

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.2.290

中图分类号: TM621

文献标志码: A

基于模糊层次法和熵权法的电源点到役评估法

陈海华(中国电源学会会员), 孙卫锋, 邹晓昕, 胡旦华, 余天保, 邵文妍
(中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福州 350003)

摘要: 针对我国近期电源点逐步到役的情况, 提出1种基于改进模糊层次法和熵权法的评估方法。首先基于层次分析法构建合适的层次结构, 形成判断矩阵。随后利用模糊层次分析法对各层级之间的判断矩阵进行处理, 得出面向重要性的权重向量。同时采用德尔菲调查法形成最末一级子准则层与目标层的评估矩阵, 经归一化处理后利用熵权法求得面向价值性的权值向量。然后把2种权值向量经过综合化处理, 形成综合权重向量。最后形成方案层对目标层的最终权重向量, 得出推荐意见。通过算例, 证明该评价方法灵活性强, 适用性广, 过程清晰合理, 结果直观准确。

关键词: 模糊层次法; 熵权法; 综合权重向量; 电源点到役; 多方案评估

Evaluation Method for Power Source Reaching Service Term Based on Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Entropy Weight Method

CHEN Haihua, *Member, CPSS*, SUN Weifeng, ZOU Xiaoxin, HU Danhua, YU Tianbao, SHAO Wenyan
(PowerChina Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: In view of the recent situation in which power sources gradually reach their service terms in China, an evaluation method based on improved fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and entropy weight method (EWM) is proposed. First, an appropriate hierarchical structure is constructed based on the analytic hierarchy process to form a judgment matrix. Then, FAHP is used to process the judgment matrix between various layers, and the importance-oriented weight vector is obtained. At the same time, the Delphi survey method is used to form an evaluation matrix for the last sub criterion layer and the target layer. After normalization, EWM is used to obtain the value-oriented weight vector. The two weight vectors are synthesized to form a comprehensive weight vector. Finally, the final weight vector of the scheme layer to the target layer is formed, and the best scheme is given. The result of an example shows that the proposed evaluation method has strong flexibility and wide applicability. In addition, it also has a clear and reasonable process, as well as intuitive and accurate results.

Keywords: Fuzzy analytical hierarchy process (FAHP); entropy weight method (EWM); comprehensive weight vector; power source reaching service term; multi-scheme evaluation

截止到2021年12月底,我国火电装机总量为129 678万kW,我国煤电机组目前平均服役年限为12年^[1]。近年来,结合“碳达峰、碳中和”目标的约束,福建省有9台机组将在“十四五”至“十五五”期间到役,这些机组多位于中心城市周边区域,退役后对电网运行影响较大,需要综合考虑退役机组的影响。在分析电源点到役策略时,当前主流的技术分析路线一般是以定性分析为主,结合部分定量

分析的方法,其存在以下不足。

(1)评估指标不够全面,且层次性不清晰。有些技术路线侧重从系统侧角度出发,论证是否满足供给需求及电力系统的安全^[2];有些侧重机组本身的指标是否满足国家政策要求,碳排放指标约束是其中非常典型的代表^[3];有些分析机组寿命及能效折减所带来的影响^[4]。上述分析方法均无法体现全寿命过程的管理理念,且由于评估指标层次性不足,某种因子的变化不能完整体现在整体方案的评估中,容易因为主观原因引起评估不准确^[5]。

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-05-07, 2022-06-14;
录用日期: 2022-06-24; 网络首发日期: 2022-08-12

(2)指标量化难度大,相互关联性也较弱。在当前主流的技术分析方法中,除了电力系统及负荷发展可以依靠预测外,其余方面在评估时定性分析占了多数^[6],甚至采用排他性分析方式,如把目标电源点退役后装机容量是否能满足负荷增长需求作为判定标准,这是电力系统规划普遍使用的1种约束性条件。通过这种方式来开展方案比选,通常会使得方案的评估过于刚性,对于实际情况不确定性的适应能力较差。

为了解决上述问题,本文以模糊层次法和熵权法为基础进行分析,其创新点在于:①分析并提取出电源点到役后各技术方案中的约束性条件,建立影响要素评估体系指标,为多级综合评估模型提供有效的指标输入,指标覆盖面广,且相互之间的逻辑关系完整;②用德尔菲调查法取得专家意见,并通过熵权法利用指标变异性的确定来专家意见权重,既考虑了专家意见,又用信息熵体系对数据进行了归一化处理,得出更为合理的价值性评分;③把层次分析法中约束性条件的重要性和熵权法中约束性条件的价值性相结合,创新综合权重计算方法,能够更好地表征指标对项目的满足度;④根据项目规模的大小和复杂程度,准则层可分为准则层和多级子准则层,熵权法仅用于处理最末一级评估矩阵,既体现出元素的关联性,又简化了计算过程;⑤受“双碳”政策的影响,火电机组到役后该如何处理已经成为“十四五”至“十五五”期间受到广泛关注的问题,本文所提的方法能较好地应用于该类型的项目,有较高的推广价值。

1 评估指标及方法优化

电力建设项目建设方案所涉及的指标众多,且针对具体项目方案进行评估时,所选取的指标体系通常也有较大区别,但总体上应遵循目的性、整体性、层次性、独立性和可量化等原则^[5-7]。在复杂项目的多方案比选评估中,首先应根据项目情况构建合适的层次系统结构,然后根据所搭建的分析模型,选择1个全面、客观、科学的指标体系。

电力行业方案决策需考虑经济、社会、能源、环境、政策多方面因素的综合作用^[8],特别是随着电力市场化改革不断深入,市场因素越来越成为项目方案中不可忽略的因素^[9]。对于城市周边区域主干电源点机组到役后的替代方案,一般可认为包括城市规划发展、环境保护、电力系统安全、建设方案、效率指标、业主方意愿等多项约束条件。当项目比较复杂时,这些约束条件会更进一步具体为整体及局部用电负荷水平、用热负荷水平、电源点筹建规划、政策导向、排放指标、可靠性、技术方案、建设成本、建设周期、厂址利用条件、运营成本、沉默成本、燃料条件、工艺水平、电价预期、电力企业决策偏好等元素,需要根据具体项目特点及评估目的进行选择。

电力行业中用于方案评估的常用数学方法主要有层次分析法、熵权法、理想解法和模糊综合评价法等。其中层次分析法、理想解法和模糊综合评价法受主观因素影响较大,属于主观赋权法,重视专家经验而忽略数据本身规律;熵权法虽然是1种客观赋值的分析法,但是其缺少重要指标间的横向比较,这种单一赋权方式难免考虑不周^[10];使用主、客观赋权结合的方式可以一定程度上降低人为主观因素,反映客观条件的变化,近年来被广泛应用于解决电力行业的各种问题^[11];模糊综合评价是1种基于模糊理论的综合评价法,通过模糊数学和隶属度等级评定对待评价指标进行评估,将其与层次分析法相结合,在体系评价、能效评估、系统优化等方面有着广泛的应用^[12]。

主、客观赋权结合的方法目前在应用中也存在一些问题:在使用熵权法时有些仅通过熵判断某个指标的离散程度来确定指标的权重大小,并未考虑指标间的相互联系,从而导致误判的结果^[8];有些研究仅就单一指标进行了关联性分析,但并未考虑到多指标评价体系下的综合评估^[13];在考虑综合权重计算时,有些研究引入权重系数,并通过肯德尔和谐系数计算^[11],这种计算方法在一定程度上受主观偏差影响,不利于结果的合理性;有些研究则考虑设立综合权重,使之与主观权重、客观权重之间

的距离平方和最小^[4]，这类算法在指标体系较多时，将导致计算过于复杂。

本文将对模糊层次法和熵权法的结合加以改进，用主、客观赋权结合的方法制定评估策略。为了使指标体系中各指标在横向和纵向均能产生联系，借鉴结构熵权法的计算思路，将层次分析法计算得出的重要性权重和熵权法计算得出的价值性权重相乘，利用所得的综合权重向量进行计算^[15]。

2 到役策略评估方法

2.1 构建层次系统结构

层次分析法最早由美国运筹学家萨蒂提出，其核心思想是将总目标分解成若干层次，一般来说包含目标层、准则层和方案层，当项目比较复杂时，准则层可进一步分解为多级子准则层。根据不同项目的具体情况，设置合适的层次数是进行分析比较的基础，随后将各评价指标填入相对应的位置，并根据逻辑关系构建出层次系统结构。对于城市周边区域主干电源点机组到役后的替代方案，其层次结构一般如图 1 所示。

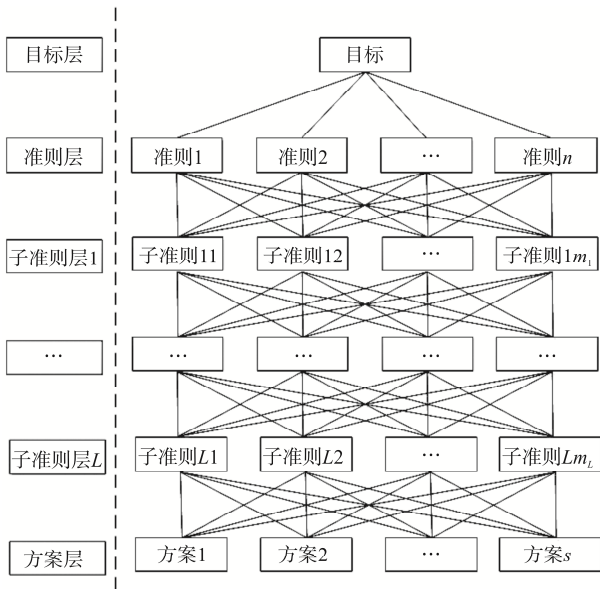


图 1 系统层次结构示意

Fig. 1 Schematic of hierarchical structure of system

最末一级子准则层的约束条件记为 C ，准则层和其余子准则层约束条件记为 B 。依次构建目标层

与准则层、准则层与子准则层、子准则层与方案层之间的判断矩阵 R ，如无子准则层，则直接建立准则层与方案层之间的判断矩阵 R ，记为 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ ， n 为判断矩阵所对应的下层的元素数量，采用两两比较的方式，以上一层次某个因素为准则，用比较标度 r_{ij} 来表达下一层次中第 i 个因素与第 j 个因素的相对重要性(或偏好优劣)， r_{ij} 的取值规则见表 1。

表 1 比较标度取值规则

Tab. 1 Rule of comparison scale value

r_{ij}	因素 i 与因素 j 比较	r_{ji}
0.5	同样重要	0.5
0.6	稍微重要	0.4
0.7	明显重要	0.3
0.8	强烈重要	0.2
0.9	极端重要	0.1

2.2 模糊层次法计算重要性权值向量

(1)利用转换公式 $f_{ij} = (r_i - r_j) / (2n + 1/2)$ 将判断矩阵 R 转换为模糊一致性判断矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times n}$ ，可不具有一致性的判断矩阵 R 调整成为具有一致性的矩阵 F 。其中， r_i 和 r_j 分别为判断矩阵 R 第 i 行和第 j 行的和。

(2)利用和行统一法求矩阵 F 的排序向量 W ，从而形成排序向量的初值，即

$$W^{(0)} = (w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n)^T = \left(\frac{\sum_{j=1}^n f_{1j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij}} \quad \frac{\sum_{j=1}^n f_{2j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij}} \quad \dots \quad \frac{\sum_{j=1}^n f_{nj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij}} \right)^T \quad (1)$$

(3)利用转换公式 $e_{ij} = f_{ij} / f_{ji}$ 将所述模糊一致性判断矩阵 F 转换为互反型矩阵 $E = (e_{ij})_{n \times n}$ ，即采用特征值法进行迭代精度计算的准备。

(4)以 $V_0 = W^{(0)}$ 为特征值法的迭代初值，通过迭代公式 $V_{k+1} = EV_k$ 得到特征向量 V_{k+1} ，并获取所述特征向量 V_{k+1} 的无穷范数 $\|V_{k+1}\|_\infty$ 。若 $\|V_{k+1}\|_\infty - \|V_k\|_\infty < \varepsilon$ ，则将所述特征向量 V_{k+1} 进行归一化，得到权值向量，完成迭代，即

$$W^{(k)} = \left(\frac{V_{k+1,1}}{\sum_{i=1}^n V_{k+1,i}} \quad \frac{V_{k+1,2}}{\sum_{i=1}^n V_{k+1,i}} \quad \dots \quad \frac{V_{k+1,n}}{\sum_{i=1}^n V_{k+1,i}} \right)^T \quad (2)$$

否则, 以 V_{k+2} 为特征值的新迭代初值, 再次迭代, 即

$$V_{k+2} = \frac{V_{k+1}}{\|V_{k+1}\|_\infty} = \left(\frac{v_{k+1,1}}{\|V_{k+1}\|_\infty} \quad \frac{v_{k+1,2}}{\|V_{k+1}\|_\infty} \quad \dots \quad \frac{v_{k+1,n}}{\|V_{k+1}\|_\infty} \right)^T \quad (3)$$

根据层级数量的不同, 当无子准则层时, 权值向量仅有 WA 和 WC_j ; 如含有子准则层, 则增加 WB_l , 以此类推。其中, WA 为目标层与准则层之间的权值向量, WB_l 为准则层与子准则层之间的权值向量, WC_j 为最后一层(子)准则层与方案层之间的权值向量, j 的取值范围与最后一层子准则层约束性条件数量有关, l 的取值范围与子准则层层数有关。

2.3 熵权法计算价值性权值向量

利用德尔菲调查法获取若干专家对第 i 个到役策略在最后一层子准则层的各所述约束条件 C 下的评估值, 形成评估矩阵 $U_i = (u_{ij'k'})_{m' \times n'}$ 。其中: $u_{ij'k'}$ 为第 i 个到役策略下第 k' 个专家对第 j 个约束条件 C 下的评估值, 满足五标度取值法; m' 为最后一层子准则层的约束条件数量; n' 为专家数量。

对评估矩阵 U_i 进行归一化处理, 得到标准化评估矩阵 $P_i = (p_{ij'k'})_{m' \times n'}$, 即对数据去量纲化处理:

$$p_{ij'k'} = \frac{u_{ij'k'} - \min(u_{ij'})}{\max(u_{ij'}) - \min(u_{ij'})}, \quad u_{ij'k'} \text{ 为正向指标}; \quad p_{ij'k'} = \frac{\max(u_{ij'}) - u_{ij'k'}}{\max(u_{ij'}) - \min(u_{ij'})}, \quad u_{ij'k'} \text{ 为逆向指标}。u_{ij'} \text{ 为第 } i \text{ 个到役策略下所有专家对第 } j \text{ 个约束条件 } C \text{ 下的评估值集合}。$$

根据信息论, 把信息中排除冗余后的平均信息量称为信息熵。根据数据信息熵计算方法求标准化评估矩阵 P_i 的信息熵向量 $Q_i = (q_{ik'})$, 其中, $q_{ik'} = -\frac{1}{\ln m'} \sum_{j'=1}^{m'} t_{ij'k'} \ln t_{ij'k'}$, $t_{ij'k'} = \frac{p_{ij'k'}}{\sum_{j'=1}^{m'} p_{ij'k'}}$ 。如果 $t_{ij'k'} = 0$, 则定义此时 $q_{ik'} = 0$ 。

根据信息熵向量得到权值向量 $H_i = (h_{ik'})^T$, 其中, $h_{ik'} = \frac{1 - q_{ik'}}{m' - \sum_{k'=1}^{m'} q_{ik'}}$ 。

由评估矩阵 U_i 和权值向量 H_i 得到基于专家意

见的价值性权值向量 $WH_i = U_i \times H_i = (wh_{ik'})$ 。

2.4 计算最终权重向量

最后一层子准则层第 j 个约束条件 C 的权值向量 $W^{(k)}$ 为 $WC_j = (wc_{ji})^T$, 其中, wc_{ji} 为第 i 个到役策略下第 j 个约束条件下的价值性权重。将权值向量 WH_i 和权值向量 WC_j 相乘, 使基于专家价值性意见的数据综合到约束条件向量中, 得到权值向量 $S_i = (s_{ij})$, 其中, $s_{ij} = \frac{wc_{ij} wh_{ij}}{\sum_{i=1}^I wc_{ij} wh_{ij}}$, wh_{ij} 为第 i 个到役策略下第 j 个约束条件下的综合权重, I 为到役策略数量, i 为到役策略编号, j 为最后一层子准则层的约束条件编号。将所述权值向量 S_i 作为最后一层子准则层的综合权值向量。

各层的权值向量通过层次分析法进一步得到最终权重向量, 并根据最终权重向量得到对各所述到役策略的评估结果。目标层的权值向量 $W^{(k)}$ 为 $WA = (wa_l)^T$, 其中, l 为方案数量, L 为准则层的约束条件数量; 准则层和除最后一层子准则层的子准则层的第 l' 个约束条件的权值向量 $W^{(k)}$ 为 $WBl_{li'} = (wbt_{li'})_{Li'}^T$, 其中, t 为该约束条件所属层的序号, Lt' 为该约束条件所属层下一层的约束条件数量。

根据目标层的权值向量 WA , 准则层和除最后一层子准则层外的子准则层的权值向量 $WBl_{li'}$, 以及最后一层子准则层的权值向量 S_i , 得到最终权重向量为

$$WF = \begin{bmatrix} S_{1k'} \\ S_{2k'} \\ \vdots \\ S_{lk'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} WBT_1 \\ WBT_2 \\ \vdots \\ WBT_{L'} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} WBl_1 \\ WBl_2 \\ \vdots \\ WBl_{L'} \end{bmatrix} \cdot WA \quad (4)$$

式中, T 为准则层和除最后一层子准则层外的子准则层数量之和。

最终权重向量 WF 中最大值对应的到役策略即为推荐策略。

2.5 评估方法流程

本文所提城市周边区域主干电源点机组到役策略评估方法流程如图 2 所示。

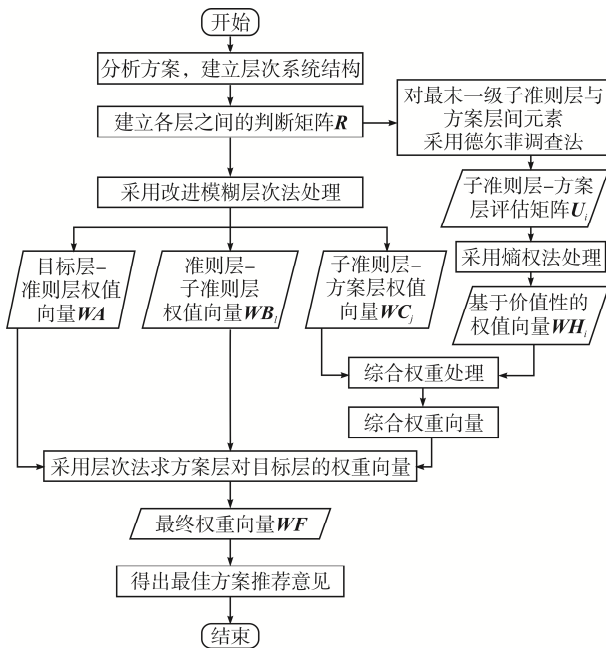


图 2 评估方法流程

Fig. 2 Flow chart of evaluation method

3 算例分析

以福州某煤电厂为例,“十四五”期间此厂达到合同设计年限需要退役。根据省“十四五”规划、

电力结构调整、节能减排工作等要求,提出了3个到役后的方案,即原址重建燃煤电厂(方案 S1)、新址重建燃煤电厂(方案 S2)、原址改建燃气电厂(方案 S3),以本文所提到役策略评估方法进行评估。层次系统结构根据工程具体情况构建,如图 3 所示。

根据层次系统结构依次构建目标层与准则层、准则层与子准则层、子准则层与方案层之间的判断矩阵 RA 、 RB 和 RC , 并对判断矩阵赋值, 以 RA 为例

$$RA = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.7 & 0.6 & 0.8 \\ 0.6 & 0.5 & 0.2 & 0.8 & 0.7 & 0.9 \\ 0.4 & 0.8 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.7 \\ 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.4 \\ 0.4 & 0.3 & 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.2 & 0.1 & 0.3 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用转换公式将判断矩阵 RA 转换为矩阵 FA , 并求其排序向量 $WA=(0.18 \ 0.19 \ 0.18 \ 0.14 \ 0.16 \ 0.15)^T$, 以权值向量 $WA^{(0)}$ 作为特征值法的迭代初值 V_0 进一步求精度较高的权值向量 $WA^{(k)}$ 。经过 3 次迭代计算后计算精度为 0.000 1, 最终求得权值向量 $WA=(0.199 \ 4 \ 0.206 \ 4 \ 0.199 \ 4 \ 0.124 \ 1 \ 0.142 \ 2 \ 0.128 \ 4)^T$, 同理可求得其余各权值向量 WB_i 和 WC_j 。

根据德尔菲调查法,结合层次系统结构形成评估矩阵 U_i , 即

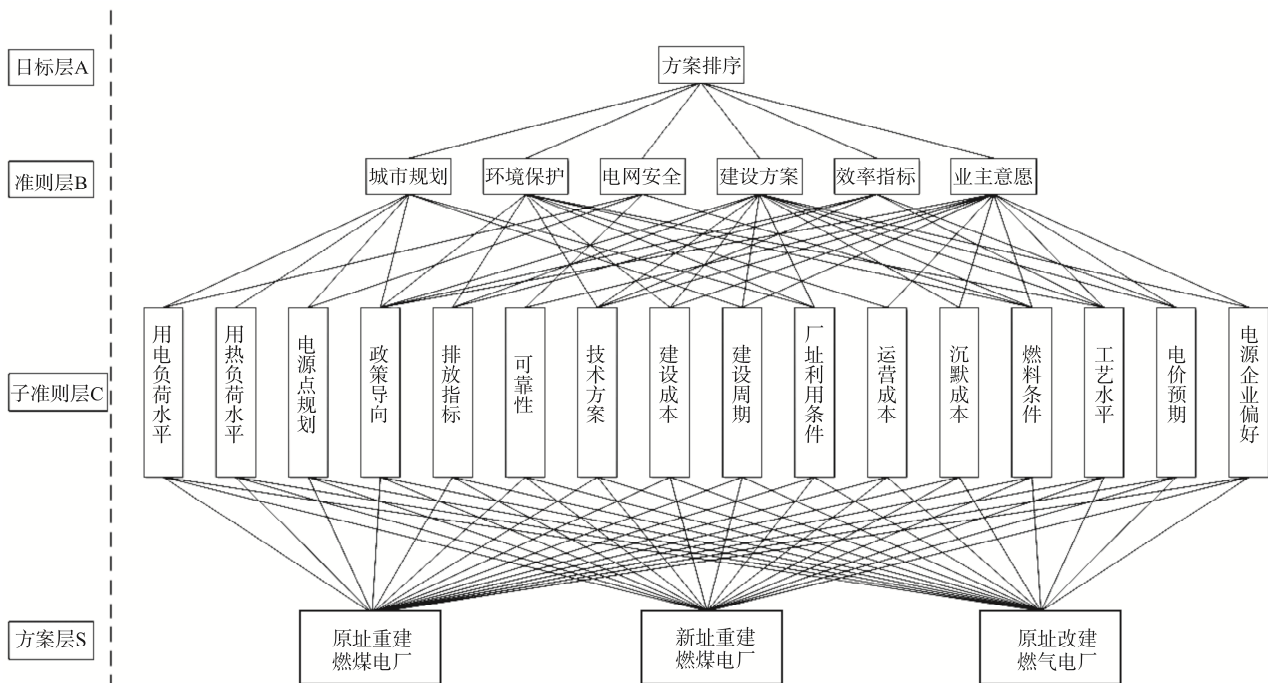


图 3 到役策略评估层次结构

Fig. 3 Hierarchical structure of evaluation on reaching-service-term strategy

$$U_1 = \begin{pmatrix} 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 4 & 4 & 4 & 3 & 4 & 3 \\ 5 & 5 & 5 & 4 & 4 & 5 \\ 5 & 5 & 5 & 4 & 4 & 5 \\ 3 & 3 & 3 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 4 & 5 & 5 & 5 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 5 & 4 \\ 4 & 3 & 4 & 3 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 5 & 5 & 4 & 5 \\ 5 & 5 & 4 & 4 & 5 & 5 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 3 & 4 & 3 & 4 \\ 5 & 5 & 4 & 4 & 5 & 5 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 4 & 4 \end{pmatrix} \quad (6)$$

对 U_1 进行归一化处理求得信息熵, 得出专家权重向量 $H_1=(0.13 \ 0.19 \ 0.21 \ 0.13 \ 0.22 \ 0.13)$, 进一步计算子准则层与方案层间各要素的价值性权值向量 $WH_1=(5.00 \ 3.74 \ 4.66 \ 4.66 \ 3.00 \ 4.87 \ 4.66 \ 4.22 \ 3.69 \ 5.00 \ 4.65 \ 4.66 \ 4.65 \ 3.57 \ 4.66 \ 4.65)$ 。

把权值向量 WH_i 和权值向量 WC_j 通过综合权重处理得出综合权重向量 S_i , 并进行归一化处理, 以 S_1 为例可得 $S_1=(0.372 \ 7 \ 0.329 \ 8 \ 0.418 \ 4 \ 0.404 \ 6 \ 0.299 \ 1 \ 0.403 \ 5 \ 0.391 \ 3 \ 0.361 \ 7 \ 0.341 \ 7 \ 0.412 \ 6 \ 0.366 \ 4 \ 0.429 \ 4 \ 0.415 \ 6 \ 0.312 \ 2 \ 0.393 \ 7 \ 0.388 \ 5)$ 。

通过以上计算方法可得出所有目标层与准则层权值相量 WA 、准则层与子准则层权值相量 WB 和综合权重向量 S_i , 随后计算方案层对目标层的最终权重向量 $WF=(0.379 \ 2 \ 0.286 \ 1 \ 0.334 \ 7)^T$ 。方案 S1 的最终权重为 0.379 2, 方案 S2 的最终权重为 0.286 1, 方案 S3 的最终权重为 0.334 7, 说明方案 S1 相对其他方案具有较大优势, 应优先考虑, 方案 S3 优于方案 S2。故方案选择顺序是: 原址重建燃煤电厂(方案 S1)、原址改建燃气电厂(方案 S3)、新址重建燃煤电厂(方案 S2)。

4 结论

随着我国市场经济的进一步发展和“双碳”目标的提出, 电源点特别是煤电厂到役策略呈现出越来越明显的多元性, 需要妥善制定评估办法才能给出合理的结论。本文所提评估办法, 通过实际算例分析可以得出以下结论。

(1)层次分析法和熵权法相结合是 1 种主、客观赋权的评估法, 可以在一定程度上降低人为主观因素的影响, 反映客观变化规律, 模糊理论的引入可以进一步消除主观因素的影响。本文所提评估法还能有效反映方案评估中各指标间的层次逻辑关系, 通过综合权重处理, 不但使专家在给出意见时因为横向比较而更加客观, 而且这些意见可以通过层次法的逻辑关系反馈到纵向的体系结构中, 使得最终的结论更加准确。

(2)评估法适用于工程方案评估的各个阶段, 并根据评估准确性的需要调整指标体系, 具有较好的灵活性与可扩展性, 特别是在一些约束关系复杂的工程中, 增加分析层级可以使指标体系独立性更好。层级间判断矩阵的作用不会影响其整体性, 且由于综合权重处理仅发生在最末一级子准则层和方案层之间, 计算简便。

(3)电厂到役后的策略在厂址利用上主要有原厂建设和移址新建 2 种, 在原料利用上主要有使用原燃料和改用新燃料 2 类, 加上其他影响因素, 往往会衍生出多种到役策略。区别于现行的评估方法, 本文所提评估方法对于多方案评估有更好的适应性, 仅需在方案层设置对应的方案元素, 建立层级间逻辑关系即可实现, 当项目情况发生变化时, 调整起来也较方便, 特别适合应用于边界条件不确定性大、评价响应要求迅速的项目中。

参考文献:

[1] 王双童, 杨希刚, 常金旺. 国内外煤电机组服役年限现状研究[J]. 热力发电, 2020, 49(9): 11-16.
Wang Shuangtong, Yang Xigang, Chang Jinwang. Research on status of service life of coal-fired units at home and abroad [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 11-16. (in Chinese)

[2] 王伟臣, 张天宇, 宣文博, 等. 考虑机组组合和网络结构优化的电网规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 108-115.
Wang Weichen, Zhang Tianyu, Xuan Wenbo, et al. Power system planning method considering unit commitment and optimal transmission switching [J]. Proceedings of the CSU-

- EPSA, 2021, 33(2): 108-115. (in Chinese)
- [3] 李军徽, 邵岩, 朱星旭, 等. 计及碳排放量约束的多区域互联电力系统分布式低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4715-4728.
- Li Junhui, Shao Yan, Zhu Xingxu, et al. Carbon emissions constraint distributed low-carbon economic dispatch of power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4715-4728. (in Chinese)
- [4] 原一方, 尚策. 减碳中多阶段的煤电机组退役与新能源、储能规划协同[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 140-147.
- Yuan Yifang, Shang Ce. Coordination of multi-stage renewable energy, energy storage planning and coal-fired unit retirement under carbon reduction goal [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 140-147. (in Chinese)
- [5] 艾欣, 秦珺晗, 胡寰宇, 等. 基于最优最劣法-熵权-逼近理想解排序法的电网安全与效益综合评价[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 60-68.
- Ai Xin, Qin Junhan, Hu Huanyu, et al. Comprehensive evaluation of power grid security and benefit based on BWM entropy weight TOPSIS method [J]. Modern Electric Power, 2021, 38(1): 60-68. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 李利, 韩胜峰, 郑焕坤, 等. 考虑源-荷不确定性的微能源网区间规划方法[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 290-304.
- Li Li, Han Shengfeng, Zheng Huankun, et al. Interval planning method for micro energy grid considering source-load uncertainties [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 290-304. (in Chinese)
- [8] 艾欣, 赵旭州, 胡寰宇, 等. G1-熵权-独立性权法在电网发展态势感知中的应用[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3481-3487.
- Ai Xin, Zhao Xuzhou, Hu Huanyu, et al. G1-entropy-independence weight method in situational awareness of power grid development [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3481-3487. (in Chinese)
- [9] 李军徽, 安晨宇, 李翠萍, 等. 计及调峰市场交易的储能-新能源-火电多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23): 6391-6406.
- Li Junhui, An Chenyu, Li Cuiping, et al. Multi-objective optimization scheduling method considering peak regulating market transactions for energy storage-new energy-thermal power [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6391-6406. (in Chinese)
- [10] 赵昱宣, 韩畅, 林振智, 等. 含可再生能源的电力系统两阶段核心骨干网架优化策略[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 371-386.
- Zhao Yuxuan, Han Chang, Lin Zhenzhi, et al. Two-stage core backbone network optimization strategy for power systems with renewable energy [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 371-386. (in Chinese)
- [11] 杜明坤, 黄媛, 刘俊勇, 等. 考虑梯级电站开发规划接入的电网适应性综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 1-8, 16.
- Du Mingkun, Huang Yuan, Liu Junyong, et al. Comprehensive evaluation on grid adaptability considering the access of cascaded power stations under planning and development [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2021, 33(9): 1-8, 16. (in Chinese)
- [12] 杨东, 刘治钢, 穆浩. 应用模糊理论的卫星电源系统状态量化评估方法[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 212-221.
- Yang Dong, Liu Zhigang, Mu Hao. Condition quantitative assessment method for satellite electrical power system with fuzzy theory [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 212-221. (in Chinese)
- [13] 姚忠胜, 钱虹, 吴文军, 等. 基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 28-34.
- Yao Zhongsheng, Qian Hong, Wu Wenjun, et al. Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved gray relation [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 28-34. (in Chinese)

[14] 倪良华, 闻佳妍, 张晓莲, 等. 基于受冲击与断开后果脆弱度的电网关键线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 81-87.

Ni Lianghua, Wen Jiayan, Zhang Xiaolian, et al. Critical lines identification in power grid based on vulnerability of line under impact and disconnection consequence [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 81-87. (in Chinese)

[15] 韩俊, 韩文花, 陈曦, 等. 基于熵权-灰色关联分析降低区域停电损失举措研究[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 10-17.

Han Jun, Han Wenhua, Chen Xi, et al. Research on reducing regional outage loss based on entropy weight-gray correlation analysis [J]. Electric Power, 2020, 53(5): 10-17. (in Chinese)



陈海华

作者简介:

陈海华(1980—), 男, 中国电源学会会员, 通信作者, 本科, 正高级工程师。研究方向: 电力工程。E-mail: chenhh@fedi.cn。

孙卫锋(1979—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 电力工程。E-mail: 18650998079@163.com。

邹晓昕(1984—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 电力工程。E-mail: zouxiaoxin@fedi.cn。

胡旦华(1978—), 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 电力工程。E-mail: hudh@fedi.cn。

余天保(1989—), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 电力工程。E-mail: yu tianbao@fedi.cn。

邵文妍(1988—), 女, 硕士, 高级工程师。研究方向: 电力工程。E-mail: 379904617@qq.com。

(责任编辑: 耿越)



来源: 中国文明网