

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.10.012

基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法

沈阳武¹, 彭晓涛¹, 施通勤², 毛 荀¹, 孙元章¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072; 2. 湖北省电力公司, 湖北省武汉市 430077)

摘要: 依据主观或客观以及主客观组合原则确定权重存在局限性, 为提高综合评价的科学性, 研究并提出了一种兼顾主客观因素的集成赋权方法。该方法以决策者提出的主观权重和客观权重作为标准, 以集成权重与主客观权重偏差最小为目标, 基于矩估计理论建立赋权的最优组合模型, 通过求解模型的最优解以确定指标的最优组合权重。在此基础上, 结合灰色关联度, 提出了基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法。利用该评价方法对某地区电网 10 kV 母线电能质量进行评价, 结果不仅验证了所提出的权重集成赋值方法的合理性, 也验证了所研究电能质量灰色综合评价方法的有效性。

关键词: 电能质量; 综合评价; 主观赋权; 客观权重; 最优组合权重; 矩估计理论; 灰色关联度

0 引言

随着微电子技术和电力电子技术的发展, 各种大型设备、非线性负荷以及冲击性负荷在日益广泛应用于电力系统的同时, 也导致了较为突出的电网电压畸变、波动和闪变等电能质量问题。随着用户侧对电能质量要求越来越高以及敏感性负荷设备的日益增多^[1-3], 如何对其用电质量进行正确评价, 是实现“按质定价、优质优价”的关键^[4]。因此, 如何对电能质量进行综合评价将成为现代电力系统的一项重要研究内容。

电能质量各评价指标的权重作为综合评价的关键, 其权重的取值将直接影响电能质量评价结果的科学合理性。目前, 评价指标权重的确定方法主要有主观赋权法、客观赋权法和综合主观与客观的组合赋权法。主观赋权法无需样本数据, 主要依靠专家的经验 and 主观性来确定评价指标的权重及排序。文献[5-6]分别研究了运用层次分析(AHP)法和专家打分法确定权重的方法, 这 2 种方法体现了对专家不同程度的依赖性。客观赋权法则是根据原始数据之间的联系, 通过一定的数学理论方法来确定指标的权重, 反映了评价指标权重与原始数据变动的关系。文献[7]提出先应用 AHP 法确定权重, 然后对所确定的权重加以修正, 虽具有一定的客观性, 但

存在数据大时赋权难以一致的问题。文献[8]基于非线性主成分分析法, 提出了以原始决策矩阵的各主成分方差贡献率作为权重的客观赋权方法。文献[9]基于信息熵原理, 研究了通过求解最大特征值对应的特征向量来确定各评价指标权重的方法, 虽然客观赋权方法完全依据原始数据确定权重, 但是最终的指标赋权中没有体现决策者的知识与经验等主观信息。为了克服主观或客观赋权法存在的缺陷, 国内外学者提出了综合主观权重与客观权重的组合赋权法。文献[10]研究了基于 G1 法和序列综合法相结合的组合赋权法; 文献[11]提出了采用 G1-熵权法来确定电能质量评价指标的权重; 文献[12]将熵权法与 AHP 法相结合对评价指标赋权。由于这些组合赋权方法仅仅采用简单的乘法合成归一化方法或线性加权组合法对评价指标进行集成, 因此还存在一些问题。例如: 利用乘法合成归一化方法进行评价指标赋权可能导致大者更大、小者更小的倍增效应; 虽然线性加权法克服了倍增效应, 但在寻找确定加权系数的简单有效方法方面还存在困难。

针对主观或客观赋权法的局限性以及组合赋权方法的不足, 本文提出一种基于矩估计理论的改进主客观权重集成赋值方法。该方法具有同时兼顾决策者的主观性、待评价对象各指标的内在联系及权重随时间渐变性的特点。以此为基础, 进一步研究了基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法。某地区电网 10 kV 母线电能质量的综合评价结果, 验证了所提出的权重集成赋值方法的合理性, 同时表明了所研究的电能质量灰色综合评价方法的有效性。

收稿日期: 2011-06-19; 修回日期: 2011-12-18。

国家自然科学基金资助项目(51007067); 国家科技支撑计划资助项目(2008BAA13B04); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(201120702020014); 湖北省自然科学基金资助项目(2008CDB307)。

1 主客观权重计算

1.1 基于改进 AHP 法的主观权重计算

为了避免传统 AHP 法由于采用对应 9 个评价等级标度可能导致的评价结论错误或一致性检验错误,文献[13]提出了采用对应附录 A 表 A1 所示 6 个评价等级的改进型标度。根据附录 A 表 A1 确定了指标 E 对指标 F 和指标 F 对指标 G 的相对重要性指标标度之后,由传递性可确定评价指标 E 对指标 G 的相对指标标度为 $E:G=(E:F)/(F:G)$ 。这样就可以建立各指标两两比较的判断矩阵 $\mathbf{K}^{[14]}$ 。在满足一致性检验的前提下,通过求取判断矩阵 $\mathbf{K}$ 的最大特征值对应的特征向量,并进行归一化处理,即可求得基于改进 AHP 法的主观权重向量。

1.2 基于 G1 法的主观权重计算

G1 法通过对各指标重要性进行排序来确定指标的权重,该方法无需进行一致性检验。其原理及计算步骤如下^[10]。

步骤 1:确定序关系,设由 m 个评价指标组成的评价指标集 $D=\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$,按照某评价准则(或目标)确定了 m 个评价指标的相对重要性排序为 $d_1^* > d_2^* > \dots > d_m^*$ 。

步骤 2:确定相邻评价指标 d_{j-1} 的权重 w_{j-1} 相对于 d_j 的权重 w_j 的重要性程度之比,即权重评价标度 $r_j=w_{j-1}/w_j, j=m, m-1, \dots, 2$ 。依据附录 A 表 A2 所示的评价语气算子与评价标度 r_j 的对应关系,确定各相邻评价指标间的权重评价标度。

步骤 3:通过附录 A 式(A1)和式(A2)确定评价指标的相对权重向量。

1.3 基于熵权的客观权重计算

熵权法确定客观权重的基本思想是^[15]:基于测量数据计算各评价指标的信息熵值 h_j ;根据熵值,按照 h_j 大则权重系数取小、 h_j 小则权重系数取大的原则确定各指标的权重系数。具体计算步骤见附录 A。

1.4 基于标准差和平均差最大化的客观权重计算

如果指标 d_j 对所有决策方案的属性值均无差别或差异很小,则该指标对所有决策方案而言,所起的决策和排序作用将较小,这样的评价指标应给予较小的权重系数;反之,应赋予较大的权重系数^[14]。可以用标准差和平均差来衡量指标 d_j 属性值的差异,具体的计算步骤见附录 A。

2 基于矩估计理论的最优组合赋权

为了在评价中既反映决策的主观性,又体现决策的客观性,需要对上述各指标的主客观赋权进行集成。

设有 l 种主观赋权评价原则对评价指标进行赋权,则可得到按各主观赋权原则确定的各指标主观权重集合 $W_s=\{\omega_{sj} | 1 \leq s \leq l, 1 \leq j \leq m\}$ 。对 $\forall s$,

$$\sum_{j=1}^m \omega_{sj} = 1, \omega_{sj} \geq 0。$$

决策矩阵归一化后,采用 $q-l$ 种客观赋权法对评价指标进行赋权,得到的客观权重集合 $W_b=\{\omega_{bj} | l+1 \leq b \leq q, 1 \leq j \leq m\}$ 。对 $\forall b$,

$$\sum_{j=1}^m \omega_{bj} = 1, \omega_{bj} \geq 0。$$

假设评价指标的集成权重向量为 $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$ 。对于主观权重,如果决策者的数量趋于很大时,由统计学的大数定理可知其判断的权重向量集成结果将接近集成权重向量 $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$;对于客观权重,采用不同的算法得到的结果具有重复性^[16]。因此,从统计学的角度可以将其看做从总体中抽取的样本来估计集成权重向量 $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$ 。

设分别从主观权重总体和客观权重总体中抽取 l 个样本和 $q-l$ 个样本,针对每个评价指标 $d_j (1 \leq j \leq m)$,有 q 个权重样本,对于各评价指标的集成组合权重 $w_j (1 \leq j \leq m)$,需要满足 w_j 与其 q 个主客观权重的偏差越小越好。同时,对于不同的评价指标,主观权重与客观权重的相对重要程度都不同,如果主观权重与客观权重的相对重要程度系数分别为 α 和 β ,则集成组合权重的优化模型为:

$$\min H(w_j) = \alpha \sum_{s=1}^l (\omega_{sj} - w_j)^2 + \beta \sum_{b=l+1}^q (\omega_{bj} - w_j)^2 \quad (1)$$

式中: $0 \leq \omega_{sj} \leq 1; 1 \leq j \leq m$ 。

q 个样本分别来自 2 个总体,按照矩估计理论的基本思想,对每个评价指标 $d_j (1 \leq j \leq m)$,其 ω_{sj} 和 ω_{bj} 的期望值^[17]为:

$$\begin{cases} E(\omega_{sj}) = \frac{\sum_{s=1}^l \omega_{sj}}{l} & 1 \leq j \leq m \\ E(\omega_{bj}) = \frac{\sum_{b=l+1}^q \omega_{bj}}{q-l} & 1 \leq j \leq m \end{cases} \quad (2)$$

利用式(2),可计算出每个指标 $d_j (1 \leq j \leq m)$ 的主观和客观权重的重要系数 α_j 和 β_j 为:

$$\begin{cases} \alpha_j = \frac{E(\omega_{sj})}{E(\omega_{sj}) + E(\omega_{bj})} \\ \beta_j = \frac{E(\omega_{bj})}{E(\omega_{sj}) + E(\omega_{bj})} \end{cases} \quad (3)$$

针对多指标决策矩阵中的评价指标,可以看成是从 2 个总体中分别取 m 个样本,同样采用矩估计

理论的基本思想,可以得到:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_j}{\sum_{j=1}^m \alpha_j + \sum_{j=1}^m \beta_j} = \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_j}{m} \\ \beta &= \frac{\sum_{j=1}^m \beta_j}{\sum_{j=1}^m \alpha_j + \sum_{j=1}^m \beta_j} = \frac{\sum_{j=1}^m \beta_j}{m} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

针对每一个评价指标 d_j ($1 \leq j \leq m$), 希望 $H(w_j)$ 越小越好, 为此, 式(1)所示优化模型可以转化为:

$$\left\{ \begin{aligned} \min H &= \{H(w_1), H(w_2), \dots, H(w_m)\} \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m w_j &= 1 \\ 0 \leq w_j &\leq 1, 1 \leq j \leq m \end{aligned} \right. \quad (5)$$

为了求解式(5), 采用等权的线性加权方法, 将多目标最优化模型转化为单目标最优化模型, 即

$$\left\{ \begin{aligned} \min H &= \sum_{j=1}^m \alpha \sum_{s=1}^l (w_j - w_{sj})^2 + \sum_{j=1}^m \beta \sum_{b=l+1}^q (w_j - w_{bj})^2 \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^m w_j &= 1 \\ 0 \leq w_j &\leq 1, 1 \leq j \leq m \end{aligned} \right. \quad (6)$$

通过对式(6)进行求解, 即可求得基于多个主客观评价指标的最优组合权向量。

3 基于灰色关联度的综合评价方法

灰色关联分析的基本思想是根据各比较序列曲线与参考序列曲线的相似程度来判断其联系是否紧密^[18]。它对样本量和样本有无规律要求较低, 其评价方法如下。

1) 确定无量纲决策矩阵

按照综合评价方法确定方案集对评价指标集的决策矩阵 $(x_{ij})_{n \times m}$ 。为了保证结果的可靠性, 将该决策矩阵转换为无量纲决策矩阵 $(r_{ij})_{n \times m}$, $r_{ij} \in [0, 1]$, 同时确定每个评价指标的最优值 $R^* = [r_1^*, r_2^*, \dots, r_m^*]$, 得到无量纲决策矩阵 $R = (r_{ij})_{(n+1) \times m}$ 。

$$R = \begin{bmatrix} r_1^* & r_2^* & r_3^* & \cdots & r_m^* \\ r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: r_{ij} 为方案 i 的第 j 个评价指标经过无量纲化处理之后的属性值; r_j^* 为评价指标参考值; 第 1 行

向量为决策方案中各评价指标的最优值。

最优值确定原则是: 若指标为极大型指标时, 最优值取该指标在各方案中的最大值; 若指标为极小型指标时, 最优值取该指标在各方案中的最小值。最优值构成了灰色关联法中的参考序列。

2) 确定评价指标的灰色关联系数

第 i 个方案的第 j 个评价指标与该指标最优值的关联系数 ϵ_j^i 是比较数列曲线与参考数列曲线在第 j 个指标的相对差值, 差值的大小可作为衡量关联程度的尺度, 即 ϵ_j^i 越大, 2 个数列在第 j 个指标上的关联程度越大。通过式(8)可以求得 ϵ_j^i 为:

$$\epsilon_j^i = \frac{\min_i \min_j |r_j^* - r_{ij}| + \rho \max_i \max_j |r_j^* - r_{ij}|}{|r_j^* - r_{ij}| + \rho \max_i \max_j |r_j^* - r_{ij}|} \quad (8)$$

式中: ρ 为分辨系数; $\min_i \min_j |r_j^* - r_{ij}|$ 为绝对最小值; $\max_i \max_j |r_j^* - r_{ij}|$ 为绝对最大值。

3) 确定决策方案的灰色关联度

关联系数仅能从某一指标反映参考数列与待比较数列的关联程度, 利用式(9)所示的关联度 P_i 就可以从全体指标描述 2 个数列之间的关联程度。

$$P_i = \sum_{j=1}^m w_j \epsilon_j^i \quad (9)$$

通过计算各决策方案关联度 P_i 的最大值, 可确定与最优评价指标最为接近的决策方案, 并排列出决策方案的优劣次序。

4 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法

将基于矩估计理论的最优组合赋权方法与基于灰色关联度的综合评价方法相结合, 即可建立如图 1 所示的基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法。利用该方法可对某地区电网 3 条 10 kV 母线电能质量进行评价。

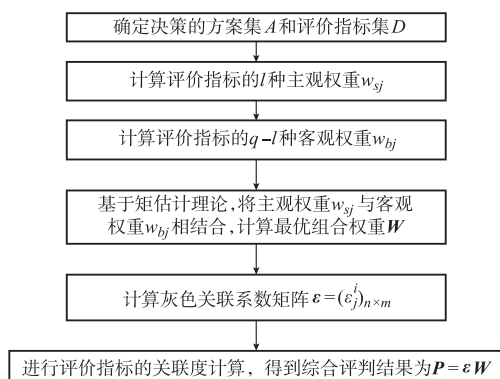


图 1 最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法
Fig. 1 Grey comprehensive evaluation method for power quality based on optimal right weight combining

用于电能质量评价的一级评价指标集 $D=\{\text{电压偏差,电压波动,电压闪变,谐波畸变,三相不平衡,频率偏差,电压暂降,电压短时间中断}\}$,其中每个一级指标包括相应的若干个二级指标,评价指标体系见表 1^[10-11]。

表 1 电能质量评价指标
Table 1 Evaluation indices of power quality

一级指标	二级指标	变量	一级指标	二级指标	变量
电压偏差	平均偏差	X_1	三相不平衡	不平衡度	X_{10}
	持续时间	X_2		持续时间	X_{11}
电压波动	平均波动幅度	X_3	频率偏差	平均偏差	X_{12}
	波动次数	X_4		持续时间	X_{13}
电压闪变	闪变水平	X_5	电压暂降	凹陷幅度	X_{14}
				持续时间	X_{15}
谐波畸变	总谐波畸变率	X_6	供电中断	中断时间	X_{16}
	偶次谐波畸变率	X_7			
	奇次谐波畸变率	X_8			
	持续时间	X_9			

表 2 评估母线的待评数据组
Table 2 Evaluating data set of evaluation bus

样本	$X_1/\%$	X_2/s	$X_3/\%$	$X_4/(\text{次}\cdot\text{s}^{-1})$	$X_5/\%$	$X_6/\%$	$X_7/\%$	$X_8/\%$	X_9/s	$X_{10}/\%$	X_{11}/s	$X_{12}/\%$	$X_{13}/\%$	$X_{14}/\%$	X_{15}/s	X_{16}/s
A ₁	1.0	6.0	2.0	3.0	0.30	1.6	1.7	0.9	3.7	0.5	5.0	0.3	2.5	0	0	0
A ₂	6.0	10.0	11.0	8.0	0.80	3.3	2.8	1.0	10.0	1.3	8.0	0.3	2.5	0	0	0
A ₃	0.8	3.0	2.2	2.0	0.10	0.8	0.6	0.3	2.5	0.2	1.0	0.3	2.5	0	0	0
A ₄	1.7	1.3	2.5	0.8	0.23	1.0	0.8	0.4	1.3	0.5	1.3	0.1	1.3	10	10	0.01
A ₅	3.5	2.5	5.0	1.5	0.45	2.0	1.6	0.8	2.5	1.0	2.5	0.2	2.5	20	20	0.10
A ₆	7.0	5.0	10.0	3.0	0.90	4.0	3.2	1.6	5.0	2.0	5.0	0.4	5.0	30	40	1.00
A ₇	14.0	10.0	20.0	6.0	1.80	8.0	6.4	3.2	10.0	4.0	10.0	0.8	10.0	40	200	10.00

1) 基于 G1 法的主观权重计算

以电能质量第 1 层指标为例,电能质量一级评价指标的序关系和指标间的相对重要性程度为:谐波畸变>电压波动=电压闪变>电压偏差>三相不平衡^[10]。通过专家确定各指标权重,基于所确定权重计算各指标之间权重评价标度,可得到 $r_2=1.8, r_3=1.0, r_4=1.2, r_5=1.5$ 。若将各一级评价指标的权重定义为 $w_{1,j}$ 、各二级评价指标的权重定义为 $w_{2,j}$,可得表 1 中各一级评价指标的权重分别为: $w_{1,1}=0.160\ 6, w_{1,2}=0.192\ 7, w_{1,3}=0.192\ 7, w_{1,4}=0.346\ 9, w_{1,5}=0.107\ 0$ 。同理,可求得各二级评价指标权重为: $w_{2,11}=0.642\ 9, w_{2,12}=0.357\ 1, w_{2,21}=0.642\ 9, w_{2,22}=0.357\ 1, w_{2,3}=1, w_{2,41}=0.262\ 7, w_{2,42}=0.141\ 1, w_{2,43}=0.141\ 1, w_{2,44}=0.455\ 1, w_{2,51}=0.357\ 1, w_{2,52}=0.642\ 9$ 。利用一级评价指标权重分别乘以其对应的二级指标权重,可以得到表 1 中 X_1 至 X_{11} 的主观权重向量 $\mathbf{W}_{G1}=[0.103\ 2, 0.057\ 4, 0.123\ 9, 0.068\ 8, 0.192\ 7, 0.091\ 1, 0.048\ 9, 0.048\ 9, 0.157\ 9, 0.038\ 2, 0.068\ 8]$ 。

3 个用于评价的方案为某地区电网 3 条 10 kV 母线的某时段实测数据样本表示为 A_1, A_2, A_3 。同时,电能质量的标准以优质、良好、合格和较差来描述,并可根据国家电能质量标准限制各个级别的标准样本^[19]。分别给出待评价 10 kV 母线的优质样本 A_4 、良好样本 A_5 、合格样本 A_6 、较差样本 A_7 。上述 7 个样本构成了本文中的决策方案集 $A=\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7\}$ 。

4.1 电能质量评价指标的主客观权重

由于暂无电压暂降和供电中断的测量数据,同时各 10 kV 母线的频率偏差指标值没有区别,因此本文在计算权重的过程中,不考虑这 3 个一级评价指标及其对应的二级评价指标。评估母线的待评数据组如表 2 所示。

2) 基于改进 AHP 法的主观权重计算

建立电能质量一级评价指标的判断矩阵 $\mathbf{K}$,判断矩阵 $\mathbf{K}$ 的一致性比例 $C_R=0.009\ 8<0.1$,满足一致性要求。求最大特征值 $\lambda_{\max}=5.043\ 8$ 对应的特征向量并进行归一化处理,得到一级指标的主观权重向量 $\mathbf{W}_1=[0.125\ 8, 0.243\ 3, 0.175\ 7, 0.371\ 0, 0.084\ 3]$ 。同理,通过建立二级评价指标的判断矩阵,并最终得到 X_1 至 X_{11} 的主观权重向量 $\mathbf{W}_{AHP}=[0.080\ 9, 0.044\ 9, 0.156\ 4, 0.086\ 9, 0.175\ 7, 0.097\ 5, 0.052\ 3, 0.052\ 3, 0.168\ 8, 0.030\ 1, 0.054\ 2]$ 。

3) 基于熵权法的客观权重计算

根据实验数据计算得各二级指标的变异系数为: $b_1=0.364\ 0, b_2=0.095\ 9, b_3=0.378\ 6, b_4=0.157\ 9, b_5=0.250\ 0, b_6=0.136\ 5, b_7=0.137\ 8, b_8=0.113\ 1, b_9=0.189\ 5, b_{10}=0.220\ 1, b_{11}=0.202\ 6$ 。进一步求得评价指标的客观权重向量 $\mathbf{W}_h=[0.162\ 1, 0.042\ 7, 0.168\ 6, 0.070\ 3, 0.111\ 3, 0.060\ 8, 0.061\ 4, 0.050\ 4, 0.084\ 4, 0.098\ 0, 0.090\ 2]$ 。由测量数据可知 X_2, X_6, X_7, X_8 数据差别不大,而 X_1, X_3, X_5

数据相差较大,故 w_2, w_6, w_7, w_8 相对较小,而 w_1, w_3, w_5 相对较大,客观权重向量正好反映了数据的这种客观特性。

4) 基于标准差和平均差极大化的客观权重计算
根据文献[14]计算各评价指标的标准差系数 δ_j 和平均差系数 μ_j , 并令 $Z_1 = Z_2 = 0.5$, 可得 $Z_1 \delta + Z_2 \mu = [0.299\ 5, 0.139\ 8, 0.303\ 6, 0.195\ 0, 0.233\ 8, 0.173\ 3, 0.159\ 9, 0.147\ 4, 0.210\ 8, 0.221\ 6, 0.189\ 7]$ 。最终确定了各评价指标的客观权重向量 $W_{\delta\mu} = [0.131\ 7, 0.061\ 5, 0.133\ 5, 0.085\ 7, 0.102\ 8, 0.076\ 2, 0.070\ 3, 0.064\ 8, 0.092\ 7, 0.097\ 4, 0.083\ 4]$ 。

4.2 电能质量评价指标的最优组合权重

根据式(2)至式(4)可计算出基于上述主客观权重 W_{G1}, W_{AHP} 和客观权重 $W_h, W_{\delta\mu}$ 的重要程度系数分别为 $\alpha = 0.481\ 5, \beta = 0.518\ 5$ 。在此基础上,通过对式(6)进行求解,可得到评价指标权重的最优组合权重向量 $W = [0.102\ 4, 0.075\ 6, 0.112\ 2, 0.085\ 9, 0.111\ 6, 0.087\ 0, 0.078\ 3, 0.076\ 6, 0.104\ 0, 0.081\ 6, 0.084\ 6]$ 。它们分别代表电压平均偏差、持续时间、

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.906\ 0 & 0.950\ 5 & 0.927\ 2 & 0.959\ 1 & 0.895\ 3 & 0.894\ 7 & 0.900\ 0 & 0.897\ 1 & 0.940\ 3 & 0.880\ 0 & 0.931\ 2 \\ 0.737\ 5 & 0.836\ 8 & 0.756\ 3 & 0.850\ 2 & 0.754\ 9 & 0.754\ 0 & 0.761\ 5 & 0.757\ 4 & 0.821\ 0 & 0.733\ 3 & 0.807\ 3 \\ 0.554\ 7 & 0.675\ 2 & 0.576\ 2 & 0.692\ 9 & 0.574\ 6 & 0.573\ 6 & 0.582\ 4 & 0.577\ 5 & 0.654\ 9 & 0.550\ 0 & 0.637\ 6 \\ 0.370\ 9 & 0.487\ 1 & 0.390\ 3 & 0.505\ 7 & 0.388\ 8 & 0.387\ 9 & 0.396\ 0 & 0.391\ 5 & 0.466\ 3 & 0.366\ 7 & 0.448\ 9 \\ 0.964\ 5 & 0.626\ 8 & 0.930\ 8 & 0.692\ 9 & 0.843\ 0 & 0.804\ 6 & 0.747\ 2 & 0.729\ 0 & 0.731\ 9 & 0.880\ 0 & 0.637\ 6 \\ 0.597\ 0 & 0.487\ 1 & 0.550\ 0 & 0.428\ 5 & 0.606\ 8 & 0.626\ 0 & 0.618\ 8 & 0.655\ 3 & 0.466\ 3 & 0.666\ 7 & 0.509\ 2 \\ 0.988\ 9 & 0.798\ 6 & 0.916\ 7 & 0.790\ 4 & 0.914\ 2 & 0.929\ 4 & 0.942\ 9 & 0.940\ 5 & 0.821\ 0 & 1.000\ 0 & 0.960\ 7 \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式(9)计算电能质量各等级样本和实测样本与理想样本之间的关联度 $P = [0.916\ 4, 0.777\ 7, 0.602\ 9, 0.416\ 6, 0.790\ 5, 0.563\ 3, 0.909\ 5]$ 。其中 P_1, P_2, P_3, P_4 分别为优质样本、良好样本、及格样本和较差样本与理想样本的关联度; P_5, P_6, P_7 分别为母线 1 样本、母线 2 样本和母线 3 样本与理想样本的关联度。母线 1 样本关联度 $P_5 = 0.790\ 5 \in (0.777\ 7, 0.916\ 4)$, 母线 2 样本的关联度 $P_6 = 0.563\ 3 \in (0.416\ 6, 0.602\ 9)$, 母线 3 样本的关联度 $P_7 = 0.909\ 5 \in (0.777\ 7, 0.916\ 4)$, 即母线 1、母线 2 与母线 3 的电能质量评价等级分别为良好、较差和良好。实际情况中,母线 3 的电能质量为良好,接近优质等级;母线 2 的电能质量接近良好等级;母线 1 的电能质量接近良好等级。可见,评估结果与实际情况相符。

表 3 同时列出了基于最优组合权重法、改进 AHP 法、G1 法、方差与平均差极大化法及熵权等赋权方法得到的各等级标准样本、实测样本与理想样本之间的关联度评价结果。

由表 3 列出的优质样本、良好样本、及格样本和

电压平均波动的幅度、电压平均波动的次数、电压闪变水平、总谐波畸变率、奇次谐波畸变率、偶次谐波畸变率、谐波畸变时间、三相不平衡度和三相不平衡持续时间。对比上述权重向量可知,采用主观赋权和客观赋权得到的权重赋值相互差别较大,而基于矩估计理论最优组合赋权得到的各赋权值之间相互差别较小,赋权结果更趋合理。

4.3 基于最优组合权重的灰色综合评价方法

对于电能质量评价指标,以最理想电能质量参数为理想样本,并取各评价指标的理想参数值为 0,则理想方案的评价指标最优值 $R^* = 0$ 。通过表 1 建立由各等级电能质量和样本组成的数据矩阵,经无量纲化之后,形成数据决策矩阵 R ,将电能质量各等级和样本数据与理想参数值进行比较,形成差值矩阵 ΔD (见附录 A),可知绝对最小值为 0.021 1,绝对最大值为 0.421 1。

由式(8)可得决策方案中各评价指标与其最优值的关联系数矩阵 ε 为:

较差样本与理想样本的关联度可以看出:基于 2 种主观赋权方法确定的关联度都大于基于客观赋权法确定的关联度。这说明单一赋权法得出的评价结果受决策者和所采用数学方法的影响较大;而基于最优组合赋权方法确定的关联度介于上述 4 种关联度之间,这是因为该赋权方法综合考虑了主客观因素,既考虑了决策者的主观性,又考虑了指标之间的内在联系和权重的渐变性,因此利用该方法得到的关联度评价结果更为合理。

· 广告 ·

空心电抗器设计软件

诚邀法人投资合作、经营电抗器产业

—— 一流的设计技术与加工技术诚邀您的加盟 ——

详细介绍网站: <http://appreciate0.qiye.gd.cn>

电子邮箱: AppreciateAndIHelp@126.com

搜索关键字: 空心电抗器设计与制造、空心电抗器软件设计与制造、电抗器(空心电抗器,铁心电抗器)

联系电话: 15295956802 联系人: 周先生

表 3 基于各赋权法的电能质量灰色综合评价结果对比
Table 3 Power quality evaluation results comparison with grey comprehensive evaluating based on vary weighing method

样本	P				
	最优组合 权重法	改进 AHP 法	G1 法	熵权法	方差与平均 差极大化法
优质样本	0.916 4	0.918 5	0.917 0	0.915 8	0.915 9
良好样本	0.777 7	0.779 4	0.778 0	0.771 7	0.774 9
及格样本	0.602 9	0.604 7	0.603 0	0.595 3	0.599 5
较差样本	0.416 6	0.418 3	0.416 7	0.409 2	0.413 3
母线 1 样本	0.790 5	0.800 3	0.799 5	0.820 0	0.803 7
母线 2 样本	0.563 3	0.554 1	0.557 6	0.567 9	0.565 4
母线 3 样本	0.909 5	0.898 4	0.902 7	0.922 4	0.915 1

由表 3 的评价结果可以进一步得出 3 条待评价母线的电能质量评价等级,如表 4 所示。

表 4 母线电能质量等级的评价结果
Table 4 Evaluation results of bus power quality rank

样本	评价结果				
	最优组合 权重法	改进 AHP 法	G1 法	熵权法	方差与平均差 极大化法
母线 1 样本	良好	良好	良好	良好	良好
母线 2 样本	较差	较差	较差	较差	较差
母线 3 样本	良好	良好	良好	优质	良好

表 4 的评价结果表明:基于熵权法得出的母线 3 的电能质量等级为优质,而且其优属度高出优质等级较多,但实际情况是母线 3 的电能质量等级应该是良好且接近优质;其他 3 种单一赋权法得出的评价结果相同并且与实际情况一致;而采用基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法对 3 条母线电能质量的评价结果与其他 3 种基于单一赋权法的评价结果一致。因此,评价结果也同时证明了基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价法的准确性。

5 结语

本文在对主客观赋权方法研究的基础上,针对传统组合赋权方法的局限性,提出了基于矩估计理论的主客观权重集成赋权方法。该方法不仅能反映决策者的主观性,而且考虑了待评价对象各指标的内在联系及权重随时间的渐变性。此外,基于该集成赋权方法并结合灰色关联分析方法,建立了电能质量的综合评价方法。该方法由于同时兼顾了评价的主客观因素,因此将使评价结果更加客观和全面。母线电能质量的评价结果证明了所述方法的有效性,同时说明该综合评价方法具有良好的应用价值。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] VANNOY D B, MCGRANAGHAN M F, HALPIN S M, et al. Roadmap for power quality standards development[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2007, 43(2): 412-421.

[2] 何禹清,彭建春,毛丽林,等.考虑用户不同需求的电能质量综合评估[J].电力系统自动化,2010,34(12):48-52.

HE Yuqing, PENG Jianchun, MAO lilin, et al. Comprehensive evaluation of power quality considering customer demands[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 48-52.

[3] 阮思烨,孙元章,李国杰.用电压源高压直流输电解决高压电网中工业系统引起的电能质量问题[J].电网技术,2007,31(19): 13-17.

RUAN Siye, SUN Yuanzhang, LI Guojie. Utilizing VSC-HVDC to solve power quality in power grid caused by industry system[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 13-17.

[4] 金广厚,李庚银,周明.电能质量市场理论的初步探讨[J].电力系统自动化,2004,28(12):1-6.

JIN Guanghou, LI Gengyin, ZHOU Ming. Primary study of power quality market theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 1-6.

[5] 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,2006,29(6):1-16.

ZHAO Xia, ZHAO Chengyong, JIA Xiufang, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight [J]. Power System Technology, 2006, 29(6): 1-16.

[6] 陈磊,徐永海.浅谈电能质量评估的方法[J].电力电气,2005, 24(1):58-61.

CHEN Lei, XU Yonghai. The discussion of the method of power quality evaluation[J]. Power Electric, 2005, 24(1): 58-61.

[7] 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 Jiamao, HUANG Shaoxian. Research on synthetic evaluation method of power quality based on fuzzy theory[J]. Relay, 2006, 34(3): 55-59.

[8] 张涛,程志友,梁栋,等.非线性主成分分析在电能质量综合评估中的应用[J].电测与仪表,2008,45(6):5-9.

ZHANG Tao, CHENG Zhiyou, LIANG Dong, et al. The application of nonlinear PCA in synthetic evaluation of power quality[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2008, 45(6): 5-9.

[9] 张炳达,王静.基于熵原理的电能质量评估新方法[J].电力自动化设备,2009,29(10):35-38.

ZHANG Bingda, WANG Jing. Power quality evaluation based on entropy principles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 35-38.

[10] 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.

[11] 李军,李继光,姚建刚,等.属性识别和 G1-熵权法在电能质量评价中的应用[J].电网技术,2009,33(14):56-61.

LI Jun, LI Jiguang, YAO Jiangang, et al. Application of

- attribute recognition and G1-entropy method in evaluation of power quality [J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 56-61.
- [12] 王睿,方洁,张可,等. 基于熵权和AHP的电能质量模糊综合评价[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.
- [13] 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 Decai, ZHENG Herong. Scale-extending method for constructing judgment matrix in the analytic hierarchy process [J]. Systems Engineering, 2003, 21(1): 105-109.
- [14] 王应明,张军奎. 基于标准差和平均差的权系数确定方法及其应用[J]. 数理统计与管理, 2003, 22(7): 22-26.
WANG Yingming, ZHANG Junkui. A method based on standard and mean deviations for determining the weight coefficients of multiple attributes and its applications [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2003, 22(7): 22-26.
- [15] 聂宏展,方吕盼,乔怡,等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 60-64.
NIE Hongzhan, FANG Lüpan, QIAO Yi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 60-64.
- [16] 杨虎,刘琼荪,钟波. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [17] 江文奇. 多属性决策的组合赋权优化方法[J]. 运筹与管理, 2006, 15(6): 40-43.
JIANG Wenqi. Optimizing method of combination weighting of multi-attribute decision-making[J]. Operations Research and Management Science, 2006, 15(6): 40-43.
- [18] 杜栋,庞庆华,吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [19] 林海雪. 论电能质量标准[J]. 中国电力, 1997, 30(3): 7-10.
LIN Haixue. A discussion on electric energy quality standard [J]. Electric Power, 1997, 30(3): 7-10.

沈阳武(1985—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统规划、新能源与储能技术及其在电力系统中的应用。
E-mail: shenyangwu@126.com

彭晓涛(1971—),男,通信作者,副教授,主要研究方向:电力系统运行与控制、储能技术及其在电力系统中的应用。
E-mail: hustpzt@163.com

施通勤(1968—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统规划、电力系统安全经济运行。

A Grey Comprehensive Evaluation Method of Power Quality Based on Optimal Combination Weight

SHEN Yangwu¹, PENG Xiaotao¹, SHI Tongqin², MAO Xun¹, SUN Yuanzhang¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: According to the limitless of weighting according to the subjective principle or the objective principle and their combination, and to make the comprehensive evaluation more scientific, an integrated weighting method taking into account both the objective and subjective influencing factors is studied and presented. This method takes the decision-maker's subjective weights and objective weights as the standard, and the minimum sum between the integration weights and subjective and objective weights as the object. With the optimal combination model created on the moment estimation theory, the optimal combination weights can be arrived at by finding the best solution of the optimal combination model. On this basis, by referring to the grey relational degree, the grey comprehensive evaluation method of power quality based on the optimal combination weights is developed. The power quality of 10 kV buses in the regional power grid is evaluated with the grey comprehensive evaluation method. The evaluation results not only verify the reasonability of the proposed integrated weight method, but also show the validity of the grey comprehensive evaluation method for power quality.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007067), the Grand Project of the National Eleventh-five Year Research Programs of China (No. 2008BAA13B04), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 201120702020014), and Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2008CDB307).

Key words: power quality; comprehensive evaluation; subjective weight determining; objective weight determining; optimal combination weight; moment estimation theory; grey relational degree

附录 A

A1 主观赋权法

A1.1 改进AHP法指标标度

表A1 改进AHP法的指数标度及含义
Table A1 Index scale and its meaning of improved AHP method

标度	标度含义	标度	标度含义
$\lambda^0=1$	同等重要	$\lambda^4=3$	明显重要
$\lambda^1=1.3161$	稍微重要	$\lambda^6=5.1962$	强烈重要
$\lambda^2=1.7321$	重要	$\lambda^8=9$	极端重要

A1.2 GI赋权法指标标度

表A2 G1法的定量评价标度及含义 Table A2 Quantitative evaluation scale and its meaning of G1 method			
r_j	语气算子	r_j	语气算子
1.0	d_{j-1} 与 d_j 同样重要	1.6	d_{j-1} 比 d_j 强烈重要
1.2	d_{j-1} 比 d_j 稍微重要	1.8	d_{j-1} 比 d_j 极端重要
1.4	d_{j-1} 比 d_j 明显重要	1.1, 1.3 1.5, 1.7	上述相邻判断的中间值

求取相邻评价指标的权重评价标度 r_j 之后，可按照式(A1)和式(A2)确定各评价指标的权重向量 $\mathbf{W}=(w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

$$w_m = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{j=k}^m r_j \right)^{-1}$$

(A1)

$$w_{j-1} = r_j w_j \quad j = m, m-1, \dots, 3, 2$$

(A2)

A2 客观赋权法

A2.1 基于熵权的客观赋权法

具体计算步骤如下。

1)依据式(A3)计算第*i*个评价指标 d_i 的信息熵 h_{j_0} 。

$$h_j = -K \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}$$

(A3)

式中： $f_{ij} = x_{ij} / \sum_{j=1}^n x_{ij}$ ， $x_{ij}(j=1,2,\cdots,m; i=1,2,\cdots,n)$ 表示决策方案集 $A=(A_1, A_2, \cdots, A_n)$ 中的方案 A_i 对评价指标集 $D=(d_1, d_2, \cdots, d_m)$ 中的指标 d_j 的指标值或属性值， $(x_{ij})_{m \times n}$ 构成了决策方案集 A 对指标集 D 的决策矩阵； $k=1/\ln n$ ；当 $f_{ij}=0$ 时， $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。

2)根据 $b_j=1-h_j$ 计算各指标的变异程度系数 b_j 。

3)根据式(A4)计算第*j*个指标的熵权 w_j 。

$$w_j = b_j / \sum_{j=1}^m b_j$$

(A4)

A2.2 基于标准差和平均差最大化的客观权重计算

如果指标 d_j 对所有决策方案的属性值均无差别或差异很小，则该指标对所有决策方案而言，所起的决策和排序作用将较小，这样的评价指标应给予较小的权系数；反之，应赋予较大的权重系数^[17]。因此，可以用式(A 5)所示的标准差和式(A 6)所示的平均差来衡量指标 d_j 属性值的差异。

$$\delta_j=\sqrt{\frac{1}{n}\left(x_{ij}-\bar{x}_j\right)^2} \tag{A5}$$

$$\mu_j=\frac{1}{n}\left|x_{ij}-\bar{x}_j\right| \tag{A6}$$

式中： $\bar{x}_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_{ij}$ 为评价指标 d_j 对各评价方案属性值的平均值。

依据式(A7)则可以得到基于标准差和平均差最大化的指标 d_j 权重值^[17]:

$$w_j=\frac{z_1\delta_j+z_2\mu_j}{\sum_{j=1}^m(z_1\delta_j+z_2\mu_j)} \tag{A7}$$

式中： z_1, z_2 分别为标准差和平均差的重要性系数， $z_1+z_2=1$,通常分别取为 0.5。

A3 差值矩阵

将电能质量各等级和样本数据与理想参数值进行比较，形成如下差值矩阵 ΔD ：

$$\Delta D=\begin{bmatrix} 0.0451 & 0.0331 & 0.0392 & 0.0309 & 0.0481 & 0.0483 & 0.0468 & 0.0476 & 0.0358 & 0.0526 & 0.0382 \\ 0.1035 & 0.0662 & 0.0957 & 0.0619 & 0.0963 & 0.0966 & 0.0936 & 0.0952 & 0.0715 & 0.1053 & 0.0763 \\ 0.2069 & 0.1325 & 0.1914 & 0.1237 & 0.1925 & 0.1932 & 0.1871 & 0.1905 & 0.1431 & 0.2105 & 0.1527 \\ 0.4139 & 0.2649 & 0.3828 & 0.2474 & 0.3850 & 0.3865 & 0.3743 & 0.3810 & 0.2861 & 0.4211 & 0.3053 \\ 0.0296 & 0.1589 & 0.0383 & 0.1237 & 0.0642 & 0.0773 & 0.0994 & 0.1071 & 0.1059 & 0.0526 & 0.1527 \\ 0.1774 & 0.2649 & 0.2105 & 0.3299 & 0.1711 & 0.1594 & 0.1637 & 0.1429 & 0.2861 & 0.1368 & 0.2443 \\ 0.0237 & 0.0795 & 0.0421 & 0.0825 & 0.0428 & 0.0386 & 0.0351 & 0.0357 & 0.0715 & 0.0211 & 0.0305 \end{bmatrix}$$