

DOI: 10.7667/PSPC171744

基于区间偏好和MADM的配电网智能化规划方案评估方法

丁家满, 沈书琳, 李川

(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 针对配电网智能化规划方案评估中决策因素的不确定性和专家判断的模糊性问题, 提出了基于区间偏好和多属性决策(Multi Attribute Decision-Making, MADM)的配电网智能化规划方案评估方法。首先建立属性层次结构和方案属性决策表。其次, 建立各方案属性间两两比较的区间偏好关系。然后, 依据偏好关系计算各方案属性的相对权重。最后, 结合属性层次结构, 获得各方案对总目标的综合权重, 并产生最终决策结果。所提出的方法较好地专家经验和定量计算相结合, 合理地处理了决策因素的不确定性和专家判断的模糊性, 简化了评判决策的步骤。实验结果表明该方法可行、有效, 所获评价排序结果与层次分析法相比具有更高的区分度。

关键词: 配电网; 智能规划; 不确定性; 综合评判决策; 区间; 偏好关系; 权重

Evaluation method of intelligent planning for distribution network based on interval preference and MADM

DING Jiaman, SHEN Shulin, LI Chuan

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: To address the problem about the uncertainty of decision-making factors and the vague of judgement in the evaluation of intelligent planning of distribution network, this paper proposes an evaluation method of intelligent planning for distribution network based on interval preference and MADM. Firstly, the attributes hierarchy and the decision table about plan attributes are established. Next, the interval preference relationships between any two plan attributes are built. After that, the relative weights of each plan attributes are calculated according to the preference relations. Finally, according to the attribute hierarchy, the comprehensive weight of each plan to the total evaluation target is obtained, and the final decision result is produced. Combining expert experience and quantitative calculation, the method proposed deals with rationally the uncertainty of decision factors and vague of judgement, and simplifies the steps to evaluation decisions. Experimental result shows that the method proposed is feasible and effective, and its dipartite degree about the sort result is higher than that of the analytic hierarchy method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467007).

Key words: distribution network; intelligent planning; uncertainty; MADM; interval; preference relation; weight

0 引言

近年来, 智能配电网在电网运行方面的作用越发显著, 已成为电力系统的重要组成部分。而通过智能配电网评价技术可以在满足用户对电力成本、高供电质量与可靠性等多元需求的基础上, 结合信息需求、供电环境等因素, 对多种方案进行综合决策评价^[1-2]。随着配电网智能化建设水平的提高, 配

电网智能化规划评价决策受到大量不确定因素的影响, 可将这些不确定因素归为四个不确定性方面: 随机性、模糊性、灰色性和未确知性。随机性, 指结果和给定条件之间没有必然联系, 或者给定的条件不充分, 可采用概率建模来对随机特征进行提取; 模糊性, 由于事物本身概念不清楚或事物所属类别划分不清晰而引起的判断上的不确定, 多以隶属度函数表征不确定因素特征; 灰色性, 显著特点为已知成分少而未知成分多, 多用灰数或区间数对其进行信息化处理; 未确知性, 指决策者由于信息、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51467007)

数据的不全面、不完整而导致的认知不确定性, 可用未确知数或盲数表示^[3-5]。

对不确定性的正确处理是后续评价与决策成功的基石。因此不确定因素的正确表达是配电网智能化规划方案评价决策的先决条件, 不确定表达方法主要有粗糙集^[6]、模糊理论^[7]和证据理论^[8]等。同时, 为防止数据丢失、保证数据的精确性, 大多采用区间数来描述和表达不确定性, 并使用区间数可能度排序方法^[9-10]产生决策结果。

综合评判决策, 也称多属性决策(Multi Attribute Decision-Making, MADM)是通过收集到的信息进行分析, 并采取一定的方式对不同的备选方案结果进行排序, 获得最优方案的决策方法。结合不确定表达方法形成的决策方法主要有模糊综合评判法^[11]、层次分析法^[12-13]、区间理论和证据推理结合方法^[14]等。在这些决策方法中, 得到各方案权重、确定优先级^[15]等也是关键问题之一。文献[16]采用模糊矩阵关系换算来确定各指标的权重, 融合了模糊一致矩阵决策方法和模糊优选方法, 以此来减少对权重分配的主观性, 但体现不出两个比较对象的差异性, 并且不适用于电网中海量数据的计算。文献[17]采用熵权-网络层次分析法(ANP)组合赋权计算智能电网的指标权重, 结合 TOPSIS 方法和灰色关联度方法进行智能电网不同属性的评估, 然而在求标准化决策矩阵时计算较为复杂, 正、负理想解较难求。文献[18]采用一种指数函数计算两个数据样本之间的距离, 并用其估计训练样本密度, 将密度值作为样本权重, 此方法有效缩减了计算权重的时间且具有较强鲁棒性。文献[19]提出双层权重模型, 利用聚集内部的一致性差异决定第一层权重, 与模糊熵对聚集测度得到的第二层权重相结合, 对决策方案进行综合排序。

在获得权重的基础上, 评价决策方法、策略的选取越发显得重要^[20]。文献[21]利用主成分分析法和聚类分析法来对智能电网指标体系进行新的分层分类, 生成综合主成分评价指标函数, 进行智能电网指标的定量计算, 简化了指标评价体系, 降低了问题的复杂性, 但是其本身具有模糊性, 且当智能电网指标数据量较大时, 获得聚类结论较为困难。文献[22]将层次分析法(AHP)和数据包络法(DEA)相融合, 并引入灰色关联度模型进行电网规划的求解, 其容错性较强, 但其需要对各指标最优值进行确认, 而电网中部分指标的最优值是难以确定的。文献[23]采用了模糊加权评价方法将多目标运行方式决策问题转换成单目标运行方式决策问题, 并结合改进的随机变异策略的进化规划算法(EPA)确定

满足多约束条件的配电网最优运行方式, 此方法较好地协调兼顾了各目标之间的不同需求, 但在单一目标方面无法做出最优决策。

以上评价决策方法, 在处理定量数据方面都取得了较好的成果, 但是在现实的电网规划评价决策中有更多的指标无法用定量数据表示, 而采用由专家经验等方式给出的定性描述。如何综合考虑定性和定量数据进行电网规划综合评价决策显得尤其重要, 而且在包含众多不确定性因素的评判决策中, 如何解决两两比较中经常出现的不确定主观判断, 让决策者更好地综合众多专家的意见非常关键。为此, 本文提出了一种新的基于区间偏好和 MADM 的配电网智能化规划方案评估方法。首先, 建立属性层次结构和方案属性决策表, 根据方案属性决策表构建方案间或属性间的区间偏好关系; 然后利用偏好关系和框架中的等级得分值进行计算得到各方案以及各属性所占权重; 最后计算综合权重并根据综合权重大小对各方案进行排序得到最佳方案。这种方法既考虑了决策者的主观判断也考虑了客观数据分析, 并系统地处理了包含多种不确定性的定性和定量因素。

1 基于区间偏好关系的决策方法

1.1 定义

本文采用相对偏好识别框架 $\Omega = \{H_{-I}, H_{-I+1}, \dots, H_{-1}, H_0, H_1, \dots, H_I\}$ ($I=1, 2, 3, \dots, N$), 用以表达决策者的相对基偏好。其中, 等级 H_1, H_2, \dots, H_I 表示成对方案或属性间由低到高的优于程度, $H_{-I}, H_{-I+1}, \dots, H_{-1}$ 表示成对方案或属性间的劣于程度, H_0 表示成对方案或属性间的无差异程度。以 H_0 为中心, 两边等级成对称性。但由于信息采集的不完全, 在实际的两两比较中经常出现不确定的主观判断, 因此, 采用区间表示会更为准确。基于此, 本文提出了改进的区间偏好关系, 即定义成对方案或属性间的区间偏好关系如下所示。

定义 1 设矩阵 $\mathbf{E} = (d_{ij})_{M \times M}$ 表示方案集 X 或属性集 Y 上使用相对偏好识别框架 $\Omega = \{H_{-I}, H_{-I+1}, \dots, H_{-1}, H_0, H_1, \dots, H_I\}$ 的偏好关系。其中

$$\begin{aligned} d_{ij} &= \{(F_{mn}, b_{ij}(F_{mn}))\}, \\ m, n &= -I, -I+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, I\}, \\ F_{mn} &= [H_m, H_n], \\ i, j &= 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

满足

$$\begin{cases} b_{ij}(F_{mn}) \in [0, 1] \\ \sum_{m, n=-I}^I b_{ij}(F_{mn}) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

这里, $b_{ij}(F_{mn})(m, n=1, 2, \dots, I)$ 、 $b_{ij}(F_{mn})(n=-I, -I+1, \dots, -1)$ 、 $b_{ij}(F_0)$ 分别表示优于度、劣于度和无差异度。当决策者主观给出 d_{ij} 时, 可以视为在优于度、劣于度及无差异度对应等级上的主观概率。若根据客观概率给出 d_{ij} 时, 则可视它们为对应等级上的客观概率。

为了得到各等级上的差异, 便于更好地计算, 对此定义各等级上的得分值如下所示。

定义2 与相对偏好识别框架 $\Omega = \{H_{-I}, H_{-I+1}, \dots, H_{-1}, H_0, H_1, \dots, H_I\}$ 各等级相对应的等级得分值定义为

$$V_H = (V(H_{-I}), V(H_{-I+1}), \dots, V(H_{-1}), V(H_0), V(H_1), \dots, V(H_I)) \quad (3)$$

其中, 对称中心 H_0 的对应等级得分值 $V(H_0)=0$; 优于程度对应等级的取值范围为 $0 < V(H_1) < V(H_2) < \dots < V(H_I) = 1$, 劣于程度的取值范围与之相反且关于 $V(H_0)$ 对称; 而对称的等级得分值满足 $V(H_n) + V(H_{-n}) = 0 (n=1, 2, 3, \dots, I)$ 。

当求出需要的综合权重后, 为了能够更好地进行分析, 可以进行方案间区分度求解, 以便了解各方案间的差异性, 区分度方法如下。

定义3 设方案 A 和方案 B 的综合权重分别为 a_w 、 b_w , 方案间的区分度为 D , 则定义 D 为

$$D = |a_w - b_w| / \min(a_w, b_w) \times 100\% \quad (4)$$

1.2 综合评判决策步骤

基于区间偏好关系的综合评判决策步骤如下。

(1) 建立属性层次结构

建立层次结构的首要任务就是确定决策目标; 其次, 对影响决策目标的各种相关因素进行解析, 并将其按照不同属性由上至下地分解成若干层次。同一层的各因素从属于其上层因素, 并对其下层各因素具有影响。顶层为目标层, 往往只具有一个因素, 底层为指标或准则层。当指标或准则层过多时, 应该继续进行分解, 得到子指标或准则层。

(2) 建立方案属性决策表

方案属性决策表是在属性层次结构与各方案结合的基础上, 获得对应信息填入表中。表中数据可以分为两类, 一类是定量数据, 例如配电网智能化规划指标中的光纤铺设总长度、建设费用等统计或计算的结果。另一类是定性数据, 包括两种情况: 一种情况是不存在定量数据, 如指标中的智能终端及子站设计的合理性, 只能根据各种因素进行分析, 由专家给出定性描述; 另一种情况就是存在定量数据, 如带宽传输速率, 在案例中, 方案1的带宽传

输速率为 1 Gbps/1 Gbps, 方案2的带宽传输速率为 1.2 Gbps/0.92 Gbps, 其存在定量的上下行数据, 但考虑到这些数据不易做到标量化来进行方案间比较, 因此仍由专家给出定性描述。

(3) 构建并计算获得成对方案或属性间的区间偏好关系矩阵

根据定义1, 在给定的相对偏好识别框架 Ω 上的 V_H , d_{ij} 对应的得分值 V_{ij} 计算如下:

$$V_{ij} = [v_{ij}^-, v_{ij}^+] = \left[\sum_{m=-I}^I V(H_m) \cdot b_{ij}(H_m), \sum_{n=-I}^I V(H_n) \cdot b_{ij}(H_n) \right] \quad (5)$$

V_{ij} 具有如下性质: $V_{ij} = [v_{ij}^-, v_{ij}^+]$ 和 $V_{ji} = [v_{ji}^-, v_{ji}^+]$ 为 Ω 上的 d_{ij} 和 d_{ji} 的得分值, 则

$$\begin{cases} v_{ij}^- \in [-1, 1] \\ v_{ij}^+ \in [-1, 1] \\ V_{ji} = [-v_{ij}^+, -v_{ij}^-] \end{cases} \quad (6)$$

针对方案集 X 或属性集 Y , 根据 Ω 上的关系矩阵 E 以及 Ω 上的等级得分值 V_H , 可以在式(5)基础上计算得到得分值矩阵 V , 即

$$V = \begin{bmatrix} 0 & [V_{12}^-, V_{12}^+] & \dots & [V_{1M}^-, V_{1M}^+] \\ [V_{21}^-, V_{21}^+] & 0 & \dots & [V_{2M}^-, V_{2M}^+] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [V_{M1}^-, V_{M1}^+] & [V_{M2}^-, V_{M2}^+] & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

由于 $d_{ii} = \{([H_0, H_0], 1)\}$, 且 $V(H_0) = 0$, 根据式(5)可得 $V_{ii} = 0$ 。

由上可知, V 并非一个正规化矩阵。由于 v_{ij}^- 、 $v_{ij}^+ \in [-1, 1]$, 在定性数据中, 可利用 $(v_{ij}^-+1)/2$ 和 $(v_{ij}^++1)/2$ 对 V 进行正规化。而在定量数据中, 可以利用 $v_{ij}^-/2$ 和 $v_{ij}^+/2$ 直接对 V 进行正规化处理, 便于之后的计算。由此得到正规化得分矩阵

$$\bar{V} = (\bar{V}_{ij} = [\bar{v}_{ij}^-, \bar{v}_{ij}^+])_{M \times M}$$

正规化得分矩阵满足性质: 若 $\bar{V}_{ij} = [\bar{v}_{ij}^-, \bar{v}_{ij}^+]$ 和 $\bar{V}_{ji} = [\bar{v}_{ji}^-, \bar{v}_{ji}^+]$ 为 Ω 上 d_{ij} 和 d_{ji} 的正规化得分值, 则

$$\bar{v}_{ij}^- + \bar{v}_{ji}^+ = 1 \quad (7)$$

$$\bar{v}_{ij}^+ + \bar{v}_{ji}^- = 1 \quad (8)$$

(4) 求解偏好关系权重

设方案集 X 或属性集 Y 中各方案的优先权向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_M)$ 满足 $\sum_{i=1}^M w_i = 1$ 。 $\forall i, j = 1, 2, \dots, M$, 有

$$\frac{w_i}{w_i + w_j} \in \bar{V}_{ij},$$

$$\text{即} \quad \bar{v}_{ij}^- \leq \frac{w_i}{w_i + w_j} \leq \bar{v}_{ij}^+ \quad \left\{ \begin{array}{l} U_i = \frac{\sum_{j=1}^M p_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M p_{ij}} = \frac{\sum_{j=1}^M p_{ij} + \frac{M}{2} - 1}{M(M-1)} \\ i=1, 2, \dots, M \end{array} \right. \quad (14)$$

建立以下优化模型确定各方案或各属性优先权的上下限, 即 w_i^- 和 w_i^+ 。

$$\begin{array}{l} \min/\max w_i; \\ \text{s.t.} \quad \left\{ \begin{array}{l} \bar{v}_{ij}^- \leq \frac{w_i}{w_i + w_j} \leq \bar{v}_{ij}^+, \\ \sum_{i=1}^M w_i = 1, \\ 0 \leq w_i \leq 1 \end{array} \right. \end{array} \quad (9)$$

上述模型位于其有界闭区间内必然存在峰值, 因此模型的解一定存在。给出模型的解析解如下。

给定方案集 X 或属性集 Y 的正规化得分矩阵 \bar{v} , 设 w_i^- 和 w_i^+ ($i=1, 2, \dots, M$) 为式(9)中一对优化问题的解, 则

$$w_i^- = \frac{1}{1 + \sum_{j=1, j \neq i}^M \frac{1 - \bar{v}_{ij}^-}{\bar{v}_{ij}^-}} \quad (10)$$

$$w_i^+ = \frac{1}{1 + \sum_{j=1, j \neq i}^M \frac{1 - \bar{v}_{ij}^+}{\bar{v}_{ij}^+}} \quad (11)$$

接着需要实现区间 $[w_i^-, w_i^+]$ 的比较, 进行方案或属性的排序, 形成决策结果。

给定 $w_i = [w_i^-, w_i^+]$ 和 $w_j = [w_j^-, w_j^+]$ ($i=1, 2, \dots, M$), 设

$$\left\{ \begin{array}{l} l(w_i) = w_i^+ - w_i^- \\ l(w_j) = w_j^+ - w_j^- \end{array} \right. \quad (12)$$

则 w_i 优于 w_j 的可能度为

$$p(w_i \geq w_j) = \frac{\min\{l(w_i) + l(w_j), \max(w_i^+ - w_j^-, 0)\}}{l(w_i) + l(w_j)} \quad (13)$$

由式(13)可得方案集 X 或属性集 Y 上优先权向量对应的可能度矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1M} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{M1} & p_{M2} & \cdots & p_{MM} \end{bmatrix}$$

式中, p_{ij} 表示 $p(w_i \geq w_j)$ 。运用基于可能度矩阵的排序方法, 通过可能度矩阵 P 求各方案或各属性的效用值, 即为权重。

依据 U_i 确定方案集上各方案或属性集上各属性的排序, 可以得到对于某一属性而言各方案的优越程度排序, 或者同一层属性对于上一层属性而言的重要程度排序。

(5) 综合权重计算和方案排序

通过计算得到各层的属性权重及方案权重后, 需要计算方案对上一层属性的权重, 如式(15)。

$$W_i^{(k+1)} = \sum_{j=1}^n W_{ij}^{(k)} W_j^{(k)} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (15)$$

式中: m 为方案个数; $W_i^{(k+1)}$ 为方案 i 对层次结构中 $k+1$ 层某属性 $A^{(k+1)}$ 的方案权重; n 为属性 $A^{(k+1)}$ 的子属性个数; $W_j^{(k)}$ 为 $A^{(k+1)}$ 在 k 层的子属性 j 的权重, 而 $W_{ij}^{(k)}$ 为方案 i 对子属性 j 的方案权重。

2 案例分析

本案例以某地区配电网智能化规划作为研究对象, 形成三个方案。这三个方案互有优势, 需要全面地考虑各个因素进行评判决策, 得到最优方案。邀请来自电力公司、规划局、当地政府和开发公司的 10 位专家对这三个方案进行进一步筛选。以下按照决策步骤来介绍如何运用区间偏好关系解决配电网智能化决策问题的理论和方法。

2.1 建立层次结构

影响配电网智能化规划的因素众多且关系复杂, 根据文献[24]可得到配电网智能化指标体系如表 1 所示。对此案例中各种影响因素进行分析建立属性间的层次结构, 如图 1 所示。

图 1 是将三个方案的决策目标, 即综合优越性评分设为 G , 其下一层属性分为高效性 A 、可靠性 B 、经济性 C 和卓越性 D 。这些属性是与 G 直接相关的子属性, 而 G 为 A 、 B 、 C 、 D 的父属性。同样, 通信系统高效性 A_1 和主站系统高效性 A_2 又是作为高效性 A 的下一层相关子属性。图 1 中的属性间的关系呈树状结构, 实际中也会出现网状结构。

区间偏好关系决策方法和层次分析法(AHP)相似, 根据属性层次结构来进行整个过程的分析和计算。最终得到各方案对于总目标的相对重要性即综合权重, 产生决策结果。在此之前, 就要求解出各层属性间对于其上一层父属性的相对权重, 即属性

表 1 配电网智能化评价指标

Table 1 Distribution network intelligent evaluation index

高效性	通信系统高效性	灵活性	
		光纤铺设总长度	
		宽带传输速率	
		通信能力	双向通信能力占比
	支持点对点等通信		
主站系统高效性	数据吞吐能力	计算及交换速率	
可靠性	主站固有小时数		
	通信系统可靠性	预计固有可靠性	
		装有备用电池比例	
经济性	建设费用		
	维护和运行费用		
卓越性	智能终端及子站合理性		
	主站系统兼容性		
	通信系统卓越性	网络架构拓展能力	
		采用新技术	

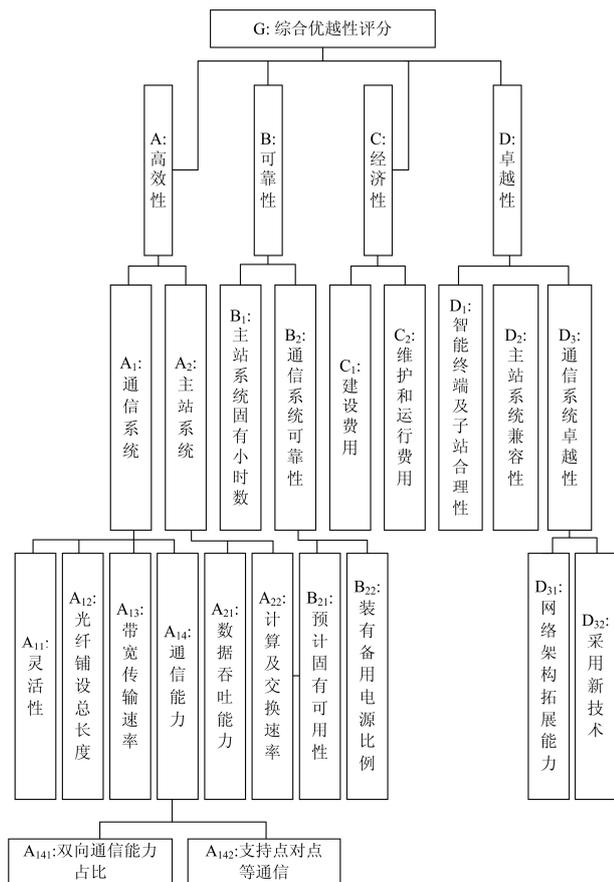


图 1 案例的属性层次结构

Fig. 1 Attribute hierarchy of the case

权重, 比如图 1 中的 A、B、C、D 相对于 G 的权重; 以及求解各方案对应于某属性的优越程度, 即方案属性, 比如方案 1、方案 2 和方案 3 对应于属性 A₁₁

的优越程度。要求得各方案对于总目标 G 的综合权重, 就要先分别求出对于各层次属性的各方案权重, 以及各层属性间的属性权重, 层层向上计算, 求得最终的综合权重。按照此方法, 首先需要的是层次结构中叶子属性的方案权重以及属性权重, 因此, 需要收集各方案关于这些属性的信息, 即方案属性决策表。

2.2 建立方案属性决策表

将图 1 中层次结构的树叶属性(共 16 个)与各方案连线就形成了方案属性决策表, 再从规划数据库和图形库中提取各个方案的相关数据填入方案属性决策表中, 如表 2 所示。

表中数据分为两类, 其中定性数据有通信系统灵活性、负荷增长较慢时经济性、网络架构拓展能力等只能由专家给出的定性描述的数据; 定量数据有光纤铺设总长度、建设费用、主站系统固有小时数等可以直接给出的数据。

2.3 形成方案或属性间的区间偏好关系

方案属性决策表建立后, 开始建立对于某属性的成对方案间或者成对属性间的区间偏好关系。例如, 要得到图 1 中属性 A₁、A₂、A₃ 和 A₄ 相对于 A 的属性权重, 就要将 A₁、A₂、A₃ 和 A₄ 对于 A 的重要程度进行两两比较形成区间偏好关系矩阵, 通过决策方法得到这 4 个属性相对 A 的权重。

同理, 各个方案对于属性 A 而言的优势程度也要通过两两比较形成区间偏好关系矩阵, 从而进行权重求解。以下分别介绍其建立过程。

(1) 方案间的区间偏好关系矩阵

由图 1 中的树叶属性可以建立 16 个区间偏好关系。方案属性决策表中数据存在两方面的问题: 一方面, 表中的定量属性虽然已经是量化数据, 但是不同定量属性的度量单位和数量级并不统一, 无法直接相互比较, 因此需要进行规范化处理; 另一方面, 为了方便比较计算, 定性数据也需要通过标量化手段转换为规范化的定量数据^[25]。因此建立区间偏好关系实质就是数据的标量化。首先, 根据表 1 中的数据参考专家意见建立底层属性方案间的区间偏好关系矩阵, 各矩阵的含义如表 3 所示。

接着, 需要确定相对偏好识别框架。在定性描述标量化的过程中, 有两大类标度体系: 互反性标度和互补性标度, 而常用的就是互反性 1-9 标度^[26], 见表 4。在本文中, 将 1-9 标度与偏好关系相结合, 确定新的相对偏好识别框架, 使其既具有电网标度的特性, 又具有偏好关系多等级的优点, 便于结合专家意见产生决策结果。确定相对偏好识别框架为

表 2 方案属性决策表

Table 2 Decision table of alternatives

方案属性		方案 1	方案 2	方案 3	
高效性	通信系统 高效性	灵活性	较高	一般	一般
		带宽传输速率	较高	最高	较高
		光纤铺设 总长度/km	297.2	278.0	283.7
	通信 能力	双向通信 能力占比	多	少	中等
		支持点对点等通信	支持度高	支持度 较高	支持度 较低
	主站系统 高效性	数据吞吐能力/ (万/s)	22	11	22
	计算和交换 速度/(Mbit/s)	约 703	约 1 005	约 703	
可靠性	主站系统 固有小时数/h		161 790	153 796	159 420
	通信系统 可靠性	预计固有 可用性/h	98 000	68 000	73 000
		装有备用电源 比例	0.6	0.9	0.6
经济性	建设费用/万元		1 175	600	700
	维护和运行费用		较少	较多	较少
卓越性	智能终端选择及子站设计 的合理性		合理但不易 于升级	合理	合理
	主站系统兼容性		较好	较差	中等
	通信系统 卓越性	网络架构 拓展能力	一般	较好	较好
		采用性价比高的 新技术	未采用	采用	采用

表 3 方案偏好关系矩阵

Table 3 Preference relation matrix of schemes

序号	矩阵	代表含义
1	A_{11E}	通信系统高效性-灵活性
2	A_{12E}	通信系统高效性-带宽传输速率
3	A_{13E}	通信系统高效性-光纤铺设总长度
4	A_{141E}	通信系统高效性-双向通信能力占比
5	A_{142E}	通信系统高效性-支持点对点等通信
6	A_{21E}	主站系统可靠性-数据吞吐能力
7	A_{22E}	主站系统可靠性-计算和交换速度
8	B_{1E}	可靠性-主站系统固有小时数
9	B_{21E}	可靠性-预计通信系统固有可用性
10	B_{22E}	可靠性-装有备用电源比例
11	C_{1E}	经济性-建设费用
12	C_{2E}	经济性-维护和运行费用
13	D_{1E}	卓越性-智能终端及子站合理性
14	D_{2E}	卓越性-主站系统兼容性
15	D_{31E}	卓越性-通信系统-网络架构拓展能力
16	D_{32E}	卓越性-通信系统-新技术

表 4 互反性 1-9 标度

Table 4 Reciprocal 1-9 scalar system

等级	语言描述的程度
1	同等
3	稍微
5	明显
7	强烈
9	极端

注: 2,4,6,8 表示上述相邻判断的中间值。

$\Omega = (H_{-8}, H_{-7}, H_{-6}, H_{-5}, H_{-4}, H_{-3}, H_{-2}, H_{-1}, H_0, H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_7, H_8) = (\dots, \text{同等}, \text{介于同等稍微}, \text{稍微}, \text{介于稍微明显}, \text{明显}, \text{介于明显强烈}, \text{强烈}, \text{介于强烈极端}, \text{极端})$, 其等级得分为 $V = (-1, \dots, 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1)$ 。

以表 3 中“就底层属性网络架构拓展能力而言的方案偏好关系矩阵”的 D_{31E} 为例, 介绍定性数据偏好关系矩阵的形成并求得正规化后的得分值矩阵 \bar{V} 。以方案 2 与方案 1 的对比作为例子来说明使用表来进行标量化计算的过程。方案 1 中网络架构的拓展能力一般, 其适应配网发展能力较差; 而方案 2 中的网络拓展能力较好, 其适应配网发展能力也较强。因此, 专家认为方案 2 相对于方案 1 的优势程度介于“明显”、“强烈”到“极端”之间, 而不同程度间的侧重点也有所差异, 由此将 3 个方案两两比较形成的区间偏好关系如表 5 所示。

在表 5 中, 第 i 行第 j 列的元素 d_{ij} 代表方案 i 与方案 j 的比较结果。例如, 第 2 行第 1 列的元素 d_{21} 代表方案 2 与方案 1 的比较结果 $\{([H_5, H_6], 0.4), ([H_6, H_8], 0.6)\}$, 专家在评判中认为方案 2 相对于方案 1 的优势程度在“明显”到“强烈”的区间 $[H_5, H_6]$ 的比重为 0.4, 而在“强烈”到“极端”的区间 $[H_6, H_8]$ 的比重为 0.6。其对称元素 d_{12} 代表方案 1 与方案 2 的比较结果。对角线元素 d_{ii} 代表方案 i 与自身的比较, 表示为“同等”, 即 $\{[H_0, H_0], 1\}$ 。

表 5 偏好关系 D_{31E}

Table 5 Preference relation D_{31E}

d_{ij}	方案 1	方案 2	方案 3
方案 1	$\{[H_0, H_0], 1\}$	—	—
方案 2	$\{([H_5, H_6], 0.4), ([H_6, H_8], 0.6)\}$	$\{[H_0, H_0], 1\}$	—
方案 3	$\{([H_5, H_6], 0.7), ([H_6, H_8], 0.3)\}$	$\{([H_0, H_1], 1)\}$	$\{[H_0, H_0], 1\}$

基于相对偏好识别框架等级得分值和表 5 中给出的偏好关系, 根据式(5)求解得分值矩阵并进行正

规范化处理, 得到正规化后的得分值矩阵为

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} 0.5 & [0.0500, 0.1500] & [0.0625, 0.1563] \\ [0.8500, 0.9500] & 0.5 & [0.4375, 0.5000] \\ [0.8438, 0.9375] & [0.5000, 0.5625] & 0.5 \end{bmatrix}$$

接下来以 C_{1E} 为例介绍定量数据的关系矩阵并求得正规化后的矩阵作为得分值矩阵 \bar{V} 。该属性表示的是建设费用对于经济可行性的影响。各方案中建设费用均已知, 专家在评判过程中认为建设费用越大, 其所花费成本越多, 经济可行性越低。在规划中应尽量减少成本花费。在这里, 借鉴层次分析法中点值判断矩阵的方法, 用各方案中建设费用资金之比来计算比较方案间的相对权重。比如, 方案 2 相对于方案 1 在属性 C_1 上的优势程度用 1 175/600 进行标量化计算, 结果采用区间形式显示为 [1.953 8, 1.953 8]。使用此种方法建立的关系矩阵如表 6 所示。

表 6 定量数据关系矩阵 C_{1E}

Table 6 Quantitative data relational matrix C_{1E}

	方案 1	方案 2	方案 3
方案 1	[1.0000, 1.0000]	[0.5106, 0.5106]	[0.5957, 0.5957]
方案 2	[1.9538, 1.9538]	[1.0000, 1.0000]	[1.1667, 1.1667]
方案 3	[1.6786, 1.6786]	[0.8571, 0.8571]	[1.0000, 1.0000]

根据以上矩阵结合式(5)进行调整得到正规化的矩阵为

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} 0.5 & [0.2553, 0.2553] & [0.2979, 0.2979] \\ [0.9769, 0.9769] & 0.5 & [0.5834, 0.5834] \\ [0.8393, 0.8393] & [0.4286, 0.4286] & 0.5 \end{bmatrix}$$

(2) 属性间的区间偏好关系矩阵

根据图 1 所示的层次结构共形成 10 个属性区间偏好关系矩阵, 各矩阵的含义如表 7 所示。

以表 7 中的 D 为例介绍属性间的区间偏好关系

表 7 属性偏好关系矩阵

Table 7 Preference relation matrix of attributes

序号	矩阵	阶数	代表含义
1	G	4	总目标
2	A	2	高效性
3	B	2	可靠性
4	C	2	经济性
5	D	3	卓越性
6	A_1	4	通信系统高效性
7	A_2	2	主站系统高效性
8	A_{14}	2	通信系统高效性-通信能力
9	B_2	2	通信系统可靠性
10	D_3	2	卓越性-通信系统卓越性

的形成, 并得到得分矩阵 \bar{V} 。和求定性方案间的区间分布式偏好关系相同, 专家就属性 D_1 、 D_2 、 D_3 相对于属性 D 的重要性进行两两比较形成分布式偏好关系如表 8 所示。

表 8 偏好关系 D

Table 8 Preference relation D

d_{ij}	D_1	D_2	D_3
D_1	$\{H_0, 1\}$	—	—
D_2	$\{[H_0, H_2], 1\}$	$\{H_0, 1\}$	—
D_3	$\{[H_6, H_7], 1\}$	$\{([H_5, H_6], 0.5), [H_6, H_7], 0.5\}$	$\{H_0, 1\}$

在表 8 中, 专家认为属性 D_2 相对 D_1 的重要性在“同等”与“稍微”之间, 因此两者比较结果为 $\{[H_0, H_2], 1\}$ 。同样, 属性 D_3 相对 D_1 的重要性在“强烈”和“极端”之间, 比较结果为 $\{[H_6, H_7], 1\}$, 属性 D_3 相对 D_2 的重要性在“明显”与“极端”之间, 专家认为其比较结果为区间 $[H_5, H_6]$ 及 $[H_6, H_7]$, 且比重相同。

根据表 8 的偏好关系, 得到正规化后的得分值矩阵为

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} 0.5 & [0.3750, 0.5000] & [0.0625, 0.1250] \\ [0.5000, 0.6250] & 0.5 & [0.0938, 0.1563] \\ [0.8750, 0.9375] & [0.8438, 0.9063] & 0.5 \end{bmatrix}$$

2.4 求解各偏好关系权重

按照本文的方法, 得到正规化的得分值矩阵后, 根据式(9)构造各方案或各属性优先权的优化模型, 然后根据式(10)和式(11)求取优化问题解区间 $[w_i^-, w_i^+]$, 再利用式(13)和 $[w_i^-, w_i^+]$ 计算可能度矩阵 P , 最后根据式(14)求得各方案或各属性的效用值, 即为权重。其中, 定量数据求解出的优化模型实际为点值, 因此将其优化模型进行归一化处理, 直接作为定量数据方案的权重。以 D_{31E} 为例, 具体计算过程如下:

由上一节可得到 D_{31E} 的正规化得分值矩阵 \bar{V} , 基于此, 利用式(9)构造优化模型, 根据式(10)和式(11)求取

$$[w_i^-, w_i^+](i = 1, 2, 3) = \{[0.0286, 0.0829], [0.4061, 0.4872], [0.4576, 0.5422]\}$$

由上式结果可以看出, 方案 2 和方案 3 相对于属性 D_{31} 的权重区间有交叉重叠部分, 在某种程度上很难在方案 2 和方案 3 中做出选择, 方案 3 并不是绝对的比方案 2 好。因此, 利用式(13)计算得到可能度矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0.1786 \\ 1 & 0.8214 & 0.5 \end{bmatrix}$$

最后利用式(14)获得各方案的效用值, 即为权重。

以表 3 中的 D_{31E} 、 C_{1E} 及表 7 中的 D 为例, 经过计算得到的权重值如表 9 所示。

表 9 偏好关系权重求解结果

Table 9 Preference relation weight vector

	U_1	U_2	U_3
D_{31E}	0.166 7	0.363 1	0.470 2
C_{1E}	0.140 9	0.508 8	0.350 2
D	0.295 5	0.204 5	0.500 0

表 9 中, 得到就属性 D_{31} 或 C_1 而言的 3 个方案权重值以及属性 D_1 、 D_2 和 D_3 相对于其上级属性 D 的属性权重。可以看出, 单就 D_{31E} 来看, 方案 1 权重值最小, 即效用最差, 可直接排除, 方案 3 权重值较方案 2 更高, 效用更好, 推荐方案 3。

2.5 综合权重计算和排序

通过计算得到各层的属性权重及方案权重后, 根据式(15)计算下层属性对其上层属性的权重, 层层向上计算, 得到最终对于总目标的综合权重。

例如在本案例中的层次结构图 1 中, 目标层 G 为第 0 层, 第 1 层属性 D 具有 3 个子属性即第 2 层属性 D_1 、 D_2 和 D_3 , 属性 D_3 又具有两个子属性 D_{31} 和 D_{32} 即第 3 层属性。案例中求得方案 1 关于 D_{31} 、 D_{32} 、 D_1 和 D_2 的方案权重为 $W_{131}^{(3)}$ 、 $W_{132}^{(3)}$ 、 $W_{12}^{(2)}$ 和 $W_{11}^{(2)}$, D_{31} 和 D_{32} 关于 D_3 的属性权重分别为 $W_{31}^{(3)}$ 和 $W_{32}^{(3)}$, 同样, D_1 、 D_2 和 D_3 关于属性 D 的属性权重为 $W_1^{(2)}$ 、 $W_2^{(2)}$ 和 $W_3^{(2)}$ 。则方案 1 关于属性 D 的权重为

$$W_1^{(1)} = \sum_{j=1}^3 W_{1j}^{(2)} W_j^{(2)} = W_{11}^{(2)} W_1^{(2)} + W_{12}^{(2)} W_2^{(2)} + (W_{131}^{(3)} W_{31}^{(3)} + W_{132}^{(3)} W_{32}^{(3)}) \times W_3^{(2)} = 0.0588$$

按照上述方法从最下层开始层层向上进行计算, 最终可以得到方案 1、方案 2 和方案 3 相对于总目标的综合权重。求得的综合权重与运用层次分析法得到的最终权重进行比较, 见表 10 所示。

表 10 综合权重排序

Table 10 Global weight sort

	本文方法	排序	层次分析法	排序
方案 1	0.270	3	0.233	3
方案 2	0.354	2	0.379	2
方案 3	0.377	1	0.389	1

综合权重越大, 该方案的相对优越性越强。通过对综合权重的排序, 可以得到 3 个方案由优至劣

的顺序为: 方案 3、方案 2、方案 1, 与区间层次分析法排序结果相同。其中方案 1 的综合权重相对方案 2 和方案 3 较低, 可将其淘汰, 而方案 3 的综合权重优于方案 2。因此, 最终的方案评估结果为方案 3 优越性最高, 优先考虑。

根据表 10 中数据, 将方案 2 和方案 3 的权重结果相比较, 结合定义 3 获得本文方法得出的两个方案的区分度为 6.50%, 而运用区间层次法得到的方案 2 与方案 3 的区分度为 2.64%。因此可以得出, 在本文方法与区间层次分析法排序结果相同的情况下, 本文方法较层次分析法在方案 2 和方案 3 的综合权重上相差较大, 可以明确得出方案 3 较为优越。究其原因, 本文方法在建立方案或属性间的区间偏好关系矩阵时就产生权重, 在方案属性间形成差异。在之后的每个计算步骤中, 差异不断放大, 所以最终的排序结果差异越发明显, 区分度更高。由此可见, 本文方法在采用传统评价方法难以给出评价方案决策的情况下更具实用性。

3 结语

本文提出了基于区间偏好关系和 MADM 的配电网智能化规划方案评估方法, 利用区间评分来解决在实际两两比较中常出现的不确定的主观判断, 同时结合偏好关系的决策方法来更好地将专家经验和定量计算相结合, 合理地处理了决策因素的不确定性和专家判断的模糊性, 减少了在两两比较中产生的不一致性, 简化了综合评判决策的步骤。实验结果表明, 本文方法可行、有效, 所获评价排序结果与层次分析法相比具有更高的区分度。

参考文献

- [1] 陶顺, 陈鹏伟, 肖湘宁, 等. 智能配电网不确定性建模与供电特征优化技术综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 77-91.
TAO Shun, CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, et al. Review on uncertainty modeling and power supply characteristics optimization technology in smart distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 77-91.
- [2] 高海东, 王春利, 颜渝坪. 绿色智能发电概念探讨[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 7-9.
GAO Haidong, WANG Chunli, YAN Yuping. Discussions on the concept of green intelligent power plant[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 7-9.
- [3] 冷华, 董莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive

- evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 53-59.
- [4] 周想凌, 郝婉梦, 邢杰, 等. 一种基于改进灰色理论的电力消费量预测方法[J]. *陕西电力*, 2016, 44(3): 53-57. ZHOU Xiangling, HAO Wanmeng, XING Jie, et al. An electric consumption prediction method based on improved gray theory[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2016, 44(3): 53-57.
- [5] 田靖雨, 王印松, 李士哲, 等. 基于协方差指标的火电机组协调控制系统性能模糊评价方法[J]. *热力发电*, 2016, 45(2): 47-51. TIAN Jingyu, WANG Yinsong, LI Shizhe, et al. Fuzzy assessment of performance of coordinated control system in thermal power unit based on covariance index[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(2): 47-51.
- [6] 滕书华, 鲁敏, 杨阿锋, 等. 基于一般二元关系的粗糙集加权不确定性度量[J]. *计算机学报*, 2014, 37(3): 649-665. TENG Shuhua, LU Min, YANG Afeng, et al. A weight uncertainty measure of rough sets based on general binary relation[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2014, 37(3): 649-665.
- [7] RAHUL, KAPOOR R, TRIPATHI M M. Detection and classification of multiple power signal patterns with Volterra series and interval type-2 fuzzy logic system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 92-101. DOI: 10.1186/s41601-017-0039-z.
- [8] 黄心, 王清心, 丁家满. 基于概率盒理论的电网规划方案中指标不确定性建模[J]. *信息与控制*, 2016, 45(3): 272-277. HUANG Xin, WANG Qingxin, DING Jiaman. Index uncertainty modeling in grid planning based on probability box theory[J]. *Information and Control*, 2016, 45(3): 272-277.
- [9] 肖峻, 张跃, 付川. 基于可能度的区间数排序方法比较[J]. *天津大学学报*, 2011, 44(8): 705-711. XIAO Jun, ZHANG Yue, FU Chuan. Comparison between methods of interval number ranking based on possibility[J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(8): 705-711.
- [10] 黄智力, 罗键. 不确定多指标决策的可能度规划模型及其应用[J]. *控制与决策*, 2017, 32(1): 131-140. HUANG Zhili, LUO Jian. Possibility degree programming model for uncertain multi-attribute decision making and its application[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(1): 131-140.
- [11] 苗红霞, 萧旋旋, 江冰, 等. 基于信息融合的预装式变电站健康状态评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(14): 85-91. MIAO Hongxia, XIAO Xuanxuan, JIANG Bing, et al. State evaluation of prefabricated substation based on information fusion[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(14): 85-91.
- [12] 刘爽, 吕永波, 张仲义. 基于 AHP 和 PCA 的多指标评价建模方法及应用[J]. *信息与控制*, 2015, 44(4): 416-421. LIU Shuang, LÜ Yongbo, ZHANG Zhongyi. Multi-index evaluation modeling method based on AHP and PCA and its Application[J]. *Information and Control*, 2015, 44(4): 416-421.
- [13] 林鸿基, 林振智, 林冠强, 等. 基于信息熵权和层次分析法的电网关键节点识别[J]. *广东电力*, 2016, 29(12): 50-56. LIN Hongji, LIN Zhenzhi, LIN Guanqiang, et al. Identification for critical nodes of power grid based on information entropy weight and analytic hierarchy process[J]. *Guangdong Electric Power*, 2016, 29(12): 50-56.
- [14] 张美璟, 王应明, 陈圣群, 等. 考虑偏好反转的区间不确定多属性决策方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(11): 2019-2024. ZHANG Meijing, WANG Yingming, CHEN Shengqun, et al. Approach for multiple attribute decision making under interval uncertainty considering preference reversal[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(11): 2019-2024.
- [15] QI Yue. New approach to determine the priorities from interval fuzzy preference relations[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(2): 267-273.
- [16] 王瑞莲, 赵万里. 基于模糊决策的城市高压输电网规划方案评价方法[J]. *电网技术*, 2013, 37(2): 488-492. WANG Ruilian, ZHAO Wanli. A fuzzy decision-based method to evaluate planning scheme for urban high voltage transmission network[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(2): 488-492.
- [17] 孙强, 葛旭波, 刘林, 等. 智能电网多属性网络层次组合评价法及其应用研究[J]. *电网技术*, 2012, 36(10): 49-54. SUN Qiang, GE Xubo, LIU Lin, et al. Multi-attribute network process comprehensive evaluation method for smart grid and its application[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(10): 49-54.
- [18] 储茂祥, 王安娜, 巩荣芬. 一种改进的最小二乘孪生支持向量机分类算法[J]. *电子学报*, 2014, 42(5): 998-1003. CHU Maoxiang, WANG Anna, GONG Rongfen. Improvement on least squares twin support vector machine

- for pattern classification[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(5): 998-1003.
- [19] 徐选华, 孙倩. 基于属性多粒度的双层权重大群体决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(10): 1908-1914.
XU Xuanhua, SUN Qian. Two-layer weight large group decision-making method based on multi-granularity attributes[J]. Control and Decision, 2016, 31(10): 1908-1914.
- [20] 付超, 侯震. 基于多等级方案成对比较的决策方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(10): 1828-1834.
FU Chao, HOU Zhen. Decision method based on pairwise comparison of alternatives on multiple grades[J]. Control and Decision, 2015, 30(10): 1828-1834.
- [21] 高新华, 严正. 基于主成分聚类分析的智能电网建设综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2238-2243.
GAO Xinhua, YAN Zheng. Comprehensive assessment of smart grid construction based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2238-2243.
- [22] 陈奎, 韦晓广, 牛俊萍, 等. 基于 AHP-DEA 模型的电网规划方案综合评判决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 40-46.
CHEN Kui, WEI Xiaoguang, NIU Junping, et al. Comprehensive judgment for power system planning alternatives based on AHP-DEA[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 40-46.
- [23] 商云龙, 李善波, 禰亮, 等. 配电网运行方式多目标决策的模糊评价[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(7): 32-36.
SHANG Yunlong, LI Shanbo, XUAN Liang, et al. Fuzzy evaluation on multi-objective decision-making of operation mode for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2016, 28(7): 32-36.
- [24] 杨丽君, 王硕, 卢志刚. 配电网智能化规划评价指标[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 83-87.
YANG Lijun, WANG Shuo, LU Zhigang. Indices of distribution network intelligent planning evaluation[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 83-87.
- [25] 肖峻, 王成山, 周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 50-57.
XIAO Jun, WANG Chengshan, ZHOU Min. An IAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57.
- [26] 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.

收稿日期: 2017-11-29; 修回日期: 2018-02-09

作者简介:

丁家满(1974—), 男, 通信作者, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统及自动化, 决策理论与方法; E-mail: tjoman@126.com

沈书琳(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为决策理论与方法; E-mail: 1214462146@qq.com

李川(1971—), 男, 教授, 研究方向为智能电网、智能检测。

(编辑 魏小丽)