

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230072

基于FAHP-改进CRITIC组合赋权的屋顶光伏接入配网评价方法

陈晨¹, 闫向阳¹, 齐桓若¹, 康祎龙¹, 何进², 米阳²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450000; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对屋顶光伏并网方式无序的问题, 构建包含稳定性、经济性和低碳性三个维度的评价指标体系, 并设计一种基于模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)和改进CRITIC法组合赋权评估模型。由于传统单一赋权法具有一定的偏向性, 为此利用FAHP对一级指标进行主观赋权来突显评价目的。同时考虑相关系数的正负以及数据的离散程度, 采用熵权法优化的CRITIC算法对二级指标进行客观赋权以增强权重的科学性, 进而通过组合赋权得到最终权重。最后以某地屋顶光伏为例设置两组仿真算例, 通过5种赋权法分别对指标进行赋权, 并采用逼近理想序列算法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)进行综合评分。经过对比分析说明了将碳交易和辅助服务收益纳入经济性指标的合理性, 以及所提指标体系与评价方法的有效性。

关键词: FAHP-改进CRITIC法; 组合赋权; 碳交易; 辅助服务; 逼近理想序列算法

An evaluation method of a roof photovoltaic access distribution network based on the weight of FAHP-improvement CRITIC combination

CHEN Chen¹, YAN Xiangyang¹, QI Huanruo¹, KANG Yilong¹, HE Jin², MI Yang²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;
2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: There is a problem of disordered grid-connection mode of roof photovoltaics. Thus an evaluation index system containing three dimensions of stability, economy and low carbon is constructed, and a weight evaluation model based on fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) and improvement CRITIC method is designed. Because of the bias of the traditional single weighting method, FAHP is used to give subjective weighting to the first level index to highlight the purpose of evaluation. At the same time, considering the positive and negative correlation coefficients and the discrete degree of data, the CRITIC algorithm optimized by the entropy weight method is adopted to objectively weigh the second-level indicators to enhance the scientific weight, and then the final weight is obtained through combination weight. Finally, two sets of simulation examples are set for a rooftop photovoltaic system. Five weighting methods are used to assign weights to the indicators, and the topsis algorithm is used to perform comprehensive scoring. After comparative analysis, the rationality of including the income from carbon trading and auxiliary services into the economic indicators is demonstrated. The effectiveness of the proposed index system and evaluation method is shown.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873159).

Key words: FAHP-improve CRITIC method; combinatorial weighting; carbon trading; ancillary services; TOPSIS

0 引言

对电力行业而言, 减少火电比例、大力发展以

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873159); 上海市自然科学基金项目资助(22ZR1425500)

光伏为主的可再生能源发电, 有助于减少碳排放和构建新型电力系统^[1]。因此, 研究屋顶光伏接入系统方案的评价体系对于指导高比例分布式屋顶光伏规划建设、促进碳中和目标的实现具有重要意义。

目前国内外学者对于光伏接入配电网方案评价的研究主要集中在指标体系与评价算法两方面^[2]。

在指标体系方面,文献[3]以经济性、能耗和环境作为一级指标,将投资费用、运行费用、能源消耗量、利用率以及污染物排放作为二级指标构建了评价体系。文献[4]从可靠性、电能质量、经济效益和社会效益几方面构建评价指标。文献[5]通过对故障情况进行建模,根据各时段系统出现故障所产生的危害程度不同,将各时段故障作为评估指标建立评价体系。文献[6]将风险作为评估对象,从政策、市场、技术、安全和管理5个方面探讨了发展过程中可能遇到的风险,并建立了相关风险评价指标体系。但随着电力市场的日趋完善,辅助服务有偿化和碳交易也是一笔可观的收益,上述研究在构建光伏系统并网评价指标体系时没有将二者纳入经济性指标中,同时对光伏等新能源的间歇性以及接入配网时带来的安全问题考虑较少。

在评价算法方面,文献[7]采用AHP法确定指标权重,将实际值与目标值的比值作为指标得分,然后对备选方案进行排序。指标权重主观性较强,缺乏客观性。文献[8]基于组合评价理论,首先通过层次分析法初步确定指标权重,随后利用熵权法对权重进行修正,最后通过模糊综合评价法进行评价分析。文献[9]对于单方案项目选取熵权法确定指标权重,将实际值与目标值的比值作为单方案指标得分;对多方案项目采用区间理论对备选方案进行排序。但以上研究没有考虑到各指标涉及多个利益主体,采用主观类赋权法有失客观性,而采用客观类赋权法往往忽略了评价目的。

基于以上指标体系和评价算法分析,本文针对屋顶光伏接入配网方案展开研究,考虑电力市场的发展将辅助服务和碳交易收益纳入经济性指标中,同时考虑到光伏受天气等环境因素影响具有间歇性,以及其接入配电网时会带来扰动等问题,从安全性、经济性和低碳性3个维度建立了评价指标体系。在评价方法方面,将主观与客观相结合,基于模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)与改进后的CRITIC法进行组合赋权,使得指标权重更加合理。然后利用逼近理想序列算法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)对屋顶光伏接入配网的设计方案进行综合评价。

1 屋顶光伏接入配网评价指标

评估屋顶光伏规划和建设的水平,不仅要看其满足社会、电力相关企业和客户需求的期望程度,而且还要看其是否符合电力市场的发展趋势。基于此,从安全性、经济性和低碳性3个维度建立了评价指标体系,如图1所示。

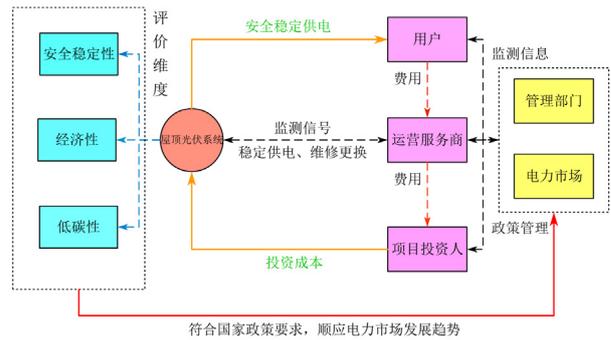


图1 屋顶光伏系统相关主体及评价维度

Fig. 1 Relevant subjects and evaluation systems of rooftop photovoltaic systems

系统的安全稳定是电网供电的基本要求,其关乎电力相关企业的利益以及用户的使用体验,是光伏并网的重点考察指标。光伏并网的收益直接影响投资者的投资欲望。此外,光伏投入除了要考虑当前的需求,还要考虑未来电网的发展趋势。根据电力市场的发展趋势,碳排放权交易日益成熟,辅助服务有偿化亦是大势所趋^[10],同时减少碳排放助力国家双碳目标也是电力行业的责任与义务。

通过以上分析,本文建立了含有储能装置的屋顶光伏接入配网的评价指标体系,其具体指标与含义如表1所示。

1.1 安全性

光伏接入配网对静态稳定性影响较小,因此以暂态稳定性、短路电流水平以及光伏间歇性来衡量系统的安全性。

1) 暂态稳定性

采用三相短路故障的平均临界切除时间 A_1 来衡量系统的暂态稳定性^[11],为了计算的准确性,根据光伏出力情况生成多个典型场景,取其加权平均值作为参考值,计算公式为

$$A_1 = \frac{1}{N_g} \sum_g \frac{1}{N_c} \sum_h T_{cct,h,g} \quad (1)$$

式中: N_g 为典型场景数量; N_c 为待校核故障数量; $T_{cct,h,g}$ 为典型场景 g 下短路故障 h 的极限切除时间。

2) 短路电流水平

大规模屋顶光伏接入系统可能会出现短路电流越限的情况^[11],影响系统的安全稳定。因此,需要对短路电流裕度进行校核,采用平均短路电流裕度衡量短路电流水平,计算公式为

$$A_2 = \frac{1}{N_g} \sum_g \frac{1}{N} \sum_{D=1}^N \frac{I_{D0} - I_{D,g}}{I_{D0}} \times 100\% \quad (2)$$

表 1 屋顶光伏接入系统评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of rooftop photovoltaic access system

一级指标	二级指标	含义
安全稳定性	暂态稳定性	高比例分布式光伏接入电网后, 若出现故障可能会造成薄弱断面失稳, 因此需对其暂态稳定性进行校核
	短路电流水平	大量屋顶光伏接入系统可能会出现短路电流越限的情况
	光伏间歇性	用频率波动率衡量光伏间歇性
经济性	传统收益	除去成本外系统净收益
	碳交易收益	碳排放权交易所得收益
	辅助服务收益	储能系统参与调峰所得收益
	投资回收期	投资返本年限
低碳性	二氧化碳减排量	利用可再生能源所减少的二氧化碳排放量

式中: N 为计入计算的节点数量; $I_{D,g}$ 为典型场景 g 下节点 D 的短路电流; I_{D0} 为短路电流限值。

3) 光伏间歇性

光伏出力受天气等诸多因素影响具有间歇性, 会造成并网点附近功率波动^[13]。本文通过频率变化率 B_1 来衡量光伏间歇性, 计算公式为

$$B_1 = \frac{1}{N_g} \sum_{g=1}^{N_g} P_g \frac{f_{\max,g} - f_{\min,g}}{f_s} \quad (3)$$

式中: P_g 为典型场景 g 发生的概率; $f_{\max,g}$ 表示典型场景 g 频率波动的最大值; $f_{\min,g}$ 表示典型场景 g 频率波动的最小值; f_s 为标准频率。

1.2 经济性

1) 传统光伏储能系统经济效益

系统总成本 C_T 包括初始投资成本、维护更换成本和退役成本^[14-15], 即

$$C_T = C_{OM} + C_R + C_1 \quad (4)$$

式中: C_1 为初始投资成本; C_{OM} 为维护更换成本; C_R 为退役成本。

$$C_{OM} = Y(O_{PV} + O_{BSS}) + E_X \quad (5)$$

式中: Y 为光伏储能系统运行周期; E_X 表示设备更换成本; O_{PV} 、 O_{BSS} 分别表示光伏和储能系统年均维护成本, 可分别表示为

$$O_{PV} = \lambda_1 C_{PV} \quad (6)$$

$$O_{BSS} = \lambda_2 C_{BSS} \quad (7)$$

式中: λ_1 、 λ_2 分别为光伏和储能系统的年维护系数; C_{PV} 为光伏系统初始投资成本; C_{BSS} 为储能系统初始投资成本。

退役成本计算公式为

$$C_R = \beta C_1 \quad (8)$$

式中, β 为退役成本系数。

系统总收益 R_T 包括发电收益和设备回收收益, 即

$$R_T = \sum_{y=1}^Y R_{ey} + R_r \quad (9)$$

式中: R_{ey} 为第 y 年发电收益; R_r 为设备回收收益。

则传统光伏储能系统收益 C_1 为

$$C_1 = R_T - C_T \quad (10)$$

2) 碳交易收益

碳交易是以碳交易市场为中心, 将碳排放权视为一种可以交易的商品。各排放源都有一定的碳排放额, 多余的排放额可以在碳交易市场进行售卖, 反之排放额不足亦可购买^[16]。

目前国内碳交易机制多采用阶梯碳价模式^[17-18], 可表示为

$$F_C = \begin{cases} \lambda(E_p - E_L), E_p \leq E_L + d \\ \lambda d + (1 + \sigma)\lambda(E_p - E_L - d), \\ E_L + d < E_p \leq E_L + 2d \\ (2 + \sigma)\lambda d + (1 + 2\sigma)\lambda(E_p - E_L - 2d), \\ E_L + 2d < E_p \leq E_L + 3d \\ (3 + 3\sigma)\lambda d + (1 + 3\sigma)\lambda(E_p - E_L - 3d), \\ E_L + 3d < E_p \leq E_L + 4d \\ (4 + 6\sigma)\lambda d + (1 + 4\sigma)\lambda(E_p - E_L - 4d), \\ E_p > E_L + 4d \end{cases} \quad (11)$$

式中: F_C 表示阶梯碳价; λ 为市场基准价格; d 为碳排放量区间长度; σ 为每个阶梯碳交易价格的增长幅度, 每上升一个阶梯, 碳交易价格增加 $\lambda\sigma$; E_p 为实际碳排放量; E_L 为免费碳排放额。

故碳排放权交易收益 C_2 为

$$C_2 = \nu F_C \quad (12)$$

式中, ν 表示光伏-储能系统可售出的碳排放量。

3) 辅助服务收益

电力系统辅助服务是指在保证系统安全稳定运行的情况下, 由各电力相关企业、参与市场化交易的电力用户和聚合商等第三方提供的服务。

在高比例分布式光伏接入背景下, 常规调峰机组灵活性难以满足系统调峰需求^[18], 因而可能导致大量弃光。储能装置通过“高发低储”平滑了光伏并网的波动性^[19], 如图 2 所示。

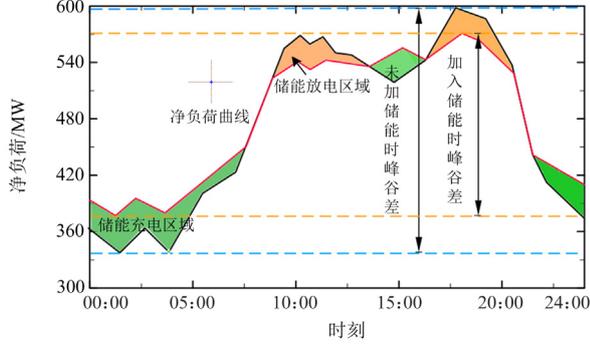


图 2 储能调峰示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy storage peak shaving

目前各省为了保障电力系统的安全稳定运行, 降低峰谷差, 制定了相应的分时电价机制, 图 3 为某省的峰谷电价曲线。

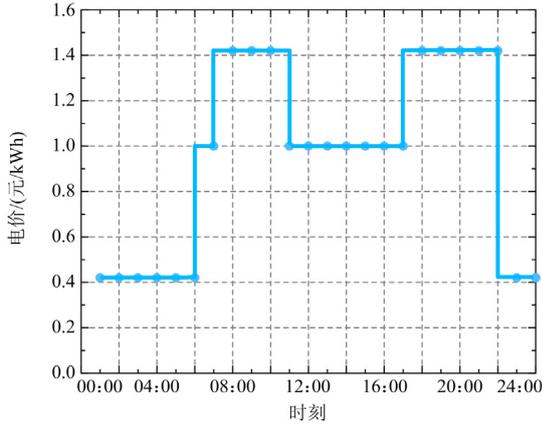


图 3 某省峰谷电价曲线

Fig. 3 Peak-valley electricity price curve of a province

则辅助服务收益 C_3 为

$$C_3 = \{(E_{r,\max} - E_{r,\min}) + (E_{r,n} - E_{r,\min})\} \times V_{\text{BSS}} \quad (13)$$

式中: $E_{r,\max}$ 表示峰时电价; $E_{r,\min}$ 表示谷时电价; $E_{r,n}$ 为平价电价; V_{BSS} 为储能容量。

4) 投资回收期

投资回收期是指投资返本年限, 其计算公式为

$$\sum_{F_i} (R_T - C_T) = 0 \quad (14)$$

式中, F_i 为投资返本年限。

1.3 低碳性

对于光伏-储能系统而言, 其低碳性用碳减排量

来衡量。碳减排量是指通过光伏发电替代化石燃料发电所减少的 CO_2 排放量, 采用基准线法进行衡量, 计算公式为

$$E_y = E_{\text{facility},y} \times E_{\text{grid,CM},y} \quad (15)$$

式中: E_y 为在第 y 年的基准线排放量; $E_{\text{facility},y}$ 为在第 y 年的光伏净上网电量; $E_{\text{grid,CM},y}$ 为组合边际二氧化碳排放因子, 可表示为

$$E_{\text{grid,CM},y} = F_{\text{grid,OM},y} \times W_{\text{OM}} + F_{\text{grid,BM},y} \times W_{\text{BM}} \quad (16)$$

式中: $F_{\text{grid,OM},y}$ 为电量边际排放因子; $F_{\text{grid,BM},y}$ 为容量边际排放因子; W_{OM} 为电量边际排放因子的权重; W_{BM} 为容量边际排放因子的权重。

则碳减排量为

$$R_y = E_y - P_y \quad (17)$$

式中: R_y 表示碳减排量; P_y 为系统排放量。由于光伏储能系统生产运行不会产生显著的温室气体排放, 因此系统排放量可忽略。

2 综合评价方法

2.1 逼近理想序列法

针对建立的评价指标, 还需通过综合评价算法将各指标纳入评价体系以进行最终评分。本文基于逼近理想序列的综合评价算法对屋顶光伏接入配网的方案进行综合评价^[20], 具体建模过程如下。

1) 将原始矩阵正向化

假设有 n 个评价对象, m 个评价指标, 则原始矩阵 Q 可以表示为

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1m} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{nm} \end{bmatrix} \quad (18)$$

正向化是指将常见的非极大型指标类型转化为极大型指标, 具体方式如下。

将极小型指标转化为极大型指标, 具体可表示为

$$\hat{x}_{ij}^1 = \max\{q_j^1\} - q_{ij}^1 \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (19)$$

式中: q_j^1 表示需要转化为极大型指标的极小型指标列; q_{ij}^1 表示列向量 q_j^1 中的元素; \max 表示取列向量中的最大值; \hat{x}_{ij}^1 表示转化后的对应元素。

将中间型指标转化为极大型指标, 具体可表示为

$$\begin{cases} \hat{x}_{ij}^2 = 1 - \frac{|q_{ij}^2 - q_{\text{best}}^2|}{M} \\ M = \max\{|q_{ij}^2 - q_{\text{best}}^2|\} \end{cases} \quad (20)$$

式中: q_{ij}^2 表示需要转化为极大型指标的中间型指标列中的各元素; q_{best} 表示中间型指标的最佳值; \hat{x}_{ij}^2 表示转化后的相应元素。

区间型指标转化为极大型指标, 可表示为

$$\hat{x}_{ij}^3 = \begin{cases} 1 - \frac{a - q_{ij}^3}{M}, & q_{ij}^3 < a \\ 1, & a \leq q_{ij}^3 \leq b \\ 1 - \frac{q_{ij}^3 - b}{M}, & q_{ij}^3 > b \end{cases} \quad (21)$$

$$M = \max \{a - \min \{q_j^3\}, \max \{q_j^3\} - b\}$$

式中: q_j^3 表示需要转化为极大型指标的区间型指标列; q_{ij}^3 表示列向量 q_j^3 中的各元素; a 、 b 表示区间型指标最佳区间的左、右端点; \hat{x}_{ij}^3 表示转化后的相应元素; \min 表示取列向量中的最小值。

2) 正向化矩阵标准化

标准化的目的是消除不同指标量纲的影响。假设各指标构成的正向化矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (22)$$

则将其标准化的矩阵记为 \mathbf{Z} , \mathbf{Z} 中的每个元素 z_{ij} 可表示为

$$z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} \quad (23)$$

3) 计算得分

标准化矩阵可表示为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (24)$$

定义最大值 \mathbf{Z}^+ 和最小值 \mathbf{Z}^- 可分别表示为

$$\mathbf{Z}^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+) \quad (25)$$

$$\mathbf{Z}^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-) \quad (26)$$

式中, z_j^+ 、 z_j^- ($j=1, 2, \dots, m$) 分别为标准矩阵第 j 列的最大、最小值。

计算各方案与正、负理想解的欧几里得距离, 可表示为

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (z_{ij} - z_j^+)^2}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (27)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (z_{ij} - z_j^-)^2}, \quad i=1, 2, \dots, n$$

式中, w_j 为各指标的权重。

各方案与正理想解的相对接近度为

$$S_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (28)$$

式中, S_i 越大表明该方案距离正理想解越近, 评分越高。

2.2 FAHP 与改进的 CRITIC 法组合赋权

2.2.1 CRITIC 法

CRITIC 权重法是一种基于数据波动性和冲突性的客观赋权法。波动性使用标准差进行表示, 如果数据标准差越大说明波动越大, 权重会越高; 冲突性使用相关系数进行表示, 如果指标之间的相关系数值越大, 说明冲突性越小, 那么其权重也就越低。将对比强度与冲突性指标相乘, 并且进行归一化处理, 即可得到最终的权重, 具体步骤如下。

1) 获取数据

假设原始数据矩阵由 n 个待评价对象, m 个评价指标构成, 即

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (29)$$

2) 数据标准化

数据标准化的主要目的就是消除量纲影响, 使所有数据能用统一的标准去衡量。

对于正向指标, 标准化后的对应元素为

$$b_j^1 = \frac{b_{ij} - \min(\mathbf{b}_j^1)}{\max(\mathbf{b}_j^1) - \min(\mathbf{b}_j^1)} \quad (30)$$

式中: \mathbf{b}_j^1 表示正向指标列向量; b_{ij}^1 表示列向量 \mathbf{b}_j^1 中的各元素; b_j^1 表示标准化后的对应元素。

对于逆向指标, 标准化后的对应元素为

$$b_j^2 = \frac{\max(\mathbf{b}_j^2) - b_{ij}^2}{\max(\mathbf{b}_j^2) - \min(\mathbf{b}_j^2)} \quad (31)$$

式中: \mathbf{b}_j^2 表示逆向指标列向量; b_{ij}^2 表示列向量 \mathbf{b}_j^2 中的各元素; b_j^2 表示标准化后的对应元素。

3) 计算信息承载量

数据的波动性 S_j 可表示为

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b'_{ij} - \bar{b}_j)^2}{n-1}} \quad (32)$$

式中： \bar{b}_j 为每个指标的均值； b'_{ij} 表示标准化后的数据。

计算冲突性时要用到指标的冲突性矩阵 \mathbf{R} ，计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (b'_{ij} - \bar{b}_j)(b_{ik} - \bar{b}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (b'_{ij} - \bar{b}_j)^2 \sum_{k=1}^m (b_{ik} - \bar{b}_k)^2}} \quad (33)$$

式中， r_{ij} 表示冲突性矩阵 \mathbf{R} 中的第 i 行第 j 列元素。

则数据的冲突性 A_j 可表示为

$$A_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (34)$$

信息承载量 C_j 可表示为

$$C_j = S_j \times A_j \quad (35)$$

4) 计算权重 ω'_j

$$\omega'_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (36)$$

从上述计算步骤可以看出，CRITIC 法存在以下可以改进和完善的地方。

1) 相关系数有正有负，对于绝对值相同的相关系数，其反映指标间的相关性程度大小应是一样的，因此在反映指标之间的对比强度时用 $|1 - r_{ij}|$ 代替原方法更适合。

2) CRITIC 法虽能有效考虑数据间的冲突性和波动性，但未考虑指标数据间的离散程度。因此，需要对 CRITIC 法进行改进，以使改进的 CRITIC 法能够充分考虑指标数据的相关性、对比强度和离散程度三大属性。

2.2.2 熵权法对 CRITIC 的改进

熵是对不确定信息的度量，熵与信息量成反比，熵值越小，权重越大。具体改进步骤如下。

1) 计算各项指标下各方案的指标值比重 P_{ij} 。

$$\begin{cases} P_{ij} = \frac{b'_{ij}}{\sum_{i=1}^n b'_{ij}} \\ \sum P_{ij} = 1 \end{cases} \quad (37)$$

2) 计算指标的信息熵值 e_j 。

$$\begin{cases} e_j = -\xi \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \\ \xi = \frac{1}{\ln n} \end{cases} \quad (38)$$

式中， ξ 确保信息熵值是有意义的。

则熵权法改进后的 CRITIC 权重 ω'_j 的计算公式为

$$\omega'_j = \frac{(e_j + S_j) \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|)}{\sum_{j=1}^m (e_j + S_j) \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|)} \quad (39)$$

2.2.3 FAHP 法

FAHP 法是通过主观判断各因素建立相对重要性矩阵，进而求得指标权重的方法，具体步骤如下^[21]。

1) 确定模糊判断矩阵

模糊判断矩阵表示两层元素之间相对重要性的比较。假定上下两层元素有联系，则模糊判断矩阵 \mathbf{F} 可表示为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (40)$$

为了表征相对重要程度，采用 0.1-0.9 标度法，数值越大相对越重要。

2) 确定模糊一致矩阵

将模糊判断矩阵经式(42)和式(43)转换为模糊一致矩阵，即可表示为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \cdots & k_{mn} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$k_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (42)$$

$$k_{ij} = \frac{k_i - k_j}{2(n-1)} + 0.5 \quad (43)$$

3) 计算各元素权重

权重 ω_j^2 计算公式为

$$\omega_j^2 = \frac{1}{n} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{\sum_{i=1}^m k_{ij}}{n\alpha} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (44)$$

式中， α 为重要度差异因子，取值范围为 $\alpha \geq (n-1)/2$ 。

2.2.4 FAHP 与改进的 CRITIC 组合赋权

主观赋权法体现的是个人或群体的主观意愿，缺乏客观性；而客观评价过度依赖理论及数据本身，得出的结论往往忽略了评价的目的。因此采用主观与客观相结合的方式指标赋权，以避免单独使

用某种方法时的弊端。

对于一级指标而言, 其涉及经济、技术和环保多个角度, 为体现评价目的采用主观赋权法 FAHP 法对一级指标进行赋权。在相同一级指标下, 利用各二级指标数据本身对其进行客观赋权。则最终权重为

$$\omega_j = \omega_j^2 \cdot \omega_j^1 \quad (45)$$

综上所述, 屋顶光伏接入方案评价流程如图 4 所示。

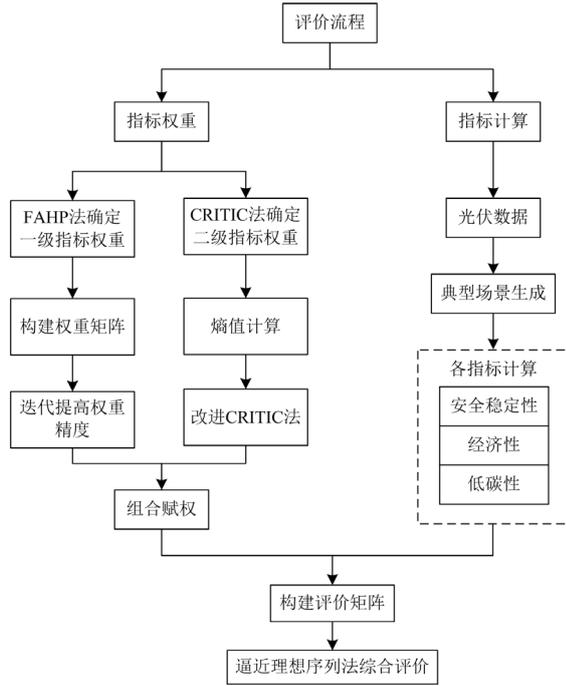


图 4 评价流程图

Fig. 4 Evaluation flow chart

3 算例分析

本文以某地装机容量为 6 MW、电压等级为 20 kV、储能容量为 900 kWh 的屋顶光伏项目为例, 配网结构示意图如图 5 所示。结合 Matlab 对相关指标进行计算和评价分析, 采用 FAHP-改进 CRITIC 法赋值指标权重, 通过逼近理想序列法进行综合评分。

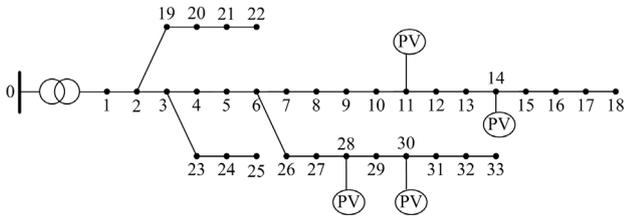


图 5 配网结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of distribution network structure

3.1 指标计算与评价分析

案例储能系统基本信息如表 2 所示。

表 2 储能电池信息

Table 2 Energy storage battery information

项目	内容
类型	磷酸铁锂
放电效率/%	96
放电深度/%	90
能量转换效率/%	98
使用寿命/年	9
保修年限/年	5

1) 安全稳定性

参考当地历史光伏数据, 基于蒙特卡洛法和 K-means++ 算法进行场景生成与聚类, 得到 5 个典型运行场景及其概率, 结果如图 6 和表 3 所示。

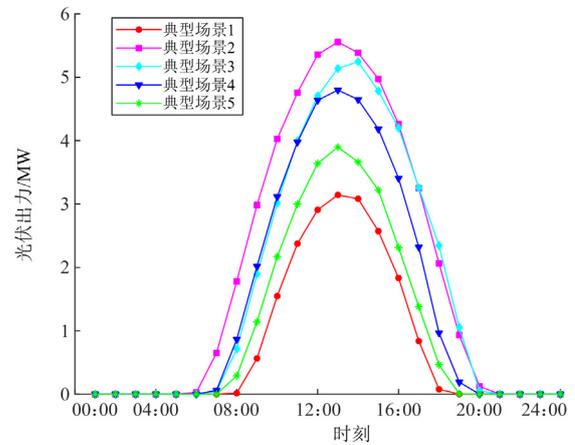


图 6 典型运行方式

Fig. 6 Typical operation mode

表 3 各典型场景概率

Table 3 Probability for each typical scenario

典型场景	概率
1	0.205
2	0.14
3	0.095
4	0.075
5	0.485

由图 6 和表 3 可以得到 5 种典型运行方式下光伏出力情况及其发生的概率。基于 Simulink 平台对各典型场景下三相短路故障的平均临界切除时间进行仿真, 结果如表 4 所示。

表 4 各典型场景下三相短路故障平均临界切除时间

Table 4 Average critical cut-off time for three-phase short-circuit faults under each typical scenario

典型场景	1	2	3	4	5
极限切除时间/s	0.020	0.030	0.050	0.015	0.013

由表 4 可知, 各典型场景下三相短路故障平均临界切除时间, 结合式(1)可以计算得到三相短路故障的平均临界切除时间约为 0.02 s。

基于 Simulink 平台对各典型场景下短路电流进行监测, 短路电流计算结果如表 5 所示。

表 5 各典型场景下短路电流

Table 5 Short-circuit currents in each typical scenario

典型场景	1	2	3	4	5
短路电流/kA	0.718	0.776	0.724	0.755	0.747

根据案例电压等级可知, 短路电流限值为 1.6 kA, 通过计算可得平均短路电流裕度为 53.5%。

基于上述 5 种典型出力场景, 在温度与光照发生明显变化时测量系统的频率波动情况以衡量系统的光伏间歇性, 结果如图 7 所示。

由图 7 中各典型场景频率波动情况可以计算得到各典型场景频率波动的大小, 再结合各典型场景发生的概率和频率变化率公式计算得到光伏储能系统频率变化率为 0.494%。

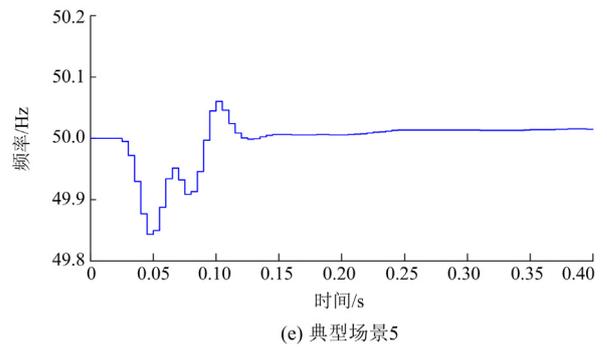
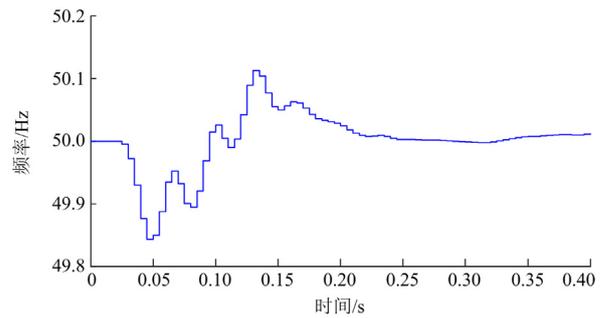
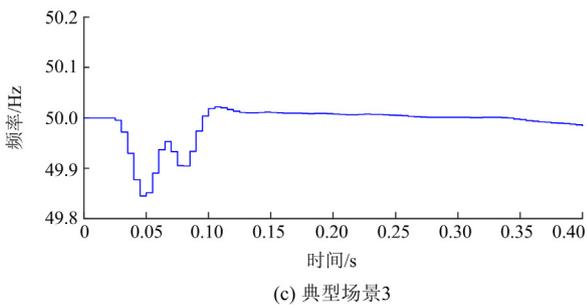
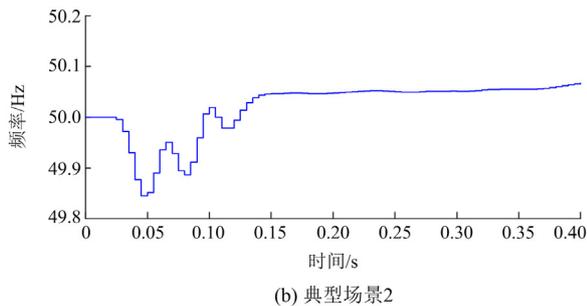
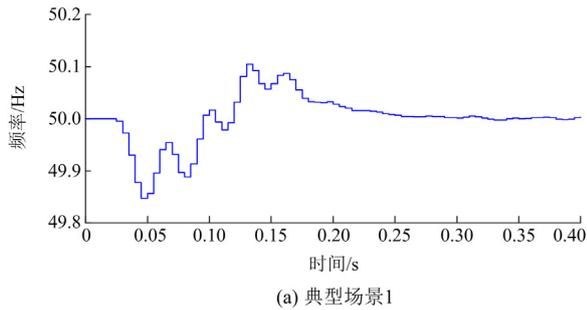


图 7 各典型场景下频率变化情况

Fig. 7 Frequency changes in each typical scenario

2) 经济性

光伏系统年运维费用系数为 1%; 储能电池的年维修系数为 1.5%。电线电缆使用寿命为 20 年, 汇流箱使用寿命为 20 年, 计量装置使用寿命为 20 年, 储能电池使用寿命约为 9 年, 退役成本忽略不计^[22]。根据式(4)~式(7)可以计算得到该项目的光伏储能系统生命周期成本, 如表 6 所示。

表 6 光伏储能系统生命周期成本

Table 6 Life cycle cost of photovoltaic energy storage system

类型	初始投资	维护更换	设备退役	总成本
成本/万元	2306.65	899.35	0	3206

根据 SolarGIS 提供的太阳能资源数据^[23], 该光伏项目理论年平均发电量为 630.3 万 kWh。由当地政策估算得到该项目年发电收益约为 353.19 万元, 全生命周期发电总收益约为 8829.75 万元。

根据相关资料, 组件回收价格为初始组件成本的 40%左右, 其他设备的回收价值按设备经验残值计算, 约为初始成本的 5%。由式(9)和式(10)可以计算得到系统传统收益为 5864.925 万元。

参考相关资料, 该光伏-储能系统全生命周期各阶段碳排放数据如表 7 所示。

由表 7 可知, 该光伏-储能系统生命周期 CO₂ 排放总量为 6654.696 t。根据式(11)和式(12)可以计算得到碳排放权交易收入为 221.468 万元。

表 7 各阶段碳排放清单

Table 7 Carbon emission inventory at each stage

阶段	碳排放量/t
系统产品生产	9014.328
生产运输	9.012
安装建设	0.450
运行维护	0.354
退役运输	9.335
系统退役	-2378.783

储能系统在谷段或平段充电, 在峰段放电^[24], 从而获得调峰收益。储能系统一天可进行 2 次满充满放, 考虑到其他因素影响, 按全年 300 天计全年调峰为 540 MW, 参考当地峰谷电价, 收益约为 40.5 万元。系统全生命周期调峰量可达 13 500 MW, 调峰辅助服务收益约为 1012.5 万元。

根据上述分析, 计及碳交易和辅助服务收益后, 该项目的净收益曲线如图 8 所示。

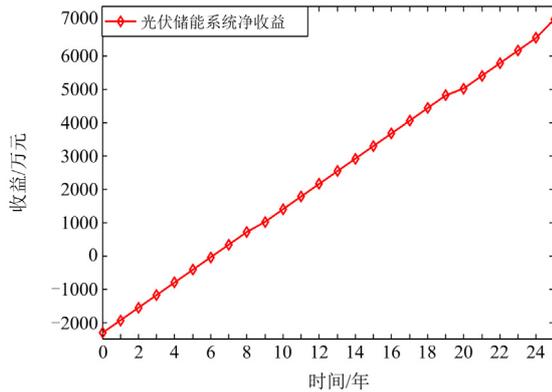


图 8 项目净收益曲线图

Fig. 8 Project net income curve

由净收益曲线可知, 项目投资回收期为 6 年。

为了体现本文将碳交易与辅助服务收益纳入经济性指标的合理性, 设置了两种情景做比较。

场景 1: 计及辅助服务收益的情况下考虑碳交易收益与不考虑碳交易收益。

场景 2: 计及碳交易收益的情况下考虑辅助服务收益与不考虑辅助服务收益。

两种场景结果分别如图 9、图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知, 本文所提出的碳交易和辅助服务收益对系统总收益都有较大影响, 甚至会影响投资回收期, 充分证明了将碳交易收益和辅助服务收益纳入屋顶光伏接入配网评价指标的科学性与合理性。

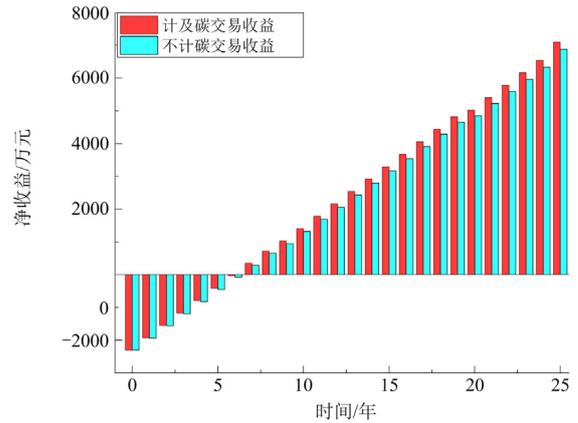


图 9 场景 1 经济性对比

Fig. 9 Comparison of the economy of scenario 1

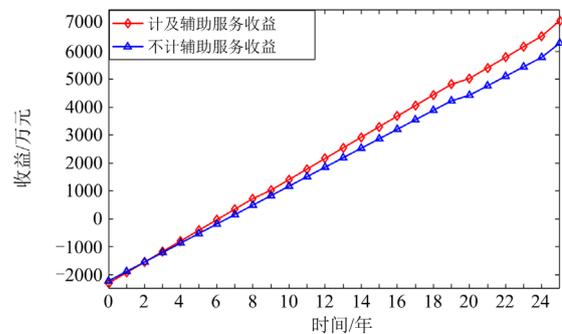


图 10 场景 2 经济性对比

Fig. 10 Comparison of the economy of scenario 2

3) 低碳性

由表 7 可知, 该光伏-储能系统生命周期 CO₂ 排放总量为 6654.696 t, 该系统 25 年总发电量为 15 757.5 万 kWh, 参照 IPCC 指南中的碳排放系数, 根据式 (15)~式 (17) 可以计算得到, 该屋顶光伏项目全生命周期内相较于燃煤发电碳减排量为 35 344.455 t。

3.2 权重赋值

采用模糊层次分析法确定一级指标权重, 为使打分科学、客观, 邀请 6 位专家进行打分, 取其平均值作为模糊判断矩阵, 可表示为

$$F = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.6 \\ 0.7 & 0.5 & 0.8 \\ 0.4 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据式(42)、式(43)计算得到模糊一致矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.3500 & 0.5750 \\ 0.6500 & 0.5000 & 0.7250 \\ 0.4250 & 0.2750 & 0.5000 \end{bmatrix}$$

重要度差异因子 α 取 1, 根据式(44)计算得到各

指标权重值为

$$\omega_j^2 = [0.3083, 0.5583, 0.1333]$$

采用改进的 CRITIC 法对二级指标进行赋权。根据式(30)一式(39)计算得到各二级指标权重, 随后组合赋权得到最终权重, 结果如表 8 所示。

3.3 评价分析

结合上述指标及权重计算, 采用逼近理想序列法的综合评价算法进行最终评分, 其结果如表 9 所示。

为凸显所提方法的可行性, 采用熵权法、传统 CRITIC 法、改进 CRITIC 法和模糊层次分析法直接将二级指标赋权与所提组合赋权进行对比, 结果如表 10 和图 11 所示。

表 8 组合权重值

Table 8 Combined weight values

一级指标	权重	二级指标	权重	最终权重
安全稳定性	0.3083	暂态稳定性	0.4333	0.1336
		短路电流水平	0.3583	0.1105
		频率波动率	0.2083	0.0642
经济性	0.5583	传统收益	0.3500	0.1954
		碳交易收益	0.2611	0.1458
		辅助服务收益	0.2167	0.1210
		投资回收期	0.1722	0.0962
低碳性	0.1333	碳减排量	1	0.1333

表 9 评价结果

Table 9 Evaluation results

一级指标	权重	二级指标	权重	最终权重	计算值
安全稳定性	0.3083	暂态稳定性	0.4333	0.1336	0.02 s
		短路电流水平	0.3583	0.1105	53.5%
		频率波动率	0.2083	0.0642	0.494%
经济性	0.5583	传统收益	0.3500	0.1954	5864.925 万元
		碳交易收益	0.2611	0.1458	221.468 万元
		辅助服务收益	0.2167	0.1210	1012.5 万元
		投资回收期	0.1722	0.0962	6 年
低碳性	0.1333	碳减排量	1	0.1333	35 344.455 t
与正理想解的相对接近度			0.5975		

从表 10 和图 11 可以看出, FAHP 法主观性过强, 忽略了指标数值的客观因素; 熵权法依赖信息熵值, 权重与指标数值大小相关; 传统 CRITIC 法权重与指标数据的波动性和冲突性正相关; 改进 CRITIC 法在传统 CRITIC 法的基础上考虑了数据的离散程度, 但也过度依赖数据本身的属性, 忽略了评价的目的。而 FAHP-改进 CRITIC 组合赋权法将主观与客观相结合, 充分考虑了数据本身的属性, 同时兼顾评价目的, 使得权重更加合理。

为直观地体现 FAHP-改进 CRITIC 法的可行性, 将上述 5 种赋权方法所得指标权重通过逼近

理想序列法进行综合评分, 结果如表 11 和图 12 所示。

从表 11 和图 12 可知, 采用逼近理想序列综合评价算法时, 单一使用主观赋权法 FAHP 法和单一客观赋权法 CRITIC、熵权法与正理想解的相对接近度都较低。改进 CRITIC 法在传统 CRITIC 法的基础上考虑了数据的离散程度, 充分利用了数据本身的三大属性, 虽然有一定的改善, 但依旧无法避免客观赋权法的弊端。FAHP-改进 CRITIC 法赋权后与正理想解相对接近度最高, 组合赋权既考虑了利益主体的主观性, 同时也充分利用了数据本身的客观属性。

表 10 5 种方法确定的权重值

Table 10 Weight values determined by five methods

方法	暂态稳定性	短路电流水平	频率波动率	传统收益	碳交易收益	辅助服务收益	投资回收期	碳减排量
FAHP	0.1332	0.1332	0.1332	0.1495	0.1168	0.1168	0.1168	0.1005
熵权法	0.1335	0.1305	0.0321	0.2514	0.1068	0.1256	0.0548	0.1653
CRITIC	0.0333	0.1024	0.0024	0.2864	0.1358	0.1637	0.1334	0.1426
改进 CRITIC	0.1135	0.1045	0.0548	0.2146	0.1376	0.1452	0.1137	0.1161
FAHP-改进 CRITIC	0.1336	0.1105	0.0642	0.1954	0.1458	0.1210	0.0962	0.1333

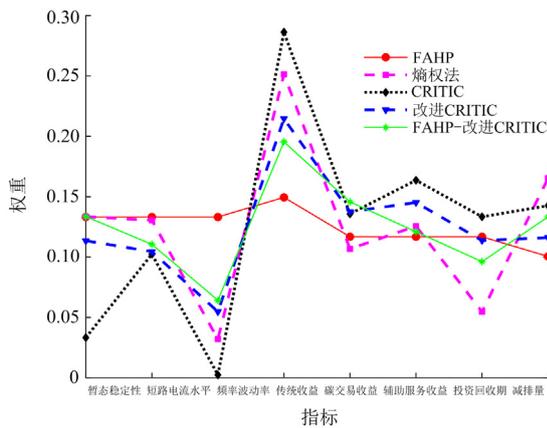


图 11 5 种方法权重值

Fig. 11 Weight values of five methods

表 11 5 种方法综合评分结果

Table 11 Combined scoring results of five methods

方法	与正理想解的相对接近度
FAHP	0.3948
熵权法	0.4267
CRITIC	0.3746
改进 CRITIC	0.4753
FAHP-改进 CRITIC	0.5975

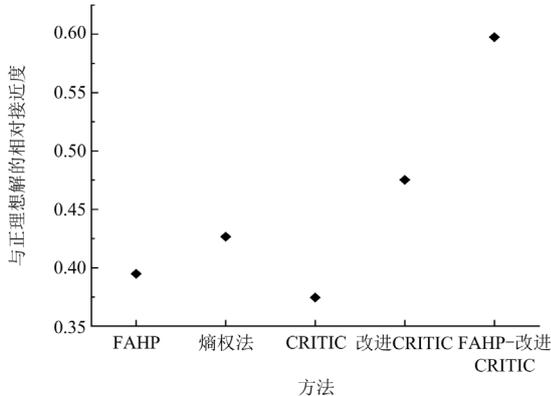


图 12 评分结果散点图

Fig. 12 Scatterplot of scoring results

4 结论

针对屋顶光伏接入配网的方案缺少行之有效的评估方法, 提出从安全稳定性、经济性和低碳性 3 个维度衡量光伏接入系统设计方案优劣。通过两种场景的对比, 说明了将碳交易收入和辅助服务收益纳入屋顶光伏接入配网方案评价指标的合理性。采用 FAHP-改进 CRITIC 法确定各指标权重, 进而采用逼近理想序列的综合评价方法进行评估。通过 5 种赋权算法对比证明所提方法的可行性。结

果表明, 本文所提评价指标在经济性上优于传统经济性指标, 不仅缩短了投资回收期, 而且大大增加了屋顶光伏的收益; 同时, 在评价方法方面, 本文所提指标赋权法得到的结果也更加接近正理想解。

参考文献

- [1] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon transformation path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [2] 徐润萍. 配电网综合评价指标体系及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
XU Runping. Research on comprehensive evaluation index system and application of distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [3] 董福贵, 张也, 尚美美. 分布式能源系统多指标综合评价研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3214-3223.
DONG Fugui, ZHANG Ye, SHANG Meimei. Multi-criteria comprehensive evaluation of distributed energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3214-3223.
- [4] 王敬敏, 施婷. 智能配电网评估指标体系的构建[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(6): 65-70.
WANG Jingmin, SHI Ting. Assessment index system for smart distribution grids[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(6): 65-70.
- [5] LIU Y B, SU Y C, XIANG Y, et al. Operational reliability assessment for gas-electric integrated distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 1091-1100.
- [6] 孙强, 张义斌, 韩冬, 等. 多因素、多维度的智能电网风险评估[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 51-55.
SUN Qiang, ZHANG Yibin, HAN Dong, et al. Multifactorial and multidimensional risk evaluation of smart grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 51-55.
- [7] 董福贵, 张也, 尚美美. 分布式能源系统多指标综合评价研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3214-3223.
DONG Fugui, ZHANG Ye, SHANG Meimei. Multi-criteria comprehensive evaluation of distributed energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3214-3223.
- [8] 刘骏锋. 基于实测数据的综合能源系统综合评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LIU Junfeng. Comprehensive evaluation of integrated energy system based on measured data[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [9] 赵静. 园区综合能源项目综合评价体系研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
ZHAO Jing. Research on comprehensive evaluation of integrated energy projects in the park[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [10] 李国庆, 闫克非, 范高锋, 等. 储能参与现货电能量-

- 调频辅助服务市场的交易决策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 45-54.
- LI Guoqing, YAN Kefei, FAN Gaofeng, et al. Transaction decision-making of energy storage stations participating in the spot energy and frequency modulation ancillary service market[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 45-54.
- [11] YU M, HUANG W, TAI N, et al. Transient stability mechanism of grid-connected inverter-interfaced distributed generators using droop control strategy[J]. Applied Energy, 2018, 210: 737-747.
- [12] 颜湘武, 梁白雪, 贾焦心, 等. 高渗透率光伏并网对系统暂态频率稳定性影响的量化评估[J]. 可再生能源, 2022, 40(9): 1232-1240.
- YAN Xiangwu, LIANG Baixue, JIA Jiaoxin, et al. Quantitative evaluation of transient frequency stability of high permeability photovoltaic grid connected system[J]. Renewable Energy Sources, 2022, 40(9): 1232-1240.
- [13] ABD EL-KAREEM A H, ABD ELHAMEED M, ELKHOLY M M. Effective damping of local low frequency oscillations in power systems integrated with bulk PV generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(4): 512-524.
- [14] 王小虎, 楚春礼, 曹植, 等. 分布式光伏-储能系统经济-碳排放-能源效益实证分析——以山东省胶州光伏及其储能系统为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 402-414.
- WANG Xiaohu, CHU Chunli, CAO Zhi, et al. Empirical analysis of cost-CO₂-energy benefits of distributed photovoltaic-battery storage system-taking (PV-BSS) in a case study in rural Jiaozhou Shandong[J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 402-414.
- [15] DIETRICH A, WEBER C. What drives profitability of grid-connected residential PV storage systems? A closer look with focus on Germany[J]. Energy Economics, 2018, 74: 399-416.
- [16] 臧紫坤, 杨晓辉, 李昭辉, 等. 考虑储热改造与最优弃能的风光火储低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 33-43.
- ZANG Zikun, YANG Xiaohui, LI Zhaohui, et al. Low-carbon economic scheduling of solar thermal storage considering heat storage transformation and optimal energy abandonment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 33-43.
- [17] 曾艾东, 邹宇航, 郝思鹏, 等. 考虑阶梯式碳交易机制的园区工业用户综合需求响应策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4352-4363.
- ZENG Aidong, ZOU Yuhang, HAO Sipeng, et al. Comprehensive demand response strategy of industrial users in the park considering the stepped carbon trading mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4352-4363.
- [18] WANG Y Q, QIU J, TAO Y C, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3145-3157.
- [19] 韩小齐, 刘文颖, 庞清仑, 等. 考虑日前现货市场风险的电力负荷参与系统调峰控制模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 55-67.
- HAN Xiaoqi, LIU Wenyong, PANG Qinglun, et al. Peak shaving control model of power load participation system considering day-ahead spot market risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 55-67.
- [20] 崔杨, 修志坚, 刘闯, 等. 计及需求响应与火-储深度调峰定价策略的电力系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4403-4415.
- CUI Yang, XIU Zhijian, LIU Chuang, et al. Dual level optimal dispatch of power system considering demand response and pricing strategy on deep peak regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4403-4415.
- [21] 付志扬, 王涛, 孔令号, 等. 基于 AHP-TOPSIS 算法的重要电力客户用电状态评估[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 4095-4101.
- FU Zhiyang, WANG Tao, KONG Linghao, et al. Power consumption state evaluation of important power customers based on AHP-TOPSIS algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 4095-4101.
- [22] 王长江, 李本新, 姜涛, 等. 基于改进模糊层次分析法的交直流受端电网交流故障筛选与排序[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4047-4056.
- WANG Changjiang, LI Benxin, JIANG Tao, et al. A contingency screening and ranking method based on improved fuzzy analytic hierarchy process for AC/DC receiving-end power grid AC faults[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4047-4056.
- [23] 李淳伟, 胡露, 樊阳波, 等. 光伏组件回收利用现状研究及标准探讨[J]. 中国标准化, 2020(增刊 1): 163-168.
- LI Chunwei, HU Lu, FAN Yangbo, et al. Research on the present situation and standard of recycling and reuse of PV modules[J]. China Standardization, 2020(S1): 163-168.
- [24] SolarGIS. Global horizontal irradiation: China[Z]. Global Solar Atlas, 2019.
- [25] 闫来清, 曹丽源, 薛太林, 等. 风电场黑启动储能容量优化配置: 一种考虑储能运行策略的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 131-139.
- YAN Laiqing, CAO Liyuan, XUE Tailin, et al. Optimal configuration of wind farm black start energy storage capacity: a method considering energy storage operation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 131-139.

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-04-23

作者简介:

陈晨(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输变电工程。E-mail: 3306415115@qq.com

(编辑 许威)