基于组合赋权-VIKOR的电能质量综合评估

钱俊杰[1]，李昊泉[1]，李广华[1,2]，徐懂理[1]，吕干云[1]
（1. 南京工程学院 电力工程学院，江苏 南京 211167；
2. 南京南瑞继保电气有限公司，江苏 南京 211102）

摘要：针对大量高渗透率的分布式电源接入配电网导致的电能质量恶化问题，提出了一种基于组合赋权和多准则妥协解排序（VIKOR）法相结合的电能质量评估方法。首先，根据现有标准和工程实际情况，从幅值质量、波形质量和频率质量3个维度建立电能质量综合评估体系。其次，考虑到传统的9标度层次分析（AHP）法存在的缺陷，采用3标度对AHP法进行改进从而得到主观权重；为了避免单一赋权方法的不足，将熵权法中的熵值与指标相关法（CRITIC）中的信息量相结合得到客观权重，该方法统筹考虑了指标间的离散程度、相关度和对比度，并采用Lagrange乘子法将主客观权重进行结合。然后，采用VIKOR法得到各电能质量指标的综合评价值并对其进行优劣排序。最后，利用某地区的5个监测点所采集的电能质量各指标数据进行实例分析并与其他评价方法进行对比分析，验证了所提方法的可行性。

关键词：组合赋权；改进层次分析法；熵权法；CRITIC法；VIKOR法；综合评估
中图分类号：TM712　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.19457/j.1001-2095.dqcd24821

Comprehensive Evaluation of Power Quality Based on Combination Weights and VIKOR Method

QIAN Junjie[1]，LI Haoquan[1]，LI Guanghua[1,2]，XU Dongli[1]，LÜ Ganyun[1]
（1.*School of Electric Power Engineering*，*Nanjing Institute of Technology*，*Nanjing* 211167，*Jiangsu*，*China*；2.*NR. Electric Co.*，*Ltd.*，*Nanjing* 211102，*Jiangsu*，*China*）

Abstract：Aiming at the problem of power quality deterioration caused by a large number of high-permeability distributed generation connected to the distribution network，a power quality assessment method based on combination weights and vlsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje（VIKOR）method was proposed. Firstly，according to the existing standards and the actual engineering situation，a comprehensive evaluation system of power quality was established from three dimensions：amplitude quality，waveform quality and frequency quality. Secondly，considering the defects of the traditional nine-demarcation analytic hierarchy process（AHP）method，the three-demarcation was used to improve the AHP method to obtain the subjective weight. In order to avoid the shortcomings of the single weighting method，the objective weight was obtained by combining the entropy value in the entropy weight method with the amount of information in the criteria importance though intercrieria correlation（CRITIC）method. This method considered the degree of dispersion，correlation and contrast between the indicators，and the subjective and objective weights were combined by the Lagrange multiplier method. Then，the VIKOR method was used to obtain the comprehensive evaluation value of each power quality index and sort its merits and demerits. Finally，the power quality index data collected by five monitoring points in a certain area were used for case analysis and compared with other evaluation methods to verify the feasibility of the proposed method.

Key words：combination weights；improved analytic hierarchy process（AHP）method；entropy weight method（EWM）；criteria importance though intercrieria correlation（CRITIC）method；vlsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje（VIKOR）method；comprehensive evaluation

基金项目：国家自然科学基金（51577086）；江苏省高等学校自然科学研究重大项目（19KJA510012）；
南京工程学院研究生科技创新基金（TB202217044）
作者简介：钱俊杰（1999—），男，硕士研究生，主要研究方向为电能质量控制与优化，Email：1850372033@qq.com

以光伏为代表的新能源分布式发电向用户提供“绿色电力”，有助于实现“碳达峰、碳中和”的双碳目标。随着环境保护和能源需求的日益增长，建立包含分布式电源（distributed generation，DG）的新型智能电网已成为电力系统未来的发展方向。大量DG的并网运行使得传统的无源配电网变成覆盖大量中小电源和负载的有源多路配电网[1]，DG的高渗透率对配电网产生了较大影响，加剧了电能质量的恶化。此外，以光伏为主要发电形式的DG易受到环境等不稳定因素的影响，光照的随机性和间歇性导致DG的输出功率波动严重，对电网的安全运行、供电质量和经济性造成一定的威胁，因此，对电能质量进行客观合理的评估，确保电网安全稳定运行并为电能质量优化奠定基础具有重要意义。

现如今国内外学者针对电能质量综合评估方法进行了大量研究，研究核心均是对电能质量各单一指标评估问题赋权结合成多指标问题进行分析并建立客观合理的综合评估体系，目前采用的主要方法有模糊数学法[2-3]、层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）[4-6]、熵权法[7-9]、秩和比法[10-11]、逼近理想解距离法（technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS）[12-16]、概率统计法[17]、粗糙集理论[18]等。其中，文献[2]将三角模糊数的概念引入AHP法形成模糊层次分析法，该方法解决了传统AHP法中主观的模糊不确定性问题，但方法中的隶属度函数易受主观因素影响导致评估结果的客观性不足；文献[4]采用传统9标度的AHP法对电能质量各指标的重要性进行排序并形成判断矩阵，从而得到各指标的权重，但当判断矩阵不符合一致性检验时，很难判断出矩阵不一致的原因，且当需评估的指标较多时，传统AHP法的计算量较大，计算较复杂；针对传统AHP法存在的缺陷，相关学者对其进行了改进，文献[6]通过改进的3标度来代替传统的9标度，避免了由于指标间的重要性相近而导致的专家评价出现偏差的缺陷，但其仅采用了主观赋权法，过于依赖专家的主观经验而脱离了实际数据特征导致评估结果不够客观；文献[10]采用秩和比法，但该方法在迭代时易损失信息从而对评估结果产生影响；文献[16]将熵权法与TOPSIS法进行结合，但传统的TOPSIS法在当指标处于正、负理想解的中垂线上时无法区分指标的优劣。

在多指标评估体系的研究中，TOPSIS法和多准则妥协解排序法（vlsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje，VIKOR）是两类常用的指标排序方法。TOPSIS法根据评估对象与理想化目标的接近程度进行排序，当评估对象接近正理想解且距离负理想解最远时，该评估对象最优，但当评估指标过多时这样的约束可能导致评估结果不合理[19]；而VIKOR法可以直接对评估指标间的交叉影响进行处理，其并不是简单地对评估对象与正、负理想解之间的距离进行比较，而是通过多角度综合考虑评估对象与正理想解，从而得到各指标互相让步的折中妥协解[20]。

由于不同决策者对电能质量各指标的评价准则的不同，为了能够客观合理地对电能质量进行评估，提出了一种当决策者对评价准则间产生冲突时能折中解决的方案，即将组合赋权和VIKOR法相结合的电能质量综合评估方法。首先采用3标度对传统的AHP法进行改进形成主观权重，将熵权法中的熵值与指标相关法（criteria importance though intercrieria correlation，CRITIC）中的信息量兼顾形成客观权重，该方法统筹考虑了指标间的离散程度、相关度和对比度，并用Lagrange法将主、客观权重有机结合；其次采用VIKOR法对电能质量各指标的综合评价值进行优劣排序；最后通过实际算例验证了该方法的可行性和有效性。

1　电能质量综合评估指标体系

大量DG接入配电网加剧了电能质量的恶化，较低的电能质量会严重影响用户的用电体验，甚至影响工业生产，造成不可逆的设备损坏和经济损失。本文从幅值质量、波形质量和频率质量3个维度建立了电能质量综合评估指标体系，其中，幅值质量考虑了配电网的电压偏差和三相不平衡，波形质量包含电压波动、电压闪变和谐波电压，频率质量考虑了配电网的频率偏差。上述6个电能质量指标不仅存在差异性，指标间还存在着关联性，电能质量综合评估指标体系如图1所示。

根据国家标准，电能质量可大致分为5个等级，分别是优秀Ⅰ、良好Ⅱ、中等Ⅲ、合格Ⅳ以及不合格Ⅴ。本文所采用的频率偏差、电压偏差、电压波动、电压闪变、谐波电压和三相不平衡的各等级取值范围如表1所示。

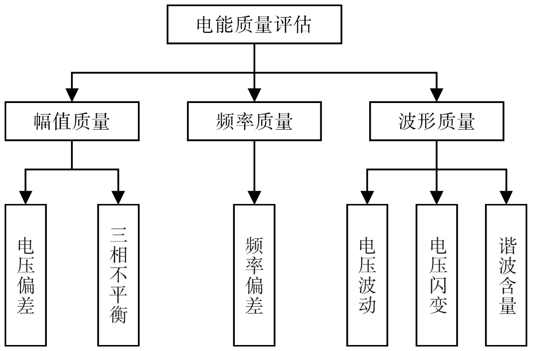

图1　电能质量综合评估指标体系

Fig.1　Index system of power quality comprehensive evaluation

表1　电能质量指标等级

Tab.1　Index level of power quality

等级	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/%
Ⅰ	≤0.05	≤1.2	≤1	≤0.2	≤1	≤0.5
Ⅱ	≤0.1	≤3	≤1.5	≤0.5	≤2	≤1
Ⅲ	≤0.15	≤4.5	≤2	≤0.8	≤3	≤1.5
Ⅳ	≤0.2	≤7	≤2.5	≤1	≤5	≤2
Ⅴ	≥0.2	≥7	≥2.5	≥1	≥5	≥2

2　电能质量各指标的权重计算

对于m个监测点、n个电能质量指标,为了避免电能质量各指标量纲的不同而影响最终的评估结果,在求取权重之前需要对各指标实际参数进行无量纲化处理,即参数的归一化。一般采用临界值法,即min-max法对参数进行无量纲化处理,方法如下:

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_{ij})}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \tag{1}$$

$$x'_{ij}=\frac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})} \tag{2}$$

其中

$$i=1,2,\cdots,m$$
$$j=1,2,\cdots,n$$

式中:x_{ij}为监测点i第j个电能质量指标数值;x'_{ij}为监测点i第j个电能质量指标归一化后的数值。式(1)为正向指标,其数值越大越好;式(2)为逆向指标,其数值越小越好。本文选用的6个电能质量指标均为逆向指标。

2.1　基于改进AHP法的主观权重

由于电能质量各指标间的重要性差距微乎其微,采用传统9标度的AHP法对电能质量各指标进行两两比较会使专家在评估过程中难以把握指标间的重要程度,最终导致评估结果出现误差。所以采用改进后的AHP法,用重要、同等重要和不重要3个标度代替传统的9标度,其对应的标度分别为1,0,-1[21]。该改进方法只需要专家在两两比较过程中作出重要、同等重要与不重要的三选一判断,而不需要对重要程度进行抉择,使得判断矩阵更加直观简洁[6]。其步骤如下:

1)根据3标度对指标的重要程度进行两两比较并构造$n\times n$阶判断矩阵$\boldsymbol{A}$:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中

$$i=1,2,\cdots,n$$
$$j=1,2,\cdots,n$$

$a_{ij}=1$表示矩阵$\boldsymbol{A}$中i元素比j元素重要;$a_{ij}=0$表示i元素与j元素同等重要;$a_{ij}=-1$表示i元素没有j元素重要。

2)构建判断矩阵$\boldsymbol{A}$的最优传递矩阵$\boldsymbol{B}$:

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & b_{ij} & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中

$$b_{ij}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a_{ik}-a_{jk})=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a_{ik}+a_{kj}) \tag{5}$$

3)最优传递矩阵$\boldsymbol{B}$的判断矩阵$\boldsymbol{D}$:

$$\boldsymbol{D}=\mathrm{e}^{\boldsymbol{B}} \tag{6}$$

4)求取第j个指标主观权重值$\boldsymbol{W}'_j$:

$$\boldsymbol{W}'_j=\frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n}d_{ij}}}{\sum_{j=1}^{n}\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n}d_{ij}}} \tag{7}$$

式中:d_{ij}为判断矩阵$\boldsymbol{D}$中第i行第j列元素。

2.2　基于Entropy-CRITIC的客观权重

熵权法和CRITIC法是常见的客观赋权法,熵权法主要利用熵(Entropy)来计算指标的权重,能很好地反映指标间的离散程度,但很多指标间还具有关联性和对比性;与熵权法相反,CRITIC法通过信息量来计算指标的权重,其能很好地反映指标间的关联性和对比性。故将熵权法与CRITIC法相结合,统筹兼顾指标间的离散程度与关联性和对比性,使得客观赋权更加合理。其步骤如下:

1)根据式(1)与式(2)将指标数据进行无量

纲化处理；

2)计算概率矩阵$\boldsymbol{p}$，即每个指标所占比重：

$$p_{ij}=x'_{ij}/\sum_{i=1}^{m}x'_{ij} \tag{8}$$

3)计算每个指标的熵值$\boldsymbol{e}_j$：

$$\boldsymbol{e}_j=-K\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln(p_{ij})\geqslant 0 \tag{9}$$

其中 $K=\dfrac{1}{\ln m}>0$

当$p_{ij}=0$或$p_{ij}=1$时，$p_{ij}\ln(p_{ij})=0$。

4)计算指标变异性，即标准差$\boldsymbol{S}_j$：

$$\boldsymbol{S}_j=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(x'_{ij}-\bar{x}_j\right)^2}{m-1}} \tag{10}$$

$$\bar{x}_j=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}x'_{ij} \tag{11}$$

5)计算指标冲突性，即相关系数$\boldsymbol{R}_j$：

$$\boldsymbol{R}_j=\sum_{j^*=1}^{n}(1-r_{j^*j}) \tag{12}$$

$$r_{j^*j}=\frac{\sum_{i=1}^{m}(x'_{ij^*}-\bar{x}_{j^*})(x'_{ij}-\bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(x'_{ij^*}-\bar{x}_{j^*})^2\sum_{i=1}^{m}(x'_{ij}-\bar{x}_j)^2}} \tag{13}$$

式中：x'_{ij^*}，x'_{ij}为监测点i第j^*项和第j项指标归一化后的数值；$\bar{x}_{j^*}$，$\bar{x}_j$为第j^*项和第j项指标的平均值；r_{j^*j}为第j^*项和第j项指标间的相关系数。

6)求取第j个指标客观权重值$\boldsymbol{W}_j''$：

$$\boldsymbol{W}_j''=\frac{(\boldsymbol{S}_j+\boldsymbol{e}_j)\boldsymbol{R}_j}{\sum_{j=1}^{n}(\boldsymbol{S}_j+\boldsymbol{e}_j)\boldsymbol{R}_j} \tag{14}$$

2.3 基于Lagrange乘子法确定综合权重

在上述计算中，本文采用改进AHP法确定电能质量各指标的主观权重，采用Entropy-CRITIC法确定客观权重，但单一的主观权重或客观权重均不能全面合理地反映指标的重要程度，因此本文通过Lagrange乘子法将主客观权重合理组合得到综合权重$\boldsymbol{W}$：

$$\boldsymbol{W}=\frac{\sqrt{\boldsymbol{W}_j'\boldsymbol{W}_j''}}{\sum_{j=1}^{n}\sqrt{\boldsymbol{W}_j'\boldsymbol{W}_j''}} \tag{15}$$

3 基于VIKOR法的电能质量综合评估模型

VIKOR法通过最大化群体效益和最小化个体损失得到各指标互相让步的折中妥协解[22]，该方法更适用于倾向利益最大化的决策者。其与TOPSIS法区别在于VIKOR法可以通过合适的指标赋权直接对相互矛盾的评估指标进行处理，并从多角度综合考虑评估对象与最优解的距离[19,23]，不需要考虑指标是否应与正、负理想解之间距离最远或最近的问题，且避免了逆序的产生，其步骤如下：

1)构造指标数据的初始判断矩阵$\boldsymbol{X}$；

2)对初始判断矩阵$\boldsymbol{X}$进行归一化得到$\boldsymbol{X}'$，并利用综合权重$\boldsymbol{W}$对其进行加权得到加权规范矩阵$\boldsymbol{Z}$：

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{X}'\boldsymbol{W} \tag{16}$$

3)计算最大化群体效益S_i、最小化个体损失R_i和综合值Q_i：

$$S_i=\sum_{i=1}^{m}\omega_j\frac{z_{\max,j}-z_{ij}}{z_{\max,j}-z_{\min,j}} \tag{17}$$

$$R_i=\max_j\left(\sum_{i=1}^{m}\omega_j\frac{z_{\max,j}-z_{ij}}{z_{\max,j}-z_{\min,j}}\right) \tag{18}$$

$$Q_i=\eta\frac{S_i-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}}+(1-\eta)\frac{R_i-R_{\min}}{R_{\max}-R_{\min}} \tag{19}$$

其中

$$z_{\max,j}=\max_{1\leqslant i\leqslant m}z_{ij}\qquad z_{\min,j}=\min_{1\leqslant i\leqslant m}z_{ij}$$
$$S_{\max}=\max_{1\leqslant i\leqslant m}S_i\qquad S_{\min}=\min_{1\leqslant i\leqslant m}S_i$$
$$R_{\max}=\max_{1\leqslant i\leqslant m}R_i\qquad R_{\min}=\min_{1\leqslant i\leqslant m}R_i$$

式中：z_{ij}为加权规范矩阵$\boldsymbol{Z}$中第i行第j列元素；$z_{\max,j}$，$z_{\min,j}$分别为j的正、负理想解；$S_{\max}$，$S_{\min}$分别为群体效益的最大、最小值；$R_{\max}$，$R_{\min}$分别为个体损失的最大、最小值；η为最大化群体效益和最小化个体损失之间的折中系数，$0\leqslant\eta\leqslant 1$。

4)根据综合值Q_i从小到大进行排序，并以最大化群体效益S_i和最小化个体损失R_i的排序结果进行校验。综合值Q_i数值越小表示该监测点的电能质量越优，反之亦然。

5)记根据综合值Q_i的排序结果为A_i，对于综合值Q_i最小的监测点A_1，妥协解判据如下[24]：

①$Q(A_2)-Q(A_1)\geqslant\dfrac{1}{m-1}$；

②A_1点的S_i与R_i也为最优。

判据①中，$Q(A_1)$，$Q(A_2)$分别为综合值Q_i的排序结果前两个最小监测点A_1和A_2的综合值。若同时满足条件①和②，则A_1为最佳妥协解；若仅满足条件①而不满足条件②，最佳妥协解为排序结果A_i中的任意一个，其中排名最后的A_m应满足

$Q(A_m)-Q(A_1)<1/(m-1)$；若仅满足条件②而不满足条件①，最佳妥协解为A_1或A_2中任意一个。

4　算例分析

利用文献[25]中的数据进行算例分析以证明本文所提方法的可行性与有效性。其5个监测点的电能质量6个指标数据如表2所示。

表2　电能质量实测数据

Tab.2　Power quality measured 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

整理实测数据，构建初步评价矩阵$\boldsymbol{V}$：

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix}0.09 & 2.53 & 0.96 & 0.22 & 1.12 & 0.88\\0.04 & 1.66 & 1.05 & 0.34 & 1.26 & 1.07\\0.19 & 3.85 & 1.41 & 0.47 & 1.18 & 0.83\\0.11 & 2.01 & 0.85 & 0.38 & 0.82 & 0.58\\0.07 & 3.18 & 1.27 & 0.53 & 1.35 & 1.23\end{bmatrix} \tag{20}$$

由于本文选用的6个电能质量指标均为逆向指标，故根据式(2)对初步评价矩阵$\boldsymbol{V}$进行无量纲化处理得到$\boldsymbol{V}'$：

$$\boldsymbol{V}'=\begin{bmatrix}0.6667 & 0.6027 & 0.8036 & 1 & 0.434 & 0.5385\\1 & 1 & 0.6429 & 0.6129 & 0.1698 & 0.2462\\0 & 0 & 0 & 0.1935 & 0.3208 & 0.6154\\0.5333 & 0.8402 & 1 & 0.4839 & 1 & 1\\0.8 & 0.3059 & 0.25 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{21}$$

4.1　权重的计算

4.1.1　改进AHP法确定主观权重

根据专家的意见，认为各电能质量指标的重要程度依次为：频率偏差>谐波电压>电压波动=电压闪变>电压偏差>三相不平衡，结合3标度法可得改进AHP法的判断矩阵$\boldsymbol{A}$：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1\\-1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1\\-1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1\\-1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1\\-1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1\\-1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0\end{bmatrix}$$

根据式(4)可得到判断矩阵$\boldsymbol{A}$的最优传递矩阵$\boldsymbol{B}$：

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0 & 1.3333 & 0.8333 & 0.8333 & 0.3333 & 1.6667\\-1.3333 & 0 & -0.5 & -0.5 & -1 & 0.3333\\-0.8333 & 0.5 & 0 & 0 & -0.5 & 0.8333\\-0.8333 & 0.5 & 0 & 0 & -0.5 & 0.8333\\-0.3333 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 1.3333\\-0.6667 & -0.3333 & -0.8333 & -0.8333 & -1.3333 & 0\end{bmatrix}$$

根据式(6)可得到最优传递矩阵$\boldsymbol{B}$的判断矩阵$\boldsymbol{D}$：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}1 & 3.7937 & 2.3009 & 2.3009 & 1.3956 & 5.2947\\0.2636 & 1 & 0.6065 & 0.6065 & 0.3679 & 1.3956\\0.4346 & 1.6487 & 1 & 1 & 0.6065 & 2.3010\\0.4346 & 1.6487 & 1 & 1 & 0.6065 & 2.3010\\0.7166 & 2.7183 & 1.6487 & 1.6487 & 1 & 3.7935\\0.1889 & 0.7166 & 0.4346 & 0.4346 & 0.2636 & 1\end{bmatrix}$$

根据式(7)可得主观权重$\boldsymbol{W}_j'$：

$$\boldsymbol{W}_j'=[0.3292\quad 0.0868\quad 0.1431\quad 0.1431\quad 0.2358\quad 0.0621]$$

4.1.2　Entropy-CRITIC确定客观权重

根据式(8)、式(9)可得到各指标的熵值$\boldsymbol{e}_j$：

$$\boldsymbol{e}_j=[0.8450\quad 0.8122\quad 0.8021\quad 0.7778\quad 0.7387\quad 0.7969]$$

根据式(10)~式(13)可分别得到变异性指标，即标准差$\boldsymbol{S}_j$和相关系数$\boldsymbol{R}_j$：

$$\boldsymbol{S}_j=[0.377\quad 0.404\quad 0.408\quad 0.387\quad 0.381\quad 0.380]$$

$$\boldsymbol{R}_j=[4.320\quad 2.339\quad 1.811\quad 2.759\quad 2.996\quad 3.621]$$

根据式(14)可得到客观权重$\boldsymbol{W}_j''$：

$$\boldsymbol{W}_j''=[0.2501\quad 0.1347\quad 0.1038\quad 0.1522\quad 0.1573\quad 0.2019]$$

4.1.3　Lagrange乘子法确定综合权重

根据式(15)将主观权重$\boldsymbol{W}_j'$和客观权重$\boldsymbol{W}_j''$组合形成综合权重$\boldsymbol{W}$：

$$\boldsymbol{W}=[0.2961\quad 0.1116\quad 0.1258\quad 0.1523\quad 0.1988\quad 0.1156]$$

图2反映了单一的改进AHP法、单一的熵权法、单一的CRITIC法、单一的Entropy-CRITIC客观赋权法与本文利用Lagrange乘子法将主客观有机结合得到的组合赋权法的权重分布。从

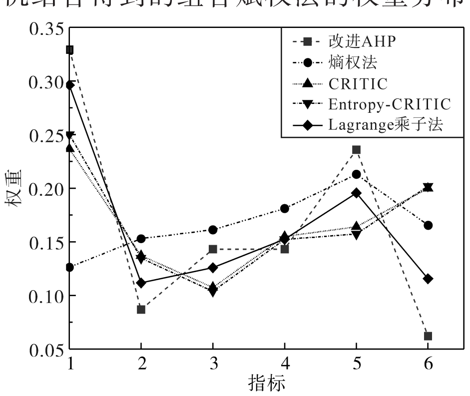

图2　不同赋权法的权重分布

Fig.2　Weight distribution of different weighting methods

图中可以很直观地显现出组合赋权的合理性和客观性。

4.2 基于VIKOR法的电能质量综合评估模型

将电能质量指标等级、实测数据和正、负理想解进行整理，构造指标数据的初始判断矩阵 $\boldsymbol{X}$：

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 0.05 & 1.2 & 1 & 0.2 & 1 & 0.5 \\ 0.1 & 3 & 1.5 & 0.5 & 2 & 1 \\ 0.15 & 4.5 & 2 & 0.8 & 3 & 1.5 \\ 0.2 & 7 & 2.5 & 1 & 5 & 2 \\ 0.09 & 2.53 & 0.96 & 0.22 & 1.12 & 0.88 \\ 0.04 & 1.66 & 1.05 & 0.34 & 1.26 & 1.07 \\ 0.19 & 3.85 & 1.41 & 0.47 & 1.18 & 0.83 \\ 0.11 & 2.01 & 0.85 & 0.38 & 0.82 & 0.58 \\ 0.07 & 3.18 & 1.27 & 0.53 & 1.35 & 1.23 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 7 & 3 & 3 & 5 & 4 \end{bmatrix}$$

将初始判断矩阵 $\boldsymbol{X}$ 进行无量纲化处理得到归一化后的矩阵 $\boldsymbol{X}'$：

$$\boldsymbol{X}'=\begin{bmatrix} 0.9 & 0.8286 & 0.6667 & 0.9333 & 0.8 & 0.875 \\ 0.8 & 0.5714 & 0.5 & 0.8333 & 0.6 & 0.75 \\ 0.7 & 0.3571 & 0.3333 & 0.7333 & 0.4 & 0.625 \\ 0.6 & 0 & 0.1667 & 0.6667 & 0 & 0.5 \\ 0.82 & 0.6386 & 0.68 & 0.9267 & 0.776 & 0.78 \\ 0.92 & 0.7629 & 0.65 & 0.8867 & 0.748 & 0.7325 \\ 0.62 & 0.45 & 0.53 & 0.8433 & 0.764 & 0.7925 \\ 0.78 & 0.7129 & 0.7167 & 0.8733 & 0.836 & 0.855 \\ 0.86 & 0.5457 & 0.5767 & 0.8233 & 0.73 & 0.6925 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(16)对 $\boldsymbol{X}'$ 进行加权得到加权规范矩阵 $\boldsymbol{Z}$：

$$\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix} 0.2665 & 0.0925 & 0.0839 & 0.1421 & 0.159 & 0.1012 \\ 0.2369 & 0.0638 & 0.0629 & 0.1269 & 0.1193 & 0.0867 \\ 0.2073 & 0.0399 & 0.0419 & 0.1117 & 0.0795 & 0.0723 \\ 0.1777 & 0 & 0.2097 & 0.1015 & 0 & 0.0578 \\ 0.2428 & 0.0711 & 0.0855 & 0.1411 & 0.1543 & 0.0902 \\ 0.2724 & 0.0851 & 0.0818 & 0.135 & 0.1487 & 0.0847 \\ 0.1836 & 0.0502 & 0.0667 & 0.1284 & 0.1519 & 0.0916 \\ 0.231 & 0.0796 & 0.0902 & 0.133 & 0.1662 & 0.0988 \\ 0.2546 & 0.0609 & 0.0725 & 0.1254 & 0.1451 & 0.0801 \\ 0.2961 & 0.1116 & 0.1258 & 0.1523 & 0.1988 & 0.1156 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(17)~式(19)求得最大化群体效益 S_i、最小化个体损失 R_i 和综合值 Q_i，计算结果如表3所示。其中最大化群体效益和最小化个体损失之间的折中系数 $\eta=0.5$，即认为最大化群体效益 S_i 和最小化个体损失 R_i 同等重要。

表3 电能质量评估计算结果

Tab.3 Power quality evaluation results

指标	S_i	R_i	Q_i
Ⅰ,Ⅱ等级界限值	0.155 0	0.041 9	0.148 3
Ⅱ,Ⅲ等级界限值	0.303 7	0.079 5	0.286 1
Ⅲ,Ⅳ等级界限值	0.447 6	0.119 3	0.425 2
Ⅳ,Ⅴ等级界限值	0.642 1	0.198 8	0.656 8
监测点1	0.215 0	0.053 3	0.197 8
监测点2	0.192 4	0.050 1	0.180 8
监测点3	0.327 7	0.112 5	0.353 9
监测点4	0.201 4	0.065 1	0.210 7
监测点5	0.261 5	0.053 7	0.221 4
正理想解	0	0	0
负理想解	1	0.296 0	1

根据表3可以确定电能质量综合评估等级区间，如表4所示。

表4 电能质量综合评估等级区间

Tab.4 Power quality comprehensive assessment level range

	电能质量指标等级				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
区间	≤0.148 3	≤0.286 1	≤0.425 2	≤0.656 8	>0.656 8

根据表3的计算结果与表4的电能质量综合评估等级区间，得到电能质量综合评估结果，并与其他评估方法[6,25-26]进行比较，其评估结果如表5所示。

表5 电能质量评估结果对比分析

Tab.5 Comparative analysis of power quality evaluation results

综合评估方法	电能质量综合评估结果排序
本文方法	监测点2>1>4>5>3
文献[6]	监测点2>4>1>5>3
文献[25]	监测点2>1>5>4>3
文献[26]	监测点2>1>4>5>3

由表5可以看出，本文方法与文献[26]所采用的利用加权理想解与灰色关联度融合的综合贴进度改进TOPSIS法的评估结果一样；文献[25]采用了改进的灰色关联投影法，其评估结果中监测点4的电能质量优于监测点3，但从表2的实测数据来看，监测点4仅频率偏差略高于监测点5，而其余5个电能质量指标均低于监测点5，因此监测点4的电能质量实际上应优于监测点5；文献[6]认为监测点4的电能质量优于监测点1，但其仅采用了单一的主观赋权法，并未将主客观赋权相结合，故其评估结果不够客观。综上所述，本文采用的评估方法是客观有效的。

5 结论

本文提出了一种基于组合赋权-VIKOR法的电能质量综合评估方法，采用改进的3标度AHP法进行主观赋权，避免了因指标间重要程度难以把握而导致的误差；采用熵权法与CRITIC法相结合的方法确定客观权重，既考虑到了指标间的离散程度，又考虑到了指标间的关联性与对比性，使得客观权重更加全面；利用Lagrange乘子法将主、客观权重有机结合，使得电能质量各指标权重更加客观合理；针对不同决策者对电能质量各指标重要程度的要求不同，提出VIKOR法对电能质量进行综合评估，通过最大化集体效益和最小化个体损失得到互相妥协的折中解；通过实际算例证明了该方法的可行性、合理性和有效性。

参考文献

[1] WEI J, SHI X, FEI G, et al. Comprehensive evaluation of impacts of connecting distributed generation to the distribution network[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2017, 12(2): 621-631.

[2] 康世崴，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 analytic hierarchy process in comprehensive evaluation of power quality[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(1): 72-77, 83.

[4] 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.

[5] CARLOS R A, LANOS A P, CASTRO A O. An analytic hierarchy process based approach for evaluating renewable energy sources[J]. International Journal of Energy Economics & Policy, 2017, 7(74): 38-47.

[6] 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 improved analytical hierarchy process in comprehensive assessment of the power quality with distributed generators[J]. Electric Power, 2014, 47(12): 72-78.

[7] DONG Y, LIU Y, YIN Z. A comprehensive combinatorial weighting method for power quality evaluation based on maximization deviation[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018.

[8] CANO-PLATA E A, USTARIZ-FARfAN A J, ESTRADA-ESTRADA J H. Wavelets and entropy for power quality assessment[J]. American Journal of Computational Mathematics, 2017, 7(3): 276-290.

[9] 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.

[10] 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 sum ration method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 128-132.

[11] 崔明建，孙元章，杨军，等. 一种基于多层次灰色面积关联分析的电网安全综合评价模型[J]. 电网技术，2013，37(12)：3453-3460.
CUI Mingjian, SUN Yuanzhang, YANG Jun, et al. Power grid security comprehensive assessment based on multi-level grey area relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3453-3460.

[12] 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, 2020, 24(1): 137-144.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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 coopeartive game theory and improved TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 109-115.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 史志波，孟杰，韩勇，等. 基于粗糙集理论的飞机交流电能质量评估[J]. 电气传动，2022，52（11）：3-9，16.
SHI Zhibo，MENG Jie，HAN Yong，et al. Evaluation of airplane AC power quality based on rough set theory[J]. Electric Drive，2022，52（11）：3-9，16.

[19] OPRICOVIC S，TZENG G H. Compromise solution by MCDM methods：a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. European Journal of Operational Research，2004，156（2）：445-455.

[20] 李志鹏，王建喜，周洪伟，等. 计及多指标间相互影响的园区综合能源系统规划评价方法[J]. 电力建设，2022，43（10）：98-110.
LI Zhipeng，WANG Jianxi，ZHOU Hongwei，et al. Evaluation method for park-level integrated energy system planning considering the interaction of multiple indices[J]. Electric Power Construction，2022，43（10）：98-110.

[21] 王心义，姚孟杰，张建国，等. 基于改进AHP法与模糊可变集理论的煤层底板突水危险性评价[J]. 采矿与安全工程学报，2019，36（3）：558-565.
WANG Xinyi，YAO Mengjie，ZHANG Jianguo，et al. Evaluation of water bursting in coal seam floor based on improved AHP and fuzzy variable set theory[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2019，36（3）：558-565.

[22] LIAO H，XU Z，ZENG X J. Hesitant fuzzy linguistic VIKOR method and its application in qualitative multiple criteria decision making[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems，2015，23（5）：1343-1355.

[23] OPRICOVIC S，TZENG G H. Multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction[J]. Computer-Aided Civil and Infrastrure Engineering，2002，17（3）：211-220.

[24] 张华一，文福拴，张璨，等. 基于前景理论的电网建设项目组合多属性决策方法[J]. 电力系统自动化，2016，40（14）：8-14.
ZHANG Huayi，WEN Fushuan，ZHANG Can，et al. Prospect theory based multiple-attribute decision-making method for determining portfolio of construction projects in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40（14）：8-14.

[25] 胡文锦，武志刚，张尧，等. 风电场电能质量分析与评估[J]. 电力系统及其自动化学报，2009，21（4）：82-87.
HU Wenjin，WU Zhigang ZHANG Yao，et al. Analysis and evaluation on the electric power quality of the wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2009，21（4）：82-87.

[26] 廖晓辉，肖景博. 一种基于组合赋权和改进TOPSIS的配电网电能质量综合评估方法[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第35届学术年会论文集，2019.
LIAO Xiaohui，XIAO Jingbo. A comprehensive evaluation method of power quality in distribution network based on combination weights and improved TOPSIS[C]//Proceedings of the 35th Annual Academic Conference of Power System and Automation Major in Chinese Higher Education Institutions，2019.

收稿日期：2022-11-30
修改稿日期：2023-02-06