

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240162

基于最大评价差异的储能多场景区间模糊层次选型方法

齐彩娟¹, 李牧远², 吴奕辰², 王 钰³, 宋蕙慧²

(1. 国网宁夏电力有限公司经济技术研究院, 宁夏 银川 750000; 2. 哈尔滨工业大学(威海)新能源学院, 山东 威海 264200; 3. 中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 为满足新能源场站升级背景下多类型储能的选型需求, 提出一种基于最大评价差异的区间模糊层次选型方法。从经济、环境、安全、技术、动态维度建立储能评价指标集, 并基于梯形区间二型模糊集量化表征指标数据。分别基于专家多轮评价法和指标相对重要性法实现主、客观赋权, 并采用最大评价差异法融合赋权。建立了基于多准则妥协解排序法的区间模糊层次选型模型, 实现多场景下储能方案优选。IEEE39算例结果表明, 所提方法能有效提升方案区分度, 可根据波动抑制与削峰填谷场景特性给出针对性方案, 为新能源场站配储提供决策支撑。

关键词: 储能选型; 最大评价差异; 区间二型模糊集; 主客观评价; 层次分析法

A fuzzy hierarchical selection method for an energy storage multi scenario interval based on maximum evaluation difference

QI Caijuan¹, LI Muyuan², WU Yichen², WANG Yi³, SONG Huihui²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Economic & Technical Research Institute, Yinchuan 750000, China; 2. School of New Energy, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264200, China; 3. Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Changchun 130000, China)

Abstract: To accommodate the selection needs for multiple types of energy storage in the context of upgrading new energy stations, a fuzzy hierarchical selection method based on the maximum evaluation difference is proposed. Energy storage evaluation indicators are established from economic, environmental, safety, technical, and dynamic dimensions, and indicator data is quantitatively represented using trapezoidal interval type-2 fuzzy sets. Subjective and objective weights for these indicators are assigned through both multiple rounds of expert evaluation and criteria importance, with integration achieved using the maximum evaluation difference method. A fuzzy hierarchical selection model based on the ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje method is developed to facilitate the optimal selection of energy storage solutions across various scenarios. Case results on the IEEE 39-bus system demonstrate that the proposed method effectively enhances the differentiation of solution. Targeted solutions are provided based on the characteristics of scenarios involving fluctuation suppression and peak shaving and valley filling, offering decision support for energy storage integration at new energy stations.

This work is supported by the Natural Science Foundation of the Ningxia Hui Autonomous Region (No. 2023AAC03823).

Key words: energy storage selection; maximal evaluation difference; interval type-2 fuzzy set; subjective and objective evaluation; analytic hierarchy process

0 引言

在新能源场站逐步成为构网主力背景下^[1], 因储能在调峰调频、波动平抑等场景具备灵活性调节

能力, 配置独立或共享储能已成为新能源场站升级改造的趋势^[2-4]。但物理机制多元、技术参数差异等问题给储能选型带来挑战^[5], 如何兼顾场站经济、技术、环境等多维需求, 科学评估异质储能整体性能, 实现场站配储最优选型具有重要意义。

储能选型^[6]、选址^[7]和定容^[8]是储能规划配置的三大问题, 部分学者在研究容量规划时同步实现储

基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目资助 (2023AAC03823)

能选型。文献[9]分别对重力、蓄电池、压缩空气储能进行容量规划, 并采用熵权法进行适应性分析。为平抑风电功率波动, 文献[10]以最小化日均成本和最大化平抑波动为优化目标, 确定了蓄电池与超级电容的最优配比。文献[11]从多时间尺度进行考量, 建议抽水蓄能可用以满足大功率需求, 电池储能和氢储能可用以短期能量均衡。针对冷热电联供系统配储需求, 文献[12]从全周期角度给出冷、热、电储最佳配置策略。类似地, 文献[13]提出一种区域多能源系统多元储能规划模型, 提高了能源利用效率和系统经济性。上述研究从经济、技术角度对储能配置问题进行了有益探讨, 但仅将选型作为配置模型的中间环节, 未能系统性建立选型分析模型。

从问题特征来看, 储能选型模型从经济、技术等多维指标出发, 旨在直接或间接量化各指标与最优选型方案间的影响关系, 部分环节涉及理性评价与人工决策, 属于典型的多属性决策问题^[14]。针对高渗透光伏系统储能适用性问题, 文献[15]建立分层综合评估体系并分析不同储能特点及差异。针对一次调频需求, 文献[16]兼顾调频及其他指标, 采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)与逼近理想解法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)实现储能最优规划。文献[17]基于对偶犹豫毕达哥拉斯模糊理论建立技术评价模型, 为可再生能源配储选型提供决策支持。文献[18]以能量存储性能为导向建立一种概率对偶犹豫模糊选型方法, 并基于山西省储能选型实例进行了灵敏度分析。文献[19]采用区间二型模糊集对储能指标进行度量, 综合考虑主客观评价权重建立了大规模储能选型模型, 对选型中的模糊语义因素描述更为充分。文献[20]建立一种三角模糊集储能遴选决策模型, 得出抽水蓄能适用于季节性储能、飞轮储能适用于惯性响应的结论。然而, 现有规划优化类研究侧重于建立选型优化模型, 更聚焦目标函数的表征方法, 对各目标间的权重配置缺乏系统性原则, 导致模型主观性强; 而多属性决策类研究则存在选型因素不充分、评价流程可解释性差、场景适应性单一化等缺点。

针对上述问题, 本文提出一种基于最大评价差异的储能多场景区间模糊层次选型方法。首先, 基于储能多维需求建立选型指标集, 并用区间二型模糊集量化指标。然后, 由专家多轮评价法实现主观赋权, 由指标相对重要性(criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)实现客观赋权, 基于最大评价差异原则进行融合赋权。基于多准则妥协解排序(visekriterijumska optimizacija I kompromisno

resenje, VIKOR)对多应用场景下储能性能进行优选排序, 得到储能规划结果。所提方法中, 区间二型模糊集量化指标有效处理了指标数据模糊性信息, 最大评价差异原则保障了评价分值区分度, 多准则妥协解排序实现了群体平均贡献及单项突出性能的平衡决策。基于 IEEE39 算例与其他 3 种方案对比分析, 验证了所提方法的有效性。

1 储能选型流程及区间二型模糊理论

1.1 场站随配储能选型流程

提出的区间模糊层次选型方法如图 1 所示。

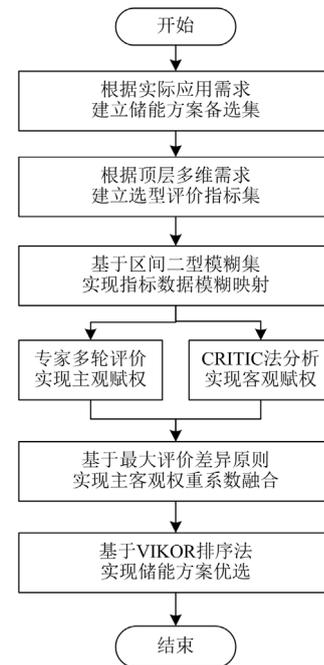


图 1 场站随配储能选型流程图

Fig. 1 Flowchart for selection of energy storage with station

步骤一: 根据场站实际场景需求及安全制约、地理制约、技术制约等因素, 建立储能方案备选集。

步骤二: 根据顶层多维评价需求, 从经济、技术、环境、安全等角度建立选型评价指标集合。

步骤三: 基于指标数据分布分别设计区间二型模糊集, 建立指标与区间二型模糊集间的映射关系。

步骤四: 基于专家多轮评价与一致性校验实现主观赋权, 基于 CRITIC 数据分析法实现客观赋权。

步骤四两种赋权方式在实施过程中分别独立, 所获得的赋权结果可单独作为指标权重结果。

步骤五: 基于最大评价差异原则, 建立主观、客观权重融合模型, 确定储能选型指标综合权重。

步骤六: 基于 VIKOR 排序法, 计算方案群体效用值与个体遗憾值, 依排序结果决定选型方案。

1.2 区间二型模糊理论基础

储能选型涉及大量人工决策过程，方案评价结果往往以极好至极差范围内的语言形式给出，具有模糊性强、可量化性差等特点。区间二型模糊集是一种重要的模糊数学工具^[21]，能够有效处理不确定性和模糊性信息，提高决策准确性，被广泛应用于决策分析、控制系统、模式识别、优化问题等领域。梯形区间二型模糊集是一类具有工程实用价值的区间二型模糊集，其描述范围可由如图2所示带状梯形阴影区表征，隶属度函数 \tilde{H}_i 定义如式(1)所示。

$$\tilde{H}_i = (H_i^U, H_i^L) = \left\{ \begin{array}{l} (a_{i1}^U, a_{i2}^U, a_{i3}^U, a_{i4}^U, H_1(a_{i2}^U), H_2(a_{i3}^U)); \\ (a_{i1}^L, a_{i2}^L, a_{i3}^L, a_{i4}^L, H_1(a_{i2}^L), H_2(a_{i3}^L)) \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中： H_i^U 、 H_i^L 分别为上、下隶属度函数； a_{i1}^U 、 a_{i2}^U 、 a_{i3}^U 、 a_{i4}^U 、 a_{i1}^L 、 a_{i2}^L 、 a_{i3}^L 、 a_{i4}^L 分别为上、下隶属度函数顶点横坐标； $H_1(a_{i2}^U)$ 、 $H_2(a_{i3}^U)$ 、 $H_1(a_{i2}^L)$ 、 $H_2(a_{i3}^L)$ 分别为上、下隶属度函数非零顶点纵坐标。

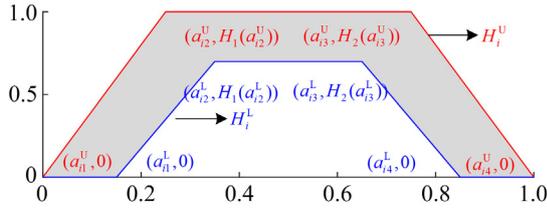


图2 区间二型模糊集示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interval type-2 fuzzy sets

为更加灵活地使用区间二型模糊集描述事物属性的模糊性，分别定义区间二型模糊集的加减法、数乘、乘法及除法运算，具体形式可参考文献[19]。

除上述运算外，难以仿照实数运算作逻辑推演，构造更为复杂的模糊函数关系，因此有必要定义模糊集与确切数值间的映射关系，基于去模糊化后确切数值间的函数关系来表征模糊集间的函数关系。梯形区间二型模糊集去模糊化方法如式(2)所示。

$$\Psi(\tilde{H}_i) = \frac{(a_{i4}^U - a_{i1}^U) + (a_{i4}^L - a_{i1}^L)}{8} + \frac{a_{i1}^U + a_{i1}^L}{2} + \frac{(H_1(a_{i2}^U)a_{i2}^U - a_{i1}^U) + (H_2(a_{i3}^U)a_{i3}^U - a_{i1}^U)}{8} + \frac{(H_1(a_{i2}^L)a_{i2}^L - a_{i1}^L) + (H_2(a_{i3}^L)a_{i3}^L - a_{i1}^L)}{8} \quad (2)$$

式中， $\Psi(\tilde{H}_i)$ 为 \tilde{H}_i 的去模糊化值。

2 基于最大评价差异的模糊层次选型法

2.1 建立储能方案备选集及评价指标集

为满足新能源场站多场景储能需求，综合考虑

应用范围广、技术成熟度好的机械与电化学电池两类储能。机械类储能包括基于水流机械能的抽水蓄能与基于空气内能的压缩空气储能，电化学电池储能包括应用范围最为广泛的锂离子电池、发明时间最为悠久的铅酸电池以及近年来作为技术补充的液流电池与钠硫电池，上述储能依次排序构成方案备选集 $P_F = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}$ ，方案总数记为 P 。

储能选型决策需要考虑多维性能对总体需求的影响，从经济、环境、安全、技术、动态五大维度出发，建立如图3所示的储能选型评价指标集 $Q_F = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5\}$ ，指标总数记为 Q 。经济维度 q_1 考虑单位功率成本 $q_{1,1}$ 、单位容量成本 $q_{1,2}$ 、一次循环成本 $q_{1,3}$ ；环境维度 q_2 考虑单体能量密度 $q_{2,1}$ 、单体功率密度 $q_{2,2}$ 、污染排放程度 $q_{2,3}$ 、生态资源破坏程度 $q_{2,4}$ ；安全维度 q_3 考虑运行安全性 $q_{3,1}$ ；技术维度 q_4 考虑典型功率范围 $q_{4,1}$ 、典型容量范围 $q_{4,2}$ 、单体循环效率 $q_{4,3}$ 、年循环效率退化因子 $q_{4,4}$ 、响应时间 $q_{4,5}$ 、循环次数 $q_{4,6}$ 、日历寿命 $q_{4,7}$ 、持续充放电时间 $q_{4,8}$ 、技术成熟度 $q_{4,9}$ ；动态维度 q_5 考虑日均电压偏差 $q_{5,1}$ 和日均相角偏差 $q_{5,2}$ ，两指标均与电力系统潮流情况有关，定义如式(3)所示。

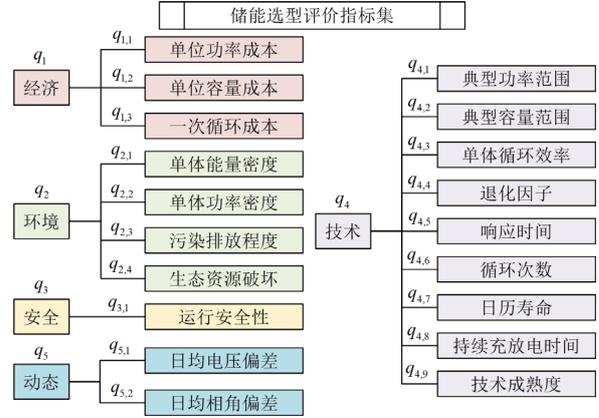


图3 储能选型评价指标集

Fig. 3 Evaluation index set for energy storage selection

$$\begin{cases} \Delta\bar{U} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{39} \frac{|U_{i,t} - U^*|}{U^*} \\ \Delta\bar{\theta} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{39} \frac{|\theta_{i,t}|}{2\pi} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\Delta\bar{U}$ 、 $\Delta\bar{\theta}$ 分别为指标 $q_{5,1}$ 和 $q_{5,2}$ ； t 为第 t 个时刻； $U_{i,t}$ 、 $\theta_{i,t}$ 分别为第 i 个节点的电压幅值和相角，需通过求解式(4)所示的潮流方程得到； U^* 为额定电压。

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j=1}^n U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j=1}^n U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \\ \theta_{ij,t} = \theta_{i,t} - \theta_{j,t} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为第 i 个节点净注入有功、无功功率; $\theta_{ij,t}$ 为节点 i 、 j 的相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路导纳 Y_{ij} 的实部、虚部; n 为系统节点总数。

2.2 基于专家多轮评价的主观赋权法

经验丰富的专家的评价意见是储能选型决策的重要参考。基于专家多轮评价意见及一致性校验方法, 实现选型评价主观赋权, 具体步骤如下。

1) 建立指标重要性判断矩阵。基于业内专家意见, 调研确定各指标的相对重要性, 基于表 1 所示的 9 级标度设计问卷, 并将结果映射为区间二型模糊集, 建立如式(5)所示的指标重要性判断矩阵 $\tilde{\mathbf{D}}$ 。

表 1 9 级标度及模糊集映射关系

| 语言变量 | 对应的区间二型模糊集 |
|-----------------------|---|
| 极端次于(L ₁) | (0.125,0.137,0.149,0.167;1,1); (0.133,0.141,0.147,0.154;0,9,0,9) |
| 强烈次于(L ₂) | (0.154,0.173,0.193,0.222;1,1); (0.167,0.179,0.189,0.200;0,9,0,9) |
| 明显次于(L ₃) | (0.200,0.234,0.270,0.333;1,1); (0.222,0.244,0.263,0.286;0,9,0,9) |
| 稍微次于(L ₄) | (0.286,0.370,0.455,0.667;1,1); (0.333,0.385,0.435,0.500;0,9,0,9) |
| 同等重要(L ₅) | (1.0,1.0,1.0,2.0;1,1); (1.0,1.0,1.0,1.5;0,9,0,9) |
| 稍微重要(L ₆) | (1.5,2.2,2.7,3.5;1,1); (2.0,2.3,2.6,3.0;0,9,0,9) |
| 明显重要(L ₇) | (3.0,3.7,4.3,5.0;1,1); (3.5,3.8,4.1,4.5;0,9,0,9) |
| 强烈重要(L ₈) | (4.5,5.2,5.8,6.5;1,1); (5.0,5.3,5.6,6.0;0,9,0,9) |
| 极端重要(L ₉) | (6.0,6.7,7.3,8.0;1,1); (6.5,6.8,7.1,7.5;0,9,0,9) |

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11} & \cdots & \tilde{d}_{1a} & \cdots & \tilde{d}_{1b} & \cdots & \tilde{d}_{1Q} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{d}_{a1} & \cdots & \tilde{d}_{aa} & \cdots & \tilde{d}_{ab} & \cdots & \tilde{d}_{aQ} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{d}_{b1} & \cdots & \tilde{d}_{ba} & \cdots & \tilde{d}_{bb} & \cdots & \tilde{d}_{bQ} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{d}_{Q1} & \cdots & \tilde{d}_{Qa} & \cdots & \tilde{d}_{Qb} & \cdots & \tilde{d}_{QQ} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, \tilde{d}_{ab} 表示指标 a 相比于指标 b 的重要程度, $\tilde{d}_{ab} = L_x, x \in \{1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$, 且其主对角线对称元素满足 $\tilde{d}_{ba} = L_{(10-x)}$; 当 $a=b$ 时, $\tilde{d}_{aa} \triangleq L_5$ 。

2) 一致性校验。为避免主观评价产生矛盾, 保证指标重要性尽量满足如式(6)所示的逻辑传递性, 需对 $\tilde{\mathbf{D}}$ 进行一致性校验, 校验方法如式(7)所示。

$$\tilde{d}_{ac} = \tilde{d}_{ab} \times \tilde{d}_{bc} \quad (6)$$

$$C_R = C_1/R_1 = \frac{\lambda_{\max} - Q}{(Q-1)R_1} \quad (7)$$

式中: C_R 为一致性比率; C_1 为一致性指标; R_1 为随机一致性指标; λ_{\max} 为 $\tilde{\mathbf{D}}$ 去模糊化后矩阵的最大特征根。 R_1 取值参考表 2。

表 2 随机一致性指标参考取值

| 阶数 | R_1 | 阶数 | R_1 | 阶数 | R_1 |
|----|--------|----|--------|----|--------|
| 1 | — | 8 | 1.4379 | 15 | 1.5980 |
| 2 | 0 | 9 | 1.4797 | 16 | 1.6046 |
| 3 | 0.5389 | 10 | 1.5079 | 17 | 1.6153 |
| 4 | 0.9165 | 11 | 1.5367 | 18 | 1.6213 |
| 5 | 1.1433 | 12 | 1.5538 | 19 | 1.6302 |
| 6 | 1.2921 | 13 | 1.5732 | 20 | 1.6374 |
| 7 | 1.3753 | 14 | 1.5863 | 21 | 1.6416 |

3) 计算主观权重。当 $C_R < 0.1$ 时, 可认为矩阵 $\tilde{\mathbf{D}}$ 逻辑传递性较好, 可根据式(8)和式(9)计算主观权重, 否则应重复问卷调研, 直至满足一致性校验。

$$\tilde{r}_j = (\tilde{d}_{j1} + \tilde{d}_{j2} + \cdots + \tilde{d}_{jQ})/Q \quad (8)$$

$$w_j^{\text{sub}} = \Psi(\tilde{r}_j / (\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \cdots + \tilde{r}_Q)) \quad (9)$$

式中: \tilde{r}_j 为指标 j 的模糊算术平均值; w_j^{sub} 为归一化后的指标 j 的主观权重。

2.3 基于 CRITIC 分析的客观赋权法

储能基础数据是其多维属性的客观反映, 挖掘数据潜在信息及特征对储能决策具有重要意义。基于 CRITIC 法^[22]分析指标变异性与信息量, 实现储能区间模糊层次选型评价客观赋权, 具体步骤如下。

1) 评价指标数据矩阵归一化。为消除数据量级及量纲差异对选型评价的影响, 对评价指标数据矩阵进行归一化和去量纲处理。设原始指标性能矩阵为 \mathbf{Z} , 去模糊化后的矩阵 \mathbf{Z}' 如式(10)所示。

$$\mathbf{Z}' = \begin{bmatrix} z'_{11} & \cdots & z'_{1j} & \cdots & z'_{1Q} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z'_{i1} & \cdots & z'_{ij} & \cdots & z'_{iQ} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z'_{P1} & \cdots & z'_{Pj} & \cdots & z'_{PQ} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $z'_{ij} = \Psi(z_{ij})$ 表示第 i 个方案下第 j 类指标去模糊化后的数据。

采用式(11)方法对正向指标(数值越大则优势越大)和负向指标(数值越小则优势越大)进行归一化和去量纲处理。

$$\begin{cases} c'_{ij} = \frac{z'_{ij} - z_{\min,j}}{z_{\max,j} - z_{\min,j}}, \text{若} j \text{为正向指标} \\ c'_{ij} = \frac{z_{\max,j} - z'_{ij}}{z_{\max,j} - z_{\min,j}}, \text{若} j \text{为负向指标} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $z_{\max,j}$ 、 $z_{\min,j}$ 分别为各个方案下的第 j 项指标的最大值和最小值; c'_{ij} 为处理后的值。

2) 计算指标变异性与信息量。计算方法如式(12)所示。

$$\begin{cases} \bar{c}'_j = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P c'_{ij} \\ S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (c'_{ij} - \bar{c}'_j)^2}{P-1}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: \bar{c}'_j 为指标 j 的数据均值; S_j 为第 j 个指标的标准差。

指标变异性 R_j 计算方法如式(13)所示。

$$R_j = \sum_{j'=1}^Q (1 - r_{jj'}) \quad (13)$$

式中, $r_{jj'}$ 为指标 j 与 j' 的 Pearson 相关系数。

指标信息量 C_j 计算方法如式(14)所示。

$$C_j = S_j \sum_{j'=1}^Q (1 - r_{jj'}) = S_j \times R_j \quad (14)$$

3) 基于信息量计算客观权重。若指标信息量越大, 则认为第 j 个评价指标在整个评价体系中的作用越大, 其客观权重如式(15)所示。

$$w_j^{\text{obj}} = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^Q C_j} \quad (15)$$

式中, w_j^{obj} 为最终获得的客观权重。

2.4 基于最大评价差异法的评价权重融合

主观赋权有利于结合专家工程经验, 考虑不同应用场景下的储能应用经验偏好, 但可能对指标数据的敏感性分析不足; 客观赋权通过挖掘数据的相关性、差异性、信息量等关键潜在特征, 基于数据客观特征设计选型权重, 但无法体现场景差异性对选型结果的引导作用。综合评价权重可以发挥两类赋权结果的优势, 弥补各自的不足, 提高最终权重的科学性。基于主观权重式(9)、客观权重式(15)和去模糊化评价指标数据式(10), 采用最大评价差异

法将两类评价权重进行权重融合, 构建储能多应用场景选型综合评价权重, 具体步骤如下。

1) 分别计算采用主观权重和客观权重时的评价结果。基于线性加权方法, 将各指标的主观权重与方案 i 对应的各指标评分进行乘积求和, 获得方案 i 的主观评价结果 y_i^{sub} ; 将各指标的客观权重与方案 i 对应的各指标评分进行乘积求和, 获得方案 i 的客观评价结果 y_i^{obj} 。

2) 建立标准化评价结果矩阵。将主、客观评价结果标准化, 排列为式(16)所示矩阵。

$$V = \begin{bmatrix} v_1^{\text{sub}} & v_1^{\text{obj}} \\ \vdots & \vdots \\ v_i^{\text{sub}} & v_i^{\text{obj}} \\ \vdots & \vdots \\ v_p^{\text{sub}} & v_p^{\text{obj}} \end{bmatrix}, \begin{cases} v_i^{\text{sub}} = \frac{y_i^{\text{sub}} - \bar{y}^{\text{sub}}}{s^{\text{sub}}} \\ v_i^{\text{obj}} = \frac{y_i^{\text{obj}} - \bar{y}^{\text{obj}}}{s^{\text{obj}}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: V 为标准化评价结果矩阵; v_i^{sub} 、 v_i^{obj} 分别为 y_i^{sub} 、 y_i^{obj} 的标准化值; \bar{y}^{sub} 、 s^{sub} 分别为 y_i^{sub} 的均值、标准差; \bar{y}^{obj} 、 s^{obj} 分别为 y_i^{obj} 的均值、标准差。

3) 计算融合后的评价结果。仍基于线性加权法, 对主观、客观评价结果进行融合。

$$\begin{cases} V^* = \zeta^T V^T = [v_1^*, \dots, v_i^*, \dots, v_p^*] \\ v_i^* = \zeta_{\text{sub}} v_i^{\text{sub}} + \zeta_{\text{obj}} v_i^{\text{obj}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: V^* 为融合结果矩阵; v_i^* 为融合后第 i 类储能类型的评价结果; ζ_{sub} 为主观融合系数; ζ_{obj} 为客观融合系数; $\zeta = [\zeta_{\text{sub}} \ \zeta_{\text{obj}}]^T$ 为主客观融合系数向量。

4) 基于最大评价差异原则确定主、客观评价融合系数。为最大程度扩大不同储能评价结果差异性, 更好区分技术优劣, 以最大化评价方差为目标, 以主客观评价结果融合系数向量为决策变量, 建立如式(18)所示的优化问题。

$$\max \frac{1}{P-1} \sum_{i=1}^P (v_i^* - \bar{v}^*)^2 \quad (18)$$

式中, \bar{v}^* 为 v_i^* 的均值。

为保证结果归一化, 并避免某类权重被过度倚重或近乎舍弃, 应考虑式(19)所示的约束条件。

$$\begin{cases} \zeta^T \zeta = \zeta_{\text{sub}}^2 + \zeta_{\text{obj}}^2 = 1 \\ 0.2 \leq |\zeta_{\text{sub}}| \leq 0.8 \\ 0.2 \leq |\zeta_{\text{obj}}| \leq 0.8 \end{cases} \quad (19)$$

5) 计算融合后的综合评价权重。设式(18)最优解为 $\zeta_{\text{best}} = [\zeta_{\text{sub,best}} \ \zeta_{\text{obj,best}}]^T$, 则主客观权重融合后的综合评价权重 w_j 如式(20)所示。

$$w_j = \zeta_{\text{sub,best}} w_j^{\text{sub}} + \zeta_{\text{obj,best}} w_j^{\text{obj}} \quad (20)$$

2.5 基于 VIKOR 排序的储能能力评估法

储能基础特性各异, 如何综合评价性能平均型与单项突出型储能的贡献是储能决策关键问题之一。VIKOR 排序法^[23]是一种有效的多属性决策方法, 综合考虑每个方案在所有评价指标上的表现, 计算“正、负理想解距离”以确定每个方案的得分, 并基于排序结果确定决策结果, 具体步骤如下。

1) 确定正、负理想解 $z_j^{'+}$ 、 z_j^{-} 。第 j 个正向或负向指标的最优解、最劣解定义如式(21)所示。

$$\begin{cases} z_j^{'+} = \max_{1 \leq i \leq P} \{z'_{ij}\}, z_j^{-} = \min_{1 \leq i \leq P} \{z'_{ij}\}, \forall \text{正向指标 } j \\ z_j^{'+} = \min_{1 \leq i \leq P} \{z'_{ij}\}, z_j^{-} = \max_{1 \leq i \leq P} \{z'_{ij}\}, \forall \text{负向指标 } j \end{cases} \quad (21)$$

2) 计算所有方案群体效用值与个体遗憾值。群体效用值 J_i 为每个方案对整体产生的效用值, 旨在选出单项指标不突出, 而整体贡献度较大的方案。个体遗憾值 K_i 为每个方案与最优解的差距, 旨在选出某方面性能最优的方案, 计算方法如式(22)所示。

$$\begin{cases} J_i = \sum_{j=1}^Q w_j \frac{z_j^{'+} - z'_{ij}}{z_j^{'+} - z_j^{-}} \\ K_i = \max_{1 \leq j \leq Q} \left\{ w_j \frac{z_j^{'+} - z'_{ij}}{z_j^{'+} - z_j^{-}} \right\} \end{cases} \quad (22)$$

3) 计算所有方案的综合评价结果。基于群体效用值及个体遗憾值, 采用折衷后的评价结果对储能方案进行性能排序, 根据得分确定方案优劣。折衷后的综合评价结果计算方法如式(23)所示。

$$F_i = h \frac{J_i - \max_{1 \leq i \leq P} J_i}{\min_{1 \leq i \leq P} J_i - \max_{1 \leq i \leq P} J_i} + (1-h) \frac{K_i - \max_{1 \leq i \leq P} K_i}{\min_{1 \leq i \leq P} K_i - \max_{1 \leq i \leq P} K_i} \quad (23)$$

式中: F_i 为折衷综合评价结果; h 为折衷融合系数, 代表决策者对群体效用值及个体遗憾值的偏好。折衷综合评价结果越小, 所属方案性能越好。

3 算例分析

3.1 算例基本配置

为了验证本文提出的基于最大评价差异的储能多场景区间模糊层次选型方法有效性, 基于图 4 所示的改进 IEEE39 节点系统, 设计包含新能源场站与随配储能的输电网算例。节点 4、25、36 处安装风电电站及储能, 风电容量取标准算例下节点 32、37、36 处火电有功的 50%, 储能容量取节点 4、25、23 处负荷有功的 20%。对于改进 IEEE39 节点系统, 采用 MATPOWER 工具箱^[24]计算系统潮流。

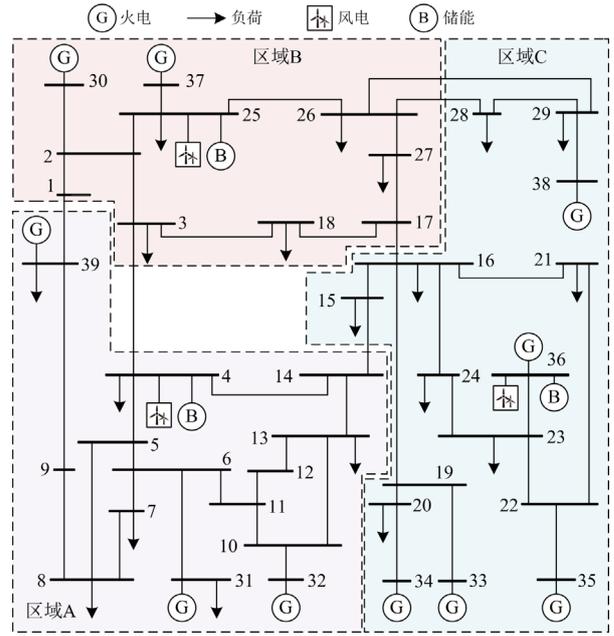
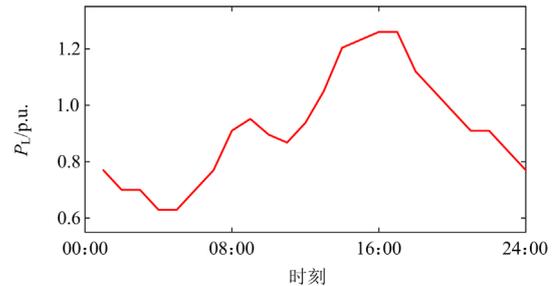


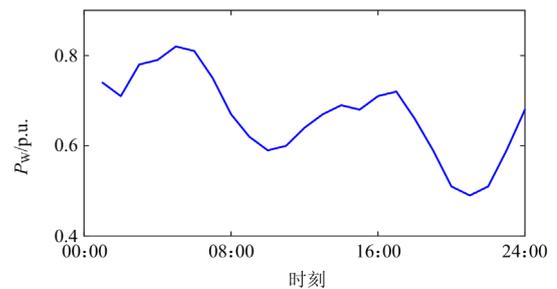
图 4 算例用 IEEE39 节点系统

Fig. 4 IEEE39-bus system for example analysis

标准算例仅包含某时刻下的潮流数据, 简化分析起见忽略风电、负荷、储能的空间差异性, 假设所有负荷按同一趋势随时间变化, 风电及储能亦然, 以体现负荷峰谷及风电波动特性。负荷相对于自身额定值的变化趋势、风电变化趋势和储能功率计划如图 5 所示。由图 5 可知, 负荷在 12:00—18:00 及 22:00—次日 07:00 峰谷特征显著, 而风电在 23:00—次日 08:00 及 14:00—16:00 大发, 在 18:00—21:00 低



(a) 负荷变化趋势



(b) 风电变化趋势

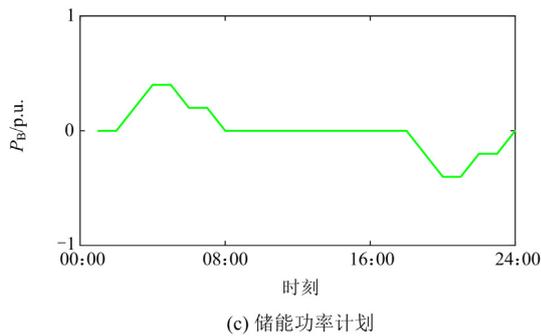


图5 负荷、风电变化趋势及储能计划

Fig. 5 Load, wind variation trends, and energy storage planning

发，两者峰谷时段差异大，接入风电加重了系统调峰需求。配置储能前，系统日均电压偏差为 1.28，日均相角偏差为 0.75，系统运行波动性较大。因此，设定储能能在 03:00—07:00 充电，在 19:00—23:00 放电，补偿风电场峰谷特性，促进风电大发能量上网，补偿风电低发场站出力。

设计以下 4 种评价方法：

1) 方法 1: 基于文献[19]的方法，采用熵权法计算客观权重，采用最小熵原理融合权重，采用 TOPSIS 法排序。

2) 方法 2: 本文所提方法，采用最大评价差异法融合主、客观权重，采用 VIKOR 法排序。

3) 方法 3: 整体评价流程同方法 2，不采用客观权重，仅采用主观权重进行排序。

4) 方法 4: 整体评价流程同方法 2，不采用主观权重，仅采用客观权重进行排序。

不同方案下各指标原始性能数据^[19,25]如表 3 所示。其中， p_1 — p_6 分别对应以下 6 种方案：① 抽水蓄能接入，② 压缩空气储能接入，③ 锂离子电池接入，④ 铅酸电池接入，⑤ 液流电池接入，⑥ 钠硫电池接入。动态指标 $q_{5,1}$ 、 $q_{5,2}$ 所列为单日均值，其 24 h 偏差值如表 4 所示。表 4 中“无”列数据对储能未接入情况。因各评价指标数量级、格式等存在明显差异，且最优方案指向性存在分歧，有必要基于流程化选型策略对储能方案进行综合评价。

按“原始数值-语义分级-二型模糊集-去模糊化”的三步法则对表 3 数据进行换算，具体过程如图 6 所示，得到表 5 所示的不同方案下各指标去模糊值。由图 6 可知，首先对表 3 中每一行指标单独设计区间二型模糊映射规则，将数量级、数据格式各异的数据转换为规范化的区间二型模糊集，然后基于式(2)进行去模糊化处理，实现模糊集与确切数值的转换。由于所定义的区间二型模糊集是规范化的有限集合，故表 5 中每个指标对应的确切数值是 0~1 区间的系列值，有利于为后续选型分析提供基础数据。

表 3 不同储能方案下评价指标性能

Table 3 Performance evaluation indicators under different energy storage schemes

| 评价指标 | 储能方案 | | | | | | |
|-------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|----------|-------------|------------|
| | p_1 | p_2 | p_3 | p_4 | p_5 | p_6 | |
| q_1 | $q_{1,1}/(\text{元}/\text{kW})$ | 600~2000 | 400~800 | 1200~4000 | 300~600 | 7~16 | 1000~3000 |
| | $q_{1,2}/(\text{元}/\text{kWh})$ | 5~100 | 2~50 | 100~2500 | 200~400 | 2742~5226 | 300~500 |
| | $q_{1,3}/(\text{元}/\text{kWh})$ | 0.1~1.4 | 2~4 | 15~100 | 20~100 | 686~1307 | 8~20 |
| q_2 | $q_{2,1}/(\text{kWh}/\text{m}^3)$ | 0.5~1.5 | 0.4~20 | 200~500 | 50~90 | 25~35 | 150~300 |
| | $q_{2,2}/(\text{kW}/\text{m}^3)$ | 0.5~1.5 | 0.04~10 | 1500~10 000 | 10~400 | 12~30 | 140~180 |
| | $q_{2,3}$ | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 |
| | $q_{2,4}$ | 严重 | 较小 | 基本无 | 基本无 | 基本无 | 基本无 |
| q_3 | $q_{3,1}$ | 高 | 较高 | 中 | 中 | 较高 | 低 |
| q_4 | $q_{4,1}$ | <3600 MW | <500 MW | 1 kW~100 MW | <5 MW | 5 kW~200 MW | 5 kW~34 MW |
| | $q_{4,2}$ | <40 GWh | 1~20 GWh | <200 MWh | <10 MWh | 0.1~120 MWh | <245 MWh |
| | $q_{4,3}/\%$ | 80 | 52 | 86 | 72 | 67.5 | 75 |
| | $q_{4,4}$ | 0.01 | 0.01 | 0.5 | 5.4 | 0.4 | 0.34 |
| | $q_{4,5}$ | 4~8 min | 3~10 min | <秒级 | <秒级 | <秒级 | <秒级 |
| | $q_{4,6}(80\% \text{DOD})$ | 10 000~60 000 | 10 000~30 000 | 1000~10 000 | 500~1000 | 10 000 | 2500~4500 |
| | $q_{4,7}/\text{年}$ | >25 | 25 | 10 | 2.6 | 15 | 13.5 |
| | $q_{4,8}/\text{h}$ | 4~10 | 1~20 | 0.3~6 | 0.25~4 | 1.5~10 | 0.7~8 |
| | $q_{4,9}$ | 8 | 6 | 7 | 7 | 3 | 5 |
| q_5 | $q_{5,1}/\text{p.u.}$ | 1.23 | 1.22 | 1.24 | 1.24 | 1.25 | 1.24 |
| | $q_{5,2}/\text{p.u.}$ | 0.26 | 0.26 | 0.28 | 0.27 | 0.28 | 0.27 |

表 4 储能配置不同情况下系统动态指标分析

Table 4 Analysis of system dynamic indicators under different energy storage configurations

| 时刻 | 储能配置情况 | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 日均电压偏差/p.u. | | | | | | | 日均相角偏差/p.u. | | | | | | |
| | 无 | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ | 无 | P ₁ | P ₂ | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₆ |
| 01:00 | 1.51 | 1.45 | 1.48 | 1.55 | 1.56 | 1.57 | 1.55 | 0.91 | 0.43 | 0.45 | 0.50 | 0.46 | 0.48 | 0.44 |
| 02:00 | 1.64 | 1.58 | 1.63 | 1.70 | 1.70 | 1.64 | 1.61 | 0.90 | 0.42 | 0.45 | 0.44 | 0.49 | 0.46 | 0.41 |
| 03:00 | 1.62 | 1.57 | 1.47 | 1.44 | 1.35 | 1.32 | 1.29 | 1.04 | 0.47 | 0.51 | 0.56 | 0.51 | 0.50 | 0.46 |
| 04:00 | 1.74 | 1.70 | 1.75 | 1.81 | 1.78 | 1.73 | 1.67 | 1.11 | 0.46 | 0.46 | 0.45 | 0.48 | 0.48 | 0.46 |
| 05:00 | 1.73 | 1.69 | 1.69 | 1.74 | 1.67 | 1.64 | 1.62 | 1.17 | 0.52 | 0.54 | 0.52 | 0.56 | 0.60 | 0.57 |
| 06:00 | 1.61 | 1.57 | 1.45 | 1.41 | 1.47 | 1.44 | 1.43 | 1.10 | 0.53 | 0.51 | 0.49 | 0.53 | 0.50 | 0.53 |
| 07:00 | 1.51 | 1.46 | 1.38 | 1.33 | 1.29 | 1.30 | 1.35 | 0.93 | 0.36 | 0.39 | 0.41 | 0.37 | 0.34 | 0.32 |
| 08:00 | 1.27 | 1.21 | 1.19 | 1.21 | 1.21 | 1.15 | 1.19 | 0.71 | 0.23 | 0.19 | 0.20 | 0.19 | 0.17 | 0.13 |
| 09:00 | 1.19 | 1.13 | 1.19 | 1.31 | 1.24 | 1.35 | 1.36 | 0.63 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.10 | 0.13 | 0.16 |
| 10:00 | 1.31 | 1.25 | 1.31 | 1.30 | 1.32 | 1.44 | 1.40 | 0.60 | 0.12 | 0.08 | 0.13 | 0.16 | 0.19 | 0.23 |
| 11:00 | 1.36 | 1.30 | 1.20 | 1.24 | 1.19 | 1.22 | 1.26 | 0.62 | 0.14 | 0.11 | 0.13 | 0.12 | 0.15 | 0.13 |
| 12:00 | 1.22 | 1.16 | 1.22 | 1.19 | 1.22 | 1.24 | 1.23 | 0.66 | 0.18 | 0.22 | 0.23 | 0.27 | 0.28 | 0.24 |
| 13:00 | 1.01 | 0.95 | 1.01 | 1.08 | 1.12 | 1.11 | 1.06 | 0.67 | 0.19 | 0.22 | 0.27 | 0.24 | 0.26 | 0.23 |
| 14:00 | 0.88 | 0.82 | 0.78 | 0.75 | 0.80 | 0.91 | 0.98 | 0.69 | 0.21 | 0.20 | 0.19 | 0.16 | 0.16 | 0.14 |
| 15:00 | 0.87 | 0.81 | 0.84 | 0.86 | 0.85 | 0.86 | 0.91 | 0.68 | 0.20 | 0.26 | 0.30 | 0.26 | 0.30 | 0.30 |
| 16:00 | 0.87 | 0.81 | 0.70 | 0.76 | 0.68 | 0.63 | 0.62 | 0.71 | 0.23 | 0.20 | 0.23 | 0.19 | 0.18 | 0.14 |
| 17:00 | 0.86 | 0.80 | 0.76 | 0.86 | 0.80 | 0.89 | 0.89 | 0.72 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.28 | 0.31 | 0.31 |
| 18:00 | 0.92 | 0.86 | 0.91 | 1.02 | 1.11 | 1.11 | 1.11 | 0.65 | 0.17 | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.18 | 0.19 |
| 19:00 | 1.02 | 0.95 | 0.98 | 1.01 | 0.94 | 0.92 | 0.84 | 0.58 | 0.14 | 0.18 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.12 |
| 20:00 | 1.15 | 1.08 | 1.15 | 1.09 | 1.16 | 1.17 | 1.11 | 0.52 | 0.11 | 0.15 | 0.11 | 0.08 | 0.10 | 0.05 |
| 21:00 | 1.30 | 1.23 | 1.23 | 1.18 | 1.19 | 1.14 | 1.11 | 0.49 | 0.09 | 0.07 | 0.09 | 0.12 | 0.16 | 0.13 |
| 22:00 | 1.29 | 1.23 | 1.11 | 1.08 | 1.18 | 1.13 | 1.06 | 0.50 | 0.06 | 0.07 | 0.11 | 0.12 | 0.10 | 0.07 |
| 23:00 | 1.42 | 1.35 | 1.39 | 1.48 | 1.39 | 1.51 | 1.56 | 0.61 | 0.19 | 0.20 | 0.25 | 0.24 | 0.30 | 0.28 |
| 24:00 | 1.52 | 1.46 | 1.52 | 1.49 | 1.48 | 1.60 | 1.52 | 0.79 | 0.31 | 0.33 | 0.31 | 0.31 | 0.35 | 0.34 |
| 平均 | 1.28 | 1.23 | 1.22 | 1.24 | 1.24 | 1.25 | 1.24 | 0.75 | 0.26 | 0.26 | 0.28 | 0.27 | 0.28 | 0.27 |

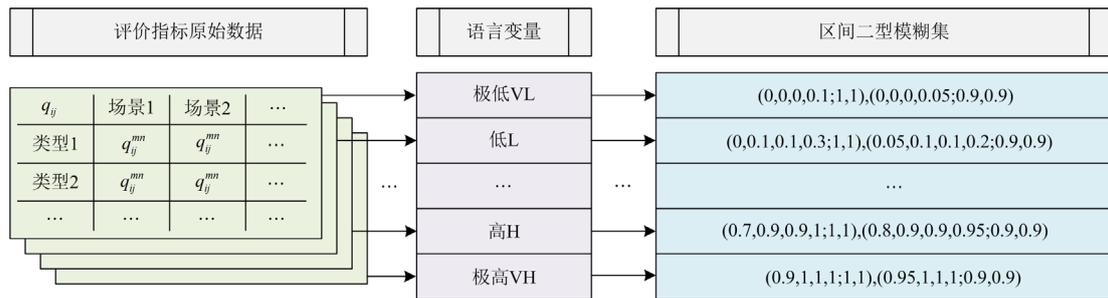


图 6 表 3—表 5 换算流程示意图

Fig. 6 Schematic diagrams for the conversion process from Table 3 to Table 5

不同选型方法下的客观权重如表 6 所示。由表 6 可知, 方法 1 与方法 2 在指标重要性评价方面存在一定分歧, 方法 1 更重视生态资源破坏程度 $q_{2,4}$ 、典型容量范围 $q_{4,2}$ 和循环次数 $q_{4,6}$, 而方法 2 认为单体能量密度 $q_{2,1}$ 、生态资源破坏程度 $q_{2,4}$ 、响应时间 $q_{4,5}$ 对选型更加重要。

本研究所述分析方法可适用于电力系统不同应用场景, 下面以功率波动平抑及削峰填谷两类型场景为例, 进一步分析算例以验证方法的有效性。

3.2 功率波动平抑场景分析

功率波动平抑场景下的主观权重如表 7 所示。由表 7 可知, 运行安全性 $q_{3,1}$ 在功率波动平抑场景选型中占有最高权重, 设备安全性是储能选型的第

一准则；响应时间 $q_{4,5}$ 占第 2 高权重，体现为功率波动平抑更加重视储能的出力响应速度；单体循环效率 $q_{4,3}$ 占第 3 高权重，储能参与波动平抑时易频繁切换充放电状态，高循环效率的储能经济技术适用性更佳。

表 5 不同储能方案下评价指标去模糊值

Table 5 Defuzzy value of evaluation indicators under different energy storage schemes

| 指标 | 储能方案 | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
| $q_{1,1}$ | 0.6825 | 0.4875 | 0.2925 | 0.0188 | 0.2925 | 0.1163 |
| $q_{1,2}$ | 0.6825 | 0.4875 | 0.1163 | 0.0188 | 0.1163 | 0.1163 |
| $q_{1,3}$ | 0.6825 | 0.1163 | 0.6825 | 0.4875 | 0.2925 | 0.4875 |
| $q_{2,1}$ | 0.0188 | 0.0188 | 0.1163 | 0.2925 | 0.1163 | 0.1163 |
| $q_{2,2}$ | 0.2925 | 0.2925 | 0.1163 | 0.1163 | 0.1163 | 0.1163 |
| $q_{2,3}$ | 0.4875 | 0.2925 | 0.1163 | 0.0188 | 0.1163 | 0.0188 |
| $q_{2,4}$ | 0.6825 | 0.6825 | 0.1163 | 0.0188 | 0.4875 | 0.1163 |
| $q_{3,1}$ | 0.2925 | 0.2925 | 0.1163 | 0.1163 | 0.2925 | 0.1163 |
| $q_{4,1}$ | 0.9563 | 0.6825 | 0.8588 | 0.8588 | 0.1163 | 0.4875 |
| $q_{4,2}$ | 0.0188 | 0.0188 | 0.4875 | 0.2925 | 0.1163 | 0.4875 |
| $q_{4,3}$ | 0.0188 | 0.0188 | 0.8588 | 0.4875 | 0.1163 | 0.2925 |
| $q_{4,4}$ | 0.2925 | 0.4875 | 0.6825 | 0.6825 | 0.4875 | 0.2925 |
| $q_{4,5}$ | 0.2925 | 0.1163 | 0.0188 | 0.0188 | 0.0188 | 0.0188 |
| $q_{4,6}$ | 0.4875 | 0.2925 | 0.6825 | 0.2925 | 0.0188 | 0.6825 |
| $q_{4,7}$ | 0.2925 | 0.1163 | 0.6825 | 0.4875 | 0.8588 | 0.4875 |
| $q_{4,8}$ | 0.0188 | 0.0188 | 0.2925 | 0.2925 | 0.4875 | 0.1163 |
| $q_{4,9}$ | 0.4875 | 0.2925 | 0.1163 | 0.1163 | 0.2925 | 0.0188 |
| $q_{5,1}$ | 0.4875 | 0.2925 | 0.6825 | 0.6825 | 0.8588 | 0.6825 |
| $q_{5,2}$ | 0.4875 | 0.4875 | 0.8588 | 0.6825 | 0.8588 | 0.6825 |

表 6 不同选型方法下的客观权重

Table 6 Objective weights under different selection methods

| 指标 | 客观权重 | | 指标 | 客观权重 | |
|-----------|--------|--------|-----------|--------|--------|
| | 方法 1 | 方法 2 | | 方法 1 | 方法 2 |
| $q_{1,1}$ | 0.0401 | 0.0588 | $q_{4,3}$ | 0.0213 | 0.0539 |
| $q_{1,2}$ | 0.0255 | 0.0414 | $q_{4,4}$ | 0.0604 | 0.0387 |
| $q_{1,3}$ | 0.0727 | 0.0442 | $q_{4,5}$ | 0.0196 | 0.0949 |
| $q_{2,1}$ | 0.0770 | 0.0796 | $q_{4,6}$ | 0.0836 | 0.0390 |
| $q_{2,2}$ | 0.0963 | 0.0652 | $q_{4,7}$ | 0.0672 | 0.0491 |
| $q_{2,3}$ | 0.0103 | 0.0533 | $q_{4,8}$ | 0.0180 | 0.0628 |
| $q_{2,4}$ | 0.1194 | 0.0751 | $q_{4,9}$ | 0.0226 | 0.0467 |
| $q_{3,1}$ | 0.0502 | 0.0389 | $q_{5,1}$ | 0.0124 | 0.0237 |
| $q_{4,1}$ | 0.0521 | 0.0366 | $q_{5,2}$ | 0.0717 | 0.0584 |
| $q_{4,2}$ | 0.0797 | 0.0397 | — | — | — |

表 7 功率波动平抑场景下的主客观权重

Table 7 Subjective weights under power fluctuation suppression conditions

| 指标 | 主客观权重 | 指标 | 主客观权重 |
|-----------|--------|-----------|--------|
| $q_{1,1}$ | 0.0850 | $q_{4,3}$ | 0.0902 |
| $q_{1,2}$ | 0.0476 | $q_{4,4}$ | 0.0566 |
| $q_{1,3}$ | 0.0874 | $q_{4,5}$ | 0.0960 |
| $q_{2,1}$ | 0.0212 | $q_{4,6}$ | 0.0660 |
| $q_{2,2}$ | 0.0461 | $q_{4,7}$ | 0.0511 |
| $q_{2,3}$ | 0.0219 | $q_{4,8}$ | 0.0119 |
| $q_{2,4}$ | 0.0423 | $q_{4,9}$ | 0.0199 |
| $q_{3,1}$ | 0.1367 | $q_{5,1}$ | 0.0428 |
| $q_{4,1}$ | 0.0226 | $q_{5,2}$ | 0.0323 |
| $q_{4,2}$ | 0.0226 | — | — |

采用式(24)总体标准差衡量各方法评分区分度。

$$s_v = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (v(p_i)^2 - \bar{v}^2)} \quad (24)$$

式中： s_v 为该方法下的总体标准差； $v(p_i)$ 为该方法下方案 p_i 的分值； \bar{v} 为该方法下方案平均分。

功率波动平抑场景下各方法评价结果如表 8 所示，方法 1 采用 TOPSIS 排序，评分越高性能越好，方法 2、3、4 采用 VIKOR 排序，评分越低性能越好，为方便起见，已在表中标注排序数值对应的优劣结果。

表 8 功率波动平抑场景下各方法结果

Table 8 Results of various methods under power fluctuation suppression conditions

| 选型方法 | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 方法 1 | 0.567 | 0.586 | 0.564 | 0.488 | 0.498 | 0.493 |
| | 次优 | 最优 | 次优 | 最劣 | 次劣 | 次劣 |
| 方法 2 | 0.500 | 0.398 | 0.816 | 0.884 | 0.533 | 0.329 |
| | 中等 | 次优 | 次劣 | 最劣 | 中等 | 最优 |
| 方法 3 | 0.909 | 0.767 | 0.720 | 0.720 | 0.540 | 0.231 |
| | 最劣 | 中等 | 中等 | 中等 | 中等 | 最优 |
| 方法 4 | 0.540 | 0.345 | 0.946 | 0.944 | 0.487 | 0.747 |
| | 中等 | 最优 | 最劣 | 最劣 | 中等 | 中等 |

由表 8 可知：

1) 方法 1 认为压缩空气储能方案最优，抽水蓄能与锂离子电池方案次优，而铅酸电池方案最劣，液流电池与钠硫电池方案次劣，评分标准差为 0.0442，虽能给出储能选型建议，但优类或劣类方案评分更加集中，不利于技术区分。

2) 方法 2 认为钠硫电池方案最优，压缩空气储能方案次优，两者总体性能较为接近，而铅酸电池方案最劣，锂离子电池方案次劣，评分标准差为 0.2248，与方法 1 相比评价区分度明显，有助于为

专业技术人员提供选型决策参考。

3) 方法 3 认为钠硫电池方案最优, 而抽水蓄能方案最劣, 评分标准差为 0.2359, 在基于主客观权重的评价方法中, 钠硫电池方案的单体循环效率 $q_{4,3}$ 与响应时间 $q_{4,5}$ 性能具备明显优势。

4) 方法 4 认为压缩空气储能方案最优, 而锂离子电池及铅酸电池方案最劣, 评分标准差为 0.2503, 该选型结果受多重因素影响, 不存在主导型指标权重。

综合上述 4 种选型方法意见, 因钠硫电池单位功率成本较低, 污染排放及生态资源破坏程度较小, 可选容量范围大, 退化因子水平低且循环充放次数多, 压缩空气储能具有较低的一次循环成本和较高的单体功率密度, 两种储能更适宜功率波动平抑场景; 而铅酸电池因其单体功率密度低, 运行安全性稍差, 年退化因子水平低等特性, 不宜作为功率波动平抑场景优选方案。

3.3 削峰填谷场景分析

削峰填谷场景下的主客观权重如表 9 所示。由表 9 可知, 响应时间 $q_{4,5}$ 占最高权重, 削峰填谷场景最为重视储能的出力响应速度; 运行安全性 $q_{3,1}$ 在削峰填谷场景选型中占有第 2 高权重, 设备安全性同样是储能选型的准则; 单位容量成本 $q_{1,2}$ 占第 3 高权重, 储能参与削峰填谷时需大量存储、释放能量, 单位容量成本越低则经济适用性越好。

表 9 削峰填谷场景下的主客观权重

Table 9 Subjective weights under peak shaving and valley filling conditions

| 指标 | 主客观权重 | 指标 | 主客观权重 |
|-----------|--------|-----------|--------|
| $q_{1,1}$ | 0.0399 | $q_{4,3}$ | 0.0409 |
| $q_{1,2}$ | 0.0789 | $q_{4,4}$ | 0.0170 |
| $q_{1,3}$ | 0.0675 | $q_{4,5}$ | 0.1878 |
| $q_{2,1}$ | 0.0336 | $q_{4,6}$ | 0.0108 |
| $q_{2,2}$ | 0.0182 | $q_{4,7}$ | 0.0390 |
| $q_{2,3}$ | 0.0218 | $q_{4,8}$ | 0.0390 |
| $q_{2,4}$ | 0.0208 | $q_{4,9}$ | 0.0390 |
| $q_{3,1}$ | 0.1304 | $q_{5,1}$ | 0.0359 |
| $q_{4,1}$ | 0.0768 | $q_{5,2}$ | 0.0258 |
| $q_{4,2}$ | 0.0768 | — | — |

削峰填谷场景下各方法评价结果如表 10 所示, 决策结果表示方法同表 8。

由表 10 可知:

1) 方法 1 认为抽水蓄能方案最优, 压缩空气储能方案次优, 而铅酸电池方案最劣, 液流电池与钠硫电池方案次劣, 评分标准差为 0.0942, 方案评分同样较为集中, 不利于技术区分。

表 10 削峰填谷场景下各方法结果

Table 10 Results of various methods under peak shaving and valley filling conditions

| 选型方法 | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 方法 1 | 0.611 最优 | 0.605 次优 | 0.476 中等 | 0.392 最劣 | 0.441 次劣 | 0.424 次劣 |
| 方法 2 | 0.500 中等 | 0.334 最优 | 0.886 最劣 | 0.824 最劣 | 0.520 中等 | 0.569 中等 |
| 方法 3 | 0.500 中等 | 0.322 最优 | 0.830 最劣 | 0.899 最劣 | 0.540 中等 | 0.231 中等 |
| 方法 4 | 0.500 中等 | 0.343 最优 | 0.946 最劣 | 0.944 最劣 | 0.487 中等 | 0.747 中等 |

2) 方法 2 认为压缩空气储能方案最优, 而锂离子电池及铅酸电池方案最劣, 其余方案优劣性能相近, 评分标准差为 0.2097, 方案评价区分度明显, 更有助于技术人员决策参考。

3) 方法 3 整体评价结果同方法 2, 仅部分方案分值存在差异, 评分标准差为 0.2670, 推荐选用压缩空气储能方案, 不建议采用锂离子电池及铅酸电池方案。

4) 方法 4 整体评价结果同方法 2, 仅部分方案分值存在差异, 评分标准差为 0.2554, 推荐选用压缩空气储能方案, 不建议采用锂离子电池及铅酸电池方案。

综合上述 4 种选型方法意见, 抽水蓄能单体功率密度高、功率范围广, 可满足大功率存储需求, 退化因子水平低, 技术较为成熟; 压缩空气储能能在一次循环成本和单体功率密度方面占优势, 两种储能更适宜削峰填谷场景; 而锂离子电池及铅酸电池运行安全性稍差, 不宜作为削峰填谷场景优选方案。

综上, 为了在功率波动平抑及削峰填谷两种场景下均具有较好的经济、技术、安全、环境适应性, 新能源场站应在因地制宜和客观条件满足的前提下尽可能考虑选择压缩空气储能方案, 尽量避免采用铅酸电池方案。

4 结论

本文提出一种基于最大评价差异的储能多场景区间模糊层次选型方法, 基于区间二型模糊集对储能选型指标进行量化, 采用最大评价差异法融合赋权, 综合专家主观评价与 CRITIC 客观评价意见, 通过 VIKOR 法实现多场景储能方案优选, 并进行了算例验证, 所得结论如下。

1) 所提方法能够充分融合主、客观意见, 从经济、技术、安全、环境多维角度对储能选型提供决策支持, 且选型结果具有良好的区分度。

2) 对于功率波动平抑场景, 因单位功率成本、可选容量范围及单体功率密度等性能优异, 在实际选取储能方案时, 在其他条件需求不变且因地制宜的条件下, 本文评估钠硫电池与压缩空气储能方案综合适应性较优异, 可作为优先考虑方案。

3) 对于削峰填谷场景, 因单体功率密度、退化因子水平、一次循环成本等性能优异, 在实际选取储能方案时, 在其他条件需求不变且因地制宜的条件下, 本文评估抽水蓄能与压缩空气储能方案综合适应性较优异, 可作为优先考虑方案。

4) 在实际运行过程中, 储能系统往往兼具多个服务功能。例如, 为兼顾本文所进行的功率波动平抑以及削峰填谷多场景适应性要求, 新能源场站储能方案选取时, 在满足客观条件的前提下, 应尽可能优先考虑配建压缩空气储能, 如上述技术不符合实际要求, 也应尽可能避免大量投建铅酸电池储能。

在本文基础上, 后续可进一步考虑不同模糊集度量方法对选型的影响。此外, 最大评价差异法融合赋权为优化规划配置模型权重选取提供了有益思路, 可进一步研究两类配置方法的结合性。

参考文献

- [1] 王祺, 张泽轲, 郭杰帅, 等. 新型电力系统主动构网机理与技术路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 504-517.
WANG Qi, ZHANG Zeke, GUO Jieshuai, et al. Mechanism and technical path of active grid-forming of new type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 504-517.
- [2] 肖云鹏, 张兰, 张轩, 等. 包含独立储能的现货电能与调频辅助服务市场出清协调机制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 167-180.
XIAO Yunpeng, ZHANG Lan, ZHANG Xuan, et al. The coordinated market clearing mechanism for spot electric energy and regulating ancillary service incorporating independent energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 167-180.
- [3] 臧云帆, 夏晟, 李嘉文, 等. 含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 90-101.
ZANG Yunfan, XIA Sheng, LI Jiawen, et al. A robust game optimization scheduling method for shared energy storage micro electric network group distribution[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 90-101.
- [4] 刘沅昆, 张维静, 张艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.
LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [5] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516-1552.
CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1516-1552.
- [6] FANG Jun, PEI Zhigang, CHEN Tianheng, et al. Economic benefit evaluation model of distributed energy storage system considering custom power services[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 10: 1029479.
- [7] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 12-19.
YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 12-19.
- [8] 郝婷, 樊小朝, 王维庆, 等. 阶梯式碳交易下考虑源荷不确定性的储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 101-112.
HAO Ting, FAN Xiaochao, WANG Weiqing, et al. Optimal configuration of energy storage considering the source-load uncertainty under ladder-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 101-112.
- [9] 侯慧, 徐焘, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 74-84.
HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, et al. Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 74-84.
- [10] 马兰, 谢丽蓉, 叶林, 等. 基于混合储能双层规划模型的风电波动平抑策略[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1016-1029.
MA Lan, XIE Lirong, YE Lin, et al. Wind power fluctuation suppression strategy based on hybrid energy storage bi-level programming model[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1016-1029.
- [11] YAO Tianliang, HUANG Julong, LI Zhiwei, et al. Planning scheme design for multi-time scale energy storage at the city level[C]//2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), July 8-11, 2022, Shanghai, China: 1538-1543.
- [12] 熊文, 刘育权, 苏万煌, 等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备,

- 2019, 39(1): 118-126.
- XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhua, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 118-126.
- [13] 刁涵彬, 李培强, 吕小秀, 等. 考虑多元储能差异性的区域综合能源系统储能协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 151-165.
- DIAO Hanbin, LI Peiqiang, LÜ Xiaoxiu, et al. Coordinated optimal allocation of energy storage in regional integrated energy system considering the diversity of multi-energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 151-165.
- [14] BHOLA P, CHRONIS A G, KOTSAMPOPOULOS P, et al. Business model selection for community energy storage: a multi criteria decision making approach[J]. Energies, 2023, 16(18): 6753.
- [15] 雷琪, 苗世洪, 郭宝甫, 等. 基于层次分析和改进逼近理想解法的分层储能系统综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 13-19.
- LEI Qi, MIAO Shihong, GUO Baofu, et al. Comprehensive evaluation of hierarchical storage system based on analytic hierarchy process and improved technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 13-19.
- [16] 赵松, 张谦, 霍红岩, 等. 基于层次分析法 AHP 和 TOPSIS 的储能参与新能源一次调频选型方案[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 134-143.
- ZHAO Song, ZHANG Qian, HUO Hongyan, et al. Selection scheme for energy storage to participate in primary frequency regulation of new energy based on AHP and TOPSIS methods[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(1): 134-143.
- [17] LIU Yong, DU Junliang. A multi criteria decision support framework for renewable energy storage technology selection[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 122183.
- [18] QIE Xiaotong, ZHANG Rui, HU Yanyong, et al. A multi-criteria decision-making approach for energy storage technology selection based on demand[J]. Energies, 2021, 14(20): 6592.
- [19] 冯喜春, 张松岩, 朱天瞳, 等. 基于区间二型模糊多属性决策方法的大规模储能选型分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 4123-4136.
- FENG Xichun, ZHANG Songyan, ZHU Tiantong, et al. Large-scale energy storage selection analysis based on interval type-2 fuzzy multiple attribute decision making method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4123-4136.
- [20] ZUBIRIA A, MENENDEZ A, GRANDE H J, et al. Multi-criteria decision-making problem for energy storage technology selection for different grid applications[J]. Energies, 2022, 15(20): 7612.
- [21] 王铁旦, 孙洁霖, 彭定洪. 基于区间二型模糊集的 VIKOR 多属性决策方法研究[J]. 价值工程, 2013, 32(29): 305-307.
- WANG Tiedan, SUN Jielin, PENG Dinghong. A study of VIKOR multiple attributes decision making method based on interval type-2 fuzzy sets[J]. Value Engineering, 2013, 32(29): 305-307.
- [22] 张玉, 魏华波. 基于 CRITIC 的多属性决策组合赋权方法[J]. 统计与决策, 2012(16): 75-77.
- ZHANG Yu, WEI Huabo. Multi-attribute decision combination weighting method based on CRITIC[J]. Statistics & Decision, 2012(16): 75-77.
- [23] 刘钧歌, 郑婷婷, 孟伟伟, 等. 基于区间 T-球形模糊熵的 TODIM-VIKOR 多属性决策方法[J]. 南昌大学学报(理科版), 2023, 47(6): 519-529.
- LIU Junge, ZHENG Tingting, MENG Weiwei, et al. TODIM-VIKOR multi-attribute decision-making approach based on interval-valued T-spherical fuzzy entropy[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2023, 47(6): 519-529.
- [24] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SANCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 12-19.
- [25] 薛福, 马晓明, 游焰军. 储能技术类型及其应用发展综述[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 48-58.
- XUE Fu, MA Xiaoming, YOU Yanjun. Energy storage technologies and their applications and development[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 48-58.
-
- 收稿日期: 2024-02-05; 修回日期: 2024-05-20
- 作者简介:
- 齐彩娟(1990—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划、储能及新能源消纳等; E-mail: qcj1224@126.com
- 李牧远(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化、新能源及储能规划、优化与评估技术; E-mail: limuyuanee@163.com
- 宋慧慧(1983—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源系统、储能、微电网非线性控制, 基于理论的电力网络分布式控制。E-mail: songhh@hitwh.edu.cn
- (编辑 周金梅)