

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106933

基于博弈论-改进 TOPSIS 的电能质量综合评价*

魏业文^{1,2} 吴希韬¹ 聂俊波¹ 解园琳¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 三峡大学 智慧能源技术湖北省工程研究中心 宜昌 443002)

摘要: 针对电能质量综合评估中使用传统单一评价方法造成的主观意识过强、对客观原始数据评判不全面以及权重分配不均的问题,提出一种基于博弈论-改进逼近理想及排序法(TOPSIS)的电能质量综合评价方法。首先在考虑实际工程情况后甄选出8个指标,并建立了评价指标体系,使用最优最劣法(BWM)求得主观权重,利用指标相关法(CRITIC)求得客观权重,引入博弈论思想将主客观权重有机结合,避免了单一赋权法的缺陷。其次,根据相对距离改进 TOPSIS 的贴合度缺陷,提升了该算法的适用性,然后运用改进 TOPSIS 对评价对象进行优劣排序以及级别判定。最后以某供电地区4个监测点所采集的数据为实例开展电能质量综合评价以及与其他评价方法作对比分析。对比分析结果表明,改进 TOPSIS 法的在监测点2、3的相对距离分别为0.232和0.256,克服了传统方法贴合度相近难以区分的缺陷,表明所提方法可以对监测点电能质量进行合理的评价及分档排序,验证了方法的有效性。

关键词: 综合评价;最优最劣法;电能质量;博弈论

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Comprehensive evaluation of power quality based on BWM-CRITIC-TOPSIS method

Wei Yewen^{1,2} Wu Xitao¹ Nie Junbo¹ Xie Yuanlin¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: A comprehensive power quality evaluation method based on the game theory and the improved technique for order performance by similarity to ideal solution (TOPSIS) is proposed to solve the problems caused by using a traditional and single evaluation method in the comprehensive evaluation of power quality, such as too strong subjective consciousness, incomplete evaluation of objective raw data and uneven weight distribution. Firstly, consider the actual engineering situation and establish the valuation index system, and the best worst method (BWM) and criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) methods are used to obtain subjective weights and objective weights, respectively. Then, the game theory idea is introduced to combine the subjective and objective weights to avoid the defects of the single assignment method. Secondly, improve the fitting degree flaws of TOPSIS through relative distances, which makes it more applicable, and the evaluation objects are ranked in order of merit and given level determination by using the improved TOPSIS. Finally, the data collected from four monitoring points in a power supply area is used as an example to carry out a comprehensive evaluation of the power quality and a comparison with other evaluation methods. The results of the comparison analysis show that the relative distances of the improved TOPSIS method at monitoring points 2 and 3 are 0.232 and 0.256 respectively, which overcomes the shortcomings of the traditional method where the fit is similar and difficult to distinguish, indicating that the proposed method can reasonably evaluate and rank the power quality of monitoring points, verifying the effectiveness of the method.

Keywords: comprehensive evaluation; best worst method; power quality; game theory

0 引言

随着电力系统中非线性负荷和冲击性负荷数量的急剧

增长,配电网电能质量问题频繁发生,不仅影响到用电设备的正常运转,也给电网安全经济运行造成了诸多不利影响^[1-3]。因此,如何实现电能质量的客观合理评价,对于电

收稿日期:2021-06-14

* 基金项目:国家自然科学基金项目(52007102)、湖北省重点研发计划项目(2020BAB110)资助

能按质定价、电网经济安全运行有着重要意义^[4-5]。

当前国内外针对电能质量评价的方法主要有模糊综合评价法、投影寻踪法^[6]、神经网络法^[7]、秩和比法^[8-9]、概率统计与矢量代数法^[10-11]等,但上述方法有着各自的局限性:模糊数学法通过隶属度函数改善了评估指标的模糊性问题,但隶属度函数的选取易被主观因素影响;投影寻踪法准确度高但计算复杂且难;智能算法建模过程复杂且依赖大量精确的样本;秩和比法在秩代换过程中可能损失部分信息,影响评估结果。文献[12]结合物原理论与证据理论对电能质量进行评价,在一定程度上降低了评价过程中的不确定性。这些方法都较好地体现了电能质量评价的研究成果,但也存在指标赋权单一或不够全面的不足。

因此,针对以上问题,本文提出一种基于博弈论-改进逼近理想及排序法(TOPSIS)的电能质量综合评价方法,使

用最优最劣法(BWM)和指标相关法(CRITIC)分别确定主客观权重,运用博弈论思想求解主客观权重的最优组合,以克服单一赋权法的不足,得到更为合理的权重结果。同时使用改进 TOPSIS 法对评价对象进行优劣排序以及确定评价对象级别。根据某供电地区监测点的实测数据进行电能质量评估,结果表明所提方法是有效可行的。

1 电能质量综合评价指标体系

本文不仅考虑了频率偏差、电压偏差、电压波动、电压谐波和三相不平衡等传统电能质量评估指标,还将功率因数偏差、供电可靠性和服务性指标考虑到评估体系中,使评估结果更加全面,也更加接近实际工程。本文所选取的电能质量综合评估指标彼此之间不仅存在差异性,一部分指标还具备内在联系。电能质量综合评估指标体系如图 1 所示。

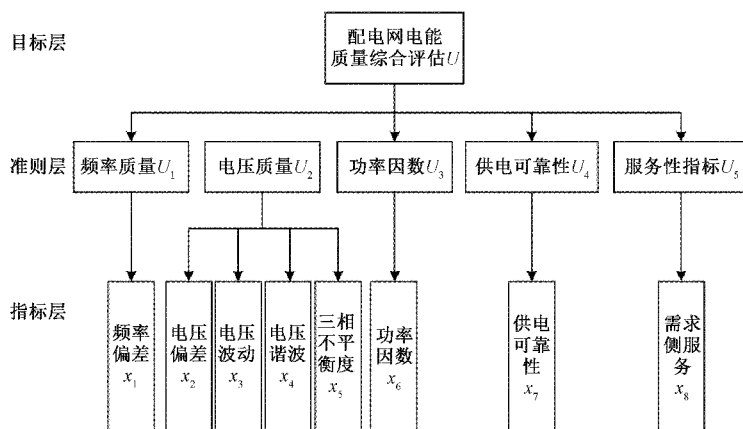


图 1 电能质量评估指标体系

根据我国现行的国家标准,将电能质量的等级划分为 5 个等级,其中 I ~ V 分别代表:优、良、中等、合格以及不及格,不同指标的等级取值范围如表 1 所示。

表 1 指标等级界限值

指标	I	II	III	IV	V
频率偏差/Hz	≤0.05	≤0.10	≤0.15	≤0.20	>0.20
电压偏差/%	≤1.2	≤3.0	≤4.5	≤7.0	>7.0
电压波动/%	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0	>2.0
电压谐波/Hz	≤1.0	≤2.0	≤3.0	≤5.0	>5.0
三相不平衡/%	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0	>2.0
功率因素	≥0.96	≥0.94	≥0.92	≥0.90	<0.90
供电可靠性	≥0.95	≥0.85	≥0.80	≥0.70	<0.70
服务性指标	≥0.9	≥0.8	≥0.7	≥0.6	<0.6

2 博弈论-改进 TOPSIS 综合评价模型

博弈论-改进 TOPSIS 综合评价方法首先是采用 BWM 法求得各指标的主观权重,采用 CRITIC 法求得客观权重,然后引入博弈论结合主客观权重求得综合权重;

最后运用改进 TOPSIS 综合评价法对电能质量进行评估。

2.1 基于 BWM 法的权重计算

BWM 法作为荷兰学者 Rezaei^[13]在 2015 年提出的一种计算指标主观权重的新方法。该方法与目前最常用的 Δ HP 法类似,都是基于指标间两两成对比较的思想。但 BWM 法相较于 AHP 法具备如下优势:比较次数少,若指标数为 m 时,AHP 法的比较次数为 $m(m-1)/2$,而 BWM 法的比较次数为 $2m-3$;消除了冗余比较,不易因计算繁琐导致失误,得出的结果更可靠。

1) 假设指标集为 $\mathbf{X}=\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$,在指标集 \mathbf{X} 中根据专家意见选取最优指标 x_b 和最差指标 x_w 。如果存在多个最优(最差)指标,可任意选择 1 个为最优(最差)指标。

2) 将最优指标 x_b 与其他指标 x_j 进行重要性比较,构造比较向量 $\mathbf{C}_b=\{C_{b1}, C_{b2}, \dots, C_{bm}\}$,其中 C_{bj} 表示最优指标和指标 j 相比的重要度, $C_{bj} \in [1, 9], j=1, 2, \dots, m$ 。

3) 将其他指标 x_j 与最差指标 x_w 进行重要性比较,构造比较向量 $\mathbf{C}_w=\{C_{1w}, C_{2w}, \dots, C_{mw}\}^T$,其中 C_{jw} 表示 x_j 比 x_w 重要, $C_{jw} \in [1, 9], j=1, 2, \dots, m$ 。

4) 构造式(1)的数学规划问题并求解,计算出各指标

权重 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ 。

$$\begin{aligned} & \min \xi \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \left| \frac{\omega_j}{\omega_j} - C_{Bj} \right| \leq \xi, j = 1, 2, 3, \dots, m \\ \left| \frac{\omega_j}{\omega_w} - C_{jw} \right| \leq \xi, j = 1, 2, 3, \dots, m \\ \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \\ \omega_j \geq 0, j = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中： C_{Bj} 是 C_B 的元素； C_{jw} 是 C_w 的元素。

5) 计算一致性比率

根据式(2)进行一致性检验,当 $CR \leq 0.1$ 时,则代表通过一致性检验;当 $CR > 0.1$,则代表未能通过一致性检验。

$$CR = \frac{\xi^*}{CI} \quad (2)$$

2.2 基于 CRITIC 法的权重计算

CRITIC 法作为希腊学者 Diakoulaki 在 1995 年提出的一种客观赋权法,根据评价指标蕴含的信息量大小来确定指标客观权重,而信息量的大小由对比强度和冲突性来表征^[14]。其中,对比强度体现的是指标间的差异性;冲突性体现的是指标间的相关性。CRITIC 法相较于熵值法而言更加全面,综合考虑了各指标之间的关联性和差异性,所得评价结果更加客观可信。

1) 建立规范评价矩阵

假设有 n 个待评价对象, m 个评价指标,将各评价对象相对应的评价指标的数据进行整理统计,建立初步评价矩阵 X 。考虑到评价指标的量化单位不一致,需对初步评价矩阵中的数据进行无量纲化处理,建立规范化的评价矩阵 X' 如式(3)所示。

$$X' = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \dots & x'_{1j} & \dots & x'_{1m} \\ x'_{21} & x'_{22} & \dots & x'_{2j} & \dots & x'_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x'_{i1} & x'_{i2} & \dots & x'_{ij} & \dots & x'_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x'_{n1} & x'_{n2} & \dots & x'_{nj} & \dots & x'_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

采取最小-最大归一化方法对各指标进行无量纲处理,无量纲化的方法如式(4)、(5)所示。

正向指标:

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

逆向指标:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (5)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

2) 建立相关系数矩阵

相关系数 r_{ij} 表示评价指标之间相关性, r_{ij} 数值越趋近于 0,则表示指标间的相关程度越弱; r_{ij} 数值越趋近于 1,

则表示指标间的相关程度越强。计算公式如下:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

利用计算出的相关系数构建相关系数矩阵 R ,如式(7)所示。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mj} & \dots & r_{mm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 计算权重

利用前面求出的相关系数计算出评价指标的冲突量化值 c_j ,计算公式如下:

$$c_j = \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (8)$$

将指标的对比强度和冲突量化值结合,可以求出指标所蕴含信息量 C_j 的大小。计算公式如下:

$$C_j = \sigma_j c_j \quad (9)$$

式中： σ_j 表示评价矩阵中第 j 个列向量的均方差。

C_j 的取值越大则表示指标包含的信息量越大,因此第 j 个指标的客观权重计算如式(10)所示。

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^m C_j} \quad (10)$$

2.3 博弈论确定指标综合权重

在上述计算中,使用 BWM 法确定主观权重,根据实测数据利用 CRITIC 法求得客观权重,但两者都不能全面考虑指标全部信息,只有综合考虑主客观权重才能全面地反映评价指标的重要程度。因此通过引入博弈论,在主客观权重之间寻找一个平衡点,使最后所求的综合权重与各基本权重的偏差最小,得到一个相对合理的综合权重^[15]。

1) 利用 BWM 法和 CRITIC 法对 n 项电能质量评估指标进行赋权,计算得主观权重 W_1 和客观权重 W_2 ,然后将两组权重线性组合,构造组合权重向量 W :

$$W = \alpha_1 W_1^T + \alpha_2 W_2^T \quad (11)$$

式中： α_1, α_2 为线性组合系数

2) 根据博弈论思想优化组合系数 α_1 和 α_2 ,使得指标组合权重 W 和 W_1, W_2 的偏差达到最小,即纳什均衡点。目标函数和约束条件为:

$$\begin{aligned} & \min(\|W - W_1\|_2 + \|W - W_2\|_2) = \\ & \min(\|\alpha_1 W_1 + \alpha_2 W_2 - W_1\|_2 + \|\alpha_1 W_1 + \alpha_2 W_2 - W_2\|_2) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \alpha_1 + \alpha_2 \geq 0 \quad (13)$$

依据微分原理可知,目标函数取得最小值的最优一阶

导数条件为：

$$\begin{cases} \alpha_1 W_1 W_1^T + \alpha_2 W_1 W_2^T = W_1 W_1^T \\ \alpha_1 W_2 W_1^T + \alpha_2 W_2 W_2^T = W_2 W_2^T \end{cases} \quad (14)$$

计算可求得线性组合系数 α_1, α_2 ，并对其进行归一化处理：

$$\begin{cases} \alpha_1^* = \frac{|\alpha_1|}{|\alpha_1 + \alpha_2|} \\ \alpha_2^* = \frac{|\alpha_2|}{|\alpha_1 + \alpha_2|} \end{cases} \quad (15)$$

3) 确定综合权重：

$$W^* = \alpha_1^* W_1^T + \alpha_2^* W_2^T \quad (16)$$

2.4 博弈论-TOPSIS 综合评价模型

TOPSIS 法是有限方案多目标决策的综合评价方法之一，在现有的对象中进行优劣排序^[16]。此方法的基本思想是：首先计算出各被评方案与最优解、最劣解的贴合度，然后对其进行排序、择优。如果评价对象最接近最优解并且远离最劣解，那么该评价对象最优。其原理如图 2 所示， a, b 点分别为最优解、最劣解， c, d 两点为处于中垂线上的评价对象，而位于中垂线上的点的贴合度都为 $1/2$ ，无法区分优劣，适用性受到限制。

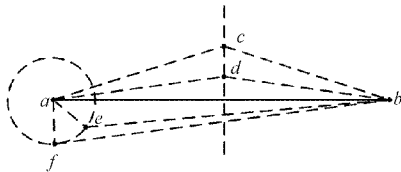


图 2 TOPSIS 法原理

为改善 TOPSIS 法中相对贴合度的缺陷，引入相对距离 L 来量化评价结果，如式(20)所示。先确定正理想解的正、负欧氏距离，并将其设置为正理想解参照点，再计算评价对象到正理想参照点的相对距离 L ，利用相对距离替代相对贴合度对评价对象进行优劣排序，提升了 TOPSIS 法的适用性。改进 TOPSIS 法原理如图 3 所示。

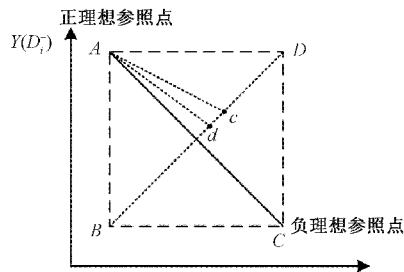


图 3 改进 TOPSIS 法原理

具体步骤如下所述：

1) 构造初始评判矩阵 X 。

2) 构造加权规范矩阵 Z 。将初始评判矩阵进行归一化处理得到 X' ，并通过各指标的综合权重 W 求得加权规范矩阵 Z ：

$$Z = X'W \quad (17)$$

3) 根据被评价对象的正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- ，求得每个方案与理想解的欧氏距离：

$$D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (18)$$

$$D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (19)$$

4) 计算各评价对象的相对距离：

$$L = \sqrt{[D_i^- - \min(D_i^-)]^2 + [D_i^+ - \max(D_i^+)]^2} \quad (20)$$

5) 将上一步的所得结果进行排序。

3 算例分析

为检验本文所提方法的有效性和优越性，使用 MATLAB 进行数据分析，对宜昌某供电地区开展电能质量评估，对该地区内 4 个监测点所采集的监测数据进行处理筛选，得到电能质量的 8 个指标数据，4 个监测点的实测值如表 2 所示。

表 2 实测数据

指标	1	2	3	4
频率偏差/Hz	0.010 5	0.024 4	0.035 6	0.027 1
电压偏差/%	0.896 3	0.719 3	0.234 8	0.917 9
电压波动/%	0.458 2	0.398 4	0.001 4	0.304 8
电压谐波/Hz	0.550 1	0.295 1	0.809 2	0.310 5
三相不平衡/%	0.020 9	0.051 3	0.446 9	0.379 4
功率因数	0.913 8	0.971 3	0.953 8	0.981 2
可靠性指标	0.974 6	0.958 3	0.998 8	0.977 1
服务性指标	0.959 8	0.932 2	0.965 9	0.903 3

根据国家标准可得到配电网最优、最劣两种运行状态下电能质量各评价指标的取值，如表 3 所示。

表 3 电能质量指标最优、最劣取值

指标	x_1/Hz	$x_2/\%$	$x_3/\%$	x_4/Hz	$x_5/\%$	x_6	x_7	x_8
最优值	0	0	0	0	0	1	1	1
最劣值	0.5	7	3	5	4	0.9	0	0

3.1 权重的计算

1) BWM 法确立主观权重。根据 3 位专家的意见分别通过 BWM 法和 AHP 法计算各指标主观权重，然后进行一致性检验。将两种方法所得一致性比率进行对比，如图 4 所示，由图 4 可知，两种方法的比率值相差不大，但 BWM 法所得一致性比率更接近 0，可靠性更高。通过加权平均计算得到 8 个指标的主观权重值：

$$\omega_1 = [0.040 6, 0.201 3, 0.122 6, 0.172 0, 0.077 2, 0.192 9, 0.172 0, 0.021 4]$$

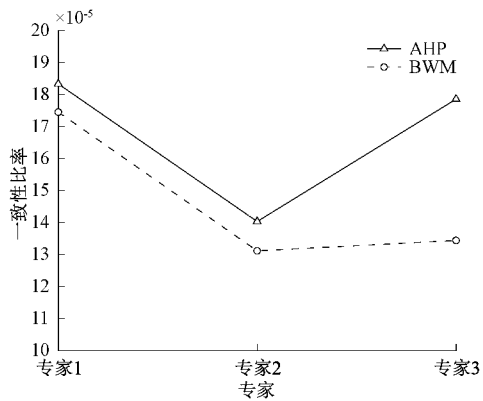


图 4 一致性比率对比图

2) CRITIC 法确定客观权重。由表 2 实测数据整理得到初步评价矩阵 X ：

$$X = \begin{bmatrix} 0.010 5 & 0.913 8 & 0.896 3 & 0.458 2 & 0.550 1 & 0.020 9 & 0.974 6 & 0.959 8 \\ 0.024 4 & 0.971 3 & 0.719 3 & 0.398 4 & 0.295 1 & 0.051 3 & 0.958 3 & 0.932 2 \\ 0.035 6 & 0.953 8 & 0.234 8 & 0.001 4 & 0.809 2 & 0.446 9 & 0.998 8 & 0.965 9 \\ 0.027 1 & 0.981 2 & 0.917 9 & 0.304 8 & 0.310 5 & 0.379 4 & 0.977 1 & 0.903 3 \end{bmatrix}$$

根据式(3)~(10)可得出 8 个指标的客观权重值：

$$\omega_2 = [0.126 2, 0.112 2, 0.112 0, 0.149 8, 0.151 0, 0.129 0, 0.106 4, 0.113 4]$$

3) 博弈论确定综合权重。根据式(11)~(15)可得出主、客观权重的纳什均衡解： $\alpha_1 = 0.677$ ， $\alpha_2 = 0.323$ ；根据式(16)求得各指标综合权重：

$$\omega = [0.068 2, 0.172 5, 0.119 2, 0.164 8, 0.101 0, 0.172 3, 0.150 8, 0.051 1]$$

如图 5 所示，图中反映了本文博弈论组合赋权与单一赋权法、Lagrange 乘子法在指标权重确定的差异。由对比结果可知，单一赋权法得到的权值分布规律差异较大，且各具特点。而通过博弈论模型求得的综合权重受主客观权重影响较小，且避免了单一赋权法过于片面所导致的结果偏差，所得结果更为合理有效。

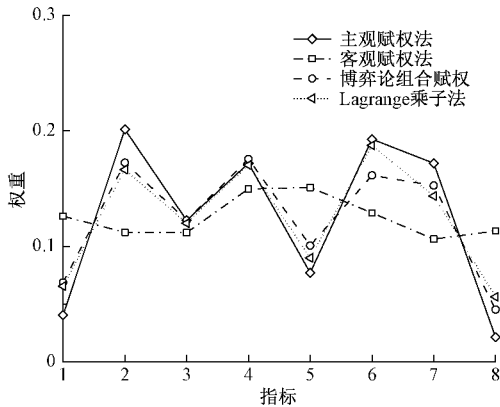


图 5 不同方法的权重分布

3.2 基于改进 TOPSIS 法评判电能质量

由电能质量等级界限、实测数据以及正理想解、负理想解数据整理出电能质量综合评价矩阵 X ：

$$X = \begin{bmatrix} 0.05 & 1.2 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.96 & 0.95 & 0.9 \\ 0.1 & 3 & 1 & 2 & 1 & 0.94 & 0.85 & 0.8 \\ 0.15 & 4.5 & 1.5 & 3 & 1.5 & 0.92 & 0.8 & 0.7 \\ 0.2 & 7 & 2 & 5 & 2 & 0.9 & 0.7 & 0.6 \\ 0.010 5 & 0.896 3 & 0.458 2 & 0.550 1 & 0.020 9 & 0.913 8 & 0.974 6 & 0.959 8 \\ 0.024 4 & 0.719 3 & 0.398 4 & 0.295 1 & 0.051 3 & 0.971 3 & 0.958 3 & 0.932 2 \\ 0.035 6 & 0.234 8 & 0.001 4 & 0.809 2 & 0.446 9 & 0.953 8 & 0.998 8 & 0.965 9 \\ 0.027 1 & 0.917 9 & 0.304 8 & 0.310 5 & 0.379 4 & 0.981 2 & 0.977 1 & 0.903 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0.5 & 7 & 3 & 5 & 4 & 0.9 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

采用式(4)、(5)对综合评价矩阵 X 进行归一化处理得到标准化矩阵 X' ：

$$X' = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.6 & 0.828 6 & 0.833 3 & 0.8 & 0.875 & 0.95 & 0.9 \\ 0.8 & 0.4 & 0.571 4 & 0.666 7 & 0.6 & 0.75 & 0.85 & 0.8 \\ 0.7 & 0.2 & 0.357 1 & 0.5 & 0.4 & 0.625 & 0.8 & 0.7 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0.333 3 & 0 & 0.5 & 0.7 & 0.6 \\ 0.979 & 0.138 & 0.872 0 & 0.847 3 & 0.890 0 & 0.994 8 & 0.974 6 & 0.959 8 \\ 0.951 2 & 0.713 & 0.897 2 & 0.867 2 & 0.941 0 & 0.987 2 & 0.958 3 & 0.932 2 \\ 0.928 8 & 0.538 & 0.966 5 & 0.999 5 & 0.838 2 & 0.888 3 & 0.998 8 & 0.965 9 \\ 0.945 8 & 0.812 & 0.868 9 & 0.898 4 & 0.937 9 & 0.905 2 & 0.977 1 & 0.903 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

并采用求得的综合权重 $\omega = [0.068 2, 0.172 3, 0.172 5, 0.119 2, 0.164 8, 0.101 0, 0.150 8, 0.051 1]^T$ ，由式(17)求得加权规范矩阵 Z ：

$$Z = \begin{bmatrix} 0.061 4 & 0.103 4 & 0.142 9 & 0.099 3 & 0.131 8 & 0.088 4 & 0.143 3 & 0.046 0 \\ 0.054 6 & 0.068 9 & 0.098 6 & 0.079 5 & 0.098 9 & 0.075 8 & 0.128 2 & 0.040 9 \\ 0.047 7 & 0.034 5 & 0.061 6 & 0.059 6 & 0.065 9 & 0.063 1 & 0.120 6 & 0.035 8 \\ 0.040 9 & 0 & 0 & 0.039 7 & 0 & 0.050 5 & 0.105 6 & 0.030 7 \\ 0.066 8 & 0.023 8 & 0.150 4 & 0.101 0 & 0.146 7 & 0.100 5 & 0.147 0 & 0.049 0 \\ 0.064 9 & 0.122 8 & 0.154 8 & 0.103 4 & 0.155 1 & 0.099 7 & 0.144 5 & 0.047 6 \\ 0.063 3 & 0.092 7 & 0.166 7 & 0.119 1 & 0.138 1 & 0.089 7 & 0.150 6 & 0.049 4 \\ 0.064 5 & 0.139 9 & 0.149 9 & 0.107 1 & 0.154 6 & 0.091 4 & 0.147 3 & 0.046 2 \\ 0.068 2 & 0.172 3 & 0.172 5 & 0.119 2 & 0.164 8 & 0.101 0 & 0.150 8 & 0.051 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由式(18)~(19)求得评价对象与正、负理想解的欧氏距离，并且利用计算公式 $C = \frac{D^-}{D^+ + D^-}$ 求得贴合度，再由式(20)求得相对距离 L ，所得结果如表 4 所示。

表 4 计算结果

指标	D^+	D^-	贴合度	L
I、II 等级界限值	0.086	0.304	0.779 5	0.013
II、III 等级界限值	0.153	0.240	0.610 7	0.205
III、IV 等级界限值	0.218	0.187	0.461 7	0.289
IV、V 等级界限值	0.314	0.134	0.299 1	0.396
监测点 1	0.044	0.337	0.884 5	0.059
监测点 2	0.178	0.227	0.517 3	0.232
监测点 3	0.192	0.206	0.516 8	0.256
监测点 4	0.214	0.156	0.421 6	0.306
正理想解	0	0.376	1	0
负理想解	0.376	0	0	0.532

根据表 4 中的计算结果，确定电能质量等级区间，如表 5 所示。

表 5 电能质量等级区间

等级	I	II	III	IV	V
C	≤ 0.013	≤ 0.205	≤ 0.289	≤ 0.396	> 0.396

3.3 综合评价结果及分析

根据表 4 的计算结果和表 5 的等级区间得出 4 个采集点的电能质量综合评价结果,与文献中不同方法对该算例分析的结果相比较,如表 6 所示。

表 6 基于不同方法的评估结果比较

样本	文献[17]	文献[18]	文献[19]	文献[20]	本文
1	2 级	2 级	2 级	2.35 级	2 级
2	3 级	3 级	3 级	3.26 级	3 级
3	3 级	3 级	3 级	2.94 级	3 级
4	3 级	4 级	4 级	3.48 级	4 级

由表 4 计算结果可知,传统的 TOPSIS 法在监测点 2、3 的贴合度分别为 0.517 3 和 0.516 8,可以看出数值间的差距很小,很难进行有效的区分,而改进 TOPSIS 法在监测点 2、3 的相对距离分别为 0.232 和 0.256,比较容易区分。因此,改进的 TOPSIS 法改善了贴合度相近难以判断优劣的缺陷,提升了该方法的适用性。

通过表 6 对比分析可知,除监测点 4 外,本文采取的博弈论-改进 TOPSIS 法与其他文献所得出的评价结果相一致,表明了该方法应用于电能质量评价的有效性。同文献[17]所采用的模糊评价理论相比,本文方法避免了模糊评价理论中隶属函数确定的主观性过强,同文献[18-19]所采用的单一赋权法相比,本文方法在指标权重的确定上更加全面合理,并且避免了文献[20]所采用的智能算法对样本需求量大问题。此外,本文方法不仅能对监测点电能质量进行等级评估,根据表 4 中各个监测点的相对距离的大小,也能确定同一等级的监测点的优劣程度。

4 结 论

本文采用 BWM 法简化了传统 AHP 方法的繁琐复杂的计算过程,降低了不一致的风险;采用 CRITIC 法计算各指标的客观权重,兼顾各指标之间的关联性与差异性,得到客观、准确的结果;引入博弈论思想,通过纳什均衡求解方式求得更可靠、准确的综合权重,即合理保留了专家经验性,也充分考量了原始数据蕴含的信息量,所得指标权重更加符合实际情况,更具代表性。

将所求综合权重引入 TOPSIS,并改进 TOPSIS 评价法中相对贴合度缺陷,使用相对距离替代相对贴合度,提升了 TOPSIS 评价法的适用性,并且通过对相对距离的排序实现电能质量的综合评价。

实例表明基于博弈论-改进 TOPSIS 的电能质量评估

方法的有效性,为电能质量评估提供了一种有效的新方法。但本文研究仍存在不足之处,如本文所构建的电能质量评价指标体系主要是稳态技术指标和服务性指标,对于暂态电能质量指标(如电压暂降状态、电压失压状态等)的监测和处理以及如何将其融入到综合评价指标体系内,使评价结果更加全面仍需进一步的探讨。

参考文献

- [1] 刘颖英,冯丹丹,林才华,等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.
- [2] 王金丽,盛万兴,宋祺鹏,等. 配电网电能质量智能监控与治理仿真[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 515-519.
- [3] 周金,高云鹏,吴聪,等. 基于改进小波阈值函数和 CEEMD 电能质量扰动检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 141-148.
- [4] 陈海宁,沈洁,马福龙,等. 基于射频识别技术的电能质量计量评估模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 25-31.
- [5] 马立新,杨天笑,豆晨飞. 分布式电源并网电能质量智能测评与方法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(11): 74-78.
- [6] 刘英,银刚,张根保,等. 数控机床质量投影寻踪综合评价方法[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(2): 21-28.
- [7] 魏伟,唐登平,陈昊,等. 基于径向神经网络的低压台区运行状态综合评价方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 9043-9048.
- [8] 付学谦,陈皓勇. 基于加权秩和比法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 128-132.
- [9] 崔明建,孙元章,杨军,等. 一种基于多层次灰色面积关联分析的电网安全综合评价模型[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3453-3460.
- [10] 郭海洋,程浩忠,马则良,等. 基于概率论和组合赋权法的电能质量综合评估[J]. 智能电网, 2017, 5(6): 524-528.
- [11] 万勇,杨星磊,王宏兵,等. 基于概率分布的风电场电能质量综合评估[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(4): 171-176.
- [12] 李玲玲,刘敬杰,凌跃胜,等. 物元理论和证据理论相结合的电能质量综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 383-391.
- [13] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. Omega, 2015, 53: 49-57.
- [14] 程杨,胡冰. 改进 AHM-CRITIC 赋权的雷达装备保障性灰色综合评估[J]. 电讯技术, 2019, 59(2): 229-236.
- [15] 陆卫强,张朝路,田毅辉,等. 基于博弈论的认知无线电频谱分配算法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(12): 58-63.
- [16] 杨文超,刘雄峰. 基于多目标遗传算法的舰船储能系统

- 配置优化[J]. 电子测量技术, 2021, 44(8): 49-53.
- [17] 郭嘉琦, 蒋建东. 可变模糊云模型电能质量综合评估[J]. 郑州大学学报(理学版), 2021, 53(3): 110-118.
- [18] 张文保, 施伟锋, 兰莹, 等. 基于层次分析—模糊综合评估法的电力推进船舶电能质量实时评估系统[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(6): 48-57.
- [19] 杨光盛, 崔幼, 宣玉华, 等. 基于 CRITIC 和理想点法的计量设备运行质量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 62-69.
- [20] 吴正玲, 张楠楠. 基于支持向量回归机的电能质量评估[J]. 现代电子技术, 2016, 39(23): 148-151.

作者简介

魏业文, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为电能质量分析、检测和评估等。

E-mail: 2323301402@qq.com

吴希韬, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析、检测和评估等。

E-mail: 1264425080@qq.com

聂俊波, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析。

E-mail: 947692245@qq.com

解园琳, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量评估。

E-mail: 1936735858@qq.com