

# 组合赋权法在电能质量综合评估中的应用

李娜娜, 何正友

(西南交通大学电气自动化研究所, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为了提高电能质量综合评估的客观性、科学性, 该文将几种典型的主观赋权法和客观赋权法相组合建立优化模型, 通过求解优化模型来确定电能质量综合评估各指标最终的权重值。该方法克服了单一赋权法的缺点, 使得权重的确定更为合理。分析计算表明, 利用组合赋权法确定权重值后再对电能质量进行综合评估, 比利用任何一种单一赋权法确定权重后再进行综合评估, 评估的结果更加客观、完善, 更符合实际。

**关键词:** 电能质量; 主观权重; 客观权重; 组合赋权; 综合评估

## Combinatorial weighting method for comprehensive evaluation of power quality

LI Na-na, HE Zheng-you

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to improve the objectivity and scientific of the power quality comprehensive evaluation, this paper combines several kinds of typical subjective weighting method and objective weighting method and establishes the optimization model. By solving the optimization model to determine the weight value of each index of power quality comprehensive evaluation. The method overcomes the shortcomings of the single weighting method and makes sure the weight more reasonable. Analysis shows that using combinatorial weighting method to determine the weight and evaluating the power quality make the evaluation result more objective, perfect and practical.

This project is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China(No.50407009).

**Key words:** power quality; subjective weight; objective weight; combinatorial weighting method; comprehensive evaluation

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0128-07

## 0 引言

随着科学技术和国民经济的发展, 用户对电能的需求量日益增加, 对电能质量的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。同时, 随着电力市场的发展, 在激烈竞争的市场环境下, 电能作为配电侧与用户侧交易的商品, 同其他任何商品一样, 必须讲究质量<sup>[2]</sup>。于是如何衡量电能质量的好坏程度, 即对电能质量进行综合评估就成为了必然。

目前, 已有不少文献对电能质量的综合评估做了研究<sup>[3-6]</sup>, 取得了一定的进展, 但是对于权重的确定没有做出深入的研究。我们知道, 对于多指标综合性评估问题, 权重的确定是一个相当重要的基本步骤, 权重值的变化, 将直接影响到综合评估结果的科学合理性。于是, 为了提高指标权重设置的科学性和合理性, 本文选择了几种有代表性的主观赋

权法和客观赋权法, 通过建立优化模型, 对各种赋权结果进行组合, 将电力用户的主观意愿和各项指标动态数据的客观作用相结合, 实现对评价指标的合理赋权。

## 1 问题的提出

目前, 权重的确定方法主要有主观赋权法和客观赋权法两种<sup>[7-9]</sup>。主观赋权法是一种定性分析方法, 它基于决策者主观偏好或经验给出指标权重, 如层次分析法、最小平方法、Delphi法等。主观赋权法体现了决策者的经验判断, 完全依靠专家的意见来确定评价指标的重要性次序并确定权重。其缺点是权重的确定与评价指标的数字特征无关, 无法显示评价指标的重要程度随时间的渐变性。客观赋权法主要原理是根据原始数据之间的关系通过一定的数学方法来确定权重, 是一种定量分析方法。常用的客观赋权法有主成分分析法、熵权法、相关系数法等。客观赋权法能够有效地传递评价指标的数

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(50407009)

据信息与差别, 但是仅仅以数据说话, 有时会出现权重系数不合理的现象。

对于电能质量综合评估, 主观赋权法通过征询电力用户的需求和咨询专家意见, 然后进行统计综合而定权。这种方法可以满足不同性质电力用户对电能质量的不同要求, 体现了电力用户对电能质量各项指标的重视程度, 确定的权重符合现实。但是, 在对电能质量进行综合评估时, 还应该考虑到指标权重的大小与指标数据的变动有关, 权重值不应该是一成不变的。因此, 在确定电能质量各项指标的权重时, 应该考虑到根据数据变动而确定的客观性权重。

针对上述问题, 本文在对各种赋权方法研究分析的基础上, 提出了综合主、客观权重的组合赋权法, 将几种典型的主观赋权法与客观赋权法的赋权结果相组合, 求取电能质量各单项指标的最终权重。组合赋权法将主观权重和客观权重相结合, 既能有效地反应参与者的主观意愿, 又可避免主观因素过多的随意性, 指标权重能够随着数据的变动而发生变化, 赋权的结果更合理。

## 2 赋权方法简介

本文将利用层次分析法的标度扩展法、专家咨询打分法、优序图法、熵权法以及变异系数法这 5 种赋权方法对电能质量的各单项指标进行赋权, 最后通过建立优化模型, 求取最终的权重值。

### 2.1 层次分析法 (AHP) [10,11]

AHP 法其本质是试图使人的思维条理化、层次化, 是一种主观赋权方法。用 AHP 作系统分析, 首先在对系统深入了解的基础上把问题层次化, 即充分利用人的经验和判断把各个因素分成层次予以量化, 然后对决策方案的优劣进行排序。

利用 AHP 方法建立的判断矩阵  $R = (r_{ij})$  满足:

$$\textcircled{1} r_{ij} > 0; \textcircled{2} r_{ji} = 1/r_{ij}; \textcircled{3} r_{ii} = 1; \textcircled{4} r_{ij} = r_{ik} \times r_{kj},$$

( $i, j, k=1, \dots, n$ )。其中:  $r_{ij}$  表示第  $i$  个元素与第  $j$  个元素相比较的标度值, 其含义如表 1 所示。

传统的 AHP 法需在建立判断矩阵时, 需要对判断矩阵进行一致性检验, 当判断矩阵不能满足一致性检验时, 必须重新修正判断矩阵, 直到满足一致性为止, 计算量非常大。本文采用了 AHP 的一种改进方法, 即 AHP 的标度扩展法, 利用该方法确定的判断矩阵都是完全一致的, 不需要一致性检验, 且排序向量也容易获得, 计算量明显减少, 方法简便、直观便于使用。

改进的 AHP 方法基本思路: 根据专家意见或用户要求对  $n$  个评价指标进行两两比较, 按重要程

度的不减方式排序, 假设根据标度扩展法得  $n$  个指标的重要性排序为  $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_n$ , 对  $x_i$  与  $x_{i+1}$  进行比较, 并将其对应的标度值记为  $t_i$ , 然后按照指标重要程度的传递性计算出判断矩阵中的其他元素的值, 从而得出判断矩阵如式 (1)。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \dots & t_1 t_2 \dots t_{n-1} \\ 1/t_1 & 1 & \dots & t_2 t_3 \dots t_{n-1} \\ 1/t_1 t_2 & 1/t_2 & \dots & t_3 t_4 \dots t_{n-1} \\ 1/t_1 t_2 t_3 & 1/t_2 t_3 & \dots & t_4 t_5 \dots t_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1/t_1 t_2 \dots t_{n-2} & 1/t_2 t_3 \dots t_{n-2} & \dots & t_{n-1} \\ 1/t_1 t_2 \dots t_{n-1} & 1/t_2 t_3 \dots t_{n-1} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由此得出的判断矩阵具有一致性, 因此不需要进行一致性检验, 便可直接根据矩阵  $R$  计算出各项指标的权重值:

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}} \quad (0 \leq w_i \leq 1) \quad (2)$$

表 1 各标度值的含义

Tab.1 The meaning of each scale value

标度	含义
1	两个因素相比, 具有同等重要性
1.2	两个因素相比, 一个因素比另一个稍微重要
1.4	两个因素相比, 一个因素比另一个强烈重要
1.6	两个因素相比, 一个因素比另一个明显重要
1.8	两个因素相比, 一个因素比另一个绝对重要
以上标度倒数	因素 $i$ 与 $j$ 比较得判断 $r_{ij}$ , 则因素 $j$ 与 $i$ 比较得 $r_{ji} = 1/r_{ij}$

### 2.2 专家咨询打分法 [12]

专家打分法是各位专家根据经验判断和个人的理解, 对各指标的权重进行打分, 最后将各位专家的打分结果进行综合从而求得权重的一种主观赋权法。本文参考文献 [12] 提出的新方法, 首先通过对专家的咨询和对电力用户的调查, 形成各项指标的原始权重, 然后通过计算各个权重的偏移量, 最终求取各指标的主观权重值。具体步骤如下:

①对电力用户进行调查, 根据用户需求和专家意见, 形成各指标的原始权重矩阵  $Q = (q_{ij})_{m \times n}$ 。  $q_{ij}$  表示第  $i$  个调查对象对第  $j$  个指标的原始权重, 且

$$\text{满足条件: } \sum_{i=1}^n q_{ij} = 1$$

②计算各指标的平均权重:

$$\bar{q}_j = \sum_{i=1}^m q_{ij} / k \quad (3)$$

其中： $\bar{q}_j$  表示第  $j$  个指标的评价权重， $k$  是被调查对象的总人数。

③ 计算原始权重的偏移量： $q_{ij}^* = |q_{ij} - \bar{q}_j|$  (4)

④ 确定新权重： $p_j = \frac{\sum_{u=1}^m q_{uj} p_{uj}}{\sum_{u=1}^m p_{uj}}$  (5)

其中： $p_{ij} = \frac{\max_i q_{ij}^* - q_{ij}^*}{\max_i q_{ij}^* - \min_i q_{ij}^*}$

对  $P_j = [p_1, p_2, \dots, p_n]$  进行归一化处理得各指标

的权重值为： $w_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j$  ( $0 \leq w_j \leq 1$ ) (6)

2.3 优序图法<sup>[13]</sup>

优序图法是一种比较简单、直观且容易理解和掌握的主观赋权方法。设电能质量的评价指标有  $n$  个，优序图是一个棋盘格的图示共有  $n \times n$  个空格，在进行两两比较时，可选择 1, 0 两个基本数字来表示何者为大，为优。“1”表示两个相比中的相对“大的”、“优的”、“重要的”，而用“0”表示相对“小的”、“劣的”、“不重要的”。由于自身相比没有意义，所以代表相同序号的格子内无需填写。在利用优序图判断各因素优劣或重要性顺序时，以优序图中相同序号的各自为对角线，把这对角线两边对称的空格数字对照一番，如果对称的两栏数字正好一边是 1，而另一边是 0 形成互补或者两边都为 0.5，则表示填表数字无误，即完成互补检验。满足互补检验的优序图的各行所填的各格数字横向相加，分别与总数  $T(T=n(n-1)/2)$  相除就得到了各指标的权重。

2.4 熵权法<sup>[14,15]</sup>

信息熵表示对一个随机事件的不确定性的量度，也可以理解为某种特定信息的出现概率。熵越大，表示无序的程度越高，反之则认为有序程度越高。假设系统  $S$  可能会处于  $n$  种不同的状态： $S_1, S_2, \dots, S_m$ ，每一状态出现的概率分别是  $P_1, P_2, \dots, P_m$ ，它们满足条件：

①  $0 \leq P_i \leq 1, i=1, \dots, m$ ; ②  $\sum_{i=1}^m P_i = 1$ 。

则该系统的熵定义为： $E = -\sum_{i=1}^m P_i \ln P_i$  (7)

$E$  用来作为系统  $S$  的不确定性的量度。当系统  $S$  中，所有  $P_i$  都相等时，即  $P_i=1/m$  时， $E$  的值最大，这时系统具有最大的不确定性；反之，当系统

中任何一个  $P_i = 0$  而其余的都为零时，则  $E \equiv 0$ ，这时系统  $S$  不存在任何不确定性。

熵权法在确定客观权重的基本思想是：对于电能质量综合评估中的各项指标，我们可以根据测量数据计算出每一项指标的熵值  $e_i$  ( $i=1, \dots, n$ )，然后比较各项指标的熵值，根据熵值的大小来确定对应的权重，若某项指标的熵值较小，说明该项指标数据序列的变异程度较大，则它相对应的权系数就较大。

电能质量评估因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  是由评价电能质量的  $n$  个指标组成的集合。评判集  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$  是由电能质量各因素的  $m$  种评价所构成，本文中为优质，良好，合格，较差，很差。

对于评价因素  $U$  中每一指标  $u_i$  做一个评价  $f(u_i)$ ，则可得  $U$  到  $Q$  的一个模糊映射  $f$ ，即：

$u_i \rightarrow f(u_i) = (f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{im}) \in F(Q)$

其中： $F(Q)$  是  $Q$  上的模糊集合全体。根据模糊变换的定义，模糊映射可以确定一个模糊关系  $F$ ，称为模糊评判矩阵：

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对评判矩阵  $F$ ，如果某单项电能质量指标  $u_i$  对评判集  $T$  中各指标的支持度  $f_{ij}$  差距越大，则该单项指标在综合评价中所起的作用越大。如果某单项电能质量指标对评判集  $Q$  中各指标的支持度全部相等，即该指标的评定结果太分散，则该因素在综合评价中几乎不起作用。利用式 (7)，可以求得衡量某个单项指标  $u_i$  的相对重要性的熵值，即该指标传递的信息量为：

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (9)$$

总信息量为： $E = \sum_{i=1}^n e_i$  (10)

由于熵值越大，该指标对电能质量综合评估的贡献越小，即客观权重值  $v_i$  与  $e_i$  成反比，所以因素集  $u_i$  的权重可由  $1-e_i$  来度量。因此由熵权法求得的各指标的客观权重为：

$$v_i = (1 - e_i) / (n - E) \quad (0 \leq v_i \leq 1) \quad (11)$$

2.5 变异系数法<sup>[16,17]</sup>

变异系数法是根据各指标在所有被评价对象上 (本文指电能质量的各等级) 观测值变异程度的大

小来对其进行赋权, 是一种客观赋权法。与熵权法相似, 当该指标变异程度大时, 说明能够较好地区分各个等级在该指标的情况, 应赋予较大的权重; 反之, 则应赋予较小的权重。利用变异系数法求取各指标的权重步骤如下:

① 对评判矩阵  $F$ , 计算第  $i$  个指标的平均值:

$$\bar{f}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \quad (12)$$

② 计算第  $i$  个指标的标准差:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (f_{ij} - \bar{f}_i)^2} \quad (13)$$

③ 计算第  $i$  个指标的变异系数:

$$v_i = \sigma_i / \bar{f}_i \quad (14)$$

④ 归一化处理得第  $i$  个指标的权重:

$$w_i = v_i / \sum_{i=1}^n v_i \quad (0 \leq w_i \leq 1) \quad (15)$$

### 3 组合赋权

利用 2.1~2.5 所述的方法, 可以分别求得电能质量各单项指标的权重值, 并形成矩阵如下:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1k} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nk} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中:  $n$  为指标个数,  $k$  为采用的赋权方法数。  $u_{ij}$  指的是采用第  $j$  种赋权法对第  $i$  个指标的赋权结果。

为了既照顾到决策者的主观偏好, 又考虑到指标数据的客观性, 达到主观与客观的一致, 需要将上述权重进行组合。基于组合权重向量对应的评价向量与原权重向量对应的评价向量之间的偏差应尽可能小的思想, 建立如下模型<sup>[18,19]</sup>:

$$\begin{cases} \min B = \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((u_{il} - a_i) \cdot f_{ij})^2 \\ \text{S.T. } \sum_{i=1}^n a_i = 1, a_i \geq 0 \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $u_{il}$  为第  $l$  种赋权法对第  $i$  个指标的赋权结果;  $a_i$  为第  $i$  个指标组合后的权重值;  $f_{ij}$  为由各指标标准化后形成的评判矩阵。

对模型求解: 该模型的求解是一个条件极值的求解问题, 首先构造拉格朗日 (langrange) 函数:

$$L(a_i, \lambda) = \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(u_{il} - a_i) f_{ij}]^2 + \lambda (\sum_{i=1}^n a_i - 1)$$

根据极值存在的必要条件, 分别对  $a_i, \lambda$  求一阶偏导数, 并令其为零:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial a_i} = -2 \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^m (u_{il} - a_i) f_{ij}^2 + \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n a_i - 1 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

将式 (18) 中以  $i=1, 2, \dots, n$  分别展开, 并形成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} C & e \\ e^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中:  $e = [1, 1, \dots, 1]^T$

$$C = \text{diag} \left[ \sum_{j=1}^m 2kf_{1j}^2, \sum_{j=1}^m 2kf_{2j}^2, \dots, \sum_{j=1}^m 2kf_{nj}^2 \right]$$

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$$

$$D = [2 \sum_{j=1}^m (\sum_{l=1}^k u_{1l}) f_{1j}^2, 2 \sum_{j=1}^m (\sum_{l=1}^k u_{2l}) f_{2j}^2, \dots, 2 \sum_{j=1}^m (\sum_{l=1}^k u_{nl}) f_{nj}^2]^T$$

解矩阵方程 (19) 得:

$$A = C^{-1} \cdot \left[ D + \frac{1 - e^T C^{-1} D}{e^T C^{-1} e} \cdot e \right] \quad (20)$$

根据上式, 便可求得由多种赋权方法确定的权重组合而得的组合权重向量  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。

### 4 综合评估

求得评估指标的权重  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  向量后, 按下式便可求得评估结果:

$$B = A \cdot F \quad (21)$$

其中:  $F$  为评判矩阵, 求取方法参考文献[3]。此处采用了  $(\oplus, \cdot)$  综合评判模型, 称为加权平均型, 它对所有因素依权重大小均衡兼顾, 充分体现出各个因素的作用。

对  $B$  应用加权平均法求取最终评估结果:

$$B' = \sum_{k=1}^m kB_k / \sum_{k=1}^m B_k \quad (22)$$

### 5 仿真分析

首先确定电能质量的因素集  $U$ 、评判级  $T$ 。本文中  $U = \{\text{电压偏差, 谐波, 三相不平衡, 频率偏差, 电压暂降, 电压波动, 电压闪变}\}$ ,  $T = \{\text{优质, 良好, 合格, 较差, 很差}\}$ 。将电能质量分为 5 个等级, 第一级为优质, 第二级为良好, 第三级为合格, 第四级为较差, 第五级为很差。

对电能质量的这几项扰动, 模拟了一组数据, 模拟时间为 60 min, 对模拟数据进行统计分析, 并

形成评判矩阵  $F$  如下:

$$F = \begin{bmatrix} 0.5564 & 0.4097 & 0.0339 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2117 & 0.7883 & 0 & 0 \\ 0.3694 & 0.4923 & 0.1644 & 0.0339 & 0 \\ 0 & 0.3586 & 0.323 & 0.1587 & 0.1597 \\ 0 & 0.0086 & 0.875 & 0.1164 & 0 \\ 0.3218 & 0.1287 & 0.1931 & 0 & 0.3563 \\ 0 & 0 & 0 & 0.338 & 0.662 \end{bmatrix}$$

利用多种赋权方法相组合求取电能质量的组重, 并进行综合评估的具体步骤如下:

### 5.1 利用上述各种方法分别求取各指标的权重值

#### (1) AHP 的标度扩展法

根据专家意见和用户的要求, 对评价指标建立序关系, 本文假定为: 频率>谐波畸变>电压波动>闪变>电压偏差>电压暂降>三相不平衡。

确定指标间的相对重要程度, 可通过专家调查确定, 这里假定为:  $r_{12}=1.8, r_{23}=1.7, r_{34}=1, r_{45}=1.8, r_{56}=1.2, r_{67}=1.2$ 。

根据式 (1) 便可形成判断矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1.8 & 3.06 & 3.06 & 3.672 & 4.4064 & 5.28768 \\ 1/1.8 & 1 & 1.7 & 1.7 & 2.04 & 2.448 & 2.9376 \\ 1/3.06 & 1/1.7 & 1 & 1 & 1.2 & 1.44 & 1.728 \\ 1/3.06 & 1/1.7 & 1 & 1 & 1.2 & 1.44 & 1.728 \\ 1/3.672 & 1/2.04 & 1/1.2 & 1/1.2 & 1 & 1.2 & 1.44 \\ 1/4.4064 & 1/2.448 & 1/1.44 & 1/1.44 & 1/1.2 & 1 & 1.2 \\ 1/5.28768 & 1/2.9376 & 1/1.728 & 1/1.728 & 1/1.44 & 1/1.2 & 1 \end{bmatrix}$$

利用式 (2) 计算得出各单项指标的主观性权重向量:  $W_1=[0.34512 \ 0.19173 \ 0.11278 \ 0.11278, w_5=0.093987 \ 0.078322 \ 0.065269]$ 。依次代表频率、谐波畸变、电压波动、闪变、电压偏差、电压暂降和三相不平衡的主观权重值。

#### (2) 专家咨询打分法

针对不同类型的电力用户, 分别进行用户调查, 根据用户需求和专家意见, 形成各指标的原始权重。假定有 5 位专家对指标权重进行了打分, 形成的原始权重矩阵如下:

$$V = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.20 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.08 & 0.07 \\ 0.30 & 0.25 & 0.08 & 0.15 & 0.1 & 0.06 & 0.06 \\ 0.30 & 0.25 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.09 & 0.06 \\ 0.35 & 0.2 & 0.12 & 0.1 & 0.08 & 0.07 & 0.08 \\ 0.35 & 0.25 & 0.1 & 0.1 & 0.08 & 0.06 & 0.06 \end{bmatrix}$$

利用式 (3) ~ (6) 计算得出频率、谐波畸变、电压波动、闪变、电压偏差、电压暂降和三相不平衡的主观权重分别为:  $W_2=[0.35626 \ 0.20358 \ 0.10179 \ 0.10197 \ 0.10197 \ 0.070717 \ 0.064068]$ 。

#### (3) 优序图法

按照频率、谐波畸变、电压波动、闪变、电压偏差、电压暂降、三相不平衡这几项指标的重要性次序, 形成优序图如表 2 所示。

表 2 优序图

Tab.2 Precedence chart							
	频率偏差	谐波	波动	闪变	电压偏差	电压暂降	三相不平衡
频率偏差	■	1	1	1	1	1	1
谐波	0	■	1	1	1	1	1
波动	0	0	■	1	1	1	1
闪变	0	0	0	■	1	1	1
电压偏差	0	0	0	0	■	1	1
电压暂降	0	0	0	0	0	■	1
三相不平衡	0	0	0	0	0	0	■

此优序图满足互补条件, 将优序图的各行数字横向相加, 然后分别与总数  $T(T=n(n-1)/2)=21$  ( $n$  为指标个数) 相除就得到了频率、谐波畸变、电压波动、闪变、电压偏差、电压暂降和三相不平衡的权重:  $W_3=[0.285 \ 7 \ 0.238 \ 10 \ 0.190 \ 50 \ 0.142 \ 90 \ 0.095 \ 20 \ 0.047 \ 62 \ 0]$ 。

#### (4) 熵权法

对评判矩阵  $F$ , 利用式 (9) 计算得出每一项指标的信息量  $e_i$  分别为:  $e_1=0.508 \ 44, e_2=0.320 \ 37, e_3=0.701 \ 05, e_4=0.818 \ 84, e_5=0.253 \ 56, e_6=0.816 \ 43, e_7=0.397 \ 47$ 。利用式 (10) 求得总信息量  $E=3.816 \ 5$ 。利用式 (11) 求得频率、谐波畸变、电压波动、闪变、电压偏差、电压暂降和三相不平衡的客观权重分别为:  $V_1=[0.15635 \ 0.21288 \ 0.093691 \ 0.051776 \ 0.23394 \ 0.057531 \ 0.18883]$ 。

#### (5) 变异系数法

按照式 (12) ~ (15) 求得频率、谐波畸变、电压波动、闪变、电压偏差、电压暂降和三相不平衡的客观权重分别为:  $V_2=[0.14877 \ 0.19246 \ 0.11352 \ 0.08152 \ 0.21452 \ 0.081891 \ 0.16734]$ 。

### 5.2 求解优化模型, 确定最终的组合权重

利用各种赋权法求得各指标的权重后, 便可形成矩阵  $U$ , 然后利用式 (17) ~ (20), 便可求得各指标的最终权重值:  $A=[0.19344 \ 0.15033 \ 0.13718 \ 0.15854 \ 0.11367 \ 0.14229 \ 0.10454]$ 。各种赋权法确定的权重以及最终的组合权重如表 3 所示。

### 5.3 综合评估

利用式 (21) ~ (22), 求得最终的评估结果  $B'=2.7076$ 。

这就是对电能质量的最终评估结果,  $B'$  介于 2 和 3 之间, 即电能质量介于“良好”与“合格”之间。

### 5.4 结果分析

假设三相不平衡不平衡度在整个测量时间段里都处于 1.6%~2.0% 的范围, 也就是说三相不平衡处在第五级的时间为 60 min, 而处在其他级的时间均

为 0 s, 这时它在各级 (1~5 级) 所占的概率分别为: 0, 0, 0, 0, 1。其他六项的扰动数据不变。求得各指标的权重及评估结果见表 4。

从表 3 可以看出, 当三相不平衡的数据发生变动后, 利用 AHP、专家打分法以及优序图这三种主观赋权法确定的各指标权重值未发生改变, 而利用熵权法、变异系数法这两种客观赋权法确定的各指标的权重发生了明显的变化, 三相不平衡项的权重分别由原来的 0.188 83 和 0.167 34 变为 0.278 69 和 0.232 4, 这是因为三相不平衡度的偏差幅度增大, 变化剧烈, 权重值相应的要增大。这说明当指标数据发生变动时, 客观赋权法能够反应这种变化, 而主观赋权法则不能反应这种变化。从评估的结果来看, 如果单独利用某一种赋权方法, 所得的评估结果差距很大, 例如, 单独利用 AHP 法的评估结果为 2.452 1, 而单独利用熵权法的评估结果为 3.230 1, 质量等级相差了几乎一个等级。显然, 由于三相不平衡度的偏差幅度比较大, 在 1.6%~2.0% 的范围, 已经快接近国标规定的限制, 并且持续时间较长,

该项指标的单项评估明显为较差的等级。从表中可以看出, 单独利用三种主观赋权法的评估结果都分别为 2.452 1、2.443 1 和 2.318 8, 评估结果都介于“良好”与“合格”之间。而单独利用两种客观赋权法的评估结果分别为 3.230 1 和 3.118 2, 介于“合格”与“较差”之间。由此可见, 利用主观赋权法确定权重后再进行综合评估, 评估的结果对数据变动的反应不够灵敏, 评估结果受主观因素影响太大, 客观赋权虽然能够灵敏地反应这种变化, 但是却不能反应不同电力用户对电能质量的不同需求, 对一些电力用户认为不重要的电能质量指标的赋权结果过大。而本文将这几种典型的主、客观赋权法相组合后进行综合评估, 既能够满足不同用户对电能质量的不同需求, 使评估结果能够反应一定的主观意愿, 同时又做到了客观实际, 使评估的结果能够比较灵敏地反应数据的变动, 使得主客观得到了统一, 克服了单一种赋权法的不足, 使得评估的结果更为准确合理, 更符合实际。

表 3 五种赋权法求得的各指标权重及组合权重

Tab.3 The index weight and combination weight of each index with five weighting methods

	频率偏差	谐波	电压波动	闪变	电压偏差	电压暂降	三相不平衡
AHP	0.345 12	0.191 73	0.112 78	0.112 78	0.093 987	0.078 322	0.065 269
熵权法	0.156 35	0.212 88	0.093 969 1	0.051 776	0.233 94	0.057 531	0.188 83
专家打分法	0.356 26	0.203 58	0.101 79	0.101 79	0.101 79	0.070 717	0.064 068
变异系数法	0.147 75	0.192 69	0.113 66	0.081 6	0.214 78	0.081 989	0.167 34
优序图法	0.285 7	0.238 10	0.190 50	0.142 90	0.095 20	0.047 62	0
组合权重	0.193 44	0.150 33	0.137 18	0.158 54	0.113 67	0.142 29	0.104 54

表 4 权重值及评估结果

Tab.4 The weight and evaluation results

	频率偏差	谐波	电压波动	闪变	电压偏差	电压暂降	三相不平衡	评估结果 B'
AHP	0.345 12	0.191 73	0.112 78	0.112 78	0.093 987	0.078 322	0.065 269	2.452 1
熵权法	0.139 03	0.189 3	0.083 313	0.050 487	0.208 02	0.051 159	0.278 69	3.230 1
专家打分法	0.356 26	0.203 58	0.101 79	0.101 79	0.101 79	0.070 717	0.064 068	2.443 1
变异系数法	0.137 14	0.177 42	0.104 65	0.075 133	0.197 76	0.075 492	0.232 4	3.118 2
优序图法	0.285 7	0.238 10	0.190 50	0.142 90	0.095 20	0.047 62	0	2.318 8
组合权重	0.194 28	0.148 83	0.139 22	0.162 99	0.111 41	0.146 71	0.096 566	2.724 2

## 6 结论

本文提出了利用组合赋权法来确定电能质量各指标权重的方法, 即将由 AHP、专家打分法和优序图法这三种主观赋权法以及熵权法、变异系数法这两种客观赋权法确定的权重相组合, 建立优化模型, 通过求解优化模型确定最终的权重值。这样,

既考虑到了因素在动态变化时, 权数也应该随各因素贡献度的不同而有所变化, 又可以使专家以及用户参与到评估过程当中, 满足不同情况下用户的需求, 使得权重的确定符合现实。同时将各种赋权法相组合, 能够克服单一赋权法的不足, 使得评估结果更为客观、合理, 更符合实际。

## 参考文献

- [1] 贾秀芳,赵霞.电力市场环境下的电压质量的综合评价指标[J].电网技术,2007,31(11):59-68.  
JIA Xiu-fang, ZHAO Xia. Synthesis Evaluating Index of Voltage Quality in Electricity Market Environment[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 59-68.
- [2] 徐永海,肖湘宁.电力市场环境下的电能质量问题[J].电网技术,2004,28(22):48-52.  
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning. Power Quality Problems in Deregulated Power Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 48-52
- [3] 陈磊,许永海.浅谈电能质量评估的方法[J].电气应用,2005,24(1):58-65.  
CHEN Lei,XU Yong-hai.Discussion about the Methods of Evaluation Power Quality[J].Electric Application, 2005, 24(1):58-65.
- [4] 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,2000,24(6):46-49.  
JIA Qing-quan, SONG Jia-hua, LAN Hua, et al. Quality of Electricity Commodity and Its Fuzzy Evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 46-49.
- [5] 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.  
TAN Jia-mao, HUANG Shao-xian. Research on Synthetic Evaluation Method of Power Quality Based on Fuzzy Theory[J]. Relay, 2006, 34(3): 55-59.
- [6] 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):11-14.  
ZHAO Xia, ZHAO Cheng-yong, JIA Xiu-fang, et al. Fuzzy Synthetic Evaluation of Power Quality Based on Changeable Weight[J]. Power System Technology,2005,29(6):11-14.
- [7] 王晖,陈丽,陈垦,等多指标综合评价方法及权重系数的选择[J].广东药学院学报,2007,23(5):583-589.  
WANG Hui,CHEN Li,CHEN Ken,et al.Choose the Method of Multi-index Integrative Appraise and the Weight Coefficient[J]. Journal of Guangdong College of Pharmacy,2007,23(5):583- 589.
- [8] 赵忠刚,姚安林,赵学芬,等.油气管道风险因素的权重赋值方法研究[J].天然气工业,2007,27(7):103-108.  
ZHAO Zhong-gang,YAO An-lin,ZHAO Xue-fen,et al.Method of Assining Weight to Risk Factors of Oiland Gas Pipeline[J].Natural Gas Industry, 2007,27(7):103-108.
- [9] 李因果,李新春.综合评价模型权重确定方法研究[J].辽东学院学报(社会科学版),2007,9(2):92-97.  
LI Yin-guo,LI Xin-chun.Weight Determination of Comprehensive Evaluation Model[J].Journal of Eastern Liaoning University(Sosial sciences), 2007,9(2):92-97.
- [10] 黄德才,郑河荣. AHP方法中判断矩阵的标度扩展构造法[J].系统工程,2003,21(1):105-109.  
HUANG De-cai, ZHENG He-rong. Scale-extending Method for Constructing Judgment Matrix in the Analytic Hierarchy Process[J]. Systems Engineering, 2003, 21(1): 105-109(in Chinese).
- [11] 何堃.层次分析法的标度研究[J].系统工程理论与实践,1997,(6):58-61.  
HE Kun. A Study on the Scale of Analytic Hierarchy Process[J]. Systems Engineering Theory and Practice,1997,(6):58-61.
- [12] 王宇亮,刘智慧.基于模糊数学理论的桥型方案比选模型[J].工程设计与建设,2005,37(1):14-17.  
WANG Yu-liang,LIU Zhi-hui.Bridge Type Scheme Comparison Model Based on Theory of Fuzzy Mathematics[J].Engineering Design And Construction, 2005,37(1):14-17.
- [13] 金新政,厉岩.优序图和层次分析法在确定权重时的比较研究及应用[J].中国卫生统计,2001,18(2):119-120.  
JIN Xin-zheng,LI Yan.The Comparative Study and Application of Precedence Chart and AHP for Weight Determination[J]. China Health Statistical, 2001,18(2):119-120.
- [14] 张先起,刘慧卿.基于熵权的灰色关联模型在水环境质量评价中的应用[J].水资源研究,2006,27(3):17-19.  
ZHANG Xian-qi,LIU Hui-qing.The Application Based on Grey Correlation Model of Entropy Weight for Water Environmental Quality Assessment[J].Water Resource Research, 2006,27(3):17-19.
- [15] 郭东强.利用熵权系数法评价企业信息化建设项目[J].运筹与管理,2003,12(3):76-79.  
GUO Dongqiang.Application of Entropy Weight Coefficient Method to the Evaluation of Enterprise Informatization[J]. Operations Research and Management Science, 2003,12(3):76-79.
- [16] 李宝树,陶鹏,张艳,等.用变异系数法评价直流换流站的运行可靠性[J].华东电力,2005,33(12):9-11.  
LI Bao-shu,TAO Peng,ZHANG Yan,et al.Evaluation of Operational Reliability for DC Converter Stations by Using Variation Coefficient Method[J].East China Electric Power, 2005,33(12):9-11.
- [17] 孙凯,鞠晓风,李煜华.基于变异系数法的企业孵化器运行绩效评价[J].哈尔滨工业大学学报,2007,12(3):165-167.  
SUN Kai,JU Xiaofeng,LI Yuhua.Performance Evaluation of Enterprise Incubators Based on Variation Coefficient Method[J].Journal of Harbin Univ,SCI&TECH, 2007,12(3):165-167.
- [18] 徐泽水,达庆利.多属性决策的组合赋权方法研究[J].中国管理科学,2001,10(2):84-87.  
XU Ze-shui,DA Qing-li.Study on Method of Combination Weighting[J]. Chinese Journal of Management Science,2001, 10(2):84-87.
- [19] 毛定详.一种最小二乘意义下主客观评价一致的组价评价方法[J].中国管理科学,2002,10(5):95-97.  
MAO Ding-xiang.A Combinatinal Evaluation Method Resulting in Consistency Between Subjective and Objective Evaluation in Least Squares Sense[J]. Chinese Journal of Management Science,2002,10(5):95-97.

收稿日期:2008-09-18; 修回日期:2009-05-08

作者简介:

李娜娜(1980-),女,硕士研究生,研究方向为电能质量与电力市场;E-mail:nalilina@yahoo.cn

何正友(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事信号处理和信息理论在电力系统故障诊断中的应用、新型继电保护原理、配电网自动化等方面的研究工作。