

电能质量综合评估方法综述与展望

肖白¹, 赵雪纯¹, 董光德²

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆市 渝北区 401123)

Summary and Prospect of Comprehensive Evaluation Methods of Power Quality

XIAO Bai¹, ZHAO Xuechun¹, DONG Guangde²

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation Control and Green Energy New Technology of Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Yubei District, Chongqing 401123, China)

摘要:【目的】随着我国新型电力系统的不断发展, 光伏、风电等新能源大规模并网, 同时, 智能化控制设备与非线性负载等不断增加, 导致电能质量问题越来越复杂。为了提升整个电网的供电品质、实现电网的经济运行和优质高效发展, 对电能质量进行科学、合理的量化评估至关重要。【方法】从电能质量评估指标、赋权方法以及评估模型3个方面出发, 对电能质量综合评估方法进行系统的归纳和比较, 概述了电能质量综合评估方法的研究现状;并在此基础上, 总结了现有的各种电能质量综合评估方法的不足及尚需解决的问题, 并对未来此领域可能开展的研究方向进行展望。【结论】目前国内外对于电能质量综合评估的研究虽然已经取得了许多成果, 然而各方法有其各自的优点和不足, 且在该领域内仍有一系列被忽视的重要问题需要解决。

关键词: 新型电力系统; 电能质量; 综合评估; 指标; 权重; 评估模型

ABSTRACT: [Objectives] With the continuous development of China's new power system, there is a growing integration of new energy sources such as photovoltaic and wind power into the grid. However, this integration has also led to an increase in intelligent control equipment and nonlinear loads, resulting in more complex power quality issues. In order to enhance the power supply quality of the entire power grid and achieve economic operation and efficient development, it is crucial to conduct a scientific and rational quantitative evaluation of power quality. [Methods] Starting from

three aspects of power quality evaluation indicators, weighting methods and evaluation models, the comprehensive power quality evaluation methods were systematically summarized and compared, and the research status of comprehensive power quality evaluation methods was summarized. On this basis, the shortcomings and problems that need to be solved of various existing comprehensive power quality assessment methods were summarized, and the possible research directions in this field were prospected. [Conclusions] Although many results have been achieved in the research on comprehensive evaluation of power quality at home and abroad, each method has its own advantages and disadvantages, there are still a series of important neglected problems that need to be solved in this field.

KEY WORDS: new power system; power quality; comprehensive evaluation; indicator; weight; evaluation model

0 引言

随着电力系统的不断发展, 越来越多的电力电子设备和可再生能源发电系统大规模接入电网^[1], 非线性负荷和分布式电源对电网电能质量产生了不利影响^[2-3]。近年来, 电力市场不断推动“依质定价”, 电力系统规划也由粗放型逐渐转变为精益化, 加上用户家用电器以及工厂精密化仪器的使用等, 都对电能质量提出了更高的要求。因此, 对电能质量进行科学合理的量化评估, 对于保障居民侧用电品质, 为电能质量监管部门提供可靠依据等都具有重要意义^[4-8]。

电能质量综合评估是在对电力系统电气运行

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902205); 吉林省产业创新专项基金项目(2019C058-7)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0902205); Industrial Innovation Special Fund Project of Jilin Province (2019C058-7).

参数进行实际测量或利用建模仿真获得基础数据后，再对电能质量各项指标做出评估并和标准等级进行比较的过程^[9-10]。目前，国内外针对此方面已经进行了大量的研究，由于电能质量问题越来越复杂，传统电能质量综合评估方法无法适用于日益复杂的电力系统。同时，大数据以及人工智能等技术的发展，为电能质量综合评估方法的研究工作提供了新的技术支持^[11]。因此，对电能质量综合评估方法进行系统的归纳、总结对于未来的相关研究可以起到重要帮助作用。

本文首先从电能质量评估指标、赋权方法及评估模型 3 个方面出发，对现有的各种电能质量综合评估方法进行了系统的归纳、比较和总结；其次，分析了现有评估方法的不足及存在的问题；最后，针对存在的问题，结合电力系统的发展趋势指出了未来研究的重点方向。

1 电能质量综合评估方法的基本原理

电能质量综合评估的一般流程如图 1 所示，主要包括 3 个核心部分：一是明确待评估对象的各项指标；二是确定电能质量评估指标的权重值；三是建立电能质量综合评估模型。

首先，电能质量评估是多项指标的综合评估，

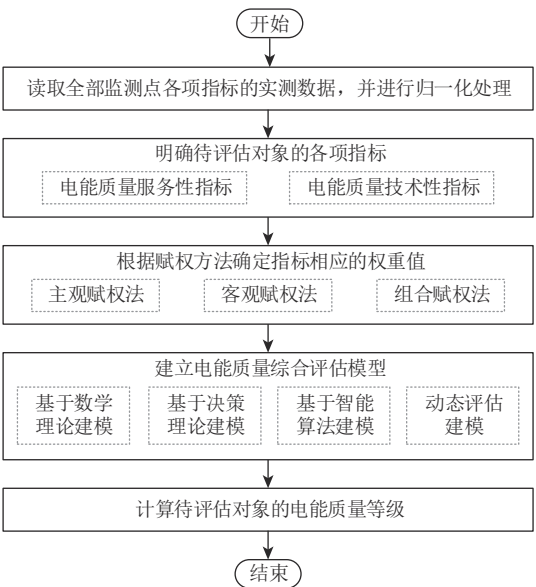


图 1 电能质量综合评估流程图

Fig. 1 Flow chart for comprehensive evaluation of power quality

单项指标是否合格并不能代表系统的整体状况，因此，待评估对象指标体系的选取对电能质量评估结果的准确性有着重要影响。

其次，针对选取的各项电能质量评估指标，利用选取的赋权方法计算各项评估指标相应的权重值，权重值越大，说明该指标对电能质量评估结果影响越大。

最后，建立电能质量综合评估模型，并结合计算得到的权重值对评估模型进行求解，根据模型计算结果即可分析得到电能质量综合评估的最终结果，从而对各待评估对象进行电能质量等级的划分。

2 电能质量的综合评估指标

电能质量最早的专业术语为“供电特征”，于 1989 年被国际发输电联合会明确提出。随着电力系统的不断发展，供电特征及其衍生的指标已不能全面反映电能质量问题，所以美国电力研究协会在 1996 年定义了一套全面的指标集，为电能质量综合评估的定量分析提供依据。20 世纪 90 年代起，我国陆续颁布了电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡等一系列电能质量评估指标。

电能质量的综合评估指标可以分为 2 类：一是服务性指标，主要从引导电力用户合理用电等方面进行电能质量的综合评估，包括电价的透明度以及供电部门对电力用户投诉的反应速度等；二是技术性指标，主要从供电的角度衡量电能质量。现有的国家标准主要是针对技术性指标来制定的，技术性指标包括电压质量、频率质量和供电可靠性。电压质量分为稳态电压质量和暂态电压质量，稳态电压质量主要包括电压偏差、三相电压不平衡、电压波形畸变、电压波动和闪变；暂态电压质量主要包括电压暂降、电压暂升、短时中断、工频过电压。频率质量表示为频率偏差。供电可靠性一般作为一个单独的分支来考虑，其主要指标包括：供电可靠率、用户平均停电时间、用户平均停电次数、系统停电等效小时数。

虽然有关电能质量的评估很多，但现有的电能质量综合评估方法大多只考虑 5 个常用的技术

性指标，分别是电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、谐波以及三相电压不平衡。其他电能质量评估指标在对电能质量要求高的特定场景下会单独考虑或与常用技术性指标共同考虑、综合分析。

3 电能质量评估指标的赋权方法

3.1 赋权法分类

目前已有多种确定指标权重的方法，主要分为三大类，即主观赋权法、客观赋权法以及组合赋权法，具体的分类如图2所示。

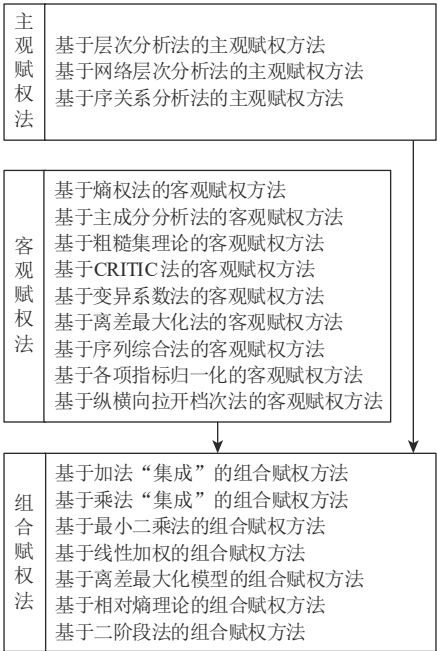


图2 电能质量评估指标的赋权方法

Fig. 2 Weighting methods for power quality evaluation index

3.2 主观赋权法

主观赋权法是根据决策者信息进行赋权的一类方法，其基本原理是：依据指标的相对重要性赋予指标不同的权重，各指标权重由专家根据经验以及实际情况做出主观判断。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、序关系分析法等都是被广泛应用的主观赋权法。

3.2.1 基于层次分析法的赋权方法

AHP是将与决策总是相关的元素分解成目标、约束等层次，然后进行定性与定量分析的决策方法，该方法应用于电能质量指标赋权时可归

结为以下4个步骤：

- 1) 建立电能质量评估的递阶层次结构；
- 2) 构造两两比较判断矩阵；
- 3) 针对某一标准，计算各评估指标权重并进行一致性校验层次单排序；
- 4) 计算当前一层指标关于电能质量的排序权重(层次总排序)。

采用AHP对电能质量指标赋权的方法原理简单，实用性强，但当电能质量综合评估指标过多时，AHP容易出现判断矩阵难以满足一致性要求的问题。为了解决传统AHP存在的不足，文献[12]将AHP、关联函数和物元模型相结合，用区间数代替点值数构造各级可拓区间数判断矩阵，解决了判断矩阵难以满足一致性要求的问题，也可采用融合D-S证据理论^[13-15]或构造比较矩阵^[16]的方法解决上述问题。

文献[17]提出了一种基于AHP的、可以同时考虑几种不同供电质量情况的方法，用于评估总线上的整体电能质量优劣。针对含分布式电源发电系统的电能质量问题，文献[18]提出了一种基于AHP的含分布式电源发电系统的电能质量综合评估方法，制定了统一的电能质量指数，用于评估单个母线的整体电能质量优劣，这种精确的方法为现代配电网的正确规划、监测以及电能质量的综合评估提供了新思路。

3.2.2 基于网络层次分析法的赋权方法

网络层次分析法(analytic network process, ANP)^[19]是以AHP为基础发展而来的一种决策方法。ANP考虑了递阶层次结构中存在内部关联以及层次结构之间存在依赖性和反馈性的特点，弥补了AHP只能处理互无关联性且内部独立元素的缺陷，适用于元素间相互影响且互相关联的复杂系统。由于电能质量评估指标体系本身并不是内部独立的递阶层次结构，文献[20]利用ANP计算权重，提出了考虑指标关联性的电能质量综合评估方法。

3.2.3 基于序关系分析法的赋权方法

序关系分析法是基于专家经验的主观赋权法，文献[21]利用序关系分析法计算电能质量各指标的主观权重值，避开了AHP的固有缺点，无需构造判断矩阵，也无需进行一致性检验，对同一层

次中的元素个数没有限制,具有保序性。

该方法的一般步骤为:

- 1) 确定各评估指标间的序关系;
- 2) 计算各相邻指标的相对重要程度和权重系数;
- 3) 根据上一步计算的权重系数调整指标的原权重系数。

主观赋权法简洁实用,所需定量数据信息少,易于掌握和使用,它根据指标的重要性给予相应的权重,比较符合权重的本质,但是过分依赖专家经验,主观随意性较大,评估结果不够客观。

3.3 客观赋权法

客观赋权法是以原始数据之间的关系为基础,通过数学方法来确定权重的一类方法。其权重结果不依赖人的主观判断,有较强的数学理论依据。熵权法、主成分分析法、粗糙集赋权法、CRITIC权重法等都是实现电能质量客观评估的常用方法。

3.3.1 基于熵权法的赋权方法

熵权法可以用来判断某个指标的离散程度,离散程度越大,该指标对综合评估结果的影响越大。文献[22]利用熵权法计算电能质量各指标的客观权重值,原理简单,但该方法不能减少计算指标的维数,计算量较大。

该方法的一般步骤为:

- 1) 利用归一化后的实测数据计算各评估指标的特征权重和熵值;
- 2) 利用上述结果计算差异度系数,并得到各评估指标的客观权重。

3.3.2 基于主成分分析法的赋权方法

主成分分析法可以起到数据化简的作用,减少计算量,该方法将原来众多具有关联性的指标重新组合成一组新的彼此无关的综合指标来代替原有指标。首先,利用归一化后的数据计算相关系数矩阵;然后,计算矩阵的特征值和特征向量;最后,根据建立的指标体系选择指标计算综合评估结果。

传统的主成分分析方法需要选取较多的评估指标进行研究,导致该方法的降维作用不明显,且只能处理线性问题。基于传统主成分分析法的不足,文献[23]提出了一种基于非线性主成分分析的电能质量综合评估方法,利用新的综合主成

分指标代替原有的评估指标,克服了数据关联性的约束并提高了降维效果。

3.3.3 基于粗糙集理论的赋权方法

粗糙集理论通过知识约简,删除数据中不重要的部分,从而得到权重计算结果,该方法不需要任何先验信息,仅利用已有的实测数据做近似刻画,但是它只能处理离散型指标数据。文献[24]利用粗糙集理论的属性重要性原理确定各评估指标之间的关系,由于其权重确定完全由数据本身决定,因此,所选取的样本数据要有一定代表性和普遍性,否则得到的权重会具有很大的片面性。

3.3.4 基于CRITIC法的赋权方法

针对部分客观赋权法仅考虑指标的差异性,而忽略指标间的关联关系,文献[25]提出CRITIC赋权法计算指标的客观权重。

CRITIC赋权法从冲突性和对比强度2个角度分析指标信息量:基于相关系数的冲突性反映指标间的关联性;基于均方差思想的对比强度反映评估指标间的差异性。该赋权方法综合考虑指标间的关联性和差异性,更深入地挖掘了指标数据蕴含的信息,但是CRITIC法只能使用正向化或逆向化处理,而不能使用标准化处理。

3.3.5 基于变异系数法的赋权方法

针对许多方法在计算客观权重时只考虑各指标对评估结果的贡献率,而没有考虑指标变化情况对评估结果造成的影响,文献[26]考虑了电能质量指标数据波动性对评估结果的影响,选用变异系数法求解客观权重值,该方法根据指标的变异程度进行赋权,变异程度越大,赋予的权重则越大。

3.3.6 基于离差最大化法的赋权方法

在多属性问题中,根据属性之间的差异确定属性权重的方法称为离差最大化法^[27]。

该方法的基本原理是在某一评估指标下,如果各观测点的电能质量指标 i 差异很小,则指标 i 对电能质量优劣排序的作用很小,应相应赋予较小的权重;反之,若指标 i 差异较大,则其对电能质量的优劣排序将起重要作用,应赋予较大的权重;若指标 i 无差异,那么该属性对方案排序没有作用,其权重设为零。

3.3.7 基于序列综合法的赋权方法

基于序列综合法的赋权方法所计算的权重大小由序列值决定，文献[21]指出序列值可采用以下2种方法确定：

1) 根据指标最大值超过样本平均值的倍数确定序列值大小，超出越多，则序列值越大；

2) 根据所有样本的指标值超过其平均值的样本个数确定序列值大小，个数越多，则序列值越大。

序列值越大，说明被统计的指标对电能质量综合评估的影响越大，即权重越大；反之，则权重越小。序列值的确定方法有很多，确定方法是否合理对权重计算结果有很大影响。序列综合法具有计算量小、简单实用的特点，能较好地反映数据结构及数据离散性。

3.3.8 基于各项指标归一化的赋权方法

针对不同量纲指标的不可公度性，文献[28]提出基于各项指标归一化的赋权方法。该方法在电能质量各项指标归一化赋权时，以各评估指标对评估结果的决策值为依据得到各评估指标的赋权结果。

由式(1)可计算得到各评估指标的决策值：

$$r_i = x_i / b_i \quad (1)$$

式中： x_i 表示第*i*项指标的实测值； b_i 表示第*i*项指标的规定限值。

显然，当 r_i 小于1时，表明此时该项电能质量指标在规定的限值之内，而且 r_i 越小，表明此时的电能质量越优；否则，说明此时电能质量超过了规定的限值， r_i 越大，表明电能质量越低劣。由此可见， r_i 的大小反映了该项电能质量的品质属性。因此，在理论上， r_i 越大，应该赋予它越大的权重，来表明该项电能质量指标对综合属性的影响。

基于各项指标归一化法的赋权方法一方面完全消除了不同量纲指标的不可公度性；另一方面充分体现了电能质量指标间相对优劣程度对电能质量综合属性的影响，实现了按质赋权。

3.3.9 基于纵横向拉开档次法的赋权方法

针对现有电能质量的时空动态特性问题，文献[29]引入纵横向拉开档次法对电能质量各评估指标进行客观赋权，该方法既能在某一个时

间断面上体现出待评估对象间的差异，又能在时间的纵向维度上展现待评估对象的分布情况。

具体过程如下：

第*i*个待评估对象 O_i 在 t_k 时刻的第*j*项指标表示为 $x_{ij}(t_k)$ ，由 $\{x_{ij}(t_k)\}$ 构成的数据表即为时序立体数据表，对于时刻 t_k ，其综合评估函数为

$$y_i(t_k) = \sum_{j=1}^m \omega_j x_{ij}(t_k) \quad (2)$$

式中： ω_j 为第*j*项指标的权重值； m 为选取的电能质量评估指标的个数。

设共有 N 个时期集 $T=\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ ，对于 n 个待评估对象 $\{O_i\}$ 在时序立体数据表 $\{x_{ij}(t_k)\}$ 上的这种整体差异，可用 $y_i(t_k)$ 的总离差平方和表示，具体表示为

$$\sigma^2 = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n [y_i(t_k) - \bar{y}]^2 = \omega^T \sum_{k=1}^N H_k \omega = \omega^T H \omega \quad (3)$$

式中： $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ ； $H = \sum_{k=1}^N H_k$ 为 $m \times m$ 阶对称矩阵； $H_k = A_k^T A_k$ ($k=1, 2, \dots, N$)，其

$$A_k = \begin{bmatrix} x_{11}(t_k) & \cdots & x_{1m}(t_k) \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1}(t_k) & \cdots & x_{nm}(t_k) \end{bmatrix}$$

若限定 $\omega^T \omega = 1$ ，当取 ω 为矩阵 H 的最大特征值 $\lambda_{\max}(H)$ 所对应的特征向量时， σ^2 取最大值。将此特征向量 ω 归一化后，即得到权重系数向量。

纵横向拉开档次法虽然考虑了时序权重，但是在应用过程中容易出现横向上的序关系保持，但纵向上破坏原有序关系的现象，违背“保序”原则。

客观赋权法得到的指标权重客观性很强，但需要足量的样本数据和实际的问题域，实用性和可参与性差，计算方法也比较复杂，过分依赖统计和数学的定量方法，忽视了评估指标本身，无法体现决策者对不同指标的重视程度，可能会出现计算权重与指标实际重要程度相差较大的情况。

3.4 组合赋权法

为了克服单一赋权方法的局限性，充分发挥各种赋权方法的优势，主客观组合赋权法的应用越来越广泛。组合赋权法可以消除主观偏差和客观片面，其所确定的权重同时体现主客观信息，完整准确、真实客观地反映待评估对象的真实情况。组合

赋权法通常先利用主观赋权法，如AHP^[30-35]、序关系分析法^[21,28]等确定各评估指标的主观权重，然后利用客观赋权法，如熵权法^[25,28,31-33]、CRITIC法^[25]、变异系数法^[26,34]、离差最大化法^[27]、序列综合法^[21]、将各项电能质量指标限值归一化法^[30]、纵横向拉开档次法^[29]等求得客观权重，最后通过加法“集成”法或乘法“集成”法^[21,24-25,31,33-34]、最小二乘法^[26]、线性加权^[27-28]、离差最大化模型^[30]、相对熵理论^[32]等方法求得各指标的组合权重。

二阶段法可以看作组合赋权法的一种特殊情况，该方法基于最优化理论，先确定指标的初始权重，充分考虑决策者主观偏好和各评估方案的差异后，利用优化理论修正原指标权重，避免了“赋权不公平”的情况。文献[36-37]建立了基于二阶段法的电能质量综合评估模型，科学、合理地修正了单一赋权法得到的初始权重，为电能质量综合评估提供了新思路。组合赋权法兼顾主客观权重的计算结果，同时反映主客观2种信息，最大化地减少信息损失，使赋权与实际结果更为接近。目前针对组合赋权的研究热点在于主客观的权重分配问题，现有的研究方法数学推导过于繁琐，适用性不强，有待进一步研究。

3.5 赋权方法对比分析

由以上分析可知，主观赋权法、客观赋权法以及组合赋权法各有其优缺点，这3类方法对比情况见表1。

表1 3类赋权方法的比较

Tab. 1 Comparison of three weighting methods

赋权方法	优点	缺点
主观赋权法	简洁实用、所需定量数据少、实用性强	主观随意性大、赋权结果不够客观
客观赋权法	有效减小主观因素对评估结果的影响	实用性和可参与性差，计算方法复杂
组合赋权法	同时反映主客观信息、信息损失最少	难以确定主客观的权重分配问题

4 电能质量综合评估模型

4.1 电能质量综合评估建模方法分类

现有的建立电能质量综合评估模型的方法有很多，本文按照评估原理将建模方法分为基于数学理论的电能质量综合评估建模方法、基于决策

理论的电能质量综合评估建模方法、基于智能算法的电能质量综合评估建模方法和动态评估建模方法，具体分类情况如图3所示。现在也出现了一些组合建模的方法，该类方法在一定程度上弥补了单一建模方法的不足，但其综合评估的结果主观性相对较强，还需进一步研究。

建立电能质量综合评估模型的方法	基于数学理论	基于模糊数学的电能质量综合评估建模方法 基于概率统计和矢量代数的电能质量综合评估建模方法 基于集对分析法的电能质量综合评估建模方法 基于灰色理论的电能质量综合评估建模方法 基于物元分析的电能质量综合评估建模方法 基于雷达图的电能质量综合评估建模方法 基于理想解的电能质量综合评估建模方法 基于秩和比法的电能质量综合评估建模方法 基于数据包络分析理论的电能质量综合评估建模方法
	基于决策理论	基于自主式决策的电能质量综合评估建模方法 基于突变决策的电能质量综合评估建模方法
	基于智能算法	基于投影寻踪模型的电能质量综合评估建模方法 基于混沌粒子群算法的电能质量综合评估建模方法 基于人工神经网络的电能质量综合评估建模方法
	动态评估建模方法	基于二次加权的电能质量综合评估建模方法 基于双激励控制线的电能质量综合评估建模方法 基于竞争机制的电能质量综合评估建模方法 基于云模型的电能质量综合评估建模方法

图3 建立电能质量综合评估模型的方法

Fig. 3 Method of establishing comprehensive evaluation model of power quality

4.2 基于数学理论的电能质量综合评估建模方法

4.2.1 基于模糊数学的电能质量综合评估建模方法

在电能质量综合评估过程中，用指标描述电能质量问题具有模糊性，很难用某种定量的形式去表示，模糊数学法恰好是一种有效的处理模糊问题的方法^[38]。该类方法首先对各项指标模糊化，然后利用监测系统获得的基础数据形成模糊集合和指标隶属函数，最后利用电压等级和隶属度函数对电能质量等级进行评定。

普通的模糊数学法由于海明距离贴进度对模糊关系的刻画过于粗糙，导致最大隶属度原则可能掩盖介于2个隶属度之间的差别，从而导致严重的判断偏差^[39]。文献[40]利用模糊数学和权重系数对电能质量进行综合评估，避免了模糊数学法最大隶属度原则的缺陷。文献[41]通过变权理论和云理论对模糊数学法进行改进，降低了评估因素本身对指标权重的影响，避免了传统模糊数学法在隶属度函数构建过程中主观因素的影响。针

对非稳态不平衡配电网，文献[42]提出了一种基于模糊小波变换的电能质量综合评估方法，将模糊理论和小波分析法相结合，为电能质量评估提供了一种新的思路。

传统的模糊数学法虽然在处理模糊性问题上具有明显优势，但是隶属度函数的建立过程受主观因素影响较大，因此，现有研究大多采用其他方法与模糊数学法相结合，以降低主观因素对评估结果的影响。

4.2.2 基于概率统计和矢量代数的电能质量综合评估建模方法

概率统计是针对随机现象统计规律的数学方法，主要针对具有随机特点的事物进行数据统计，从而控制发生错误的概率。电能质量有多个评估指标，归一量化后才能适应电能商品论质定价的要求，概率统计和矢量代数法可以将各项指标的模糊性具体量化，再采取矢量代数法将各项指标归一化，得到新且唯一的电能质量综合评估量化指标。

在对评估指标的标准差和期望进行标幺化的过程中，概率统计和矢量代数法的基准值选取是否合理对评估结果的准确性有很大的影响^[43]。文献[44]利用模糊数学对概率统计法进行改进，基准值的选取不再依赖专家经验，且保留了概率统计在处理数据时的严谨性和客观性，同时引入D-S证据理论计算指标权重，减少主观因素的影响，该方法简洁、实用，具有一定的推广价值。

基于概率统计和矢量代数法对电能质量进行综合评估建模的方法，虽然可以将各项指标具体量化，但是其基准值的选取对评估结果的准确性有很大影响，因此概率统计方法也要结合其他方法进行改进，将其优势最大化。

4.2.3 基于集对分析法的电能质量综合评估建模方法

集对分析法是解决指标不确定性问题的有效方法，其基本思想是将确定性分成“同”与“反”2个方面，而将不确定性称为“异”，三者相互联系、影响、制约，又在一定条件下相互转化，同时引入联系度及数学表达式，统一描述各种不确定性问题，从而将对不确定性的辩证认识转化成

具体数学运算。

文献[45]应用集对分析法，对电能质量各项指标进行联系度分析，建立集对分析模型，以解决指标不确定性问题。文献[46]结合集对分析法和顺势取值法，在对电能质量样本进行等级评估的同时，还能精确地给出电能质量样本在等级区间的电能质量具体值，即当多个电能质量样本同属同一等级区间时，能分辨它们在同一电能质量等级区间内的质量优劣情况。文献[47]利用集对分析法构造差异度函数以解决可变模糊集中差异度函数获取存在主观随意性的问题。

现有资料表明，学术界对于“同”“异”“反”的定义不唯一，这将导致差异度系数是一个不确定的区间值，然而差异度系数却是集对分析法求解联系度的关键，因此，还需进一步加深对集对分析法的研究。

4.2.4 基于灰色理论的电能质量综合评估建模方法

在对复杂大系统进行电能质量评估时，会存在信息不完备、不全面、不充分的情况，灰色理论是研究信息部分清楚、部分不清楚并带有不确定性现象的数学理论，在研究“外延明确，内涵不明确”的“小样本，贫信息”问题上具有明显优势，灰色理论在电能质量综合评估中的应用主要有灰色关联度分析法和灰色聚类评估法。

灰色关联度分析法用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序，以对系统作统观全局的分析。该类方法首先分析数据特征以获取比较序列和标准序列，然后得到序列间的差异信息并建立差值举证，最后计算灰色关联度，进而得到评估结果^[48]。文献[49]利用灰色关联度分析法对电能质量进行综合评估，在很大程度上减少了信息不对称带来的损失，且思路清晰，对数据量要求低，工作量少，适用于多因素、大规模问题的决策和评估，但该方法需要对各项指标的最优值进行确定，主观性过强，且部分指标最优值难以确定^[50]。

灰色聚类评估法主要用于同类因素的归并，以使复杂系统简单化。该类方法首先根据待评估对象中是否存在指标超标现象，由指标归一化值

或指标严重程度得到各指标属于各灰类的白化权数,然后将白化权数按照不同灰类进行归纳,最后判断待评估对象属于哪种灰类。文献[51]对各评估等级的白化权函数进行改进,有效解决了电能质量综合评估从指标不越界到越界的评估等级连续性问题。文献[52]将区间灰色聚类 and 证据融合理论相结合,解决了评估对象分界线附近数据的分类问题。针对分布式电源大规模并网的情况,文献[53]利用灰色聚类评估法实现了对电能质量的综合评估。

基于灰色理论的评估方法能充分挖掘原始数据的潜力,但是对监测数据的依赖性过高,且不适用于研究“大样本”问题。

4.2.5 基于物元分析的电能质量综合评估建模方法

物元分析是研究求解不相容问题时规律和方法的理论^[54],该类方法首先要确定经典域物元、节域物元和待评估物元,然后求待评估对象的关联度,最后确定指标权重并求出相应的电能质量评估等级。

针对电能质量综合评估的复杂性以及单因素识别和等级划分之间的不相容性特点,文献[55]首次提出将物元分析理论用于电能质量综合评估中,以解决上述问题。文献[56]建立了物元可拓模型实现对电能质量的综合评估,但当指标数据超出节域时,该方法的待评估对象关联函数无法计算,基于此,文献[57]提出了改进变权物元可拓模型,该模型对物元可拓模型的经典域物元、待评估物元以及最大隶属度准则进行了改进,以克服其在电能质量综合评中的局限性和不足。考虑到电能质量综合评估过程中存在不确定性因素的影响,文献[58]利用云模型的不确定推理特性对物元可拓模型进行优化以消除不确定性因素的影响。

物元分析法建模简单,易于编程,具有很好的适用性,但其所需的关联度从算法角度可以看作是对模糊数学中隶属度这一概念的扩展和延伸,因此容易受到最大隶属度原则本身缺陷的影响,从而导致评估结果有偏差。

4.2.6 基于雷达图的电能质量综合评估建模方法

雷达图法是一种典型的数值、图形相结合的评估方法,用图形的形式表示电能质量综合评估中各项指标之间的数量关系。

传统的雷达图法在运用中效果较好,但也存在一些问题,例如:

1) 若在绘制雷达图时各个指标的排列顺序不同,雷达图的面积和周长就不同,从而导致评估结果不唯一;

2) 绘制雷达图时,各指标轴的夹角仅是简单的等分关系,弱化了不同指标在综合评估中的不同重要性;

3) 三角形区域为相邻2个指标共同拥有,难以清晰地划分各指标在评估中的作用;

4) 没有明确地在合格指标与不合格指标之间设立面积界限。

为了解决上述问题,文献[59-60]利用扇形区域的角平分线作为指标轴,且由权重值的大小决定扇形区域圆心角的大小,避免了由于评估指标的排列顺序不同而造成评估结果不唯一的弊端,并且强化了不同指标的重要性。文献[61]利用各扇形区域的对角线作为指标轴绘制雷达图,将指标轴上的评估图点依次相连,避免了各指标之间的割裂,充分体现了指标之间的相互影响和各自的作用。文献[62]融合了雷达图法与隶属度算法的优点,将电能质量指标化为逆向雷达图的形式得出综合指标再以隶属度函数分级,相较以往的雷达图法而言,该方法明确了指标合格与否的问题,避免了以往的评估准确度不高的现象。

雷达图法具有完整、清晰的优点,结合对图像特征的数学处理,可以对电能质量进行客观、直观的综合评估,但是雷达图法容易出现分级不连续的情况。

4.2.7 基于理想解的电能质量综合评估建模方法

理想解法是一种有效的多指标评估方法,通过构造评估问题的正理想解和负理想解,并计算每个指标对正理想解的靠近程度和对负理想解的远离程度对各方案进行排序。

传统的理想解法使用相对贴近度来确定电能质量的综合评估结果,难以比较落在正理想解和

负理想解角平分线上的待评估目标的电能质量优劣。基于此, 文献[63-64]将灰色系统理论引入理想解法中, 构造了一种新的贴近度指标, 避免了遇到贴近度相等时不能区分样本之间优劣性的情况。文献[65]则通过加权欧氏距离判断待评估对象的排序, 极大地减小了评估结果相同的概率。

4.2.8 基于秩和比法的电能质量综合评估建模方法

秩和比法的基本思想是在一个 n 行(n 个待评估对象) p 列(p 个评估指标)矩阵中, 通过秩转换, 获得无量纲的秩和比, 以秩和比的值对评估对象的优劣进行分档排序, 值越大表明综合评估结果越优。针对现有电能质量综合评估模型较为复杂的问题, 文献[66]采用加权秩和比法的评估模型, 其计算数据为各个电能质量指标的秩, 简化了评估模型, 减小了计算量。

秩和比法综合性强, 可以显示微小变动, 对离群值不敏感, 能够看出评估指标是否具有独立性, 但通过秩替代原始指标值, 会损失部分信息, 且如何对各个指标进行恰当的编秩还有待进一步研究。

4.2.9 基于数据包络分析的电能质量综合评估建模方法

数据包络分析是一种对多投入和多产出决策单元相对效率进行评估的方法, 它把各个决策单元的输入权重和输出权重作为变量, 从最有利于决策单元的角度评估各决策单元的有效性, 避免了权重选取时主观因素的影响。

文献[67]利用数据包络分析对电能质量进行综合评估, 将待评估决策单元效率值与标准决策单元效率值进行对比分析, 得到待评估决策单元的评估等级。该方法有效避免了指标隶属度选取和权重选取对于电能质量评估结果的影响, 有着良好的指标扩展性。随着电能质量研究的深入, 反映电能质量的指标在不断增加, 数据包络分析法不需要明确的输入输出表达式, 在输入和输出指标多或关系复杂的网络中, 有着巨大的优势, 将数据包络分析应用到电能质量评估领域, 是对电能质量评估方法的丰富和补充。

4.3 基于决策理论的电能质量综合评估建模方法

决策理论是把系统理论、运筹学、计算机科学等综合运用于管理决策问题, 形成的一门有关决策过程、准则、类型及方法的较完整的理论体系, 在减少主观因素对电能质量评估结果影响方面具有显著效果, 其在电能质量综合评估中的应用主要有自主式决策和突变决策。

4.3.1 基于自主式决策的电能质量综合评估建模方法

基于自主式决策思想的电能质量综合评估方法, 可以突出各评估对象的自身优势, 弱化对手优势, 体现了评估对象的自主性作用, 其一般过程如下:

- 1) 确定电能质量综合评估指标体系;
- 2) 采集电能质量数据并进行归一化处理, 得到规范化矩阵 A ;
- 3) 选定权数非独裁性条件, 并构建竞争模型;
- 4) 在竞争视野下得到竞争力关注系数, 从而得到满足权数非独裁性条件的权重向量;
- 5) 求出所有待评估对象的权重向量, 组合成权重向量矩阵 W 。

由式(4)计算得到综合评估矩阵 Y :

$$Y = AW^T = [y_{ij}]_{n \times m} \quad (4)$$

式中: y_{ij} 是综合评估矩阵中的元素; n 是样本总数; m 是所考虑的指标总数。

传统的电能质量综合评估建模方法在评估过程中对各待评估对象的评估指标权重带有主观偏好, 各评估对象没有发言权, 无法表现自身特性, 不能发挥自主性作用。基于此, 文献[68]引入自主式决策思想对电能质量进行综合评估, 在一定程度上避免了主观偏好性, 保证评估、决策结果的客观真实性, 但其计算过程相对复杂, 计算量大。

4.3.2 基于突变决策理论的电能质量综合评估建模方法

突变决策是一种对待评估目标进行排序分析的综合分析方法, 该类方法首先对待评估目标进行多层次分解, 然后利用突变理论求取各层的突变指数, 最后通过自下向上的综合过程获得综合

评估结果。

针对复杂系统多属性决策中属性权重难以确定的情况,文献[69]选择采用突变决策方法进行分析建模,该方法具有严格的理论基础,可操作性强,不需要确定各单项指标的权重,从而减少了主观性,但是容易出现单一指标越限而多指标值较大却不越限的矛盾情况。

4.4 基于智能算法的电能质量综合评估建模方法

随着电力系统的不断发展,越来越多非线性负荷接入电网,传统电能质量综合评估方法在处理非线性问题上存在着明显的局限性,并且模型的更新工作也非常繁重,基于智能算法的电能质量综合评估建模方法模型更新速度快、适应性强,正适用于越来越复杂的电网结构。

4.4.1 基于投影寻踪模型的电能质量综合评估建模方法

投影寻踪是分析和处理高维数据的一类统计方法,其基本思想是将高维数据投影到低维子空间上,找到反映原高维数据特征或结构的投影,以达到分析和研究高维数据的目的。该类方法能够很好地解决指标多,指标关联结构复杂,指标体系呈现出高维、非线性特性等问题,但在处理小样本问题时容易产生模型误差,且在处理多元数据问题时很难找到最优投影方向。

遗传算法具有信息处理的隐并行性和鲁棒性强、全局搜索能力强、可规模化等优点,是解决传统投影寻踪模型在处理多个变量同时寻优时容易陷入局部极值问题的好办法。文献[70]采用加速遗传算法优化投影方向,建立了遗传投影寻踪插值模型,该模型首先构建投影数据并计算投影值,然后建立投影目标函数并利用加速遗传算法优化投影方向,最终建立电能质量综合评估模型。该模型采用大样本数据、精度较高、误差较小,具有很好的实用性和扩展性,但是计算量大,且能解决的问题有限。文献[71]利用特征值赋权对遗传投影寻踪模型得到的评估结果进行不同程度的综合加权,使评估结果更加准确。

4.4.2 基于混沌粒子群算法的电能质量综合评估建模方法

混沌粒子群算法通用性强、寻优速度快且具

有较强的全局搜索能力,也是解决投影寻踪模型固有问题的方法,但是投影寻踪法结合粒子群优化算法,存在“早熟收敛”的问题,并不能总是得到最优结果。

针对这一问题,文献[72]提出了一种基于自由搜索和投影寻踪模型优化的电能质量评估模型,利用自由全局优化搜索算法,建立基于自由搜索优化的投影寻踪模型,将高维评估指标投影到一维,具有全局收敛性的自由搜索,可以有效避免局部次优特性,优化最佳投影方向,实现电能质量的客观综合评估。

4.4.3 基于人工神经网络的电能质量综合评估建模方法

神经网络算法在理论上可以逼近任意函数,其基本结构由非线性变化单元组成,具有很强的非线性映射能力和自适应能力。基于人工神经网络的电能质量综合评估建模方法流程为:首先,根据统一分级标准建立原始数据集;然后,根据训练结果确定神经网络结构模型;最后,确定分界样本的模型输出值并根据模型进行电能质量的综合评估。

文献[73]结合了人工神经网络和模糊识别理论,构建了电能质量综合评估的模糊神经网络模型,该模型识别系统的柔性处理能力强,可以客观地反映各评估指标的关联性,具有很强的自组织、自学习、自适应能力。但基于人工神经网络法的模型在建立期间需要人为赋权,具有一定的主观性,建模过程还需要大量的训练样本,并且模型的物理意义也不够明确。

4.5 动态评估建模方法

近年来针对电能质量的研究大多局限于静态评估的方法,由于电力系统的不断发展,电能质量问题呈现明显的时空动态特性。相比于静态评估方法,动态综合评估可以体现出待评估对象的当前水平和历史水平,能够为研究人员提供更全面的参考信息。

4.5.1 基于二次加权的电能质量综合评估建模方法

二次加权法考虑了时序权重,对待评估对象在某一时期内的运行状况进行二次加权平均,第

一次加权平均的目的是突出各项评估指标在不同时刻的重要作用；第二次加权平均的目的是在第一次加权平均的基础上，再突出时间的作用。相较于其他动态评估建模方法，二次加权法更易操作、计算量小，但是该方法忽略了数据本身的动态变化，不适用于离散信息量大的评估问题^[74]。

4.5.2 基于双激励控制线的电能质量综合评估建模方法

针对离散信息很多的电能质量综合评估问题，文献[75]采用双激励控制线法对电能质量进行动态综合评估，该方法既适用于离散信息量大的评估问题，又能充分利用待评估对象的动态信息，同时引入时间因子反映决策者的时序偏好，在体现决策偏好的同时突出待评估对象的差异，提高对质量相近的待评估对象的辨别能力，但是该方法计算过程较复杂，实用性较差。

4.5.3 基于竞争机制的电能质量综合评估建模方法

针对使用传统评估方法以固定界限划分对象的评估等级时，可能出现对于单个指标而言待评估对象群体的评估结果比较接近，从而丧失区分度的问题，文献[76]将竞争机制引入电能质量综合评估方法中，侧重于构成电能质量水平的各项指标在群体当中的排位，并重视单一指标数据的好坏，有效提高了对于电能质量相近的待评估对象的辨别能力，同时有利于发现存在的主要电能质量问题以及薄弱环节，并推动待评估对象电能质量的提高。但是当待评估对象的质量水平差距较大时，在分界处的2个对象之间序位仅差1，此时该方法无法体现出待评估对象之间的真实差距。

4.5.4 基于云模型的电能质量综合评估建模方法

现有研究对于电能质量各项指标等级划分的边界过硬，难以满足复杂电力系统动态变化、柔性可调的要求，无法客观反映电力系统及电力设备的运行状态。基于此，文献[77]提出了电能质量云评估方法，该方法采用定性和定量评估相结合的方式，得到了电能质量准确量化的评估结果，使综合评估结果更加准确，最重要的是克服了各指标评估等级划分边界过硬的缺陷，使其更贴近

电能质量评估的实际情况，客观地反映了电能质量评估过程的动态性、复杂性和耦合性，但该模型建模过程复杂，实用性较差。

动态综合评估是一类很有应用价值和现实意义的问题，这一内容虽引起了研究人员的重视，但由于方法和模型都较静态评估方法更复杂，因此，应用性不广，研究成果尚不多见。

4.6 评估方法对比分析

由以上分析可知，基于数学理论的电能质量综合评估建模方法、基于决策理论的电能质量综合评估建模方法、基于智能算法的电能质量综合评估建模方法和动态评估建模方法各有其优缺点，现对以上四大类方法进行比较，具体情况见表2。

表2 4类评估建模方法的比较

Tab. 2 Comparison of four assessment modeling methods

评估方法	优点	缺点
基于数学理论	原理清晰、计算相对简单	各种数学方法有其固有缺陷
基于决策理论	有效减小主观因素对评估结果的影响	计算过程相对复杂，计算量大
基于智能算法	模型更新速度快、自适应能力强	模型的物理意义不够明确，建模过程需要大量训练样本
动态评估建模方法	提供更全面的参考信息	方法和模型都较复杂

5 研究展望

电能质量综合评估结果对指导电能质量治理工作有着极其重要的作用，虽然国内外对于电能质量综合评估的研究已经取得了许多成果，但是该领域仍有一些被忽视的重要问题，如大量电力电子设备接入引发的一系列暂态问题、各指标之间的相互影响、数据质量和融合问题等，所以在电能质量综合评估领域仍有很大的研究空间。笔者认为未来电能质量综合评估可以在以下几个方面展开深入研究：

1) 提高电能质量综合评估过程所需数据的质量

电能质量综合评估基于海量的监测数据，数据质量将直接影响综合评估的结果。在实际监测过程中，由于周围环境、设备自身问题以及工作人员操作等影响，所测得数据中不可避免地存在

着质量问题,可能带来错误的评估结果。

目前已有的提高电能质量数据准确率及质量的方案有异常数据的预处理、去噪、减轻数据冗余、数据分布式采集及并行处理等。但目前对于电能质量数据的研究还停留在理论层面,针对电力系统电能质量数据管理系统进行信息处理时遇到的技术性问题仍有空白,如何实现多源数据快速有效地更新存储以及精确溯源仍是难题。因此,在电能质量综合评估过程中考虑数据质量,将其进行分级并纳入电能质量综合评估结果中是未来值得关注的研究方向。

2) 考虑多源数据的融合问题

电力系统的监测数据来源多种多样,采用多源数据融合技术可以将各种不同的数据信息进行综合,吸取不同数据源的特点,然后从中提取出比单一数据更好、更丰富的统一信息。

目前已有研究实现了供电公司、敏感用户及治理产商之间价值数据的交互,得到了更加丰富的电能质量数据信息。关于电能质量多源数据融合问题的研究仍在起步阶段,未来可以考虑引入电力市场交易数据、配电公司管理数据等,实现更大范围的价值数据交互,为电能质量综合评估工作提供更加合理的数据支持。

3) 考虑将用户满意度纳入电能质量评估体系

电力用户作为消耗电能的主体,他们的意见是必不可少的,从用户的角度评估电能质量是否符合预期,将用户满意度纳入电能质量评估指标体系,可以更加全面地反映电能质量的优劣,为电能质量治理工作提供量化依据。

4) 考虑治理成本和经济效益的电能质量综合评估方法

电能质量问题最终可以归结为经济问题,要求的电能质量等级越高,所要投入的治理成本越大,在电能质量综合评估过程中综合考虑电能质量等级和治理成本的经济效益,不同场景选取不同的电能质量等级,对售电市场的电价制定将有重要的参考作用。

5) 充分考虑分布式电源大规模并网的情况

在分布式电源大规模并网的工况下,由于分布式电源固有的随机性、间歇性及不确定性,会

导致电网出现电压跌落、电压抑制等多种电压的随机变化问题,若仅提取某一时间截面的数据作为综合评估的数据,会导致不同时段的评估结果不一致。现有研究截取监测点的多个时间断面数据对电能质量进行综合评估,但如何对分布式电源并网情况进行长时间尺度的评估仍存在技术空白。

由于分布式电源在不同气象条件下及一天中不同时刻对电能质量的影响不同,因此,未来可以考虑针对不同的气象条件及一天中不同时刻,设计不同的电能质量分级标准,从而得到更加合理的电能质量综合评估结果。

6) 考虑能源互联网的电能质量综合评估方法

能源互联网可理解为综合运用先进的电力电子技术、信息技术和智能管理技术,将由分布式能量采集装置、分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络、石油网络、天然气网络等能源节点互联起来,以实现能量双向流动的能量对等交换与共享网络。由于电能和其他能源的深度耦合,电能质量问题会对其他能源的供应和消费产生影响,同时其他能源也会对电能质量等级产生影响,随着能源互联网的发展,综合考虑电能与其他能源耦合关系的电能质量综合评估方法有待进一步研究。

6 结论

通过绘制电能质量综合评估指标的赋权方法以及建模方法分类图,综述了电能质量综合评估的内容和方法,具体有以下结论:

1) 电力电子设备的大量接入将引发一系列暂态问题,然而目前现存的电能质量综合评估方法大多只考虑5个常用的稳态指标,故后续研究应加强对暂态电能质量指标的研究。

2) 主客观及组合赋权法有其各自的优点和不足,组合赋权法克服了单一主客观赋权法的缺陷,但针对组合赋权法的主客观权重分配问题仍有待进一步研究。

3) 关于电能质量综合评估建模方法的研究大多局限于静态评估,由于电网的快速发展,近年来电能质量问题表现为明显的时空动态特性,故

涌现出一系列动态综合评估方法以适应电网现状,但其评估结果主观性相对较强,还需进一步研究。

参考文献

- [1] 马锐, 李相俊, 李文启, 等. 可再生能源供电区域电网中储能系统协同调度策略[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 31-39.
- MA R, LI X J, LI W Q, et al. Cooperative scheduling strategy of energy storage systems for regional grid supplied by renewable energy[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 31-39.
- [2] 董光德, 李道明, 陈咏涛, 等. 基于粒子群优化与卷积神经网络的电能质量扰动分类方法[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 136-142.
- DONG G D, LI D M, CHEN Y T, et al. Power quality disturbance classification method based on particle swarm optimization and convolutional neural network[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 136-142.
- [3] 张敏, 祗会强, 张世锋, 等. 考虑配电网电能质量改善的分布式光伏优化调度方法[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 147-157.
- ZHANG M, ZHI H Q, ZHANG S F, et al. Optimal scheduling method for distributed photovoltaic generation in distribution network considering power quality improvement[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 147-157.
- [4] 刘颖英, 戴平, 徐永海, 等. 电能质量综合评估方法比较[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 93-97.
- LIU Y Y, DAI P, XU Y H, et al. Comparison of comprehensive evaluation methods of power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 93-97.
- [5] 张成, 赵涛, 朱爱华, 等. 弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 224-230.
- ZHANG C, ZHAO T, ZHU A H, et al. Stability and power quality control of parallel inverters in weak current network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 224-230.
- [6] 吴怀诚, 刘家强, 岳蕾, 等. 基于多特征融合的卷积神经网络的电能质量扰动识别方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 19-23.
- WU H C, LIU J Q, YUE L, et al. Identification of power quality disturbances based on MFCNN[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 19-23.
- [7] 奚鑫泽, 邢超, 覃日升, 等. 基于多层特征融合注意力网络的电能质量扰动识别方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 37-44.
- XI X Z, XING C, QIN R S, et al. Power quality disturbance recognition method based on multi-layer feature fusion attention network[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 37-44.
- [8] 陈向群, 杨茂涛, 刘谋海, 等. 基于模糊聚类分析的电能质量扰动模式识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 79-85.
- CHEN X Q, YANG M T, LIU M H, et al. Disturbance pattern recognition method of power quality based on the fuzzy clustering analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 79-85.
- [9] 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 Y Y, FENG D D, LIN C H, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [10] 李养俊, 何子春, 张强, 等. 火力发电厂电能质量测试与评估分析[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 135-139.
- LI Y J, HE Z C, ZHANG Q, et al. Test and evaluation of power quality in thermal power plant[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 135-139.
- [11] 徐昌宝, 丁健, 潘成达, 等. 基于大数据深化分析的电能质量扰动辨识方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12): 33-40.
- XU C B, DING J, PAN C D, et al. Research on the power quality disturbance identification method based on big data deepening analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12): 33-40.
- [12] 逯玉兰. 基于改进的可拓层次分析法的电能质量综合评估[J]. 软件, 2019, 40(5): 16-20.
- LU Y L. Power quality integrated evaluation based on the improved AHP, 2019, 40(5): 16-20.
- [13] 吴传来, 杨洪耕, 张云红. 考虑指标质量影响权重的电能质量综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 97-102.
- WU C L, YANG H G, ZHANG Y H. Comprehensive evaluation of power quality considering the influence weight of index quality[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 33(25): 78-92.
- [14] 杨丽徙, 郭建宇, 程杰. 证据理论和层次分析法相结合的新农村电气化电能质量评估[J]. 电力系统保护与

- 控制, 2009, 37(14): 26-30.
- YANG L X, GUO J Y, CHENG J. Power quality evaluation of electrification in new countryside based on evidence theory and analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 26-30.
- [15] 蒋亚坤, 李文云, 赵莹, 等. 粗糙集与证据理论结合的电网运行优质性综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 1-7.
- JIANG Y K, LI W Y, ZHAO Y, et al. Evaluation of power quality performance based on rough set and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 1-7.
- [16] 何吉彪, 程浩忠, 姚良忠, 等. 基于两种改进方法的电能质量综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 18-22.
- HE J B, CHENG H Z, YAO L Z, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on two improved methods[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 18-22.
- [17] MILANOVIĆ J V, ABDELRAHMAN S, LIAO H. Compound index for power quality evaluation and benchmarking[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(19): 4269-4275.
- [18] 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.
- [19] 孙强, 葛旭波, 刘林, 等. 智能电网多属性网络层次组合评价法及其应用研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 49-54.
- SUN Q, GE X B, LIU L, et al. Multi-attribute network process comprehensive evaluation method for smart grid and its application[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 49-54.
- [20] 曾巧燕, 杨洪耕, 杨雪萍, 等. 考虑指标关联性的电能质量综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(7): 73-78.
- ZENG Q Y, YANG H G, YANG X P, et al. Comprehensive evaluation on power quality considering the relevance of indexes[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(7): 73-78.
- [21] 李连结, 姚建刚, 龙立波, 等. 组合赋权法在电能质量模糊综合评价中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 29(4): 56-60.
- LI L J, YAO J G, LONG L B, et al. Application of combined weighting method in fuzzy comprehensive evaluation of power quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 29(4): 56-60.
- [22] 韩一鸣, 徐鹏飞, 宫建锋, 等. 基于用户侧需求的电网发展经营综合评价体系研究[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 636-644.
- HAN Y M, XU P F, GONG J F, et al. Research on comprehensive evaluation system of power grid development and operation based on user demand[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 636-644.
- [23] 张涛, 程志友, 梁栋, 等. 非线性主成分分析在电能质量综合评估中的应用[J]. 电测与仪表, 2008, 31(6): 5-9.
- ZHANG T, CHENG Z Y, LIANG D, et al. The application of nonlinear PCA in synthetic evaluation of power quality[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 31(6): 5-9.
- [24] 舒服华. 粗糙集在电能质量综合评价中应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 31(10): 75-79.
- SHU F H. Application of rough set in comprehensive evaluation of power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 31(10): 75-79.
- [25] 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 H S, LI J X, MI Z Q, et al. Grading evaluation method of power quality based on critical and improved grey TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 1-8.
- [26] 李琼林, 代双寅, 丁同, 等. 基于主客观组合赋权法的低压配电网电能质量能耗综合评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(12): 52-59.
- LI Q L, DAI S Y, DING T, et al. Comprehensive evaluation of power quality and energy consumption of low voltage distribution network based on subjective and objective combination weighting method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(12): 52-59.
- [27] 康世葳, 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 S W, PENG J C, HE Y Q. Comprehensive evaluation of power quality based on fuzzy analytic hierarchy process and multi-objective decision-making[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 113-118.
- [28] 刘兵, 李群湛, 董祥. 基于时变权重的电能质量综合评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 6-9.
- LIU B, LI Q Z, DONG X. Comprehensive

- assessment study of the power quality based on the time-varying weight[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(14): 6-9.
- [29] 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.
- [30] 梁海峰, 刘子嫣. 基于AHP-熵权法-模糊综合分析的智能配电网综合效益评估[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2021, 25(18): 1-8.
- LIANG H F, LIU Z Y. Comprehensive benefit evaluation of intelligent distribution network based on AHP entropy weight method fuzzy comprehensive analysis[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural and Science)*, 2021, 25(18): 1-8.
- [31] 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.
- [32] GE B, PAN T, LI Z. Synthetic assessment of power quality using relative entropy theory[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2015, 11(4): 1323-1331.
- [33] 李娜娜, 何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. *电网技术*, 2009, 33(6): 55-61.
- LI N N, HE Z Y. Comprehensive evaluation of power quality based on subjective and objective weights[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(6): 55-61.
- [34] 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.
- GUO H Y, CHENG H Z, MA Z L, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on probability theory and combined weighting method[J]. *Smart Grid*, 2017, 5(6): 524-528.
- [35] 王睿, 方洁, 张可, 等. 基于熵权和AHP的电能质量模糊综合评估[J]. *电测与仪表*, 2007, 31(11): 21-25.
- WANG R, FANG J, ZHANG K, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of power quality based on entropy weight and AHP[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2007, 31(11): 21-25.
- [36] 荆朝霞, 胡仁. 基于二阶段法的电能质量评估及其灵敏度分析[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(7): 57-62.
- JING Z X, HU R. Power quality evaluation and sensitivity analysis based on two-stage method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(7): 57-62.
- [37] 熊以旺, 程浩忠, 王海群, 等. 基于改进AHP和概率统计的电能质量综合评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(13): 48-52.
- XIONG Y W, CHENG H Z, WANG H Q, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on Improved AHP and probability statistics[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(13): 48-52.
- [38] 陈磊, 徐永海. 浅谈电能质量评估的方法[J]. *电气应用*, 2005, 33(1): 58-61.
- CHEN L, XU Y H. On the methods of power quality evaluation[J]. *Electrical Application*, 2005, 33(1): 58-61.
- [39] 贾清泉, 宋家骅, 兰华, 等. 电能质量及其模糊方法评价[J]. *电网技术*, 2000, 31(6): 46-49.
- JIA Q Q, SONG J H, LAN H, et al. Power quality and its fuzzy evaluation method[J]. *Power System Technology*, 2000, 31(6): 46-49.
- [40] FARGHAL S A, KANDIL M S, ELMITWALLY A. Quantifying electric power quality via fuzzy modeling and analytic hierarchy processing[J]. *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 2002, 149(1): 44-49.
- [41] SHEN C R, HU L X. Power quality comprehensive evaluation method based on fuzzy mathematics and cloud theory[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1684(1): 49-57.
- [42] MORSI W G, EL-HAWARY M E. Power quality evaluation in smart grids considering modern distortion in electric power systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81(5): 1117-1123.
- [43] 江辉, 彭建春, 欧亚平, 等. 基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2003, 23(1): 66-70.
- JIANG H, PENG J C, OU Y P, et al. Normalized quantization and evaluation of power quality based on probability statistics and vector algebra[J]. *Journal of Hunan University (Natural and Science)*, 2003, 23(1): 66-70.
- [44] 王勇, 刘金宁, 曹曼, 等. 基于概率论与证据理论的风电场电能质量评估方法研究[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(3): 65-70.
- WANG Y, LIU J N, CAO M, et al. Research on power quality evaluation method of wind farm based on probability theory and evidence theory[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural and Science)*, 2012, 39(3): 65-70.
- [45] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 基于模糊集对分析法

- 的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 81-85.
- LIU J H, LUO L F, ZHANG Z W, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on Fuzzy set pair analysis[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 81-85.
- [46] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 一种考虑排序稳定分析的电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 70-76.
- LIU J H, LUO L F, ZHANG Z W, et al. A new comprehensive evaluation method of power quality considering sequencing stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 70-76.
- [47] 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 Z Y, LIU D D, WU J, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on set pair analysis and variable fuzzy set[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1950-1956.
- [48] 雷刚, 顾伟, 袁晓冬. 灰色理论在电能质量综合评估中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 62-65.
- LEI G, GU W, YUAN X D. Application of grey theory in comprehensive evaluation of power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 62-65.
- [49] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73.
- SHEN Y W, PENG X T, SHI T Q, et al. Grey comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 67-73.
- [50] LIU S F, LIN Y. An introduction to grey systems theory[M]. Grove City: IIGSSA Academic Publisher, 1998: 39-44.
- [51] 周辉, 杨洪耕, 吴传来. 基于灰色聚类的电能质量综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 70-75.
- ZHOU H, YANG H G, WU C L. Comprehensive evaluation method of power quality based on grey clustering[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 70-75.
- [52] 黄沁悦, 周福林, 刘双玲, 等. 基于区间灰色证据组合模型的电能质量评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 8-15.
- HUANG Q Y, ZHOU F L, LIU S L, et al. Power quality evaluation method based on interval grey evidence combination model[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 8-15.
- [53] JASIŃSKI M, SIKORSKI T, BORKOWSKI K. Clustering as a tool to support the assessment of power quality in electrical power networks with distributed generation in the mining industry[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 166(15): 52-60.
- [54] CAI W. The extension set and non-compatible problems [M]. Beijing: International Academic Publishers, 1999: 46-49.
- [55] 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, 33(6): 25-29.
- HUANG J, ZHOU L, LI Q H, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on matter-element analysis theory[J]. Journal of Chong Qing University (Natural and Science), 2007, 33(6): 25-29.
- [56] 丁立, 贾秀芳, 赵成勇, 等. 基于可拓学的电能质量综合评价[J]. 电力自动化设备, 2007, 22(12): 44-47.
- DING L, JIA X F, ZHAO C Y, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on Extenics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 22(12): 44-47.
- [57] 李泓泽, 郭森, 唐辉, 等. 基于改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 653-659.
- LI H Z, GUO S, TANG H, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on improved variable weight matter-element extension model[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 653-659.
- [58] 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 R Q, SU H Y. Comprehensive evaluation of power quality based on improved variable weight matter-element extension model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 66-70.
- [59] 李国栋, 李庚银, 杨晓东, 等. 基于雷达图法的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 70-74.
- LI G D, LI G Y, YANG X D, et al. Comprehensive evaluation model of power quality based on radar chart method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 70-74.
- [60] 程志友, 朱唯韦, 陶青, 等. 基于改进雷达图的配电系统电能质量评估方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 34-39.

- CHENG Z Y, ZHU W W, TAO Q, et al. Power quality evaluation method of distribution system based on improved radar chart[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(14): 34-39.
- [61] 乔鹏程, 吴正国, 李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综合评估方法[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(6): 88-92.
- QIAO P C, WU Z G, LI H. Power quality evaluation method of distribution system based on improved radar chart[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(6): 88-92.
- [62] 刘蓉晖, 王毅超. 基于改进雷达图法与高斯隶属度相结合的电能质量综合等级评估[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(14): 69-74.
- LIU R H, WANG Y C. Comprehensive grade evaluation of power quality based on improved radar chart method and Gaussian membership degree[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(14): 69-74.
- [63] 李正明, 施诗, 潘天红, 等. 基于灰色关联度和理想解法的电能质量综合评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(6): 14-19.
- LI Z M, SHI S, PAN T H, et al. Comprehensive evaluation method of power quality based on grey correlation degree and ideal solution[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(6): 14-19.
- [64] 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 J. Research on power quality evaluation method based on cooperative game and improved TOPSIS [J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(20): 109-115.
- [65] 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 X Q, CHEN H Y. Comprehensive evaluation of power quality based on ideal solution[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(4): 26-30.
- [66] 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 X Q, CHEN H Y. Comprehensive evaluation of power quality based on weighted rank sum ratio method [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(1): 128-132.
- [67] 柴鹏飞, 孙雅娟, 沈可, 等. 基于数据包络分析的电能质量综合评估方法研究[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(4): 124-128.
- CHAI P F, SUN Y J, SHEN K, et al. Research on comprehensive evaluation method of power quality based on data envelopment analysis[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(4): 124-128.
- [68] 欧阳森, 廖一键, 杨洋, 等. 基于自主式决策的综合评价方法在电能质量领域的分析与运用[J]. *电网技术*, 2012, 36(2): 70-74.
- OUYANG S, LIAO Y J, YANG Y, et al. Analysis and application of comprehensive evaluation method based on autonomous decision-making in the field of power quality[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(2): 70-74.
- [69] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 基于突变决策的分布式发电系统电能质量综合评估[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(21): 52-57.
- ZENG Z, YANG H, ZHAO R X. Analysis and application of comprehensive evaluation method based on autonomous decision-making in the field of power quality[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(21): 52-57.
- [70] 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, 32(7): 32-35.
- ZHOU L, LI Q H, ZHANG F. Application of genetic projection pursuit interpolation model in comprehensive evaluation of power quality[J]. *Power System Technology*, 2007, 32(7): 32-35.
- [71] 李国栋, 刘颖英, 顾强, 等. 遗传投影寻踪和特征值赋权法综合评估地区谐波[J]. *高电压技术*, 2008, 30(2): 329-333.
- LI G D, LIU Y Y, GU Q, et al. Comprehensive evaluation of regional harmonics by genetic projection pursuit and eigenvalue weighting method[J]. *High Voltage Technology*, 2008, 30(2): 329-333.
- [72] YUN J Y, CHAO T, YUN T X, et al. A projection pursuit model optimized by free search: for the regional power quality evaluation[J]. *The Open Cybernetics & Systemics Journal*, 2015, 9(1): 1422-1427.
- [73] 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, 30(9): 66-69.
- ZHOU L, LI Q H, LIU H Y, et al. Evaluation of power quality using fuzzy neural network model[J]. *High Voltage Technology*, 2007, 30(9): 66-69.
- [74] 饶岫, 王勇. DWATrust: 一种基于“二次加权法”的P2P网络动态综合信任模型[J]. *计算机科学*, 2011, 38(6): 122-126.
- RAO S, WANG Y. DWATrust: doubly weighted average based dynamic comprehensive trust model for

- P2P network[J]. Computer Science, 2011, 38(6): 122-126.
- [75] 欧阳森, 石怡理, 刘洋. 基于双激励控制线的区域电网电能质量动态综合评价方法[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 205-210.
- OUYANG S, SHI Y L, LIU Y. Dynamic comprehensive evaluation method of power quality in regional power grid based on double excitation control line[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 205-210.
- [76] 欧阳森, 杨家豪, 石怡理. 基于竞争机制的电能质量动态评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 1-7.
- OUYANG S, YANG J H, SHI Y L. Dynamic evaluation method of power quality based on competition mechanism[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(2): 1-7.
- [77] 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 Y C, WU R J, CHANG B L. Cloud evaluation service model and method of power quality knowledge in complex power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 241-247.

收稿日期: 2023-09-22。

修回日期: 2023-11-25。

作者简介:



肖白

肖白(1973), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划、空间电力负荷预测、多种能源互补协调发电、电能质量综合治理、电价套餐设计, xbxiaobai@126.com;



赵雪纯

赵雪纯(1999), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与治理, zhaoxuechun0@163.com;



董光德

董光德(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电能质量分析与治理, 1012423917@qq.com。

(责任编辑 辛培裕)