

DOI: 10.7667/PSPC171541

基于合作博弈和改进 TOPSIS 的电能质量评估方法研究

李杰

(国网河南省电力公司驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 对电网的电能质量开展合理的综合评估, 是科学检测电能优劣性以及实施有效管控的重要依据。因此, 提出了一种基于合作博弈和改进 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)的电能质量评估方法。首先建立了评价指标体系, 利用合作博弈的理论对多种权重结果进行组合, 获得各个评价指标的优化权重, 避免了单一赋权方法的不足。然后运用改进后的 TOPSIS 方法开展评估, 根据相对贴程度大小进行排序对比。利用 C++对算法进行编程后对某供电地区的电能质量开展评估。结果说明基于合作博弈理论确定的优化权重兼顾了主客观的影响, 利用改进 TOPSIS 的评估方法能够实现电能质量的综合评估。

关键词: 电能质量; 合作博弈; 优化权重; 改进 TOPSIS; 综合评估

Research on evaluation method of power quality based on cooperative game theory and improved TOPSIS

LI Jie

(State Grid Zhumadian Electric Power Supply Company, Zhumadian 463000, China)

Abstract: The reasonable and comprehensive evaluation of power quality of power system is an important basis for scientific detection of power quality and effective management and control. Therefore, this paper proposes a power quality comprehensive evaluation method based on cooperative game theory and improved TOPSIS. Firstly, an index system for quantitative evaluation of power quality is established, which avoids the shortcoming of single weighting method. Then, by using the cooperative game theory, the optimized weights of various evaluation indexes are obtained. Finally, the improved TOPSIS method is adopted to evaluate the power quality, and the magnitude of the relative proximity is used for sorting and comparing. After the algorithm is programmed by C++, the power quality of a power supply area is evaluated comprehensively. The results of the example show that the optimal weights determined by the cooperation game theory take into account both subjective and objective effects, the evaluation method based on the improved TOPSIS can effectively evaluate the power quality comprehensively.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 2016KJ0325).

Key words: power quality; cooperation game; optimized weights; improved TOPSIS; comprehensive evaluation

0 引言

电能质量的评估是利用收集到的电力系统运行参数, 检验相关指标是否满足规定的标准。单一评价指标内涵单一, 无法反映整个系统的运行情况, 因此需要开展综合评估。电能质量的综合评估反映了电网所提供的电能的整体质量水平, 本质上代表了整个电网结构的运行水平以及电力系统的供电能力。按照电能质量确定电能的市场价格是当前供电

市场的重要趋势, 因此电能质量的高低将是影响上网电价的重要因素。此外, 评估后得到的综合量化结果, 是电力企业维护与提升电能质量的重要参考。因此, 对电能开展准确、有效的综合评估意义重大^[1-2]。

当前对于电能质量的评估已有较多的研究。文献[3]利用神经网络具有自主性的特征, 建立了用于电能评估的神经网络模型, 可以比较客观地评价电能质量。但是当评价指标较多时会出现计算过程不收敛以及过分依赖于训练样本的情况。文献[4]首先计算了所选择指标的隶属度, 然后建立了模糊综合

评判模型，对电能进行二级评判具有一定的客观性和合理性。但是该方法的评估结果受隶属度及权重影响较大，适用范围具有一定的局限。文献[5]研究了基于粒子群算法的理想区间法，该方法是以相似理论为基础，评估结果更加精确。但求取权重值时用的是层次分析法，主要依靠所评判专家的个人经验，主观性太强。文献[6]采用的熵权法是根据熵表达信息量的特征，权重的确定完全依赖于原始数据资料，权重结果具有绝对的客观性。但是求取的权重有时并不能真正地反映实际当中对应指标的重要程度。文献[7-10]采用组合赋权的思想把主、客观权重结合到一起求得综合权重，但大多也只是加权组合或者乘法合成归一化，存在系数难以确定、倍增效应等问题。

对电能质量评价时，如果只是从定性角度判断各个指标的重要程度是不合理的，对其进行准确量化得到的结果才更加科学。利用合作博弈的理论将多种类型的权重进行组合，兼顾主客观因素，可以获得更具有合理性的优化权重。另外，电力系统中电能质量评价的过程是一个多指标联合决策的过程，评估中受到统计数据以及人为等主观因素的影响，表现出“灰色”特点，灰色关联分析方法已经在状态评估、医疗卫生等领域应用颇为广泛^[11-12]。

逼近理想解的排序方法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)诞生于20世纪80年代^[13]，在多目标决策的相关分析中，应用较多，可以综合考虑多指标对目标的影响。

针对当前对于电能质量评估研究的不足之处，文章提出了一种基于优化权重和改进TOPSIS的电能质量评估方法，利用合作博弈的理论将多种类型的权重进行组合，获得更具有合理性的优化权重。在此基础上，将灰色关联和TOPSIS两种方法进行融合，形成一种改进的TOPSIS方法对电能质量开展综合评估，根据量化的评估结果可以简单清晰地了解电能水平。利用C++实现所研究的算法，将某供电地区的电能质量监测点数据作为原始数据，对电能质量进行评估，结果表明基于合作博弈和改进TOPSIS的综合评估方法是可行的。

1 电能评估指标体系

在电力系统当中，能够反映电能质量的指标有很多，仅用某一指标或某一节点的合格与否来表征整个系统的电能质量过于片面，不具有说服力。因此需要选择多个指标和多个数据采集点，对系统的电能质量开展全面的评估，从而能够客观地从多个角度反映系统的状况^[14-15]。

现有的研究表明，对于电能的评估主要从电压质量、频率质量和供电可靠性3个角度考虑。所建立的评估指标体系结构如图1所示。

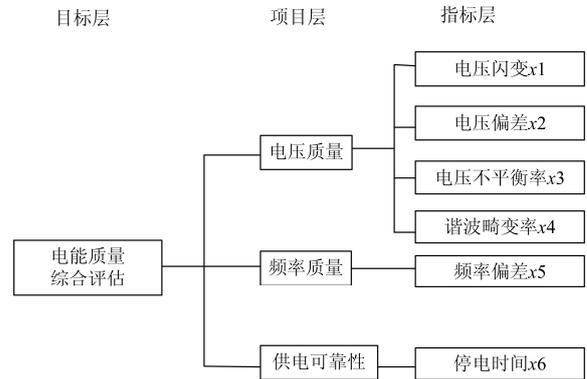


图1 评估体系结构

Fig. 1 Structure of evaluation system

2 优化权重的确定

2.1 单一权重确定方法

1) 层次分析法

层次分析法^[16-17]是一种较为经典的主观赋权法，不需要原始数据。根据专家的个人经验确定各个指标的相对重要程度，由此可得判断矩阵。当指标类型比较多时，往往会产生自相矛盾的状况。

2) 熵权法

熵权法^[18-19]是采用数值进行数理推导得到权重的计算方法，只用到了原始数据，结果比较客观。但是完全屏蔽掉专家经验所获取的权重值有时并不能真实地反映该指标在整个评估当中的重要性。

3) 神经网络法

BP神经网络算法是一种智能型算法。将历史经验移植到新的网络当中形成新的网络模型，然后通过推理已训练网络求得评估体系中的权重。对于样本的选择以及初始参数的设置等依赖性较大，采用神经网络法确定权重的具体过程参见文献[20]。

2.2 基于合作博弈求取优化权重

2.2.1 合作博弈理论

合作博弈^[21-22]是研究具有数个局中对象的决策，若干个对象通过商定、协调等方式自由结合使结果最优。假设电能质量评价体系中，需要对 n 个监测点的电能水平进行评价排序，可选择的单一评价方法有 m 种，评价方法的集合 $M=\{1, 2, \dots, m\}$ 。把 M 视作博弈论中的局中对象集合，其子集共有 2^m 个，并且任一子集组成评价体系的其中一个联盟。把联盟作为整体进行综合评价，可以降低误差。

2.2.2 求取优化权重

文献[22]在利用博弈理论求取优化权重时,将每一个单一权重视为博弈中的参与者,将它们均值作为用于参考的基准。该基准的选取缺少合理性,并没有体现数据的特点。

本文根据数据本身的客观性,利用一致性相关系数对多种评价方法优化组合,使最终的结果更加合理。把采用不同计算方法获取的 p 种权重 $W(1)$ 、 $W(2)$ 、 \dots 、 $W(p)$ 作为输入量,组成一个整体,通过处理获得优化权重 W ,也即是输出量。同时利用 C++ 汇编语言辅助算法的实现,显著提高了权重求取的准确性以及数据处理效率。

求取优化权重的过程如下。

1) 计算相关系数

用 $W(i)$ 表征第 i 种权重计算方法所求得的权重, $W(p-i)$ 表征第 i 种权重以外的其他 $p-1$ 种权重的组合权重。

那么这两者之间的一致性相关系数可以用式(4)求得,并用 $L(i)$ 表示。

$$L(i) = \frac{\sum_{j=1}^q [W_j(i) - \overline{W(i)}][W_j(p-i) - \overline{W(p-i)}]}{\left\{ \sum_{j=1}^q [W_j(i) - \overline{W(i)}]^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{j=1}^q [W_j(p-i) - \overline{W(p-i)}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

式中: q 表示评价体系当中的指标个数;“—”表示取元素的平均数值。

2) 计算组合权重 W'

$$W' = \sum_{i=1}^p W(i)L(i) \quad (2)$$

3) 计算最终综合权重 W

将 W' 通过归一化处理得到最后的综合权重 W 。需要特别指出的是,根据 $W(p-i)$ 所表示的含义可知,其计算方法与 W' 的计算方法相同。

在利用 C++ 编写计算程序时,采用递归调用的方式,每计算一次,权重的种类数就减少一个,一直到最后种类数为 2 的时候,计算终止。对于只有两种权重的计算,如式(3)所示。

$$W' = \frac{W(1) + W(2)}{2} \quad (3)$$

3 基于改进 TOPSIS 的评估方法

传统的 TOPSIS 需要首先根据评价指标体系确定出一个虚拟的最优方案和一个虚拟的最差方案。然后计算待评估的若干个方案分别距离两个虚拟方案的欧式距离。最后,根据距离最优最近以及距离

最差最远两个原则选择出待评估方案中的优秀方案。这种优选法是通过客观数据进行的计算,避免了主观性的影响。

但是,这种方法评判的依据只是指标数值序列之间的欧式距离。利用几何距离作为评判的标准只是反映了各个序列曲线相互之间的位置关系,对于序列曲线的走势变化无法表征,并且容易出现某两个待评估方案由于相对贴度相同而没有办法判断优劣的问题。灰色关联分析方法通过计算序列中每一个指标之间的关联度,较好地表征了两个序列曲线的变化趋势及关联性。这在一定程度上弥补了 TOPSIS 方法的短板。因此,考虑将这两种方法进行融合,形成一种改进的 TOPSIS 方法,实现更优的评估结果,具体实现过程如下所述。

1) 构造原始评估矩阵

假设系统中有 m 个监测点,选取 n 个评价指标。用 x_{ij} 表示监测点 $i(i=1, 2, \dots, m)$ 的第 $j(j=1, 2, \dots, n)$ 个指标数值,每一个待评估监测点的所有指标数值均可以视为一条序列曲线。将 m 个监测点的所有数据集集合到一起,便可以构造出原始的评估矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 。

2) 标准化处理

在进行定量评估时,不同含义的指标无论是量纲还是数量级都不会完全相同,因而失去了可比性。因此需要对原始评估矩阵实施标准化处理。根据评估体系中指标类别的差异,采用不同的计算方法。

收益型的指标计算方式为

$$u_{ij} = (x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) / (\max_{i \in n} x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) \quad (4)$$

成本型的指标计算方式为

$$u_{ij} = (\max_{i \in n} x_{ij} - x_{ij}) / (\max_{i \in n} x_{ij} - \min_{i \in n} x_{ij}) \quad (5)$$

原始评判矩阵内的每一个元素经处理以后成为标准矩阵 $R=(u_{ij})_{m \times n}$, $u_{ij} \in [0, 1]$ 。

根据优化权重计算出加权标准矩阵为

$$R^* = (r_{ij})_{m \times n} = (u_{ij} \omega_j)_{m \times n} \quad (6)$$

式中, ω_j 为第 j 个指标的权重。

3) 确定虚拟的最优方案和最差方案

利用公式 $r_j^+ = \max_{i \in m} r_{ij}$ 和 $r_j^- = \min_{i \in m} r_{ij}$, 分别得到加权标准矩阵中每一个指标对应的最优值和最差值,然后得到的最大值序列 $R^+ = [r_1^+ \ r_2^+ \ \dots \ r_n^+]$ 和最小值序列 $R^- = [r_1^- \ r_2^- \ \dots \ r_n^-]$ 分别为虚拟的最优方案和最差方案。

4) 计算欧氏距离和关联度

利用式(7)和式(8)分别求出每一个待评估方案

与最优和最差方案间的欧氏距离。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^+)^2}, (i=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - r_j^-)^2}, (i=1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

分别求出每一个待评估方案与虚拟最优和最差之间关联度。在评估体系第 j 个指标上产生的相对差值称为关联系数 ε_{ij}^+ 和 ε_{ij}^- ，计算公式为

$$\varepsilon_{ij}^+ = \frac{\min_{i \in m} \min_{j \in n} |r_j^+ - r_{ij}^+| + \rho \max_{i \in m} \max_{j \in n} |r_j^+ - r_{ij}^+|}{|r_j^+ - r_{ij}^+| + \rho \max_{i \in m} \max_{j \in n} |r_j^+ - r_{ij}^+|} \quad (9)$$

$$i=1, 2, \dots, m$$

$$\varepsilon_{ij}^- = \frac{\min_{i \in m} \min_{j \in n} |r_j^- - r_{ij}^-| + \rho \max_{i \in m} \max_{j \in n} |r_j^- - r_{ij}^-|}{|r_j^- - r_{ij}^-| + \rho \max_{i \in m} \max_{j \in n} |r_j^- - r_{ij}^-|} \quad (10)$$

$$i=1, 2, \dots, m$$

式中： ρ 代表分辨系数，它的取值范围是 0 和 1 之间，通常取为 0.5；关联系数 ε_{ij} 的值越大，说明两个序列在指标 j 上的关联程度就越高。

第 i 个方案和虚拟最优与最差之间的关联度分别为 E_i^+ 和 E_i^- ，计算公式为

$$E_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij}^+, i=1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$E_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij}^-, i=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

5) 判据拟合

分析可知，当某一个待评估方案的 D_i^- 和 E_i^+ 的数值均比较大时表明该方案比较优秀；同理， D_i^+ 和 E_i^- 的数值较大时，表明该方案比较差。据此，可以将 4 个变量拟合为两个新的特征量，如式(13)和式(14)。

$$S_i^+ = \alpha_1 D_i^- + \alpha_2 E_i^+, i=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$S_i^- = \alpha_1 D_i^+ + \alpha_2 E_i^-, i=1, 2, \dots, m \quad (14)$$

式中：系数 a_1 和 a_2 代表的是评估者对于空间位置以及图形贴适度两个因素的偏重程度，其中 $a_1 + a_2 = 1$ ，通常两者均取为 0.5； S_i^+ 越大表明方案越好，相反， S_i^- 越大表明该方案越差。

6) 确定相对贴适度

利用上一步拟合得到的新的特征量，可以求取每一个待评估方案的相对贴适度为

$$G_i = \frac{S_i^+}{S_i^- + S_i^+}, i=1, 2, \dots, m \quad (15)$$

G_i 越大，该处的电能质量越好。

4 电能质量综合评估步骤

经过上述分析可将电能质量评估的具体步骤总结如下。

1) 科学全面地分析待评估的目标，根据其特点选择合适的指标体系，涵盖电压、频率、可靠性 3 个方面，并且指标要量化，便于后续分析。

2) 对原始数据进行预处理，消除量纲的影响。

3) 根据 2.1 节内容确定出三个单一权重，并利用 3.2 节中的内容求取最终的优化权重。

4) 根据式(6)确定加权标准矩阵，可得虚拟理想电能质量及虚拟最差电能质量。

5) 由式(15)计算各个电能监测点的相对贴适度，完成待评估系统的电能质量评价。

根据以上步骤编写 C++ 程序，用于数据分析计算，现场监测点采集到的数据作为程序的原始数据包。流程图如图 2 所示。

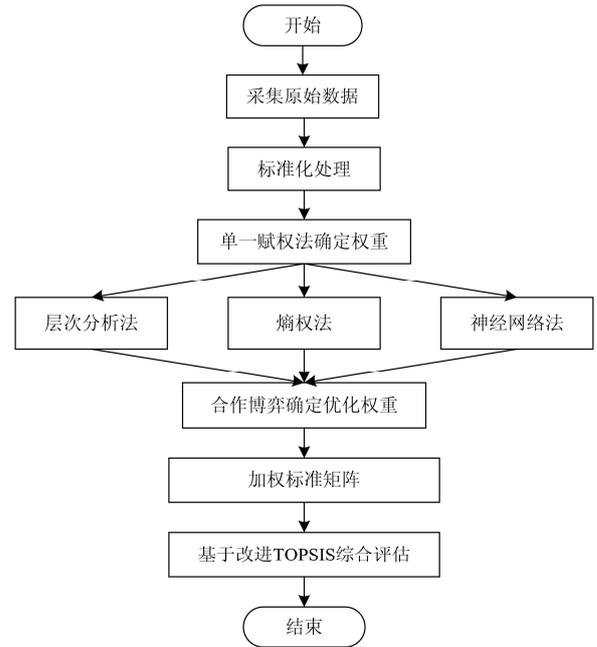


图 2 综合评估流程图

Fig. 2 Flow chart of comprehensive evaluation

5 算例

对华中电网某供电区域开展电能质量评估，该区域范围内设有 5 个监测点，根据监测设备采集到的运行数据，处理筛选后得到表征电能质量的 6 个指标数据，分别为电压闪变 x_1 、电压偏差 x_2 、电压不平衡率 x_3 、谐波畸变率 x_4 、频率偏差 x_5 、停电时间 x_6 。5 个监测点的具体数据如表 1 所示。

表 1 5 个监测点数据

Table 1 Data from 5 monitoring points

评估指标	$x_1/\%$	$x_2/\%$	$x_3/\%$	$x_4/\%$	x_5/Hz	$x_6/(\text{h}/\text{年})$
监测点 1	0.078	2.27	0.90	1.16	0.078	163.0
监测点 2	0.12	3.34	1.24	1.73	0.091	171.3
监测点 3	0.20	4.25	1.06	0.95	0.085	155.6
监测点 4	0.095	2.55	0.81	1.20	0.077	200.8
监测点 5	0.14	3.86	0.72	1.33	0.095	188.1

根据表1的监测数据，可以整理出原始评判矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 0.078 & 2.27 & 0.90 & 1.16 & 0.078 & 163.0 \\ 0.12 & 3.34 & 1.24 & 1.73 & 0.091 & 171.3 \\ 0.20 & 4.25 & 1.06 & 0.95 & 0.085 & 155.6 \\ 0.095 & 2.55 & 0.81 & 1.20 & 0.077 & 200.8 \\ 0.14 & 3.86 & 0.72 & 1.33 & 0.095 & 188.1 \end{bmatrix}$$

根据指标类型的差异，进一步处理后得到更加科学合理的标准化矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.65 & 0.73 & 0.94 & 0.84 \\ 0.66 & 0.46 & 0 & 0 & 0.22 & 0.65 \\ 0 & 0 & 0.35 & 1 & 0.56 & 1 \\ 0.86 & 0.86 & 0.83 & 0.68 & 1 & 0 \\ 0.49 & 0.20 & 1 & 0.51 & 0 & 0.28 \end{bmatrix}$$

对于该评估体系，通过专家咨询采用层次分析法得到的主客观权重为： $W_1=(0.14, 0.20, 0.09, 0.33, 0.18, 0.06)$ ；利用熵权法求得的客观权重为 $W_2=(0.17, 0.21, 0.15, 0.23, 0.16, 0.08)$ ；利用神经网络法取得的权重为 $W_3=(0.30, 0.11, 0.14, 0.15, 0.27, 0.03)$ 。

将上述三种单一权重作为博弈论中的局中人，根据式(1)一式(3)计算出一致性相关系数分别为： $L_1=0.973, L_2=0.946, L_3=0.961$ 。所以最终的优化权重 $W=[0.20, 0.17, 0.13, 0.24, 0.20, 0.06]$ 。

从上述数据中可看出，单一权重确定方法受方法本身以及决策者的影响作用比较明显，而基于合作博弈的最优权重值介于三种方法中间，同时兼顾主客观的影响，因此更加合理。

根据优化权重以及标准化矩阵可以得到加权矩阵为

$$R^* = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.17 & 0.0845 & 0.1752 & 0.188 & 0.0504 \\ 0.132 & 0.0782 & 0 & 0 & 0.044 & 0.039 \\ 0 & 0 & 0.0455 & 0.24 & 0.112 & 0.06 \\ 0.172 & 0.1462 & 0.1079 & 0.1632 & 0.2 & 0 \\ 0.098 & 0.034 & 0.13 & 0.1224 & 0 & 0.0168 \end{bmatrix}$$

利用公式 $r_j^+ = \max_{i \in m} r_{ij}$ 和 $r_j^- = \min_{i \in m} r_{ij}$ 可以求得虚拟的最优电能质量和最差电能质量分别为 $R^+ =$

$[0.20 \ 0.17 \ 0.13 \ 0.24 \ 0.20 \ 0.06]$ 和 $R^- = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

计算每一个评估监测点的欧氏距离，结果为： $D_1^+=0.048, D_2^+=0.335, D_3^+=0.290, D_4^+=0.1064, D_5^+=0.2906, D_1^-=0.38, D_2^-=0.164, D_3^-=0.275, D_4^-=0.359, D_5^-=0.207$ 。

各个监测点和虚拟的最优电能质量和最差电能质量的关联度分别为： $E_1^+=0.815, E_2^+=0.4533, E_3^+=0.6044, E_4^+=0.7083, E_5^+=0.5217, E_1^-=0.3714, E_2^-=0.6802, E_3^-=0.6211, E_4^-=0.4780, E_5^-=0.6148$ 。

利用式(13)和式(14)对计算得到的欧式距离和灰色关联度进行判据拟合，得到各个监测点的特征量值分别为： $S_1^+=0.5975, S_2^+=0.3087, S_3^+=0.4397, S_4^+=0.5337, S_5^+=0.3644, S_1^-=0.2097, S_2^-=0.5076, S_3^-=0.4556, S_4^-=0.2922, S_5^-=0.4529$ 。

根据式(15)计算最终的相对贴近度值分别为： $G_1=0.7402, G_2=0.3782, G_3=0.4911, G_4=0.6462, G_5=0.4459$ 。

由各个监测点的相对贴近度可知，当前研究的供电区域中，5个电能质量监测点的电能质量优劣的排序为：点1>点4>点3>点5>点2。监测点2、监测点3和监测点5的评估结果较差。从表2中的现场数据可以看出，这3个监测点处的电压闪变、电压偏差以及频率偏差均较大，需重点监控，并采取有效的措施进行治理，使电能得到改善。

为了验证改进的TOPSIS评估方法是否正确，根据以上基础数据，采用传统的TOPSIS方法进行再次评估。计算出各个监测点的欧氏距离以后，利用公式 $C = \frac{D^-}{D^- + D^+}$ 计算各个点的贴近度，计算结果为：

$C_1=0.8878, C_2=0.3287, C_3=0.4867, C_4=0.7714, C_5=0.4160$ 。根据贴近度大小，电能质量监测点的电能质量优劣的排序同样为：点1>点4>点3>点5>点2，与上述评估结果一致。由此可知，改进的TOPSIS评估方法是可行的。另外，传统的TOPSIS评估方法可能出现某两个监测点的正负欧氏距离分别近似相等，那么它们的贴近度都约为0.5，则很难判断两个监测点电能的优劣，而改进后的方法则避免了这种情况的发生。

算例的结果表明，基于合作博弈理论确定的优化权重兼顾了主客观的影响，利用改进的TOPSIS方法进行评估，求取相对贴近度，融合了理想解法与灰色关联分析法的优点，能够实现对电能质量的评估。

6 结论

电能质量的综合评估反映了电网所提供的电能的整体质量水平,本质上代表了整个电网结构的运行水平以及电力系统的供电能力。科学合理的综合评估体系是实现电能质量准确评估的关键。文章采用合作博弈理论求取更加合理的优化权重,避免了单个权重确定方法的不足;利用改进TOPSIS法进行量化评估,结果更为准确。采用C++对算法编程,实际算例的结果表明,基于合作博弈和改进TOPSIS的方法可以实现电能质量的评估。

参考文献

- [1] 陶顺,肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系架构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 171-175.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Power quality assessment system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175.
- [2] 彭卉,邹舒,付永生,等. 冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 54-61.
PENG Hui, ZOU Shu, FU Yongsheng, et al. Study on power quality analysis and control scheme for impact load access to power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 54-61.
- [3] RAHUL, KAPOOR R, TRIPATHI M M. Detection and classification of multiple power signal patterns with Volterra series and interval type-2 fuzzy logic system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2(2): 92-101. DOI: 10.1186/s41601-017-0039-z.
- [4] 唐会智,彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 85-88.
TANG Huizhi, PENG Jianchun. Research on synthetic and quantificated appraisal index of power quality based on fuzzy theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 85-88.
- [5] 张蔓,林涛,曹健,等. 理想区间法在电能质量综合评估中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 33-38.
ZHANG Man, LIN Tao, CAO Jian, et al. Application of ideal interval method in power quality synthetic evaluation[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 33-38.
- [6] YU Z, CHANG C, WANG W, et al. Energy consumption assessment by AIA based time series scatter degree method[C] // International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management, January 9-10, 2010, Harbin, China: 520-525.
- [7] 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, 44(11): 21-25.
WANG Rui, FANG Jie, ZHANG Ke, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on entropy and AHP[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2007, 44(11): 21-25.
- [8] 吴翔,何怡刚,张大波,等. 基于最优权重与雷达图的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 55-60.
WU Xiang, HE Yigang, ZHANG Dabo, et al. Transformer condition assessment based on optimal weight and radar map[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 55-60.
- [9] 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, 31(4): 56-60.
LI Lianjie, YAO Jiangang, LONG Libo, et al. Application of combination weighing method in fuzzy synthetic evaluation of power quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 56-60.
- [10] 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.
- [11] SONG B, YU P, LUO Y, et al. Study on the fault diagnosis of transformer based on the grey relational analysis[C] // Proceedings International Conference on Power System Technology, October 13-17, 2002, Kunming, China: 2231-2234.
- [12] 周名煜,谢宁,王承民. 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 130-137.
ZHOU Mingyu, XIE Ning, WANG Chengmin. Evaluation method of variable weight of distribution network operation mode based on sensitivity and grey relational grade[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 130-137.
- [13] 雷琪,苗世洪,郭宝甫,等. 基于层次分析和改进逼近理想解法的分层储能系统综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 13-19.
LEI Qi, MIAO Shihong, GUO Baofu, et al. Comprehensive evaluation of hierarchical energy storage system based on analytic hierarchy process and improved TOPSIS method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 13-19.
- [14] 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 Hui, YANG Honggeng, WU Chuanlai. A power quality comprehensive evaluation method based on grey clustering[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 70-75.
- [15] 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.
- [16] 张姝, 谭熙静, 何正友, 等. 基于层次分析法的复杂配电网健康诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 7-13.
ZHANG Shu, TAN Xijing, HE Zhengyou, et al. Study on the health diagnosis of complex distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 7-13.
- [17] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [18] 杨志超, 张成龙, 葛乐, 等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 90-94.
YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, GE Le, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of insulator pollution flashover status based on entropy weight method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90-94.
- [19] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-81.
LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- [20] 孙会君, 王新华. 应用人工神经网络确定评价指标的权重[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2001, 20(3): 84-86.
SUN Huijun, WANG Xinhua. Determination of the weight of evaluation indexes with artificial neural network method[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2001, 20(3): 84-86.
- [21] 周建国, 段三良. 烟气同时脱硫脱硝技术综合评价——基于博弈改进云模型[J]. 技术经济, 2009, 28(8): 66-71.
ZHOU Jianguo, DUAN Sanliang. Comprehensive evaluation on simultaneous removal of SO₂ and NO_x from flue gas: based on game theory and improving cloud model[J]. Technology Economics, 2009, 28(8): 66-71.
- [22] 陈衍泰, 陈国宏, 李美娟. 应用合作博弈确定组合评价权重系数的方法研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(3): 89-94.
CHEN Yantai, CHEN Guohong, LI Meijuan. Study on the method of determining weights in combination evaluation by applied cooperative game[J]. Chinese Management Science, 2005, 13(3): 89-94.

收稿日期: 2017-10-17; 修回日期: 2018-01-27

作者简介:

李杰(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电网调度自动化、电能质量评估。E-mail: lt_ncepu@126.com

(编辑 周金梅)