

考虑源荷匹配特性的屋顶光伏接入配电网的综合排序方法

欧阳森, 彭志豪, 张晋铭, 康澜, 黎人玮

(华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 面向规模化屋顶光伏接入配电网急需进行有序控制的现状, 提出了一种考虑源荷匹配特性的屋顶光伏并网的综合排序方法。首先, 综合考虑负荷与光伏协调特性等需求, 设计了兼顾光伏业主侧、电网侧和用电用户侧需求的综合评价指标体系; 其次, 提出了一种基于改进层次分析法(improved analytic hierarchy process, IAHP)-改进反熵权法(improved anti-entropy method, IAM)-博弈组合赋权法-改进逼近理想解法(improved technique for order preference by similarity to ideal solution, improved TOPSIS)的评价方法, 先根据改进的层次分析法进行主观赋权, 同时考虑到指标间的相关性和波动性, 采用所提改进反熵权法确定各指标的客观权重, 再基于博弈论思想获取综合权重, 以确保权重的合理性, 然后, 为提高各方案的整体区分度, 采用所提改进逼近理想解法对屋顶光伏接入方案进行排序。最后, 以 IEEE 33 节点系统为例, 在 MATLAB 平台验证了所提指标体系和排序方法的有效性。

关键词: 源荷匹配特性; 改进反熵权法; 改进逼近理想解法; 屋顶光伏; 配电网; 综合排序

Comprehensive Sorting Method for Rooftop Photovoltaic Access to Distribution Network Considering Source-Load Matching Characteristics

OUYANG Sen, PENG Zhihao, ZHANG Jinming, KANG Lan, LI Renwei

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the urgent need for orderly control of large-scale rooftop photovoltaic access to the distribution network, a comprehensive sorting method of rooftop photovoltaic grid-connected considering source-load matching characteristics is proposed. Firstly, considering the demand of load and photovoltaic coordination characteristics, a comprehensive evaluation index system is designed, which takes into account the demand of photovoltaic owner side, power grid side and power user side. Secondly, an evaluation method based on improved analytic hierarchy process-improved anti-entropy weight method-game combination weighting method-improved technique for order preference by similarity to ideal solution is proposed. Then, the subjective weighting is carried out according to the improved analytic hierarchy process, and the correlation and volatility between the indexes are taken into account. The proposed improved anti-entropy weight method is used to determine the objective weight of each index, and then the comprehensive weight is obtained based on the game theory to ensure the rationality of the weight. Moreover, in order to improve the overall discrimination of each scheme, the improved technique for order preference by similarity to ideal solution is used to sort the rooftop photovoltaic access scheme. Finally, taking the IEEE 33-node system as an example, the effectiveness of the proposed index system and ranking method is verified on the MATLAB platform.

Key words: source-load matching characteristics; improved anti-entropy weight method; improved TOPSIS; rooftop photovoltaic; distribution network; comprehensive sorting

0 引言

屋顶光伏作为分布式光伏发电的形式之一,由于其投资成本低、布置灵活、可提高空间利用率等优点,逐渐规模化接入配电网^[1-3]。不同屋顶所建设的光伏的经济效益具有差异性,而且规模化的屋顶光伏并网后会对配电网的电压偏差、线损分布造成影响,因此对屋顶光伏的并网方案进行综合排序具有重要意义^[4-5]。

在光伏并网方案的评价指标方面,针对分布式光伏并网对配电网造成的影响,文献[6-7]设计了电能质量和电网损耗相关的指标来对比与评价不同的光伏并网方案。文献[8-9]从光伏的发电量、性能、经济效益等方面出发,设计对应指标并对光伏投资项目进行评价。然而以上文献设计的指标维度较为单一,文献[6-7]仅考虑了光伏并网对电网电能质量的影响,文献[8-9]则仅从光伏发电项目的经济性出发。文献[10-11]综合考虑光伏的寿命周期成本、效率、并网造成的线损等因素,对光伏并网方案进行评价。但文献[6-11]建立的光伏并网评价指标体系均未考虑待安装光伏出力与用电负荷的协调性问题及其影响,忽略了配电网用电用户侧对光伏的安装需求。

在对多个屋顶光伏接入配电网排序的综合决策方面,文献[12]从地理条件、利润和环境效益三方面设计决策标准,在确定权重后采用灰色累积前景理论对选址方案进行排序。文献[13]先采用层次分析法确定各指标权重,再基于逼近理想解法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)获取最优的光伏接入地点,但传统 TOPSIS 法存在可能无法明显判断评价对象优劣的问题^[14]。文献[15]利用最优最劣赋权法对可持续角度下的各项指标权重进行计算,然后基于改进的模糊综合评价方法对项目的效益进行合理的评价。文献[16]则根据熵权法确定各风险指标的比重,再对各光伏投资项目进行分析。文献[17]采用基于指标相关性的指标权重确定法(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC)确定各目标的客观权重,并采用 TOPSIS 法从待选配置方案中确定最优项。然而文献[16-17]所得权重无法全面反映指标数据的客观信息,而且文献[12-17]在确定指标权重时仅从主观或客观角度出发,会使所得

结果过于依赖决策者的主观意见或所收集的数据信息,具有片面性。

针对上述问题,本文首先构建了兼顾光伏业主侧、电网侧和用电用户侧需求的综合评价指标体系,采用匹配率和峰谷差变化率指标衡量屋顶光伏与用电负荷的匹配程度,然后利用负荷波动系数指标反映用电用户安装屋顶光伏的需求。其次,提出了一种规模化屋顶光伏接入配电网的综合评价方法,先根据改进的层次分析法确定主观权重,同时提出一种改进的反熵权法进行客观权重的计算,通过引入绝对相关系数和标准差对反熵权进行优化,使获得的客观权重兼顾指标数据的相关性、波动性和差异性信息,再采用博弈组合赋权法计算综合权重,以确保权重的科学性,然后提出一种改进逼近理想解法进行综合评估,先基于灰色关联矩阵的欧氏距离构建新的度量距离以弥补传统度量距离的不足,再根据改进的度量距离求取灰色相对贴合度,并对各方案进行排序,从而提高各方案的整体辨识度以更好地指导屋顶光伏的优先性建设工作。最后,以 IEEE 33 节点系统为例,在 MATLAB 平台上验证本文所提指标体系和评估方法的可行性。

1 指标体系设计

为对各屋顶光伏并网方案进行优先级排序,使综合效益最大化,本文分别从光伏业主侧、电网侧和用电用户侧三个角度建立屋顶光伏并网方案的指标评价体系,不仅考虑了屋顶光伏自身竞争力和其对配电网的影响,还考虑了用户负荷与光伏的匹配特性及用户需求对方案决策的影响,具体的评价指标体系如图1所示。

1.1 光伏业主侧指标

在对屋顶光伏安装项目进行决策时一般需要考虑其成本与效益,两者综合最佳的屋顶光伏安装方案的投资竞争力更高。为此,本文从光伏业主侧出发,引入平准化度电成本和净现值指标分别反映屋顶光伏项目的投资成本与经济效益。

1)平准化度电成本(D_1),指在项目的生命周期内,屋顶光伏单位发电量所用成本。平准化度电成本能直接反映屋顶光伏发电的经济性,其值越小,对光伏业主的吸引力越大,其计算公式如下。

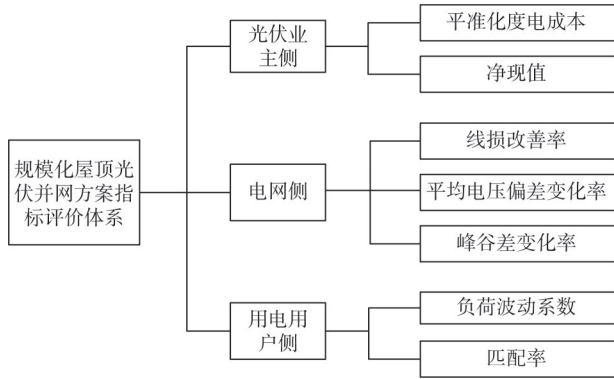


图 1 规模化屋顶光伏并网方案指标评价体系

Fig. 1 Index evaluation system of large-scale roof photovoltaic grid-connected scheme

$$D_1 = \frac{I_{c0} - \frac{I_{c0}r_c}{(1+r_d)^{T_c}} + \sum_{t=1}^{T_c} \frac{C_{o,t}}{(1+r_d)^t}}{\sum_{t=1}^{T_c} \frac{E_{g,t}}{(1+r_d)^t}} \quad (1)$$

式中： I_{c0} 为项目的初期投资成本； r_c 为残值率； r_d 为折现率； T_c 为屋顶光伏项目的运营周期； $C_{o,t}$ 为项目第 t 年的运维成本； $E_{g,t}$ 为屋顶光伏第 t 年的发电量。

2)净现值(D_2)，指运营年限内项目获得的净现金流量，能直接反映了项目的效益价值，其计算公式如下。

$$D_2 = -I_{c0} + \sum_{t=1}^{T_c} \frac{R_{E,t} + R_{c,t} - C_{o,t}}{(1+r_s)^t} \quad (2)$$

式中： $R_{E,t}$ 、 $R_{c,t}$ 分别为第 t 年的发电量收益和碳交易收益； r_s 为贴现率。

假设屋顶光伏业主采用自发自用，余电上网的模式，则发电量收益 $R_{E,t}$ 的计算公式如下。

$$R_{E,t} = r_o E_{g,t} P_s + (1 - r_o) E_{g,t} P_d \quad (3)$$

式中： r_o 为自用电比例； P_s 为销售电价； P_d 为脱硫标杆电价。

碳交易收益表征屋顶光伏安装项目带来的碳减排收益，其计算公式如下。

$$R_{c,t} = E_{g,t} \times F_{\text{grid,CM},t} \times P_c \quad (4)$$

式中： P_c 为平均碳价； $F_{\text{grid,CM},t}$ 为第 t 年的地区电网排放因子，其计算公式如下。

$$F_{\text{grid,CM},t} = F_{\text{grid,OM},t} \times w_{\text{OM}} + F_{\text{grid,BM},t} \times w_{\text{BM}} \quad (5)$$

式中： $F_{\text{grid,OM},t}$ 、 w_{OM} 分别为电量边际排放因子和对应的权重； $F_{\text{grid,BM},t}$ 、 w_{BM} 分别为容量边际排放因子和对应的权重。

1.2 电网侧指标

屋顶光伏的波动性出力会影响整个系统的线损分布，同时屋顶光伏的并网还会抬高各节点的电压幅值，影响系统的电压质量。此外，屋顶光伏出力与用户负荷的不匹配可能会导致净负荷的峰谷差增大，使调峰成本提高。因此，为衡量屋顶光伏接入对配电网的影响，本文选取系统线损改善率、平均电压偏差变化率和峰谷差变化率作为电网侧的评价指标。

1)线损改善率(D_3)。合理的屋顶光伏安装方案有利于减少负荷从网络获取的功率，从而减小线损。因此，本文选取线损改善率来衡量屋顶光伏并网对系统线损的影响，其计算公式如下。

$$D_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{t=1}^T P'_{\text{loss},t,i} - \sum_{t=1}^T P_{\text{loss},t,i}}{\sum_{t=1}^T P_{\text{loss},t,i}} \quad (6)$$

式中： N 为场景数量； $P_{\text{loss},t,i}$ 、 $P'_{\text{loss},t,i}$ 分别为第 i 个场景的统计周期 T 内第 t 时刻屋顶光伏接入前、后配电网的总线路损耗。

2)平均电压偏差变化率(D_4)。屋顶光伏并网会影响各节点电压幅值在标称电压附近的偏移程度，对电压质量具有改善效果的方案应优先执行。为此，本文选取平均电压偏差变化率来反映屋顶光伏并网对系统电压幅值的影响，其计算公式如下。

$$D_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{U'_{d,i} - U_{d,i}}{U_{d,i}} \quad (7)$$

式中： $U_{d,i}$ 、 $U'_{d,i}$ 分别为第 i 个场景中屋顶光伏接入前、后系统的平均电压偏差，其中系统平均电压偏差的计算公式如下。

$$U_d = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{N_{\text{bus}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} \left| \frac{U_{i,t} - U_{N,i}}{U_{N,i}} \right| \quad (8)$$

式中： N_{bus} 为整个系统的节点数量； $U_{i,t}$ 为第 i 个节点在 t 时刻的电压值； $U_{N,i}$ 为第 i 个节点的电压额定值。

3)峰谷差变化率(D_5)。屋顶光伏与用户负荷匹配效果不佳的情况会导致净负荷的峰谷差值变大，提高系统的调峰难度。为此，本文从峰谷差的角度出发，采用峰谷差变化率来衡量屋顶光伏与负荷的匹配效果，其计算如式(9)所示。峰谷差变化率越小，表明屋顶光伏的接入能有效减小负荷的峰谷差，屋顶光伏与负荷出力具有较好的匹配度。

$$D_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P'_{d,i} - P_{d,i}}{P_{d,i}} \quad (9)$$

式中 $P_{d,i}$ 、 $P'_{d,i}$ 分别为第 i 个场景中屋顶光伏接入前、后负荷曲线的峰谷差值。

1.3 用电用户侧指标

规模化屋顶光伏并网时也需考虑用户侧的需求,不同用户负荷接入光伏的优先级别不同,本文采用负荷波动系数来衡量用户负荷安装屋顶光伏的迫切性。此外,考虑到用户负荷与屋顶光伏出力的协调性,本文提出匹配率该项指标,分别从曲线变化趋势和功率匹配度来衡量用户负荷与屋顶光伏出力的匹配程度。

1) 负荷波动系数(D_6)。本文采用用户负荷功率曲线的标准差来反映负荷的波动情况,其计算公式如式(10)所示。负荷波动系数越大,表明负荷功率在其均值附近的离散程度越大,负荷曲线的起伏较大,在该节点附近的屋顶光伏的接入优先级会更高。

$$D_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (P_{L,t,i} - P_{av,i})^2}{T-1}} \quad (10)$$

式中 $P_{L,t,i}$ 、 $P_{av,i}$ 分别为在第 i 个场景中用户负荷在 t 时刻的功率值和周期 T 内的平均功率值。

2) 匹配率(D_7)。为衡量屋顶光伏出力与用电负荷的互补性,本文提出基于斯皮尔曼相关系数和曼哈顿距离的匹配率指标。

斯皮尔曼相关系数是一种非参数的等级相关性衡量指标,相比于皮尔逊相关系数,该系数无需变量数据呈正态分布,适用性更广,而且更能反映变量间单调关系的一致性^[18]。因此,本文采用斯皮尔曼相关系数来度量屋顶光伏出力与用户负荷两者趋势变化的相似程度,第 i 个场景的斯皮尔曼相关系数 ρ_i 的计算公式如下。

$$\rho_i = 1 - \frac{6}{T(T^2-1)} \sum_{t=1}^T (d_{L,t,i} - d_{P,t,i})^2 \quad (11)$$

式中 $d_{L,t,i}$ 、 $d_{P,t,i}$ 分别为第 i 个场景中,用户负荷和屋顶光伏出力在 t 时刻的功率排序值。

由式(11)计算得出的斯皮尔曼相关系数取值范围在 $[-1, 1]$ 之间,其值越大,表明屋顶光伏出力曲线与用户负荷曲线之间的趋势匹配度越高。然而,斯皮尔曼相关系数只能反映两者曲线单调变化的相似性,无法体现两者曲线功率数值上的差异性。

曼哈顿距离是根据变量间的绝对轴向距离之和来衡量距离的指标,能够反映变量间绝对距离的远近,因此,本文引入曼哈顿距离来衡量屋顶光伏出力和用户负荷在功率数值上的匹配程度。同时针对斯皮尔曼相关系数和曼哈顿距离量纲不一致的问题,本文先对两者进行标么化,再加权获取匹配率指标,其计算公式如下。

$$D_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\alpha \frac{1 + \rho_i}{2} + (1 - \alpha) d_{m,i} \right) \quad (12)$$

$d_{m,i} =$

$$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|P_{L,t,i} - P_{P,t,i}| - \min(|P_{L,t,i} - P_{P,t,i}|)}{\max(|P_{L,t,i} - P_{P,t,i}|) - \min(|P_{L,t,i} - P_{P,t,i}|)} \quad (13)$$

式中: α 为权重系数; $d_{m,i}$ 为第 i 个场景中屋顶光伏功率向量与负荷功率向量之间标么化后的平均曼哈顿距离。

本文所提匹配率指标的取值范围在 0 与 1 之间,匹配率越接近于 1,表明待安装屋顶光伏出力与用户负荷两者的变化趋势和功率的匹配性越佳,能够实现更好的源荷互补效果。

2 评价方法设计

本文所设计的规模化屋顶光伏并网方案综合评价方法的步骤为: 1) 根据各指标的初始矩阵,分别利用 IAHP 和 IAM 法确定各指标的主、客观权重; 2) 基于博弈组合赋权法对综合权重进行求解; 3) 采用 ITOPSIS 法求取各屋顶光伏接入方案的相对贴合度并进行排序。综合评价流程如图 2 所示。

2.1 基于 IAHP 法的主观权重计算

传统的 AHP 法在构造判断矩阵过程中需由专家根据九标度法对各指标进行两两比较,但在工程应用中标度难以准确判定,而且判断矩阵进行检验时易出现不一致性,需多次调整。为此,本文采用三标度法建立判断矩阵,简化了指标间标度的判定,并由拟优一致矩阵求取各指标的权重,避免了一致性检验的环节^[19-20]。方法的具体步骤如下。

1) 由专家根据三标度法对各指标间进行两两比较,构造比较矩阵 B 如下。

$$b_{ij} = \begin{cases} 2, i \text{ 元素比 } j \text{ 元素重要} \\ 1, i \text{ 元素与 } j \text{ 元素同等重要} \\ 0, j \text{ 元素比 } i \text{ 元素重要} \end{cases} \quad (14)$$

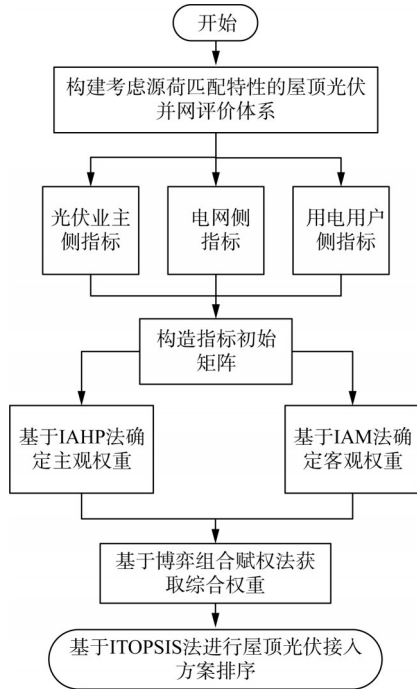


图2 规模化屋顶光伏并网方案评价流程

Fig. 2 Evaluation process of large-scale rooftop photovoltaic grid-connected scheme

式中 b_{ij} 为比较矩阵中的元素。

2) 由初始比较矩阵构建判断矩阵 P 。

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{k_i - k_j}{k_{\max} - k_{\min}} \left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}} - 1 \right) + 1, & k_i \geq k_j \\ \left[\frac{k_j - k_i}{k_{\max} - k_{\min}} \left(\frac{k_{\max}}{k_{\min}} - 1 \right) + 1 \right]^{-1}, & k_i < k_j \end{cases} \quad (15)$$

式中: p_{ij} 为判断矩阵中的元素; k_i 为比较矩阵中第 i 行元素之和; $k_{\max}$ 和 $k_{\min}$ 分别为 k_i 的最大值和最小值。

3) 由判断矩阵求解拟优一致矩阵 A 。

$$a_{ij} = 10 \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\lg \frac{p_{ij}}{p_{ji}} \right) \right) \quad (16)$$

式中: a_{ij} 为拟优一致矩阵中的元素; n 为指标总数。

4) 由拟优一致矩阵获得各指标的主观权重 w_{js} 。

$$w_{js} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (17)$$

2.2 基于IAM法的客观权重计算

由于传统熵权法易对指标的差异度过于敏感, 可能导致指标权重分配不合理, 本文采用一种反熵值^[21], 其特性与熵值的特性相反, 指标的差异程度越大, 反熵值越大, 该项指标的权重系数也越大。第 j 项指标的反熵值 $h_{d,j}$ 的计算如下。

$$h_{d,j} = - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ij} \ln(1 - \varepsilon_{ij}) \quad (18)$$

式中 ε_{ij} 为第 j 项指标里第 i 个方案的占比。

反熵权法在确定客观权重时虽能考虑指标间的差异性, 有效突出各方案的竞争力指标, 但并未考虑到指标间的波动强度, 而且电网侧各指标间的相关性较强, 反熵权法无法考虑到指标间的相关属性。故本文对反熵权法进行改进, 将其与 CRITIC 权重法进行结合, 引入绝对相关系数和标准差来反映指标的冲突性和波动程度, 使改进的反熵权法在赋权时能兼顾指标的相关性、差异性和波动性信息。具体的步骤如下。

1) 构造归一化矩阵。假设有 m 个待选方案, n 个指标, 然后采用 min-max 方法由初始矩阵 X 获取指标的归一化矩阵 X^1 , 其中对于正向指标。

$$x_{ij}^1 = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (19)$$

对于负向指标:

$$x_{ij}^{1'} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (20)$$

式中 x_{ij} 为归一化矩阵元素。

2) 求取各指标包含的信息量。指标 j 所承载的信息量 C_j 的计算如下。

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|) \quad (21)$$

式中: σ_j 为第 j 项指标数据的标准差, 用来表征指标的波动性; r_{ij} 为指标 i 与 j 之间的相关系数, 由于绝对值相等的相关系数反映的关联程度一致, 本文采用 $\sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|)$ 来反映指标的冲突性。

3) 根据式(18)和(21)求取改进反熵权法的客观权重 w_{jo} 。

$$w_{jo} = \frac{(h_{d,j} + \sigma_j) \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|)}{\sum_{j=1}^n (h_{d,j} + \sigma_j) \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|)} \quad (22)$$

2.3 基于博弈论的组合权重计算

针对传统赋权方法仅从客观或主观的角度直接获取权重, 无法兼顾决策者的意见和指标数据信息的问题, 本文将主、客观权重的特性进行结合, 采用基于博弈论的组合赋权方法获取综合权重, 以保证权重的科学性^[22], 具体的步骤如下。

1)根据IAHP法和IAM法分别确定的主客观权重向量 w_s 和客观权重向量 w_o 构造综合权重向量 w_c 。

$$w_c = \lambda_1 w_s^T + \lambda_2 w_o^T \quad (23)$$

式中 λ_1 和 λ_2 为组合权重系数。

2)基于博弈论思想对 λ_1 和 λ_2 进行优化,实现 w_c 与 w_s 、 w_o 的偏差最小,此时的目标函数为:

$$\min(\|w_c - w_s\|_2 + \|w_c - w_o\|_2) \quad (24)$$

根据矩阵微分理论将式(24)转化为:

$$\begin{pmatrix} w_s w_s^T & w_s w_o^T \\ w_o w_s^T & w_o w_o^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_s w_s^T \\ w_s w_o^T \end{pmatrix} \quad (25)$$

3)根据式(25)获取的最优系数 λ_1 和 λ_2 计算综合权重。

$$w_c = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} w_s^T + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} w_o^T \quad (26)$$

2.4 基于ITOPSIS法的综合评价

传统TOPSIS法根据计算各决策方案分别与最优、最劣方案间的相对距离,实现对决策方案的优劣排序^[23-25]。但传统TOPSIS法存在一定的不足:仅考虑了各方案与正、负理想解的相对位置,可能出现各方案评价结果相近,无法评估优劣的问题,而且忽略了各方案的动态趋势信息,无法实现可靠的综合评估。

相比于TOPSIS法,灰色关联评价法则从各方案与理想方案之间的关联性的角度来衡量方案的好坏,能够反映各方案整体指标的变化态势。因此,本文将两种评价方法进行结合,提出改进的TOPSIS法模型,首先,基于加权归一化数据矩阵获取正、负灰色关联系数矩阵,再分别求取对应的欧氏距离,然后进行加权结合获取新的综合距离测度,最后再根据改进的灰色相对贴合度进行方案的排序,从而增大各方案评价结果的区分度,提高评估的准确性。具体的步骤如下。

1)获取正向标准化矩阵。假设有 m 个待选方案, n 个指标,则原始指标矩阵 Z 为:

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (27)$$

本文所用指标仅有极大型和极小型两种类别,故只需将极小型指标转化为极大型指标。根据矩阵 Z 获取正向化矩阵 Z^1 :

$$z_{ij}^1 = \begin{cases} \max(z_j) - z_{ij}, & z_{ij} \text{ 为极小型指标} \\ z_{ij}, & z_{ij} \text{ 为极大型指标} \end{cases} \quad (28)$$

同时为消除指标量纲的影响,对正向化矩阵 Z^1 进行标准化处理,获取正向标准化矩阵 Z^2 。

$$z_{ij}^2 = z_{ij}^1 / \sqrt{\sum_{i=1}^m (z_{ij}^1)^2} \quad (29)$$

2)根据正向标准化矩阵 Z^2 构造加权归一化矩阵 Z^3 。

$$Z^3 = (z_{ij}^3)_{m \times n} = (z_{ij}^2 w_{cj})_{m \times n} \quad (30)$$

根据获得的加权矩阵 Z^3 确定正、负理想解 Z^+ 和 Z^- 。

$$\begin{cases} Z^+ = \left(\max_j z_{ij}^3 \right) = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+) \\ Z^- = \left(\min_j z_{ij}^3 \right) = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-) \end{cases} \quad (31)$$

3)求取灰色关联系数矩阵 $G_{+,ij}$ 和 $G_{-,ij}$,对应矩阵的元素计算如下。

$$\begin{cases} g_{+,ij} = \frac{\min_i \min_j |z_{ij}^3 - z_j^+| + \eta \max_i \max_j |z_{ij}^3 - z_j^+|}{|z_{ij}^3 - z_j^+| + \eta \max_i \max_j |z_{ij}^3 - z_j^+|} \\ g_{-,ij} = \frac{\min_i \min_j |z_{ij}^3 - z_j^-| + \eta \max_i \max_j |z_{ij}^3 - z_j^-|}{|z_{ij}^3 - z_j^-| + \eta \max_i \max_j |z_{ij}^3 - z_j^-|} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $g_{+,ij}$ 、 $g_{-,ij}$ 分别为矩阵 $G_{+,ij}$ 和 $G_{-,ij}$ 的元素; η 为分辨系数,一般取0.5。

4)分别求取正、负灰色关联系数矩阵 $G_{+,ij}$ 和 $G_{-,ij}$ 的欧式距离。

首先,与式(31)同理,分别确定矩阵 $G_{+,ij}$ 和 $G_{-,ij}$ 的正、负理想解 $G_{+,i}^+$ 、 $G_{+,i}^-$ 和 $G_{-,i}^+$ 、 $G_{-,i}^-$ 。然后分别求解矩阵与正、负理想解的欧式距离。

$$\begin{cases} E_{+,i}^1 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (g_{+,ij}^2 - g_{+,i}^+)^2} \\ E_{-,i}^1 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (g_{+,ij}^2 - g_{+,i}^-)^2} \\ E_{+,i}^2 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (g_{-,ij}^2 - g_{-,i}^+)^2} \\ E_{-,i}^2 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (g_{-,ij}^2 - g_{-,i}^-)^2} \end{cases} \quad (33)$$

式中: $E_{+,i}^1$ 、 $E_{-,i}^1$ 和 $E_{+,i}^2$ 、 $E_{-,i}^2$ 、分别为矩阵 $G_{+,ij}$ 和

$G_{-,ij}$ 中方案*i*与正、负理想解之间的欧氏距离。

5)求取改进的灰色相对贴合度。

根据式(33)构造改进的距离测度 μ_i^- 和 μ_i^+ ，其计算公式如(34)所示。 μ_i^- 值越大表明该方案与初始负理想解*Z*的关联程度较强，更接近负理想解；同理， μ_i^+ 值越大表明该方案更接近正理想解*Z*⁺。

$$\begin{cases} \mu_i^- = \beta_1 E_{-,i}^1 + (1 - \beta_1) E_{-,i}^2 \\ \mu_i^+ = \beta_1 E_{+,i}^1 + (1 - \beta_1) E_{+,i}^2 \end{cases} \quad (34)$$

式中 β_1 为距离权重系数，本文取0.5。

基于式(34)计算改进的灰色相对贴合度*S_i*，其计算公式如式(35)所示。待评价方案的*S_i*值越大，表明该方案更贴合理想方案。

$$S_i = \frac{\mu_i^+}{\mu_i^+ + \mu_i^-} \quad (35)$$

3 仿真算例验证

本文采用IEEE 33节点系统作为仿真算例，其电路拓扑图如图3所示，系统的具体参数见文献[26]，此处不再赘述。在系统中，节点13、14、15和16为商业负荷，节点30、31、32和33为工业负荷，其余节点除节点1外均为居民负荷。本文设置了7组屋顶光伏并网方案进行评价，具体的信息如表1所示。

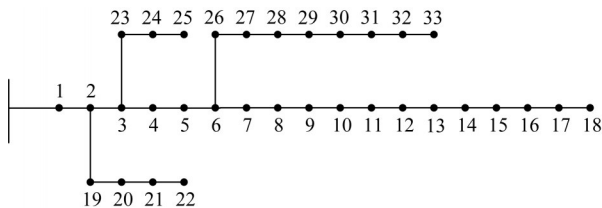


图3 IEEE 33节点系统拓扑图

Fig. 3 IEEE 33-node system topology diagram

表1 屋顶光伏并网方案信息

Tab. 1 Roof photovoltaic grid-connected scheme information

方案	屋顶光伏安装节点	并网容量/MW
1	4,21,24	0.2,0.1,0.4
2	4,21,24	0.1,0.05,0.4
3	6,25,27	0.05,0.4,0.1
4	9,30,32	0.1,0.3,0.2
5	14,18,32	0.15,0.15,0.2
6	18,25,32	0.1,0.35,0.15
7	20,21,22	0.2,0.2,0.1

3.1 指标参数设置与计算

本文在计算光伏业主侧指标时假定屋顶光伏余量上网的比例为20%，屋顶光伏发电系统的生命周期为25年，发电量按每年0.5%衰减，初期投资成本为4元/W，运维成本按初期投资成本的2%计算，每年按3%的比例增长。其余的仿真参数如表2所示^[27-28]。

此外，本文根据一年四季中屋顶光伏和3种用户负荷的典型功率曲线设置了4组典型场景，具体的功率曲线如图4所示^[29]。另外，由于每个屋顶光伏并网方案包含3个节点，峰谷差变化率和用电用户侧指标均取3个节点的指标数据的均值。

本文根据上述参数计算得出的各指标的仿真数据如表3所示。

表2 光伏业主侧指标的仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of photovoltaic owner side index

参数	数值
残值率/%	3
折现率/%	8
贴现率/%	6
销售电价/(元·kWh ⁻¹)	0.630 2
脱硫电价/(元·kWh ⁻¹)	0.453
平均碳价/(元·MWh ⁻¹)	12.16

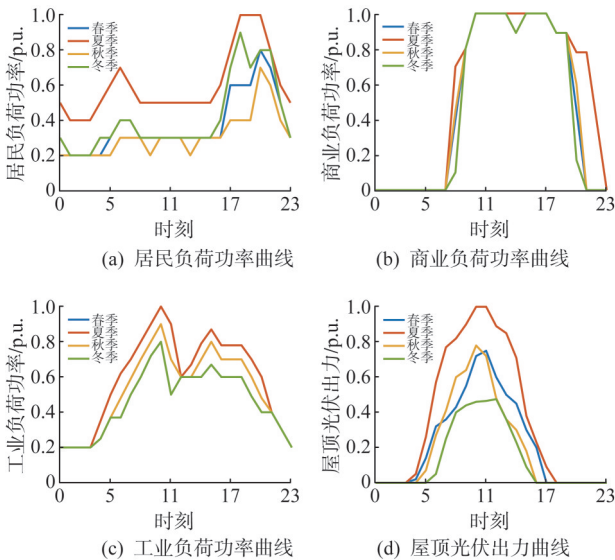


图4 屋顶光伏和各类型负荷的四季典型出力曲线

Fig. 4 Typical output curves of roof photovoltaic and various types of loads in four seasons

3.2 权重计算结果分析

为验证所提改进赋权方法的可行性，本文对赋

表 3 各指标仿真数据

Tab. 3 Simulation data of each index

方案	$D_1/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	$D_2/\text{万元}$	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
1	0.532 1	89.559 8	-0.059 2	0.021 2	1.433 4	0.036 5	0.408 3
2	0.526 9	74.023 3	-0.048 4	0.016 5	0.840 5	0.036 5	0.383 9
3	0.516 6	81.332 9	-0.075 6	0.026 4	1.314 1	0.031 3	0.398 9
4	0.511 7	92.713 9	-0.206 1	0.084 8	0.873 2	0.034 4	0.562 9
5	0.548 6	54.003 5	-0.181 8	0.088 4	0.860 0	0.039 8	0.534 0
6	0.560 1	56.830 0	-0.134 1	0.050 2	0.660 1	0.045 4	0.468 1
7	0.554 3	50.681 0	-0.002 5	0.009 0	2.217 6	0.015 6	0.411 1

权法改进前、后各指标的权重计算结果进行对比,如图 5 和表 4 所示。分析图 5 可知,在主观权重计算上,IAHP 法得到的权重的整体趋势与传统 AHP 法一致,均为电网侧和用电用户侧各指标的权重大于光伏业主侧指标。相比于 AHP 法,IAHP 法标度的判定更简易,而且无需一致性检验,有效简化了主观权重的计算,但 IAHP 法仅考虑了决策者的主观偏好程度,忽略了指标数据的客观属性。在客观权重计算方面,由表 4 可知,由于 IAM 法在传统反熵权法的基础上还考虑了指标间的相关属性,电网侧相关性较强的线损改善率 D_3 和平均电压偏差变化率 D_4 指标的权重均有所下降。改进后的反熵权法考虑了指标数据的离散、波动和冲突特性,所得权重更能体现数据包含的信息量,但也过分依赖指标数据的客观信息。相比于 IAHP 法和 IAM 法,IAHP-IAM-博弈组合赋权法所得权重大小在两者之间,兼顾了主观意见和客观信息量,更具合理性。

3.3 评价结果分析

为验证所提考虑源荷匹配特性的屋顶光伏并网评价指标体系的合理性,本文设置了以下两组场景并对两者的评价结果进行分析。

场景 1: 未考虑源荷匹配特性指标对决策的影

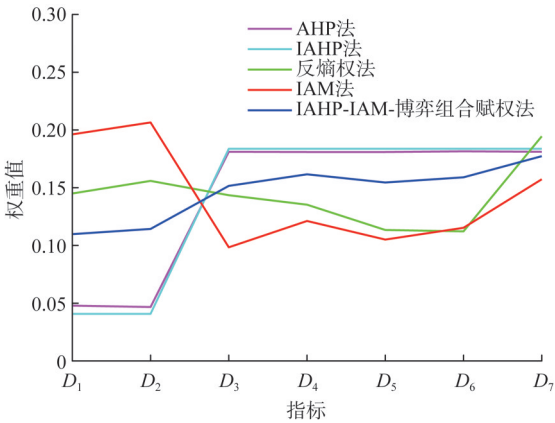


图 5 各指标权重值

Fig. 5 Weight values of each index

响,指标体系中未加入峰谷差变化率和匹配率指标。

场景 2: 本文所提指标体系。

场景 1 和 2 的评价结果如表 5 所示,根据相对贴合度值对各方案进行排序,相对贴合度值越大,表明该屋顶光伏接入方案更贴近理想方案,带来的综合效益较大。由表 5 可知,本文所提指标体系的评估结果中,方案 4 的综合相对贴合度值最大,为 0.649 1,即在进行屋顶光伏并网方案决策时,方案 4 优先实施。根据表 3 可知,方案 4 虽然造成的电压偏差较大,但其给光伏业主带来的效益最大,对系统的线损改善结果最佳,而且所安装屋顶光伏与用户负荷的匹配特性最佳。此外,考虑到各指标的权重大小且其中匹配率指标的权重最大,可知方案 4 综合最优,与评估结果一致,表明了本文所提评价方法的合理性。

对比场景 1 与 2 可知,加入考虑源荷匹配特性的指标后,对评价结果有比较大的影响。由于方案 3 待接入屋顶光伏与负荷协调性较差,由原来的排序最优降至第 3 名,源荷匹配特性较佳的方案 4 和 2

表 4 各指标权重计算结果

Tab. 4 Weight calculation results of each index

方法	权重值						
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7
AHP 法	0.047 9	0.046 7	0.181 1	0.180 9	0.180 9	0.181 5	0.181 1
IAHP 法	0.040 8	0.040 8	0.183 7	0.183 7	0.183 7	0.183 7	0.183 7
反熵权法	0.145 0	0.155 9	0.143 5	0.135 3	0.113 4	0.112 2	0.194 5
IAM 法	0.196 2	0.206 5	0.098 4	0.121 2	0.105 1	0.115 3	0.157 3
IAHP-IAM-博弈组合赋权法	0.109 8	0.114 3	0.151 6	0.161 6	0.154 5	0.159 0	0.177 3

则分别由原来的第 2、4 名上升至最优和次优方案。同时,在场景 1 中,方案 1 与方案 2 屋顶光伏安装节点相同,两者的评价数值相近,难以明显区分优劣,但考虑屋顶光伏出力与用户负荷的匹配特性对决策的影响后,两个方案的相对贴合度差值明显增大,增大了 14 倍左右。

为更好地衡量本文所提指标体系对各方案区分度的影响,分别将场景 1 和 2 中的各方案的相对贴合度值由大到小排序,经两两相邻相减后获取降序相对贴合度差值,所得结果如表 6 所示。由表 6 可知,加入考虑源荷匹配特性的指标后,各方案的最大、最小和平均降序相对贴合度差值均增大,其中最大、平均降序相对贴合度差值分别增大了 111.00 %和 45.04 %,可见,本文所提指标体系有效提高了方案间的整体区分度,具有合理性。

此外,为证明所提评价方法的优越性,本文对比了传统 TOPSIS 法、灰色关联评价法和所提 ITOPSIS 法的评价结果,评估结果如图 6 和表 7 所示。由图 6 可知,3 种评价方法得出的各方案的相对贴合度值具有相同的趋势,即均呈现交替上升和下降的变化趋势。分析表 7 可知,本文所提 ITOPSIS 法的排序结果与其他两种方法基本一致,均为方案 4、方案 2 和方案 3 分别居前三位,方案 7 居末位,可见本文所提 ITOPSIS 法具有适应性。同时,相比于其他两种方法得到的降序相对贴合度差

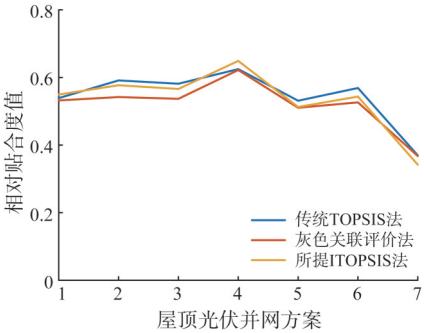


图6 3种评价方法的相对贴合度对比

Fig. 6 Comparison of the relative fit of the three evaluation methods

表 7 3种评价方法的评估结果对比

Tab. 7 Comparison of the evaluation results of the three evaluation methods

方法	方案排序结果	最大降序相对贴合度差值	最小降序相对贴合度差值	平均降序相对贴合度差值
TOPSIS 法	4>2>3>6>1>5>7	0.161 6	0.007 9	0.042 5
灰色关联评价法	4>2>3>1>6>5>7	0.142 8	0.004 8	0.042 4
ITOPSIS 法	4>2>3>1>6>5>7	0.170 7	0.006 0	0.051 2

值,本文所提方法的最大和平均降序相对贴合度差值更大,其中与 TOPSIS 法和灰色关联评价法相比,平均降序相对贴合度差值分别增大了 20.47 %和 20.75 %。可见,本文所提评价方法能够有效增大各屋顶光伏并网方案相对贴合度值的差异度,使各方案的优劣程度更加明显,所得的整体排序结果更具辨识度,有利于决策者对屋顶光伏接入方案进行选优。

综上,本文所提考虑源荷匹配特性的屋顶光伏并网指标体系和综合评价方法均能增大方案间的相对距离,能更好地反映屋顶光伏并网带来的综合效益与影响,指导屋顶光伏并网方案的优先级实施。

4 结论

本文针对规模化屋顶光伏接入配电网的排序决策问题,构建了考虑源荷匹配特性的屋顶光伏并网评价体系,提出了基于 IAHP-IAM-博弈组合赋权-ITOPSIS 法的综合评价方法,结合仿真算例,本文得出以下结论。

1)相比于传统指标体系,本文所提指标体系兼

表 5 各屋顶光伏并网方案评估结果

Tab. 5 Evaluation results of each roof photovoltaic grid-connected scheme

方案	场景 1 的相对贴合度值	场景 2 的相对贴合度值
1	0.590 1	0.549 5
2	0.588 1	0.577 0
3	0.605 6	0.566 0
4	0.599 2	0.649 1
5	0.460 6	0.512 6
6	0.507 2	0.543 5
7	0.393 6	0.341 9

表 6 不同场景的相对贴合度对比

Tab. 6 Comparison of relative fit of different scenes

降序相对贴合度差值	场景 1	场景 2
最大值	0.080 9	0.170 7
最小值	0.002 0	0.006 0
平均值	0.035 3	0.051 2

顾了光伏业主侧、电网侧和用电用户侧的需求,同时还考虑了屋顶光伏出力与用户负荷的匹配特性对决策的影响,更加全面、科学。此外,本文电网侧和用电用户侧指标在计算时考虑了多种典型场景,得出的指标数据更具合理性。

2)基于IAHP-IAM-博弈组合赋权法计算的权重兼顾了主观决策者的偏好程度和指标数据的离散性、波动性和相关性信息,所得的综合权重更具可靠性。

3)与传统指标体系和评价方法相比,本文所提指标体系和评价方法均能有效提高方案间的整体区分度,能有效指导规模化屋顶光伏有序接入配电网,更具优越性。

参考文献

- [1] ZHAO X G, XIE Y M. The economic performance of industrial and commercial rooftop photovoltaic in China [J]. *Energy*, 2019(187): 115961.
- [2] 于瑛,姚星,丑锦帅,等.城镇典型住宅建筑屋顶分布式光伏系统潜能分析[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(7): 182-190.
YU Ying, YAO Xing, CHOU Jinshuai, et al. Potential analysis of distributed PV systems on roof of typical residential building in urban area [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(7): 182-190.
- [3] 朱涛,常向阳,朱方林,等.江苏县域农村屋顶分布式光伏发电系统建设自然社会影响因素实证分析[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(5): 217-225.
ZHU Tao, CHANG Xiangyang, ZHU Fanglin, et al. Empirical analysis of natural and social factors affecting newly installed capacity of rural rooftop distributed photovoltaic system at county level in Jiangsu province [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(5): 217-225.
- [4] ALBOAOUH K A, MOHAGHEGHI S. Impact of rooftop photovoltaics on the distribution system [J]. *Journal of Renewable Energy*, 2020(1): 1-10.
- [5] 程耀华,张宁,王佳明,等.面向高比例可再生能源并网的输电网规划方案综合评价[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 33-42, 57.
CHENG Yaohua, ZHANG Ning, WANG Jiaming, et al. Comprehensive evaluation of transmission network planning for integration of high-penetration renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 33-42, 57.
- [6] 陈虎,张田,裴辉明,等.分布式光伏接入对电网电压和网损的影响分析[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(23): 63-69.
CHEN Hu, ZHANG Tian, PEI Huiming, et al. Analysis of distributed photovoltaic power influence on grid voltage and power losses [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(23): 63-69.
- [7] 陈力,胡钊,卫敬宣,等.一种新的光伏并网评价体系[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(2): 105-110.
CHEN Li, HU Po, WEI Jingyi, et al. A new evaluation system of grid-integrated PV generation [J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(2): 105-110.
- [8] WANG P, YU P, HUANG L, et al. An integrated technical, economic, and environmental framework for evaluating the rooftop photovoltaic potential of old residential buildings [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022(317): 115296.
- [9] CRISTEA C, CRISTEA M, BIROU I, et al. Economic assessment of grid-connected residential solar photovoltaic systems introduced under Romania's new regulation [J]. *Renewable Energy*, 2020(162): 13-29.
- [10] KAZEM H A, YOUSIF J, CHAICHAN M T, et al. Experimental and deep learning artificial neural network approach for evaluating grid-connected photovoltaic systems [J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(14): 8572-8591.
- [11] HE Y, MENDIS G J, WEI J. Real-time detection of false data injection attacks in smart grid: a deep learning-based intelligent mechanism [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(5): 2505-2516.
- [12] LIU J, XU F, LIN S. Site selection of photovoltaic power plants in a value chain based on grey cumulative prospect theory for sustainability: a case study in northwest China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017(148): 386-397.
- [13] SINDHU S, NEHRA V, LUTHRA S. Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: case study of India [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017(73): 496-511.
- [14] 吕志鹏,吴鸣,宋振浩,等.电能质量CRITIC-TOPSIS综合评价方法[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(1): 137-144.
LÜ Zhipeng, WU Ming, SONG Zhenhao, et al. Comprehensive evaluation of power quality on CRITIC-TOPSIS method [J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(1): 137-144.
- [15] 王诗蔓.基于可持续发展的政府投资光伏扶贫项目效益评价研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- [16] 王立. A企业太阳能光伏发电项目投资风险分析与评价[D].南京:东南大学,2019.
- [17] XU C, KE Y, LI Y, et al. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020(215): 112892.
- [18] 于群,霍筱东,何剑,等.基于斯皮尔曼相关系数和系统惯量的中国电网停电事故趋势预测[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(14): 5372-5381.
YU Qun, HUO Xiaodong, HE Jian, et al. Trend prediction of power blackout accidents in Chinese power grid based on spearman's correlation coefficient and system inertia [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(14): 5372-5381.
- [19] 张指辉,张毅,李健宁.基于改进层次分析法与熵权法的目标选择模型[J]. *探测与控制学报*, 2022, 44(6): 117-121.
ZHANG Zhihui, ZHANG Yi, LI Jianning. Target selection model based on improved AHP and entropy weight method [J]. *Journal of Detection & Control*, 2022, 44(6): 117-121.
- [20] 欧阳森,于业辉,张真.考虑负荷重要程度含DG中压配电网电压调控策略[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(9): 120-131.
OUYANG Sen, YU Yehui, ZHANG Zhen. Voltage regulation strategy of medium voltage distribution network with DG considering the importance of load [J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(9): 120-131.

(下转第181页 Continued on Page 181)