

文章编号: 2095-2163(2022)10-0176-05

中图分类号: TM732

文献标志码: A

基于博弈论组合赋权的 TOPSIS 电能质量综合评估

刘康康¹, 杨超¹, 薛仰孝², 杜刃刃³

(1 贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025; 2 国网渭南供电公司, 陕西 渭南 714000; 3 贵州电网有限责任公司贵安供电局, 贵阳 550000)

摘要: 电能质量综合评估对电网实施有效治理和电力市场改革背景下供需双方进行交易价格的制定至关重要。为使电能质量的评估结果更接近实际, 本文提出基于博弈论组合赋权的 TOPSIS 电能质量综合评估方法。首先根据建立的评价指标体系, 采用三标法对传统 AHP 法进行改进, 得到指标主观权重, 再使用熵权法求取指标的客观权重; 其次引入博弈论思想将主、客观权重进行线性组合, 得到指标的最终权重; 最后采用改进的 TOPSIS 算法进行电能质量的综合评估。通过算例验证了方法的可行性。

关键词: 电能质量; 综合评估; 层次分析法; 权重; 博弈论; TOPSIS

Comprehensive evaluation of TOPSIS power quality based on combination weighting of game theory

LIU Kangkang¹, YANG Chao¹, XUE Yangxiao², DU Renren³

(1 College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2 Weinan Power Supply Company, State Grid Corporation of China, Weinan Shaanxi 714000, China;

3 Gui'an Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

[Abstract] The comprehensive evaluation of power quality is very important to the pricing of power supply and demand under the background of effective power grid governance and power market reform. In order to make the evaluation result of power quality more close to reality, this paper proposes TOPSIS comprehensive evaluation method of power quality based on combination weighting of game theory. First, according to the established evaluation index system, the traditional AHP method is improved by using the three-standard method to get the subjective weight of the index, and then the entropy weight method is used to get the objective weight of the index. Secondly, the game theory is introduced to combine the subjective and objective weights to get the final weight of the index. Finally, the improved TOPSIS algorithm is used to evaluate the power quality comprehensively. The feasibility of the method is verified by an example.

[Key words] power quality; comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; weight; game theory; TOPSIS

0 引言

现代电力系统中存在大量的非线性和冲击负荷, 同时新能源发电的并网渗透率逐年增高, 这对电网的安全运行、用户的用电体验有着巨大的影响, 从而电能质量问题关乎电网的安全经济运行以及用户的生产生活, 成为减少经济损失所必须考虑的关键点^[1-2]。实现对电能质量进行科学有效的综合评估, 对目前电力市场改革背景下进行电能质量的全面考核、依质定价和电能质量管控模型研究具有重要意义^[3]。

在电能质量评估中常使用层次分析法, 为提高权重的准确性, 研究者对传统的层次分析法进行改

进。文献[4]引入模糊数学领域的模糊隶属度, 将各指标以同种量纲加以规范化, 提高 AHP 构建判断矩阵的一致性。考虑电能质量各指标间的复杂性和非线性特点, 文献[5]采用三标度法(重要、同等重要、不重要)对层次分析法进行改进, 使得对传统 AHP 判断矩阵的一致性有显著提高。考虑指标间的关联性, 文献[6]提出将网络层次分析法(ANP)中由 AHP 计算部分替换为最优最劣网络法(BWM)计算电能质量指标的主观权重, 基本避免了一致性检验无法通过的情况。根据指标间存在差异性与关联性, 文献[7]采用 CRITIC 赋权法求取各指标的权重, 并在理想解法中使用相对距离替代贴近度, 提高其实用性, 实现了对电能质量的综合性评估。考虑

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合基础[2019]1100)。

作者简介: 刘康康(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电能质量评估; 杨超(1971-), 女, 副教授, 主要研究方向: 配电网规划及电能质量管理。

收稿日期: 2022-03-01

到 SVM 参数设置对评估模型的影响较大,利用粒子群算法(PSO)易实现全局优化能力对数据进行优化,提出 PSO-SVM 的电能质量综合评估^[8]。针对现有的评估方法对电能质量监测系统所监测的海量数据缺乏挖掘,对长时间周期情况下电网电能质量的整体情况难以判断,文献[9]在模糊综合评估基础上,引入数据包络分析(data envelopment analysis, DEA),实现某变电站母线监测点一年的电能质量综合评估。针对监测数据存在缺失、异常、偏移等数据质量问题,文献[10]根据电能质量数据特点提出相应的数据修复方法,研究质量问题中数据质量的良好程度对电能质量综合评估结果的影响,但研究中使用每天监测数据的 95% 概率值进行评估,这只能对应于大部分情况,如此只能对全年的电能质量进行大致评估,其中的少量数据尚未进行分析,这是否会对全年的电能质量有影响,也亟待更进一步的探讨与评判。

基于上述研究论述,本文提出基于博弈论组合赋权的 TOPSIS 电能质量综合评估方法。通过引入三标法对传统 AHP 进行改进,构建一致性矩阵提高一致性;其次,利用博弈论思想将主客观权重进行组合,使得最终权重合乎实际;最后,通过改进的 TOPSIS 模型进行电能质量的综合评估,并经算例验证了方法的可行性。

1 电能质量评价指标

理想情况下,供电公司应向负荷侧电力用户提供相位相差 $\frac{2}{3}\pi$ 、恒压恒频的正弦交流电。由于现代电力系统中大量分布式电源并网存在间隙性和不确定性;输电线路、变压器、熔断器等设备在输电过程中有额外电能损耗;用电负荷侧接入负荷的随机性和复杂性,并且目前电力系统采用的控制技术和手段有限,往往在实际的供电过程中达不到理想值。电源侧发出的电能送达负荷侧时,工业和生活用电可能达不到最低的标准,使得用户面临电力设备损坏、影响生产生活的威胁。因此对电能质量进行科学的综合评估具有重要经济价值意义。本文选取电压偏差 I_1 、电压波动 I_2 、频率偏差 I_3 、三相电压不平衡度 I_4 、总谐波畸变率 I_5 作为评价指标,构建如图 1 所示的评价指标体系。

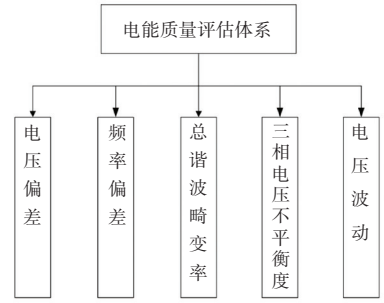


图 1 电能质量评估指标体系

Fig. 1 Index system of power quality evaluation

2 权重的确定

2.1 改进层次分析

层次分析法(AHP)是在进行主观赋权时常用的一种数学方法,但传统 AHP 构建的判断矩阵往往需要对一致性进行检验。由于受主观意见的干扰导致在构建判断矩阵时往往达不到工程实际的需要,得加以多次的调整。为了提高判断矩阵的一致性,引入三标法对传统的 AHP 进行改进。其流程如下:

(1) 引入最优矩阵。利用三标法 $(-1 \ 0 \ 1)$ 构建判断矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$, 其中矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$ 元素 a_{ij} 含义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{元素 } i \text{ 比 } j \text{ 更重要} \\ 0 & \text{元素 } i \text{ 与 } j \text{ 一样重要} \\ 1 & \text{元素 } j \text{ 比 } i \text{ 更重要} \end{cases}$$

根据专家意见得到各个评价指标的重要程度,得到判断矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{n \times n}$, 显然 \mathbf{A} 是主对角线为 0 的一个实数矩阵,若满足 $a_{ij} = -a_{ji}$, 矩阵 \mathbf{A} 则为反对称矩阵。

如果反对称矩阵 \mathbf{A} 元素满足 $a_{ij} = a_{im} + a_{mj}$, 那么矩阵 \mathbf{A} 有传递性。当传递矩阵 \mathbf{A} 与矩阵 \mathbf{S} 满足下式:

$$b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{ik} - a_{jk} \quad (1)$$

此时, 矩阵 \mathbf{S} 称为 \mathbf{A} 的最优矩阵。

(2) 引入一致性矩阵。当 \mathbf{S} 为 \mathbf{A} 最优矩阵且满足 $\mathbf{A}^* = e^{\mathbf{S}}$, 则矩阵 \mathbf{A}^* 是 \mathbf{A} 的一致性矩阵^[11]。 \mathbf{A}^* 的数学定义可写为如下形式:

$$\mathbf{A}^* = \begin{cases} a_{11}^* & a_{12}^* & \cdots & a_{1n}^* \\ a_{21}^* & a_{22}^* & \cdots & a_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}^* & a_{n2}^* & \cdots & a_{nn}^* \end{cases} \quad (2)$$

(3) 求取矩阵 \mathbf{A}^* 的最大特征向量, 并对其进行

归一化处理,最终结果为指标的主观权重 w_1 。

2.2 博弈论组合赋权法

利用熵权法确定各评价指标的客观权重 w_2 。在评价过程中,确定指标的权重时,单独使用主观赋权法,导致得到的权重主观性太强,受到决策者的个人意愿影响,缺乏客观性;而使用客观赋权法可以充分挖掘数据,但不会体现专家对各指标的重视程度。因此使用组合赋权法来确定指标的权重,使之包含主、客观因素,从而更加真实有效。本文采用博弈论思想将主、客观权重进行组合,得到指标的最终权重。其过程如下:

(1)将使用改进 AHP 得到的权重 w_1 和熵权法得到权重 w_2 , 进行线性组合求取组合权重 w , 表达式如下:

$$w = \beta_1 w_1^T + \beta_2 w_2^T \tag{3}$$

其中, β_1, β_2 分别表示主观权重和客观权重的线性系数。

(2)利用博弈论思想求取权重纳什均衡点,即:

$$\min \| \beta_1 w_1^T + \beta_2 w_2^T - w_q^T \|_2, q = 1, 2 \tag{4}$$

(3)对式(4)进行一阶求导,其最优解即是主、客观权重利用博弈论思想得到的最优权重组合,导数条件如下:

$$\beta_1 w_q w_1^T + \beta_2 w_q w_2^T = w_q w_q^T \tag{5}$$

(4)根据式(5)求得权重系数 β_1, β_2 , 并对其按下式进行归一化处理:

$$\beta_q^* = \frac{\beta_q}{\beta_1 + \beta_2} \tag{6}$$

(5)确定最终组合权重 w , 其值可由如下数学公式求出:

$$w = \beta_1^* w_1 + \beta_2^* w_2 \tag{7}$$

3 TOPSIS 模型的电能质量综合评估

TOPSIS 是一种通过计算各评价对象的指标数据与理想指标数据的欧式距离对评价对象进行优劣排序的综合评价方法^[11]。为消除评价指标间可能存在一定的线性关联,本文对传统的 TOPSIS 做出改进。现给出基本步骤分述如下:

(1)设评估对象为 m , 评估指标为 n, d 为电能质量等级。将评估数据和标准数据组合得到样本矩阵 X , 即 $X = (x_{ij})_{(m+d)n}$ 。这里在矩阵 X 中,第 1 ~ d 行是电能质量指标的等级样本,第 $(d + 1) \sim (d + m)$ 行是评估对象测量样本。

(2)数据归一化处理。本文所选取的指标皆为逆向指标,采用下式进行数据处理:

$$Z_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \tag{8}$$

(3)构建加权样本矩阵 $Y = (y_{ij})_{(m+d)n}$, 此处需用到的数学公式为:

$$y_{ij} = w_j * z_{ij} \tag{9}$$

其中, w_j 为组合权重。

(4)确定正理想解 A^+ 和负理想解 A^- , 利用夹角余弦分别求解第 j 个待评价方案到理想解的距离。研究中推得的数学公式可分别表示为:

$$S_i^+ = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - x_c) \times (A_j^+ - x_c)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - x_c)^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_j^+ - x_c)^2}} \tag{10}$$

$$S_i^- = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - x_c) \times (A_j^- - x_c)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - x_c)^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_j^- - x_c)^2}} \tag{11}$$

其中, $x_c = \frac{A_j^+ + A_j^-}{2}, i = 1, 2, \dots, m。$

(5)计算各待评价对象的相对接近度 C_i , 数学定义公式见如下:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \tag{12}$$

计算 C_i 值得到样本数据的优劣次序,结果值越大,表明其质量越接近正理想方案,即质量越好。本文基于博弈论组合赋权的 TOPSIS 电能质量综合评估流程如图 2 所示。

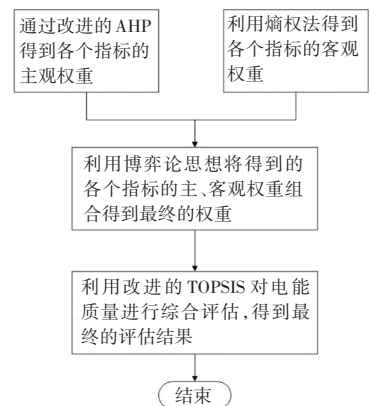


图 2 基于博弈论组合赋权的 TOPSIS 电能质量评估

Fig. 2 TOPSIS power quality evaluation based on combination weighting of game theory

4 实例验证

本文选取 0.38 kV 线路的 5 个不同的观测点所采集的实测数据作为实例验证数据^[12], 实测数据见表 1。根据专家意见, 结合三标度法得到判断矩阵 A:

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

根据公式(1)求得的最优矩阵 S 为:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{6}{5} & 0 & 0 & -\frac{4}{5} \\ \frac{6}{5} & 0 & \frac{6}{5} & \frac{6}{5} & \frac{2}{5} \\ 0 & -\frac{6}{5} & 0 & 0 & -\frac{4}{5} \\ 0 & -\frac{6}{5} & 0 & 0 & -\frac{4}{5} \\ \frac{4}{5} & -\frac{2}{5} & \frac{4}{5} & \frac{4}{5} & 0 \end{bmatrix}$$

根据关系式 $A^* = e^S$ 求得的一致性矩阵 A^* 为:

$$A^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.301 & 1 & 0 & 0.449 \\ 3.32 & 1 & 3.32 & 3.32 & 1.492 \\ 1 & 0.301 & 1 & 1 & 0.449 \\ 1 & 0.301 & 1 & 1 & 0.449 \\ 2.226 & 0.670 & 0.226 & 2.226 & 1 \end{bmatrix}$$

由于一致性矩阵 A^* 具有一致性要求, 不需要再次进行验证, 直接求取其最大的特征向量, 并进行归一化, 得到的结果即为指标的主观权重 w_1 :

$$w_1 = (0.117 \ 0 \ 0.388 \ 5 \ 0.117 \ 0 \ 0.117 \ 0 \ 0.264 \ 0)$$

利用熵权法对实测数据处理得到评估指标的客观权重 w_2 :

$$w_2 = (0.193 \ 5 \ 0.061 \ 2 \ 0.205 \ 0 \ 0.208 \ 4 \ 0.332 \ 0)$$

将 w_1, w_2 代入公式(3)可以解得:

$$\beta_1 = 0.653 \ 9 \quad \beta_2 = 0.496 \ 5$$

根据公式(4)~(7)可以得到评估指标的组合同权重 w :

$$w = (0.150 \ 0 \ 0.247 \ 2 \ 0.155 \ 0 \ 0.156 \ 4 \ 0.293 \ 4)$$

将指标的实测数据与国际标准构建样本矩阵, 根据公式(8)~(9)建立样本加权矩阵 Y:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.076 \ 8 & 0.089 \ 7 & 0.083 \ 5 & 0.083 \ 3 & 0.275 \ 7 \\ 0.053 \ 0 & 0.059 \ 8 & 0.055 \ 7 & 0.055 \ 5 & 0.206 \ 8 \\ 0.033 \ 1 & 0.029 \ 9 & 0.027 \ 8 & 0.027 \ 8 & 0.137 \ 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.050 \ 1 & 0.040 \ 1 & 0.060 \ 0 & 0.065 \ 0 & 0.226 \ 1 \\ 0.004 \ 2 & 0.028 \ 1 & 0.024 \ 4 & 0.035 \ 5 & 0.049 \ 6 \\ 0.035 \ 1 & 0.003 \ 0 & 0.045 \ 6 & 0.036 \ 1 & 0.160 \ 6 \\ 0.022 \ 1 & 0.037 \ 7 & 0.011 \ 9 & 0.014 \ 4 & 0.113 \ 0 \\ 0.036 \ 8 & 0.025 \ 1 & 0.006 \ 0 & 0.009 \ 4 & 0.029 \ 6 \end{bmatrix}$$

根据公式(10)~(12)得到各个监测点与理想解间的贴近度 C, 即:

$$C = (1.000 \ 0 \ 0.990 \ 8 \ 0.102 \ 1 \ 0.000 \ 0 \ 0.852 \ 1 \ 0.038 \ 2 \ 0.252 \ 1 \ 0.088 \ 8 \ 0.038 \ 6)$$

由表 1 的计算结果得到 5 个监测点的电能质量优劣次序为: 点 1、点 3、点 4、点 5、点 2。文献[12]采用遗传投影寻踪插值模型对电能质量进行综合评估, 5 个监测点的电能质量优劣排序与本文一致, 实例结果验证了本文方法的可行性。

表 1 实测数据
Tab. 1 Measurement data

编号	指标				
	$I_1 / \%$	$I_2 / \%$	I_3 / Hz	$I_4 / \%$	$I_5 / \%$
1	3.212	1.33	0.092 2	0.83	1.72
2	6.680	1.53	0.156 2	1.36	4.28
3	4.350	1.95	0.118 0	1.35	2.67
4	5.530	1.37	0.178 7	1.74	3.36
5	4.220	1.58	0.189 2	1.83	4.57

5 结束语

针对运用 AHP 确定主观权重需要进行一致性检验, 为提高一致性引入三标法对 AHP 进行改进, 通过构建一致性矩阵提高一致性, 使得主观权重更加实际。研究中, 采用博弈论思想将主、客观权重进行组合, 再使用改进的 TOPSIS 模型进行最终的评估, 使得组合权重更加合理。因此本文提出基于博弈论组合赋权的 TOPSIS 电能质量综合评估法。算例结果表明本文提出的方法是一种可行的电能质量综合评估方法。

参考文献

[1] BOLLEN M H J. What is power quality [J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(1): 5-14.
 [2] 付学谦, 陈皓勇, 刘国特, 等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4270-4276.