

基于灰色关联度和理想解法的电能质量综合评估方法

李正明, 施诗, 潘天红, 陈武晖

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 电能质量的合理性评估是电能分质定价的基础, 也是实现电能综合治理的重要依据。为提高电能评估的客观性与科学性, 将灰色系统理论引入理想解法中, 构造一种新的贴近度指标, 判定电能质量的等级及优劣排序, 避免了理想解法在遇到贴近度相等时不能区分样本之间优劣性的情况, 使得评估更加合理。此外, 结合 G1 法与熵权法确定权重因子, 实现了权重的主客观统一, 为评估奠定基础。实例分析表明, 该方法能细化电能质量的等级, 使得评价结果更加客观、合理和全面。

关键词: 电能质量; 组合赋权; 理想解法; 灰色关联度; 贴近度

A synthetic power quality assessment based on grey correlation analysis and TOPSIS method

LI Zheng-ming, SHI Shi, PAN Tian-hong, CHEN Wu-hui

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A reasonable power quality evaluation method is not only the foundation to set the price according to power quality, but also the important basis to manage electric energy comprehensively. In order to evaluate the power quality objectively and scientifically, a novel relative similarity degree index is presented to evaluate the grade of power quality and order preference by integrating the grey correlation analysis into the ideal solution (TOPSIS) method. Then it can avoid the case that TOPSIS cannot distinguish samples' disparity due to the equal relative similarity degrees. Furthermore, to achieve a unification of objectivity and subjectivity of weight, a weight factor is determined by combining the G1 with entropy weight method, which is also a foundation for evaluation. A case study demonstrates that the proposed method can elaborate the grade of power quality and make the power quality assessment being more objective, reasonable and comprehensive.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61273142).

Key words: power quality; combinatorial weighting method; TOPSIS; grey correlation degree; relative similarity degree

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)06-0014-06

0 引言

随着科学技术和经济的发展, 不仅对电能的需求量日益增加, 同时对电能质量的要求也越来越高。如何对电能质量进行综合评估^[1]将成为现代电力系统的一项重要研究内容。文献[2]提出了结合 D-S 证据理论的数据融合技术对 AHP 法的判断矩阵进行改进, 克服了权重的主观局限性。文献[3]提出一种基于 RBF 神经网络模型的评估方法, 能客观地反映评估指标之间的内在关系, 但需大量的样本进行训练。文献[4-5]应用物元分析理论将电能质量评估作

为一个确定的数学模型进行处理, 但没有考虑电能质量分级界限值的随机性和模糊性。文献[6]运用灰色关联分析法消除各专家在运用 AHP 法求得的各项指标权重时意见不统一造成的权重分配错误。文献[7]通过对 AHP 法改进并调整对一致性影响最大的元素, 得到合理的权值, 同时解决了加权 TOPSIS 法中可能产生的逆序问题。

电能质量评估是一种多指标决策过程, 而理想解法^[8]是一种有效的多指标决策方法, 分析的依据是数据序列之间确定的距离关系。但由于统计数据有限, 加上人为因素的影响, 指标无法用一个严格的标准来衡量, 具有“灰色”特征。而灰色关联度能很好地分析曲线的相似程度。因此, 本文在理想解法中引入灰色关联度, 将欧式距离与灰色关联度相结合来解决电能质量问题, 使评估结果更加合理。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273142); 江苏省科技支撑计划项目(BE2011143); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 PAPD

1 电能质量评估指标及权重的确定

1.1 电能质量评估指标

本文以 8 项电能质量指标为目标, 进行评估分析, 亦即: 电压偏差 I_1 、电压暂降 I_2 、三相不平衡 I_3 、电压波动 I_4 、电压闪变 I_5 、电压谐波 I_6 、频率偏差 I_7 、供电可靠性 I_8 , 根据电能质量国家标准, 对这 8 项电能质量指标进行等级评定, 按照其质量优劣分为优秀 Q_1 、良好 Q_2 、中等 Q_3 、及格 Q_4 、不及格 Q_5 。本文考虑的电压等级为 380 V, 电能质量评估指标的等级界限如表 1 所示。

表 1 电能质量评估指标的等级界限

指标	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
电压偏差/%	≤ 1.20	≤ 3.00	≤ 4.50	≤ 7.0	≥ 7.00
电压暂降	≥ 0.90	≥ 0.80	≥ 0.50	≥ 0.10	≤ 0.10
三相不平衡/%	≤ 0.50	≤ 1.00	≤ 1.50	≤ 2.00	≥ 2.00
电压波动/%	≤ 0.50	≤ 1.00	≤ 1.50	≤ 2.00	≥ 2.00
电压闪变/%	≤ 0.20	≤ 0.50	≤ 0.80	≤ 1.00	≥ 1.00
电压谐波/%	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 3.00	≤ 5.00	≥ 5.00
频率偏差/Hz	≤ 0.05	≤ 0.10	≤ 0.15	≤ 0.20	≥ 0.20
供电可靠性	≥ 0.95	≥ 0.85	≥ 0.80	≥ 0.70	≤ 0.70

1.2 权重的确定

目前, 指标赋权分为主观赋权和客观赋权两大类^[9]。为了有效避免单一赋权的局限性, 将主客观赋权法结合, 使权重系数更加合理。本文用 G1 法确定指标的主观权重, 熵权法确定客观权重。G1 法是对 AHP 法进行改进的一种方法, 无需构造判断矩阵, 不需进行一致性检验; 计算量比 AHP 大幅减小, 提高了计算速度。通过专家对所选指标的重要性进行排序, 给出相邻指标的重要程度之比, 先求出最次要的指标的权重, 再递归依次求得剩下指标的主观权重 A ^[10]。

熵权法是根据各项指标观测值所提供的信息量大小来客观确定指标权重。信息熵是系统无序程度的度量。某个指标的信息熵越小, 表明其指标值的变异程度越大, 则该指标在综合评估中所起的作用也较大, 对应的权重值就大。计算出每一项指标的熵值, 根据熵值的大小确定客观权重 B ^[11]。

最后, 将 G1 法和熵权法得到的主观权重 A 和客观权重 B , 采用乘法合成法进行组合赋权, 即:

$$W_j = \frac{a_j \times b_j}{\sum_{j=1}^m a_j \times b_j} \quad (1)$$

$W = [W_1, W_2, \dots, W_m]$ 为指标的组合权重向量。

2 传统的理想解法

理想解法是以距离作为尺度仅反映数据曲线之间的位置关系。其中心思想是通过构造理想解和负理想解, 并以与理想解距离最近且与负理想解距离最远的方案作为最优方案^[12]。其基本步骤为

- 1) 对无量纲矩阵进行加权, 得到加权标准化矩阵。
- 2) 确定理想方案和负理想方案。
- 3) 分别计算每个方案到理想解的欧氏距离 D_i^+ 和负理想解的欧氏距离 D_i^- 。
- 4) 计算每个方案的相对贴近度。

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad (i=1, 2, \dots, n+p) \quad (2)$$

根据 C_i^* 的大小对方案排序, 贴近度越大方案越优。

TOPSIS 模型可以看出, TOPSIS 法是基于计算两方案之间的距离来对各方案的优劣性进行排序, 当两方案的相对贴近度相等, 则无法比较方案的好坏。从图 1 直观看出, A 点和 B 点表示正理想解和负理想解, C、D、E、F 点代表四个方案。情况一: 若线段 AB 的垂直平分线为直线 CD, 则直线 CD 上任意两点到点 A 和点 B 的距离都相等, 相对贴近度为 0.5。情况二: 若线段 EF 被线段 AB 垂直平分, 则方案 E 和 F 到理想点 A 的距离相等且分别到负理想点 B 的距离也相等, 即相对贴近度也相等。这两种情况下, 根据式(2)可看出 TOPSIS 法无法对方案 C 与 D、E 与 F 进行排序比较。

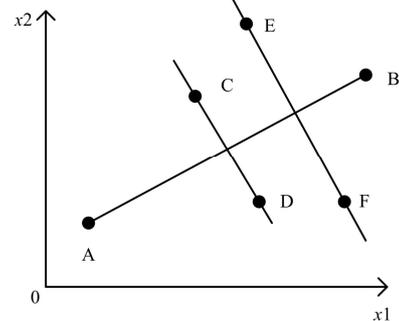


图 1 贴近度相等案例

Fig. 1 Case for equal relative similarity degree

3 灰色关联分析法

灰色关联分析法是以曲线间相似程度的大小作为关联程度的衡量尺度, 反映数据序列的态势变化。它适用于部分信息已知、部分信息未知的贫信息环境^[13], 但在系统方案的整体评判上存在缺陷。其基

本思想是由决策矩阵中各个方案的评价向量与理想最优方案的评价向量之间灰色关联度的大小来确定方案的优劣排序^[4]。其基本步骤为

1) 首先确定出最优方案作为参考序列曲线。

2) 计算每个方案的评价指标与该指标的最优值的关联系数, 构成多目标决策的灰色关联系数矩阵。

3) 求各个方案与相对最优方案的加权关联度矢量

$$R_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} W_j \quad (3)$$

关联度越大, 说明待评估样本与标准样本越接近。

4 基于理想解法和灰色关联度的评估模型

针对电能质量综合评价指标体系, 充分利用理想解法和灰色关联分析法各自的优点, 本文利用灰色关联度进一步改进 TOPSIS 法, 可以更确切地体现待评估样本与标准等级的贴合度, 合理地比较样本之间的优劣程度。基于 TOPSIS 和灰色关联度的电能质量评估的步骤如下。

1) 本文将 n 个评估样本、 p 级标准等级、 m 个指标数构成初始矩阵 $X \in R^{(n+p)m}$, 用极差法对其作标准化处理。

2) 计算加权标准化矩阵。

$$Z = W^T \cdot Y = \begin{bmatrix} W'_1 y_{11} & W'_2 y_{12} & \cdots & W'_m y_{1m} \\ W'_1 y_{21} & W'_2 y_{22} & \cdots & W'_m y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ W'_1 y_{(n+p)1} & W'_2 y_{(n+p)2} & \cdots & W'_m y_{(n+p)m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 确定理想方案和负理想方案。

$$Z_j^+ = \left\{ \max_{1 \leq i \leq (n+p)} \left(\{z_{ij}\}_{i=1}^{n+p} \right) \middle| j \in J^+, \min_{1 \leq i \leq (n+p)} \left(\{z_{ij}\}_{i=1}^{n+p} \right) \middle| j \in J^- \right\} = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+) \quad (5)$$

$$Z_j^- = \left\{ \min_{1 \leq i \leq (n+p)} \left(\{z_{ij}\}_{i=1}^{n+p} \right) \middle| j \in J^+, \max_{1 \leq i \leq (n+p)} \left(\{z_{ij}\}_{i=1}^{n+p} \right) \middle| j \in J^- \right\} = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-) \quad (6)$$

式中: J^+ 是值越大越好的指标集合; J^- 是值越小越好的指标集合。

4) 计算第 i 个方案与理想方案关于第 j 个指标的灰色关联系数。

$$r_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |z_j^+ - z_{ij}| + \rho \max_i \max_j |z_j^+ - z_{ij}|}{|z_j^+ - z_{ij}| + \rho \max_i \max_j |z_j^+ - z_{ij}|} \quad (7)$$

式中 $\rho \in [0, 1]$ 为分辨系数, 通常取 $\rho = 0.5$ 。

各方案与理想方案的灰色关联系数矩阵为

$$R^+ = \begin{bmatrix} r_{11}^+ & r_{12}^+ & \cdots & r_{1m}^+ \\ r_{21}^+ & r_{22}^+ & \cdots & r_{2m}^+ \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1}^+ & r_{n2}^+ & \cdots & r_{nm}^+ \end{bmatrix} \quad (8)$$

第 i 个方案与理想方案的灰色关联度为

$$R_i^+ = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_{ij}^+, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

5) 同理计算第 i 个方案与负理想方案关于第 j 个指标的灰色关联系数。

$$r_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |z_j^- - z_{ij}| + \rho \max_i \max_j |z_j^- - z_{ij}|}{|z_j^- - z_{ij}| + \rho \max_i \max_j |z_j^- - z_{ij}|} \quad (10)$$

各方案与负理想方案的灰色关联系数矩阵为

$$R^- = \begin{bmatrix} r_{11}^- & r_{12}^- & \cdots & r_{1m}^- \\ r_{21}^- & r_{22}^- & \cdots & r_{2m}^- \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1}^- & r_{n2}^- & \cdots & r_{nm}^- \end{bmatrix} \quad (11)$$

第 i 个方案与负理想方案的灰色关联度为

$$R_i^- = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_{ij}^-, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

6) 第 i 个方案到理想解距离 D_i^+ 和负理想解距离 D_i^-

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m [z_{ij} - z_j^+]^2}, \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [z_{ij} - z_j^-]^2}, \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

7) 分别对 R_i^+ 、 R_i^- 、 D_i^+ 、 D_i^- 进行无量纲化处理

$$M_{\text{new}} = \frac{M_i}{\max_{1 \leq i \leq n} (M_i)} \quad (15)$$

其中, M_i 分别代表 D_i^+ 、 D_i^- 、 R_i^+ 、 R_i^- 。

8) 由于 D_i^- 和 R_i^+ 数值越大, 方案越接近理想解; 而 D_i^+ 和 R_i^- 数值越大, 方案越远离理想方案, 因此有

$$S_i^+ = f \times D_i^- + (1-f) \times R_i^+, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

$$S_i^- = f \times D_i^+ + (1-f) \times R_i^-, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

其中 f 反映决策者对位置形状的偏好程度, S_i^+ 反映方案与理想方案接近程度, 其值越大方案越优; S_i^- 反映方案与理想方案远离程度, 其值越大方案越劣。

9) 计算方案的相对贴近度

$$CS_i = \frac{S_i^+}{S_i^- + S_i^+}, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

贴近度越大方案越优; 反之, 贴近度越小方案越劣。

5 实例分析

基于上述模型分析, 本文引用文献[15]的数据, 对 5 个观测点的电能质量数据进行评估。实测数据见表 2。

表 2 观测站的电能质量实测数据

Table 2 Practical values of index at the observation station

观测点	电压偏差 /%	电压暂降 /%	三相不平衡横% /%	电压波动 /%	电压闪变 /%	电压谐波 /%	频率 /Hz	供电可靠性
1	3.212	0.7963	0.83	1.33	0.473	1.72	0.0922	0.833
2	6.68	0.1589	1.36	1.53	0.847	4.8814	0.1562	0.762
3	4.35	0.5156	1.35	1.95	0.634	2.67	0.1180	0.796
4	5.33	0.5856	1.74	1.37	0.826	3.36	0.1787	0.740
5	4.22	0.4863	1.83	1.58	0.828	4.57	0.1892	0.764

步骤 1: 确定组合权重

根据 G1 法, 文献结合一些专家的意见, 对评价因子进行排序: $I_7 > I_6 > I_8 > I_4 > I_5 > I_1 > I_2 > I_3$

确定各评价因子之间的相对重要程度:

$$r_2 = 1.8, r_3 = 1.7, r_4 = 1.2, r_5 = 1, r_6 = 1.2, r_7 = 1.2, r_8 = 1.2$$

利用 G1 法得到的主观权重为

$$A = [0.0756, 0.0630, 0.0525, 0.0908, 0.0908, 0.1851, 0.3333, 0.1089]$$

利用熵权法得到的客观权重为

$$B = [0.1160, 0.1031, 0.1244, 0.1351, 0.1228, 0.1468, 0.1408, 0.1110]$$

则组合权重向量为

$$W = [0.0668, 0.0495, 0.0497, 0.0933, 0.0848, 0.2068, 0.3570, 0.0920]$$

步骤 2: 计算加权标准化决策矩阵

$$Z = \begin{bmatrix} 0.0668 & 0.0495 & 0.0497 & 0.0933 & 0.0848 & 0.2068 & 0.3570 & 0.0920 \\ 0.0461 & 0.0433 & 0.0331 & 0.0622 & 0.0530 & 0.1551 & 0.2380 & 0.0552 \\ 0.0288 & 0.0247 & 0.0166 & 0.0311 & 0.0212 & 0.1034 & 0.1190 & 0.0368 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0436 & 0.0431 & 0.0388 & 0.0417 & 0.0559 & 0.1696 & 0.2566 & 0.0490 \\ 0.0037 & 0.0036 & 0.0212 & 0.0292 & 0.0162 & 0.0061 & 0.1042 & 0.0228 \\ 0.0305 & 0.0257 & 0.0215 & 0.0031 & 0.0388 & 0.1205 & 0.1952 & 0.0353 \\ 0.0192 & 0.0300 & 0.0086 & 0.0392 & 0.0185 & 0.0848 & 0.0507 & 0.0147 \\ 0.0320 & 0.0239 & 0.0056 & 0.0261 & 0.0182 & 0.0222 & 0.0257 & 0.0236 \end{bmatrix}$$

步骤 3: 基于灰色关联理想解法分析

根据式(5)、式(6)确定理想解和负理想解:

$$Z_j^+ = [0.0668, 0.0495, 0.0497, 0.0933, 0.0848, 0.2068, 0.3570, 0.0920]$$

$$Z_j^- = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

根据式(9)~式(14)分别求得方案与理想方案、负理想方案的灰色关联度及欧氏距离。根据式(18), 分别取 $f = 0, f = 0.6, f = 1$ 时的贴近度。具体数据见表 3, 其中 $i = (1, 2, \dots, 9)$ 。

表 3 评估结果比较

Table 3 Comparisons of the evaluation results

等级观测点	R_i^+	R_i^-	D_i^+	D_i^-	$f = 0$ 时灰色关联贴近度 R	$f = 1$ 时 TOPSIS 的贴近度 C^*	$f = 0.6$ 时本文方法的贴近度 CS
优质	1	0.6355	0	0.4516	0.6114	1	0.7973
良好	0.8353	0.7104	0.1446	0.3091	0.5404	0.6813	0.6099
中等	0.7313	0.8078	0.2854	0.1713	0.4752	0.3751	0.4255
及格	0.6355	1	0.4516	0	0.3886	0	0.2027
1	0.8377	0.7139	0.1324	0.3273	0.5399 中等	0.7120 良好	0.6252 良好
2	0.6825	0.8893	0.3531	0.1141	0.4342 及格	0.2443 及格	0.3399 及格
3	0.7493	0.7918	0.2232	0.2396	0.4862 中等	0.5178 中等	0.5020 中等
4	0.7076	0.8524	0.3555	0.1149	0.4536 及格	0.2443 及格	0.3488 及格
5	0.6916	0.8907	0.4016	0.0660	0.4371 及格	0.1411 及格	0.2905 及格
排序	$R_6^+ < R_8^+$	$R_6^- > R_8^-$	$D_6^+ = D_8^+$	$D_6^- = D_8^-$	①>③>④>⑤>②	①>③>④=②>⑤	①>③>④>②>⑤

由表 3 看出用 TOPSIS 法评估电能质量时, 观测点 2 与观测点 4 到理想解的距离、负理想解的距离分别近似相等, 且相对贴近度也相等, 此时仅仅用 TOPSIS 法不能比较观测点 2 与观测点 4 电能质量的优劣性。当引入灰色关联度时, 若取偏好系数 $f = 0.6$, 从表 3 对比中看出用本文的方法可以判定

观测点 4 比观测点 2 要好, 本文的评估等级及排序结果与文献[15]基本一致, 这充分说明本文的方法取得了较好的评估效果。灰色关联理想解法与灰色关联分析法的排序结果略有不同, 是因为本文同时考虑了数据曲线之间位置和形状相似性上的差异。

当决策者在考虑方案数据曲线之间位置和形

状相似性上的偏好有所不同时，对方案作出的评估结果就会略有不同。图 2 是反映当偏好系数 f 从 0 到 1 变化时，各个观测点与标准等级的贴近程度的差别。当 $f=0$ 时是只考虑用灰色关联分析法中的灰色关联度来评估电能质量，此时由于观测点 1 的电压波动有点大，导致评估观测点 1 为中等，但观测点 1 的关联度很接近良好等级，当 $f=0.1$ 时，观测点 1 就已经达到良好等级。当 $f=1$ 时只考虑用 TOPSIS 法的相对贴近度来评估电能质量，观测点 2 与观测点 4 的贴近度相等。由图 2 可以看出当 $0 \leq f < 1$ 时，观测点 4 的电能质量要比观测点 2 的电能质量好。它可以给评估者一个参考，通过选择合适的偏好系数 f ，从而判断得出最佳排序结果。

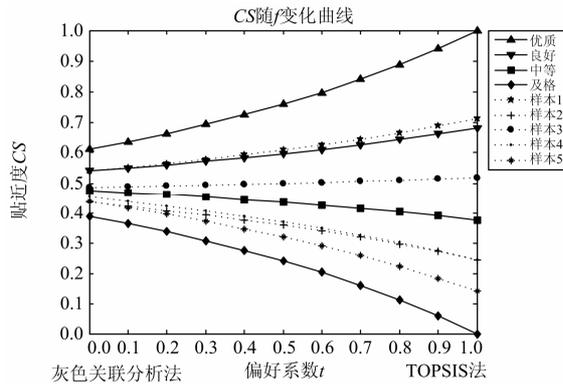


图 2 偏好系数 f 变化时，各个样本的贴近度变化曲线

Fig. 2 Relative similarity degree curves of each sample change with preference coefficient called f

6 结论

针对电能质量合理性评估问题，本文首先将 G1 法与熵权法组合，计算综合权重系数，实现权重的主客观统一。同时融合灰色关联分析法和理想解法的各自优点，构建新的模型综合评估监测点的电能质量。实例分析表明，本文算法可以有效避免传统理想解法在遇到贴近度相等时不能区分方案之间优劣性的情况。此外，本文方法还能体现待评估样本中数据在曲线位置上的关系，以及反映样本数据曲线之间态势变化和几何曲线的相似性，能够合理地对方案进行排序。因此，本文将理想解法和灰色关联分析法二者相结合，物理意义更加明确，用于综合评估电能质量，能够解决信息不充足、样本较少的问题，是一种比较客观合理的评估方法。

参考文献

[1] 陶顺, 肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系构架[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 171-175.
TAO Shun, XIAO Xiang-ning. Infrastructure of the

power quality assessment system of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175.

[2] 杨丽徒, 郭建宇, 程杰. 证据理论和层次分析法相结合的新农村电气化电能质量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 26-30.
YANG Li-xi, GUO Jian-yu, CHENG Jie. Power quality evaluation of new rural electrification on D-S evidential theory and AHP[J]. Power System Protection and control, 2009, 37(14): 26-30.

[3] 刘颖英, 李国栋, 顾强, 等. 基于径向基函数神经网络的电能质量综合评估[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 45-48.
LIU Ying-ying, LI Guo-dong, GU Qiang, et al. The comprehensive evaluation of power quality based on the RBF neural network[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(1): 45-48.

[4] 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): 25-29.
HUANG Jian, ZHOU Lin, LI Qiu-hua, et al. Evaluation of power quality based on the method of matter-element[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(6): 25-29.

[5] 夏非, 范莉, 苏浩益, 等. 基于云物元分析理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 6-10.
XIA Fei, FAN Li, SU Hao-yi, et al. A synthetic power quality evaluation model based on cloud matter element analysis theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 6-10.

[6] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 基于模糊集对分析法的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 81-85.
LIU Jun-hua, LUO Long-fu, ZHANG Zhi-wen, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on fuzzy set pair analysis[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 81-85.

[7] 何吉彪, 程浩忠, 姚良忠, 等. 基于两种改进方法的电能质量综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 18-22.
HE Ji-biao, CHENG Hao-zhong, YAO Liang-zhong, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on two improved methods[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(1): 18-22.

[8] DYMOVA L, SEVASTJANOV P, TIKHONENKO A. An

- approach to generalization of fuzzy TOPSIS method[J]. Information Science, 2013, 238: 149-162.
- [9] 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.
- LI Na-na, HE Zheng-you. Combinatorial weighting method for comprehensive evaluation of power quality[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 128-134.
- [10] 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 Ji-guang, YAO Jian-gang, et al. Application of attribute recognition and G1-entropy method in evaluation of power quality[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 56-61.
- [11] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 一种考虑排序稳定分析的电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 70-76.
- LIU Jun-hua, LUO Long-fu, ZHANG Zhi-wen, et al. A new method for power quality comprehensive evaluation considering the analysis of sequence stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 70-76.
- [12] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与TOPSIS集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 456-459.
- CHEN Lei, WANG Yan-zhang. Research on TOPSIS integrated evaluation and decision method based on entropy coefficient[J]. Control and Decision, 2003, 18(4): 456-459.
- [13] 周辉, 杨洪耕, 吴传来. 基于灰色聚类的电能质量综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 70-75.
- ZHOU Hui, YANG Hong-geng, WU Chuan-lai. A power quality comprehensive evaluation method based on grey clustering[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 70-75.
- [14] 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, 36(10): 67-73.
- SHEN Yang-wu, PENG Xiao-tao, SHI Tong-qin, et al. A grey comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 67-73.
- [15] 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 Qiu-hua, ZHANG Feng. Application of genetic projection pursuit interpolation model on power quality synthetic evaluation[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 32-35.

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2013-11-18

作者简介:

李正明(1957-), 男, 教授, 博导, 研究方向为智能电网与电力系统远程监控, 工业控制计算机网络与应用; E-mail: lzming@ujs.edu.cn

施诗(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量评估及监测;

潘天红(1974-), 男, 教授, 研究方向为非线性系统的模型辨识与控制、智能电网。