

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230236

基于状态熵权和双轨制 TOPSIS 的电能质量实时综合评估方法

胡润泽¹, 吕世轩¹, 张灿¹, 耿蒲龙¹, 卫宏², 郑丽君¹

(1. 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室(太原理工大学), 山西 太原 030024;

2. 南京林业大学信息科学技术学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 为实现电能质量连续、实时综合评估, 提出了一种全域电能质量评估体系, 设计了综合评估方法。首先, 使用熵权法构造各指标间数据信息量的对比通道, 实现对电能质量指标影响权重的常权赋予, 保证赋权的客观性。通过构造状态变元, 对计算单元内各点权重进行动态调整, 保证指标时序赋权的动态特性, 增强时域下的权重分辨率。然后, 提出了双轨制 TOPSIS 评估方法, 分别开辟数据与等级的 TOPSIS 计算路径, 避免数据与等级杂糅对两者内部相对关系的破坏, 减小评估标准对于数据的依赖, 保证各时段评估标准的一致性。最后, 实时判断两者贴合度, 完成数据向等级的并轨, 得到以综合评估等级为判据的电能质量整体状态评价和以状态权重为参考的等级变化成因分析。通过算例分析验证了该评估方法能够实现实时评估, 具备准确快速地反映电能质量随时间变化的能力, 且评估流程具有普适性。

关键词: 实时评估; 全域电能质量评估; 熵权法; 状态变权; 双轨制 TOPSIS

Real time comprehensive evaluation method of power quality based on state entropy and dual track TOPSIS

HU Runze¹, LÜ Shixuan¹, ZHANG Can¹, GENG Pulong¹, WEI Hong², ZHENG Lijun¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control (Taiyuan University of Technology), Taiyuan 030024, China; 2. College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: This paper proposes a comprehensive evaluation method and a global power quality evaluation system to achieve continuous and real-time evaluation of power quality. The entropy weight method is used to construct a comparison channel for the data information between each power quality indicator, ensuring the objectivity of the weighting. State variables are also constructed to dynamically adjust the weights of each point in the calculation unit, which enhances the time sequence weighting's dynamic characteristics and improves the weight resolution in the time domain. A dual-track TOPSIS evaluation method is proposed to open up TOPSIS calculation paths for both data and grades, ensuring the consistency of evaluation standards for each period. The method also merges data into grades to obtain a comprehensive evaluation of the power quality overall state based on the evaluation grade and a cause analysis of grade changes based on the state weight. Through case analysis, this evaluation method is verified to be effective for real-time evaluation and has generality.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 202103021224115).

Key words: real time evaluation; global power quality evaluation; entropy weight; variable weight; dual-track TOPSIS

0 引言

随着电网规模的不断扩大与新能源技术的发展, 各种非线性设备相继并网, 在提供更高用电效率、更多元能源转化方式的同时也影响着电网的电

能质量。另一方面, 随着信息化与智能化程度的提高, 各种传感、监测以及自动化控制设备对电能质量的要求也越来越高, 进一步加剧了解决电能质量问题的紧迫程度。在物联网大背景下, 离线电能质量评估已越来越难以适应当前的生产生活需要, 难以为电能质量的改善提供更为全面时效的决策支持^[1]。因此, 在面对不断提高的电网电能质量要求

基金项目: 山西省自然科学基金项目资助(202103021224115)

时, 为了让观测者直接快速地了解当前电能质量的状态, 及时发现电能质量状态恶化趋势, 同时为后续电能质量治理提供全面时效的指导, 构建一套科学全面的电能质量实时评估体系具有重要意义。

在研究电能质量的过程中, 电压偏差、频率偏差、三相不平衡、谐波含量和电压波动等指标是反映电能质量的重要因素, 但仅仅选取其中一个指标难以反映电能质量的整体状态^[2]。同时, 考虑到指标限值的单一化, 这种一刀切的模式将难以精确反映当前电能质量状态, 使得电能质量评估结果单一且不具备更多元化的区分度, 因此需要将多项指标综合考虑, 以提高电能质量评估的准确性。

目前电能质量综合评估主要包含主客观赋权分析法^[3-7]、物元分析法^[8-9]、模糊评价法^[10-13]和神经网络算法^[14-16]以及优劣解距离(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)法^[17-21]等。文献[3]中采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)+CRITIC 法(criteria importance though intercriteria correlation)的方式对指标进行主客观组合赋权并以权重与指标数值的乘积作为评估结果, 其在区分指标时兼顾评估者的主观性与数据的客观性, 但此方法对指标状态的变化欠考虑, 导致计算单元内各点权重均为常数, 存在动态权重缺失的问题。文献[11]采用可变模糊集方法通过相对隶属度函数将数据进行融合, 再利用集对分析法构造评估模型, 但仍存在评价者主观偏好对指标赋权以及隶属度关系选择的影响。文献[14]采用模糊神经网络构建综合评估模型, 虽然使得评估具有更高的自适应性, 但需要大量的数据以及训练次数支持, 评估的时效性不强, 难以满足长时间序列的电能质量实时评估要求。文献[17]中采用纳入等级限值的 TOPSIS 进行综合评估, 一定程度上弥补了 TOPSIS 组内比较的缺陷, 能较好地给出多指标融合的分级评估结果, 但也破坏了数据间的相对关系, 同时将等级与数据进行杂糅使得评估方法不具备普适性, 使得不同组计算单元的计算结果不具备可比性, 难以以为时间序列数据的实时分段评估提供统一的评估标准。由此可见, 当前的评估方法难以同时满足实时评估所需的评估结果时效准确、评估标准普适客观以及动态评估响应快速^[22]等要求。

针对上述问题, 本文提出结合状态熵权与双轨制 TOPSIS 的实时评估方法。首先, 将实时采集的时段数据作为计算单元, 利用熵权法计算指标间的差异性权重^[23], 并引入皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)作为指标间相关性补充, 对整个计算单元的指标进行常数赋予; 后引入状态变权

思维^[24], 以指标等级状态作为变元构造变权因子, 解决常数难以有效区分计算单元内各时刻点间指标权重的问题, 在常数的基础上对各时刻点的权重进行动态补充, 在保证赋权客观性的基础上提高了权重在时域下动态响应的快速性。之后, 双轨制 TOPSIS 综合评估方法将数据与等级分离, 分别开辟数据与等级的 TOPSIS 计算路径, 实时判断两者贴合度, 完成数据向等级的并轨, 实现综合评估。

1 多指标电能质量综合评估体系

1.1 电能质量指标

电能质量是指电力系统向外输送的电能的品质, 宏观上其包含电压质量、频率质量以及波形质量三个方面。在对电能质量进行评估时, 通常考虑以下电能质量指标:

1) 衡量系统运行过程中电压偏离额定值程度的电压偏差, 其表现为实际电压有效值与电压额定值之差同电压额定值之比的百分数。

2) 衡量系统运行过程中频率偏离额定值程度的频率偏差, 其表现为实际频率与额定频率的差值。

3) 衡量由于非对称负载的作用而导致的三相幅值不一致的三相不平衡程度, 其表现为负序均方根值与正序均方根值之比的百分数。

4) 衡量由于非线性负荷向系统注入不同于基波频率的谐波成分而导致整体波形畸变程度的谐波含量, 其表现为谐波有效值的方和根与基波有效值之比的百分数。

5) 衡量由于冲击性或间歇性负荷引起的电压均方根值曲线快速变动程度的电压波动, 其表现为电压半波有效值曲线上的极差与额定电压比值的百分数。

1.2 电能质量评估体系

针对单一指标评估, 考虑到指标限值的单一化, 这种一刀切的模式将难以精确反映当前各电能质量指标的具体状态, 使得指标评估结果不具备更多层次的区分度。因此, 为综合考虑指标评估的区分度与有效性, 本文根据国家相关标准将各指标按照单一指标等级限值划分为 5 个等级, 并以此为依据对电能质量各指标进行分级评估, 即优质(1 级)、一般(2 级)、不良(3 级)、差(4 级)、极差(5 级)。分级情况如表 1 所示。

电能质量作为一个多指标共同作用下的概念, 在对其进行评估时, 单独考虑其中某一个指标的优劣程度将会使得评估结果片面且带有观测者的主观性, 难以客观全面地反映电能质量的整体状态。因此, 在对单一指标进行分级评估的基础上, 考虑不

表 1 电能质量指标分级

Table 1 Grading of power quality indexes

指标类型	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
电压偏差/%	≤2.8	≤5.6	≤9.8	≤12.6	>12.6
频率偏差/Hz	≤0.08	≤0.16	≤0.28	≤0.36	>0.36
三相不平衡/%	≤0.8	≤1.6	≤2.8	≤3.6	>3.6
谐波含量/%	≤1.6	≤3.2	≤5.6	≤7.2	>7.2
电压波动/%	≤1.6	≤3.2	≤6	≤7.2	>7.2

同指标对于电能质量整体状态影响程度的不同,综合指标间的差异性与相关性,本文提出先根据指标影响程度的不同对各指标进行赋权,后将带权指标进行综合分级评估的方式,从而得到具备整体性反映能力的电能质量综合评估结果。此外,指标权重不仅用于综合评估的计算,其还将作为整体性综合评估结果的补充,使得评估不仅能够从电能质量整体状态上给出评估结果,还能明确造成整体状态变化的主要成因。多指标电能质量评估流程图如图 1 所示。

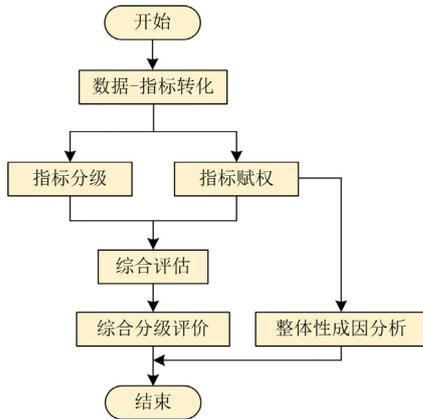


图 1 多指标电能质量评估流程图

Fig. 1 Flow chart of multi index power quality evaluation

2 基于状态熵权法和双轨制 TOPSIS 的电能质量综合评估模型

2.1 基于熵权法的指标权重求取

对于多指标的电能质量评估,不同指标对于电能质量整体状态的影响程度不同,为了建立多指标评估的横向比较关系来区分指标,本文采用以信息熵为理论基础的熵权法进行指标赋权,将信息从数据中具象化,使得原本不具备可比性的指标数据能够在信息量这一标准下进行比较,从而达到对指标影响程度的区分。由于权重的计算均源于实际采集的客观数据,保证了赋权的客观性。

1) 输入数据标准化

针对一个有 m 个指标与 n 组数据的评估体系,

其原始数据构成的矩阵如式(1)所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (1)$$

式中, x_{ij} 表示第 i 时刻下第 j 个指标数据。

由于各指标间存在数据量级与量纲差异,为了使得各项指标在评估过程中处于同一个衡量标准下,需要将数据进行标准化,抹去不同指标间量纲以及数量级上的差异。

由于电能质量指标数据存在负数的可能性,而评估主要考究数据之间的无方向性的相对大小关系,因此以每个指标下数据组内最大最小值之差作为标准化分母,考究数据组内区间分布情况,即

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j \{x_{ij}\}}{\max_j \{x_{ij}\} - \min_j \{x_{ij}\}} \quad (2)$$

式中, z_{ij} 表示第 i 时刻下第 j 个指标标准化数据。

由此得到标准化矩阵为

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (3)$$

2) 指标数据比重计算

考虑到信息熵计算考究的是数据的无序程度,即离散程度。本文将熵值计算的输入数据处理为考究数据频次的概率形式,以抹去数值大小对整体数据离散程度判断的影响,即将一组数据的最大最小值之差作为区间,均分成 k 份,以每个区间存在数据的概率作为熵值计算的输入,即

$$p_{ij} = \frac{t_{ij}}{n} \quad (4)$$

式中: p_{ij} 为数据点落在第 i 个区间下第 j 个指标的频次概率; t_{ij} 为第 j 个指标的 n 个数据中落在第 i 个区间里的个数,约束条件为

$$1 \leq j \leq m, 1 \leq i \leq k, 0 \leq t \leq n, \sum_{i=1}^k p_{ij} = 1$$

由此得到概率输入矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{k1} & p_{k2} & \cdots & p_{km} \end{bmatrix}_{k \times m} \quad (5)$$

3) 信息熵计算

不确定程度的公式为

$$I_{ij} = \ln \left(\frac{1}{p_{ij}} \right) = -\ln(p_{ij}) \quad (6)$$

式中: I_{ij} 为不确定程度, 或消除不确定还需要的信息量, 其与所能够提供的信息量为互补关系; p_{ij} 为某个情况的概率, 即数据点落在第 i 个区间内的概率。

在同一指标下求取不确定程度的期望即为信息熵, 其表征该指标下这组数据的概率分布所带来的不确定程度, 即

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^k (p_{ij} \times I_{ij})}{\ln(k)} \quad (7)$$

式中, E_j 为第 j 个指标的熵值。

考虑到 $p_{ij} = 0$ 的情况, 由于 $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} \frac{p_{ij}}{-\ln(p_{ij})} = 0$,

因此 $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} (p_{ij} \times I_{ij}) = 0$ 。

4) 权重计算

由于熵值 E_j 是不确定程度的期望, 即消除不确定所需信息量的期望, 其数值与其能提供的信息量的期望互补, 因此信息量的期望 D_j 为

$$D_j = 1 - E_j \quad (8)$$

传统熵权法根据 D_j 的大小来进行指标权重 w_j 的赋予, 即

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^m D_j} \quad (9)$$

考虑到熵值 E_j 为 1 时, 信息量期望 D_j 为 0, 此时归一化后的赋权计算式(9)将使得指标权重为 0, 变相抹除了指标, 使得指标未能有效参与后续综合评估。

此外, 各指标熵值 E_j 均趋于 1 时, 信息量期望 D_j 将均趋于 0, 权重的计算式(9)中分子分母也将趋于 0, 这代表微小的熵值差异也会带来急剧倍增的权重差异, 导致在信息量层面出现指标权重区分度随熵值 E_j 分布的改变而发生大幅度变动, 难以统一不同数据分布的权重标准, 使得不同组数据间的权重不具备可比性。

因此, 采用将信息量期望等距平移的方式, 避免倍增与零权的情况, 即

$$w_j = \frac{D_j + \alpha}{\sum_{j=1}^m (D_j + \alpha)} \quad (10)$$

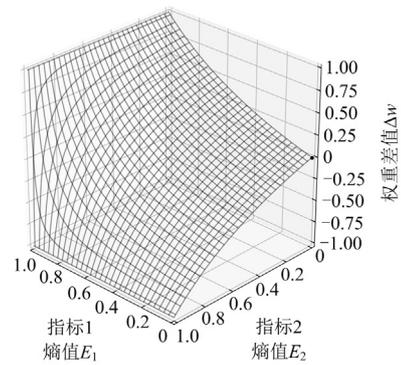
式中, α 为各指标信息量期望 D_j 的零点平移量, 表示指标信息量期望相对于信息量期望零点的距离, 用于修正熵权法的常权分辨率。

为具象化该方式的作用效果, 以指标间权重差值作为判断依据, 构造权重区分度的衡量计算式, 如式(11)所示, 以指标熵值 E_j 和区分度 Δw 构成的函数图像展现对比优化结果, 即

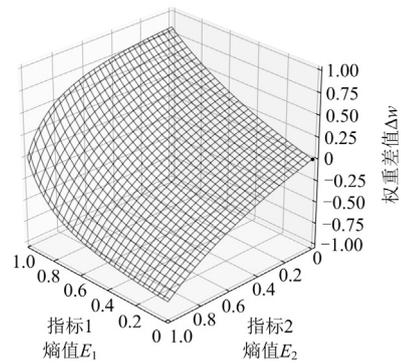
$$\Delta w = \frac{D_1 - D_2}{\sum_{j=1}^m (D_j + \alpha)} = \frac{E_2 - E_1}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j + \alpha)} \quad (11)$$

式中, Δw 为指标 1 与指标 2 的权重差值。函数图像如图 2、图 3 所示。

图 2 是两指标情况下, 平移前后 Δw 的函数图像。当指标熵值 E_j 接近于 1 时, 图 2(a)中平移前的 Δw 函数曲线呈现急剧上升的现象, 说明边缘区域 Δw 的变化率远高于中心区域, 指标间的权重差异正因微小的熵值变化而被急剧拉大; 而图 2(b)中平移后的 Δw 曲线则显得更为柔和, 说明整段函数具有相似的区分度变化率, 指标间的权重差异随熵值的变化更为平缓连续。



(a) 平移前



(b) 平移后

图 2 两指标权重差平移前后对比

Fig. 2 Comparison of weight difference between two indexes before and after translation

图 3 是三指标情况下, 平移前后 Δw 的函数图像。当指标熵值 E_j 接近于 1 时, 图 3(a)中平移前的 Δw 函数呈现出边缘颜色急剧加深的现象, 说明此

时边缘区域 Δw 的变化率远高于中心区域，指标间的权重差异正因微小的熵值变化而被急剧拉大；而图 3(b)中平移后的 Δw 颜色变化则更为柔和，说明各方向上区分度变化率更为相似，指标间的权重差异随熵值的变化更为平缓连续。

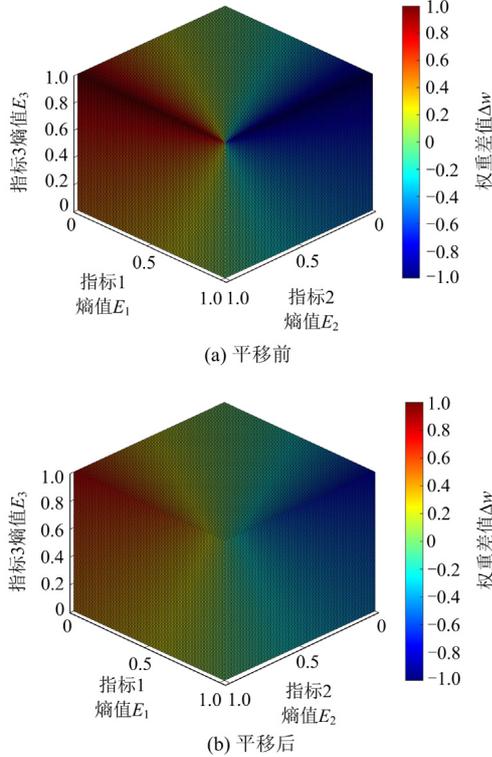


图 3 三指标权重差平移前后对比

Fig. 3 Comparison of weight difference of three indexes before and after translation

由此可以看出，等距平移的方式不仅规避了权重为 0 的情况，还解决了熵值边缘区域相较于其他中心区域的权重区分度随熵值变化而过度倍增的问题。在保障各指标均能参与评估的同时，还为后续多时段不同分布的数据组提供了相似的区分尺度，增强了时段间权重的可比性。

5) 相关性考究

考虑到指标间既存在差异性也存在相关性，为进一步强化指标横向比较，综合考究指标间的差异性与相关性，本文采用 Pearson 相关系数作为相关性的补充，即

$$\xi_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

式中： ξ_{ij} 表示指标 i 与指标 j 的相关系数； x_t 表示数据量为 n 的时段数据中指标 i 的第 t 个标准化数

据； y_t 表示数据量为 n 的时段数据中指标 j 的第 t 个标准化数据； \bar{x} 、 \bar{y} 分别表示数据量为 n 的时段数据中指标 i 和 j 的标准化数据平均值。

根据 Pearson 相关系数得到各指标的冲突强度，即

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} (1 - \xi_{ij})}{m-1} \quad (13)$$

式中， I_j 为第 j 项指标的冲突强度。

由此得到的指标权重为

$$w_j = \frac{I_j(D_j + \alpha)}{\sum_{j=1}^m (I_j(D_j + \alpha))} \quad (14)$$

式(14)以冲突强度 I_j 作为熵权权重修正系数，

削弱高相关性指标间的权重差异，增强低相关性指标间的权重差异，在熵权法的基础上进一步增加了指标间的区分度，使得指标权重分配兼顾指标间的差异性与相关性。

2.2 基于变权理论的状态变权

在实时评估过程中，当指标权重较小的指标短时间内出现急剧恶化的情况时，其重要程度相较于其他未发生恶化的指标而言更为重要，但熵权法所赋予的常权仅能够区分各时段间的指标，无法将计算单元内各时刻点权重进行区分，而指标权重应该根据指标状态的改变而发生相应的变化，使得各时刻点权重数据具备良好的动态响应。

根据变权理论，采用文献[25]所提及的状态变权规则构造映射：

$$S: [0,1]^m \rightarrow [0,1]^m \quad X \mapsto \mathbf{S}(X) = (S_1(x), S_2(x), \dots, S_m(x))$$

其中， $\mathbf{S}(X)$ 为一个 m 维状态变权向量。

考虑到状态量需要与单一指标等级建立联系，但等级数值是固定距离散点，为满足状态变权的公理化定义，则需要采用数据点作为变元。此外，考虑到各指标数据本身不带有等级性质，且数据分布与等级分布可能会出现不一致的情况，因此，需要用到等级建立的约束方程来对数据点进行约束，即将指标数据作为变元，并利用等级限值将其进行分级约束，得到状态变权因子，即

$$S(x) = e^{\beta(L(x)-1)} \quad (15)$$

式中， $S(x)$ 为指标数据 x 的状态变权因子； β 为指标变权因子增益系数，其用于调节计算时段内各常权点的状态变权强度，从而优化各时刻点权重的动态响应特性。 β 过小会导致其对常权点的状态变权作用不明显，进而影响时序数据点的动态响应；而

过大则会使得赋权变成各时刻点指标数据数值大小主导的权重分配, 从而导致状态变权的效果掩盖熵权法的效果。因此, β 的设计一方面需要考虑变权因子的状态划分带来的整体强度变化, 另一方面又需要考虑熵权法的常权分辨率。

约束函数为

$$L(x) = \begin{cases} L_i \times \frac{(x-x_i)}{(x_{i-1}-x_i)} + L_{i+1} \times \frac{(x-x_{i-1})}{(x_i-x_{i-1})} & x \in [x_{i-1}, x_i) \\ L_5 & x \in [x_4, +\infty) \end{cases} \quad (16)$$

式中: x 为 3 s 数据间隔瞬时指标数据; L_i 为第 i 个等级下的等级系数; x_i 为第 i 个等级的等级限值; 其中 $i \in [1, 4]$, 具体数值请参考表 1, 特殊地 $x_0 = 0$ 。

对常权向量 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 采用 Hadamard 乘积:

$$\mathbf{W}(X) = \frac{\mathbf{W} \times \mathbf{S}(X)}{\sum_{j=1}^m w_j \times S_j(x)} \quad (17)$$

此时, 满足三条公理定义, 当扩展至多组数据点时得到的变权权重为

$$w_{ij} = \frac{I_j(D_j + \alpha)e^{\beta(L_j - 1)}}{\sum_{j=1}^m (I_j(D_j + \alpha)e^{\beta(L_j - 1)})} \quad (18)$$

式中, w_{ij} 为第 i 时刻第 j 个指标的权重。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & w_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (19)$$

此时, 同一指标下 n 个时刻数据点的权重不再相同, 而是在原有相同的熵权法权重的基础上乘上自身的等级变权系数, 补足了指标数据动态权重, 增强了各指标时域下的权重分辨率与动态响应, 使得权重结果能更准确、快速地反映指标间的差异。

2.3 基于双轨制 TOPSIS 的综合评估

为满足电能质量综合实时评估的时效性与普适性, 综合多指标得出电能质量整体性状态, 本文提出双轨制 TOPSIS, 在保证各项指标均基于时序权重有效参与综合评估的基础上, 形成针对不同时段都具有相同评估标准的普适性评估方法。双轨制 TOPSIS 本身不仅引入了等级限值, 还实现了数据与等级双轨道计算, 在解决传统 TOPSIS 组内比较问题的基础上, 进一步削弱了评估标准对于数据的依赖, 不仅使得各时段内数据点保有良好的区分度, 还使得各时段间数据点具有可比性, 实现时域上的统一。

1) 正负理想解距

首先求解数据理想解距, 将其作为数据处理的输入, 相当于将数据组进行同等水平的升降, 在完成距离计算的同时保证数据组相对关系的完整性。

(1) 数据部分

设有 m 项指标 n 组数据, 按照数据时间顺序排列构成的数据矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (20)$$

计算数据与正负理想解距离分别为

$$P_{D_{ij}} = \max\{L\} - |x_{ij}| = l_{qj} - |x_{ij}| \quad (21)$$

$$N_{D_{ij}} = |x_{ij}| - \min\{L\} = |x_{ij}| - l_{1j} \quad (22)$$

式中: $P_{D_{ij}}$ 为第 i 时刻、第 j 项指标的数据正理想解距离; $N_{D_{ij}}$ 为第 i 时刻、第 j 项指标的数据负理想解距离; $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, l_{1j} = 0, l_{qj}$ 为对应第 j 项指标的最大等级限值。

得到数据正负理想解的距离矩阵分别为

$$\mathbf{P}_D = \begin{bmatrix} P_{D_{11}} & P_{D_{12}} & \dots & P_{D_{1m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{D_{n1}} & P_{D_{n2}} & \dots & P_{D_{nm}} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (23)$$

$$\mathbf{N}_D = \begin{bmatrix} N_{D_{11}} & N_{D_{12}} & \dots & N_{D_{1m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ N_{D_{n1}} & N_{D_{n2}} & \dots & N_{D_{nm}} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (24)$$

(2) 等级部分

设有 m 项指标 q 组等级限值, 按照等级限值从小到大排列构成的等级矩阵为

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{q1} & L_{q2} & \dots & L_{qm} \end{bmatrix}_{q \times m} \quad (25)$$

计算各等级限值与正负理想解的距离分别为

$$P_{L_{ij}} = \max\{L\} - |l_{ij}| = l_{qj} - |l_{ij}| \quad (26)$$

$$N_{L_{ij}} = |l_{ij}| - \min\{L\} = |l_{ij}| - l_{1j} \quad (27)$$

式中: $P_{L_{ij}}$ 为第 i 时刻、第 j 项指标的等级限值正理想解距离; $N_{L_{ij}}$ 为第 i 时刻、第 j 项指标的等级限值负理想解距离; $1 \leq i \leq q, 1 \leq j \leq m, l_{1j} = 0, l_{qj}$ 为对应第 j 项指标的最大等级限值。

得到等级正负理想解的距离矩阵分别为

$$P_L = \begin{bmatrix} P_{L_{11}} & P_{L_{12}} & \cdots & P_{L_{1m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{L_{q1}} & P_{L_{q2}} & \cdots & P_{L_{qm}} \end{bmatrix}_{q \times m} \quad (28)$$

$$N_L = \begin{bmatrix} N_{L_{11}} & N_{L_{12}} & \cdots & N_{L_{1m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ N_{L_{q1}} & N_{L_{q2}} & \cdots & N_{L_{qm}} \end{bmatrix}_{q \times m} \quad (29)$$

2) 解距标准化

由于指标间存在量纲和数量级上的差异, 为了使其在综合评估的过程中拥有相同的表现力, 需要进行标准化处理。

(1) 数据部分

考虑到正负理想解距离需要在同一个体系下比较相对大小, 因此在标准化过程中将两者作为一个体系下的数据进行标准化, 即

$$P_{DS_j} = \frac{P_{D_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{D_{ij}}^2 + N_{D_{ij}}^2)}} \quad (30)$$

$$N_{DS_j} = \frac{N_{D_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{D_{ij}}^2 + N_{D_{ij}}^2)}} \quad (31)$$

式中: P_{DS_j} 为第 j 项评估指标、第 i 时刻数据的正理想解距离标准化数据; N_{DS_j} 为第 j 项评估指标、第 i 时刻数据的负理想解距离标准化数据。

得到标准化数据矩阵分别为

$$P_{DS} = \begin{bmatrix} P_{DS_{11}} & P_{DS_{12}} & \cdots & P_{DS_{1m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{DS_{n1}} & P_{DS_{n2}} & \cdots & P_{DS_{nm}} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (32)$$

$$N_{DS} = \begin{bmatrix} N_{DS_{11}} & N_{DS_{12}} & \cdots & N_{DS_{1m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ N_{DS_{n1}} & N_{DS_{n2}} & \cdots & N_{DS_{nm}} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (33)$$

(2) 等级部分

$$P_{LS_j} = \frac{P_{L_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^q (P_{L_{ij}}^2 + N_{L_{ij}}^2)}} \quad (34)$$

$$N_{LS_j} = \frac{N_{L_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^q (P_{L_{ij}}^2 + N_{L_{ij}}^2)}} \quad (35)$$

式中: P_{LS_j} 为第 j 项评估指标、第 i 个等级限值的正理想解距离标准化数据; N_{LS_j} 为第 j 项评估指标、第 i 个等级限值的负理想解距离标准化数据。

得到标准化等级矩阵分别为

$$P_{LS} = \begin{bmatrix} P_{LS_{11}} & P_{LS_{12}} & \cdots & P_{LS_{1m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{LS_{q1}} & P_{LS_{q2}} & \cdots & P_{LS_{qm}} \end{bmatrix}_{q \times m} \quad (36)$$

$$N_{LS} = \begin{bmatrix} N_{LS_{11}} & N_{LS_{12}} & \cdots & N_{LS_{1m}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ N_{LS_{q1}} & N_{LS_{q2}} & \cdots & N_{LS_{qm}} \end{bmatrix}_{q \times m} \quad (37)$$

3) 带权欧氏距离

采用欧氏距离将各项指标的正负理想解距离进行带权综合, 得到正负理想解综合距离。

(1) 数据部分

考虑到指标间相对重要程度不同, 求解正负理想解时, 需要将多指标乘上各自权重, 即

$$P_{DW_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_{DS_{ij}} \times w_{ij})^2} \quad (38)$$

$$N_{DW_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (N_{DS_{ij}} \times w_{ij})^2} \quad (39)$$

式中: P_{DW_i} 为第 i 时刻数据的正理想解综合距离; N_{DW_i} 为第 i 时刻数据的负理想解综合距离。

得到各个数据点的正负理想解综合距离分别为

$$P_{DW} = \begin{bmatrix} P_{DW_1} \\ P_{DW_2} \\ \vdots \\ P_{DW_n} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$N_{DW} = \begin{bmatrix} N_{DW_1} \\ N_{DW_2} \\ \vdots \\ N_{DW_n} \end{bmatrix} \quad (41)$$

(2) 等级部分

$$P_{LW_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_{LS_{ij}} \times w_{ij})^2} \quad (42)$$

$$N_{LW_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (N_{LS_{ij}} \times w_{ij})^2} \quad (43)$$

式中: P_{LW_i} 为第 i 个等级限值的正理想解综合距离; N_{LW_i} 为第 i 个等级限值的负理想解综合距离。

得到各个等级限值的正负理想解综合距离分别为

$$P_{LW} = \begin{bmatrix} P_{LW_1} \\ P_{LW_2} \\ \vdots \\ P_{LW_q} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$N_{LW} = \begin{bmatrix} N_{LW_1} \\ N_{LW_2} \\ \vdots \\ N_{LW_q} \end{bmatrix} \quad (45)$$

4) 贴合度计算

采用负理想解综合距离进行数据与等级的组内优劣程度评分。

(1) 数据部分

$$S_{D_i} = \frac{N_{DW_i}}{P_{DW_i} + N_{DW_i}} \quad (46)$$

$$S_D = \begin{bmatrix} S_{D_1} \\ S_{D_2} \\ \vdots \\ S_{D_n} \end{bmatrix} \quad (47)$$

式中: S_D 为 n 个时刻数据的组内优劣程度评分矩阵; S_{D_i} 为第 i 时刻数据的组内优劣程度评分。

(2) 等级部分

$$S_{L_i} = \frac{N_{LW_i}}{P_{LW_i} + N_{LW_i}} \quad (48)$$

$$S_L = \begin{bmatrix} S_{L_1} \\ S_{L_2} \\ \vdots \\ S_{L_q} \end{bmatrix} \quad (49)$$

式中: S_L 为 q 个等级限值的组内优劣程度评分矩阵; S_{L_i} 为第 i 个等级限值的组内优劣程度评分。

5) 数据并轨

由于数据与等级限值采用同组正负理想指标数值, 且综合评估的流程一致, 因此可并轨两者再综合评估结果, 即以等级限值组所计算的评估结果作为综合评估等级标准限值, 将数据组计算的结果与其进行贴合度计算来得到综合评估等级, 即

$$L_{C_i} = \begin{cases} 1 & S_{D_i} < S_{L_2} \\ \vdots & \vdots \\ q-1 & S_{D_i} \leq S_{L_q} \end{cases} \quad (50)$$

式中, L_{C_i} 为第 i 时刻的综合评估等级。

2.4 电能质量实时综合评估模型

电能质量实时综合评估模型如图 4 所示, 具体实现方式如下所述。

1) 利用熵权法对数据进行信息化处理, 建立不同指标间共同的信息量通道, 解决不同指标间难以通过数值比较进行指标重要程度区分的问题, 有效地区分各指标对电能质量影响程度的差异。采用状态变权的方法, 将指标数据相对于指标限值的约束

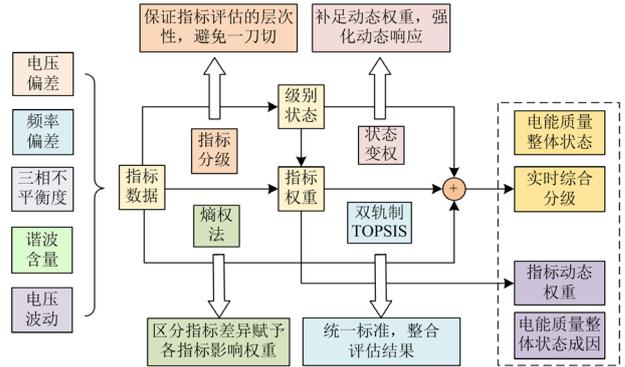


图 4 电能质量综合评估模型

Fig. 4 Comprehensive evaluation model of power quality

等级作为状态变元构建变权因子, 形成动态权重, 使得指标权重变化更为实时准确, 为时序数据下指标权重的动态变化提供较强的时效性。

2) 采用数据与等级分离的双轨制 TOPSIS 评估方法, 避免了数据与等级杂糅, 充分发挥 TOPSIS 顾及多指标、保证评估层次性的能力, 对电能质量进行多指标分级综合评估。削弱了评估标准对于数据的依赖, 使得综合分级评估方法更具有普适性, 为时间序列电能质量分析提供一套统一评估流程。等级贴合度与数据贴合度的合并则解决了传统 TOPSIS 仅能组内比较的问题, 使得评估依附于指标状态本身, 结果更为精确且层级分明。

3) 结合多指标综合评估以及指标动态赋权构建全域电能质量评估体系, 先根据指标影响程度的不同对各指标进行动态赋权, 后将带权指标进行综合分级评估。以综合分级评估结果为整体性状态判断, 考究电能质量整体状态; 以局部各项指标的动态状态权重为参考, 考究电能质量劣化的具体成因。

3 算例分析

3.1 电能质量综合实时评估分析

对于实时数据测量, 不同指标具有不同的时间尺度。根据 IEC 标准, 电压波动的稳态判断建立时间为 1 s, 需要保证一定的观测时长, 而谐波、三相不平衡度以及电压偏差的最小刷新时间则为 10 个周波。因此, 为了将多个指标在同一时间尺度下显示, 以 3 s 作为最小刷新时间, 采用求取数据均方根的方式将各项指标进行时间聚合, 以此保证评估时各指标数据量一致。

对于连续分段评估, 熵权法的计算需要一定长度的时序数据, 在保证准确性的基础上, 还需要追求一定的时效性。因此, 选择 30 s 的数据量作为时段计算尺度, 当测量时间满 30 s 后, 进行实时评估

计算, 得到这 30 s 内 3 s 数据间隔的实时综合评估结果。连续计算数据时段, 得到以 3 s 为间隔的时序评估结果。

本文选取某风电场变电站内一 380 V 电压等级的监测点, 利用监测设备进行长时连续采集与实时评估, 并对某日内的数据进行存储提取, 得到 3 s

时间尺度的指标观测数据。

1) 单一主因对评估结果影响的验证

单一主因实测数据序列如表 2 所示, 权重变化及评估结果如图 5 所示。可以看出: 在 33 s 时刻, 电压偏差、三相不平衡度、谐波指标数值均出现上升, 其中谐波含量最为明显, 出现高达 6% 的谐波含量。

表 2 单一主因实测数据序列

Table 2 Single cause measured data sequence

时间/s	电压偏差/%	频率偏差/Hz	三相不平衡度/%	谐波含量/%	电压波动/%
3	0.244 81	-0.014 012	0.228 03	0.161 01	0.001
6	0.243 39	-0.013 930 4	0.228 13	0.169 25	0.001
9	0.244 46	-0.013 958 9	0.228 25	0.155 74	0.001
12	0.241 41	-0.013 920 4	0.229	0.167 64	0.001
15	0.243 58	-0.013 936 9	0.226 89	0.187 44	0.001
18	0.2429	-0.013 977 4	0.228 61	0.163 36	0.001
21	0.243 48	-0.013 993 4	0.228 54	0.152 41	0
24	0.246 65	-0.013 963	0.226 32	0.140 99	0
27	0.241 72	-0.013 953	0.228 41	0.210 54	0
30	0.243 22	-0.013 957 2	0.229 67	0.143 95	0
33	0.381 42	-0.012 330 3	0.512 79	2.500 52	-0.221 07
36	0.439 85	-0.013 970 2	0.630 93	6.008 37	0
39	0.436 98	-0.013 94	0.631 81	6.009 54	0
42	0.440 75	-0.013 963 8	0.629 25	6.008 8	0
45	0.439 65	-0.013 972 9	0.629 58	6.008 54	0
48	0.439 97	-0.013 981 1	0.629 34	6.007 15	0
51	0.438 15	-0.014 004 2	0.632 58	6.008 23	0.001
54	0.440 75	-0.013 971 5	0.631 41	6.007 38	0.001
57	0.439 58	-0.014 016 3	0.630 98	6.011 08	0.001
60	0.439 95	-0.014 001 3	0.628 64	6.008 32	0.001

由图 5(a)可以看出, 伴随着谐波含量的逐步上升, 谐波含量权重快速响应, 由 0.1 上升为 0.22, 直至 0.5, 成为影响电能质量劣化的主要成因。由图 5(b)可以看出, 综合评估等级相应发生变化, 由 1 级恶化为 2 级, 直至变为 3 级。

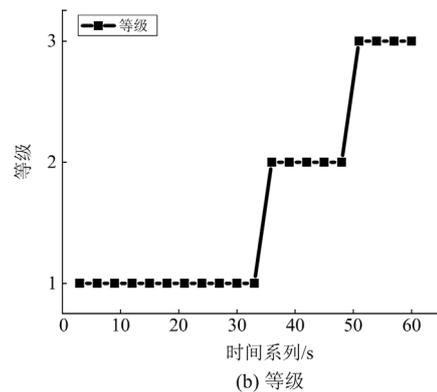
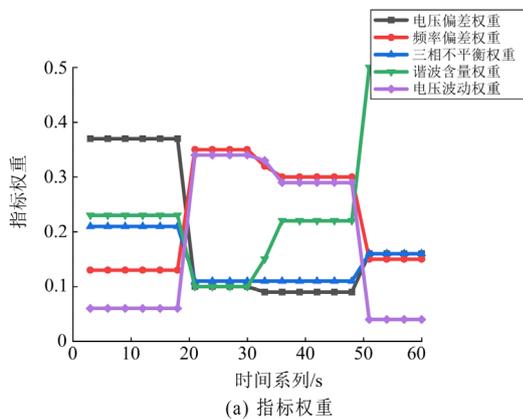


图 5 时间序列权重/等级图

Fig. 5 Time series weight/grade chart

2) 多因素对评估结果影响的验证

多因素实测数据序列如表 3 所示, 权重变化及评估结果如图 6 所示。可以看出: 在 30 s 时刻电压

出现负向偏差, 由原先+0.4%突变至-9.5%, 变化瞬时电压波动出现剧烈上升, 达到 10%。一段时间后, 达到新稳态, 电压波动恢复正常, 电压偏差维持在

-9.5%, 三相不平衡由原先的 0.6%上升至 3.6%, 谐波含量由原先的 6%进一步上升至 6.6%。

表 3 多因素实测数据序列

Table 3 Multi-factor measured data sequence

时间/s	电压偏差/%	频率偏差/Hz	三相不平衡度/%	谐波含量/%	电压波动/%
3	0.440 14	-0.013 944 3	0.629 34	6.007 63	0.001
6	0.440 73	-0.013 979 4	0.629 17	6.011 13	0.001
9	0.441 12	-0.013 957	0.630 45	6.009 38	0.001
12	0.4401	-0.013 820 5	0.630 76	6.009 96	0.001
15	0.437 89	-0.013 946 3	0.630 78	6.012 19	0.001
18	0.437 04	-0.013 977 8	0.630 22	6.009 59	0.001
21	0.441 68	-0.014 017	0.629 29	6.008 95	0
24	0.437 88	-0.013 949 8	0.628 46	6.010 23	0
27	0.438 43	-0.013 937 2	0.631 21	6.009 76	0
30	-7.916 36	-0.013 727 4	3.139 99	7.148 87	10.018 84
33	-9.577 06	-0.014 009 5	3.637 52	6.663 71	0
36	-9.579 45	-0.013 989	3.639 49	6.664	0
39	-9.577 59	-0.013 978 5	3.6394	6.663 39	0
42	-9.579 66	-0.014 010 3	3.6405	6.666 47	0
45	-9.579 83	-0.013 968 5	3.638 28	6.662 21	0
48	-9.577 79	-0.013 983 1	3.639 41	6.664 63	0
51	-9.575 99	-0.013 993 2	3.6387	6.663 06	0.001
54	-9.574 51	-0.013 925 9	3.639 33	6.664 54	0.001
57	-9.576 51	-0.013 972 1	3.638 12	6.6645	0.001
60	-9.577 12	-0.014 004 6	3.639 35	6.663 75	0.001

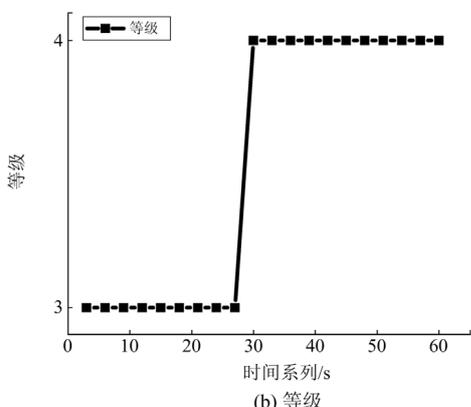
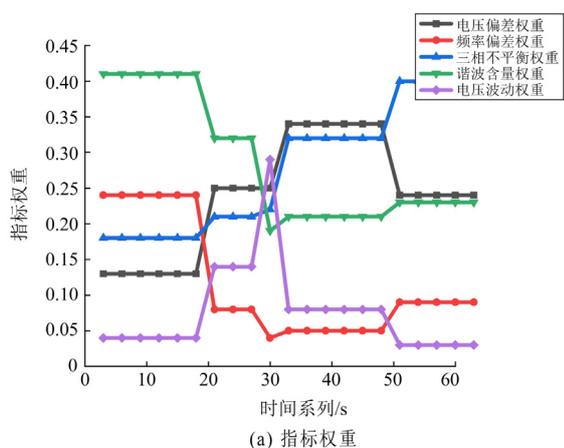


图 6 时间序列权重/等级图

Fig. 6 Time series weight/grade chart

在 30 s 时刻, 由表 3 可知, 电压出现负向偏差由原先+0.4%突变至-9.5%, 变化瞬时电压波动出现剧烈上升达到 10%, 由图 6(a)可知, 此时电压波动权重快速响应, 从 0.04 上升至 0.29 成为影响电能质量的主导因素, 由图 6(b)可知, 综合等级由 3 级上升至 4 级。在 30 s 至 48 s 时段内, 电压波动逐渐消散, 但电压偏差并未消除, 此时, 由图 6(a)可知, 电压偏差权重从原先的 0.13 逐步上升为 0.34, 接替电压波动成为影响当前电能质量的主要成因。而持续性的电压偏差间接影响着三相不平衡度指标使其权重由原先的 0.18 逐步上升为 0.32。此外, 由于电压波动的消散, 原先就存在的谐波问题再次促使谐波含量权重逐步上升至 0.21。在 48 s 之后, 由于电压波动的完全消散, 系统达到新稳态, 由图 6(a)可知, 此时电压的下降导致谐波含量占比进一步加剧, 而谐波含量又与电压偏差共同促使三相不平衡的加剧。最终, 三相不平衡权重进一步上升至 0.4、谐波含量上升至 0.23、电压偏差则下降至 0.24, 在达到新稳态后, 三个指标相对于其他两个指标权重增大, 成为电能质量恶化的主要指标, 综合等级维持在 4 级。

由上述两组评估结果可以看出, 此评估方法不仅能够有效反映当前电能质量整体状态, 还可以快速准确地分辨各时刻电能质量恶化的主要成因, 具

有较快的动态响应与准确性。

3.2 双轨制 TOPSIS 评估方法验证

采用两组样本数据进行原始 TOPSIS^[4]、引入等级的 TOPSIS^[17]与双轨制 TOPSIS 评估方法进行对比验证, 3 种方法的评估结果如图 7 所示。考虑到前置的赋权环节, 此处采用均权方式消除赋权方法的影响, 仅考究 3 种不同 TOPSIS 方法的对比。样本数据如表 4 所示, 表中括号内的数值为参考等级限值表得出的单一指标等级。表 4 中 1~10 组的时序数据覆盖单一指标等级各个区间, 11~20 组的时序数据仅维持在单一指标等级的某一至两个区间。

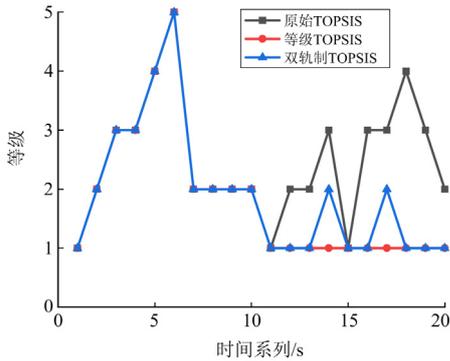


图 7 综合评估方法比较

Fig. 7 Comparison of comprehensive evaluation methods

表 4 验证数据序列

Table 4 Validation data sequence

序号	电压偏差/%	频率偏差/Hz	三相不平衡度/%	谐波含量/%	电压波动/%
1	0(1)	0(1)	0(1)	0(1)	0(1)
2	2.8(1)	0.08(1)	0.8(1)	1.6(1)	1.6(1)
3	5.6(2)	0.16(2)	1.6(2)	3.2(2)	3.2(2)
4	9.8(3)	0.28(3)	2.8(3)	5.6(3)	5.6(3)
5	5.6(4)	0.36(4)	3.6(4)	7.2(4)	7.2(4)
6	15.4(5)	0.44(5)	4.4(5)	8.8(5)	8.8(5)
7	1.8(1)	0.17(3)	1.8(3)	2.6(2)	3.6(3)
8	2.6(1)	0.06(1)	0.6(1)	3.2(2)	2.2(2)
9	5.4(2)	0.14(2)	1.4(2)	1.8(2)	1.8(2)
10	1.2(1)	0.12(2)	1.2(2)	1.4(1)	1.4(1)
11	0.02(1)	0.05(1)	0.18(1)	0.05(1)	0.02(1)
12	0.03(1)	0.07(1)	0.15(1)	0.67(1)	0.01(1)
13	0.01(1)	0.05(1)	0.22(1)	0.56(1)	0.15(1)
14	0.02(1)	0.20(3)	0.12(1)	0.75(1)	0.25(1)
15	0.01(1)	0.02(1)	0.30(1)	0.25(1)	0.18(1)
16	0.01(1)	0.05(1)	0.50(1)	0.18(1)	0.88(1)
17	0.05(1)	0.20(3)	0.40(1)	0.88(1)	0.19(1)
18	0.08(1)	0.07(1)	0.8(1)	0.88(1)	0.88(1)
19	0.04(1)	0.05(1)	0.5(1)	0.41(1)	0.27(1)
20	0.06(1)	0.01(1)	0.14(1)	0.17(1)	0.31(1)

由图 7 可以看出: 当时序数据覆盖单一指标等级各个区间时, 3 种方法的综合评估结果趋于一致。说明引入等级的 TOPSIS 和双轨制 TOPSIS 相较于原始 TOPSIS 而言, 判断数据间优劣程度的能力没有因为算法过程的变化而变化。

但是, 当时序数据仅维持在单一指标等级的某一至两个区间时, 在原始 TOPSIS 方法下, 均处于 1 级状态的指标数据通过组内比较的方式, 凭借着数值上微小的差异, 强行拉开了数据间的差距, 使其分散在各个综合等级之上, 致使综合评估等级甚至恶化到 4 级, 与实际情况存在较大误差。

引入等级限值的 TOPSIS 在一定程度上解决了原始 TOPSIS 组内比较的问题, 其综合评估结果均为 1 级, 较原始 TOPSIS 法更为准确。但针对表 4 中频率偏差已是 3 级的 4 和 7 两点, 却因为数据比较强度被等级“注水”, 致使评估标准发生变动, 无法将其分辨, 评估结果维持 1 级, 与实际情况存在误差。

双轨制 TOPSIS 综合前两种方法的优势, 解决组内比较问题并减少评估标准对于数据的依赖, 对其余各点进行综合评级至 1 级, 而且依靠数据和等级并轨计算的优势, 避免数据被等级杂糅, 提取到数据点差异, 对 4 和 7 两点数据综合评为 2 级, 评估结果更为准确。

4 结论

1) 利用熵权法数据-信息转化能力, 建立了指标间信息量关系, 从信息量层面解决了不同指标数值难以区分指标差异性的问题。将状态变权思维应用于熵权法中, 补足了常权方法中各时刻点动态权重的缺失, 大大提升了时域权重的分辨率与动态响应的速度, 解决了时域下常权响应慢、分辨率低的问题。

2) 提出了双轨制 TOPSIS 综合评估方法对电能质量进行综合分级评估, 在解决传统 TOPSIS 组内比较问题的基础上还削弱了评估标准相对于数据的依赖, 不仅使得各时段内数据点保有良好的区分度, 还使得各时段间数据点具有可比性, 实现时域上的统一。

3) 提出了全域电能质量评估体系, 考究电能质量在时域下的变化状态, 以实时综合评估结果作为等级判据, 以各项指标的动态权重作为成因解析, 从时间维度和指标维度丰富评估结果, 构建了一套时间序列电能质量综合评估体系。

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] 吕程. 电能质量综合评估方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- LÜ Cheng. Research on comprehensive evaluation method of power quality[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [3] 罗宁, 贺墨琳, 高华, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC 组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 86-96.
- LUO Ning, HE Molin, GAO Hua, et al. Comprehensive evaluation method for a distribution network based on improved AHP-CRITIC combination weighting and an extension evaluation model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 86-96.
- [4] 孙建梅, 陈璐. 基于组合赋权法的 TOPSIS 模型的电能质量综合评估[J]. 电气应用, 2020, 39(3): 20-25.
- SUN Jianmei, CHEN Lu. Comprehensive power quality evaluation of TOPSIS model based on combinatorial weighting method[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(3): 20-25.
- [5] 管春, 贺仁茜. 基于交叉熵赋权法的电能质量综合评估[J]. 电工技术, 2017(3): 1-4.
- [6] 董慧芬, 金晨阳, 史志波. IF-ANP 组合赋权的灰聚类飞机电能质量评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 49-55.
- DONG Huifen, JIN Chenyang, SHI Zhibo. Aircraft electrical power quality evaluation of grey clustering with IF-ANP combination weight[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(7): 49-55.
- [7] 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.
- [8] 孟婷. 基于可拓学物元理论的电能质量综合评估方法研究[J]. 机电信息, 2011(24): 232-235.
- [9] 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.
- [10] 石宜金, 谭贵生, 赵波, 等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 167-176.
- SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 167-176.
- [11] 刘荡荡. 基于云物元模型与可变模糊集的电能质量综合评估方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- LIU Dangdang. Research on comprehensive evaluation method of power quality based on cloud matter model and variable fuzzy set[D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [12] 林才华, 张逸, 邵振国, 等. 基于模糊 DEA 的长时间尺度电能质量综合评估[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1751-1761.
- LIN Caihua, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo, et al. Comprehensive evaluation of power quality on long-time scale based on fuzzy DEA[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1751-1761.
- [13] 禹洪波, 刘永波, 黄滔滔, 等. 基于可拓云模型与模糊贴近度的电能质量评估研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 23-29, 52.
- YU Hongbo, LIU Yongbo, HUANG Taotao, et al. Power quality evaluation based on extension cloud model and fuzzy proximity degree[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 23-29, 52.
- [14] 周林, 栗秋华, 刘华勇, 等. 用模糊神经网络模型评估电能质量[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 66-69.
- ZHOU Lin, LI Qiu-hua, LIU Huayong, et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neural network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 66-69.
- [15] 郑炜, 林瑞全, 王俊, 等. 基于 GAF 与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, 2021, 49(11): 97-104.
- ZHENG Wei, LIN Ruiquan, WANG Jun, et al. Power quality disturbance classification based on GAF and a convolutional neural network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 97-104.
- [16] 杨朝赞, 夏圣峰, 江南, 等. 基于相关性分析和长短时记忆网络的稳态电压质量指标预测[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 9-16.
- YANG Chaoyun, XIA Shengfeng, JIANG Nan, et al. Prediction of steady-state indices of voltage quality based on correlation analysis and long short-term memory network[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4): 9-16.
- [17] 赵洪山, 李静璇, 米增强, 等. 基于 CRITIC 和改进 Grey-TOPSIS 的电能质量分级评估方法[J]. 电力系统保护

- 与控制, 2022, 50(3): 1-8.
- ZHAO Hongshan, LI Jingxuan, MI Zengqiang, et al. Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 1-8.
- [18] 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.
- [19] 魏业文, 吴希韬, 聂俊波, 等. 基于博弈论-改进 TOPSIS 的电能质量综合评价[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 50-56.
- WEI Yewen, WU Xitao, NIE Junbo, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on BWM-CRITIC-TOPSIS method[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(16): 50-56.
- [20] 吕志鹏, 吴鸣, 宋振浩, 等. 电能质量 CRITIC-TOPSIS 综合评价方法[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(1): 137-144.
- LÜ Zhipeng, WU Ming, SONG Zhenhao, et al. Comprehensive evaluation of power quality on CRITIC-TOPSIS method[J]. Electric Machines and Control, 2022, 24(1): 137-144.
- [21] 李国欣, 李国庆, 朱堂宇, 等. 基于变权和改进优劣解距离法的电能质量综合评估[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 86-92.
- LI Guoxin, LI Guoqing, ZHU Tangyu, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on variable weight and improved distance method of superior and inferior solutions[J]. Smart Power, 2021, 49(7): 86-92.
- [22] 赵冬梅, 谢家康, 王闯, 等. 基于 Bagging 集成学习的电力系统暂态稳定在线评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 1-10.
- ZHAO Dongmei, XIE Jiakang, WANG Chuang, et al. On-line transient stability assessment of a power system based on Bagging ensemble learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 1-10.
- [23] 李昕, 刘洋, 谭冠岗. 融合相似性与差异性特征的电能质量综合评估方法研究[J]. 电工技术, 2022(23): 41-45, 50.
- LI Xin, LIU Yang, TAN Guangang. Research on power quality comprehensive assessment method based on similarity and difference features[J]. Electric Engineering, 2022(23): 41-45, 50.
- [24] 李志军, 李格格, 张家安, 等. 电能质量变权综合评估及多功能并网逆变器多目标优化[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 515-521.
- LI Zhijun, LI Gege, ZHANG Jiaan, et al. Power quality variable weight comprehensive evaluation and multiobjective optimization of multifunctional grid-connected inverter[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(11): 515-521.
- [25] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(IX)——均衡函数的构造与 Weber-Fechner 特性[J]. 模糊系统与数学, 1996, 10(3): 12-19.
- LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation(IX) ——structure of balance functions and Weber-Fechner's characteristics[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1996, 10(3): 12-19.

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-06-30

作者简介:

胡润泽(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量状态监测及评估; E-mail: 1220750582@qq.com

郑丽君(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子变压器。E-mail: bench621@163.com

(编辑 魏小丽)