_{GIDG}$  来自于基于结算价格折扣优惠的电网分成部分,即

$$B_{\text{GDG}} = \begin{cases} 0, & 1 < y \leq y_{\text{DG0}} \\ \sum_{t=1}^I [\alpha_1 (1 - \varphi_{\text{DG}}) \rho_{\text{s},t} k E_{\text{DG},t}], & y_{\text{DG0}} < y \leq y_{\text{DG0}} + N_{\text{DG}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\alpha_1$  为园区企业与电力用户对分布式发电集群电价折扣部分的分成比例。

电力用户的收益  $B_{\text{UDG}}$  包含基于电价折扣优惠的分成部分和电碳协同市场中分布式发电集群所带来的上级电网电价节省的收益, 即

$$B_{\text{UDG}} = \begin{cases} 0, & 1 < y \leq y_{\text{DG0}} \\ \sum_{t=1}^I \left[ \left( \frac{1 - \varphi_{\text{DG}}}{2} \rho_{\text{s},t} + \rho_{\text{G}} \right) k E_{\text{DG},t} \right], & y_{\text{DG0}} < y \leq y_{\text{DG0}} + N_{\text{DG}} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\rho_{\text{G}}$  为上级电网的输配电价。

### 1.1.1.2 储能集群经济效益评估指标

#### 1) 储能集群成本模型。

从初始投资期、建设期、运营期与退出运营这4个阶段对储能装置的全寿命周期成本进行建模, 即

$$C_{\text{IES}} = \begin{cases} C_{\text{ES}}^{\text{se}}, & y = 1 \\ 0, & 1 < y \leq y_{\text{ES0}} \\ C_{\text{ES}}^{\text{fn}} + C_{\text{ES}}^{\text{om}}, & y_{\text{ES0}} < y < y_{\text{ES0}} + N_{\text{ES}} \\ C_{\text{ES}}^{\text{fn}} + C_{\text{ES}}^{\text{om}} - C_{\text{ES}}^{\text{re}}, & y = y_{\text{ES0}} + N_{\text{ES}} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $C_{\text{IES}}$  为储能装置的年支出;  $C_{\text{ES}}^{\text{se}}$  为储能装置的初始自筹资金;  $C_{\text{ES}}^{\text{fn}}$  为储能装置的年财务成本;  $C_{\text{ES}}^{\text{om}}$  为储能装置的年运营成本;  $C_{\text{ES}}^{\text{re}}$  为储能装置的回收价值。其分别定义如下:

$$C_{\text{ES}}^{\text{se}} = (1 - i_{\text{ES}}) c_{\text{ES}}^{\text{ivs}} \quad (10)$$

式中,  $i_{\text{ES}}$  为储能装置的贷款比例;  $c_{\text{ES}}^{\text{ivs}}$  为储能装置的建设成本。

$$C_{\text{ES}}^{\text{fn}} = \frac{12 i_{\text{ES}} C_{\text{ES}}^{\text{ivs}} \frac{i_2 \varepsilon_2}{12} \left( 1 + \frac{i_2 \varepsilon_2}{12} \right)^{12 y_{\text{ESa}}}}{\left( 1 + \frac{i_2 \varepsilon_2}{12} \right)^{12 y_{\text{ESa}}} - 1}, \quad y_{\text{ES0}} < y \leq y_{\text{ES0}} + y_{\text{ESa}} \quad (11)$$

式中,  $i_2$  为储能的年贷款利率;  $\varepsilon_2$  为储能的贷款优惠比例;  $y_{\text{ES0}}$  为储能装置的建设年限;  $y_{\text{ESa}}$  为储能装置的还款年限。

$$C_{\text{ES}}^{\text{om}} = r_{\text{ES,om}} P_{\text{ES}}, \quad y_{\text{ES0}} < y \leq y_{\text{ES0}} + N_{\text{ES}} \quad (12)$$

式中,  $r_{\text{ES,om}}$  为单位功率运营成本;  $P_{\text{ES}}$  为储能装置的装机功率;  $N_{\text{ES}}$  为储能装置的寿命周期。

$$C_{\text{ES}}^{\text{re}} = \gamma_{\text{ES}} c_{\text{ES}} P_{\text{ES}}, \quad y = y_{\text{ES0}} + N_{\text{ES}} \quad (13)$$

式中,  $c_{\text{ES}}$  为储能装置的单位成本;  $P_{\text{ES}}$  为储能装置的装机功率;  $\gamma_{\text{ES}}$  为储能装置的回收价值系数。

#### 2) 储能集群收益模型。

储能装置的作用在于其可在电价较低时购电, 在电价较高时放电, 其收益即来自节省电量的购电费用, 即

$$B_{\text{ES}} = \sum_{t=1}^I \left( \rho_{\text{f},t} \eta_{\text{dis}} P_{\text{d},t} - \frac{\rho_{\text{p},t} + \rho_{\text{g},t}}{\eta_{\text{ch}}} P_{\text{c},t} \right) \tau, \quad y_{\text{ES0}} < y < y_{\text{ES0}} + N_{\text{ES}} \quad (14)$$

式中,  $B_{\text{ES}}$  为储能集群的收益;  $P_{\text{d},t}$  为  $t$  时段储能放电功率;  $P_{\text{c},t}$  为  $t$  时段储能充电功率;  $\eta_{\text{dis}}$  为储能的放电效率;  $\rho_{\text{p},t}$  为  $t$  时段储能放电功率;  $\rho_{\text{g}}$  为  $t$  时段储能充电功率;  $\eta_{\text{ch}}$  为储能的充电效率;  $\tau$  为时段时长;  $\rho_{\text{f},t}$ 、 $\rho_{\text{p},t}$ 、 $\rho_{\text{g},t}$  分别为峰时、平时、谷时的电价;  $I$  为总时段数。

### 1.1.1.3 电动汽车充电经济效益评估指标

#### 1) 电动汽车充电站成本模型。

从初始投资期、建设期、运营期与退出运营这4个阶段对充电站的全寿命周期成本进行建模, 即:

$$C_{\text{ICS}} = \begin{cases} C_{\text{CS}}^{\text{se}}, & y = 1 \\ 0, & 1 < y \leq y_{\text{CS0}} \\ C_{\text{CS}}^{\text{fn}} + C_{\text{CS}}^{\text{om}}, & y_{\text{CS0}} < y < y_{\text{CS0}} + N_{\text{CS}} \\ C_{\text{CS}}^{\text{fn}} + C_{\text{CS}}^{\text{om}} - C_{\text{CS}}^{\text{re}}, & y = y_{\text{CS0}} + N_{\text{CS}} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $C_{\text{ICS}}$  为充电站的年支出;  $C_{\text{CS}}^{\text{se}}$  为充电站的初始自筹资金;  $C_{\text{CS}}^{\text{fn}}$  为充电站的年财务成本;  $C_{\text{CS}}^{\text{om}}$  为充电站的年运营成本;  $C_{\text{CS}}^{\text{re}}$  为充电站的回收价值。其分别定义如下:

$$C_{\text{CS}}^{\text{se}} = (1 - i_{\text{CS}}) c_{\text{CS}}^{\text{ivs}} \quad (16)$$

式中,  $i_{\text{CS}}$  为充电站的贷款比例;  $c_{\text{CS}}^{\text{ivs}}$  为充电站的建设成本。

$$C_{\text{CS}}^{\text{fn}} = \frac{12 i_{\text{CS}} C_{\text{CS}}^{\text{ivs}} \frac{i_3 \varepsilon_3}{12} \left( 1 + \frac{i_3 \varepsilon_3}{12} \right)^{12 y_{\text{CSa}}}}{\left( 1 + \frac{i_3 \varepsilon_3}{12} \right)^{12 y_{\text{CSa}}} - 1}, \quad y_{\text{CS0}} < y \leq y_{\text{CS0}} + y_{\text{CSa}} \quad (17)$$

式中,  $i_3$  为年贷款利率;  $\varepsilon_3$  为充电站的贷款优惠比例;  $y_{\text{CS0}}$  为充电站的建设年限;  $y_{\text{CSa}}$  为充电站的还款年限。

$$C_{\text{CS}}^{\text{om}} = r_{\text{CS,om}} P_{\text{CS}}, \quad y_{\text{CS0}} < y \leq y_{\text{CS0}} + N_{\text{CS}} \quad (18)$$

式中,  $r_{\text{CS,om}}$  为单位功率运营成本;  $P_{\text{CS}}$  为充电站的装机功率;  $N_{\text{CS}}$  为充电站的寿命周期。

$$C_{\text{CS}}^{\text{re}} = \gamma_{\text{CS}} c_{\text{CS}} P_{\text{CS}}, \quad y = y_{\text{CS0}} + N_{\text{CS}} \quad (19)$$



式中,  $C_{CS}$  为电动汽车的单位成本;  $\gamma_{CS}$  为回收价值系数。

## 2) 电动汽车充电收益模型。

充电站的收益主要来自于充电站的服务费,即

$$B_{CS} = \sum_{t=1}^T (\rho_{CS,t} P_{CS,t}) y_{CS0} < y \leq y_{CS0} + N_{CS} \quad (20)$$

式中,  $B_{CS}$  为充电站的收益;  $P_{CS,t}$  为  $t$  时段充电站出售的电功率;  $\rho_{CS}$  为充电服务价格。

### 1.1.4 经济指标

基于各分布式资源集群的成本与收益模型,选取初始投资成本、年投入成本、年运营收益、净现值、投资回收期、内部收益率等6个指标<sup>[24]</sup>作为电碳市场背景下园区分布式资源集群经济效益评估的依据。其中,净现值代表基于折现率的各年净收益现值之和,投资回收期表示总净收益与初始投资相抵时的年限,内部收益率表示资金流入、流出现值总和相等时的折现率取值。

## 1.2 环境效益评估指标

### 1.2.1 电碳因子

电碳因子是评估传统能源的碳排放水平和不同电力系统环境效益的重要指标。采用电碳因子  $\kappa_{CO_2}$  表征电碳市场协同背景下传统能源出力的占比,其定义如下:

$$\kappa_{CO_2} = \frac{m_{CO_2} p_{CG}}{p_{total}} \quad (21)$$

式中,  $m_{CO_2}$  为传统能源出力的单位碳排放量;  $p_{CG}$  为化石能源发电量;  $p_{total}$  为所有发电机组的总发电量。电碳因子数值越高,相同总发电量下的碳排放量越大,环境效益越差。

### 1.2.2 低碳效益指数

#### 1) 可再生能源发电集群的低碳效益指数。

作为评估电力系统的低碳化水平和环境友好性的重要指标,可再生能源的低碳效益指数表示风机和光伏发电在总发电量中的比例。利用低碳效益指数这一指标,可以量化传统能源和可再生能源的碳排放差异,评估电力系统的碳减排潜力和环境影响。这一指标可以为园区决策者提供科学依据,促进可持续能源的应用和推广。风机、光伏的低碳效益指数  $\chi_{RES}$  的计算式为

$$\chi_{RES} = \frac{E_{RES} \phi_{CO_2}}{C_{RES}^{se} + C_{RES}^{in} + C_{RES}^{om}} \quad (22)$$

式中,  $E_{RES}$  为可再生能源的年度发电总量;  $C_{RES}^{in}$  为新能源装置的年财务成本;  $C_{RES}^{se}$  为新能源装置的初始自筹资金;  $C_{RES}^{om}$  为新能源装置的年运营成本;  $\phi_{CO_2}$  为单位新能源发电量的碳减排质量。

#### 2) 储能装置的低碳效益指数。

储能装置的低碳效益指数  $\chi_{ES}$  为

$$\chi_{ES} = \frac{E_{ES} \phi_{CO_2}}{C_{ES}^{se} + C_{ES}^{in} + C_{ES}^{om}} \quad (23)$$

式中,  $E_{ES}$  为储能装置的年度总能量;  $C_{ES}^{se}$  为储能装置的初始自筹资金;  $C_{ES}^{in}$  为储能装置的年财务成本;  $C_{ES}^{om}$  为储能装置的年运营成本。

#### 3) 电动汽车充电低碳效益指数。

电动汽车充电的低碳效益指驾驶电动汽车相较于驾驶燃油车所引起的二氧化碳减排量。忽略电动汽车种类差异所引起的二氧化碳排放强度差异,其低碳效益指数  $\chi_{CS}$  为

$$\chi_{CS} = \frac{E_{CS} \left( \frac{\beta}{\alpha} - \phi_{CO_2} \right)}{C_{CS}^{se} + C_{CS}^{in} + C_{CS}^{om}} \quad (24)$$

式中,  $\beta$  为燃油汽车行驶时的每千米碳排放量;  $\alpha$  为电动汽车行驶时的每千米耗电量。

### 1.2.3 空气污染物浓度减少值

通过光伏和风能等可再生能源与储能等技术,社会可以减少对化石燃料的依赖,减少空气污染物的排放,改善空气质量。空气污染物浓度主要包含,可吸入颗粒物与细颗粒物、氮氧化物( $NO_x$ )及二氧化硫( $SO_2$ )等,该指标可从项目所在地的区域空气质量报告获取。

## 1.3 技术效益评估指标

技术效益指标主要从安全性、稳定性、紧迫性、先进性4个方面进行设置。通过专家打分法等方法对技术性效益指标进行量化,更综合地对电碳市场协同下的园区分布式资源集群效益进行评估。

## 2 投资效益模型构建

### 2.1 投资效益分析指标权重确定

针对初步确立的3层指标体系,向分布式资源集群相关的经济、环境、技术类专家发放调查问卷,对各个指标进行打分,利用模糊层次分析法将定量指标和定性指标的重要程度进行比较,并以此为基础计算各指标对于目标层的权重。其步骤如下。

1) 由各类专家分别对同一层的各项指标对上一层元素的重要程度进行比较判断,综合判断结果采用模糊判断矩阵表示。其中,矩阵中三角模糊数的取值可依据1-9标度法确定,其定义如下:

$$\begin{cases} a_{ij} = [l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}] \\ a_{ji} = a_{ij}^{-1} = \left[ \frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}} \right] \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $u$  和  $l$  分别为三角模糊数的上界和下界。

$T$  位专家的综合判断结果为

$$a'_{ij} = [l'_{ij}, m'_{ij}, u'_{ij}], i, j = 1, 2, \dots, n, t = 1, 2, \dots, T$$

为避免逻辑错误的出现,需对判断矩阵进行一致性检验。定义一致性检验指标  $I_{CI}$  如下:

$$I_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (26)$$

式中,  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值;  $n$  为样本数。

接着根据矩阵阶数查找一致性指标  $I_{RI}$ 。1~14 阶矩阵的一致性指标见表 2。

表 2 矩阵的一致性指标

Table 2 Consistency index of matrix

矩阵阶数	$I_{RI}$	矩阵阶数	$I_{RI}$
1	0.00	8	1.41
2	0.00	9	1.46
3	0.52	10	1.49
4	0.89	11	1.52
5	1.12	12	1.54
6	1.26	13	1.56
7	1.36	14	1.58

最后计算判断矩阵的一致性比例  $I_{CR}$ :

$$I_{CR} = \frac{I_{CI}}{I_{RI}} \quad (27)$$

当  $I_{CR} < 0.1$  时,判断矩阵通过一致性检验;反之,当  $I_{CR} \geq 0.1$  时,则对矩阵元素重新打分修正。

2) 根据模糊判断矩阵,计算第  $i$  个指标的模糊综合重要程度。

$$S_i = \left( \sum_{j=1}^n \oplus a_{ij} \right) \otimes \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \oplus a_{ij} \right)^{-1} = \left( \frac{\sum_{j=1}^n l_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right) \quad (28)$$

式中,  $a_{ij}$  是模糊矩阵中的一个元素,表示指标  $i$  相对于指标  $j$  的重要性。每个  $a_{ij}$  由一个三角模糊数构成。其中,  $\oplus$  和  $\otimes$  的定义为

$$\begin{cases} (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \\ (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) \approx (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \end{cases} \quad (29)$$

3) 根据模糊判断矩阵,计算第  $i$  个指标比其他指标重要的可能性程度  $d'(A_i)$ , 即

$$d'(A_i) = \min_{j=1, 2, \dots, n, j \neq i} V(S_i \geq S_j), i = 1, 2, \dots, n \quad (30)$$

其中,  $V(S_i \geq S_j)$  为模糊数  $S_i \geq S_j$  的可能性程度,此

处模糊数  $M_1 \geq M_2$  的可能性程度  $V(M_1 \geq M_2)$  定义如下:

$$V(M_1 \geq M_2) = \begin{cases} 1, & m_1 \geq m_2 \\ \frac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, & m_1 < m_2, l_2 \leq u_1 \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (31)$$

由此,可得该层各指标对上层元素的权重计算结果,即

$$W = [d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n)]^T \quad (32)$$

## 2.2 投资效益评价

对电碳市场协同下园区分布式资源集群综合效益指标体系进行评价,具体步骤如下。

1) 一致化处理。

采用极大值指标对指标体系中的正向、负向与区间型指标进行一致化处理,其中对区间型指标的处理如下所示:

$$x^* = \begin{cases} 1 - \frac{q_1 - x}{\max(q_1 - m, M - q_2)}, & x \leq q_1 \\ 1, & q_1 < x < q_2 \\ 1 - \frac{x - q_2}{\max(q_1 - m, M - q_2)}, & x \geq q_2 \end{cases} \quad (33)$$

式中,  $x$  为指标的原始值;  $x^*$  为处理后的标准化值,用于在不同指标间进行比较;  $q_1, q_2$  均为指标的阈值;  $m$  与  $M$  分别为指标的最小与最大值。

2) 无量纲化处理。

为解决指标的单位及数量级差异问题,采用极值法对指标进行无量纲化处理,即

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{M_j - m_j} \quad (34)$$

式中,  $x_{ij}$  为原始的指标数据,表示第  $i$  个对象在第  $j$  个指标上的取值;  $x'_{ij}$  为归一化后的无量纲值,用于消除不同指标间的单位与数量级差异,  $M_j = \max\{x_{ij}\}$ ,  $m_j = \min\{x_{ij}\}$ 。

3) 确定隶属度函数类型。

采用二次函数  $y = ax^2 + bx + c$  作为电碳市场协同下园区分布式资源集群综合效益指标体系的评分函数。其中,  $y$  表示指标评分结果。

4) 百分制评分处理及综合评价结果计算。

根据各指标的最大值、标准值、最小值确定二次函数的系数,并对该指标进行打分。基于各指标的权重和评价,加权计算,可得园区中该分布式资源集群的综合评估结果。

将该方法应用到园区分布式资源的综合效益评估中,具体流程如图 2 所示。

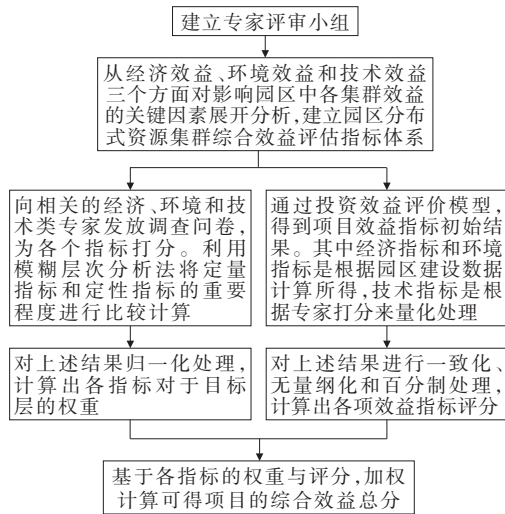


图 2 综合效益评估流程

Figure 2 Flowchart of comprehensive benefit evaluation

### 3 算例分析

#### 3.1 各项投资指标权重计算结果分析

对电碳市场协同下考虑园区分布式资源集群综合效益评价体系中各指标的重要程度展开逐一比较,并结合多位专家的共同意见,分别构建指标层—基础层、基础层—目标层的模糊判断矩阵。计算各指标同其他指标相比较的模糊综合重要程度和重要可能性程度,通过归一化可得各指标的权重,结果见表 3。

表 3 指标体系权重

Table 3 Weight calculation results of indicator system

二级指标 (基础层)	权重	三级指标 (指标层)	权重	最终权重
经济指标 B <sub>1</sub>	0.396 4	投资成本 B <sub>11</sub>	0.209 7	0.083 1
		年投入成本 B <sub>12</sub>	0.217 5	0.086 2
		年运营收益 B <sub>13</sub>	0.113 5	0.045 0
		净现值 B <sub>14</sub>	0.162 5	0.064 4
		投资回收期 B <sub>15</sub>	0.130 2	0.051 6
环境指标 B <sub>2</sub>	0.214 8	电碳因子 B <sub>21</sub>	0.166 6	0.066 1
		低碳效益指数 B <sub>22</sub>	0.377 8	0.081 2
		空气污染物年平均浓度减少值 B <sub>23</sub>	0.312 1	0.067 0
技术指标 B <sub>3</sub>	0.388 8	安全性 B <sub>31</sub>	0.310 0	0.066 6
		稳定性 B <sub>32</sub>	0.283 4	0.110 2
		紧迫性 B <sub>33</sub>	0.288 1	0.112 0
		先进性 B <sub>34</sub>	0.216 8	0.084 3

由表 3 可知,在二级指标中,负责对各指标的重要程度进行判定的专家团对影响效益评价的 3 个方面的重视程度较为均衡。其中,经济指标权重最大。因此,考虑园区分布式资源集群的投资应充分对其经济性效益展开综合评估,进一步推动园区分布式资源建设。

在三级指标中,电碳因子和低碳效益指数这 2 个指标权重较大,说明随着当前中国节能减排工作的大力推进,基于碳排放量的环境效益评估对园区的综合效益也尤其重要。因此,考虑提高可再生能源与储能的比例以降低电碳因子,提高园区清洁低碳化效益,加强低碳园区的绿色运行。

#### 3.2 投资效益评估结果分析

##### 3.2.1 园区场景设置

本文以中国某园区为案例,对电碳市场协同背景下园区分布式资源集群的综合效益进行评估。在该园区各集群初始成本中,自有资本金占项目总投资的 20%,其余资金可申请银行贷款,贷款比例为 80%,项目年财务成本为总投资的 4.9%。此外,各集群年运营率为 4%,残值率为 5%。

分布式发电集群项目计算期为 26 a。其中,建设周期为 1 a,运营期 25 a。光伏发电单位容量装机成本为 4.5 元/W,总装机容量为 60 MW。风机发电单位容量装机成本为 5.6 元/W,总装机容量为 2 MW。可再生能源发电电价折扣为 95%,配电公司与电力用户的分成比例为 50%。此外光伏年发电量为 68 400 MW·h,光伏上网电价为 0.502 0 元/(kW·h);风机年发电量为 3 700 MW·h,风电项目上网电价为 0.528 0 元/(kW·h);市场化交易过网费为 0.040 0 元/(kW·h),上级电网输配电电价为 0.032 8 元/(kW·h)。储能集群计算期为 11 a,其中建设周期为 1 a,运营期 10 a。储能项目单位容量装机成本为 3.200 0 元/(W·h),总装机容量为 30 MW·h。储能集群充放电效率取 95.00%,放电深度取 90%。峰时段电价设置为 0.947 7 元/(kW·h),平时段电价设置为 0.622 6 元/(kW·h),谷时段电价设置为 0.325 1 元/(kW·h)。单日日考虑两充与(平谷时段)两放(峰时段)。电动汽车计算期为 11 a,其中建设周期为 1 a,运营期 10 a。充电站项目单位容量装机成本为 3.500 0 元/(W·h),总充电功率为 600 kW·h。充电站的充电服务价格为 0.500 0 元/(kW·h),平均单日有效工作时间为 4 h,有效工作天数为 330 d。燃油汽车行驶时的碳排放量为 1.16 kg/km;电动汽车行驶时的耗电量为 1.11 (kW·h)/km。此外,空气污染

物浓度减少值可从项目所在地的区域空气质量报告获取。该指标的取值参考文献[25]。

风机、光伏、储能及电动汽车4个不同类型的分布式资源集群对应的空气污染物年平均减少值分别为0.30、0.25、0.28、0.10 mg/m<sup>3</sup>。

### 3.2.2 分布式资源运行结果分析

基于园区各分布式资源集群的基础建设数据,计算可得基于折现率的逐年净现值如图3所示。从图3中可看出,在前10 a的时间里,随着项目产生收入并开始收回初始资本支出,净现值(net present

value, NPV)会增加。随着项目开始运营并产生回报,此期间的现金流量可能会超过初始投资,从而产生正的净现值。在10~25 a,风电和光伏项目的NPV随之下降。其原因在于随着设备老化及效率下降,会产生更高的运维成本,最终使得NPV下降。

项目的效益指标计算初始结果见表4。在表4中,经济评估指标和环境评估指标根据园区各分布式资源集群的基础建设数据计算所得,技术评估指标根据专家打分法进行量化。

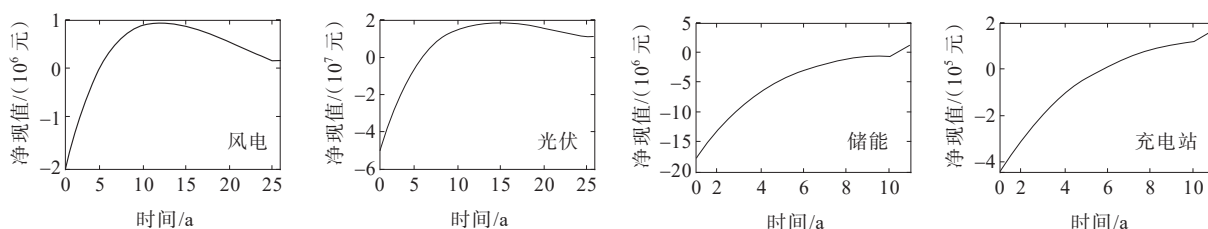


图3 园区分布式资源集群逐年净现值

Figure 3 Annual net present value of park with distributed resource clusters

表4 项目效益指标计算结果

Table 4 Calculation results of project benefit indicators

项目分类	投资成本/万元	年投入成本/万元	年运营收益/万元	净现值/万元	投资回收期/a	内部收益率/%	电碳因子	低碳效益指数	污染物减少值	安全性分值	稳定性分值	紧迫性分值	先进性分值
风电	224	111	192	15	5	18	0.87	0.88	0.30	91	89	90	88
光伏	5 400	1 728	3 367	1 114	7	16	0.82	0.77	0.25	86	90	89	88
储能	1 920	950	1 477	125	11	10	0.85	0.68	0.28	88	86	86	86
电动车	48	24	40	17	6	18	0.87	0.27	0.10	87	87	87	87

### 3.2.3 投资效益评价模型运行结果分析

首先通过投资效益评价模型,将项目的效益指标计算初始结果进行一致化、无量纲化及百分制处理,得到各项效益指标评分,各项指标的效益评价得分的计算结果如图4所示。在图4中,各项指标的得分与其对应的权重系数相乘,可得出项目的综

合效益总分。

从图4中可看出,在风电项目中,投资回收期和内部收益率这两个经济指标得分最高。其原因在于,投资回收期可以通过量化投资资本的回报率来洞察风电项目的效率和盈利能力。当内部收益率超过预期时,风电项目被认为在财务上可行。这两个

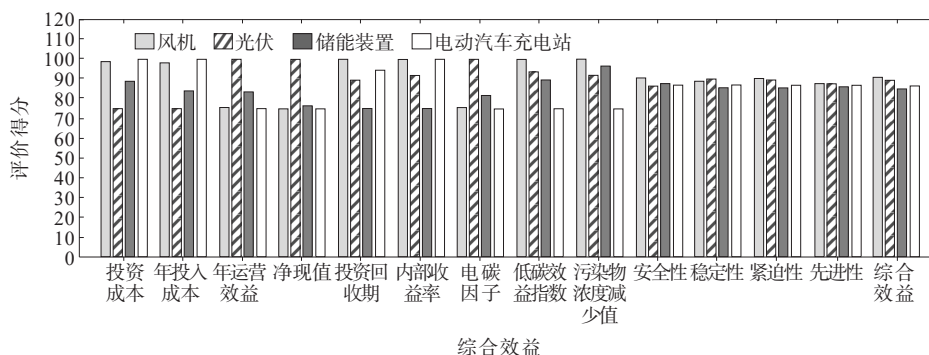


图4 园区分布式资源集群综合效益评价结果

Figure 4 Comprehensive benefit evaluation results of park with distributed resource clusters



指标都表明了项目的潜在经济效益。低碳效益指数和污染物减少值这两个环境指标评分最高。它们衡量了项目减少碳排放的程度,有助于减缓气候变化。

在光伏项目中,年度营业收入和净现值评分较高,因为它们代表了项目的财务绩效和盈利能力。

此外,光伏的电力碳因子这一指标为满分。该指标认可了在不产生大量碳排放的情况下产生清洁、可再生能源的环境效益。

在储能项目中,低碳效益指数和污染物减排值的得分较高,其原因在于通过储存可再生能源或在非高峰期产生的多余能量,并在需求高时释放,储能有助于优化能源使用以及减轻对环境的影响。安全指标得分较高反映了对将与储能部署相关的风险降至最低的承诺。安全考虑包括电池技术的适当管理、风险评估、消防安全以及遵守相关行业标准。

在电动汽车项目中,电动汽车项目的投资成本得分通常很高,因为它代表了建立必要的基础设施、充电站和车辆制造或采购所需的初始财务支出。而内部收益率评分高表明预期的投资回报率。其反映了项目的财务可行性和潜在盈利能力。

### 3.2.4 综合效益得分分析

从图4中还可看出,在综合效益得分中,在对电碳市场协同下园区分布式资源集群的综合效益展开评估时,各分布式资源集群的综合效益评价结果较为均衡。其中,风电和光伏的综合投资效益较高,电动汽车项目次之,储能项目得分最少。

分析其原因在于:在经济指标中,投资成本权重因子较大;在环境指标中,电碳因子权重较大;在技术指标中,安全性和稳定性的指标权重较大。而在这4类投资项目中,风机和光伏的投资相对较少,碳排放为零且相对较为安全,得分最高。储能项目虽然在环境指标上得分超过电动汽车项目的,但是储能投资较大且其安全性低于其他项目的,因此储能项目得分最低。综上所述,园区内不同的分布式资源集群所产生的不同综合效益得分源于对经济、环境和技术3个方面的权衡。

### 3.3 与实际情况对比分析

根据国际能源署发布的最新年度《世界能源投资报告》中数据显示,全球范围的可再生能源、电网和储能目前占电力行业总投资的80%以上<sup>[26]</sup>。其中,光伏发电和风电项目占比超过总投资的一半,储能项目投资创下紧随其后创下新高。这与本文

计算的综合投资效益得分结果一致。

在“双碳”目标下,中国新能源相关产业发展势头迅猛,有望成为未来经济发展的支柱。根据国内投资机构发布的数据显示,2023年1~6月中国新能源行业内投资资金主要流向风电光伏,金额约为2.5万亿人民币,占比约为46.9%;锂电池投资总金额1.2万亿人民币,占比约为22.6%;储能投资总额9500亿元人民币,占比约为18.1%<sup>[27]</sup>。这与本文所计算的各项综合效益得分排名结果一致。

这些都说明本文所提的方法与实际情况相符。本文通过基于模糊层次分析法的权重确定和基于指标一致化处理的指标评分,能够避免建设规模等不一致因素所带来的投资差异,从而建立完整的评价指标体系。通过该体系,园区的投资者可以全面了解与投资项目相关的财务盈利能力、低碳可持续发展能力及技术可行性3个方面,并且选择在这3个能力上提供最佳平衡的可再生能源技术。

## 4 结语

电碳市场协同下园区分布式集群综合效益评估对园区的投资规划具有重要意义,综合分析各影响因素并建立完善的指标体系是进行效益评估的关键。本文分析了影响分布式集资源集群经济效益、环境效益和技术效益的指标,利用模糊层次分析法对各指标的权重进行了计算,基于各资源集群的实际状态数据确定了其综合评估效益。本文所提方法克服了建设规模等因素带来的不一致性,能够全面了解与园区投资项目相关的财务盈利能力、低碳可持续发展能力和技术可行性。案例研究论证了该评价方法在协调电碳市场框架下评估园区分布式资源集群综合效益的现实意义。

### 参考文献:

- [1] 朱志芳,许苑,岑海凤,等.考虑需求侧响应的园区综合能源系统优化配置[J].智慧电力,2022,50(1):37-44.  
ZHU Zhifang, XU Yuan, CEN Haifeng, et al. Optimal configuration of park-level integrated energy system considering demand response[J]. Smart Power, 2022, 50(1):37-44.
- [2] 潘华,姚正,黄玲玲,等.考虑分布式电源及需求响应不确定性的园区综合能源系统经济调度[J].电力科学与技术学报,2022,37(2):94-105.  
PAN Hua, YAO Zheng, HUANG Lingling, et al. Economic dispatch of park integrated energy system considering the uncertainty of distribution generation and demand

- response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(2):94-105.
- [3] 张程,罗玉锦,陈昌亮.考虑源荷不确定的多园区微网与共享储能电站协同优化运行[J].电力系统保护与控制,2023,51(24):77-89.  
ZHANG Cheng, LUO Yujin, CHEN Changliang. Collaborative optimization operation of multi park microgrids and shared energy storage power stations considering source load uncertainty[J]. Power System Protection and Control,2023,51(24):77-89.
- [4] 胡伟,杨梓俊,王瑾然,等.园区综合能源系统日前多目标优化调度[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):13-20.  
HU Wei, YANG Zijun, WANG Jinran, et al. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system in the industry park[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(1):13-20.
- [5] 邱迪,刘东,高飞,等.基于离散混合自动机的园区综合能源系统多模式建模与日前优化[J].中国电机工程学报,2023,43(1):135-147.  
QIU Di, LIU Dong, GAO Fei, et al. Multi-scenario modeling and day-ahead optimization of park multiple energy system based on discrete hybrid automaton[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(1):135-147.
- [6] 刘雪飞,赵海彭,胡珀,等.考虑综合需求响应的园区综合能源系统经济性优化方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):3-16.  
LIU Xuefei, ZHAO Haipeng, HU Po, et al. Economic optimization method of comprehensive energy system in industrial park considering comprehensive demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):3-16.
- [7] 王仕炬,刘天琪,何川,等.基于舒适度的需求响应与碳交易的园区综合能源经济调度[J].电测与仪表,2022,59(11):1-7.  
WANG Shiju, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Comfort demand response and carbon trading based comprehensive energy economic dispatching in industrial parks[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(11):1-7.
- [8] 顾海飞,喻洁,李扬,等.环境约束下含多能园区的新型城镇双层组合优化经济调度[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2441-2453.  
GU Haifei, YU Jie, LI Yang, et al. Bi-level joint optimization economic dispatch of new-type town with multi-energy parks under environmental constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(8):2441-2453.
- [9] 李振坤,任昱亮,王法顺,等.基于年时序仿真的增量配电网投资效益评估及敏感性分析[J].电网技术,2019,43(6):2163-2171.  
LI Zhenkun, REN Yuliang, WANG Fashun, et al. Investment benefit evaluation and sensitivity analysis of incremental distribution network based on annual time series simulation[J]. Power System Technology,2019,43(6):2163-2171.
- [10] 张寓涵,赵克壮.混合所有制模式下基于电力公司视角的配电网投资效益评估[J].电网与清洁能源,2018,34(2):43-52.  
ZHANG Yuhan, ZHAO Kezhuang. Investment benefit analysis of distribution networks based on power companies' perspective in mixed ownership model[J]. Power System and Clean Energy,2018,34(2):43-52.
- [11] 焦丰顺,张劲松,唐晟,等.智能配电网项目综合效益分析评价方法研究[J].南方能源建设,2017,4(1):134-137.  
JIAO Fengshun, ZHANG Jinsong, TANG Sheng, et al. Research on comprehensive benefits evaluation of smart distribution grid[J].Southern Energy Construction,2017,4(1):134-137.
- [12] 李蕊.基于不同商业运营模式的分布式电源/微电网综合效益评价方法[J].电网技术,2017,41(6):1748-1758.  
LI Rui. Comprehensive benefit evaluation method of distributed generation/microgrid projects based on different business models[J]. Power System Technology, 2017,41(6):1748-1758.
- [13] 李燕,胡志坚,仇梦林,等.基于不确定网络理论计及经济性与可靠性的主动配电网规划[J].电力系统自动化,2019,43(16):68-77.  
LI Yan, HU Zhijian, ZHANG Menglin, et al. Active distribution network planning considering economy and reliability based on uncertain network theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(16):68-77.
- [14] 王磊,田旭,傅旭,等.风光抽蓄互补系统合理容量效益研究[J].电网与清洁能源,2023,39(4):111-117.  
WANG Lei, TIAN Xu, FU Xu, et al. A study on the reasonable capacity benefit of the wind power-PhotovoltaicPumped hydro storage complementary system[J]. Power System and Clean Energy,2023,39(4): 111-117.
- [15] 李钰,刘巍,李鹏,等.计及投资效益评估的县级配电网投资分配方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):83-89.  
LI Meng,LIU Wei,LI Peng,et al.Method for allocation of county distribution network considering the investment benefit evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(6):83-89.
- [16] 孔祥玉,尧静涛,崔凯,等.考虑分布式电源接入的区域配电网规划投资决策方法[J].中国电力,2020,53(4):41-48.  
KONG Xiangyu,YAO Jingtao,CUI Kai,et al.Investment decision-making method for regional distribution network planning considering distributed generations[J]. Electric Power,2020,53(4):41-48.

- [17] 叶斌,王绪利,马静,等.新电改下考虑微网和多元负荷的配网效益评价研究[J].电力工程技术,2019,38(3):108-114.  
YE Bin,WANG Xuli,MA Jing,et al.Benefit evaluation of distribution network considering microgrid and multiple loads under new electricity reform[J].Electric Power Engineering Technology,2019,38(3):108-114.
- [18] 贺春光,檀晓林,周兴华,等.基于博弈论组合赋权的智能配电网项目投资效益评价[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):161-167.  
HE Chunguang, TAN Xiaolin, ZHOU Xinghua, et al. Investment benefit evaluation of intelligent distribution network project based on game theory combination weighting[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):161-167.  
LIANG Tangjie, XIE Qing, LIU Chunfang, et al. Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the life cycle cost theory and the cloud matter element theory[J]. Power System Protection and Control,2017,45(19):12-17.
- [19] 梁唐杰,谢庆,柳春芳,等.基于全寿命周期理论和云物元理论的配电网规划综合效益的评估[J].电力系统保护与控制,2017,45(19):12-17.  
LIANG Tangjie, XIE Qing, LIU Chunfang, et al. Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the life cycle cost theory and the cloud matter element theory[J]. Power System Protection and Control,2017,45(19):12-17.
- [20] 葛婷,陈艳波,汪颖翔.基于三角模糊多属性决策的配电网投资效益评价[J].电网与清洁能源,2018,34(10):12-20.  
GE Ting, CHEN Yanbo, WANG Yingxiang. Investment benefit evaluation of the distribution network based on triangular fuzzy multiple attribute decision making[J]. Power System and Clean Energy,2018,34(10):12-20.
- [21] 姚峰,张海燕.基于主客观权重的配电网规划效益评价[J].电网与清洁能源,2018,34(6):7-11+18.  
YAO Feng, ZHANG Haiyan. Benefit analysis of distribution network planning based on improved entropy-weighted[J]. Power System and Clean Energy, 2018,34(6):7-11+18.
- [22] 庞腊成,吉斌,徐帆,等.面向电-碳市场协同的负荷响应机制与效益分析初探[J].电力系统自动化,2022,46(22):62-71.  
PANG Lacheng, JI Bin, XU Fan, et al. Preliminary study on mechanism and benefit analysis of load response for electricity-carbon market collaboration[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(22):62-71.
- [23] 王文彬,郑蜀江,范瑞祥,等.“双碳”背景下微网分布式电能交易绩效评价指标与方法[J].上海交通大学学报,2022,56(3):312-324.  
WANG Wenbin, ZHENG Shujiang, FAN Ruixiang, et al. Performance evaluation index and method of micro-grid distributed electricity trading under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2022,56(3):312-324.
- [24] 宋小敏,杨青,万君康.项目投资经济效益评价原理与方法研究[J].中国管理科学,2002,10(1):45-48.  
SONG Xiaomin, YANG Qing, WAN Junkang. The principle and method of economic efficiency evaluation of project capital rationing[J]. Chinese Journal of Management Science,2002,10(1):45-48.
- [25] 舒梦迪.多能互补条件下分布式能源投资效益分析及优化研究[D].北京:华北电力大学,2020.  
SHU Mengdi. Analysis and optimization of investment benefit of distributed energy under the condition of multi-energy complementarity[D]. Beijing: North China Electric Power University,2020.
- [26] 周希唯,段沛一.国际能源署发布《2022年世界能源投资报告》[J].世界石油工业,2022,29(4):77.  
ZHOU Xiwei, DUAN Peiyi. The international energy agency released the world energy investment report 2022 [J]. World Petroleum Industry,2022,29(4):77.
- [27] 华商华电科技.2023年上半年中国新能源产业投资金额近5.2万亿(2023-8-3)[2023-9-2]http://www.cinno.com.cn/industry/news/newenergy230803.