

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210386

基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法

赵洪山, 李静璇, 米增强, 蒲靓, 崔阳阳

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为提高电能质量分级评估的客观性和准确性, 提出了一种基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法。首先, 基于压力-状态-响应模型中子系统间的逻辑关系, 从压力、状态、响应多维度选取评价指标, 建立科学的电能质量综合评估指标体系。由于指标间存在一定关联关系, 综合指标间的差异因素, 从两种信息角度采用 CRITIC 赋权法, 保证指标赋权的客观性。然后, 建立改进 Grey-TOPSIS 评估模型, 引入灰色关联度改进单一的欧氏距离。将图形贴进度与空间位置融合, 构建新距离测度, 弥补原有判据的缺陷。同时, 将电能质量等级矩阵加入评估矩阵中, 通过计算实测和等级序列与正理想解间的贴进度, 实现对电能质量等级客观的量化分级。最后, 通过实际算例分析, 验证了所提方法能够充分利用数据信息, 降低主观因素影响, 获得更准确、全面的电能质量分级评估结果。

关键词: 电能质量分级评估; 压力-状态-响应模型; CRITIC 赋权法; 改进 Grey-TOPSIS 评估方法

Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS

ZHAO Hongshan, LI Jingxuan, MI Zengqiang, PU Liang, CUI Yangyang

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: To improve the objectivity and accuracy of power quality evaluation, a grading evaluation model of power quality based on criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) and an improved grey-technique for order preference by similarity to an ideal solution (Grey-TOPSIS) method is proposed. First, the evaluation indices are selected based on the interaction between subsystems in a pressure-state-response (PSR) model, and a comprehensive evaluation index system is established. Because there is a certain correlation between indices, and considering the differences between indices, the CRITIC method is used to ensure the objectivity of index weighting based on two aspects of information. Then, an improved Grey-TOPSIS evaluation model is established, and the Euclidean distance is improved by introducing grey correlation degree. The new distance measure is constructed by fusing the progress of graph pasting with spatial position to make up for the defect of the original criterion. Moreover, the power quality grade is added to the evaluation matrix, and the grading evaluation of power quality is realized by judging the distance between the grade sequence and the positive ideal solution. The case study indicates that the improved model makes full use of data information, reduces the impact of subjective factors, and can obtain more accurate and comprehensive power quality evaluation results.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFE0122200).

Key words: grading evaluation of power quality; pressure-state-response model; CRITIC method; improved Grey-TOPSIS method

0 引言

近年来, 随着电力电子设备等非传统主体单元逐渐呈现产业化发展趋势, 新能源发电逐渐大规模

渗入电网, 分布式电源和非线性负荷的运行对电网的电能质量产生一定的影响^[1-2]。在负荷侧, 居民家用电器及工业精密设备的使用, 对电能质量提出了更高的要求^[3]。因此, 通过建立合理的评估体系, 对电能质量进行科学量化, 准确评估系统电能质量的整体状况, 对保障用户侧用电品质, 指导电网电

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFE0122200)

能质量治理, 推动“依质定价”在未来电力市场中的开展, 具有重要的现实意义。

国内外学者针对电能质量综合评估问题开展了相关研究。电能质量评估指标的综合性会影响评估结果的科学性, 现有评估体系多从电压、频率、波形角度来构建评价指标^[4-5]。文献[6]选取频率偏差、电压偏差、电压波动、三相电压不平衡等 7 个指标评估电能质量整体状况和变化趋势。但仅从反映电能质量状态的因素构建指标, 具有一定的局限性, 需要考虑多维度影响因素, 以提高评估指标体系的科学性。

目前电能质量评估方法主要有模糊评价法、投影寻踪法、物元分析法等。采用模糊评估法^[7-8]对电能质量进行评估时, 评价者的主观偏好会对隶属度函数的选择和指标权重的确定产生影响, 评估结果缺乏一定的客观性。文献[5]在评估中引入云推理模型来替代隶属度函数, 构建多维多规则的云评价算法, 降低隶属度确定中的主观性。基于神经网络算法^[9-10]构建电能质量评估模型, 虽然能够提高评估结果的客观性, 但模型训练需要大量的数据支持, 评估过程较为复杂。投影寻踪法^[11-12]中将多指标转换为单一投影指标问题, 建立投影寻踪电能质量评估模型, 但评估过程存在不确定性。因此, 文献[13]将物元法与证据理论融合, 降低电能质量评估过程中的不确定性。但在证据融合过程中可能导致部分有效信息丢失, 影响评估的准确性。TOPSIS 法^[14]充分利用指标数据信息, 基于相对贴近度概念对电能质量优劣性进行评价, 但模型没有对电能质量等级进行量化, 无法划分监测点所属的电能质量等级, 缺乏细致的电能质量分级评估结果。由此可知, 现有方法在指标选取方面存在一定的局限性, 难以对影响电能质量的指标因素进行多维度分析, 且评估方法难以对电能质量等级实现客观的量化分级, 缺乏准确、客观的分级评估结果。

针对上述问题, 本文依据压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)模型中子系统间的逻辑关系, 在选取反映电能质量三要素的状态指标基础上, 考虑供电可靠性压力因素和服务响应因素, 从多个维度构建综合的电能质量评估指标体系。考虑指标间存在一定的关联性, 利用 CRITIC 法确定指标权重, 保证赋权的客观性。建立改进 Grey-TOPSIS 评估模型, 引入灰色关联度与欧氏距离融合, 改进单一的距离判据, 更精确地辨别方案的相对优劣性, 提高综合评估结果的准确性。从 PSR 维度评估分析, 能够寻找影响电能质量的关键因素。同时在综合评估矩阵中加入电能质量等级矩阵, 对

电能质量进行客观的分级量化, 能够获得更准确、细致的分级评估结果。

1 电能质量评估指标体系

20 世纪 80 年代末期, 国际组织提出针对环境治理的 PSR 框架体系^[15-16]。PSR 模型通过建立“原因-状态-反应”的思维逻辑, 科学合理地对自然与人类活动间的关联和影响进行分析。“状态”代表所产生的现象, “压力”代表造成该现象产生的因素, “响应”代表社会或个人的反应和采取的措施, 体现一定的因果逻辑关系(见图 1)。结合电网背景, 本文应用 PSR 模型中的逻辑关系选取具有代表性的指标, 构建电能质量综合评估指标体系。

供电可靠性指标涵盖停电时长、停电次数、供电可靠率等因素, 能够有效地反映对电能质量产生影响的压力因素, 可视为“压力”指标。电压、频率和波形是衡量电能质量重要的三要素, 从该角度选取能够实际反映电能质量状况的指标作为“状态”指标, 文中状态子系统包含电压偏差、三相不平衡度、频率偏差等 7 个关键指标。供电部门通过开展电能计量、故障抢修、电话服务等业务, 积极优化供电服务, 推动电能质量的提升, 体现了社会对提升电能质量目标的响应, 因此服务性指标可视为“响应”指标。压力、状态、响应三个子系统相互联系、作用, 共同构成了基于 PSR 模型的电能质量评估体系, 因此电能质量各评估指标间不仅存在差异性, 同时也具有一定的关联性。基于 PSR 模型的电能质量评估指标体系如图 1 所示。

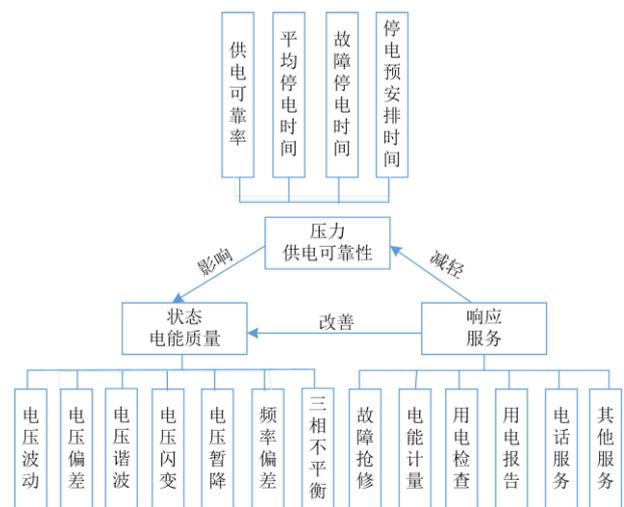


图 1 电能质量综合评估指标

Fig. 1 Comprehensive evaluation index of power quality

根据国家相关标准将电能质量划分为五个等级^[11], I-V 分别表示优秀、良好、中等、合格、不

合格, 各电能质量等级中的单指标值如表 1 所示。

表 1 电能质量指标分级情况

Table 1 Grading circumstances of each index of power quality

指标	类型	I	II	III	IV	V
供电可靠性	效益	≥0.95	≥0.85	≥0.8	≥0.7	<0.7
电压波动/%	成本	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0	>2.0
电压偏差/%	成本	≤1.2	≤3.0	≤4.5	≤7.0	>7.0
电压谐波/%	成本	≤1.0	≤2.0	≤3.0	≤5.0	>5.0
电压闪变/%	成本	≤0.2	≤0.5	≤0.8	≤1.0	>1.0
电压暂降	效益	≥0.9	≥0.8	≥0.5	≥0.1	<0.1
频率偏差/Hz	成本	≤0.05	≤0.1	≤0.15	≤0.2	>0.2
三相不平衡/%	成本	≤0.5	≤1.0	≤1.5	≤2.0	>2.0
服务性	效益	≥0.9	≥0.8	≥0.7	≥0.6	<0.6

2 基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估模型

2.1 基于 CRITIC 确定指标权重

在多指标综合评价方法中, 指标权重会影响评价结果。在主观赋权法中, 指标权重受到评价者主观偏好的影响, 难以科学地衡量指标的重要程度。客观赋权法基于数据信息量化指标对评估结果的影响力。熵权法通过挖掘评价指标间的差异性信息求取指标权重^[17], 是一种重要的客观赋权法。虽然该方法降低了主观因素对指标赋权的影响, 但仅考虑指标的差异性, 忽略了指标间的关联关系, 因此提出 CRITIC 赋权法, 更充分挖掘指标数据蕴含的信息, 提高赋权的合理性、客观性。

CRITIC 赋权法从对比强度和冲突性两种信息角度分析指标信息量^[18]。对比强度基于均方差思想反映评价指标间的差异性。冲突性基于相关系数反映指标间的关联性。该赋权法综合考虑指标间的关联性和差异性, 弥补熵权法中的缺陷, 赋权过程更为客观、科学。CRITIC 赋权法的步骤如下。

1) 效益型指标和成本型指标

效益型指标

$$x_{ij}^{(1)} = x_{ij} \quad (1)$$

成本型指标

$$x_{ij}^{(1)} = \max x_j - x_{ij} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为电能质量指标的原始数值; $x_{ij}^{(1)}$ 为正向化后的指标值。

2) 指标数据标准化处理

对指标进行标准化处理, 避免因量纲不同而影响评估的准确性, 如式(3)所示。

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}^{(1)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^{(1)2}}} \quad (3)$$

式中, x_{ij}^* 为标准化处理后的指标值。

3) 求取指标的相关系数

相关系数可以反映线性相关程度, 基于离差乘积来衡量两个变量之间的关联程度, 如式(4)所示。

$$\zeta_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{\infty} (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - n(\bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - n(\bar{y})^2 \right]}} \quad (4)$$

式中, $\zeta_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个指标与第 j 个指标间的相关系数, ζ_{ij} 越接近于 1 表示两个指标间的相关程度越大。

4) 综合衡量指标的信息量

利用评价指标的相关系数矩阵, 根据对比强度和冲突性概念, 定义信息度衡量指标 C_j 。

$$C_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_{ij}) \quad (5)$$

式中: σ_j 为指标 j 的均方差, 反映指标间的差异性; $(1 - \zeta_{ij})$ 反映指标间的冲突性; C_j 值越大表示蕴含的信息量越大。

5) 计算指标权重

依据公式(5)中指标所蕴含的信息量来确定指标权重值, 定义指标权重为

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (6)$$

式中, w_j 表示指标 j 的权重值。

2.2 改进 Grey-TOPSIS 评估方法

传统 TOPSIS 法作为一种多目标决策评价方法, 通过比较各评估对象与虚拟最优和最劣解间的欧氏距离来衡量各个评估方案的优劣性, 该方法利用相对贴近度概念对评估结果进行量化, 可以综合分析整体情况^[19-20]。但传统 TOPSIS 评价方法存在一定的缺陷: 一是仅利用欧氏距离作为距离测度, 可能存在评价方案与正理想解和负理想解的距离测度均相接近的情况, 造成根据相对贴近度无法准确判断评价方案的相对优劣性, 影响评价结果的可靠性; 二是在传统 TOPSIS 评价中, 利用相对贴近度的大小仅能对评估方案进行内部排序, 判断方案间的相对优劣性, 但无法实现评估对象的分级评估, 即无法衡量评估对象的电能质量等级。

针对上述传统 TOPSIS 存在的缺陷, 提出改进

Grey-TOPSIS 法实现电能质量分级评估。灰色关联分析利用指标间的关联度来反映数据序列的内在变化趋势^[21], 可以弥补传统欧氏几何距离无法准确反映相对位置关系的缺陷。因此在传统 TOPSIS 法中, 引入灰色关联分析, 将欧氏几何距离与灰色关联度进行融合, 作为改进后的距离测度, 可以有效辨别评估对象间的相对位置关系, 提高评估的准确性。此外在模型中加入子系统分析环节, 从 PSR 维度分析影响电能质量的指标因素。具体步骤如下。

1) 构建原始评估矩阵

选取 n 个评价指标, m 个评估对象, 依据监测得到的指标数据, 构造原始评估矩阵 \mathbf{X} 。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, x_{ij} 为评估对象 i 中指标 j 的原始值。

2) 构建标准化加权评估矩阵

依据评估指标类型, 根据式(1)和式(2)进行正向化处理。根据公式(3)构建标准化评估矩阵 \mathbf{X}^* , 综合指标权重求取标准化加权矩阵 \mathbf{Z} 。

$$\mathbf{Z} = (z_{ij})_{m \times n} = (x_{ij}^* w_j)_{m \times n} \quad (8)$$

式中: x_{ij}^* 为标准化处理后的数据值; w_j 为指标 j 的权重值; z_{ij} 为标准化加权后的指标值。

3) 确定正负理想解 Z^+ 和 Z^-

TOPSIS 评价法中定义正负理想解为标准评估矩阵中各指标对应最大、最小值的集合:

$$\begin{aligned} Z^+ &= \left\{ \max_j z_{ij} \right\} = \{z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+\} \\ Z^- &= \left\{ \min_j z_{ij} \right\} = \{z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-\} \end{aligned} \quad (9)$$

在改进 Grey-TOPSIS 评估方法中, 依据相关标准利用各指标实际最优最劣极限值构建最优最劣值序列, 并加入评估矩阵中进行正向化和标准化处理, 以此确定正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- 。

4) 计算欧氏距离和灰色关联度

根据式(10)计算欧氏几何距离。

$$\begin{aligned} E_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \\ E_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, E_i^+ 和 E_i^- 分别为与正、负理想解之间的欧氏距离。

根据式(11)和式(12)计算灰色关联度。

$$\begin{aligned} \gamma_{ij}^+ &= \frac{\min_i \min_j |z_{ij} - z_j^+| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^+|}{|z_{ij} - z_j^+| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^+|} \\ \gamma_{ij}^- &= \frac{\min_i \min_j |z_{ij} - z_j^-| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^-|}{|z_{ij} - z_j^-| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^-|} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: γ_{ij}^+ 和 γ_{ij}^- 为灰色关联系数; ρ 是分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 通常 $\rho = 0.5$ 。

$$R_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^+ \quad (12)$$

$$R_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^-$$

式中: R^+ 、 R^- 分别为与正、负理想解之间的灰色关联度。

5) 构建改进灰色-欧氏距离测度

将灰色关联度和欧氏距离结合, 定义两个新型距离测度 S_i^+ 和 S_i^- , 如式(13)所示。当评估对象对应的 E_i^- 和 R_i^+ 值均较大时, 该方案更接近最优解。同理, 当 E_i^+ 和 R_i^- 均较大时, 该方案更接近最劣解。

$$\begin{aligned} S_i^+ &= \lambda E_i^- + (1 - \lambda) R_i^+ \\ S_i^- &= \lambda E_i^+ + (1 - \lambda) R_i^- \end{aligned} \quad (13)$$

式中: λ 为评价者对于欧式几何距离测度的偏重程度, 本文中对两种方法没有主观偏好, 因此 $\lambda = 0.5$ 。 S_i^+ 越大则该评估方案较优, S_i^- 越大则该方案较差。

6) 计算相对贴近度

利用公式(13)中的新距离测度, 计算相对贴近度。如果 D_i 值越大, 则该评估方案越贴近正理想解, 该监测点的电能质量更优。

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

7) 电能质量子系统因素分析

基于步骤5)和6)计算 PSR 子系统电能质量指标所对应的新距离测度, 以 PSR 三个子系统的相对贴近度值作为子系统评分。

2.3 电能质量分级评估模型

为实现对电能质量分级量化, 构建电能质量分级评估模型, 具体流程(图 2)如下:

1) 根据 PSR 框架, 基于压力、状态、响应三个维度间的联系和逻辑关系, 选取涵盖可靠性、服务性和电能状态的电能质量综合评价指标, 使指标体系具有科学性和综合性, 并对指标进行量化。

2) 考虑指标间存在关联性和差异性的特点, 基于 CRITIC 赋权法计算指标权重, 充分利用指标的

数据信息, 提高赋权过程的客观性。

3) 利用改进 Grey-TOPSIS 评价法进行分级评估。在评估矩阵中加入电能质量等级矩阵和基于标准的指标最优最劣值矩阵, 能够解决传统 TOPSIS 评估无法判断评估对象所属电能质量等级的问题, 实现等级量化。引入灰色关联度与欧式几何距离融合来改进距离测度, 能够可靠地反映各评估对象与正、负理想解间的位置关系, 更准确地判断方案与最优解的贴近度。

4) 根据相对贴近度, 评价各评估对象电能质量的相对优劣性。从压力、状态、响应维度评估指标性能, 分析影响电能质量的关键指标因素。根据电能质量等级量化结果, 实现分级评估目标。

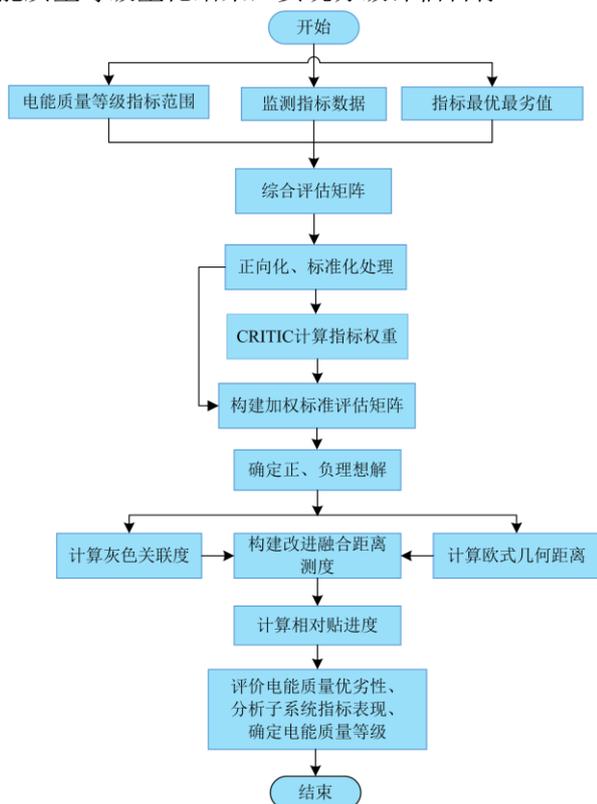


图2 电能质量分级评估流程

Fig. 2 Power quality grading assessment process

3 算例分析

3.1 电能质量综合评估分析

选取某观测区域内 5 个不同的观测点, 电压等级为 380 V, 利用监测设备采集的运行数据对 PSR 指标体系中的评估指标进行观测和记录。对某月内的大量监测数据进行统计和计算, 取其 95% 概率大值作为该指标的数据值, 最终获得各监测点的指标数据如表 2 所示。

依据相关标准和专家经验量化各指标的极限

值, 确定实际运行状况下最优、最劣值, 如表 3 所示, 并将最优最劣矩阵加入综合评估矩阵中。

表 2 监测点指标数据

Table 2 Indexes data of monitoring points

指标	监测点 1	监测点 2	监测点 3	监测点 4	监测点 5
供电可靠性	0.833	0.762	0.796	0.740	0.764
电压波动/%	1.33	1.53	1.95	1.37	1.58
电压偏差/%	3.21	6.68	4.35	5.33	4.22
电压谐波/%	1.72	4.28	2.67	3.36	4.57
电压闪变/%	47.3	84.7	63.4	82.6	82.8
电压暂降	79.63	15.89	51.56	58.56	48.63
频率偏差/Hz	0.092 2	0.156 2	0.118 0	0.178 7	0.189 2
三相不平衡/%	0.83	1.36	1.35	1.74	1.83
服务性	0.832	0.713	0.864	0.684	0.783

表 3 指标最优最劣值

Table 3 Optimal and worst value of index

指标	最优	最劣
供电可靠性	1	0
电压波动/%	0	3
电压偏差/%	0	7
电压谐波/%	0	5
电压闪变/%	0	3
电压暂降	1	0
频率偏差/Hz	0	0.5
三相不平衡/%	0	4
服务性	1	0

指标最优极限值确定根据指标类型划分。对于效益型指标, 其最优值为指标的最大极限值, 如服务性指标最优值为 1; 对于成本型指标, 其最优值为指标的最小极限值, 如电压波动、电压偏差等指标最优值为 0。当电网标称电压为 380 V 时, 电压波动与电压闪变不超过 3%, 电压偏差不超过 7%, 电压谐波不超过 5%, 短时电压不平衡度不超过 4%, 频率偏差极限值不超过 0.5 Hz, 由此确定各指标的最劣值。

为实现电能质量客观的分级量化, 改进传统评估矩阵, 利用实际监测数据、最优最劣极限值和等级数据构建电能质量综合评估矩阵, 并依据式(1)一式(3)进行数据标准化处理, 构建标准综合评估矩阵, 如表 4 所示。

基于 CRITIC 赋权法计算电能质量综合评价体系中各指标权重, 权重向量为:

$$W = [0.0175, 0.1614, 0.2089, 0.1953, 0.0245, 0.2195, 0.0477, 0.0763, 0.0487].$$

根据指标权重计算加权标准综合评估矩阵, 利用改进 Grey-TOPSIS 法进行综合评估, 结果如表 5 所示。

表 4 标准化综合评估数据

Table 4 Standardized comprehensive evaluation data

类型	供电可靠性	电压波动	电压偏差	电压谐波	电压闪变	电压暂降	频率偏差	三相不平衡	服务性
实测	0.319 6	0.289 7	0.324 5	0.382 4	0.331 8	0.387 9	0.338 0	0.351 4	0.330 7
	0.292 3	0.255 0	0.027 4	0.083 9	0.282 7	0.077 4	0.285 0	0.292 7	0.283 4
	0.305 4	0.182 2	0.227 0	0.271 6	0.310 7	0.251 2	0.316 7	0.293 8	0.343 5
	0.283 9	0.282 8	0.125 9	0.191 2	0.285 5	0.285 2	0.266 3	0.250 6	0.271 9
	0.293 1	0.246 3	0.238 2	0.050 1	0.285 2	0.236 9	0.257 6	0.240 6	0.311 3
等级	0.364 5	0.433 7	0.496 9	0.466 3	0.367 7	0.438 4	0.373 0	0.388 0	0.357 8
	0.326 1	0.347 0	0.342 7	0.349 7	0.328 3	0.389 7	0.331 6	0.332 6	0.318 0
	0.306 9	0.260 2	0.214 2	0.233 2	0.288 9	0.243 6	0.290 1	0.277 2	0.278 3
	0.268 5	0.173 5	0.000 0	0.000 0	0.262 6	0.048 7	0.248 7	0.221 7	0.238 5
最优	0.383 6	0.520 5	0.599 7	0.582 9	0.393 9	0.487 1	0.414 5	0.443 5	0.397 5
最劣	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

表 5 改进 Grey-TOPSIS 计算结果

Table 5 Results of improved Grey-TOPSIS

指标	S ⁺	S ⁻	D
监测点 1	0.480	0.355	0.575
监测点 2	0.383	0.483	0.442
监测点 3	0.425	0.404	0.513
监测点 4	0.415	0.423	0.496
监测点 5	0.408	0.437	0.483
I、II 级界限	0.541	0.315	0.632
II、III 级界限	0.480	0.356	0.574
III、IV 级界限	0.421	0.407	0.508
IV、V 级界限	0.360	0.528	0.405

根据相对贴近度值排序，相对贴近度值越大，则反映该点电能质量状况更接近最优理想解，电能质量相对较好。5 个监测点的电能质量相对优劣性排序为：监测点 1>监测点 3>监测点 4>监测点 5>监测点 2。监测点 1 的电能质量相对较好，监测点 2 的电能质量评估结果较差，应对综合评估结果较差监测点的电能质量状况重点进行监测、治理。

根据表 5 中电能质量等级界限对应相对贴近度值，客观量化电能质量等级，实现各监测点电能质量的分级评估并作为治理依据，结果如表 6 所示。各监测点电能质量等级划分结果：监测点 1 电能质量为良好，监测点 3 对应的电能质量等级为中等，监测点 2、4、5 对应的电能质量等级为合格。

表 6 电能质量等级划分

Table 6 Power quality level classification

等级	取值范围	监测点	等级
I	≥0.632	监测点 1	II
II	≥0.574	监测点 2	IV
III	≥0.508	监测点 3	III
IV	≥0.405	监测点 4	IV
V	<0.405	监测点 5	IV

3.2 电能质量子系统因素分析

通过对电能质量综合评估体系中压力、状态和响应三个子系统进行评估，分析影响监测点电能质量综合评估结果的重要指标因素，如图 3 所示。监测点 1 的压力和状态系统评分在 5 个监测点中达到最高，三个维度的指标表现均较好，因此最终的综合评估结果最优。与其他观测点相比，监测点 3 的响应维度评分值最高，服务性能指标更优，而响应指标可以对压力、状态因素产生正向的反馈，最终其排名较高。因此应注重提升服务能力，进而推动电能质量的提升。监测点 2 在 PSR 子系统表现均较差，其压力维度的表现与其他监测点存在较大差距，最终电能质量排名最低，应重点优化供电可靠性指标因素，提高供电可靠性。

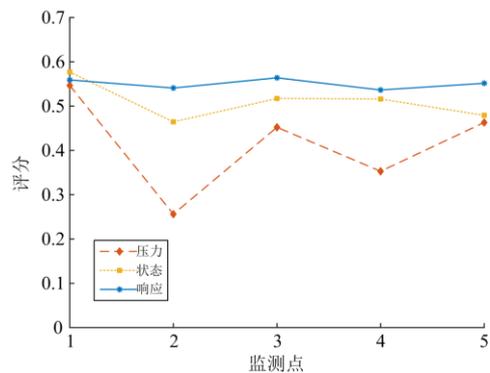


图 3 电能质量子系统评估

Fig. 3 Evaluation results of power quality subsystem

3.3 电能质量分级评估模型适应性分析

为验证基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 电能质量分级评估模型的有效性，采用不同的评估方法对各监测点电能质量等级进行评估分析，评估结果如表 7 所示。

表 7 评估方法对比

Table 7 Comparison of different evaluation methods

评估方法	改进 Grey-TOPSIS	TOPSIS	动态时间弯曲空间距离度量	可拓云理论
监测点 1	II	II	II	II
监测点 2	IV	IV	IV	IV
监测点 3	III	III	III	III
监测点 4	IV	III	IV	IV
监测点 5	IV	IV	IV	IV

由表 7 可知, 文中提出的基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估结果与其他评估方法的评估结果基本一致, 验证了该模型的适应性。

在 TOPSIS 评估法中, 为确定电能质量等级, 将电能等级序列也加入综合评估矩阵中, 但监测点 4 的电能质量等级结果存在误差。因为该方法仅利用单一欧氏距离作为距离测度, 无法准确判断待评估对象与正负理想解间的位置关系, 可能导致电能质量等级判断错误。文中评估方法引入灰色关联度与欧氏距离结合形成新的拟合判据, 能够更可靠地反映方案的相对位置关系, 评估结果更加准确。在动态时间弯曲空间距离度量^[22]评估方法中, 采用 AHP 和熵权法确定指标权重, 包含评价者主观偏好。可拓云理论评估方法^[23]运用模糊评价方法, 隶属度函数的选择受主观因素影响。因此, 上述两种方法的评价结果在一定程度上受主观因素影响, 而本文评估模型充分利用指标的数据信息, 采用 CRITIC 赋权和改进 Grey-TOPSIS 电能质量等级评估, 评价过程基于客观数据信息, 避免主观偏好对评估的影响, 结果更具科学性、客观性。同时相较于其他方法, 文中模型中引入 PSR 子系统分析环节, 能够感知影响监测点电能质量的重要指标因素, 为优化电能质量提供依据。

4 结论

文中利用 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 对电能质量进行分级评估。基于 PSR 模型中三个子系统间的逻辑关系, 从压力、状态、响应多维度选取电能质量综合评估指标, 构建科学全面的指标体系。考虑指标间不仅存在差异性, 还具有一定的关联性, 充分利用数据信息, 基于 CRITIC 法计算指标权重, 提高指标赋权的客观性。然后结合灰色关联度改进 TOPSIS 法, 建立改进 Grey-TOPSIS 评估模型, 克服 TOPSIS 法中单一欧氏距离测度对位置判断模糊的缺陷。同时在模型中加入电能质量等级矩阵构建综合评估矩阵, 实现对电能质量等级的客观量化评估。改进后的模型能够评估各监测点电能质量的相

对优劣性和具体等级, 评估结果更为全面细致。实例表明, 基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估模型具有适应性。通过对比分析可知, 该模型能充分利用指标数据中蕴含的信息, 指标权重和评估结果的客观性更强。改进后的距离拟合判据对位置判断更准确, 提高了分级评估的可靠性。此外模型中的 PSR 子系统分析环节能够分析影响评估结果的指标因素, 为提升电能质量水平提供参考方向。

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.
LIU Yingying, FENG Dandan, LIN Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [2] 付学谦, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 能源互联网供能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 1-7.
FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 1-7.
- [3] KIRANMAI S A, LAXMI A J. 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(1): 303-314.
- [4] 张逸, 李渴, 邵振国, 等. 基于标准文件的电能质量领域本体构建方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 102-110.
ZHANG Yi, LI Ke, SHAO Zhenguo, et al. Standard files based ontology construction method in power quality domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 102-110.
- [5] 阴艳超, 吴仁杰, 常斌磊. 复杂电网电能质量知识云评价服务模型与方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 241-247.
YIN Yanchao, WU Renjie, CHANG Binlei. Knowledge cloud evaluation service model and method for power quality of complex power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 241-247.
- [6] WANG T, LI Y, LIN C, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of power quality based on confrontational cross DEA model[C]// 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), November 21-23, 2019, Beijing, China: 2595-2599.
- [7] 康世崑, 彭建春, 何禹清. 模糊层次分析与多目标决策相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 113-118.
KANG Shiwei, PENG Jianchun, HE Yuqing. Comprehensive evaluation of power quality based on the integration of fuzzy analytic hierarchy process with

- multi-objective decision-making[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 113-118.
- [8] 杨家豪, 欧阳森, 石怡理, 等. 一种组合隶属度函数及其在电能质量模糊评价中的应用[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(2): 63-69.
YANG Jiahao, OUYANG Sen, SHI Yili, et al. Combined membership function and its application on fuzzy evaluation of power quality[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(2): 63-69.
- [9] SALARVAND A, MIRZAEIAN B, MOALLEM M. Obtaining a quantitative index for power quality evaluation in competitive electricity market[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(7): 810-823.
- [10] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159, 164.
OUYANG Sen, SHI Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159, 164.
- [11] 周林, 栗秋华, 张凤. 遗传投影寻踪插值模型在电能质量综合评估中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 32-35.
ZHOU Lin, LI Qihua, ZHANG Feng. Application of genetic projection pursuit interpolation model on power quality synthetic evaluation[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 32-35.
- [12] 李华, 贺鹏举, 景丽婷, 等. 基于 RAGA-PPM 的电能质量综合评估方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 349-353.
LI Hua, HE Pengju, JING Liting, et al. The method of power quality comprehensive evaluation based on RAGA-PPM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 349-353.
- [13] 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.
LI Lingling, LIU Jingjie, LING Yuesheng, et al. Power quality comprehensive evaluation based on matter-element theory and evidence theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 383-391.
- [14] 李杰. 基于合作博弈和改进 TOPSIS 的电能质量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 109-115.
LI Jie. Research on evaluation method of power quality based on cooperative game theory and improved TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 109-115.
- [15] ZHANG D, SHEN J, LIU P, et al. Allocation of flood drainage rights based on the PSR model and Pythagoras Fuzzy TOPSIS method[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(16): 1-19.
- [16] 宋琪, 文福拴, 王维洲, 等. 智能电网社会效益测评的压力—状态—响应模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 23-32.
SONG Qi, WEN Fushuan, WANG Weizhou, et al. Evaluating social welfare of smart grid development in Pressure-State-Response framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 23-32.
- [17] FAN L, ZHANG Y. Application of combination weighing and outranking relation method in evaluation of power quality[J]. Journal of Information and Computational Science, 2013, 10(1): 1-7.
- [18] 汤旻安, 张凯越, 许希元. 基于启发式规则与 AHP-CRITIC 算法的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 1-9.
TANG Min'an, ZHANG Kaiyue, XU Xiyuan. Service restoration strategy of a distribution network based on heuristic rules and the AHP-CRITIC algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 1-9.
- [19] 陈琪华, 何育恒, 曾永忠, 等. TOPSIS 法在垃圾焚烧发电锅炉蒸汽空气预热器综合评价中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1274-1281, 1418.
CHEN Qihua, HE Yuheng, ZENG Yongzhong, et al. Application of TOPSIS method in the comprehensive evaluation of steam-air preheater on waste incineration boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1274-1281, 1418.
- [20] MALGORZATA J K, KATARZYNA A, RYSZARD W, et al. Application of MICMAC, fuzzy AHP, and fuzzy TOPSIS for evaluation of the maintenance factors affecting sustainable manufacturing[J]. Energies, 2021, 14(5): 1436-1446.
- [21] 姚忠胜, 钱虹, 吴文军, 等. 基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 28-34.
YAO Zhongsheng, QIAN Hong, WU Wenjun, et al. Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved gray relation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 28-34.
- [22] 林德清, 顾伟, 王元凯, 等. 基于动态时间弯曲空间距离度量的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 562-567.
LIN Deqing, GU Wei, WANG Yuankai, et al. Synthetic evaluation of power quality based on dynamic time warping spatial distance measurement[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 562-567.
- [23] 李如琦, 苏浩益. 基于可拓云理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 66-70.
LI Ruqi, SU Haoyi. A synthetic power quality evaluation model based on extension cloud theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 66-70.

收稿日期: 2021-04-11; 修回日期: 2021-06-29

作者简介:

赵洪山(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电力设备故障预测与优化运维等研究; E-mail: zhaohshcn@ncepu.edu.cn

李静璇(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量评估、变压器剩余寿命预估。E-mail: lijingxuansd@163.com

(编辑 葛艳娜)