

# 基于主成分分析与加权 TOPSIS 的县域 配电网投资效益评估方法

檀晓林<sup>1</sup>, 胡诗尧<sup>1</sup>, 张 菁<sup>1</sup>, 周兴华<sup>2</sup>, 贺春光<sup>1</sup>, 苏 娟<sup>3</sup>

(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:**近年来县级供电公司配电网投资持续加大,但对配电网投资效益缺乏一套科学合理的配电网投资效益评估体系。本文首先从装备水平、运行水平、供电能力、网架结构和降损增供等方面构建两级配电网投资评估指标体系;其次,综合运用层次分析法和熵值法分别计算一级和二级评估指标权重系数;然后,采用主成分分析方法降低各评估对象评价指标数据之间的相关性;最后,基于 TOPSIS 对各评估对象配电网投资效益优劣进行排序。该方法可指导上级管理单位对各县级供电公司配电网整体投资效益进行科学合理评价,有效指导下一年配电网投资计划。

**关 键 词:**配电网;投资效益;层析分析;熵值;主成分分析;TOPSIS

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.016 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2022)03-0133-07

## Investment benefit assessment based on PCA and weighted TOPSIS in county distribution network

TAN Xiaolin<sup>1</sup>, HU Shiyao<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, ZHOU Xinghua<sup>2</sup>, HE Chunguang<sup>1</sup>, SU Juan<sup>3</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Hebei Electric Power 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, distribution network investment of county-level power supply companies continues to increase. There is a lack of a scientific and reasonable distribution network investment benefit evaluation system. This paper firstly constructs an investment evaluation index system for two-layer distribution network from the aspects of equipment level, power supply capacity, line loss reduction and power consumption increase. Secondly, the weight of each evaluation index is calculated by using analytic hierarchy process (AHP) and entropy method. Thirdly, the correlation of every evaluation index data is reduced by principal component analysis (PCA). Finally, the investment benefits of the distribution network of each evaluation object are ranked on the basis of TOPSIS. This method can be

收稿日期:2020-10-22;修回日期:2021-03-05

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:周兴华(1978-),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统仿真分析、配电网规划设计研究;E-mail:cauzxhua@126.com

a reference for the superior management unit to evaluate the overall investment benefit in distribution network of county-level power supply company scientifically and reasonably, and then effectively guide the investment plan of distribution network in the next year.

**Key words:** distribution network; investment efficiency; analytic hierarchy process; entropy value method; principal component analysis (PCA); TOPSIS

当前,中国县域配电网尤其是农村配电网仍存在供电负荷密度不均匀、电能质量差以及网架结构薄弱等问题,迫切需要加大配电网的投资力度。然而,配电网投资项目周期长、投资金额大,为电网公司日常管理带来了潜在风险。近年来,国家电网公司持续加大对县域配电网投资,推动其供电设施改造升级,但缺乏一套科学合理的县域配电网投资效益评估体系。科学合理的配电网投资效益评估方法可指导上级管理单位对各县级供电公司的配电网整体投资效益进行科学合理评价,进而有效地指导下一年配电网投资计划。

关于配电网投资效益评估,目前已经有一些专家学者对其评价指标体系和评价方法进行研究。文献[1]重点分析了配电网投资经济效益,但未考虑配电网投资建设在供电能力提升等方面成效,评价指标体系不完整;文献[2]采用层次分析法建立配电网投资效益相关的预评价指标,通过项目投资关联性分析筛选出最终的评价指标并将其应用于配电网项目管理,但未给出具体评估方法;文献[3-5]构建了配电网投资效益评价指标体系,采用熵值法确定指标权重,但熵值法缺乏各指标之间的横向比较,指标的权重系数随着样本的变化而变化,影响了评价指标权重的可靠性。

逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)作为一种简单有效的综合评价方法,能充分利用评价指标数据信息,精确地反映各评价对象之间的差距。文献[6]采用了 TOPSIS 评估采空区边坡稳定性预测模型的精确度和性能;文献[7]采用 TOPSIS 评估电网停电后的黑启动恢复方案的优劣。

本文结合现有配电网投资效益评估指标与方法,从装备水平、网架结构、运行水平、供电能力和降损增供等方面构建两级县域配电网投资效益评价指

标体系;采用层次分析法、熵值法确定各评价指标权重,主成分分析降低各评价指标之间相关性;采用 TOPSIS 对各评估对象的配电网投资效益优劣进行排序。本文方法将应用于上级管理单位对各县级供电公司配电网投资计划管理,能够有效提升配电网投资效益。

## 1 县域配电网投资效益评估指标体系

### 1.1 构建评估指标体系原则

科学合理的评价指标体系是县域配电网投资效益评估的基础。评价指标体系不仅需要反映配电网装备水平、网架结构、运行水平、供电能力,还要能够反映降低线损、新增供电量等经济效益。县域配电网投资效益评估指标选取应科学、全面,既要保证指标体系完整又要保证各个指标之间的独立,尽量避免重复计算。同时,各个指标还能够量化分析,以方便配电网投资效益评估的具体实施。

### 1.2 县域配电网投资效益评估指标体系

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、网架结构、供电能力和降损增供等方面情况,在组织相关专家充分论证后,构建二级指标体系开展县域配电网投资效益综合评估。其中,一级指标为装备水平、运行水平、网架结构、供电能力和降损增供;二级指标包括绝缘化线路占比提升率、配自覆盖率提升率、老旧线路占比下降率、老旧配变占比下降率,线路停电时长率下降率、频繁停电配变占比下降率、低电压时长率下降率、三相不平衡时长下降率,联络线路占比提升率、“N-1”通过率提升率、供电半径超标线路占比下降率等 20 个评估指标,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 Index system of investment benefit evaluation for distribution network

一级指标	指标序号	二级指标	指标序号
装备水平	A	绝缘化线路占比提升率	A <sub>1</sub>
		配电自动化覆盖率提升率	A <sub>2</sub>
		老旧线路占比下降率	A <sub>3</sub>
		老旧配变占比下降率	A <sub>4</sub>
运行水平	B	线路停电时长率下降率	B <sub>1</sub>
		频繁停电配变占比下降率	B <sub>2</sub>
		低电压时长率下降率	B <sub>3</sub>
		三相不平衡时长下降率	B <sub>4</sub>
网架结构	C	联络线路占比提升率	C <sub>1</sub>
		“N-1”通过率提升率	C <sub>2</sub>
		供电半径超标线路占比下降率	C <sub>3</sub>
		户均配变容量提升率	D <sub>1</sub>
供电能力	D	重载线路占比下降率	D <sub>2</sub>
		过载线路占比下降率	D <sub>3</sub>
		重载配变占比下降率	D <sub>4</sub>
		过载配变占比下降率	D <sub>5</sub>
		单位配变容量供电量提升率	E <sub>1</sub>
降损增供	E	配电线路线损下降率	E <sub>2</sub>
		台区线损下降率	E <sub>3</sub>
		单位投资供电量提升率	E <sub>4</sub>

式中  $n$  为矩阵阶数,等于一级指标数量。

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	介于两两相对重要程度之间

③计算每一行  $M_i$  的  $n$  次方根值。

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

④计算各一级指标权重系数。

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

2)与层析分析法相比,熵值法完全基于各评估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一级指标下各二级指标之间的权重系数,具体步骤如下。

①评估指标数据标准化。由于各二级指标的量纲、数量级差异较大,需要对各指标数据归一化至指定区间,具体公式为

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

式中  $x_{ij}$  为第  $i$  个评估对象第  $j$  项指标原始值;  $x_{j\max}$  为评估对象集合中第  $j$  项指标最大值;  $x_{j\min}$  为评估对象集合中第  $j$  项指标最小值;  $x'_{ij}$  为第  $i$  个评估对象第  $j$  项指标值标准化处理后的值。

②计算各评估指标下各评估对象比重矩阵。根据步骤 1 结果计算第  $j$  项指标下第  $i$  个评估对象的比重  $y_{ij}$ ,具体公式为

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{j=1}^m x'_{ij}} (0 \leq y_{ij} \leq 1) \quad (5)$$

式中  $m$  为第  $i$  个评估对象的评估指标数量。

③计算各评估指标信息熵值和信息效用值。根据步骤 2 结果可以计算第  $j$  项指标的信息熵值  $e_j$ ,具体公式为

$$e_j = -K \sum_{i=1}^m (y_{ij} \ln y_{ij}) \quad (6)$$

## 2 县域配电网投资效益评估方法

### 2.1 县域配电网投资效益评估指标权重计算

在各单位配电网投资效益评估过程中,评估指标权重是基础。在县域配电网投资效益评估指标体系中,装备水平、运行水平、供电能力、网架结构和降损增供 5 个一级指标的评估数据无法直接量化,无法采用定量方法计算权重。

1)采用层次分析法计算一级指标权重。首先,组织配网业务专家设计各指标之间的判断矩阵,然后,计算各指标的权重系数,具体步骤如下。

①组织配网业务专家明确各一级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  $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n,n}$ ,判断矩阵标度表内容如表 2 所示。

②计算指标判断矩阵  $\mathbf{X}$  的每一行元素的积。

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

式中  $m$  为第  $i$  个评估对象的评估指标数量;  $K = 1/\ln m$ 。

接着,计算第  $j$  项评估指标的信息效用价值  $d_j$ ,具体公式如下:

$$d_j = 1 - e_j \quad (7)$$

④计算各评估指标权重系数  $\omega_j$ ,具体公式为

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (8)$$

基于层析分析法的一级指标权重系数和基于熵值法的二级指标权重系数,配电网投资效益评估指标最终为一级指标之间权重系数与相应的二级指标之间权重系数的乘积<sup>[8-9]</sup>。

### 2.2 基于主成分分析的评价指标提取

配电网投资效益评估指标涵盖装备水平、运行水平、供电能力、网架结构和降损增供等方面的 20 项指标,各个指标之间可能存在较强的相关性,直接基于上述 20 项指标原始数据开展各单位配电网投资效益评估,会引起较大的误差。本文采用主成分分析提取评估指标数据最重要  $k$  个主成分,将评估指标转化为相互独立的指标<sup>[10-11]</sup>,具体步骤如下。

1)原始评估指标数据  $\mathbf{X}$  标准化处理为  $\mathbf{X}'$ 。

2)计算标准化矩阵  $\mathbf{X}'$  的协方差矩阵  $\mathbf{V}$ 。

3)计算协方差矩阵  $\mathbf{V}$  的特征值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ ,以及对应的特征向量  $\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_p)$ 。

4)计算各主成分累积贡献率。选择累积贡献率大于 95% 的前  $k$  个主成分,贡献率具体公式为

$$\beta_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (9)$$

5)计算前  $k$  个主成分的得分  $F$ ,为下一步分析作准备,具体公式为

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_k) = (u_1, u_2, \dots, u_k)^T \mathbf{X} \quad (10)$$

### 2.3 基于 TOPSIS 的配网投资效益评估

TOPSIS 是经典的多指标、多对象的分析评估方法。通过构造“正理想解”与“负理想解”,计算评估对象与二者之间的距离或贴近度对评估对象的优劣进行排序,具体步骤如下。

1)对于评估指标数据矩阵  $\mathbf{X}$ ,求解正理想解

$v^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_p^+\}$  和负理想解  $v^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_p^-\}$ 。

当  $x_j$  为正向指标时,有

$$\begin{cases} v_j^+ = \max\{x_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\} \\ v_j^- = \min\{x_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\} \end{cases} \quad (11)$$

当  $x_j$  为负向指标时,有

$$\begin{cases} v_j^+ = \min\{x_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\} \\ v_j^- = \max\{x_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\} \end{cases} \quad (12)$$

2)计算各评估对象到正理想解的距离  $D_i^+$  和到负理想解距离  $D_i^-$ ,具体公式为

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - v_j^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - v_j^-)^2} \end{cases} \quad (13)$$

3)计算各评估对象的贴近度  $\epsilon_i$ ,具体公式为

$$\epsilon_i = \frac{D_i^+}{D_i^+ + D_i^-} \quad (14)$$

4)按照  $\epsilon_i$  大小对各评估对象排序, $\epsilon_i$  越大表示评估对象越优<sup>[12]</sup>。

## 3 算例分析

选取某地市电网公司 2019 年的配电网投资效益评估为例,对其管理的 5 个县公司配电网投资效益进行评估。各县公司 2019 年配电网总投资金额如表 3 所示。

表 3 各县公司配电网总投资金额

Table 3 Total investment amount of distribution network in every county company 万元

公司	投资金额
1	4 600
2	4 200
3	3 600
4	3 800
5	3 900

相比 2018 年末,2019 年末上述 5 个县公司配电网装备水平、网架结构、运行水平、供电能力和降损增供等各方面评价指标原始数据如表 4 所示(序号含义参见表 1)。

**表 4** 县公司配电网投资效益评估指标原始数据

**Table 4** Investment benefit evaluation index data of distribution network of county companies

一级指标	二级指标	公司				
		1	2	3	4	5
A	A <sub>1</sub>	82.21	69.66	44.46	96.30	98.07
	A <sub>2</sub>	0.00	55.06	50.25	0.00	74.55
	A <sub>3</sub>	0.30	0.00	0.00	1.29	0.00
	A <sub>4</sub>	3.41	11.97	6.28	1.07	3.00
B	B <sub>1</sub>	29.14	43.41	74.86	35.78	47.80
	B <sub>2</sub>	26.38	30.87	20.77	13.86	26.83
	B <sub>3</sub>	0.13	0.23	1.19	0.15	0.74
	B <sub>4</sub>	1.63	2.22	0.99	1.66	7.41
C	C <sub>1</sub>	80.66	44.94	72.41	75.54	96.88
	C <sub>2</sub>	74.32	44.38	72.41	73.82	79.02
	C <sub>3</sub>	55.59	32.58	44.83	46.35	32.59
D	D <sub>1</sub>	3.04	4.15	3.63	3.35	4.42
	D <sub>2</sub>	16.01	13.48	4.43	10.73	20.98
	D <sub>3</sub>	2.42	0.56	0.00	0.86	5.80
	D <sub>4</sub>	2.84	2.10	1.49	1.36	4.06
	D <sub>5</sub>	0.85	0.45	0.33	0.54	0.34
E	E <sub>1</sub>	2.02	2.27	2.24	1.84	2.25
	E <sub>2</sub>	17.18	14.33	17.94	14.54	16.35
	E <sub>3</sub>	15.8	14.89	15.64	14.28	15.10
	E <sub>4</sub>	0.86	0.90	0.86	0.90	0.88

**表 6** 一级指标权重系数

**Table 6** Weight coefficients of primary index

一级指标	权重
A	0.07
B	0.27
C	0.13
D	0.20
E	0.33

**表 7** 评价指标最终权重系数

**Table 7** Final weight coefficient of evaluation index

一级指标	权重	二级指标	权重	综合权重
A	0.07	A <sub>1</sub>	0.112	0.007 84
		A <sub>2</sub>	0.223	0.015 61
		A <sub>3</sub>	0.472	0.033 04
		A <sub>4</sub>	0.193	0.013 51
...	...	...	...	...

**表 8** 评价指标数据加权矩阵

**Table 8** Weighting matrix of evaluation index data

二级指标	公司				
	1	2	3	4	5
A <sub>1</sub>	0.005 2	0.003 7	0.000 8	0.006 8	0.007 1
A <sub>2</sub>	0.001 6	0.010 8	0.010 0	0.001 6	0.014 0
A <sub>3</sub>	0.009 5	0.003 3	0.003 3	0.029 7	0.003 3
A <sub>4</sub>	0.003 7	0.012 2	0.006 5	0.001 4	0.003 3
...	...	...	...	...	...

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、供电能力和降损增供 5 个一级指标之间的判断矩阵,如表 5 所示;然后,根据层析分析法(式(1)~(3))计算一级指标权重,结果如表 6 所示。采用熵值计算各一级指标下二级指标权重,评价指标综合权重为一级指标权重与相应二级指标权重的乘积,结果如表 7 所示。将原始数据(0.1,0.9)标准化,然后将处理后评价矩阵乘以各指标综合权重,加权评价矩阵如表 8 所示。

**表 5** 一级指标之间判断矩阵

**Table 5** Judgment matrix between primary indexes

一级指标	A	B	C	D	E
A	1	0.25	0.5	0.333	0.2
B	4	1.00	2.0	1.333	0.8
C	2	0.50	2.0	0.666	0.4
D	3	0.75	1.5	1.000	0.6
E	5	1.25	2.5	1.666	1.0

对加权评价指标矩阵开展主成分分析,各主成分的特征值和累计贡献率如表 9 所示。由表 9 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。降维后的各主成分得分数据如表 10 所示。

**表 9** 方差及各主成分贡献率

**Table 9** Eigenvalue and principle components contribution rates

主成分	特性向量	
	特征值	方差累计贡献率/%
F <sub>1</sub>	0.004 185 826	53.911 207 2
F <sub>2</sub>	0.001 786 513	76.920 542 9
F <sub>3</sub>	0.001 038 579	90.296 888 4
F <sub>4</sub>	0.000 753 378	100.000 000 0

表 10 评价指标数据各主成分得分

Table 10 Score of each principal component of evaluation data

公司	不同主成份得分				综合
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	
1	-0.032 0	0.036 0	0.021 0	0.008 0	0.033 0
2	0.084 0	-0.028 0	-0.019 0	0.035 0	0.072 0
3	-0.053 0	0.010 0	-0.067 0	0.016 0	-0.094 0
4	0.088 0	0.062 0	-0.040	-0.012 0	0.098 0
5	0.015 0	-0.039 0	-0.022 0	-0.036 0	-0.082 0

针对各主成分的得分数据,计算评估对象集合的正、负理想解,计算各评估对象与正、负理想解的距离和贴进度,结果如表 11 所示。

各县公司 2019 年配电网投资效益评估数据的前 4 个主成分的综合得分、与理想解的贴合度及配电网总的投资金额如表 12 所示。

表 11 各县公司与正、负理想解距离及贴进度

Table 11 Distance from positive and negative ideal solutions, and closeness between each company

公司	与正理想解的距离	与负理想解的距离	贴进度
1	0.125 520 142	0.125 170 461	0.499 302 564
2	0.098 700 796	0.162 119 232	0.621 575 089
3	0.175 102 542	0.071 216 395	0.289 122 696
4	0.077 681 168	0.176 688 618	0.694 613 227
5	0.149 474 678	0.081 712 233	0.353 446 623

表 12 各县公司配电网整体投资效益对比分析

Table 12 Comparative analysis on the overall investment benefit of distribution network for every county company

公司	主成分综合得分	与理想解的贴进度	投资金额/万元
1	0.033	0.499	4 600
2	0.072	0.622	4 200
3	-0.094	0.289	3 600
4	0.098	0.695	3 800
5	-0.082	0.353	3 900

由表 12 可知,从主成分综合得分与投资金额的比值大小分析,2019 年公司 4 配电网投资效益最优,公司 2 次之,依此类推。相应的,从贴合度与投资金额的比值大小分析,同样也是公司 4 的配电网整体投资效益最优,公司 2 次之。因此可以看出,本

文选取的配电网投资效益评估指标全面、合理,评估方法科学。该计算结果可以作为省市电网公司对下属各县公司配电网投资绩效考核的参考依据,同时指导下年度配电网投资计划。

### 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、网架结构、运行水平、供电能力和降损增供等方面构建了两级配电网投资评价指标体系;然后,综合层次分析法、熵值法计算各评价指标权重,采用主成分分析方法降低各评价指标相关性;最后,采用 TOP SIS 综合评价各对象的优劣。该方法可用于上级管理单位对各县级供电公司配电网整体投资效益进行评价,有利于省市电网公司决策者获知各县公司配电网投资效益的基本情况,并以此作为未来资源配置和投资优化的参考依据,提升了应用单位配电网投资效益。

### 参考文献:

[1] 邓嘉明,李俊杰,姜世公,等.考虑配电网规划长期增量成本的可靠性定价方法[J].电网与清洁能源,2021,37(3):17-23+30.  
DENG Jiaming,LI Junjie,JIANG Shigong,et al.A reliability pricing method considering long-Term incremental cost of distribution network planning[J].Power System and Clean Energy,2021,37(3):17-23+30.

[2] 刘福炎.基于投资关联性分析的配电网投资效益评价体系研究[J].浙江电力,2016,(3):68-71.  
LIU Fuyan.Study on investment efficiency evaluation system for distribution networks based on investment correlation analysis[J].Zhejiang Electric Power,2016,(3):68-71.

[3] 李娜,李朝阳,周进,等.考虑投资均衡和效益性的中压配电网投资分配[J].中国电力,2021,54(12):143-149.  
LI Na,LI Chaoyang,ZHOU Jin,et al.Investment allocation for medium-voltage distribution networks considering investment equilibrium and benefits[J].Electric Power,2021,54(12):143-149.

[4] 季宇,熊雄,寇凌峰,等.基于经济运行模型的储能系统投资效益分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(4):143-150.

- JI Yu, XIONG Xiong, KOU Lingfeng, et al. Analysis of energy storage system investment benefit based on economic operation model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4):143-150.
- [5] 王利利,贾梦雨,韩松,等. 基于 TOPSIS—灰色关联度的农网投资效益与风险能力综合评价[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4):76-83.
- WANG Lili, JIA Mengyu, HAN Song, et al. Synthesized evaluation of investment efficiency and risk ability of rural network based on TOPSIS-gray incidence[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4):76-83.
- [6] ZHAO BO, ZHAO YUQIONG, WANG JIAMIN. New stability forecasting model for goaf slope based on the AHP-TOPSIS theory[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14:17.
- [7] 冷亚军,刘鹏飞,时浩. 考虑不完全信息的电力系统黑启动方案评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6):99-109.
- LENG Yajun, LIU Pengfei, SHI Hao. Evaluation method of power system black start scheme considering incomplete information[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6):99-109.
- [8] 邓申玮,韦钢,朱兰,等. 基于区间理论含充换储一体站的主动配电网供电能力评估[J]. 智慧电力, 2022, 50(4):59-65.
- DENG Shenwei, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Power supply capability evaluation of active distribution network with charging-swapping-storage integrated station based on interval theory[J]. Smart Power, 2022, 50(4):59-65.
- [9] 段建东,孙茜,陈鲁鹏,等. 基于改进和声搜索算法的有源配电网优化调度[J]. 高压电器, 2021, 57(11):1-9.
- DUAN Jiandong, SUN Qian, CHEN Lupeng, et al. Optimal dispatching of active distribution network based on improved harmony search algorithms[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11):1-9.
- [10] 赵京,李立明. 基于主成分分析法和核主成分分析法的机器人全域性能综合评价[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(12):1763-1769.
- ZHAO Jing, LI Liming. Comprehensive evaluation of robotic global performance based on principal component analysis and kernel principal component analysis[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(12):1763-1769.
- [11] 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 Minmin. 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.