

基于二阶段法的电能质量评估及其灵敏度分析

荆朝霞, 胡仁

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 借助不同的赋权法发展出一种基于二阶段法的电能质量评估模型。该模型先用不同的赋权法计算各指标的初始权重, 考虑方案的偏好信息后计算期望的指标权重, 再利用最小二乘法建立指标权重的优化模型, 求出最终的指标权重, 最后计算综合评价进行排序。基于简单加权法模型, 对指标参数进行灵敏度计算。算例分析结果验证了所提模型的有效性。

关键词: 电能质量; 二阶段法; 综合评估; 灵敏度分析; 模型

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.010

0 引言

电能质量问题不仅关系到电网自身运行的安全性和经济性, 也直接影响到用户侧的正常生产。目前已有许多文献对电能质量的识别、检测、控制等问题进行了研究^[1-4]。为了对电能质量进行综合评估, 许多研究者利用“降维”的思想, 将反映电能质量的指标进行量化处理, 得到一维综合指标, 并进行等级排序。

目前常用的电能质量评估方法主要有模糊评价法^[5-8]、概率论和矢量代数^[9]、投影寻踪法^[10]、拓扑物元分析法^[11-12]、灰色关联法^[13]、智能算法^[5, 14]等。这些方法在一定程度上解决了电能质量评估中的实际问题, 但也存在一定的问题。这些方法大多需事先确定目标的指标权重, 而确定权重仅通过单一赋权法(主观赋权法、客观赋权法或者主客观组合赋权法), 并没有考虑各评估方案的差异和偏好信息(如有些方案的电压指标较好而频率指标较差, 就希望电压指标权重更大些, 而频率指标权重就小些), 可能出现“赋权不公平”的情形, 即目标权重对于某些方案的综合评价有利而对其他的不利。

二阶段法^[15-19]是一种基于最优化理论的评估方法。该方法先给定指标的初始权重, 充分考虑了评估方案的差异和偏好信息后, 再利用优化模型修正指标权重, 避免了“赋权不公平”情形的出现。为此本文在电能质量评估中引入了二阶段法, 借助不同的赋权法, 发展了一种基于二阶段法的电能质量评估模型。算例分析表明, 该模型能有效地修正单一赋权法得到的初始权重, 修正后的指标权重兼顾了各方案的偏好信息, 有利于增大各方案综合决策值。

目前的电能质量评估内容主要集中于指标的集成和方案的排序^[5-14], 而关于评估结果对指标参数变化的敏感性分析的研究较少。实际多属性决策评估中, 决策者不仅要得到评估结果, 还要了解该评估结

果的稳定性, 即指标参数的灵敏度分析。基于简单加权模型^[20-21], 本文分别对指标属性值和权重进行灵敏度分析, 给出相应指标参数的灵敏度区间的计算公式。

1 基于二阶段法的电能质量评估模型

二阶段法的评估原理为: 对评估方案的原始数据进行标准化处理后, 在一阶段采用不同的赋权法计算指标的初始权重, 再依据不同方案的差异和偏好信息, 计算各方案期望的指标权重; 在二阶段以与各方案的综合评价偏差最小为目标, 利用最小二乘法建立指标权重的优化模型, 得出最终的指标权重, 最后计算各方案的综合决策值, 并进行排序。

设共有 n 个电能质量监测点样本, 构成了样本集合 $S = \{S_i | (i=1, 2, \dots, n)\}$, 指标集合 $G = \{g_j | (j=1, 2, \dots, m)\}$ 。其中每个样本对应有 m 个电能质量指标属性, 即第 i 个样本的第 j 个指标的属性值表示为 $c_{ij} (j=1, 2, \dots, m)$, 构成初始决策矩阵 $C = \{c_{ij}\}_{n \times m}$ 。二阶段法的具体评估过程如下。

1.1 决策矩阵标准化

考虑到各指标数据的量纲、大小及正逆向特性等差异, 对初始决策矩阵 C 进行如下标准化处理。

对于正向指标而言:

$$r_{ij} = c_{ij} / E_j \quad (1)$$

对于逆向指标而言:

$$r_{ij} = e_j / c_{ij} \quad (2)$$

其中, $E_j = \max\{c_{ij} | 1 \leq i \leq n\}$ 为正向指标列的最大值; $e_j = \min\{c_{ij} | 1 \leq i \leq n\}$ 为逆向指标列的最小值; r_{ij} 为各指标规范化后的值, 构成标准化矩阵 $R = \{r_{ij}\}_{n \times m}$ 。标准化后各指标属性值越接近 1, 则该指标情况越优。

1.2 一阶段赋权

在一阶段赋权中, 本文分别应用了主观赋权法、客观赋权法、组合赋权法计算各指标的初始权重, 即由层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 得到 $U = [u_1, u_2, \dots, u_m]$ 、变异系数法 VCM (Variation Co-

efficient Method) 得到 $V=[v_1, v_2, \dots, v_m]$ 、组合赋权法 (由 AHP 与 VCM 组合赋权) 得到 $L=[l_1, l_2, \dots, l_m]$ 。

考虑到各评估方案存在一定的差异和偏好信息, 可以计算各方案期望的指标权重。假定已知初始权重为 $x_j(j=1, 2, \dots, m)$, 则令第 i 个样本 S_i 的第 j 个期望的指标权重 $w_j^{(i)}$ 计算式为:

$$w_j^{(i)} = \frac{x_j r_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_j r_{ij}} \quad (3)$$

由式(3)可知, 不同方案的指标权重是按照各指标对综合决策值的重要程度进行分配的, 即每个方案的决策者都希望在综合决策值中作用较大的指标所分配的权重较大些, 反之就小些。这样可得到样本 S_i 的指标权重向量为 $W^{(i)}=[w_1^{(i)}, w_2^{(i)}, \dots, w_m^{(i)}]$ 。

1.3 二阶段赋权

根据加权法得到样本 S_i 的综合决策值为 $f_i = \sum_{j=1}^m w_j^{(i)} r_{ij}$, 假设存在最终指标权重 $w_j(j=1, 2, \dots, m)$, 使得所有样本的综合决策值 $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j r_{ij}$ 与 $\sum_{i=1}^n f_i$ 的偏差最小, 利用最小二乘法建立指标权重的优化模型为:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (w_j - w_j^{(i)})^2 r_{ij}^2 \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^m w_j = 1 \\ & w_j \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

通过拉格朗日函数法, 可以求出精确解 $W=[w_1, w_2, \dots, w_m]$, 即为所求的最终指标权重值。

1.4 综合决策值排序

根据二阶段法确定的最终指标权重, 可计算样本的综合决策值为:

$$F_i = \sum_{j=1}^m w_j r_{ij} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

再对 F_i 进行排序, 即可得出各样本的综合评估结果。样本的综合决策值越大, 表明该样本的综合评估结果越好。

2 电能质量综合评估的灵敏度分析

在实际的电能质量评估中, 决策者不仅要得到其评估结果, 还要了解其评估结果的稳定性, 即评估结果对指标参数变化的敏感程度。当指标参数的灵敏度较高时, 评估结果不稳定, 需要对这些灵敏指标予以特别的关注; 反之, 评估结果稳定。由于电能质量的评估结果主要取决于指标属性值和指标权重^[7-17], 本文将基于简单加权法模型, 对电能质量评估中的指标属性值和权重值分别进行灵敏度分析。

为了便于量化和界定指标参数的灵敏性, 定义指标参数的灵敏度区间长度 d 为^[23]:

$$d = |g_p - g_q| \text{ 或 } d = |w_p - w_q| \quad (6)$$

其中, g_p 和 g_q 分别为指标属性值灵敏度区间的上、下限值, w_p 和 w_q 分别为指标权重灵敏度区间的上、下限值。由于已标准化后的指标参数, 其大小一般在 0~1 之间, 因而一般 $d \leq 1$ 。

当 $d \leq h$ 时, 称该指标为灵敏指标, 说明在实际决策中要特别注意该参数的变化。其中, 常数 h 为灵敏度阈值, 可根据实际决策中对评估结果的稳定性或鲁棒性要求, 确定其大小, h 值越大, 表明对稳定性要求越高。若将评估的稳定性要求划分为最低要求、较低要求、稍高要求、较高要求、很高要求 5 个等级, 则相应的灵敏度阈值 h 的范围建议可为: $[0, 1/10], (1/10, 1/5], (1/5, 1/3], (1/3, 1/2], (1/2, 1]$ 。

2.1 指标属性值灵敏度分析

假设方案 S_i 原来排在第 t 位, 相应的综合评价为 F_i , 存在另外 2 个方案分别排在第 $t-1, t+1$ 位, 对应的综合评价分别为 F^{t-1} 和 F^{t+1} , 且满足 $F^{t+1} < F_i < F^{t-1}$ 。当给定指标属性值 r_{ih} 小扰动 Δr_{ih} 时, 扰动后新的指标属性值和评价值分别为 r_{ih}^*, F_i^* , 为了保持扰动后方案 S_i 的排序不变, 使得 $F^{t+1} < F_i^* < F^{t-1}$ 成立的 Δr_{ih} 的变化范围即为灵敏度区间, 其充要条件为:

$$\max \left\{ \frac{e_1}{w_h}, -r_{ih} \right\} \leq \Delta r_{ih} \leq \min \left\{ \frac{e_2}{w_h}, 1 - r_{ih} \right\} \quad (7)$$

其中, $-r_{ih} \leq \Delta r_{ih} \leq 1 - r_{ih}, r_{ih}^* = r_{ih} + \Delta r_{ih}, F_i^* = F_i + \Delta r_{ih} w_h, e_1 = F^{t+1} - F_i, e_2 = F^{t-1} - F_i$ 。当式(7)中左边项最大值为 $-r_{ih}$ 时, 则不等式左边取闭区间; 当式(7)的右边项最小值为 $1 - r_{ih}$ 时, 则不等式右边取闭区间。具体证明过程如下:

$$\begin{aligned} F^{t+1} < F_i^* < F^{t-1} \\ \Leftrightarrow F^{t+1} < F_i + \Delta r_{ih} w_h < F^{t-1} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow \frac{F^{t+1} - F_i}{w_h} < \Delta r_{ih} < \frac{F^{t-1} - F_i}{w_h} \quad (9)$$

又已知要求 $-r_{ih} \leq \Delta r_{ih} \leq 1 - r_{ih}$, 故上式得证。

2.2 指标权重值灵敏度分析

当给定指标权重 w_h 小扰动 Δw_h 时, 新的指标权重和评价值分别为 $w_h^*, F^{(t-1)*}, F_i^*, F^{(t+1)*}$, 为了保持扰动后方案 S_i 的排序不变, 使得 $F^{(t+1)*} < F_i^* < F^{(t-1)*}$ 成立的 Δw_h 的变化范围即为灵敏度区间, 其充要条件如下。

a. 当 $r_{(t-1)h} < r_{ih} < r_{(t+1)h}$ 时:

$$-w_h \leq \Delta w_h < \min \left\{ \frac{q_1}{p_1}, \frac{q_2}{p_2}, 1 - w_h \right\} \quad (10)$$

b. 当 $r_{(t+1)h} < r_{ih} < r_{(t-1)h}$ 时:

$$\max \left\{ \frac{q_1}{p_1}, \frac{q_2}{p_2}, -w_h \right\} < \Delta w_h \leq 1 - w_h \quad (11)$$

c. 当 $r_{ih} > r_{(t-1)h}, r_{ih} > r_{(t+1)h}$ 时:

$$\max \left\{ \frac{q_1}{p_1}, -w_h \right\} < \Delta w_h < \min \left\{ \frac{q_2}{p_2}, 1 - w_h \right\} \quad (12)$$

d. 当 $r_{ih} < r_{(t-1)h}, r_{ih} < r_{(t+1)h}$ 时:

$$\max\left\{\frac{q_2}{p_2}, -w_h\right\} \leq \Delta w_h \leq \min\left\{\frac{q_1}{p_1}, 1-w_h\right\} \quad (13)$$

其中, $p_1=r_{(t+1)h}-r_{ih}, q_1=F_i-F^{t+1}, p_2=r_{ih}-r_{(t-1)h}, q_2=F^{t-1}-F_i$ 。

已知 $-w_h \leq \Delta w_h \leq 1-w_h$, 扰动后 $w'_h=w_h+\Delta w_h$, 若其他指标权重 w_j 不变, 对所有权重进行归一化处理得:

$$w'_j = \frac{w_j}{1+\Delta w_h} (j \neq h), w_h^* = \frac{w_h+\Delta w_h}{1+\Delta w_h}, \text{ 则 } F_i^* = \frac{F_i+r_{ih}\Delta w_h}{1+\Delta w_h}。$$

当不等式(13)左边项最大值为 $-w_h$ 时, 则不等式左边取闭区间; 当不等式(13)右边项最小值为 $1-w_h$ 时, 则不等式右边取闭区间。其具体证明过程如下。

$$F^{(t+1)*} < F_i^* < F^{(t-1)*} \Leftrightarrow \frac{F^{t+1}+r_{(t+1)h}\Delta w_h}{1+\Delta w_h} < \frac{F_i+r_{ih}\Delta w_h}{1+\Delta w_h} < \frac{F^{t-1}+r_{(t-1)h}\Delta w_h}{1+\Delta w_h} \quad (14)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} (r_{(t+1)h}-r_{ih})\Delta w_h < F_i-F^{t+1} \\ (r_{ih}-r_{(t-1)h})\Delta w_h < F^{t-1}-F_i \end{cases} \quad (15)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} p_1\Delta w_h < q_1 \\ p_2\Delta w_h < q_2 \end{cases}$$

a. 当 $p_1>0, p_2>0$ 时:

$$\Delta w_h < \frac{q_1}{p_1}, \Delta w_h < \frac{q_2}{p_2} \quad (16)$$

因 $-w_h \leq \Delta w_h \leq 1-w_h$, 故上式得证。

b. 当 $p_1<0, p_2<0$ 时:

$$\Delta w_h > \frac{q_1}{p_1}, \Delta w_h > \frac{q_2}{p_2} \quad (17)$$

因 $-w_h \leq \Delta w_h \leq 1-w_h$, 故上式得证。

c. 当 $p_1>0, p_2<0$ 时:

$$\Delta w_h > \frac{q_1}{p_1}, \Delta w_h < \frac{q_2}{p_2} \quad (18)$$

因 $-w_h \leq \Delta w_h \leq 1-w_h$, 故上式得证。

d. 当 $p_1<0, p_2>0$ 时:

$$\Delta w_h < \frac{q_1}{p_1}, \Delta w_h > \frac{q_2}{p_2} \quad (19)$$

因 $-w_h \leq \Delta w_h \leq 1-w_h$, 故上式得证。

3 算例分析

3.1 电能质量的评估

本文分别对某地区 0.38 kV 配网和 110 kV 高压网 2 组实测电能质量数据进行分析。

3.1.1 实例 1

以 0.38 kV 配网的 8 个实测点样本原始数据为例^[5,11], 经式(1)、(2)标准化后见表 1。根据 AHP、VCM 及主客观组合赋权法分别计算指标的初始权重 $U、V、L$, 根据不同方案调整指标权重后, 再利用指标权重优化模型求出修正后的指标权重 $U'、V'、L'$, 比较指标权重修正前后的变化, 计算方案综合决策值排序。

根据 AHP、VCM 及主客观组合赋权法分别计算各指标的初始权重 $U、V、L$, 如表 2 所示, 计算相应的初始权重下各样本的指标权重后, 再分别求解由最小二乘法建立的指标权重优化模型的精确解 $U'、V'、L'$, 如表 2 所示(表中除指标电压偏差、供电可靠性、服务指标为正向指标外, 其他指标均为逆向指标)。根据表 1, 将 $U、V、L$ 与修正后的 $U'、V'、L'$ 分别对应进行比较, 如图 1—3 所示。

图中横坐标序号 1~9 分别代表表 2 中从左至右的 9 个评估指标。由图可知: 经过二阶段法修正后, 正向指标权重值基本会增大, 逆向指标权重值基本

表 1 0.38 kV 实例标准化后的数据

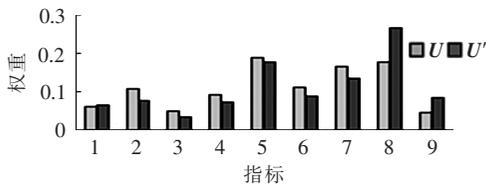
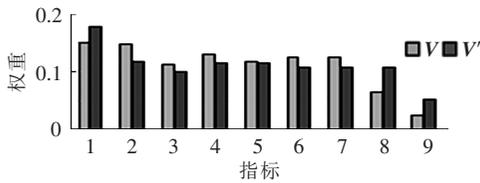
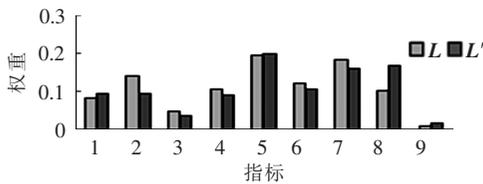
Tab.1 Normalized data of case 1(0.38 kV grid)

样本	电压暂降/%	电压偏差/%	频率偏差/%	三相不平衡/%	电压波动/%	谐波畸变率/%	电压闪变/%	供电可靠性/%	服务指标/%
样本 1	0.582 7	0.250 2	0.409 8	0.433 7	0.375 9	0.367 6	0.370 4	0.568 4	0.924 4
样本 2	0.843 2	0.714 3	0.806 5	1.000 0	0.943 4	0.781 3	0.606 1	0.873 7	0.792 2
样本 3	0.039 6	0.275 9	0.277 8	0.266 7	0.256 4	0.214 1	0.215 1	0.336 8	0.960 0
样本 4	0.192 2	0.188 1	0.282 5	0.206 9	0.365 0	0.297 6	0.238 1	0.568 4	0.760 0
样本 5	0.692 2	0.372 7	0.490 2	0.433 7	0.568 2	0.389 1	0.625 0	0.800 0	0.870 0
样本 6	0.347 8	0.255 9	0.362 3	0.315 8	0.299 4	0.302 1	0.303 0	0.705 3	0.850 0
样本 7	0.195 6	0.253 2	0.347 2	0.330 3	0.342 5	0.358 4	0.350 9	0.789 5	0.934 4
样本 8	0.213 3	0.193 5	0.268 8	0.268 7	0.318 5	0.246 3	0.263 2	0.326 3	0.774 4

表 2 不同情形的指标权重向量

Tab.2 Index weight vectors for different situations

权重向量	权重								
	电压暂降	电压偏差	频率差	三相不平衡	电压波动	谐波畸变率	电压闪变	供电可靠性	服务指标
U	0.063 2	0.107 4	0.048 7	0.092 9	0.187 9	0.112 8	0.164 8	0.176 5	0.045 9
V	0.151 3	0.147 7	0.112 8	0.129 3	0.118 5	0.124 5	0.125 7	0.065 4	0.024 7
L	0.084 8	0.140 8	0.048 8	0.106 6	0.197 7	0.124 7	0.184 0	0.102 5	0.010 1
U'	0.064 8	0.076 9	0.033 2	0.073 1	0.177 9	0.089 5	0.134 8	0.263 9	0.085 8
V'	0.178 1	0.118 7	0.100 9	0.114 2	0.115 2	0.107 2	0.107 0	0.107 8	0.051 1
L'	0.098 0	0.113 2	0.037 9	0.093 0	0.199 0	0.108 1	0.162 7	0.169 5	0.018 6

图 1 权重向量 U 与 U' 比较Fig.1 Comparison between weight vector U and U' 图 2 权重向量 V 与 V' 比较Fig.2 Comparison between weight vector V and V' 图 3 权重向量 L 与 L' 比较Fig.3 Comparison between weight vector L and L'

会减少,整体上有利于各评估样本的综合决策值增大。故 3 种初始权重修正后的变化趋势符合各方案决策者的趋利思想,即尽量强化有利于方案综合评价增大的作用因素,充分考虑了方案自身的偏好信息。

最后计算 3 种二阶段指标权重下的各样本综合决策值 F_U, F_V, F_L 如下:

$$F_U = [0.4814 \quad 0.8275 \quad 0.3175 \quad 0.3903 \quad 0.6275 \quad 0.4576 \quad 0.4967 \quad 0.3240]$$

$$F_V = [0.4552 \quad 0.8223 \quad 0.2591 \quad 0.3082 \quad 0.5712 \quad 0.3836 \quad 0.3859 \quad 0.2847]$$

$$F_L = [0.4296 \quad 0.8207 \quad 0.2545 \quad 0.3241 \quad 0.5775 \quad 0.3830 \quad 0.4069 \quad 0.2805]$$

对 8 个电能质量实测样本进行排序,与文献[5,8,10-11]的指标分级一致,评估结果比较见表 3。

由表 3 可知,各种方法的评估结果稍有差异,但基本相似。在样本 1、2 处的评估结果存在不同,对比样本 1、2 的各指标数据(即表 1 中第 1、2 行的数据),可以看出样本 2 的各指标除了服务性指标外均优于

样本 1,则 $S_1 < S_2$ (“ $<$ ”表示劣于),相比文献[5]的模糊神经网络和文献[11]的物元分析法的评估结果,二阶段法、文献[8]的可变权重模糊评价法和文献[10]的投影寻踪法对样本 1、2 的评估结果更合理,且样本 1 的评估结果趋于 3 级,样本 2 的评估结果趋于 2 级。从样本 6、7 的评估结果可知,二阶段法可以区别样本 6 的结果优于样本 7 的结果,而其他文献的方法在分级时忽略了类似样本 6、7 的同级别优先序的差异。

通过观察文献[5]和文献[8]的评估结果可知,模糊评价法在样本 1、2 处的评估结果存在着不确定性;而比较二阶段法的结果可知,虽然 3 种赋权法的初始指标权重有一定差异,但评估结果趋于一致,表明二阶段法的评估稳定性较好。

3.1.2 实例 2

以 110 kV 的 8 个变电站的样本原始数据为例,经标准化后如表 4 所示。根据本文二阶段法评估步骤,进行一阶段和二阶段权重计算后,可得到 8 个变电站的电能质量样本的评估结果如表 5 所示,各指标分级参考文献[22]。

3.2 电能质量指标的灵敏度计算

为分析评估结果稳定性,计算各指标属性值或权重的灵敏度区间。根据 0.38 kV 实例中组合赋权-二阶段法的评估结果,以样本 S_7 为例,计算保持 $S_6 < S_7 < S_5$ 排序不变时 S_7 的各指标属性值变化量和权重值变化量的灵敏度区间 $[g_p, g_q]$ 、 $[w_p, w_q]$ 如表 6 所示。

故只要上述各指标属性值或权重值的变化量在所求的灵敏度区间内,就可以保持 $S_6 < S_7 < S_5$ 优先顺序。根据灵敏度区间长度的定义,可计算各指标参数的灵敏度区间长度值。当对评估稳定性要求在最低要求时,即灵敏度阈值 $h \in (0, 0.1]$,此时不存在灵敏指标,故满足最低稳定性要求;当对评估稳定性要求较低时,即 $h \in (0.1, 0.2]$,此时也不存在灵敏指标,故满足此时的稳定性要求;当对评估稳定要求较高时,即 $h \in (\frac{1}{3}, \frac{1}{2}]$,会出现电压暂降的指标权重和供电可靠性的指标属性值均为灵敏指标。可见,随着灵敏度阈值的增大,对评估稳定性的要求也在不断提高,故实际决策中要对这些灵敏指标予以注意。

表 3 不同方法下的评估结果比较

Tab.3 Comparison of evaluation results among different methods

方法	评估结果							
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8
AHP-二阶段法	3.3	1.6	5	3.9	2.1	3.4	3.1	5
VCM-二阶段法	2.9	1.4	5	3.8	2.2	3.3	3.3	4
组合赋权-二阶段法	3	1.4	5	3.8	2	3.4	3.2	5
文献[5]	1	3	5	4	2	3	3	4
文献[8]	3	2	4	4	2	3	3	4
文献[10]	3	2	5	4	2	3	3	5
文献[11]	2	4	5	4	2	3	3	4

表 4 110 kV 实例标准化后的数据
Tab.4 Normalized data of case 2(110 kV grid)

变电站	电压暂降/%	电压偏差/%	频率差/%	三相不平衡/%	电压波动/%	谐波畸变率/%	电压闪变/%	供电可靠性/%	服务指标/%
1	0.735 2	0	1	0.836 9	0.693 6	0.652 9	0.752 1	0.5	0.666 6
2	0.846 3	0.005 0	1	0	0.559 0	0.437 1	0.753 2	0	0
3	0.694 8	0.101 0	0	1.000 0	0.504 1	0.821 0	0.580 0	0.5	0.666 6
4	0.763 5	1.000 0	0	0.699 0	0.440 9	1.000 0	0.466 0	1.0	0.333 3
5	0.901 2	0.129 1	0	0.730 4	0	0.865 8	0	0.5	0.666 6
6	0.593 8	0.273 4	1	0.282 1	1.000 0	0.584 4	1.000 0	0	0
7	0.735 1	0.775 1	0	0.783 6	0.844 7	0.812 3	0.876 0	1.0	0.666 6
8	0.668 9	0.520 4	0	0.485 8	0.910 7	0	0.922 1	0.5	0.666 6

表 5 8 个变电站的评估结果
Tab.5 Evaluation results for eight substations

方法	评估结果							
	变电站 1	变电站 2	变电站 3	变电站 4	变电站 5	变电站 6	变电站 7	变电站 8
AHP-二阶段法	2.6	3.5	3.0	2.4	3.7	2.8	1.8	2.9
VCM-二阶段法	2.4	3.1	3.0	2.5	3.4	2.5	2.2	3.0
组合赋权-二阶段法	2.6	3.3	2.9	2.4	3.6	2.6	1.8	2.8

表 6 各指标属性值变化量和权重值变化量的灵敏度区间
Tab.6 Sensitivity interval of different index attribute variation and index weight variation

区间	灵敏度区间								
	电压暂降	电压偏差	频率差	三相不平衡	电压波动	谐波畸变率	电压闪变	供电可靠性	服务指标
$[g_p, g_q]$	[-0.195 6, 0.804 4]	(-0.240 0, 0.764 8]	[-0.347 2, 0.652 8]	(-0.286 0, 0.669 7]	(-0.133 7, 0.657 5]	(-0.246 1, 0.641 6]	(-0.163 5, 0.649 1]	(-0.156 9, 0.210 5]	[-0.934 4, 0.065 6]
$[w_p, w_q]$	[-0.098 0, 0.174 8]	[-0.113 2, 0.886 8]	[-0.037 9, 0.962 1]	(0.572 0, 0.907 0]	[-0.199 0, 0.801 0]	[-0.108 1, 0.891 9]	[-0.162 7, 0.837 3]	[-0.169 5, 0.830 5]	[-0.018 6, 0.981 4]

4 结论

a. 本文基于二阶段法的电能质量评估模型,经算例分析验证了其有效性,能有效地修正单一赋权法得到的初始权重,充分考虑了方案的偏好信息,避免了“赋权不公平”情形的出现。

b. 电能质量评估的灵敏度分析是一个后优化过程,本文通过基于简单加权模型的指标参数灵敏度分析过程,推导了指标参数的灵敏度区间的充要条件,为计算电能质量指标参数的灵敏度提供了参考依据。

c. 根据对评估稳定性的要求,本文对电能质量评估稳定要求进行了 5 级划分,并设置了相应的灵敏度阈值范围,可通过调整灵敏度阈值来分析指标参数的灵敏性,对实际的决策过程具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 丁洪发,段献忠,朱庆春. 混合型电能质量调节器及其控制策略[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):33-38.
DING Hongfa,DUAN Xianzhong,ZHU Qingchun. A hybrid power quality conditioner and its control strategy [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(8):33-38.

[2] 焦东升,陆冬良,应俊豪,等. 基于 Profibus 的电能质量实时监测系统[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):117-120.
JIAO Dongsheng,LU Dongliang,YING Junhao,et al. Real-time power quality monitoring system based on Profibus[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):117-120.

[3] 张杨,刘志刚. EEMD 在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力自

动化设备,2011,31(12):86-90.

ZHANG Yang,LIU Zhigang. Application of EEMD in power quality disturbance detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(12):86-90.

[4] 管春,周维维,卢伟国,等. 基于图像平滑算法的电能质量数据压缩方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):77-80.
GUAN Chun,ZHOU Luwei,LU Weiguo,et al. Power quality data compression based on image smoothing algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):77-80.

[5] 周林,栗秋华,刘华勇,等. 用模糊神经网络模型评估电能质量[J]. 高电压技术,2007,33(9):67-68.
ZHOU Lin,LI Qiuhua,LIU Huayong,et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neural network[J]. High Voltage Engineering,2007,33(9):67-68.

[6] 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 Jiangan,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.

[7] 李娜娜,何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术,2009,33(6):55-61.
LI Nana,HE Zhengyou. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight with objective weight[J]. Power System Technology,2009,33(6):55-61.

[8] 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 Chengyong,JIA Xiufang,et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weigh[J]. Power System Technology,2005,29(6):11-14.

- [9] 江辉,彭建春,欧亚平,等. 基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2003,30(1):66-70.
JIANG Hui,PENG Jianchun,OU Yaping,et al. Power quality unitary quantification and evaluation based on probability and vector algebra[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences, 2003,30(1):66-70.
- [10] 周林,栗秋华,张凤. 遗传投影寻踪插值模型在电能质量综合评估中的应用[J]. 电网技术,2007,31(7):32-35.
ZHOU Lin,LI Qihua,ZHANG Feng. Application of genetic projection pursuit interpolation model on power quality synthetic evaluation [J]. Power System Technology,2007,31(7):32-35.
- [11] 黄剑,周林,栗秋华,等. 基于物元分析理论的电能质量综合评估[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(6):25-30.
HUANG Jian,ZHOU Lin,LI Qihua,et al. Evaluation of power quality based on the method of matter-element [J]. Journal of Chongqing University:Natural Science Edition,2007,30(6):25-30.
- [12] 丁立,贾秀芳,赵成勇,等. 基于可拓学的电能质量综合评价[J]. 电力自动化设备,2007,27(12):44-48.
DING Li,JIA Xiufang,ZHAO Chengyong,et al. Synthetic evaluation of power quality based on extenics [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(12):44-48.
- [13] 雷刚,顾伟,袁晓冬. 灰色理论在电能质量综合评估中应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):62-65.
LEI Gang,GU Wei,YUAN Xiaodong. Application of gray theory in power quality comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):62-65.
- [14] 张蔓,林涛,曹健,等. 2种电能质量综合评估方法的分析比较[J]. 电力系统自动化,2008,32(21):37-41.
ZHANG Man,LIN Tao,CAO Jian,et al. A comparative study on two methods for synthetic evaluation of power quality[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(21):37-41.
- [15] 刘家学. 对指标属性有偏好信息的一种决策方法[J]. 系统工程理论与实践,1999,19(2):54-57.
LIU Jiaxue. A decision making method that has favouritism information for the index attribute [J]. Systems Engineering Theory and Practice,1999,19(2):54-57.
- [16] 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,2004,26(2):194-197.
CHEN Huayou. Combination determining weights method for multiple attribute decision making based on maximizing deviations [J]. Systems Engineering and Electronics,2004,26(2):194-197.
- [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(16):40-43.
JIANG Wenqi. Optimizing method of combination weighting of multi-attribute decision-making [J]. Operations Research and Management Science,2006,15(16):40-43.
- [18] 徐泽水. 部分权重信息下多目标决策方法研究[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(1):43-47.
XU Zeshui. One method for multi-objective decision-making with partial weight information [J]. Systems Engineering Theory and Practice,2002,22(1):43-47.
- [19] 黄维忠. 指标权重的二阶段赋权法及其应用[J]. 上海海运学院学报,2003,24(2):168-171.
HUANG Weizhong. Two-step weighting method of criterion and its application [J]. Journal of Shanghai Marine University,2003,24(2):168-171.
- [20] 林振智,文福拴,薛禹胜. 黑启动决策中指标值和指标权重的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):20-25.
LIN Zhenzhi,WEN Fushuan,XUE Yusheng. Sensitivity analysis on the values and weights of indices in power system black-start decision making [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(9):20-25.
- [21] 樊治平,尤天慧,张全. 多属性决策中基于加权模型的属性值灵敏度分析[J]. 东北大学学报:自然科学版,2002,23(1):83-88.
FAN Zhiping,YOU Tianhui,ZHANG Quan. The sensitivity analysis to attribute values based on the additive weighting model in multiple attribute decision making [J]. Journal of Northeastern University:Natural Science,2002,23(1):83-88.
- [22] 蒋德珑,王克文,杨平,等. 基于聚类思想的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(7):106-109.
JIANG Delong,WANG Kewen,YANG Ping,et al. Power quality comprehensive evaluation based on the clustering method [J]. Power System Protection and Control,2012,40(7):106-109.

作者简介:

荆朝霞(1975-),女,河南巩义人,副教授,博士,研究方向为电力市场、电力系统优化规划和运行(E-mail:zxjing@scut.edu.cn);

胡仁(1989-),男,江西景德镇人,硕士研究生,研究方向为电力市场、电力系统优化规划和运行(E-mail:huren0618@qq.com)。

Power quality evaluation based on two-stage method and its sensitivity analysis

JING Zhaoxia,HU Ren

(School of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510641,China)

Abstract: A power quality evaluation model based on two-stage method is developed,which calculates the initial weight of different indexes by different weighting approaches respectively,estimates the expected index weights by considering the preference information of each alternative,applies the least square method to establish the optimization model of index weight to determine the final index weights,and sorts the calculated comprehensive evaluative values. The index sensitivity is calculated based on simple weighting model. Results of case analysis verify the effectiveness of the proposed model.

Key words: power quality; two-stage method; synthetic evaluation; sensitivity analysis; models