

考虑用户需求和专家知识的电能质量综合评估

毛雨林, 黎灿兵, 何禹清

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Comprehensive Evaluation of Power Quality Considering Customer Demands and Expert Knowledge

MAO Lilin, LI Canbing, HE Yuqing

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: There are obvious difference between the evaluation modes of power quality and the judgment of their advantage or disadvantage in the viewpoint of power consumers and experts. Considering consumer demand and expert knowledge, a new method to comprehensively evaluate power quality is proposed. Firstly, the evaluations on advantages or disadvantages of indices of all monitoring points are described by language evaluation and expert grading respectively; then taking evaluation information as the evidence, the evidence synthesis is performed by Dempster-Shafer theory to determine the evaluation information on each monitoring point from consumers and experts and to determine the weight of individual, the conflict degree is used to calculate the weight of individual by which the weight of each individual is updated, meanwhile the weights of different groups are taken into account; finally the Dempster-Shafer theory is used again to determine the power quality grades of all monitoring points. The proposed method not only can incarnate different requirements of consumers for power quality, but also can reflect experts' knowledge, so it can incarnate the evaluation opinions of the majority. Simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: electricity market; power quality; expert knowledge; customer requirement; Dempster-Shafer theory

摘要: 电力用户和电力专家 2 类群体对电能质量的评价方式和优劣判断有明显不同。同时考虑用户需求和专家知识, 提出了一种电能质量综合评估的新方法。首先利用语言评价和专家评分的形式分别描述用户、专家对监测点各指标的优劣评价; 然后将这些评价信息作为证据, 利用 D-S (Dempster-Shafer, D-S) 证据理论进行证据合成以确定各用户、专家对各监测点的评估信息。在个体的权重确定过程中, 利用冲突度指数来计算个体的权重, 同时计及不同群体的权重, 并以此更新各个体的权重; 最后, 再次利用 D-S 证据理论确定各监测点电能质量的优劣及等级。仿真结果验证了所提方

法的有效性。

关键词: 电力市场; 电能质量; 专家知识; 用户需求; 证据理论

0 引言

电能是电力部门向用户提供的由发电、供电、用电 3 方共同保证质量的一种特殊商品。无论是从电网安全还是电力用户需求角度看, 电能质量问题都非常重要^[1]。对于单个电能指标而言, 其优劣可以直接通过测量客观确定, 但对于一个监测点而言, 其综合评价结果却不能直观得出, 因此, 对电能质量进行合理、准确的综合评估是解决电能质量问题的基本前提。

目前, 电能质量的综合评估方法有多种^[2-11], 文献[2-3]基于模糊数学方法对电能质量的综合评估进行了探讨; 为使评估更加客观、公平, 文献[4-5]采用层次分析法和主客观权重相结合的方法来综合评估电能质量; 文献[6]以概率统计和矢量代数为基础, 提出了基于日周期的电能质量量化和评价方法; 考虑到电能质量综合评估模型的高维复杂性, 文献[7]和文献[8-9]分别运用神经网络和遗传投影寻踪法对电能质量进行综合评估, 实现了评估过程的客观性; 文献[10]提出了基于物元分析法的电能质量综合评估方法; 基于对权重的改进, 文献[11]提出了基于组合赋权的评估方法, 有效克服了单一赋权法的不足。上述方法从电能质量的指标、权重和模型特性方面对电能质量的综合评估做了有益的探索。

在电力市场运行机制下, 用户的需求起着越来越重要的作用, 用户可以作为独立的实体选择不同的电能供应商, 并参与价格控制。为计及用户对电能质量的不同需求和偏好, 文献[12]提出考虑不同

用户需求的电能质量综合评估方法。但电力用户一般未对电能质量的评估体系进行深入研究，因此单纯依据用户评价可能使评估结果缺乏科学性。

针对上述问题，本文提出一种同时考虑不同用户需求和专家知识的电能质量综合评估方法。该方法区别电力用户和电力专家 2 类群体对电能质量的评价方式和优劣判断的明显不同，并利用证据理论来识别他们之间的区别。

1 权重的确定

由于用户自身专业知识及经验的限制，致使其对电能质量各技术指标很难有一个定量的判断，同时，用户由于自身生产或生活需要的不同，他们在评估过程中对各指标会有不同的侧重^[12]。

专家基于其对电能质量技术指标评价体系的研究，均可以对一定环境下的各技术指标给出一个定量的判断，且从电力系统的角度对各指标的权重进行评价。这里采用专家评分制来实现专家对电能质量的评价。专家评分采用百分制的评分形式，专家根据电能指标的实际优劣情况并参照标准对各项指标进行评分。这种评分方法能从专家角度定量地反映各电能指标的优劣。

本文利用判断矩阵法^[5]得到用户对各指标的权重为 w_{c-B} (c 为与用户相关的量)。采用改进的层次分析法^[13]确定每一位专家对各指标的权重，得到专家对各指标的权重为 w_{e-B} (e 为与专家相关的量)。

2 D-S 证据理论及合成法则

D-S(Dempster-Shafer, D-S)证据理论^[14]是一种不确定性推理方法，是对经典概率论的推广，它将各种不同来源数据作为具体证据，运用证据合成规则合成一个聚焦了多个具体证据的抽象证据。D-S 证据理论在对证据信息的表示上，能够区分不确定和不知道的差异，能较好地处理具有模糊和不确定信息的合成问题。下面给出 D-S 证据理论的基本概念和运算。

设所能认识到的所有可能结果的集合为识别框架 Θ 。 Θ 内任一子集称为一个焦点 X ； $m(X)$ 称为焦点 X 的基本可信数或 Mass 函数，它反映对焦点 X 的精确信任程度；用信度函数 $B_{el}(X)$ 来表示对焦点 X 的所有子集的信度总和，用似真函数 $P_{ls}(X)$ 来表示不否定焦点 X 的程度，其中，

$$\begin{cases} B_{el}(X) = \sum_{Y \subseteq X} m(Y) \\ P_{ls}(X) = \sum_{Y \cap X \neq \phi} m(Y) \end{cases} \quad (1)$$

设 B_{el1} 和 B_{el2} 为同一识别框架上的 2 个信度函数， m_1 、 m_2 分别为其对应的 Mass 数， m_1 、 m_2 对应的焦点分别为 X_1, X_2, \dots, X_s 和 Y_1, Y_2, \dots, Y_t ，则 2 个信度函数的基本合成法则为

$$m(D) = \begin{cases} 0, & D = \phi \\ \frac{\sum_{X_s \cap Y_t = D} m_1(X_s)m_2(Y_t)}{1 - \sum_{X_s \cap Y_t = \phi} m_1(X_s)m_2(Y_t)}, & D \neq \phi \end{cases} \quad (2)$$

记为 $B_{el1} \oplus B_{el2}$ ；对于同一识别框架上的 $Z(Z>2)$ 个信度函数，其合成法则为

$$m(D) = B_{el1} \oplus B_{el2} \oplus B_{el3} \oplus \dots \oplus B_{elZ} \quad (3)$$

3 单一评价个体的信息量化及合成

对于用户的语言评价信息，采用两极比例法^[15]对其进行量化，语言评价信息等级量化值见表 1。利用表 1 中的归一化值得到用户 c_l 的决策矩阵 \bar{v}_{c_l} 。

表 1 语言评价信息等级量化表
Fig. 1 The hierarchy structure of linguistic evaluation

属性	优	良	好	中	差
属性量化值	9	7	5	3	1
归一化值	0.36	0.28	0.20	0.12	0.04

对于专家的评价信息，由于其采用的是评分形式，因而只要对每项指标进行归一化即可。专家 e_k 对第 i 个监测点的第 j 个指标的评分值 $v_{ek}(i, j)$ 归一化处理后为

$$\bar{v}_{ek}(i, j) = v_{ek}(i, j) / \sum_{m=1}^N v_{ek}(m, j) \quad (4)$$

式中 N 为监测点的个数。

将上述归一化后的值作为各焦点 $X_{js}(s=1, 2, \dots, t, t \leq 2^N)$ 的初始分配函数值 e_{ij} ，并结合单个个体 i (专家或用户)对指标 j 的权重 $w_{a(i-j)}$ (下标 a 代表包含专家和用户的个体)，则可得到不同指标下各焦点 X_{js} 的基本概率分配函数值 (basic probability assignment function, BPAF)

$$m_{a(i-j)}(X_{js}) = w_{a(i-j)}e_{ij} \quad (5)$$

运用 D-S 合成式(2)对单个个体下的所有电能指标对应焦点的 BPAF 进行合成，得到单个个体 i 对焦点 X_s 的 BPAF 值 $m_{ai}(X_s)$ ，从而得到单个个体 i 对各观测点的综合评价信息。

4 综合用户和专家 2 类群体的证据合成

4.1 同一群体内个体的评价冲突和权重

考虑到用户、专家之间的评价存在差异，本文利用文献[12]中的冲突度分析法来反映用户成员、

专家成员间意见的冲突程度。通过冲突度分析可得任意 2 个用户 c_i 和 c_j 之间的冲突度为 h_{cij} 。由单个用户与其他用户的冲突度，利用序加权平均算子^[16]可得到用户 c_i 的冲突度指数 I_{ck} 。同理，可以得到专家 e_k 的冲突度指数 I_{ek} 。

采用体现多数人意见的群组评价思想——位置权向量^[17]来计算用户 c_i 的权重 w_{ci}

$$w_{ci} = g_Q(i/P_c) - g_Q((i-1)/P_c) \quad (6)$$

式中： $g_Q(r) = \sqrt{r}$ 为模糊语义量化算子， $r \in [0,1]$ ； P_c 为用户成员个数； i 为将 P_c 个用户按冲突度指数升序排列后用户 c_i 所在的位置。同理，也可得到专家 e_k 的权重 w_{ek} 。

4.2 综合考虑用户和专家后的评价冲突和权重

4.1 节得到了个体在各自群体内的权重值，但实际评估过程中，这 2 类群体的重要性并不一定相同。另一方面，不同群体的个体对于全体成员而言其权重也应服从少数服从多数的原则。因而，个体在整体评价中的权重需要考虑用户和专家这 2 类群体在实际问题中的权重，即其权重需要进行更新。

给用户和专家这 2 类群体各赋一个总的权重值，分别为 w_{ct} 、 w_{et} ($w_{ct} + w_{et} = 1$)。这 2 个权重值可以通过电力公司(或专家)与用户的共同协商或通过其他群体权重的取值方法来确定。将 4.1 节中得到的同类群体中各个体的权重乘以个体单独评价下各焦元的 BPAF 值，便得到个体在其群体内的证据数值，综合考虑不同类群体的权重后，可得到个体在整体评价中的证据数值。通过计算任意 2 个个体 i 和 j 之间的冲突度 d_{ij} ，可得到任意个体 i 的冲突度指数 I_i 为

$$I_i = g_Q(h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{i(P_c+P_e)}) \quad (7)$$

将 $P_c + P_e$ 个个体的冲突度指数 I_i 按升序进行排列，可得到个体 i 的权重 w_{ak} 为

$$w_{ak} = g_Q\left(\frac{k}{P_c + P_e}\right) - g_Q\left(\frac{k-1}{P_c + P_e}\right) \quad (8)$$

式中 k 为冲突度指数排列后个体 i 的位置。

4.3 各监测点电能质量的优劣排序

将第 3 章中得到的个体证据数值与第 4 章的个体权重值相乘，可得到所有个体在整体评价中最终的证据数值，将其作为证据，通过运用 D-S 合成式(2)，可得到所有个体对各监测点的综合评价。

由 D-S 证据理论中对信度函数和似真函数的定义，结合以各监测点为焦元的 BPAF 值计算任一监测点 A 的信任度 $f_B(A)$ 和不否认 A 的程度 $f_P(A)$ 。利

用文献[18]的基于 D-S 理论的多属性群决策规则，对所有监测点的信任区间进行比较分析，可实现对各监测点电能质量的优劣排序。

5 电能质量综合评估流程

电能质量综合评估的总体流程如图 1 所示。具体步骤可描述为：

- 1) 用户对各监测点电能质量指标的优劣进行语言评价。
- 2) 专家从系统的角度对各监测点电能质量指标的优劣通过评分的形式进行评价。
- 3) 对用户和专家的评价值进行量化。
- 4) 利用 D-S 证据理论对单个个体对各监测点的评价信息进行合成。
- 5) 计算个体在其群体内的冲突度和权重。
- 6) 综合考虑用户和专家这 2 类群体后，计算个体在整个群体(用户群体和专家群体)中的冲突度和权重。
- 7) 将赋权后的个体评价视为证据，利用 D-S 证据理论形成所有个体对各监测点的综合评价，并确定各监测点电能质量的优劣。

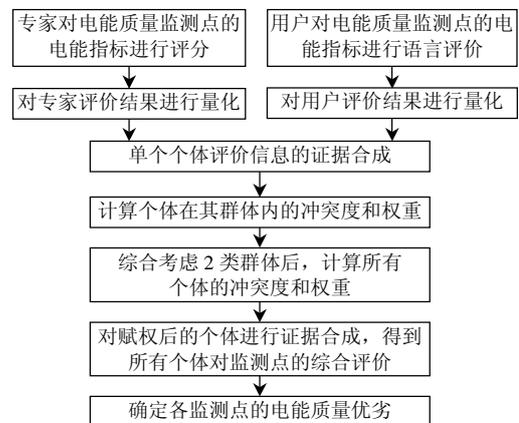


图 1 电能质量综合评估流程
Fig. 1 Flowchart of power quality evaluation

6 算例分析

为验证本文方法，以 4 位用户、4 位专家对某地区 A、B、C、D、E 这 5 个观测点的电能质量进行评估。该地区 5 个观测点电能质量实测数据见文献[9]。

表 2 为用户和专家对各电能指标的权重值。由表中数据可以看出，不同的用户对电能质量各指标的要求不同。专家对各指标权重的确定与用户有很大区别，尽管不同的专家对每项指标的权重值会有所不同，但在各指标的重要性上基本保持一致。

由用户的语言评价^[12]和表 3 的专家对各监测点各指标评分值可知，用户对各指标的优劣只能给

表 2 用户和专家对各电能指标的权重
Tab. 2 Weight of single quality index to customers and experts

人员	频率 偏差	电压 偏差	电压 波动	三相 不平衡	谐波 含量	电压 暂降	停电 时间
用户 1	0.066 7	0.066 7	0.066 7	0.066 7	0.066 7	0.066 7	0.600 0
用户 2	0.375 0	0.060 5	0.060 5	0.051 7	0.051 7	0.375 0	0.025 7
用户 3	0.040 9	0.260 3	0.260 3	0.041 4	0.044 0	0.273 2	0.079 7
用户 4	0.142 9	0.142 9	0.142 9	0.142 9	0.142 9	0.142 9	0.142 9
专家 1	0.374 8	0.208 2	0.122 5	0.122 5	0.068 0	0.056 7	0.047 3
专家 2	0.327 3	0.204 6	0.127 9	0.127 9	0.091 3	0.066 7	0.054 4
专家 3	0.367 1	0.216 0	0.135 0	0.112 5	0.070 3	0.057 3	0.041 8
专家 4	0.303 4	0.216 7	0.180 6	0.112 9	0.066 4	0.064 7	0.055 3

出一个定性判断，而专家却能给出一个定量评价。

基于表 2 用户和专家对各指标的权重和表 3 的评价信息，各监测点电能质量评估步骤如下：

1) 将用户和专家的评价信息进行量化处理，并将量化后的值作为焦元。利用式(5)计算各用户、专家对每个指标的焦元的 BPAF 值。以用户 1 和专家 1 为例，用户 1 对频率偏差的各个焦元的 BPAF 值分别为： $m_{e(1-1)}(A,B)=0.024$ ， $m_{e(1-1)}(C)=0.008$ ， $m_{e(1-1)}(E)=0.018 7$ ， $m_{e(1-1)}(\Theta)=0.949 3$ 。专家 1 对频率偏差的各焦元的 BPAF 值分别为： $m_{e(1-1)}(A)=0.077 5$ ， $m_{e(1-1)}(B)=0.074 8$ ， $m_{e(1-1)}(C)=0.072 9$ ， $m_{e(1-1)}(D)=0.073 9$ ， $m_{e(1-1)}(E)=0.075 7$ ， $m_{e(1-1)}(\Theta)=0.625 2$ 。同理，可得所有用户、专家对 7 个电能指标各个焦元的 BPAF 值。

2) 运用式(2)和式(3)的 D-S 合成法则对用户、专家 7 个指标下的各焦元进行合成。其中，对专家 1 合成后的数值为： $m_{e1}(A)=0.122 6$ ， $m_{e1}(B)=0.109 4$ ， $m_{e1}(C)=0.109 1$ ， $m_{e1}(D)=0.112 5$ ， $m_{e1}(E)=0.110 7$ ， $m_{e1}(C,E)=0.020 7$ ， $m_{e1}(A,D)=0.011 6$ ， $m_{e1}(A,E)=0.003 9$ ， $m_{e1}(B,D)=0.003 8$ ， $m_{e1}(\Theta)=0.395 7$ 。因篇幅限制，其他用户、专家合成后的数值不再罗列。

3) 将不同用户、专家的评价作为证据，计算用户、专家间的冲突度向量，确定各用户和专家在其群体内的权重向量分别为： $w_c=(0.134, 0.158 9,$

$0.207 1, 0.500)$ ； $w_e=(0.158 9, 0.134, 0.500, 0.207 1)$ 。

4) 综合考虑用户和专家这 2 类不同群体的评价，并取 $w_{c1}=0.5$ ， $w_{e1}=0.5$ ，根据 4.2 节中的式(7)计算个体的冲突度指数为 $I=(0.067 4, 0.062 5, 0.126 7, 0.264 4, 0.124 9, 0.101 1, 0.295 6, 0.146 6)$ ，依据式(9)计算出所有个体的权重为 $w_a=(0.146 4, 0.353 6, 0.083 5, 0.069 4, 0.094 7, 0.112 4, 0.064 6, 0.075 5)$ 。

图 2 为步骤 3) 和 4) 得到的权重值对比图。由图可知：用户 2 因与其他用户的冲突较大，在其群体内被赋予了较小的权重，而在综合考虑专家意见后，用户 2 在整个群体中被赋予了较大的权重值；同样，专家 3 在其群体内的权重较大，而在整个群体中反而变小。其他用户和专家也有类似的情况出现。由此可知，综合考虑用户和专家后，个体的权重在整个群体中得到重新分配。

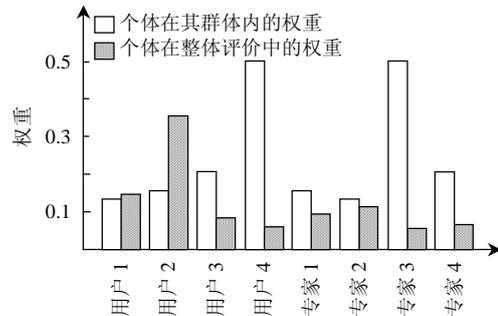


图 2 个体的权重对比

Fig. 2 Weight compared among each individual

5) 对所有个体的评价进行赋权得到个体对各监测点最终的评价值。将个体的最终评价值作为证据，再次利用式(2)进行证据合成，形成整个群体对各监测点的综合评价值，各监测点的总信任区间为： A 为 $[0.107 2, 0.556 8]$ ； B 为 $[0.088 6, 0.357 8]$ ； C 为 $[0.078 5, 0.432 3]$ ； D 为 $[0.132 1, 0.431 0]$ ； E 为 $[0.054 3, 0.425 6]$ 。再由式(15)得到各监测点的排序为

$$A > D > C > E > B$$

表 4 为 3 种方法的评估结果对比。由表 4 可知，本文的评估结果与文献[13]和文献[12]有所不同。由

表 3 专家对监测点电能质量的评价信息

Tab. 3 Evaluation information of different experts to the field data of power quality from observation points

参数	专家 1					专家 2					专家 3					专家 4				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
频率偏差	85	82	80	81	83	88	84	82	84	86	83	80	80	80	81	80	78	70	72	75
电压偏差	75	60	72	65	72	77	62	70	68	70	73	58	70	63	70	76	60	74	66	70
电压波动	75	65	61	75	68	77	64	62	76	66	72	63	60	72	66	76	64	60	76	69
三相不平衡	90	80	68	78	60	91	82	67	77	62	89	80	66	76	59	90	82	68	77	61
谐波含量	80	62	70	67	65	81	61	71	68	66	80	60	69	65	63	81	63	72	69	68
电压暂降	85	80	65	82	70	86	82	66	83	72	83	78	61	80	68	84	78	63	81	71
停电时间	92	90	95	90	92	92	91	94	90	93	91	90	92	90	91	85	80	89	80	85

于用户评价时比较关注停电时间、电压偏差指标,而专家评价时更注重各指标的整体平衡,因此侧重用户需求的文献[12]认为 $C > D$, 且 $E > B$, 而侧重系统分析的文献[13]认为 $C < D$, 且 $E < B$, 而本文方法的结果是 2 种情况的一个折衷结果, 即 $C < D$, 且 $E > B$, 这是因为本文既考虑用户需求、又考虑专家知识, 是一个综合评价结果, 因此更符合电能质量综合评估的实际要求。

表4 评估结果比较

Tab. 4 Comparison of the evaluation results

方法	优劣排序
本文方法	$A > D > C > E > B$
文献[12]方法	$A > C > D > E > B$
文献[13]方法	$A > D > C > B > E$

7 结论

1) 本文方法区别电力用户和电力专家 2 类群体对电能质量的评价方式和优劣判断的明显不同, 全面反映了参与电能质量评估各方的利益表达。

2) 本文方法在综合考虑用户和专家后, 个体的权重在整个群体中得到重新分配, 符合少数服从多数的权重分配原则。仿真实例表明, 该方法既考虑了用户的需求, 又兼顾了电网的要求, 符合电能质量综合评价的实际情况和要求。

参考文献

- [1] 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 Yonghai, Xiao Xiangning. Power quality problems in deregulated power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 48-52(in Chinese).
- [2] 贾清泉, 宋家骅, 兰华, 等. 电能质量及其模糊方法评估[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 46-49.
Jia Qingquan, Song Jiahua, Lan Hua, et al. Power quality and fuzzy method evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 46-49(in Chinese).
- [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.
Tan Jiamao, Huang Shaoxian. Research on synthetic evaluation method of power quality based on fuzzy theory[J]. Relay, 2006, 34(3): 55-59(in Chinese).
- [4] 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 Jianguang, et al. Application of attribute recognition and G1-entropy method in evaluation of power quality [J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 56-61(in Chinese).
- [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估[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 11-16.
Zhao Xia, Zhao Chengyong, Jia Xiufang, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 11-16(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 周林, 栗秋华, 刘华勇, 等. 用神经网络模型评估电能质量[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 66-69.
Zhou Lin, Li Qiu-hua, Liu Huayong, et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neural network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 66-69(in Chinese).
- [8] 栗秋华, 周林, 刘华勇, 等. 用加速遗传算法和 SP 模型评估电能质量[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 139-143.
Li Qiu-hua, Zhou Lin, Liu Huayong, et al. Evaluation of power quality by accelerating genetic algorithm and shepard interpolation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 139-143(in Chinese).
- [9] 周林, 栗秋华, 张风. 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(in Chinese).
- [10] 迟远英, 牛东晓, 李向阳, 等. 基于物元分析理论的供电服务质量评价方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 33-37.
Chi Yuanying, Niu Dongxiao, Li Xiangyang, et al. Research on evaluation of power supply service quality based on the matter-element analysis theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 33-37(in Chinese).
- [11] 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估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 56-60.
Li Lianjie, Yao Jianguang, 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(in Chinese).
- [12] 何禹清, 彭建春. 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. Comprehensive evaluation of power quality considering customer demands[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 48-52(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [14] Dempster A P. A generalization of Bayesian inference(with discussion)[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 1968, 30(2): 205-247.
- [15] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976: 27-83.
- [16] Yager R R. Quantifier guided aggregation using OWA operators[J]. International Journal of Intelligent Systems, 1996, 11(1): 49-73.
- [17] 李荣均. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 21-22.
- [18] 龚本刚, 华中生, 檀大水. 一种语言评价信息不完全的多属性群决策方法[J]. 中国管理科学, 2007, 15(1): 88-93.
Gong Bengang, Hua Zhongsheng, Tan Dashui. A method of multi-attribute group decision making with incomplete linguistic assessment information[J]. Chinese Journal of Management Science, 2007, 15(1): 88-93(in Chinese).



毛丽林

收稿日期: 2011-03-02。

作者简介:

毛丽林(1982), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量评估, E-mail: maolilin@126.com;

黎灿兵(1979), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力负荷预测、规划、电能质量评估、信息化与新能源;

何禹清(1982), 男, 博士, 主要研究方向为配电网优化运行与控制、电能质量评估。

(责任编辑 褚晓杰)