

基于组合赋权和正态云模型的电能质量评价

高强伟¹, 嵇程程¹, 刘轶超¹, 岳洋²

(1. 国网天津市电力公司城东供电分公司, 天津 300250;

2. 国网天津市电力公司, 天津 300143)

摘要:为了准确评估系统电能质量状况,提出了一种基于组合赋权和正态云模型的电能质量综合评估方法。首先,从幅值质量、波形质量和频率质量3个维度构建了电能质量综合评估框架。其次,为克服传统层次分析法在权重确定中的主观性和模糊性方面的局限性,引入梯形模糊数进行改进以获取主观权重;同时,采用改进的CRITIC方法获取客观权重,该方法综合考虑了各评估指标的变异性、冲突性以及离散程度,并利用最小信息鉴别原理将主客观权重进行结合;最后,结合正态云模型,并依据既定的评价等级标准,对电能质量进行综合评估。通过实际算例分析并与其他评价方法进行对比,验证了所提方法的有效性和准确性。

关键词:电能质量;层次分析法;CRITIC法;最小信息鉴别原理;正态云模型

中图分类号:TM711 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26296

Power Quality Evaluation Based on Combinatorial Assignment and Normal Cloud Modelling

GAO Qiangwei¹, ZHUO Chengcheng¹, LIU Yichao¹, YUE Yang²

(1. Chengdong Power Supply Branch of State Grid Tianjin Electric Power Supply Company,

Tianjin 300250, China; 2. State Grid Tianjin Electric Power Supply Company,

Tianjin 300143, China)

Abstract: To accurately assess the power quality status of a system, a comprehensive power quality evaluation method based on a combined weighting approach and the normal cloud model was proposed. Initially, a comprehensive evaluation framework for power quality was established, encompassing three key dimensions: amplitude quality, waveform quality, and frequency quality. To address the subjectivity and ambiguity inherent in the traditional analytic hierarchy process for weight determination, an improved method utilizing trapezoidal fuzzy numbers was introduced to derive subjective weights. Concurrently, an enhanced (criteria importance through intercriteria correlation) CRITIC method was employed to calculate objective weights, which incorporates the variability, conflict, and dispersion of the evaluation indices. The integration of subjective and objective weights was then achieved through the principle of minimal information discrimination. Finally, the normal cloud model was applied to perform a comprehensive evaluation of power quality, based on predefined grading standards. The effectiveness and accuracy of the proposed method were validated through practical case studies, and comparisons with existing evaluation methods demonstrate its superior performance.

Key words: power quality; analytic hierarchy process (AHP); criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) method; minimum information discrimination principle; normal cloud model

随着新能源发电技术的迅速发展,分布式电源和冲击性负荷大量增加,电能质量问题日益严重。为了保证电网的安全和稳定运行,新能源发电的并网容量需满足电网电能质量的相关标准,从而提升其向电网输送的电量质量和数量;同时,还需要考虑不同时间尺度、空间分布以及负荷特性的变化。因此,构建一个客观、准确的电

能质量综合评价方法对于各方面的利益相关者都具有重要意义^[1]。

近年来,电能质量综合评估问题吸引了学术界的广泛关注。研究核心均在于如何将电能质量的多个单一指标进行合理的权重分配,并结合成一个多指标的综合问题进行分析。为了实现这一目标,学者们提出了多种方法,包括基于模

糊数学的方法^[2-3]、概率统计法^[4]、物元分析法^[5]、神经网络模型^[6]、随机森林模型^[7]、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[8-9]等。文献[10]考虑了电能质量分级界限值存在随机性和模糊性问题,通过引入云模型到物元分析理论中来改进物元结构,建立标准可拓云模型有助于得到满意的综合评估结果。文献[11]考虑引入理想解法来计算电能质量综合评估指标,通过构造正理想解和负理想解,计算评估对象与这两个解的欧氏距离,从而确定评估对象的优劣排序,克服了传统理想解法在距离计算时未能体现权重作用的不足,但样本量的有限性可能影响评估结果的适用性。文献[12]采用秩和比法进行评估,但可能会在秩次转化时丢失原始数据的部分信息,导致评估结果与原数据的排序差异程度无关。文献[13]考虑了AHP法的局限性以及对专家判断的模糊性和不确定性信息的挖掘不充足,评估指标所含信息量不全面,提出了一种基于区间直觉模糊层次的分析法和改进CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)法的评估配电网运行方案可行性的方法,最后基于最小鉴别信息原理融合主、客观权重向量,综合评估配电网规划运行方案的权重,为配电网规划方案评估提供新的思路。

综上所述,为了提高电能质量评估的准确性,提出了一种基于组合赋权和正态云模型相结合的电能质量评价方法。首先,针对传统AHP在权重分配中存在的主观性局限,采用梯形模糊数对AHP方法进行改进,提高权重确定的客观性;接着,引入绝对值和标准差系数对CRITIC法进行改进来形成客观权重,并通过最小鉴别信息原理将主、客观权重进行结合,从而确保了评估结果的全面性与准确性。其次,利用云模型在处理模糊性和随机性的优势,实现指标在定性与定量间的平滑转换,提高评估的适应性与鲁棒性。最后通过实际算例验证了该方法的准确性和有效性。

1 电能质量综合评估指标框架

电能质量是指电网企业向用户提供的交流电能电压、频率、波形等特性方面的优劣程度,反映了交流电能的适用性和可靠性。本文基于电能质量3要素(电压、频率和波形)得到量化低压配电网电能质量的6个评估指标,包括如下:

1)频率偏差 C_1 :作为电网运行稳定性的核心,频率偏差反映了发电和负荷动态平衡状态,过大的频率偏差可能导致设备保护动作或停运,严重时甚至可能引起大范围的电力故障。分布式发电接入后,频率的稳定性变得更加复杂。

2)电压偏差 C_2 :电压是所有电气设备运行的基础条件,偏差过大会导致设备效率降低或无法正常运行,因此电压偏差是电能质量评估的关键指标。

3)电压波动 C_3 和电压闪变 C_4 :电压波动反映长时间的电压变化趋势,电压闪变则用于评估短时间的快速波动。这两个指标不仅影响电力设备的运行效率,还直接影响用户的用电体验。

4)谐波电压 C_5 :谐波是分布式发电接入后常见的问题,其过高会导致设备发热、运行效率下降等不良后果。由于低压配电网中电气设备通常具有较高的功率密度,谐波问题对设备的长期稳定性具有较大影响。

5)三相电压不平衡 C_6 :三相不平衡是电网质量的关键指标,严重时会导致电动机等工业设备过热、振动加剧,甚至造成设备损坏。随着分布式发电源的接入,电压不平衡问题可能加剧,进而影响电网中设备的正常运行。

综上所述,本文选择的6个电能质量评估指标全面涵盖了电能质量的主要影响因素,并能够有效反映低压配电网在分布式发电接入后的电能质量状况。这些指标均符合国家相关标准(GB/T 12325和GB/T 14596),保证了评估方法的科学性和实用性。通过构建以这6个指标为核心的综合评估框架,能精确量化低压配电网电能质量的水平,适配分布式发电接入场景下的电能质量分析需求。图1所示为低压配电网电能质量评估框架。

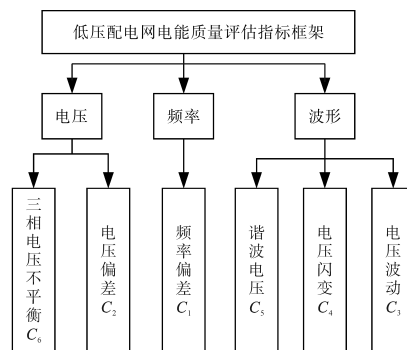


图1 低压配电网电能质量评估指标框架

Fig.1 Assessment framework for power quality in low-voltage distribution networks

2 电能质量各指标权重确定

主观赋权法主要依赖于决策者或领域专家的个人认知和知识判断,对评价指标进行定性或量化赋值。相较而言,客观赋权法基于原始数据的内在关联性,通过数学建模与定量分析确定指标权重。然而,单一运用这两种方法难以消解评价指标间的模糊性问题,且所得权重的代表性和实时适配性可能存在偏差。鉴于系统电能质量状态的非线性和复杂性,本文综合运用主观赋权法与客观赋权法的各自优势,对构建的电能质量评价指标框架进行主客观融合赋权,进而构建了电能质量综合评价的系统化流程,其具体步骤如图2所示。

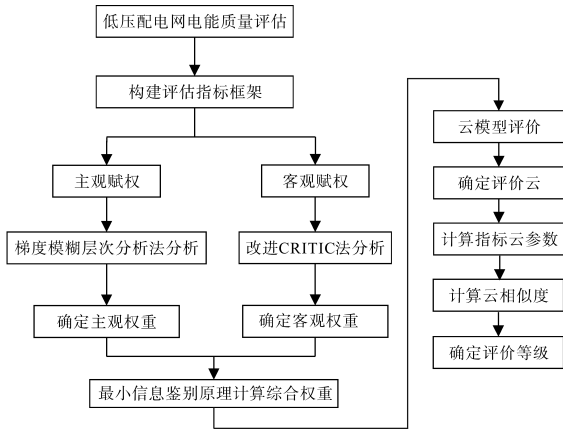


图2 电能质量评估流程

Fig.2 The evaluation process for power quality

2.1 基于梯形模糊层次分析法主观权重确定

AHP^[14]通过将复杂的决策问题分解为层次结构,结合定性与定量因素,广泛应用于社会、经济和科技领域。鉴于主观评估固有的局限性,将客观描述与模糊数相结合,形成了模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)。FAHP借助专家知识和数学手段,有效减少了主观偏差,提高了决策的客观性。梯形模糊数因其直观和易于操作的特性,在实际情况下更广泛使用。

设备状态评价是多指标综合评价的问题,涉及的部件和技术指标复杂多样。权重的合理设定和评价结果的准确性对于实现高效的状态检修至关重要。设备状态评价基于设备历史运行数据和在线检测结果,通过完善的评价系统得出结论。现代设备系统复杂多样,影响因素相互交织,难以通过简单的函数关系表达。因此,采用梯形模糊层次分析法(trapezoidal fuzzy analytic hi-

erarchy process, TF-AHP)可以将复杂的设备状态评价问题转化为更易操作的模型,通过计算权重,确保评价的科学性和全面性。

TF-AHP结合了定量分析和模糊数学理论,克服了传统AHP的局限性。通过引入梯形模糊数,TF-AHP能够更好地反映专家在实际情况中的不确定性。其步骤如下:

1)在梯形模糊层次分析法中,通过两两比较构建判断矩阵,矩阵中的标度使用梯形模糊数表示,如表1所示。

表1 梯形模糊数判断矩阵标度

Tab.1 Trapezoidal fuzzy hierarchical analysis judgement matrix

元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 重要性程度	梯形模糊数	梯形模糊数倒数
元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 同等重要	(1,1,1,1)	(1,1,1,1)
元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 稍微重要	(1,3/2,5/2,3)	(1/3,2/5,2/3,1)
元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较重要	(3,7/2,9/2,5)	(1/5,2/9,2/7,1/3)
元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 很重要	(5,11/2,13/2,7)	(1/7,2/13,2/11,1/5)
元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 特别重要	(7,15/2,17/2,9)	(1/9,2/17,2/15,1/7)

2)构建梯形模糊判断矩阵。现有*K*位专家进行打分评估(各专家同等重要),根据第*k*位专家的打分,梯形模糊判断矩阵 $R^{(k)}$ 为

$$R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)})_{n \times n} = (a_{ij}^{(k)}, b_{ij}^{(k)}, c_{ij}^{(k)}, d_{ij}^{(k)})_{n \times n} \quad (1)$$

其中,*k*的取值为1,2,⋯,*K*。

构建模糊综合判断矩阵 R 如下式所示:

$$R = (r_{ij})_{n \times n} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})_{n \times n} = \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K a_{ij}^{(k)}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_{ij}^{(k)}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c_{ij}^{(k)}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d_{ij}^{(k)} \right)_{n \times n} \quad (2)$$

3)一致性检验。首先将梯形模糊数经下式转化为实数,模糊综合判断矩阵 R 转化为实数映射矩阵 $X=(x_c)_{n \times n}$,计算公式为

$$x_c = \frac{a + b + c + d}{4} \quad (3)$$

由式(3)可以求出最大特征值 $\lambda_{\max}$,根据一致性指标*CI*计算公式进行验证:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中:*n*为评价指标数。

随机一致性指标 $RI_{(n)}$ 的取值如表2^[15]所示。

表2 $RI_{(n)}$ 取值表

Tab.2 Table of values for $RI_{(n)}$

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI_{(n)}$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

一致性比率*CR*计算公式如下式所示:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

当随机一致性比率 $CR \leq 0.1$ 时,判断矩阵通过一致

性检验,否则需要修改判断矩阵。

4)计算指标权重。各部件的模糊评价值的计算公式为^[16]

$$I(v_i) = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}, \sum_{j=1}^n b_{ij}, \sum_{j=1}^n c_{ij}, \sum_{j=1}^n d_{ij} \right) \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \right)^{-1} = \left[\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \right] \quad (6)$$

各指标的模糊评价期望为^[17]

$$\overline{I(v_i)} = \frac{1}{4} (a_i + b_i + c_i + d_i) \quad (7)$$

归一化处理,求得各指标的权重:

$$w_i = \frac{I(v_i)}{\sum_{i=1}^n I(v_i)} \quad (8)$$

式中: w_i 为第*i*个指标的权重。

2.2 基于改进 CRITIC 的客观权重确定

传统 CRITIC 法确定评价指标权重存在一些局限性,一是使用带量纲的标准差来衡量评价指标可能导致不同指标间数量级和量纲的差异无法得到准确反映;二是在确认评价指标冲突性方面运用 $\sum_{i=1}^n (r_{ij})$ 方法来衡量^[18]。因此,本文引入绝对值和标准差系数概念来改进 CRITIC 方法,其具体步骤如下:

1)建立规范评估矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: x_{nm} 为第*m*个方案的第*n*个指标的取值。

2)因为各个指标量纲不同,可能影响到评估结果的准确性,所以需要对指标进行标准化处理,标准化过程如下式所示:

$$x'_{ij} = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_j}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

其中, $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ 。

3)衡量方案间的对比度,通过计算指标的标准差 r_{ij} 来体现不同方案下相同指标间的数据波动

情况,计算公式为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

根据相关系数矩阵可以计算冲突性 c_j 为

$$c_j = \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|) \quad (13)$$

用标准差系数 s_j 来表示对比强度,计算公式如下:

$$s_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}} \quad (14)$$

4)确定指标之间的信息量 C_i :

$$C_i = \frac{\sigma_j}{\bar{x}} \sum_{i=1}^n (1 - |r_{ij}|) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

5)计算权重。由上述所求的数据可以得出第*i*个指标的客观权重 w_i , 计算公式如下式所示:

$$w_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^m C_j} \quad (16)$$

2.3 基于最小鉴别信息原理的组合权重确定

本文基于最小鉴别信息原理,结合主观权重和客观权重,建立一致性偏差最小化求解指标的综合权重,如下式所示:

$$\begin{cases} \min J(\omega) = \sum_{i=1}^n (\omega_i \ln \frac{\omega_i}{\alpha_i} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\beta_i}) \\ \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \end{cases} \quad (17)$$

求解主、客观权重一致性程度最优的准则层综合权重 ω_i :

$$\omega_i = \frac{\sqrt{\alpha_i \beta_i}}{\sum \sqrt{\alpha_i \beta_i}} \quad (18)$$

根据本文的方法同样求得准则层与方案层聚合的综合权重矩阵,从而建立两者之间的联系。

3 云模型

3.1 云模型理论

云模型是一种综合了模糊性和随机性的数学模型。广泛应用于处理不确定性问题。当云模型采用正态分布时,即为正态云模型,因数学特性而被广泛应用,本文将基于该模型进行深入分析。

云模型的核心是通过数值上的云滴来表征

知识,在电能质量评估模型中,通过一组参数(E_x, E_n, H_e)来描述电能质量等级。期望值 E_x 表示云滴中心位置,最能代表电能质量等级的点,熵 E_n 用来衡量概念的不确定程度和量化模糊性的强度,超熵 H_e 是衡量熵的变化速率,进一步反映分布的不确定性^[19]。

关于云模型参数的计算,在文献[10]中给出了一种双约束空间的计算公式:

$$E_x = \frac{c_{\max} + c_{\min}}{2} \quad (19)$$

$$E_n = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{6} \quad (20)$$

$$H_e = p \quad (21)$$

式中: $c_{\max}, c_{\min}$ 分别为等级上限、下限; p 为根据实际情况可自行调整的常数。

3.2 云模型步骤

正向云生成算法是指在已知云模型的参数(E_x, E_n, H_e),用来生成所需云滴的个数 n 和隶属度 u 的算法。其步骤^[20]如下:

- 1)以 E_x 为均值, H_e 为方差的正态分布,生成一个随机的熵值 E'_n ,记作 $E'_n=NORM(E_x, H_e)$ 。
- 2)以 E_x 为均值, E'_n 为方差的正态分布,生成一个数据点 x ,记作 $x=NORM(E_x, E'_n)$ 。
- 3)计算每个数据点的隶属度:

$$u = \exp \left[\frac{(x - E_x)^2}{2(E'_n)^2} \right]$$

- 4)将每个数据点 x 和其对应的 u 隶属度结合成一个云滴。

- 5)重复步骤1)~步骤4),直到产生 n 个云滴停止。

根据上述步骤,所有云滴组合生成云模型,提供了对概念的模糊和随机性质的数学表征,能够更准确地描述复杂和不确定的概念^[21]。

4 案例研究

为了验证本文所提方法的可行性与有效性,利用文献[22]中的数据进行算例分析。如表3所示为5个监测点的电能质量6个指标数据。

表3 监测点数据
Tab.3 Monitoring site data

监测点	频率偏差/Hz	电压偏差/%	电压波动/%	电压闪变/%	谐波电压/%	三相不平衡/%
1	0.09	2.53	0.96	0.22	1.12	0.88
2	0.04	1.66	1.05	0.34	1.26	1.07
3	0.19	3.85	1.41	0.47	1.18	0.83
4	0.11	2.01	0.85	0.38	0.82	0.58
5	0.07	3.18	1.27	0.53	1.35	1.23

4.1 评价指标权重的确定

4.1.1 评价指标的主观权重确定

根据梯形模糊层次分析法理论,首先通过邀请专家对评价指标进行两两比较,构建了梯形模糊数矩阵,如表4所示。

然后将梯形模糊数转化为实数,并对矩阵进行一致性检验。根据式(3),梯形模糊数映射矩阵 r 如下:

$$r = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 4 & 4 & 2 & 8 \\ 0.17 & 1 & 0.6 & 0.6 & 0.26 & 2 \\ 0.26 & 2 & 1 & 1 & 0.6 & 4 \\ 0.26 & 2 & 1 & 1 & 0.6 & 4 \\ 0.60 & 4 & 2 & 2 & 1 & 6 \\ 0.13 & 0.60 & 0.26 & 0.26 & 0.17 & 1 \end{bmatrix}$$

表4 基于梯形模糊数的评价指标矩阵

Tab.4 Matrix of evaluation indicators based on trapezoidal fuzzy numbers

评价指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_1	(1, 1, 1, 1)	(5, 11/2, 13/2, 7)	(3, 7/2, 9/2, 5)	(3, 7/2, 9/2, 5)	(1, 3/2, 5/2, 3)	(7, 15/2, 17/2, 9)
C_2	(1/7, 2/13, 2/11, 1/5)	(1, 1, 1, 1)	(1/3, 2/5, 2/3, 1)	(1/3, 2/5, 2/3, 1)	(1/5, 2/9, 2/7, 1/3)	(1, 3/2, 5/2, 3)
C_3	(1/5, 2/9, 2/7, 1/3)	(1, 3/2, 5/2, 3)	(1, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 1)	(1/3, 2/5, 2/3, 1)	(3, 7/2, 9/2, 5)
C_4	(1/5, 2/9, 2/7, 1/3)	(1, 3/2, 5/2, 3)	(1, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 1)	(1/3, 2/5, 2/3, 1)	(3, 7/2, 9/2, 5)
C_5	(1/3, 2/5, 2/3, 1)	(3, 7/2, 9/2, 5)	(1, 3/2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 5/2, 3)	(1, 1, 1, 1)	(5, 11/2, 13/2, 7)
C_6	(1/9, 2/17, 2/15, 1/7)	(1/3, 2/5, 2/3, 1)	(1/5, 2/9, 2/7, 1/3)	(1/5, 2/9, 2/7, 1/3)	(1/7, 2/13, 2/11, 1/5)	(1, 1, 1, 1)

根据式(4)和式(5),计算出矩阵的 $\lambda_{\max}=6.272\ 8$, $CI=0.054\ 6$, $RI=1.24$, 则 $CR=0.044\ 0<0.1$ 符合一致性检验的要求。然后根据式(6)~式(8)对权重求解,从而得到评价指标 $C_1\sim C_6$ 的主观权重分别为 $\omega'=[0.379\ 5\ 0.072\ 2\ 0.136\ 0\ 0.136\ 0\ 0.239\ 6\ 0.036\ 7]$ 。

4.1.2 评价指标的客观权重确定

本文采用基于变异系数改进的CRITIC法,综合考虑指标的信息量及其相互关联性,通过计算各指标的变异系数、独立性系数与重要性系数,得到各评价指标的客观权重,结果如表5所示。

表5 评价指标的客观权重

Tab.5 Objective weights of evaluation indicators

评价指标	变异系数	独立性系数	重要性系数	客观权重
C_1	0.565 7	4.319 9	2.443 7	0.410 9
C_2	0.334 0	2.338 9	0.781 3	0.131 4
C_3	0.206 4	1.811 4	0.373 9	0.062 9
C_4	0.309 0	2.759 6	0.852 6	0.143 3
C_5	0.176 0	2.966 1	0.522 0	0.087 8
C_6	0.269 0	3.621 2	0.974 0	0.163 8

4.1.3 评价指标的组合权重

根据最小信息鉴别理论,根据评价指标的主观和客观权重,利用式(17)~式(18)算出评价指标的组合权重如表6所示。

表6 评价指标的组合权重

Tab.6 Combined weights of evaluation indicators

评价指标	主观权重	客观权重	组合权重
C_1	0.379 5	0.410 9	0.417 0
C_2	0.072 2	0.131 4	0.102 9
C_3	0.136 0	0.062 9	0.097 7
C_4	0.136 0	0.143 3	0.147 4
C_5	0.239 6	0.087 8	0.153 2
C_6	0.036 7	0.163 8	0.081 9

4.2 评价结果的确定

依据国家标准,将电能质量的评定结果分为

表8 评估指标对应云模型数字特征

Tab.8 Numerical characteristics of the cloud model for each level of the evaluation indicator

评价指标等级	参数	指标1	指标2	指标3	指标4	指标5	指标6
I	E_x	0.025	0.600	0.250	0.100	0.500	0.250
	E_n	0.008	0.200	0.083	0.033	0.167	0.083
	H_e	0.001	0.020	0.008	0.003	0.017	0.008
II	E_x	0.075	2.100	0.750	0.350	1.500	0.750
	E_n	0.008	0.300	0.083	0.050	0.167	0.083
	H_e	0.001	0.030	0.008	0.005	0.017	0.008
III	E_x	0.125	3.750	1.250	0.650	2.500	1.250
	E_n	0.008	0.250	0.083	0.050	0.167	0.083
	H_e	0.001	0.025	0.008	0.005	0.017	0.008
IV	E_x	0.175	5.750	1.750	0.900	4.000	1.750
	E_n	0.008	0.417	0.083	0.033	0.333	0.083
	H_e	0.001	0.042	0.008	0.003	0.033	0.008
V	E_x	0.225	8.000	2.250	1.100	6.500	2.250
	E_n	0.008	0.333	0.083	0.033	0.500	0.083
	H_e	0.001	0.033	0.008	0.003	0.050	0.008

通过计算评价指标的云模型数字特征,并结合各监测点的实测值,可以确定各评价指标在不

优质、良好、中等、合格、不合格,对应等级 I ~ V,各评价指标所对应的分级标准如表7所示,计算出的云模型数字特征如表8所示,其中评价指标 C_1 的云模型图如图3所示。

表7 评价指标分级标准

Tab.7 Criteria for grading evaluation indicators

等级	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
I	0~0.05	0~1.2	0~0.5	0~0.2	0~1	0~0.5
II	0.05~0.10	1.2~3	0.5~1	0.2~0.5	1~2	0.5~1
III	0.10~0.15	3~4.5	1~1.5	0.5~0.8	2~3	1~1.5
IV	0.15~0.20	4.5~7	1.5~2	0.8~1	3~5	1.5~2
V	0.20~0.25	7.0~9	2~2.5	1~1.2	5~8	2~2.5

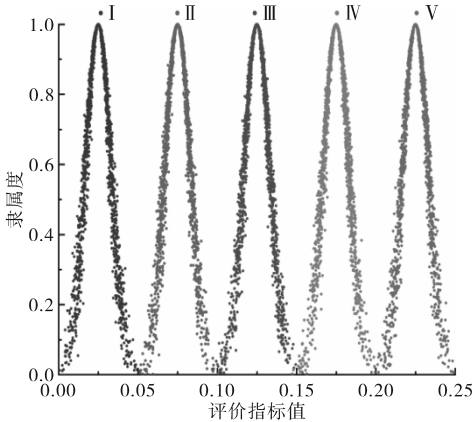


图3 评价指标 C_1 云模型图

Fig.3 Evaluation indicator C_1 cloud model diagram

同等级中的隶属度。基于评价指标的组合权重,得出各监测点隶属于各等级的确定度,最后依据

最大隶属度原则确定各监测点的等级,结果如表9所示。

表9 各监测点的评价等级

Tab.9 Evaluation level of each monitoring point						
监测点	I	II	III	IV	V	评价等级
1	0.025 3	0.299 5	0.085 2	0.007 9	0.000 7	II
2	0.207 5	0.317 8	0.024 8	0.000 6	0.000 1	II
3	0.000 3	0.090 7	0.134 7	0.214 3	0.084 8	IV
4	0.033 6	0.350 3	0.205 4	0.023 1	0.002 1	II
5	0.050 5	0.432 9	0.230 1	0.004 0	0.000 2	II

4.3 评价结果分析

根据表9所示的评价等级,可以观察到所有监测点的电能质量等级分布在“良好”(II级)到“中等”(III级)之间。具体来看,监测点1和监测点2的电能质量等级主要为II级,显示其电能质量处于“良好”水平,反映了该区域电网的运行状况较为稳定。频率偏差(监测点1为0.09 Hz,监测点2为0.04 Hz)和电压偏差(监测点1为2.53%,监测点2为1.66%)均处于合理范围,然而,监测点1的电压闪变为0.22%,谐波电压为1.12%;监测点2的相应值为0.34%和1.26%。这些指标虽未超出良好电能质量标准,但相较于I级(优质)标准,仍有一定差距。监测点3的电能质量被评定为IV级,表明其电能质量仅达到“合格”水平,接近“不合格”边界,其频率偏差(0.19 Hz)和电压波动(1.41%)明显高于其他监测点,尤其是电压波动超过了良好电能质量标准,表明该区域的电压稳定性存在较大问题。可能是由于该区域负荷变化频繁或存在大量非线性负载(如工业设备)导致的。长期的电压波动和谐波问题会对设备的正常运行产生不利影响,因此建议针对该区域加强电压调节和谐波治理。监测点4和监测点5的电能质量评价均为II级,表明其电能质量较为理想,监测点4的三相不平衡度仅为0.58%,在所有监测点中控制效果最优;该测点仅电压偏差、电压闪变指标存在轻微波动,未出现严重超标现象,因此对区域整体电能质量的负面影响有限。

整体而言,大多数监测点的电能质量处于良好或合格水平,尤其是在频率和电压偏差控制方面表现较为理想。个别监测点(如监测点3)在电压波动和谐波问题上存在较大波动,需要进一步加强调控和优化。

为了验证本文所提方法的有效性,与其他能

够实现电能质量等级评估并对同等级下各监测点进行优劣排序的评估方法进行比较,综合评估结果如表10所示。

表10 综合评估结果

Tab.10 Results of the integrated assessment	
方法	电能质量综合评估结果排序
文献[23]	监测点5(II)>监测点4(II)>监测点2(II)>监测点1(II)>监测点3(IV)
文献[24]	监测点5(II)>监测点4(II)>监测点2(II)>监测点1(II)>监测点3(IV)
本文方法	监测点5(II)>监测点4(II)>监测点2(II)>监测点1(II)>监测点3(IV)

由表10可知,本文的方法与其他评估方法的综合评估结果一致,验证了本文方法的准确性和有效性。监测点4的等级评估结果如表11所示。

表11 监测点4的等级评估结果

Tab.11 Results of the hierarchical assessment of monitoring site 4						
方法	指标	I	II	III	IV	V
文献[23]	相对隶属度	0.053	0.890	0.762	0.159	0
	贴适度	0.853 5	1.216 2	0.943 2	0.838 9	0.812 1
本文方法	最大隶属度	0.033 6	0.350 3	0.205 4	0.023 1	0.002 1

3种方法均基于指标的最大值进行等级的划分,但文献[23]采用二元语义法进行二次评估时需要在一次评估结果的基础上增加多个计算步骤,涉及语义尺度调整、语义隶属度优化等,导致模型的复杂性增加,而且对于大规模电能质量监测系统,可能消耗更多的计算资源和时间。文献[24]得出的每一等级的贴适度差异不明显,此外这种方法对权重分配和理想状态定义的依赖性较高,在评估结果解释性和异常数据处理能力方面存在一定的局限性。本文依据组合赋权法结合云模型确定最大隶属度的等级评估方法,具有较强的实用性和实现便捷性。且能够有效平衡模型复杂性与评估精度之间的关系。且通过最大隶属度的确定,简化了等级划分过程,避免了多步骤计算带来的复杂度。通过该方法,不仅提高了评估的效率,还增强了其在复杂数据处理和不确定性评估中的鲁棒性。

5 结论

本文提出了一种基于组合赋权和正态云模

型的电能质量综合评估方法,研究结论如下:1)通过结合TF-AHP和改进的CRITIC方法,综合主客观赋权,并采用最小信息鉴别原理融合权重,克服了传统权重分配方法在主观性和客观性上的不足,确保了权重分配的合理性。2)云模型将随机性和模糊性相结合,实现了定性与定量数据的统一处理。基于最大隶属度原则的等级划分简化了评估流程,提高了评估效率,并通过实际算例分析,验证了其在电能质量评估中的有效性。3)与现有文献的其他评估方法相比,本文方法在综合评估结果上与其他方法一致,验证了其准确性。同时,本文方法在评估效率方面具有明显优势。

参考文献

- [1] 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]. Electrical Machines and Control, 2020, 24(1): 137-144.
- [2] 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.
- [3] 林爽,秦萃丽. 模糊层次分析法在电能质量综合评估中的应用研究[J]. 电网与清洁能源,2018,34(1):72-77,83.
LIN Shuang, QIN Cuili. Application of fuzzy hierarchical analysis method in comprehensive evaluation of electric power quality[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(1): 72-77, 83.
- [4] CHAGAS E A, RODRIGUES A B, SILVA M. Probabilistic power flow for power quality assessment of islanded microgrid[C]// IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems(PMAPS), 2018.
- [5] 黄剑,周林,栗秋华,等. 基于物元分析理论的电能质量综合评估[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2007,30(6):25-29,55.
HUANG Jian, ZHOU Lin, LI Qiuhua, et al. Evaluation of power quality based on method of matter-element[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 30(6): 25-29, 55.
- [6] 黄静,马宏忠,纪卉. 密切值法在电能质量综合评价中的应用[J]. 继电器,2008,36(3):60-63.
HUANG Jing, MA Hongzhong, JI Hui. Application of the intimate data method in synthetical evaluation about power quality[J]. Relay, 2008, 36(3): 60-63.
- [7] 何锦雄,刘国伟,杨永. 基于深度学习的配电设备智能识别技术研究[J]. 电子设计工程,2020,28(6):74-77,82.
HE Jinxiong, LIU Guowei, YANG Yong. Research on intelligent recognition technology of power distribution equipment based on deep learning[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(6): 74-77, 82.
- [8] 赵宪,周力行,邓维. 改进的层次分析法在含分布式电源系统电能质量综合评估中的应用[J]. 中国电力,2014,47(12):72-78.
ZHAO Xian, ZHOU Lixing, DENG Wei. Application of the improved analytic hierarchy process in comprehensive assessment of power quality with distributed generators[J]. Electric Power, 2014, 47(12): 72-78.
- [9] BAJAJ M, SINGH A K, ALOWAIDI M, et al. Power quality assessment of distorted distribution networks incorporating renewable distributed generation systems based on the analytic hierarchy process[J]. IEEE Access, 2020, 8: 145713-145737.
- [10] 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.
- [11] 付学谦,陈皓勇. 基于理想解法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):26-30.
FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on TOPSIS approach[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 26-30.
- [12] 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.
FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on weighted rank sumration method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 128-132.
- [13] 刘传修,张菁,刘小康,等. 基于IVIF-AHP与改进CRITIC法的配电网规划方案综合评估[J]. 控制工程,2022,29(2):322-329.
LIU Chuanxiu, ZHANG Jing, LIU Xiaokang, et al. Comprehensive evaluation of distribution network planning schemes based on IVIF-AHP and improved CRITIC method[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(2): 322-329.
- [14] 赵娟,刘琼荪. 一种基于模糊数中心的模糊数排序方法[J]. 模糊系统与数学,2008,22(2):142-146.
ZHAO Juan, LIU Qionsun. Ranking fuzzy numbers based on the centroids of fuzzy numbers[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2008, 22(2): 142-146.
- [15] 王力,刘家琦. 梯形模糊AHP及其在卫星方案中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2002,6(3):315-319.
WANG Li, LIU Jiaqi. Trapezoidal fuzzy AHP and its application to optimal selection of satellite system schemes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 6(3): 315-319.
- [16] 牟琼,杨春德. 一种基于梯形模糊数互补判断矩阵确定权重的方法[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版),2006,18(6):809-812.

- MOU Qiong, YANG Chunde. Method of determining weights based on complementary judgement matrix with trapezium fuzzy numbers[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2006, 18(6): 809-812.
- [17] 俞伟,王建伟,贾磊. 梯形模糊层次分析法在电网设备状态评价权重算法中的应用[C]//浙江省电力学会,上海市电机工程学会,江苏省电机工程学会,安徽省电机工程学会,浙江省电力学会2016年度优秀论文集,2016,5:333-337.
- YU W, WANG J W, JIA L. Application of trapezoidal fuzzy analytic hierarchy process in the weight algorithm for power grid equipment condition evaluation[C]//Zhejiang Electric Power Society, Shanghai Electric Machinery Engineering Society, Jiangsu Electric Machinery Engineering Society, Anhui Electric Machinery Engineering Society, Zhejiang Electric Power Society 2016 Annual Outstanding Papers Collection, 2016, 5: 333-337.
- [18] 张立军,张潇. 基于改进CRITIC法的加权聚类方法[J]. 统计与决策, 2015, 31(22): 65-68.
- ZHANG Lijun, ZHANG Xiao. Weighted clustering method based on improved CRITIC method[J]. Statistics & Decision, 2015, 31(22): 65-68.
- [19] LI Deyi. Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers journal of computer science and mathematics with application[J]. Elsevier Science, 1998, 35(3): 99-123.
- [20] 王腾. 基于云模型的城市轨道交通项目施工风险评价方法研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2014.
- WANG Teng. Research on construction risk evaluation method for urban rail transit projects based on cloud model[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2014.
- [21] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
- LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership cloud and membership cloud generator[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.
- [22] 钱俊杰,李昊泉,李广华,等. 基于组合赋权-VIKOR的电能质量综合评估[J]. 电气传动, 2024, 54(6): 37-44.
- QIAN Junjie, LI Haoquan, LI Guanghua, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on combination weights and VIKOR[J]. Electric Drive, 2024, 54(6): 37-44.
- [23] 程志友,刘荡荡,吴吉,等. 基于集对分析与可变模糊集的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1950-1956.
- CHENG Zhiyou, LIU Dangdang, WU Ji, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on set pair analysis and variable fuzzy sets[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1950-1956.
- [24] 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.

收稿日期:2024-11-06
修改稿日期:2025-02-11