

基于博弈论组合赋权的智能配电网项目投资效益评价

贺春光¹, 檀晓林¹, 周兴华², 安佳坤¹, 赵阳¹, 苏娟³

(1. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 河北 石家庄 050000; 2. 北京中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 近些年电网公司对配电网投资持续加大, 但缺乏一套科学合理的配电网项目投资效益评估体系。在此背景下, 首先从装备水平、网架结构、供电能力、新增供电量等方面构建了两级配电网项目投资效益评估指标体系, 并使用层次分析法与熵值法分别对评估体系中各指标计算权重, 以及使用博弈论方法综合二者权重形成各指标最终权重; 最后, 采用核主成分分析方法抽取各项目评价指标数据的主成分, 再基于主成分综合得分和投资金额对项目投资效益优劣进行排序。仿真算例表明该方法可以科学合理评价配电网项目投资效益, 有效地指导配电网建设与改造。

关键词: 配电网项目; 投资效益; 指标权重; 层析分析; 熵值法; 博弈论; 核主成分分析

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.019 中图分类号: TM726 文章编号: 1673-9140(2022)01-0161-07

Investment benefit evaluation of intelligent distribution network project based on game theory combination weighting

HE Chunguang¹, TAN Xiaolin¹, ZHOU Xinghua², AN Jiakun¹, ZHAO Yan¹, SU Juan³

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;
2. Beijing Join Bright Digital Power Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China; 3. College of Information and
Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, power grid companies continue to increase their investment in distribution network. However there is a lack of a scientific and reasonable investment benefit evaluation system for distribution network projects. In order to solve this problem, this paper firstly constructs a two-level distribution network project investment benefit evaluation index system from the aspects of equipment level, grid structure, power supply capacity, and newly added power supply. Secondly, the analytic hierarchy process and entropy method are used to calculate the weight of each index in the evaluation system. Then the game theory method is used to synthesize the two weights to form the final weight of each index. Finally, the principal components of the evaluation index data of each project are extracted by the nuclear principal component analysis method, and the investment benefits of each project are sorted based on the comprehensive score of the principal components and the investment amount. Numerical simulation examples show this method can scientifically and reasonably evaluate the investment benefits of distribution network projects and effectively guide the construction and transformation of distribution network.

收稿日期: 2020-03-18; 修回日期: 2021-05-19

基金项目: 河北省电力有限公司经济技术研究院项目 (SGHEJY00GHJS1900049)

通信作者: 贺春光 (1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事配电网规划设计技术研究; E-mail: 35379459@qq.com

Key words: distribution network project; investment efficiency; index weight; analytic hierarchy process; entropy value method; game theory; kernel principal component analysis

配电网直接面向终端用户,与广大人民群众的生产生活紧密相关,是国民经济发展的基础设施。近年来,随着配电网投资逐年递增,投资能力无法满足投资需求的矛盾日渐显现。如何最大限度地提高配电网投资效率、发挥投资效果,成为了电网企业亟需研究的问题。配电网项目的建设改造应满足电网企业、终端用户和社会发展3个利益主体的需求。传统配电网投资策略往往以新增供电量作为参照,不能准确全面反映出配电网建设重点与发展方向,亟需一套全面合理的配电网项目投资效益评价体系和评价方法^[1-5]。

本文结合现有的配电网投资效益评估指标与方法,首先从装备水平、网架结构、运行水平、供电能力、新增供电量等方面构建2级配电网项目投资效益评估指标体系;其次,使用层次分析法与熵值法分别对评估体系中各指标计算权重,以及使用博弈论方法综合二者权重形成各指标最终权重;最后,采用核主成分分析方法抽取各项目评价指标的主成分,基于主成分综合得分和投资金额对各项目投资效益优劣进行排序。该方法可以科学合理地评价配电网项目投资效益,进而有效地指导配电网建设与改造。

1 配电网项目投资效益评价指标体系

1.1 构建评估指标体系原则

科学合理的评价指标体系是配电网项目投资效益评估的基础。评价指标不仅需要体现项目的新增供电量能力,还要能够反映项目对地区配电网装备水平、网架结构、运行水平、供电能力改善程度。评价指标选取应科学、全面,既要保证指标体系完整性又要尽量降低各指标之间的关联性。同时,各个指标还需要给出详细定义以及具体计算方法,方便配电网项目投资效益评估的具体实施^[6]。

1.2 配电网项目投资效益评价指标体系

参考《城市配电网运行水平和供电能力评估导则》(Q/GDW 565—2010)、《配电网规划设计技术导则》(DL/T 5729—2016)等相关标准,充分考虑各县域配电网在装备水平、运行水平、供电能力和网架结

构、降损增供等方面情况,在组织相关专家充分论证后,构建了2级指标体系开展县域配电网投资效益综合评估。其中,1级指标为装备水平、运行水平、供电能力和网架结构、降损增供,2级指标包括线路绝缘化率、配自终端覆盖率等20个评估指标^[5,7-9],具体内容如表1所示。

表1 配电网投资效益评估指标体系

Table 1 Distribution network investment benefit evaluation index system

1级指标	2级指标	单位	指标序号
装备水平	绝缘化线路占比提升率	%	A ₁
	电缆化线路占比提升率	%	A ₂
	老旧线路占比下降率	%	A ₃
	老旧开关占比下降率	%	A ₄
	老旧配变占比下降率	%	A ₅
	配变无功补偿规范化提升率	%	A ₆
	配自覆盖率提升率	%	A ₇
运行水平	线路停电时长率下降率	%	B ₁
	频繁停电配变占比下降率	%	B ₂
	低电压时长率下降率	%	B ₃
	三相不平衡时长下降率	%	B ₄
网架结构	联络线路占比提升率	%	C ₁
	“N-1”通过率提升率	%	C ₂
	分段不合理线路占比下降率	%	C ₃
供电能力	供电半径超标线路占比下降率	%	C ₄
	新增户均配变容量	kV·A/户	D ₁
	重载线路占比下降率	%	D ₂
	过载线路占比下降率	%	D ₃
	重载配变占比下降率	%	D ₄
降损增供	过载配变占比下降率	%	D ₅
	新增年供电量	MW·h	E ₁
	新增年售电量	MW·h	E ₂

2 配电网项目投资效益评价方法

2.1 基于博弈论组合赋权的评估指标权重计算

在各配电网项目投资效益评价过程中,评价指标的权重是基础。首先计算各指标在层次分析法和

熵值法计算体系下的权重,再利用博弈论方法对上述 2 种方法得出的指标权重进行加权处理,从而得到评价体系中各指标的最终权重。

2.1.1 层次分析法确定指标权重

由配网业务专家明确各指标之间的相对重要性,参照判断矩阵标度表构建指标之间判断矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$,相对重要性的标度内容如表 2 所示。

表 2 判断矩阵标度

Table 2 Scale of judgment matrix

相对重要程度	定义
1	指标 i 与 j 同等重要
3	指标 i 与 j 略微重要
5	指标 i 与 j 相当重要
7	指标 i 与 j 明显重要
9	指标 i 与 j 绝对重要
2,4,6,8	介于两相对重要程度之间

计算指标判断矩阵 \mathbf{A} 的每一行元素的积为

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

计算每一行 M_i 的 n 次方根值,即

$$d_i = \sqrt[n]{M_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式(1)、(2)中 n 为矩阵阶数^[10]。

计算各指标权重系数 w_{ci} , 即

$$w_{ci} = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (3)$$

2.1.2 熵值法确定指标权重

与层析分析法相比,熵值法完全基于各指标数据分布情况计算各指标的权重系数,避免了人为因素的影响。采用熵值法计算每个指标之间的权重系数,详细计算步骤如下。

1) 评估指标归一化。由于 2 级指标在量纲和数量级方面均存在较大差异,为统一分析,需先将其进行标准化处理,对各指标数据归一化至指定区间 $[a, b]$, 评估对象 j 的评估指标 i 指标值标准化处理后的归一值为

$$x'_{ij} = a + (b - a) \frac{x_{ij} - x_{i-\min}}{x_{i-\max} - x_{i-\min}} \quad (4)$$

式中 x_{ij} 为评估对象 j 的评估指标 i 的原始值; $x_{i-\max}$ 为评估对象集合中评估指标 i 的最大值; $x_{i-\min}$ 为评估对象集合中评估指标 i 的最小值; a 为

指标数据归一化指定区间的最小值; b 为指标数据归一化指定区间的最大值。

2) 各评估指标下评估对象的比重矩阵计算。基于步骤 1 的计算结果对第 i 项指标下第 j 个评估对象的比重 y_{ij} 计算, 即

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} (0 \leq y_{ij} \leq 1) \quad (5)$$

3) 评估指标的信息熵值和信息效用值计算。基于步骤 2 的比重计算结果对第 i 项指标的信息熵值 e_i 计算, 即

$$e_i = -K \sum_{j=1}^n y_{ij} \ln y_{ij} \quad (6)$$

其中, $K = 1/\ln n$ 。

然后计算第 i 项指标的信息效用价值为

$$d_i = 1 - e_i \quad (7)$$

4) 计算各评估指标权重系数^[11-12]为

$$w_{si} = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (8)$$

2.1.3 博弈论组合赋权

博弈论(game theory, GT)用来平衡各决策主体之间行为的理论,其基本思想是采用不同赋权方法得到的权重和最终计算出的综合权重之间的偏差最小化,使各个赋权法得到的权重更加协调、均衡。基于层析分析法、熵值法的各配电网项目投资效益评价指标权重,采用博弈论平衡 2 种方法得到的各指标权重,具体方法如下。

假设采用 L ($L=2$) 种方法计算 n 个指标的权重,构成权重集合 $\mathbf{u}_k = \{u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn}\}$, $k = 1, 2, \dots, L$ 。将 L 种向量的线性组合记为

$$\mathbf{u} = \sum_{k=1}^L \beta_k \mathbf{u}_k^T \quad (9)$$

式中 \mathbf{u}_k 为基本权重向量; β_k 为不同赋权方法的线性组合系数,且 $\sum_{k=1}^L \beta_k = 1$ 。

对式(9)的线性组合系数进行优化处理,实现可能权重 \mathbf{u} 与基本权重之间的偏差极小化,即

$$\min \left(\sum_{k=1}^L \beta_k \mathbf{u}_k^T - \mathbf{u}_j^T \right)^2, j = 1, 2, \dots, L \quad (10)$$

式中 \mathbf{u}_j 表示为第 j 种赋权方法得到的指标权重向量。

根据矩阵微分性质,计算式(10)最优化一阶导数为

$$\begin{bmatrix} u_1 \mathbf{u}_1^T & \cdots & u_1 \mathbf{u}_L^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_L \mathbf{u}_1^T & \cdots & u_L \mathbf{u}_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \mathbf{u}_1^T \\ \vdots \\ u_L \mathbf{u}_L^T \end{bmatrix} \quad (11)$$

根据式(11)可计算得出 $\beta_k = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$, 并进行归一化处理,即

$$\beta_k^* = \frac{\beta_k}{\sum_{k=1}^L \beta_k} \quad (12)$$

式中 β_k^* 为不同赋权方法经优化后的线性组合系数。因此,由博弈论得到的组合权重为

$$\mathbf{u}^* = \sum_{k=1}^L \beta_k^* \cdot \mathbf{u}_k^T \quad (13)$$

式中 \mathbf{u}^* 为最终计算的组合权重^[13-15]。

2.4 基于 KPCA 的配电网项目投资效益评估方法

在评价配电网项目投资效益时,各项目评价指标数据通常存在着关联性。为消除数据之间的非线性关联性,降低数据维度,采用 KPCA 分析法提取项目评价指标数据的主成分,然后基于各主成分综合得分评估各项目投资效益的优劣。具体方法如下。

1)假设 m 个配网项目投资效益评价 n 个指标数据矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。根据指标数据分布选择符合要求的核函数 $k(\cdot)$,并结合评价指标矩阵得到相应的核矩阵,即

$$\mathbf{K} = \Phi^T \Phi = \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & \cdots & k(x_1, x_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_m, x_1) & \cdots & k(x_m, x_n) \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中 $k(\cdot)$ 为核函数; Φ 为经映射后呈现在高维空间后的样本矩阵; m 为项目个数; n 为指标个数。

2)对核矩阵进行中心化处理,即

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} - \mathbf{K} \mathbf{I}_N - \mathbf{I}_N \mathbf{K} + \mathbf{I}_N \mathbf{K} \mathbf{I}_N \quad (15)$$

式中 \mathbf{I}_N 为 $n \times n$ 维的数值全为 $1/n$ 的矩阵; $\bar{\mathbf{K}}$ 为中心化处理后的核矩阵。

3)运用 Jacobi 迭代方法计算 $\bar{\mathbf{K}}$ 的协方差矩阵的特征值为 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 及其对应的特征向量为 $\mathbf{v}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

4)计算 Φ 的核主元向量。

$$\mathbf{t}_i = (\lambda_i)^{-\frac{1}{2}} \Phi \Phi^T \mathbf{v}_i = (\lambda_i)^{-\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{K}} \mathbf{v}_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

5)求取各个主元方差贡献率和与其相应的累计贡献率,即

$$\xi_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (17)$$

$$\eta_k = \sum_{i=1}^k \xi_i = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j}, k \leq n \quad (18)$$

式中 λ_i 为第 i 个主元的协方差特征值; ξ_i 为第 i 个主元的方差贡献率; η_k 为前 k 个主元共同累计的方差贡献率。

6)选择累计贡献率大于 95% 的前 k 个主元,基于前 k 个主元的综合得分和投资金额评价各项目投资效益的优劣^[15-17]。

3 算例分析

选取某县供电公司 2019 年配电网项目投资效益评估为例,对其管理的 5 个项目投资效益进行评估,各项目投资金额如表 3 所示。各项目配电网装备水平、网架结构、运行水平、供电能力等各方面原始数据如表 4 所示(序号含义参见表 1)。

首先,根据配网规划、运行专家意见构建装备水平、网架结构、运行水平、供电能力、降损增供各指标之间的判断矩阵,部分判断矩阵如表 5 所示。

然后,利用层次分析法对表 5 中的判断矩阵标度计算各指标权重系数,利用熵值法计算表 1 中各指标的原始数据的权重系数;最后,基于博弈论组合加权处理层次分析法、熵值法求得的各指标权重系数,计算各指标的最终权重系数,具体结果如表 6 所示。

表 3 配电网项目投资金额

Table 3 Investment data of distribution network projects

项目	投资金额/万元	项目	投资金额/万元
1	460	4	380
2	420	5	490
3	360		

表 4 配电网项目投资效益评估指标原始数据

Table 4 Investment benefit evaluation index data of distribution network projects

指标	项目				
	1	2	3	4	5
A ₁	0.822 1	0.696 6	0.444 6	0.963 0	0.980 7
A ₂	0.000 0	0.550 6	0.502 5	0.000 0	0.745 5
A ₃	0.300 0	0.000 0	0.000 0	1.290 0	0.000 0
A ₄	3.410 0	11.970 0	6.280 0	1.070 0	3.000 0
A ₅	2.901 4	4.341 3	7.486 9	3.578 7	4.780 5
A ₆	0.263 8	0.308 7	0.207 7	0.138 6	0.268 3
A ₇	0.130 0	0.230 0	1.190 0	0.150 0	0.740 0
B ₁	1.630 0	2.220 0	0.990 0	1.660 0	7.410 0
B ₂	0.806 6	0.449 4	0.724 1	0.755 4	0.968 8
B ₃	0.743 2	0.443 8	0.724 1	0.738 2	0.790 2
B ₄	0.555 9	0.325 8	0.448 3	0.463 5	0.325 9
C ₁	3.040 0	4.150 0	3.630 0	3.350 0	4.420 0
C ₂	0.160 1	0.134 8	0.044 3	0.107 3	0.209 8
C ₃	2.420 0	0.560 0	0.000 0	0.860 0	5.800 0
C ₄	2.840 0	2.100 0	1.490 0	1.360 0	4.060 0
D ₁	0.850 0	0.450 0	0.330 0	0.540 0	0.340 0
D ₂	0.203 0	0.226 4	0.225 8	0.183 1	0.224 3
D ₃	0.171 8	0.143 3	0.179 4	0.145 4	0.163 5
D ₄	0.158 0	14.890 0	15.640 0	14.280 0	15.100 0
D ₅	0.860 0	0.900 0	0.860 0	0.900 0	0.880 0
E ₁	1 812	2 032	2 280	515	1 086
E ₁	1 712	1 845	2 104	510	993

表 5 2 级指标之间判断矩阵

Table 5 Judgment matrix between secondary indexes

指标	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	...
A ₁	1.0	2	2	2	...
A ₂	0.5	1	1	1	...
A ₃	2.0	4	4	4	...
A ₄	0.5	1	1	1	...
A ₅	0.5	1	1	1	...
...

将项目评价指标原始数据标准化,将处理后评价矩阵乘以各指标综合权重,各项目加权评价矩阵如表 7 所示。

对加权评价矩阵开展核主成分分析,各主成分的特征值和累计贡献率如表 8 所示。由表 8 可知,前 4 个主成分的累积贡献率接近于 1,故选择前 4 个主成分,降维后的评估指标数据如表 9 所示。

表 6 评价指标权重系数

Table 6 Weighting coefficients of evaluation index

指标	层析分析法	熵值法	博弈论组合权重
A ₁	0.053	0.026	0.050
A ₂	0.026	0.052	0.034
A ₃	0.105	0.111	0.113
A ₄	0.026	0.045	0.032
A ₅	0.026	0.044	0.032
A ₆	0.026	0.027	0.028
A ₇	0.026	0.072	0.039
B ₁	0.026	0.071	0.039
B ₂	0.026	0.025	0.028
B ₃	0.026	0.023	0.027
B ₄	0.105	0.055	0.100
C ₁	0.026	0.036	0.030
C ₂	0.026	0.028	0.028
C ₃	0.026	0.058	0.035
C ₄	0.026	0.054	0.034
D ₁	0.105	0.063	0.102
D ₂	0.026	0.026	0.028
D ₃	0.026	0.045	0.032
D ₄	0.105	0.022	0.092
D ₅	0.105	0.055	0.100
E ₁	0.026	0.029	0.029
E ₂	0.026	0.030	0.029

表 7 评价指标数据加权矩阵

Table 7 Weighting matrix of evaluation index data

指标	项目				
	1	2	3	4	5
A ₁	0.035	0.024	0.000	0.048	0.050
A ₂	0.000	0.025	0.023	0.000	0.034
A ₃	0.026	0.000	0.000	0.113	0.000
A ₄	0.007	0.032	0.015	0.000	0.006
A ₅	0.000	0.010	0.032	0.005	0.013
A ₆	0.021	0.028	0.011	0.000	0.021
A ₇	0.000	0.004	0.039	0.001	0.022
B ₁	0.004	0.007	0.000	0.004	0.039
B ₂	0.019	0.000	0.015	0.016	0.028
B ₃	0.023	0.000	0.022	0.023	0.027
B ₄	0.100	0.000	0.053	0.060	0.000
C ₁	0.000	0.024	0.013	0.007	0.030
C ₂	0.020	0.015	0.000	0.011	0.028
C ₃	0.015	0.003	0.000	0.005	0.035
C ₄	0.019	0.009	0.002	0.000	0.034
D ₁	0.102	0.024	0.000	0.041	0.002
D ₂	0.013	0.028	0.028	0.000	0.027
D ₃	0.025	0.000	0.032	0.002	0.018
D ₄	0.000	0.088	0.092	0.084	0.089
D ₅	0.000	0.100	0.000	0.100	0.050
E ₁	0.021	0.025	0.029	0.000	0.009
E ₂	0.022	0.024	0.029	0.000	0.009

表 8 方差及各主成分贡献率

Table 8 Variance and contribution rate of each principal component

主成分	特征值	方差累计贡献率/%
1	0.005 909 94	44.837 378 4
2	0.004 463 825	78.703 412 7
3	0.001 665 362	91.338 135 5
4	0.001 141 706	100

表 9 项目评价指标数据主成分的得分

Table 9 Scores of the principal component for the project evaluation index data

主成分	项目				
	1	2	3	4	5
F_1	0.110 1	-0.076 4	-0.026 6	0.009 2	-0.073 8
F_2	0.013 5	0.056 7	-0.023 6	0.152 5	0.023 6
F_3	-0.020 8	-0.024 9	0.065 5	0.034 4	-0.019 3
F_4	0.009 9	-0.033 7	0.003 7	0.020 7	0.060 3
综合	0.112 7	-0.078 3	0.019 0	0.216 8	-0.009 2

由表 9 可知,根据主成分综合得分大小比较,项目的综合得分值排序为:4>1>3>5>2。综合考虑各项目评价指标数据主成分的综合得分和项目投资金额,以综合得分/投资金额评价项目最终投资效益的优劣,结果表明项目 4 的配电网投资效益最优,项目 2 配电网投资效益最差。

4 结语

本文结合配电网投资效益相关的评估指标,首先,从装备水平、供电能力、降损增供等方面构建了两级配电网投资评价指标体系;接着,分别利用层次分析法和熵值法对各评价指标权重值进行计算,得出每个指标的两个权重值,再利用博弈论组合加权处理 2 种方法的指标权重,计算出最终权重值;然后,采用核主成分分析方法提取各评价指标数据的主成分相关性;最后,基于各主成分的综合得分和投资金额评价各项目的投资效益的优劣,并将其应用于配电网建设与改造项目的管理流程,提升了应用单位配电网投资效益。

参考文献:

[1] 刘宣,谭彩霞,王绵斌,等.基于动态综合模糊评估的增

量配网合作模式[J].电力科学与技术学报,2021,36(5):87-96.

LIU Xuan, TAN Caixia, WANG Mianbin, et al. Research on incremental distribution network cooperation model based on dynamic comprehensive fuzzy evaluation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021,36(5):87-96.

[2] 李猛,刘巍,李鹏,等.计及投资效益评估的县级配电网投资分配方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):83-89.

LI Meng, LIU Wei, LI Peng, et al. Method for allocation of county distribution network considering the investment benefit evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020,35(6):83-89.

[3] 韩俊,谢珍建,耿路,等.中压配电网的高可靠性接线模式综合评估方法[J].中国电力,2020,53(3):91-100.

HAN Jun, XIE Zhenjian, GENG Lu, et al. Research on comprehensive evaluation method of high reliability wiring mode for medium voltage distribution network[J]. Electric Power, 2020,53(3):91-100.

[4] 据泽立,朱跃,蒲路,等.配电网电压综合补偿方法研究[J].高压电器,2020,56(4):235-240.

JU Zeli, ZHU Yao, PU Lu, et al. Study on the voltage integrated compensation method of distribution network [J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(4):235-240.

[5] 纪永新,王承民,张玉林,等.智能配电网一二次协同规划方法研究[J].智慧电力,2020,48(1):69-73.

JI Yongxin, WANG Chengmin, ZHANG Yulin, et al. Primary and secondary collaborative planning method for smart distribution network[J]. Smart Power, 2020, 48(1):69-73.

[6] 梁伟豪,周潮,涂智豪,等.分布式光伏接入对配电网可靠性影响的快速评估方法[J].供用电,2020,37(2):60-66.

LIANG Weihao, ZHOU Chao, TU Zhihao, et al. Fast evaluation method of the impact of distributed photovoltaic access on the reliability of distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2020,37(2):60-66.

[7] 赵晓龙,方恒福,王罡,等.面向弹性配电网防灾减灾的组件重要度评估方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(16):28-36.

ZHAO Xiaolong, FANG Hengfu, WANG Gang, et al. Component importance indices evaluation considering

- disaster prevention and mitigation in resilient distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16):28-36.
- [8] 付高善,翟旭京,周专,等. 基于多属性决策的配电网项目储备库评价方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1):26-30+35.
FU Gaoshan, ZHAI Xujing, ZHOU Zhuan, et al. Reserve database evaluation of distribution network projects based on multi-attribute decision making[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1):26-30+35.
- [9] 刘胜利,曹阳,冯跃亮,等. 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015(2):119-125.
LIU Shengli, CAO Yang, FENG Yueliang, et al. Research and application of distribution grid investment effectiveness evaluation and decision-making model[J]. Power System Protection and Control, 2015(2):119-125.
- [10] 周盛世,张艳萌,赵敏敏. 基于 AHP 和 TOPSIS 方法的第三方冷链物流企业评价研究[J]. 物流工程与管理, 2016, 38(11):65-67.
ZHOU Shengshi, ZHANG Yanmeng, ZHAO Mimi. Evaluation of the third-party cold chain logistics enterprises based on AHP and TOPSIS method[J]. Logistics Engineering and Management, 2016, 38(11):65-67.
- [11] 吴亚雄,高崇,曹华珍,等. 配电网全寿命周期可靠性评估和管理问题研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13):6-11.
WU Yaxiong, GAO Chong, CAO Huazhen, et al. Research on life-cycle reliability assessment and management of distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13):6-11.
- [12] 刘旭娜,魏俊,张文涛,等. 基于信息熵和模糊分析法的配电网投资效益评估及决策[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12):48-56.
LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao, et al. Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12):48-56.
- [13] 卢强,陈来军,梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29):5009-5017.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5009-5017.
- [14] 张淑林,栗晓玲. 博弈论与 DS 证据理论耦合的黄河流域水资源配置方案评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(11):123-133.
ZHANG Shulin, SU Xiaolin. Evaluation of water resource allocation scheme based on game theory and DS evidence theory in the Yellow River Basin[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(11):123-133.
- [15] 贾梦雨,李猛,韩松,等. 基于博弈论组合赋权的农村电网综合评价体系研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2):69-75.
JIA Mengyu, LI Meng, HAN Song, et al. Research on rural power system comprehensive evaluation system based on game theory combination weights[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):69-75.
- [16] 孙志娟,赵京,赵辛. PCA 与 KPCA 在并联机构综合性能评价中的应用比较[J]. 制造业自动化, 2014, 36(4):66-71.
SUN Zhijuan, ZHAO Jing, ZHAO Xin. Comparison between PCA and KPCA method in comprehensive performance evaluation of parallel mechanism[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(4):66-71.
- [17] 王维洲,汤红卫,刘福潮,等. A+~E 类区域配电网降损潜力评估模型研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2):59-65.
WANG Weizhou, TANG Hongwei, LIU Fuchao, et al. Study on the evaluation model of energy loss reduction potential for A+~E regional distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2):59-65.