

基于组合赋权法的TOPSIS模型的电能质量综合评估

孙建梅¹, 陈璐²

(1. 上海电力学院经管学院, 上海 200090; 2. 浙江正泰新能源开发有限公司, 杭州 310000)

摘要: 随着电价改革的推进, 准确的电能质量评估将成为分质电价的关键依据之一。首先选用改进的层次分析法、改进的熵权法和变异系数法这三种赋权法得到权重因子, 并利用相对熵理论建立优化模型, 求取其组合权重; 再采用近似理想解法的排序法, 根据相对熵值计算相对接近度, 以构建电能质量评价体系, 最终实现综合评估。该评估模型避免了单一赋权法的弊端, 应用主客观赋权法与TOPSIS相结合的方法, 为权值的有效组合提供了新的思路, 通过实例分析体现了组合赋权法的TOPSIS模型的可操作性和准确性。

关键词: 电能质量; 理想解法; 相对熵; 综合评估

Comprehensive power quality evaluation of TOPSIS model based on combinatorial weighting method

SUN Jianmei¹, CHEN Lu²

(1. School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Zhejiang CHINT New Energy Derelopment Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: With the advancement of electricity price reform, accurate comprehensive evaluation of power quality will become one of the key basis for qualitative pricing. The improved analytic hierarchy process (AHP), the improved entropy weight method and the coefficient of variation method are used to obtain the weighting factors. By using the relative entropy theory, the optimization model is established and the combination weights of various subjective and objective weighting methods are calculated. Using the approximate ideal solution method (TOPSIS) ranking method, according to the relative entropy to calculate the relative proximity, a power quality evaluation system is built, and ultimately to achieve a comprehensive assessment. The evaluation model of this paper avoids the drawbacks of the single weighting method, and uses the method of combining the subjective and objective weighting method with TOPSIS, and provides a new idea for the effective combination of weights. Through the example analysis, the feasibility and accuracy of the TOPSIS model of the combination weighting method are verified.

Key words: power quality; TOPSIS; relative entropy; comprehensive evaluation

0 引言

随着电价改革的发展, 电能质量将作为

分质定价的参考依据之一。同时, 用户侧对电能质量的要求也在提高, 因此对其进行准确地综合评估具有实质性作用。针对多指标的综合评估, 每一指标权重值的确定非常重

国家自然科学基金项目“基于节能减排的发电权与排污权组合交易模型”(71403163)

要,对权重进行有效组合也是需要重点研究的内容之一,它们都对评价结果的科学性有直接影响^[1]。

从现有研究看,文献[2]选用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)以及模糊方法作评估,但求得的权重值主观性太强,忽略了数据本身的特点;文献[3-4]通过隶属度函数作综合评估,客观性较差,在利用AHP法获得主观权重值时,必须先对构建的判断矩阵作一致性检验,使整个过程的计算量明显增大;文献[5]将主客观方法的权重相组合,获得其组合权重,但客观权值的确定方法还值得商榷;文献[6]根据离差最大化原理得到最优组合权重值,该方法计算简单、概念清晰,但缺点是可能会使组合赋权的结果失真。AHP法是一种极具代表性的主观赋权法^[7],传统的AHP法需进行繁杂的一致性检验。熵权法是一种适用于小样本数据,对异常值较敏感,且可以充分利用原始状态数据的客观赋权法,但传统的熵权法存在不足之处。变异系数法的思路清晰,计算简单,需获得均值和标准差^[8]。将主客观赋权值作组合优化,可以尽可能保留客观数据的原始信息,且可以借助于专家们的经验累积,使计算结果更为合理。在权值组合的方法中,加法合成不能完全合理地确定偏好系数;乘法合成存在倍增效应的缺陷,且这两种组合方式仅能满足两种赋权法的合成。基于相对熵原理建立的最优化数学模型适用于两种及两种以上赋权方法的合成,且能够充分利用主客观赋权值的信息,减少误差。因此,该文选择三种合适的赋权方法,再根据相对熵原理来构建最优化数学模型,并获得组合权重,同时基于理想解法,最终实现电能质量的综合评估。

1 权重的确定

1.1 改进的层次分析法

AHP法是基于专家的主观经验来构建判

断矩阵。传统的AHP法采用九标度法,矩阵元素间重要程度比较的划分过于复杂,容易导致判断误差;且必须对判断矩阵反复地作一致性检验,直到符合要求为止。该文选用三标度的AHP法生成判断矩阵,其优点在于很大程度上减小矩阵元素间作比较时出现误判的几率,且避免一致性检验的步骤,以简化计算过程。具体计算步骤如下:

1)根据专家的经验,评选出各指标的重要性程度。

2)构建出判断矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times n}$,式中,若指标 i 重要,取 $a_{ij}=1$;若指标 j 重要,取 $a_{ij}=-1$;若两指标同等重要,取 $a_{ij}=0$ 。

3)求最优传递矩阵,最后可求解一致性矩阵。最优传递矩阵 $B=(b_{ij})_{m \times n}$ 满足

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

将 B 转换成完全一致性矩阵 $A^*=(a^*_{ij})_{m \times n}$,其中 $a^*_{ij}=\exp(b_{ij})$ 。该矩阵 A^* 满足一致性要求,且尽可能地体现出判断矩阵的初始信息。

4)计算矩阵 A^* 的特征向量 $\theta=[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$,所求向量即为各指标的权重系数。

1.2 变异系数法

变异系数法是直接运用各指标的原始信息,基于各指标观测值变异的程度对其作权重。定义原始数值的标准差除以均值的值为变异系数。首先将所有指标进行正向化处理,以便将不同量纲的指标作比较。假定有 n 项指标, m 个评价对象,首先对原始矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 作指标正向化处理,将负向指标的数据取倒数,得到矩阵为 $X'=(x'_{ij})_{m \times n}$ 。第 j 项指标的变异系数 η_j 可表示为

$$\eta_j = \frac{\sigma_j}{\bar{X}_j} \quad (2)$$

式中, $\bar{X}_j$ 和 σ_j 分别为第 j 个指标的平均值和标准差。

第 j 项被评价指标的权值为

$$u_j = \frac{\eta_j}{\sum_{j=1}^n \eta_j} \quad (3)$$

1.3 改进的熵权法

熵权法是能够充分运用初始数据信息的客观赋权法^[9]，该方法一般用来进行方案选择，很适合于小样本数据，能够使求取的权重系数更客观准确。采用该方法进行电能质量综合评价时，人们可以基于指标的变异程度得到相应的熵值，通过对比指标熵值的大小来得到其权值。

假定 n 项指标， m 个评价对象，将指标一致正向化后的矩阵为 $X'=(x'_{ij})_{m \times n}$ 。各指标的信息熵值表示为

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \left(\sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \right) \quad j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

其中， $Y=(y_{ij})_{m \times n}=(x'_{ij})/(\sum_{i=1}^m x'_{ij})$ ， $j=1,2,\dots,n$ 。为使 $\ln y_{ij}$ 有意义，假定 $y_{ij}=0$ 时， $y_{ij} \ln y_{ij}=0$ 。

各指标的熵权值（即权重）定义为

$$v_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^n (1-E_j)} \quad (5)$$

由式（5）可知，熵值越大，相应的权值越小。利用式（5）计算权重时也会存在一些问题，如传统熵权法在计算指标信息熵值 E_j 趋近于1指标权重时，虽然信息熵值的大小区别很细微，计算得到的熵权值却会出现成倍数的差异。为有效解决此类问题，对式（5）进行改进如下

$$v_j = \frac{\sum_{k=1}^n E_k + 1 - 2E_j}{\sum_{l=1}^n (\sum_{k=1}^n E_k + 1 - 2E_l)} \quad (6)$$

1.4 相对熵的组合赋权

相对熵常被应用于概率论中，以体现两个概率分布之间的差异，也可以被用于确定最优的组合权重。通过对权重向量计算得出

相对熵，以衡量多种赋权法的贴近程度。相对熵的运用，对多种主客观赋权法的结果作一定修正，最终取得最优权重。

设有权向量 u_i 和 u_j ，二者间相对熵 $h(u_i, u_j)$ 可表示为 $h(u_i, u_j) = \sum_{l=1}^m u_{il} \log \frac{u_{il}}{u_{jl}}$ 。

根据相对熵的原理，基于单一赋权值与组合权重的相对熵总和取得最小的思想，建立数学规划模型如下

$$\begin{aligned} \min H(w) &= \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^n w_j \log \frac{w_j}{u_{kj}} \\ \text{s. t. } &\sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad w_i > 0 \quad i=1,2,\dots,m \end{aligned} \quad (7)$$

式中， u_{kj} 为第 k 种赋权法对第 j 个指标的权值。

最优化模型有全局最优解 $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 可表示为

$$w_j = \frac{\prod_{i=1}^p (u_{ji})^{\frac{1}{p}}}{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^p (u_{ji})^{\frac{1}{p}}} \quad (8)$$

2 基于改进理想解法的综合评价模型

理想解法多被应用于多指标评估体系，又被称为TOPSIS法。该方法采用相对接近度来表征各评价对象与参考点的距离，根据相对接近度值对评估对象作优劣排序，该值越大，意味着评估对象越接近理想解，评估对象越优。

不同的指标有不同的物理量纲，为了在各指标间进行比较，必须进行无量纲处理，由下式得标准化矩阵 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$ ，即

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{k=1}^n x'_{kj}} \quad (9)$$

将所求得的各项指标权值乘以标准化矩阵，得到加权标准化决策矩阵^[10]表达式为

$$c_{ij} = w_j \times y_{ij} \quad (i=1,2,\dots,4; j=1,2,\dots,8) \quad (10)$$

各指标已作正向化处理，因此可用各指标的最值分别构成正负理想解 c_j^+ 、 c_j^- ，具体如下

$$c_j^+ = \max c_{ij} \quad 1 \leq j \leq n \quad (11)$$

$$c_j^- = \min c_{ij} \quad 1 \leq j \leq n \quad (12)$$

采用相对熵值计算公式来求取观测点各项指标和正负理想解的距离 d_i^+ 、 d_i^- ，即

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n [c_j^+ \times \lg \frac{c_j^+}{c_{ij}} + (1 - c_j^+) \lg \frac{1 - c_j^+}{1 - c_{ij}}] \quad (13)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n [c_j^- \times \lg \frac{c_j^-}{c_{ij}} + (1 - c_j^-) \lg \frac{1 - c_j^-}{1 - c_{ij}}] \quad (14)$$

相对接近度由式(15)计算得到

$$\varepsilon_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (15)$$

3 算例分析

基于上述综合评估方法的分析，引用文献[11]中的数据，用以检验评估方法的准确性。电能质量的评价指标一般涉及三个方面，分别是频率质量、电压质量及供电可靠性。该文选取其中的8种主要指标作电能质量评估，即电压偏差 X_1 、电压暂降 X_2 、三相不平衡 X_3 、电压波动 X_4 、电压闪变 X_5 、谐波畸变 X_6 、频率偏差 X_7 和供电可靠性 X_8 。其中仅有 X_2 和 X_8 是正向型指标，该类指标值越大越好^[12]，观测点各指标的原始数据如表1所示。

表1 电能质量各指标数据

Tab. 1 Power quality index data

观测点	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
1	3.21	0.2	0.83	1.33	0.473	1.72	0.092	0.17
2	6.68	0.84	1.36	1.53	0.847	4.28	0.156	0.24
3	4.35	0.48	1.35	1.95	0.634	2.67	0.118	0.2
4	5.33	0.41	1.74	1.37	0.826	3.36	0.179	0.26

3.1 求出综合权重系数

(1) AHP

基于专家们的经验和意见，综合确定上述指标的重要性程度由高到低为：频率偏

差、谐波畸变、供电可靠性、电压波动、电压闪变、电压偏差、电压暂降和三相不平衡，根据不同程度的重要性构建指标的判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

可见， A 为反对称矩阵，依据式(1)，得到最优传递矩阵 B 。由最优传递矩阵 B 可求得一致性矩阵 A^* ，并根据矩阵 A^* 采用方根法，求取各电能质量指标的主客观权重。

(2) 变异系数法

将各项指标作正向化处理，并利用式(2)求取每一项指标的变异系数，再利用式(3)求得权重。

(3) 熵权法

由式(4)得到各项指标的熵值 E_j 为： $E_1=0.974$ ， $E_2=0.918$ ， $E_3=0.972$ ， $E_4=0.992$ ， $E_5=0.979$ ， $E_6=0.957$ ， $E_7=0.976$ ， $E_8=0.991$ 。可见计算得到的熵值都趋近于1，传统的熵权法无法得到合理的权重，因此，利用式(6)求得改进后的熵权法的权重，三种组合权重结果如表2所示。

表2 三种组合权重

Tab. 2 Three combination weights

赋权方法	X_1	X_2	X_3	X_4
AHP法	0.073	0.057	0.045	0.094
变异系数法	0.124 2	0.217 0	0.131 2	0.064 1
熵权法	0.124 9	0.126 9	0.124 9	0.124 2
组合权重	0.110 2	0.122 8	0.095 0	0.095 9
赋权方法	X_5	X_6	X_7	X_8
AHP法	0.121	0.199	0.256	0.155
变异系数法	0.112 4	0.159 8	0.118 4	0.072 9
熵权法	0.124 7	0.125 4	0.124 8	0.124 2
组合权重	0.125 9	0.167 5	0.164 5	0.118 2

由表2可知, AHP法所代表的主观赋权法明显体现出专家的主观意见, 结果认为频率偏差的权重最大, 三相不平衡的权重最小; 两种客观赋权法的权重则清晰地反映出原始数据的真实情况, 结果一致表明电压暂降的权重最大, 电压波动的权重最小, 可见其权重占比相近, 从而相互验证了赋权结果的正确性。基于相对熵的最优化组合权重, 得到的权值介于主客观权值之间, 实现了主客观赋权方法的统一。

3.2 基于理想解法的综合评估结果分析

由TOPSIS法确定各观测点综合电能质量的优劣排序如表3所示, 观测点1的相对接近度为0.528, 最接近理想解; 其次是观测点3, 其相对接近度为0.415, 具体从优至劣的排序为: 观测点1、观测点3、观测点2和观测点4。文献[13]采用加权核向量空间模型, 以电能质量等级为评价结果, 得到四个观测点的等级结果为2级、4级、3级和4级; 文献[14]采用基于灰色关联分析的灰靶模型, 得到四个观测点的等级结果为3级、4级、3级和4级。在误差允许范围内, 该文应用TOPSIS模型的组

合赋权方法取得的评估结果和另外两篇文章接近, 且改进的理想解法根据计算得到加权距离更为准确地判别评估对象的优劣, 很大程度上避免了评估结果的完全一致性。

4 结束语

在多指标的综合评估中, 权重的确定尤为关键。该文运用相对熵法对主客观赋权进行有效结合, 为权重的组合提供新的思路。改进的AHP法确定权值时, 构建的判断矩阵无须一致性检验, 大大简化了计算过程; 改进的熵权法很好地解决了熵值趋近于1无法得到准确合理权重的问题; 相对熵的组合赋权充分利用主客观权值信息, 避免权重出现偏差, 使赋权结果更合理, 且计算简单, 可操作性强。改进的理想解法根据求取的加权距离更准确地判别评估对象的优劣排序, 很大程度上降低了评估结果相同的概率。

与现有的评价方法相比, 该方法能对观测点的电能质量进行客观的整体评价, 且能反映观测点各指标与理想指标之间的整体相似程度, 是一种更为有效的综合评价方法。

表3 TOPSIS法确定的电能质量综合指标的理想解及其排序

Tab. 3 The ideal solution and ranking of the comprehensive index of power quality determined by TOPSIS method

观测点	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	d_i^+	d_i^-	e_i
1	0.039	0.013	0.035	0.027	0.044	0.065	0.057	0.023	0.017	0.019	0.528
2	0.019	0.053	0.021	0.024	0.024	0.026	0.034	0.033	0.021	0.011	0.358
3	0.029	0.031	0.022	0.019	0.033	0.042	0.044	0.027	0.011	0.008	0.415
4	0.024	0.026	0.017	0.026	0.025	0.033	0.029	0.035	0.023	0.004	0.154
c_j^+	0.039	0.053	0.035	0.027	0.044	0.065	0.057	0.035			
c_j^-	0.019	0.127	0.017	0.018	0.024	0.026	0.029	0.023			

参考文献

- [1] 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(10): 67-73.
- [2] 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.

- [3] 谭家茂, 黄少先. 基于模糊理论的电能质量综合

- 评价方法研究[J]. 继电器, 2006, 34(3): 55-59.
- [4] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳, 等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 11-16.
- [5] 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.
- [6] 陈华友. 多属性决策中基于离差最大化的组合赋权方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004(2): 194-197.
- [7] 赵宪, 周立行, 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.
- [8] 李娜娜, 何正友. 组合赋权法在电能质量综合评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 128-134.
- [9] 杨茂, 齐玥, 穆钢, 等. 基于改进熵权法的风电功率组合预测方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(15): 46-50.
- [10] 陈铭, 喻杰, 邹浩. 基于正交投影法的供应链企业利益分配方法研究[J]. 长沙大学学报, 2011(5): 99-101.
- [11] 林海雪. 论电能质量标准[J]. 中国电力, 1997, 30(3).
- [12] 付可欣, 彭澎, 孔静, 等. 基于层次分析法的电网能效评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(3): 23-26.
- [13] 李如琦, 苏浩益, 曲振旭. 核向量空间模型在电能质量综合评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 72-76.
- [14] 苏浩益, 李如琦, 唐林权, 等. 基于灰靶理论的电气化铁道电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 78-82.
- [15] 柴鹏飞, 孙亚娟, 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.

作者简介



孙建梅

孙建梅(1976—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为可再生能源技术在建筑节能设计中的应用实践等。

陈璐(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式光伏并网对配电网的影响。

(收稿日期: 2019-07-16) **EA**