

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191247

## 基于证据推理的优质电力投资决策方法

栾乐, 周凯, 肖天为, 王勇, 许中, 马智远

(广州供电局有限公司电力试验研究院, 广东 广州 510420)

**摘要:** 电压暂降会给高端制造企业带来巨大的经济损失, 企业对优质电力需求强烈, 其对优质电力的投资意愿逐步提高, 却对如何选择最优的优质电力投资方案无从入手。为有效解决该问题, 提出一种基于证据推理理论的多信息融合优质电力投资决策方法。首先, 分析优质电力投资决策的影响因素, 建立优质电力投资决策的指标体系。然后, 采用主客观组合赋权得到指标权重, 统一两种权重, 降低权重的主观性。最后, 基于由权重与等级置信度组成的基本概率函数, 利用证据推理理论进行多信息融合, 实现对优质电力投资方案的优选。通过对某半导体制造企业进行实例分析, 证明所提出的主客观组合赋权与证据推理相结合的方法可对优质电力投资方案进行有效决策, 具有较好的实用性。

**关键词:** 优质电力; 电压暂降; 投资决策; 证据推理; 效用值

### Premium power investment decision-making method based on evidence reasoning

LUAN Le, ZHOU Kai, XIAO Tianwei, WANG Yong, XU Zhong, MA Zhiyuan

(Electric Power Test Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510420, China)

**Abstract:** A voltage sag will bring huge economic losses to high-end manufacturing enterprises. Enterprises have a strong need for premium power, and their willingness to invest in premium power is gradually increasing. However, there is no way to choose the best premium power investment scheme. In order to solve this problem, a multi-information fusion premium power investment decision-making method based on evidence reasoning theory is proposed. The criteria system of premium power investment decision-making is established by deeply analyzing the influence factors of premium power investment decision-making. The weight of the index is obtained by combining subjective and objective weights, unifying the two weights and reducing the subjectivity of the weights. Finally, based on a basic probability function composed of weights and rank belief degrees, multiple information fusion is performed using evidence reasoning theory to optimize the premium power investment scheme. Through a case analysis of a semiconductor manufacturing enterprise, it is proved that the combination of subjective and objective combination weighting and evidence reasoning proposed in this paper can make effective decision-making on premium power investment schemes, and that this has better practicality.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GZHKJXM20170141).

**Key words:** premium power; voltage sag; investment decision; evidence reasoning; utility value

## 0 引言

高端制造企业生产过程使用的变频器、现代电力电子器件、自动化技术设备等对电能质量的要求逐步提高, 日益增多的电能质量问题会造成企业生产过程中中断、产品质量下降等后果<sup>[1-2]</sup>, 得到广泛关

注<sup>[3-4]</sup>。其中电压暂降问题带给企业的影响严重, 造成的经济损失巨大<sup>[5-6]</sup>。为减少电压暂降带来的经济损失, 敏感的高端制造企业希望得到优质供电。因此这类敏感用户对优质电力的投资需求很大。优质电力即指电能质量指标高于现有公用电网供电章程、相关规定的电能质量指标的电力<sup>[7]</sup>。随着售电市场的逐步开放, 用户对优质电力投资具有更多选择与参与, 其对优质电力的需求与投资意愿逐步提高; 同时电力市场会呈“多卖方-多买方”格局。卖

基金项目: 中国南方电网有限公司科技项目资助 (GZHKJXM20170141)

方为用户提供有效合理的优质电力投资方案是一种提高自身竞争力的重要途径。因此研究优质电力投资决策方法是有必要的。

国内外对优质电力投资决策的研究还处于初步阶段。文献[8]基于效用理论和增溢价值理论,研究用电效用和支付意愿的定量分析方法,提出一种优质电力增溢价值量化方法。该方法的提出为优质电力投资提供了一定基础。文献[9]进一步提出了一种多参与者的优质电力投资策略和最优优质电力投资策略确定方法。根据双边匹配理论,考虑敏感用户和新售电公司(由第三方独立售电公司和传统电网公司组成)的失望-欣喜心理感知,建立一个多目标的投资优化模型,基于隶属函数的加权和法求解相应多目标优化模型。文献[10]提出一种基于模糊软集的优质电力投资决策方法。主要研究用户和售电公司参与优质电力投资所关注的关键要素及其数学本质,并提出基于模糊软集的决策原理及方法。

综上,虽然现有研究为优质电力投资决策提供了一些方法,但优质电力投资决策中,一般具有定性指标和定量指标,可获得的数据信息具有不确定性、多属性的特点,所以需要进行多信息融合。信息融合的多种方法中,证据推理理论相较于其余常用的方法,如灰色关联分析法、层次分析法、加权因素比较法、模糊综合评价法等<sup>[11-13]</sup>,其优势在于结合了证据组合等理论,可对多方面指标因素进行信息融合,保留初始评价信息的不确定性,同时也能处理模糊性带来的不确定性,可在一定程度上增强判断结果的客观性,其在电力等领域的多指标评价问题上运用广泛<sup>[14-15]</sup>。故采用证据推理理论对优质电力投资决策的多方面信息进行融合。

基于此,本文提出一种基于证据推理理论(Evidential Reasoning, ER)<sup>[16-17]</sup>的优质电力投资决策方法。该方法充分考虑影响优质电力投资决策的不同因素,在此基础上建立售电侧开放背景下的优质电力投资决策评价指标体系;经主客观权重组合赋权得到指标权重,作为衡量各指标重要性的参数;采用相应指标权重和等级置信度组合形成基本概率函数。最后运用ER理论算法进行多指标信息融合,利用综合效用值实现优质电力投资最优决策。

### 1 优质电力投资决策评价指标体系

优质电力投资决策受多种因素影响,主要为经济性因素、技术性因素和社会综合性因素。在售电侧开放的背景下,更具经济性的优质电力投资方案必然会增加售电公司的竞争力,用户也会更愿意投资,因此经济性因素的提出具有必要性。其次考虑

技术性因素,优质电力投资方案的优劣还体现在技术不同所带来的供电水平的不同,同时用户的电能质量水平是影响技术服务方案选择的重要因素。社会综合性因素是用于考量优质电力投资在电力市场大环境下的开展潜力,具有实际意义。确立如表 1 所示的评价指标体系。

表 1 优质电力投资决策评价指标体系  
Table 1 Premium power investment decision-making evaluation index system

指标类型	指标	特点/意义
经济性	投资净现值	考虑资金时间价值
	投资风险	体现投资不确定性
技术性	优质供电水平	反映投资方案技术供应好坏
	暂降影响程度	反映用户电能质量水平
社会综合性	投资环境	影响投资的其他潜在因素
	市场可进性	体现市场潜力与投资有效性
	用户素质	体现用户个体总体可合作性

经济性评价指标选用投资净现值和投资风险。其中投资净现值(NPV of Investment, NPVI)能直接以货币值表示获利情况,呈现优质电力投资方案获利与否<sup>[18]</sup>。一般可得到相应投资的 NPVI 变化范围和最大可能值  $M_1$ 。

投资风险存在于优质电力投资中,风险大意味着可能会造成收益不确定性,会影响投资方案的经济性,此指标的提出是有意义的。投资风险无法用一个准确的数值表示,只知道其变化范围及最可能值  $M_2$ 。

技术性评价指标的选择结合优质电力的分级供应特点与电压暂降的实际物理特征,选取优质电力水平(Premium Power Level, PPL)和暂降影响程度两个指标。采用 PPL 可以简洁明了地刻画不同优质电力投资方案为用户提供的优质电力水平,结合现有行业标准具有实际意义。其分为三个等级:A、AA、AAA,分别对应普通、优质、特级<sup>[19]</sup>。

暂降影响程度指标基于实际电压暂降特征数据,利用暂降严重程度<sup>[20]</sup>量化电压暂降事件,采用用户不可承受暂降严重程度之和与总暂降严重程度之和的比值体现用户遭受的电压暂降整体水平,准确且直观。

社会综合性因素选取投资环境、市场可进性和用户素质。投资环境是指其他影响用户进行优质电力投资的因素,是进行投资需要考量的参数。可引入直觉模糊集理论刻画,得到直觉模糊数中的  $u$  值来刻画投资环境的好坏。

市场可进性(MA)的提出在售电侧开放背景下具有重要意义。其刻画优质电力投资方案进入市场

的有效性以及令用户满足的程度。按程度分为弱(W)、中(M)、强(S)三个等级, 表示如式(1)所示。

$$MA = \{W | M | S\} \quad (1)$$

实际中售电公司在提供优质供电时应对用户进行评估, 决定值得合作的对象。因此以用户素质(OU)表示用户各方面如信用等级等的综合信息作为用户评估的依据, 分为5个等级: 非常差(VL)、较差(L)、中等(M)、较好(G)、非常好(VG), 表示如式(2)。

$$QU = \{VL | L | M | G | VG\} \quad (2)$$

由上可知, 每一种评价指标均可以用语言或数学公式描述, 其他因素也可进行类似描述。

## 2 基于证据推理的优质电力投资决策

### 2.1 证据推理理论

ER 理论是在不确定条件下处理多属性决策问题的一种有效方法<sup>[21-22]</sup>。与现有的优质电力投资方案的决策方法不同, ER 方法提供了一种有效过程, 可以综合有关决策因素的评估信息。

在优质电力投资评价中, 对任一待选方案都可得到如式(3)所示结果。

$$S(a_i) = \{(e_{j,i}, \beta_{j,i}); i=1, 2, L, T\}, j=1, 2, L, N \quad (3)$$

其中研究对象  $a_i$  共有  $T$  个评价指标,  $e_{j,i}$  代表属性  $e_i$  被判定为  $H_j$  等级, 其等级置信度为  $\beta_{j,i}$ <sup>[23]</sup>。属性  $e_i (i=1, 2, L, T)$  的权重用  $\omega_i$  表示,  $0 \leq \omega_i \leq 1$ , 有  $\sum_{i=1}^T \omega_i = 1$ 。属性即评价指标。

### 2.2 基础因素

用于解决优质电力投资决策的 ER 方法主要包括两个关键基础因素, 即用以表示决策指标重要程度的相关权重, 以及表示指标与等级之间匹配程度的等级置信度。

#### 2.2.1 相关权重

主流的权重确定方法分为主观赋权和客观赋权。前者体现了评价者的主观经验与偏好; 后者则基于实际测量信息进行客观权重计算。但两种方法都存在自身无法克服的问题, 造成权重结果可信度不高<sup>[24]</sup>。为实现两者统一, 本文指标权重通过主观赋权与客观赋权相结合得到, 提高了可信度。

##### 1) 基于集值迭代确定主客观权重

基于集值迭代的主客观权重确定方法<sup>[25]</sup>具体步骤如下:

(1) 明确基本信息, 赋予  $M$  个专家不同的权重, 记为权重集  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, L, \lambda_M)$ 。

(2) 基于集值迭代为指标进行排序。首先, 各专家需从  $T$  个指标中选出认为最重要的  $p (1 \leq p \leq M)$  个指标, 再通过综合专家权重与是否被选为最重要

的指标对原指标进行重新排序。

令第  $m$  个专家选取的最重要指标集为  $E^m = (e_1^m, L, e_p^m)$ , 同时引入函数:

$$\mu_m(k) = \begin{cases} 1 & x_k \in X^m \\ 0 & x_k \notin X^m \end{cases} \quad (4)$$

$$g_k = \sum_{m=1}^M \lambda_m \mu_m(k) \quad (5)$$

最后按  $g_k$  的大小, 重新对指标集排序, 得到新指标集:  $E^* = (e_1^*, L, e_T^*)$ 。

(3) 得到比较矩阵。专家根据参考值比较相邻指标,  $r_{ik}$  为比较数值。

通过式(6)将区间值转化为点值。

$$r_i = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^M \lambda_k ((r_{ik}^2)^2 - (r_{ik}^1)^2)}{\sum_{k=1}^M \lambda_k (r_{ik}^2 - r_{ik}^1)} \quad (6)$$

(4) 计算指标主客观权重。将  $T$  个指标依次相邻比较, 可以得到  $T-1$  个比较值。

$$r_{T-1} = \frac{x_{T-1}^*}{x_T^*} \quad (7)$$

将比较值进行连乘:

$$\prod_{i=1}^{T-1} r_i = \frac{x_1^*}{x_T^*} \quad (8)$$

指标  $x_T^*$  权重:

$$\omega_T^* = \frac{1}{1 + \sum_{m=1}^{T-1} \prod_{i=m}^{T-1} r_i} \quad (9)$$

再通过式(10)得到其余指标权重。

$$\omega_i^* = r_i \omega_{i-1}^* (i=1, 2, L, (T-1)) \quad (10)$$

##### 2) 基于差异驱动原理确定客观权重

基于差异驱动原理的客观权重计算方法全面地利用实测数据, 并通过多维度比较来使权重更为客观可信。计算步骤如下: 假设  $L$  个评价对象在  $T$  个评价指标下形成的观测矩阵为  $X = (x_{li})_{L \times T}$ 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & L & x_{1T} \\ x_{21} & x_{22} & L & x_{2T} \\ M & M & & M \\ x_{l1} & x_{l2} & L & x_{lT} \end{bmatrix}$$

其中,  $x_{li} (l=1, 2, L, L, i=1, 2, L, T)$  表示第  $l$  个评价对象在第  $i$  个评价指标下的观测值。同时设正向理想评价对象为  $X = [x_1^+, x_2^+, L, x_T^+]$ 。

从两个方面考量第  $i$  个指标的观测值所提供客观信息量的大小, 如式(11)、式(12)所示。

$$Z_{1i} = \max_l |x_{li} - x_i^+| / x_i^+ \quad (11)$$

$$Z_{2i} = \sum_{l=1}^L |x_{li} - x_i^+| / (L \cdot x_i^+) \quad (12)$$

这两个值结合了整体信息和个体信息。各指标客观权重如式(13)确定。

$$\omega_{2,i} = \frac{Z_{1i} + Z_{2i}}{\sum_{i=1}^T (Z_{1i} + Z_{2i})} \quad (13)$$

### 3) 采用几何平均法确定组合权重

通过上述两种方法分别得到各指标主观权重和客观权重，二者通过几何平均公式进行综合，组合赋权几何平均公式如式(14)所示。

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\omega_{1,i} \cdot \omega_{2,i}}}{\sum_{i=1}^T \sqrt{\omega_{1,i} \cdot \omega_{2,i}}} \quad (14)$$

## 2.2.2 等级置信度

对指标进行评级，实际上是需要对指标相应的实际信息进行计算分析，转换为定性等级评价。指标可分为定量型和定性型。两类指标的等级置信度 $\beta_{j,i}$ 确定方法不同。

### 1) 定量型指标

以投资净现值为例，定量数据 $M_1$ 值代表了投资方案的相应投资净现值水平。而等级划分是定性的，需要对定性指标等级设定对应标准值，从而计算定量数据的相应等级置信度。

标准值的选取需要涵盖待评价方案的各 $M_1$ 值，并且5个标准值均匀分布，梯度一致，跨度不能过大。不同等级的标准值用 $Y_{j,i}$ 表示，标准值确定后，置信度 $\beta_{j,i}$  ( $i=1$ ，投资净现值为指标 $e_1$ )计算过程如下：

当 $M_1$ 大小介于 $Y_{j,1}$ 与 $Y_{j+1,1}$ 之间，用式(15)和式(16)计算投资净现值指标分别属于 $j$ 、 $j+1$ 两个等级的置信度 $\beta_{j,1}$ 、 $\beta_{j+1,1}$ 。

$$\beta_{j,1} = \frac{Y_{j+1,1} - M_1}{Y_{j+1,1} - Y_{j,1}} \quad (15)$$

$$\beta_{j+1,1} = \frac{Y_{j,1} - M_1}{Y_{j+1,1} - Y_{j,1}} \quad (16)$$

其余三个等级置信度为0。同时可得到若 $M_1$ 数值正好等于任意等级标准值 $Y_{j,1}$ ，则该等级置信度为1，其余等级置信度为0。

最后得到指标等级置信度分布，即指标评价证据集合，如式(17)所示。

$$S(e_1) = \{(H_1, \beta_{1,1}), (H_2, \beta_{2,1}), (H_3, \beta_{3,1}), (H_4, \beta_{4,1}), (H_5, \beta_{5,1})\} \quad (17)$$

其余定量型指标均可类比得到评价证据集合。

### 2) 定性型指标

以优质电力水平指标为例，此指标可获得数据是定性的3个等级，而评价等级有5级，因此可以将3个等级依次对应到5个评价等级，即将A对应为 $H_1$ ，AA对应为 $H_3$ ，AAA对应为 $H_5$ 。当获得数据为AA，则获得数据被评价等级为 $H_3$ 的可信度为1，其余4个等级置信度为0。得到证据集合为

$$S(e_4) = \{(H_1, 0), (H_2, 0), (H_3, 1), (H_4, 0), (H_5, 0)\} \quad (18)$$

其余定性型指标可类比得到证据集合。

## 2.3 ER推理过程

### 2.3.1 ER递归算法

组合权重与置信度，形成优质电力投资决策中的基本概率函数<sup>[26]</sup>。

$$m_{j,k} = \omega_k \beta_{j,k}, j=1, 2, L, N \quad (19)$$

$$m_{H,k} = 1 - \sum_{j=1}^N m_{j,k} = 1 - \omega_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k} \quad (20)$$

$$\overline{m}_{H,k} = 1 - \omega_k, \overline{m}_{H,k} = \omega_i (1 - \sum_{j=1}^N \beta_{j,k}) \quad (21)$$

式中： $m_{j,k}$ 为属性 $e_k$ 再加入指标权重 $\omega_k$ 后被判为 $H_n$ 等级的基本信度概率分配； $m_{H,k}$ 代表无法确定其等级部分的基本信度概率分配； $\overline{m}_{H,k}$ 为由权重设定与真实情况存在差异所引起的基本信度概率未分配。

再使用以下ER递归算法组合基本概率函数：

$$m_{j,I(k+1)} = K_{I(k+1)} M_j \quad (22)$$

$$M_j = [m_{j,I(k)} m_{j,k+1} + m_{H,I(k)} m_{j,k+1} + m_{j,I(k)} m_{H,k+1}] \quad (23)$$

其中：

$$m_{H,I(k+1)} = K_{I(k+1)} M_H \quad (24)$$

$$M_H = [\overline{m}_{H,I(k)} \overline{m}_{H,k+1} + \overline{m}_{H,I(k)} \overline{m}_{H,k+1} + \overline{m}_{H,I(k)} \overline{m}_{H,k+1}] \quad (25)$$

$$\overline{m}_{H,I(k+1)} = K_{I(k+1)} [\overline{m}_{H,I(k)} \overline{m}_{H,k+1}] \quad (26)$$

$$K_{I(k+1)} = \frac{1}{1 - \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N m_{j,I(k)} m_{i,k+1}}, k = \{1, 2, L, L-1\} \quad (27)$$

研究候选方案 $a_i$ 的聚合结果存在于评价等级 $j$ 上。

$$\beta_j = \frac{m_{j,I(L)}}{1 - \overline{m}_{H,I(L)}} \quad (28)$$

研究对象 $a_i$ 的聚合结果相对于未知：

$$\beta_H = \frac{\overline{m}_{H,I(L)}}{1 - \overline{m}_{H,I(L)}} \quad (29)$$

### 2.3.2 基于效用区间的ER排序方法

为精确比较相似结果间的优劣，将为每一个不同的评价等级设定一个相应的效用函数<sup>[27]</sup>：

$$u(H_n) = \frac{n-1}{N-1}, n=1,2,L,N \quad (30)$$

将最终评价结果投射到次效用函数上, 得到综合效用值:

$$U(S(a_l)) = U_l = \sum_{j=1}^N U(H_j)\beta_j \quad (31)$$

按综合效用值比较投资方案, 综合效用值更大的方案更具有优势。

### 2.4 决策流程

优质电力投资方案证据推理决策过程如图 1 所示。

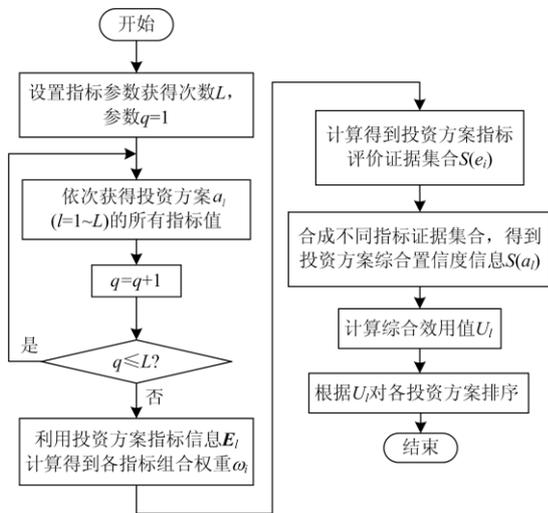


图 1 优质电力投资方案证据推理决策流程

Fig. 1 Flow chart of ER decision-making on premium power investment schemes

## 3 算例分析

### 3.1 基础数据

本文对西南地区某半导体制造企业进行实证分析, 论证优质电力投资的证据推理决策方法的可行性、有效性。该企业生产过程受电压暂降问题的影响极为严重, 每年因电压暂降事故所造成的经济损失较大。该企业的典型敏感设备有排气泵、排气风机等。该用户在母线安装电能质量监测装置, 可获得监测数据如图 2 所示。

假设售电公司根据所提供的用户受影响数据, 提供的待选择的优质电力方案  $A = \{a_l\}$ ,  $l=1,2,L,8$ , 如表 2 所示<sup>[28]</sup>。

优质电力投资方案评价指标  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}$  依次为投资净现值、投资风险、投资环境、优质电力水平、暂降影响程度、市场可进性、用户素质。对售电公司和用户进行调查与统计, 得到 8 个优质电力方案各参数的实际值如表 3 所示。

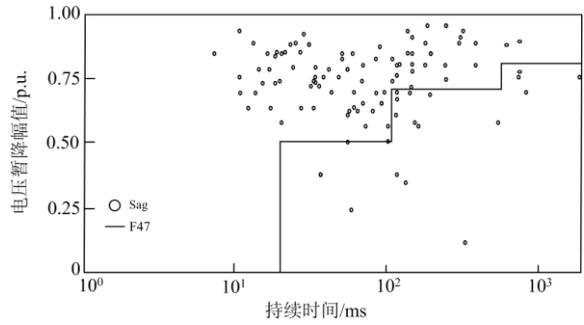


图 2 实测暂降数据

Fig. 2 Recorded voltage sag data

表 2 优质电力投资方案

Table 2 Premium power investment schemes

方案	定制电力装置	成本/万元
$a_1$	STATCOM	28.254 2
$a_2$	DVR	31.925 4
$a_3$	SVC	16.954 7
$a_4$	Flywheel UPS 250 kV A,18 s	73.395 7
$a_5$	Static UPS 350 kV A,180 min	126.511 3
$a_6$	Static UPS 350 kV A,90 min	82.089 2
$a_7$	Static UPS,350 kV A,30 min	43.103 2
$a_8$	Static UPS,350 kV A,20 min	33.235 7

表 3 方案指标值

Table 3 Scheme index value

方案	指标						
	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$
$a_1$	1 259.265	0.4	0.7	AA	0.521	M	G
$a_2$	1 152.723	0.5	0.75	AA	0.521	S	G
$a_3$	442.714	0.75	0.6	AA	0.521	M	G
$a_4$	2 664.386	0.8	0.4	AA	0.521	M	G
$a_5$	1 470.896	0.2	0.4	AAA	0.521	M	G
$a_6$	1 369.210	0.4	0.5	AAA	0.521	S	G
$a_7$	1 507.819	0.3	0.6	AAA	0.521	S	G
$a_8$	1 882.152	0.5	0.65	AA	0.521	M	G

### 3.2 优质电力投资决策实证分析

基于表 3 数据, 利用式(4)一式(14)计算得到主客观组合赋权后的权重向量  $[0.21, 0.09, 0.1, 0.19, 0.13, 0.12, 0.16]$ 。

对单个优质电力投资方案每个指标进行等级置信度计算, 过程如下: 根据不同定量型指标数据, 选取等级值; 选取完等级值后利用式(15)、式(16)进行完整计算。定性型指标直接进行等级信息匹配即可得到等级置信度。

通过计算可得 8 个优质电力投资方案各自对应的置信度数据。以方案  $a_1$  为例, 置信度信息如表 4 所示, 包含 7 个指标的 5 个等级置信度信息。其余

优质电力投资方案同样得到类似表格。

按照证据推理原理进行编程，聚合得到 8 个待选方案的综合置信度信息如表 5 所示。

表 4  $a_1$  置信度信息

Table 4 Degree of belief of  $a_1$

$\beta_{j,k}(k=1)$	VL	L	M	G	VG
	(j=1)	(j=2)	(j=3)	(j=4)	(j=5)
$e_1$	0	0.23	0.77	0	0
$e_2$	0	0.4	0.6	0	0
$e_3$	0	0	0.2	0.8	0
$e_4$	0	0	1	0	0
$e_5$	0	0	0.92	0.08	0
$e_6$	0	0	1	0	0
$e_7$	0	0	0	1	0

表 5 方案综合置信度

Table 5 Comprehensive degree of belief of plans

	VL	L	M	G	VG	$\beta_H$
$a_1$	0	0.041 3	0.433 3	0.124 9	0	0.400 5
$a_2$	0	0.046 0	0.331 4	0.142 9	0.057 6	0.422 1
$a_3$	0.067	0.044 4	0.363 5	0.107 9	0	0.417 6
$a_4$	0	0.019 0	0.300 4	0.128 4	0.124 4	0.427 8
$a_5$	0.008 5	0.054 6	0.301 5	0.104 5	0.100 9	0.429 9
$a_6$	0	0.133 2	0.157 4	0.090 3	0.177 8	0.441 2
$a_7$	0	0.034 3	0.219 7	0.138 0	0.174 6	0.433 4
$a_8$	0	0	0.373 5	0.224 5	0	0.402 1

基于效用区间进行优质电力投资方案排序，赋予 5 个评价等级不同的效用值，计算得到 8 个投资方案综合效用值如表 6 所示。

表 6 方案综合效用值

Table 6 Comprehensive utility value of methods

综合效用	方案			
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
$U_i$	0.320	0.342	0.274	0.376
	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
$U_i$	0.344	0.357	0.396	0.355

按照综合效用值从大到小的排序结果为

$$a_7 > a_4 > a_6 > a_8 > a_5 > a_2 > a_1 > a_3$$

得到优质电力投资方案  $a_7$  为最优方案。

分析待选方案的 7 个评价指标数据，不同投资方案的  $e_5$  和  $e_7$  两个指标对于同一个用户是相同的；可知方案 7 的投资净现值  $e_1$  不是最大的，而方案 4 具有最大的投资净现值，但方案 4 的指标  $e_4$  比方案 7 低一个等级，而  $e_4$  是第二重要的因素，则会较大程度影响方案 4 的排序。另外方案 7 的其余 3 个指标值也优于方案 4，结合指标相应权重信息，可知文章方法决策结果符合分析结果，可行且有效。以方案 3 为例，其采用 SVC 设备治理电压暂降，其优

点是调节快速，并且在投资和运维上具有经济性。从数据可以看出其投入成本最小，但其能带来的投资获利也最小。此类设备还可能给用户带来谐波困扰，不是最佳的治理设备。因此排序最末是合理的。

当所有获得证据都用于信息融合时，本文方法决策结果的不确定性降至最低，而且此时的决策结果已综合考虑了来自所有证据的信息，因此能有效合理地实现最佳优质电力投资决策。

### 3.3 方法对比

ER 理论是在层次分析法的基础上发展而来的一种信息融合方法，因此通过将本文方法与层次分析法的决策结果进行对比分析，以验证本文所提方法的有效性与特点所在。

通过判断矩阵计算得到 7 个指标的权重为 [0.40, 0.02, 0.04, 0.27, 0.08, 0.06, 0.13]，对指标值进行归一化处理，通过加权求和得到 8 个方案的综合指标值如表 7 所示。

表 7 方案综合指标值

Table 7 Comprehensive index value of methods

综合指标	方案			
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
E	0.487 2	0.502 0	0.343 2	0.736 2
	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
E	0.644 3	0.664 0	0.630 9	0.599 3

方案综合指标从大到小排序为

$$a_4 > a_6 > a_5 > a_7 > a_8 > a_2 > a_1 > a_3$$

从排序结果对比可知，层次分析法决策出的最优方案为  $a_4$ ，而本文方法决策得到的最优方案为  $a_7$ 。

从两个方案的指标数据对比可知，方案 4 的  $e_1$  值远大于方案 7 的  $e_1$  值，即方案 4 能带来的投资净现值远大于方案 7，而方案 7 的  $e_3$ 、 $e_6$  值大于方案 4 的  $e_3$ 、 $e_6$  值。对权重进行分析可知，由于层次分析法得到  $e_1$  的权重  $\omega_1$  远大于其余指标权重，导致放大了方案 4 在投资净现值指标的优势，而  $e_3$ 、 $e_6$  对应的权重  $\omega_3$ 、 $\omega_6$  极小，进一步削弱方案 7 的优势，因此层次分析法决策出方案 4 为最优。

可见层次分析法决策结果受主观权重影响大，易将极端情况放大。而本文方法正好弥补此缺陷，考虑实际指标数据，对权重进行主客观结合处理，提高客观性，减少极端情况出现的可能性。且进一步对指标数据进行处理，切合实际情况，实现多维度信息的融合。

## 4 结论

1) 本文建立优质电力投资决策评价指标体系，

提出一种基于证据推理理论的优质电力投资决策新方法。该方法对多种指标信息有效融合, 并充分考虑不同指标重要程度的影响。

2) 本文方法综合考虑了多重因素对优质电力投资决策的影响, 并采用主客观组合赋权得到各指标的相关权重, 能更好地反映优质电力投资综合决策中不同因素的重要程度。

3) 在证据推理决策过程中, 以相关权重和等级置信度组成基本概率函数, 根据ER递归算法确定不同投资方案的置信度概率分布, 保证了多种决策信息的有效融合。

4) 通过对某半导体企业的实证分析与对比分析, 证明本文方法能清晰有效地对优质电力投资进行决策。进一步可以研究区间置信度, 其更贴近实际情况, 能提高优质电力投资决策方法的适用性。

### 参考文献

- [1] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进S变换的复合电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 64-71.  
YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 64-71.
- [2] 许立武, 李开成, 罗奕, 等. 基于不完全S变换与梯度提升树的电能质量复合扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 24-31.  
XU Liwu, LI Kaicheng, LUO Yi, et al. Classification of complex power quality disturbances based on incomplete S-transform and gradient boosting decision tree[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 24-31.
- [3] 陈伟, 何家欢, 裴喜平. 基于相空间重构和卷积神经网络的电能质量扰动分类[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 87-93.  
CHEN Wei, HE Jiahuan, PEI Xiping. Parallel hidden Markov model based classification of power quality disturbance events[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 87-93.
- [4] ASHA K S, JAYA L A. Data mining for classification of power quality problems using WEKA and the effect of attributes on classification accuracy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 303-314. DOI: 10.1186/s41601-018-0103-3.
- [5] 肖先勇, 谭秀美, 汪颖, 等. 基于电气特性-物理属性-感知损失的电压暂降经济损失评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊1): 105-110.  
XIAO Xianyong, TAN Xiumei, WANG Ying, et al. Voltage sag economic losses assessment based on electrical characteristic-physical attribute-perceived loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 105-110.
- [6] 李春敏, 肖先勇, 张逸, 等. 工业用户电压暂降损失风险的模糊综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 50-56.  
LI Chunmin, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on loss risk of voltage sag for industry plant[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 50-56.
- [7] 马愿谦, 肖先勇, 汪颖, 等. 高端制造企业优质电力增值价值及其量化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊1): 99-104.  
MA Yuanqian, XIAO Xianyong, WANG Ying, et al. Premium price valuation of premium power for high-end manufacturing enterprises[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 99-104.
- [8] XIAO Xianyong, MA Yuanqian, ZHANG Yi, et al. Premium power valuation method based on customer perception of utility for high technology manufacturing customers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(4): 1655-1662.
- [9] MA Yuanqian, XIAO Xianyong, WANG Ying, et al. Investment strategy and multi-objective optimization scheme for premium power under the background of the opening of electric retail side[J]. Energies, 2018, 11(8): 1-25.
- [10] 马愿谦, 肖先勇, 黄聃喆, 等. 售电侧放开背景下优质电力投资的模糊软集决策方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 106-114.  
MA Yuanqian, XIAO Xianyong, HUANG Danzhe, et al. Fuzzy soft decision-making method for premium power investment in the background of the opening of electricity retail side[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 106-114.
- [11] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. Omega, 2015, 53: 49-57.
- [12] SAATY T L. The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: the AHP/ANP approach[J]. Operations Research, 2013, 61(5): 1101-1118.
- [13] 苑开波, 罗萍萍, 王高猛, 等. 基于灰色关联分析法的电力系统隐蔽性数据攻击检测新方法[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(1): 17-23.  
FAN Kaibo, LUO Pingping, WANG Gaomeng, et al. A new method of power system false data attack detection based on grey relational analysis[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(1): 17-23.
- [14] 朱建全, 刘锋, 梅生伟, 等. 基于证据推理的电力负荷

- 建模[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 93-99.
- ZHU Jianquan, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Electric load modeling based on Evidence Reasoning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 93-99.
- [15] 陈浩, 王睿, 孙荣丽, 等. DSIT: 面向传感网信息融合的证据推理方法[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(4): 972-982.
- CHEN Hao, WANG Rui, SUN Rongli, et al. DSIT: an evidence reasoning method for information fusion in wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(4): 972-982.
- [16] ZHANG Zhongjun, YANG Jianbo, XU Dongling. A hierarchical analysis model for multiobjective decision making[J]. IFAC Proceedings, 1989, 22(12): 13-18.
- [17] MANTARAS R L D. Approximate reasoning models[M]. US: Prentice Hall PTR, 1990.
- [18] YU Haibo, ZHANG Chao, DENG Zuqiang, et al. Economic optimization for configuration and sizing of micro integrated energy systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(2): 330-341.
- [19] MERAL M E, TEKE A, BAYINDIR K C, et al. Power quality improvement with an extended custom power park[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(11): 1553-1560.
- [20] IEEE-SA Standards Board. IEEE guide for voltage sag indices: IEEE Std 1564TM—2014[S]. New York: Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power and Energy Society, 2014.
- [21] YANG Jianbo. Rule and utility based evidential reasoning approach for multiattribute decision analysis under uncertainties[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(1): 31-61.
- [22] YANG Jianbo, XU Dongling. On the evidential reasoning algorithm for multiple attribute decision analysis under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Part A Systems and Humans, 2002, 32(3): 289-304.
- [23] 陈圣群, 王应明, 施海柳. 多属性匹配决策的等级置信度融合法[J]. 系统工程学报, 2015, 30(1): 25-33.
- CHEN Shengqun, WANG Yingming, SHI Hailiu. Data fusion method for multi-attribute matching decision-making with rank belief degrees[J]. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(1): 25-33.
- [24] 王剑波, 王晓霖, 周立国, 等. 管道风险因素的主客观集成权重赋权方法[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 745-750.
- WANG Jianbo, WANG Xiaolin, ZHOU Liguang, et al. Pipeline risk factor weighting method based on subjective-objective integrated weight[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(7): 745-750.
- [25] 李德顺, 许开立, 李春晨. 基于集值迭代的多专家主观权重确定方法的研究[J]. 金属矿山, 2009(9): 42-43, 50.
- LI Deshun, XU Kaili, LI Chunchen. Multi-expert determination of the subjective weight based on set valued iteration[J]. Metal Mine, 2009(9): 42-43, 50.
- [26] HUYNH V N, NAKAMORI Y, HO T B, et al. Multiple-attribute decision making under uncertainty: the evidential reasoning approach revisited[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part A Systems & Humans, 2006, 36(4): 804-822.
- [27] WANG Yingming, YANG Jianbo, XU Dongling. Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(3): 1885-1913.
- [28] ZHANG Yan, MILANOVIC, J V. Techno-economic assessment of voltage sag performance and mitigation[M]. Manchester: Manchester University Press, 2008.

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-12-17

作者简介:

栾乐(1983—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为主配网设备测试和状态评价; E-mail: yazhui869396@163.com

周凯(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电能质量分析与控制、用电技术监督; E-mail: 285358753@qq.com

肖天为(1987—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断. E-mail: 40867172@qq.com

(编辑 魏小丽)