

基于 IAHP-变异系数法的分布式能源系统评价体系

彭怀午¹, 李安桂², 王 鑫², 牛东圣¹, 李 扬², 许晨琛¹

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安, 710065;

2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安, 710055)

摘要: 针对区域分布式能源综合利用项目后评价体系的缺乏, 建立了园区分布式能源系统评估模型, 为能源综合利用项目的建设提供参考. 从经济、能源、环保、可靠性四个方面定义了 11 项二级指标构建多维度的评价体系, 提出改进层次分析法(IAHP)-变异系数法的综合评价方法, 并对三个典型案例项目进行综合赋权计算分析, 量化分析指标. 分析表明, 本文提出的园区分布式能源综合评价方法可行, 并具有计算量小、使用方便、适用性宽等优点.

关键词: 园区分布式能源系统; 评价指标; 改进的层次分析法; 变异系数法; 综合评价模型

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0572-07

Distributed energy system evaluation matrix model and index quantification analysis based on IAHP-variation coefficient method

PENG Huaiwu¹, LI Angui², WANG Xin², NIU Dongsheng¹, LI Yang¹, XU Chenchen²

(1. Northwest Engineering Co. Ltd., Power China, Xi'an 710065, China;

2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Aiming at the lack of post-evaluation system of regional distributed energy comprehensive utilization project, the evaluation model of distributed energy system in the park is established to provide reference for the construction of energy comprehensive utilization project. In this paper, 11 secondary indexes were defined from the aspects of economy, energy, environmental protection and reliability to construct a multi-dimensional evaluation system, and the comprehensive evaluation method of improved analytic hierarchy process (IAHP)-coefficient of variation method was put forward. Analysis shows that the comprehensive evaluation method of distributed energy in the park proposed in this paper is feasible and has the advantages of small computation, easy to use and wide applicability.

Key words: distributed energy system; evaluation index; improved analytic hierarchy process; coefficient of variation method; comprehensive evaluation model

随着能源危机日渐严重, 人们对于能源的需求不再单一考虑经济因素, 如何在经济性、能源可持续性和环保性中寻求平衡成为世界性难题. 在此背景下, 能源互联网^[1]、微电网系统^[2]等概念相继被提出, 多能源耦合利用式的分布式能源系统成为当下最理想的系统^[3].

多能源式的分布式能源系统由传统能源系统衍生而来, 从单一能源转变为多能源互补, 可再生能源的利用率也越来越高. 分布式能源系统可将风能、地热能、太阳能等清洁能源与燃煤、天然气等传统能源与电能耦合起来, 通过多种能源之间的耦合调节, 优化能源利用效率, 以高效方式满足用户侧供电、供热、供冷之需求.

多能源耦合利用系统的研究, 不仅要建立能源综合利用耦合计算模型, 通过模型分析实现系统的协调优化, 还需要建立关于能源综合利用系统的评价方法及评价体系, 因为后者关系着所建立耦合模型的优化及多能源综合利用系统功能的良好实现. 故一个多层次、多维度的评价体系的建立与应用是非常必要.

目前在多能源耦合系统评估方面, 国内外学者已经做了一定的研究. 洪潇等^[4]针对智慧园区的建设验收, 从经济、能源、环境、社会 and 工程等方面建立了评价指标体系; 张涛等^[5]从经济、能源、环境三个方面应用熵权法和专家评价法进行建模计算; 蒋菱等^[6-7]分别针对智能电网、小

收稿日期: 2019-11-28

修改稿日期: 2020-07-10

基金项目: 十二五国家科技支撑课题合作单位基金资助项目(2011BAJ03B03-5)

第一作者: 彭怀午(1979—), 男, 教授级高工, 博士, 主要研究方向: 新能源发电规划设计与研究. E-mail: phive@163.com.

型能源互联网建立了一套评价指标体系; 吴强等^[8-12]基于层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)、投影寻踪法、AHP-熵权法、AHP-改进熵权法等不同的赋权方法, 建立了不同的系统配置评价模型。总体来说关于能源系统的优化配置以及能源耦合利用的研究较多^[13-14], 评价模型多用于系统选型配置, 缺乏对园区分布式能源系统项目后评价的评价模型。规划设计中由于某些评价指标不能得出精确的数值, 需用三角模糊数表示, 这会使得规划设计阶段评价并不准确, 仅能作为参考, 而实际运行后的案例可使指标具体化, 使得评价更精确, 为系统改进提供依据, 后评价有利于系统的运行改进。同时大多数评价模型中的赋权方法计算繁琐或有缺陷, 如层次分析法需进行一致性检验, 熵权法过于灵敏造成评价失效等。

基于上述问题, 本文提出了一种基于改进层次分析法 (Improved Analytic Hierarchy Process, IAHP) 与变异系数法相结合的园区分布式能源系统评价方法, 此方法通过多维度的指标体系对园区分布式系统项目进行项目后评价分析, 同时可克服层次分析法的一致性检验问题和其他客观赋权法的复杂计算问题, 减少了计算量, 增加了适用性。

1 评价指标数学模型的建立

1.1 评价指标

为实现园区分布式能源综合利用项目后评价的目的, 需要深入了解园区分布式能源系统与传统系统的不同, 分析能源互联网和微电网的发展趋势, 选择有代表性和针对性的指标建立评价体系^[15-17]。

关于评价体系的建立, 需考虑项目中电、冷、气、热等的能源利用的高效性, 投资的收益性和对环境影响的差异性。从经济性、能源利用、环境保护、可靠性4个维度出发并作为评价体系的一级指标, 依据这4个维度, 选择投资折合费、维护费用、一次能源消耗量及CO₂、NO_x排放量等11项指标作为二级指标, 建立了园区分布式能源综合利用项目后评价的指标体系, 如图1所示。

1.2 指标定量分析

图1中各个二级指标均设为定量型, 指标值越大越好的指标称为极大型, 指标值越小越好的指标称为极小型。



图1 评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system

1.2.1 经济性指标因子

(1) 投资折合费

年投资折合费 F_{cap} 主要由设备投资与折现率及设备使用寿命所求, 求解如下。

$$F_{cap} = \sum_t \sum_{n=1}^N C_n P_n^e \frac{I}{1 - (1 + I)^{-I_n}} \quad (1)$$

式中: C_n 为设备单位费用 (注: 本文中单位费用的单位均为元/kw); P_n^e 为设备额定功率 (注: 本文中功率的单位均为 kw/h); I 为折现率; I_{tech} 为设备使用寿命 (单位为年); N 为设备种类。

(2) 维护费用

年维护费用 $F_{O\&M}$ 由设备单位费用与设备功率与比例系数的乘机所得, 求解如下。

$$F_{O\&M} = \sum_t \sum_{n=1}^N C_n P_n^e (\epsilon_1 + \epsilon_2) \quad (2)$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 分别为人工费用比例系数和维护费用比例系数。

(3) 燃料费用

年燃料费用 F_{fuel} 由燃气输入功率、燃气价格、电价格等计算所得, 求解如下。

$$F_{fuel} = \sum_{t=1}^T (P_{g,t}^m P_{gas} + E_{de,t}^{buy} P_{de,buy,t} + P_{ren,t}^m P_{ren,buy,t}) \quad (3)$$

式中: $P_{g,t}^m$ 、 $E_{de,t}^{buy}$ 、 $P_{ren,t}^m$ 分别为燃气输入功率、购买电功率、可再生能源输入功率; P_{gas} 、 $P_{de,buy,t}$ 、 $P_{ren,buy,t}$ 分别为燃气价格 (注: 本文中价格单位均为

元)、购电价格、可再生能源价格。

1.2.2 能耗指标因子

(1)一次能耗

一次能耗 Q 由燃气输入功率、电厂发电效率、电网输电线损耗率等计算所得

$$Q = \sum_{t=1}^T (P_{g,t}^m + \frac{E_{ele,t}^{buy}}{\delta(1-\varphi)}) \quad (4)$$

式中: δ 为电厂发电效率; φ 为电网输电线损耗率。

(2)一次能源利用率

一次能源利用率由买卖的能源功率计算所得

$$P = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (L_{k,t} + E_{k,t}^{sell})}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (E_{k,t}^{buy} + R_{k,t})} \quad (5)$$

式中: $L_{k,t}$ 为用户 k 类能源需求功率; $E_{k,t}^{sell}$ 为系统售卖的 k 类能源功率; $E_{k,t}^{buy}$ 为系统购买的 k 类能源功率; $R_{k,t}$ 输入系统的 k 类可再生能源功率;

(3)清洁能源发电量占比

清洁能源发电量占比 I 用清洁能源(风、光)年发电量 Q_c 与园区年总发电量 Q_e 的比值表示。

1.2.3 环保因子

环境保护的指标一般考虑污染物的排放和治理污染物的税费,但治理税费与污染物排放量之间一般存在一个比例关系,一般指标的选取尽量避免相互之间的关系,故选取污染气体排放中占比最大的 CO_2 与 NO_x 的排放量作为环保因子的计算方法,能令结论更加合理。

(1) CO_2 、 NO_x 排放量

CO_2 、 NO_x 排放量 S_1 、 S_2 由燃气输入功率、购买电功率、 CO_2 、 NO_x 排放系数计算所得

$$S = \sum_{t=1}^T (P_{g,t}^m \sigma_{gas} + \frac{E_{ele,t}^{buy}}{\delta(1-\varphi)} \sigma_{coal}) \quad (6)$$

式中: σ_{gas} 、 σ_{coal} 分别表示所对应的 CO_2 、 NO_x 排放系数。

1.2.4 可靠性分析

(1)供电可靠性

供电可靠性 R 用某一监测时段内的实际供电时间 R_g 与电压检测的总时间 R_s 的比值表示。

(2)最大峰谷差占最大负荷比

最大峰谷差占最大负荷比 L 用夏季负荷峰谷差 L_s 与最大负荷 L_M 的比值表示。

(3)区域弃风、弃光率

区域弃风、弃光率 T 用区域年弃风、弃光电量 T_l 与清洁能源(风、光)年发电量 Q_c 的比值表示。

2 评价指标矩阵的建立

为实现多属性指标对多能源耦合分布式系统的评价分析,基于多属性指标,采用三角模糊数、层次分析法以及变异系数法对系统进行权重评价。具体流程图如图 2 所示。

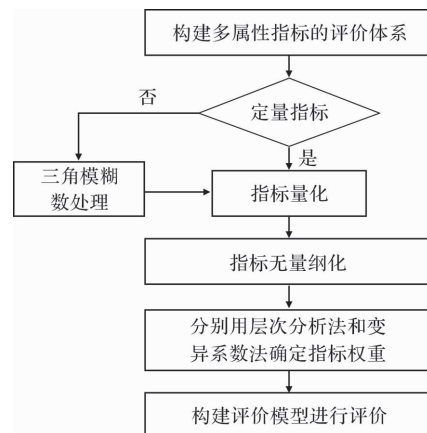


图 2 评价流程图

Fig. 2 Evaluation flow chart

2.1 定性型指标处理

本文所述评价模型中的指标均为定量型指标,并给出了计算方法;但为了增加模型的适用性,若存在定性型指标或不确定性指标,这里给出一种三角模糊数的方式处理定性型指标^[18]。

在论域 U 上,任意 $x \in U$, 有唯一 $F_A(x)$ 与之对应, $F_A(x)$ 为 x 的隶属函数,其三角模糊数的隶属度函数如下公式所示:

$$F_A(x) = \begin{cases} 1, & x = q \\ \frac{x-t}{q-t}, & t \leq x \leq q \\ \frac{p-x}{p-q}, & q \leq x \leq p \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $-\infty < t \leq q \leq p < +\infty$; $0 < x < 1$; t, q, p 的值为给定。

定性型指标用三角模糊数可表示为 (t, q, p) 。

2.2 指标矩阵的构建及无量纲化

对于 m 个系统方案与 n 个评价指标,第 i 个系统方案对应的第 j 个指标值可用 x_{ij} 表示,则该 m 个系统方案与 n 个评价指标可构成一个指标矩阵 A ,可表示为

$$A = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

指标矩阵建立后由于量纲不同需对指标矩阵进行无量纲化. 极大型指标与极小型指标的无量纲化方法不同, 对于极大型指标的无量纲化处理如下式所示.

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (9)$$

极小型指标的无量纲化处理可表示为

$$b_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (10)$$

式中: b_{ij} 表示第 i 个方案的第 j 个指标值进行规范化后得到的指标值; $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 表示为一个指标内所有指标值中对应的最大、最小指标值.

规范化后的指标矩阵 A 变换为无量纲指标矩阵 B , 矩阵 B 表示为

$$B = [b_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.3 改进的层次分析法及其赋权

指标经过归一化和规范化后采用改进的层次分析法与变异系数法分别确定各指标的权重.

层次分析法是一种常用的权重计算方法, 具有灵活、实用等特点, 但是传统的层次分析在判断矩阵阶数较少时还容易计算, 但是当判断矩阵阶数增大时, 权重计算将越来越繁琐, 一致性校验难度不断增大, 用起来不方便^[19]. 改进的层次分析法即在构造判断矩阵后, 计算最优传递矩阵, 最优传递矩阵的性质决定了无需一致性校验, 大大减少了原本的计算量, 使可操作性大大增强^[20].

2.3.1 判断矩阵模型

改进的层次分析法首先通过指标两两相互比较构造一个判断矩阵 C , 判断矩阵如下式表示

$$C = [c_{ij}] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1j} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{i1} & c_{i2} & \cdots & c_{ij} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: C_n 表示为第 n 个指标; c_{ij} 表示为指标 C_i 与 C_j 相对重要性的标度量化值, 其取值与专家的主观经验有关^[20]. c_{ij} 取值方法可表示为

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, C_i \text{ 比 } C_j \text{ 重要} \\ 0, C_i \text{ 与 } C_j \text{ 同样重要} \\ -1, C_j \text{ 比 } C_i \text{ 重要} \end{cases} \quad (13)$$

C 的最优传递矩阵 R 为

$$R = [r_{ij}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (c_{ik} - c_{jk})$.

R 的判断矩阵 G 为

$$G = [g_{ij}] = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1j} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{i1} & g_{i2} & \cdots & g_{ij} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, $g_{ij} = \exp(r_{ij})$.

2.3.2 权重计算

由判断矩阵 G 可求得的指标权重 ω'_i , 求解公式如下式所示.

$$\omega'_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{k=1}^n g_{ik}}}{\sum_{k=1}^n \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n g_{ik}}} \quad (16)$$

2.4 变异系数法及其赋权

用改进的层次分析法得到的是主观权重, 这里用变异系数法求客观权重, 变异系数法基于指标值求解对应指标的均值与标准差, 由此确定指标的变异系数, 再由变异系数求解指标的权重^[21].

指标均值求解公式为

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (17)$$

指标标准差求解公式为

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \quad (18)$$

变异系数求解公式为

$$V_j = \frac{s_j}{\bar{p}_j} \quad (19)$$

通过对各指标的变异系数作归一化处理, 可得到各指标的权重 ω''_j 为

$$\omega''_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (20)$$

2.5 综合赋权

根据层次分析法和变异系数法求得各指标权重后, 引入偏好系数 α 、 β , 得到结合权重. 偏好系数 α 、 β 的值由决策者人为控制 (α 和 β 的和为 1), 这样做可以控制评价模型主观性和客观性的比例. 该权重值的求解公式如下式所示.

$$\omega_j = \alpha \omega'_j + \beta \omega''_j \quad (21)$$

将所得结合权重与指标值相乘并进行累加, 得到系统的评分并转化为百分制, 计算方法如下.

$$f(x) = 100 \left(\sum_{j=1}^n \omega_j P_{ij} \right) \quad (22)$$

由此, 评价模型构建完成. 上述评价方法通过引入最优传递矩阵, 使得构造的判断矩阵无须进行一致性检验, 且判断矩阵失误最优传递矩阵

可由 MATLAB 软件输入函数代码直接计算出来,节省了大量计算步骤. 此外客观评价法中的变异系数法计算量小, 故该评价模型的整体计算难度与其他模型相比大幅度降低.

3 案例验证及分析

本文以三个建成的园区分布式能源系统为例, 验证评价模型的合理性.

案例 1: 能源网项目, 坐标天津, 规划面积为 80 万 km^2 , 一期工程 21.13 万 km^2 , 是一个典型的园区分布式能源系统建设工程.

案例 2: 某园区项目, 坐标北京, 是配有地热、太阳能、小型风电、生物质等多种可再生能源的园区多能源利用系统建设工程.

案例 3: 某扩建机场项目, 坐落中国中部, 具备充足的储能设备, 有完善的能源监控系统, 属于小型的分布式能源系统建设工程.

计算过程为: 用公式(1)~(6)计算各定量型指标的指标值, 建立指标矩阵 A , 再用公式(9)和(10)对指标矩阵进行无量纲化处理后得到指标矩

阵 B , 指标矩阵 B 如下:

$$B = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.738 & 1.000 \\ 0.000 & 0.677 & 1.000 \\ 1.000 & 0.296 & 0.000 \\ 1.000 & 0.753 & 0.000 \\ 0.313 & 0.000 & 1.000 \\ 1.000 & 0.828 & 0.000 \\ 1.000 & 0.944 & 0.000 \\ 1.000 & 0.668 & 0.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.667 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ 1.000 & 0.257 & 0.000 \end{bmatrix}$$

再根据改进的层次分析法构造指标矩阵, 依据相关专家的意见进行因素间重要性比较, 排序为: 供电可靠性 > 清洁能源发电量占比 = 区域弃风、弃光率 > 投资折合费 = 一次能耗 = 一次能源利用率 > CO_2 排放量 = NO_x 排放量 > 维护费用 = 燃料费用 = 最大峰谷差占最大负荷比, 依据此排序及公式(13)可构造判断矩阵. 构造的判断矩阵如表 1 所示.

表 1 判断矩阵

Tab. 1 Judgment matrix

c_{ij}	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}
c_1	0	1	1	0	0	1	1	1	-1	1	-1
c_2	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1
c_3	-1	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	0	-1
c_4	0	1	1	0	0	-1	1	1	-1	1	-1
c_5	0	1	1	0	0	-1	1	1	-1	1	-1
c_6	1	1	1	1	1	0	1	1	-1	1	0
c_7	-1	1	1	-1	-1	-1	0	0	-1	1	-1
c_8	-1	1	1	1	1	-1	0	0	-1	1	-1
c_9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
c_{10}	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1
c_{11}	1	1	1	1	1	0	1	1	-1	1	0

判断矩阵构造完成后, 利用公式(14)~(15)并借助 MATLAB 编程计算得到权重 ω'_j . 再由指标矩阵 Q 利用公式(17)~(20)计算得到权重 ω''_j . 主观权重 ω'_j 和客观权重 ω''_j 均计算完成, 用公式(21)计算综合指标权重 ω_j , 这里取偏好系数 $\alpha = \beta = 0.5$, 即令主观权重和客观权重所占权重比例相同, 得到三种权重如表 2 所示.

根据公式(22), 计算可得综合评估结果, 结果如表 3 所示. 其中, 项目 1 最终得分 68.9 分、项目 2 最终得分 48.8 分、项目 3 最终得分 41.6 分. 得分显示项目 1 较优, 项目 2 与项目 3 得分接近, 为保证该评价模型的准确性, 我们用多种赋权方法进行对比, 分别计算其指标权重和最终得分. 指标权重图结果如图 3 所示.

表 2 指标权重
Tab. 2 Index weight

指标	主观权重	客观权重	综合权重
F_{cap}	0.089 66	0.137 98	0.113 82
$F_{O\&M}$	0.036 12	0.131 33	0.083 73
F_{fuel}	0.051 96	0.097 75	0.074 86
Q	0.089 66	0.031 09	0.060 37
P	0.089 66	0.186 80	0.138 23
I	0.141 25	0.099 05	0.120 15
S_1	0.056 91	0.170 29	0.113 60
S_2	0.081 87	0.043 50	0.062 68
R	0.185 54	3.4E-06	0.092 77
L	0.036 12	0.001 31	0.018 72
T	0.141 25	0.100 89	0.121 07

表 3 最终得分
Tab. 3 Final score

项目	项目 1	项目 2	项目 3
指标 F_{cap} 得分	0	8.397 0	11.381 9
指标 $F_{O\&M}$ 得分	0	5.671 7	8.372 6
指标 F_{fuel} 得分	7.485 6	2.217 9	0
指标 Q 得分	6.037 4	4.548 0	0
指标 P 得分	4.327 0	0	13.822 9
指标 I 得分	12.015 0	9.943 4	0
指标 S_1 得分	11.359 9	10.722 0	0
指标 S_2 得分	6.268 2	4.186 8	0
指标 R 得分	9.277 2	0	6.184 8
指标 L 得分	0	0	1.871 6
指标 T 得分	12.107 0	3.113 2	0
最终得分	68.877 6	48.800 5	41.633 9

通过 TOPSIS 法和熵权法计算权重，发现三种方法确定的权重基本一致，在个别指标上有差异，如指标 10 和指标 11。分析认为其主要受主观因素的影响，但最终得分上的排序三者相同，证明本文所述评价模型的可行性。且三种评价方法中，本文所述评价方法的计算最为方便且计算量最少，体现出评价模型的优势。

综合各个评价模型，结果均显示项目 1 的优越性，其在一次能耗、一次能源利用率、清洁能源占比、供电可靠性等多个指标上得分较高，可作为区域分布式能源综合利用项目的示范工程，经验可供其他工程学习借鉴。项目 2、3 均需要提高可再生能源出力设备的出力占比，减少污染气体的排放。

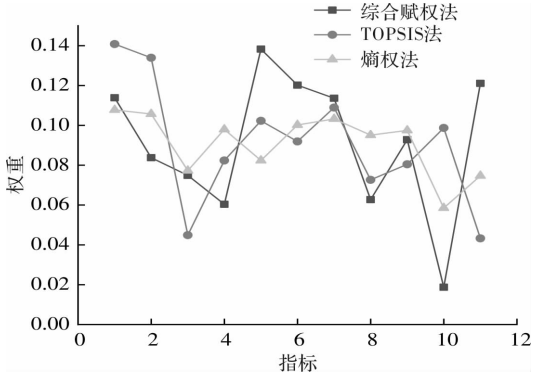


图 3 三种指标权重结果

Fig. 3 Results of weights of three indicators

4 结语

(1)本文建立了一种针对园区多能源耦合分布式系统的项目后评价模型，提出了通用性较强的指标，增加了评价模型的实用性。且该模型具有开放接口，对于不同的能源系统或决策，可适当对指标进行修改。

(2)本文提出的基于 IAHP 与变异系数法耦合的园区分布式能源系统(DES)评价矩阵模型为园区分布式能源系统的评价及项目后评价提供了一种新途径，与其他方法相比，本文所给出的赋权方法可行，并具有计算量小、使用方便、适用性广等优点。

(3)该评价模型适用于评价园区分布式能源综合利用项目，并对园区分布式能源系统的选型配置有一定的参考意义。

参考文献 References

[1] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system; Theenergyinternet [J]. Proc IEEE, 2011, 99: 133-148.

[2] 甘中学, 朱晓军, 王成, 等. 泛能网——信息与能量耦合的能源互联网[J]. 中国工程科学, 2015(9):98-104. GAN Zhongxue, ZHU Xiaojun, WANG Cheng, et al. Faneng Internet; Energy internet with information and energy coupling[J]. China Engineering Science, 2015 (9):98-104.

[3] JIN M, FENG W, LIU P, et al. MOD-DR:Microgrid optimal dispatch with demand response[J]. Applied Energy, 2017, 187: 758-776.

[4] 洪潇. 区域能源互联网多能源协调评价模型研究 [D]. 北京:华北电力大学(北京),2018. HONG Xiao. Multi-energy coordination evaluation model of regional energy internet [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

[5] 张涛,朱彤,高乃平,等,分布式冷热电能源系统优化设

- 计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3706-3713.
- ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design of distributed cold, hot and electric energy system and multi-index comprehensive evaluation method [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 35(14): 3706-3713.
- [6] 蒋菱, 袁月, 王峥, 等. 智能电网创新示范区能源互联网评估指标及评价方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 39-45.
- JIANG Ling, YUAN Yue, WANG Zheng, et al. Evaluation index and evaluation method of energy Internet in smart grid innovation demonstration zone [J]. Journal of Power System and Automation, 2016, 28(1): 39-45.
- [7] 杨永标, 郑红娟, 霍现旭, 等. 小型能源互联网多源优化综合评估技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(8): 53-60.
- YANG Yongbiao, ZHENG Hongjuan, HUO Xianxu, et al. Research on multi-source optimization and comprehensive assessment technology for small energy Internet [J]. Electric Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2017(8): 53-60.
- [8] 吴强, 程林, 黄河, 等. 基于层次分析法的能源互联网综合能效评估方法[J]. 电气应用, 2017, 36(17): 62-68.
- WU Qiang, CHENG Lin, HUANG He, et al. Energy Internet comprehensive energy efficiency evaluation method based on analytic hierarchy process [J]. Electrical Application, 2017, 36(17): 62-68.
- [9] 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): 3214-3222.
- [10] ZHU Xiaochen, NIU Dapeng, WANG Xu, et al. Comprehensive energy saving evaluation of circulating cooling water system based on combination weighting method [J]. Applied Thermal Engineering. 2019, 157.
- [11] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 174-182.
- CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dianchen, et al. Comprehensive evaluation index and method of regional integrated energy system [J]. Automation of Power System, 2018, 42(4): 174-182.
- [12] 张世翔, 吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2431-2439.
- ZHANG Shixiang, LU Shuaikang. Evaluation method of integrated energy system for microgrid in the park [J]. Grid Technology, 2018, 42(8): 2431-2439.
- [13] WANG Yi, CHENG Jiangnan, ZHANG Ning, et al. Automatic and linearized modeling of energy hub and its flexibility analysis [J]. Applied Energy. 2018, 211: 705-714.
- [14] 林威, 靳小龙, 穆云飞, 等. 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5829-5839.
- LIN Wei, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Multi-objective optimal hybrid power flow algorithm for regional integrated energy system [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(20): 5829-5839.
- [15] 徐健. 区域能源互联网运行控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- XU Jian. Research on regional energy Internet operation control technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [16] 李洋, 吴鸣, 周海明, 等. 基于全能流模型的区域多能源系统若干问题探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2230-2237.
- LI Yang, WU Ming, ZHOU Haiming, et al. Discussion on several problems of regional multi-energy system based on all-powerful flow model [J]. Grid Technology, 2015, 39(8): 2230-2237.
- [17] 康重庆, 王毅, 张靖, 等. 国家能源互联网发展指标体系与态势分析[EJ/OL]. 电信科学, 2019, 35(6): 2-14.
- KANG Chongqing, WANG Yi, ZHANG Jing, et al. National energy internet development index system and situation analysis [EJ/OL]. Telecommunications Science, 2019, 35(6): 2-14.
- [18] 杜康, 袁宏俊, 郑亚男. 基于三角模糊数及GOWA算子的区间型组合预测模型[J]. 统计与决策, 2019(16): 22-28.
- DU Kang, YUAN Hongjun, ZHENG Yanan. Interval combinatorial prediction model based on triangular fuzzy number and GOWA operator [J]. Statistics and Decision, 2019(16): 22-28.
- [19] HAN Lu, SONG Yonghui, DUAN Liang, et al. Risk assessment methodology for Shenyang Chemical Industrial Park based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Environmental Earth Sciences. 2015, 73, (9): 5185-5192.
- [20] WANG Xinyi, WANG Tiantian, WANG Qi, et al. Evaluation of floor water inrush based on fractal theory and an improved analytic hierarchy process [J]. Mine Water and the Environment. 2017, 36, (1): 87-95.
- [21] PROOST JOHANNES H. Calculation of the coefficient of variation of log-normally distributed parameter values. [J]. Clinical Pharmacokinetics, 2019, 58(9): 1101-1102.