

基于可拓学的电能质量综合评价

丁立, 贾秀芳, 赵成勇, 李庚银

(华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 将可拓学与层次分析法相结合, 提出了电能质量评估的新方法。用可拓学中的物元理论对电能质量进行物元分析, 建立 3 种物元模型, 然后结合可拓学中的相关函数理论, 将 3 种物元模型的关系进行量化, 形成关联值矩阵; 用层次分析法(AHP)得到电能质量各指标的权重; 最后结合关联值矩阵和指标权重能够得到最终的电能质量综合评价等级。用基于可拓学的综合评价方法对公共连接点(PCC)的电能质量进行了综合评价, 实际算例表明这种方法能够有效地区分电能质量等级, 并对电能质量进行定性和定量评价。

关键词: 电能质量; 综合评价; 物元; 关联函数; 层次分析法

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)12-0044-04

0 引言

随着电力行业的发展, 建立规范的电力市场是当前电力改革的主要任务之一。在电力市场环境下, 电能是一种商品, 具有质量属性。在市场竞争中, 供电部门和电力用户都将更加关注电能的质量优劣, 因此对电能质量进行科学的评估并按质定价将成为一种趋势^[1-2]。目前, 尽管世界各国对电能质量制定了一系列标准, 但这些标准只能用来确定电能的单项指标合格与不合格, 却不能确定质量的好坏。由于电能质量是一个多指标体系, 因此两级化的质量标准以及单项指标的评价方法不能全面、真实、自然地反映电能质量的性质。为了对电能质量进行客观、综合的评价, 有必要建立一种更有效的评价方法。

目前的评价方法多数基于模糊评价方法。文献[3]给出了各电能质量指标的模糊模型, 形成隶属度集, 根据择近原则来判断电能质量等级。文献[4-5]采用模糊综合评价方法进行评价, 但未给出权重的确定方法。文献[6]采用层次分析法 AHP(Analysis of Hierarchy Process)及模糊方法进行综合评估, 文献[7]用层次分析法得到主观权重, 然后将主观权重修正形成可变的综合权重, 结合模糊方法进行综合评价。

模糊评价方法的核心就是如何将待评价量与评价区间的关系用模糊的方法进行量化, 但如果待评价量与数个评价区间隶属度相近, 则归属区间难以确定。基于这种情况, 文献[8-12]提出了一种基于可拓学的量化方法, 能够更清晰地确定待评价量的归属区间。文献[13]比较了模糊评价和可拓学评价的不同并指出了可拓评价的优点。

现采用可拓学分析方法中物元和关联函数的概念, 将待评价量与评价区间的关系量化形成关联值矩阵, 并针对不同用户对电能质量不同指标的敏感程

度不同, 采用 AHP 确定指标权重, 提出了基于可拓学的电能质量综合评价方法。实例验证这种方法能够有效的在用户对指标敏感程度不同的情况下, 进行电能质量的综合评价。

1 电能质量的可拓分析

电能质量是一个多指标体系, 对其进行综合评价, 首先要对其中的单个指标进行评价。如何量化测量值与评价区间的关系, 是单个指标评价的基础。可拓学中的物元理论和关联函数可以解决这个问题。

1.1 电能质量物元模型

首先, 建立电能质量的物元模型。以给定事物的名称 N 、特征 c 和关于特征的量值 v 组成有序三元组作为描述事物

$$R = (N, c, v) \quad (1)$$

的基本元, 简称物元。其中, v 由 N 和 c 确定, 记作

$$v = c(N) \quad (2)$$

一个事物有多个特征, 如果事物 N 以 n 个特征 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 和相应的量值 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 描述, 则表示为

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & c_1(N) \\ & c_2 & c_2(N) \\ & \dots & \dots \\ & c_n & c_n(N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

如果对电能质量的 5 个指标: 电压偏差、三相不平衡、闪变、频率偏差、谐波分为优、良、中、合格、差 5 个等级进行综合评价, 将用到物元的 3 种表示形式: 经典域物元、节域物元和待评估物元。

1.1.1 经典域物元

所谓电能质量的经典域, 是指各个电能质量等级关于对应特征所取的数据范围, 表示为

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & \langle a_1, b_1 \rangle \\ & c_2 & \langle a_2, b_2 \rangle \\ & c_3 & \langle a_3, b_3 \rangle \\ & c_4 & \langle a_4, b_4 \rangle \\ & c_5 & \langle a_5, b_5 \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 N_j 为第 j 等级的电能质量; c_1 为电压偏差; c_2 为三相不平衡; c_3 为闪变; c_4 为谐波; c_5 为频率偏差; $\langle a_1, b_1 \rangle$ 表示在第 j 等级的电能质量下, c_1 的取值范围。

1.1.2 节域物元

所谓节域,是指电能质量等级的全体关于某特征所取的量值范围,表示形式为

$$R_p = \begin{bmatrix} N & c_1 & \langle c_1, d_1 \rangle \\ & c_2 & \langle c_2, d_2 \rangle \\ & c_3 & \langle c_3, d_3 \rangle \\ & c_4 & \langle c_4, d_4 \rangle \\ & c_5 & \langle c_5, d_5 \rangle \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 N 表示评价电能质量等级的全体; $\langle c_1, d_1 \rangle$ 表示 c_1 的所有评价等级的总的范围。

1.1.3 待评估物元

将一组待评估的电能质量的数据用物元形式表示,具体形式为

$$R = \begin{bmatrix} N_0 & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & c_3 & x_3 \\ & c_4 & x_4 \\ & c_5 & x_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 N_0 代表待评估的一组电能质量数据; x_1 为实测的 c_1 值。

1.2 关联值计算

在确定了电能质量评估的经典域物元、节域物元和待评估物元后,可以用可拓学中的关联函数将待评估物元与经典域物元、节域物元的关系进行量化。

关联函数把物元中的元素映射到实轴上,表述实轴上的一个点 x 与 2 个区间: $X_0 = \langle a, b \rangle$, $X = \langle c, d \rangle$ 且 $X_0 \subset X$ 的量化关系。当关联函数大于 0,表示该元素具有此性质;当关联函数小于 0,表示该元素不具有该性质;当关联函数等于 0,表示该元素既具有该性质,又不具有该性质,为临界元素。通过关联函数,可以定量地描述任意元素与该区间套关联的程度,而且对同一范围内的元素,也可以通过关联函数的大小区分出不同的层次。

在条件 $X_0 = \langle a, b \rangle$ 和 $X = \langle c, d \rangle$, 且 $X_0 \subset X$ 下,最优取值 x_0 不是 $X_0 = \langle a, b \rangle$ 区间中点时,关联函数为^[6-8]

$$k(x) = \begin{cases} \frac{\rho(x, x_0, X_0)}{\rho(x, X) - \rho(x, X_0)} & \rho(x, X) - \rho(x, X_0) \neq 0 \\ -\rho(x, x_0, X_0) - 1 & \rho(x, X) - \rho(x, X_0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (8)$$

$$\rho(x, X) = \left| x - \frac{c+d}{2} \right| - \frac{d-c}{2} \quad (9)$$

而 $\rho(x, x_0, X_0)$ 则分为左侧距和右侧距,具体的选择由最优取值 x_0 在 $X_0 = \langle a, b \rangle$ 区间内的位置决定。所谓最优取值 x_0 ,指 $x = x_0$ 时,取得最佳效果。例如,工程预算为 5~10 万元,则最优预算为 5 万元。洗澡水合适温度为 40~45 ℃,人体感觉最佳温度为 44 ℃。电能质量评估中的最优取值 $x_0 = a$,应采用左侧距公式。在电能质量评估中适用的左侧距公式简化形式为

$$\rho(x, x_0, X_0) = \begin{cases} a-x & x \leq a \\ x-b & x > a \end{cases} \quad (10)$$

如果将电能质量 n 指标分为 m 个等级,在应用可拓学的物元理论和关联函数进行计算后,将形成一个 $n \times m$ 阶的关联值矩阵 K ,它表示待评估值与各指标、各质量等级的关联程度。

$$K = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & \cdots & k_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, C_i 为第 i 项指标的单因素评价。

2 指标权重的确定

在得到关联函数矩阵 K 后,如果想要得到最终的评价结果,需要确定各评价指标的权重。

确定权重的方法很多^[14-15],这里采用 AHP 方法确定各指标的权重。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。具体做法是根据问题的性质和要达到的总目标,将问题分解为不同的组成因素,并按照因素间的相互关联影响及隶属关系,将因素按不同层次聚集组合,形成一个多层次的分析结构模型,最终把系统分析归结为确定底层相对于顶层的相对权值。根据权值大小对问题进行排序。电能质量评估的层次模型如图 1 所示。

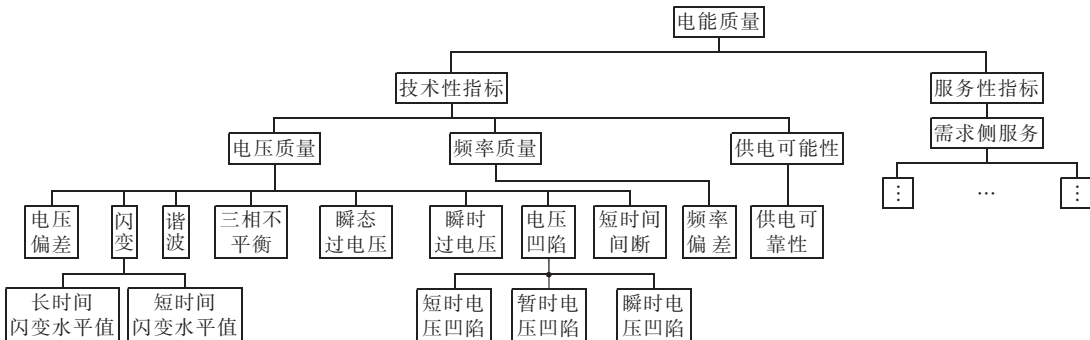


图 1 电能质量评估层次模型

Fig.1 Power quality hierarchy model for evaluation

在确定的递阶层次结构中,每一个元素和该元素支配的下一层元素构成一子区域,对于子区域内的各元素采用专家咨询法来构建若干个判断矩阵。判断矩阵表示针对上一层某元素,本层次有关元素之间相对重要性的状况,通常用 1、2、…、9 及它们的倒数来表示相对重要性,如果因素 i 与 j 比较得判断 b_{ij} ,则因素 j 与因素 i 比较得半段 $b_{ji}=1/b_{ij}$,其含义如表 1 所示。

表 1 判断矩阵形成准则

Tab.1 Rules of judgment matrix

标度	含义
1	2 个因素相比,具有同等重要性
3	2 个因素相比,一个比另一个稍微重要
5	2 个因素相比,一个比另一个明显重要
7	2 个因素相比,一个比另一个强烈重要
9	2 个因素相比,一个比另一个极端重要

注:2、4、6、8 为上述两相邻判断的中值,表中未列。

假设由 AHP 法计算得到的权重矢量为 W , $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$, 与公式 (11) 得到的关联值矩阵 K 相结合,可得评价结果为

$$P=W \cdot K \quad (12)$$

P 为电能质量可拓综合评价结果矢量,它表明了该评价点电能质量对各质量等级的关联程度。由该矢量中的最大值可以确定最终的评价结果。

3 可拓综合评价方法的应用

现仅考虑稳态电能指标 $c_1 \sim c_5$, 并将其质量等级确定为 k_1 为优, k_2 为良, k_3 为中, k_4 为合格, k_5 为差。下面用某一配电网公共连接点 PCC (Point of Common Coupling) 点的监测数据为例说明所提出的评价方法。指标的数据取监测时段的 95% 概率大值,见表 2。

表 2 各分项指标质量等级分级标准及实测值

Tab.2 Level criteria of different quality indexes and measured values

分项指标	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	实测
c_1	2 %	3.5 %	5 %	7 %	10 %	3.52 %
c_2	0.5 %	1 %	1.5 %	2 %	4 %	1.74 %
c_3	0.7	0.8	0.9	1	1.3	0.781
c_4	1 %	2 %	3.5 %	5 %	6 %	4.75 %
c_5	0.05	0.1	0.15	0.2	0.5	0.122

具体评价有 4 个步骤。

3.1 确定物元模型

事物的名称 N 、特征 c 和关于特征的量值 v 组成有序三元组,称为物元。

经典域物元 R_j , 表示 j 等级的电能质量物元,例如

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 0.5 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 0.7 \rangle \\ & c_4 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_5 & \langle 0, 0.05 \rangle \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & \langle 1, 3 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.5, 1 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.7, 0.8 \rangle \\ & c_4 & \langle 1, 2 \rangle \\ & c_5 & \langle 0.05, 0.1 \rangle \end{bmatrix}$$

其中的符号和具体数值表示的意义举例说明如下:

R_1 表示电能质量为优的评价区间的物元形式;

R_2 表示电能质量为良的评价区间的物元形式; N_1 表示该事物的名称为“电能质量为‘优’的评价区间”; c_1 表示事物的第一个特征为“电压偏差”; $\langle 0, 1 \rangle$ 表示事物 N_1 关于 c_1 这个特征的取值范围在 0 到 1 的区间内。

R_3, R_4, R_5 分别表示电能质量为中、合格、差的物元形式。具体值可以类比 R_1 和 R_2 得到。

节域物元 R_p, N 表示物元名称为“电能质量的总体评价范围”; c_1 表示特征“电压偏差”; $\langle 0, 10 \rangle$ 表示电压偏差的总体评价范围在 0 到 10 这个区间内。

$$R_p = \begin{bmatrix} N & c_1 & \langle 0, 10 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 4 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 1.3 \rangle \\ & c_4 & \langle 0, 6 \rangle \\ & c_5 & \langle 0, 0.5 \rangle \end{bmatrix}$$

待评估物元 R , 表示待评估的数据构成的物元:

$$R = \begin{bmatrix} N_0 & c_1 & 3.52 \\ & c_2 & 1.74 \\ & c_3 & 0.781 \\ & c_4 & 4.75 \\ & c_5 & 0.122 \end{bmatrix}$$

其中, N_0 表示物元名称为“待评价的实测值”; c_1 表示特征“电压偏差”; 3.52 表示电压偏差的实测值。

3.2 关联值的计算

将经典域物元、节域物元和评估物元代入公式 (7), 进行关联值的计算。

下面以实测“电压偏差”在“优”的经典域下的关联值为例,说明计算过程。

$$X_0 = \langle a, b \rangle = \langle 0, 2 \rangle, X = \langle c, d \rangle = \langle 0, 10 \rangle, x = 3.52 > a$$

$$\rho(x, x_0, X_0) = x - b = 3.52 - 1 = 2.52$$

$$\rho(x, X) = \left| x - \frac{c+d}{2} \right| - \frac{d-c}{2} = -3.52$$

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} = 1.52$$

$$k(x) = \frac{\rho(x, x_0, X_0)}{\rho(x, X) - \rho(x, X_0)} = -0.3015 \quad (8)$$

同理,可以得到其他关联值,形成关联值矩阵:

$$K = \begin{bmatrix} -0.3015 & -0.0056 & 0.4229 & -0.296 & -0.4971 \\ -0.4161 & -0.2983 & -0.1212 & 0.1733 & -0.13 \\ -0.135 & 0.038 & -0.0353 & -0.1865 & -0.2967 \\ -0.75 & -0.6875 & -0.5 & 0.25 & -0.1666 \\ -0.3711 & -0.1527 & 0.28 & -0.1866 & -0.39 \end{bmatrix}$$

关联值为负,表示评定结果不在该区间内,其值的大小表示偏离该区间的程度。关联值为正,表示评定结果位于该区间内,其大小表示与最优取值的接近程度,值越大表示越接近。

3.3 确定目标权重

所评价的 5 个指标,可以构成一个 2 层次的分级结构模型,具体模型如图 2 所示。

这个结构中包括 2 个一级指标,即电压质量和频率质量,电压质量又由 4 个二级指标构成。

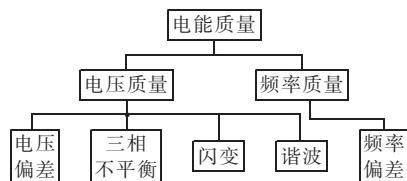


图 2 基于 AHP 的指标分层结构图

Fig.2 Power quality hierarchy model of AHP evaluation

经专家评价打分,各级指标的判断矩阵为

A 层对 B 层的判断矩阵:

$$R_{A-B} = \begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

这表明电压质量比频率质量明显重要。

B 层电压质量对 C 层电压质量各项的判断矩阵:

$$R_{B-C} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/3 & 1/5 \\ 1/3 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ 3 & 5 & 1 & 1/3 \\ 5 & 7 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

经过层次单排序、层次总排序以及一致性检验^[5]后,得权重矢量为

$$W = [0.098 \quad 0.046 \quad 0.220 \quad 0.470 \quad 0.167]$$

该矢量中的因子分别表示这一类电力用户对电压偏差、三相不平衡、闪变、谐波和频率偏差的敏感程度。由因子的大小可以看出该类用户对谐波最为敏感。

3.4 质量等级的评定

在得到关联值矩阵 K 和目标权重 W 后,想要得到最终的评定结果,需要用式(12)进行最终的综合评价计算。将 K 和 W 代入式(12)计算后得:

$$P = [-0.4929 \quad -0.3545 \quad -0.1601 \quad 0.0243 \quad -0.2634]$$

该矢量中的因子代表了综合评价结果对各个质量等级的关联程度。取其中的最大值 0.0243 所隶属的质量等级为最终评定等级。可以得到最终综合评定结果为“合格”。

4 结论

采用可拓学和 AHP 相结合的评价方法,不但将评价区间从原来模糊评价方法的 $[0, 1]$ 扩展到 $[-\infty, +\infty]$, 而且不存在模糊评价中如果隶属度近似、难于取舍的问题,量化的结果能够更清晰地区分评价结果的区间归属。

由于采用 AHP 计算权值,因此电力用户在对不同电能指标的敏感程度不同的时候,将采用不同的权值。因此在电力市场环境,同一检测点的电能质量,电能质量综合评价的等级对不同的用户可能是不同的,评价结果有助于实现电能质量按质定价及供用电双方制定合同。

参考文献:

- [1] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一)——电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):1-4.

YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong, LIU Jun-yong. Issues and technology assessment on power quality. Part1: general concepts on power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10):1-4.

- [2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(七)——电力市场环境下的电能质量问题[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4):1-4.
- YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong, LIU Jun-yong. Issues and technology assessment on power quality. Part 7: power quality issues on power market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4):1-4.
- [3] 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. Power quality and fuzzy method evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6):46-49.
- [4] CAI L, CHEN Hong-kun. Fuzzy studies on power quality. Part I: index and evaluation[C]//10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.], 2002: 414-418.
- [5] 唐会智,彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术,2003,27(12):85-88.
- TANG Hui-zhi, PENG Jian-chun. Research on synthetic and quantificated appraisal index of power quality based on fuzzy theory[J]. Power system Technology, 2003, 27(12):85-88.
- [6] FARGHAL S A, KANDIL M S, ELMITWALLY A. Quantifying electric power quality via fuzzy modeling and analytic hierarchy processing[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1):44-49.
- [7] 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):11-16.
- 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(9):11-16.
- [8] 蔡文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索学报,1983(1):83-97.
- CAI Wen. The extension set and non-compatible problems[J]. Scientific Inquiry, 1983(1):83-97.
- [9] 蔡文. 物元分析[M]. 广州:广东高等教育出版社,1987.
- [10] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.
- [11] 蔡文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [12] CAI Wen. Extension management engineering and applications[J]. International Journal of Operations and Quantitative Management, 1999, 5(1):59-72.
- [13] HUANG Yo-ping, CHEN Hung-jin. The designing methodology of extenics-based fuzzy reasoning model[C]//IEEE SMC'99 Conference Proceedings. Tokyo, Japan: IEEE, 1999:331-336.
- [14] 胡永宏,贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [15] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2003.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

丁 立(1982-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:ncepuidl@126.com);

贾秀芳(1966-),女,辽宁庄河人,副教授,主要研究方向为电能质量分析与控制、电磁测量研究;

赵成勇(1964-),男,浙江丽水人,教授,博士,从事电能质量分析与控制、HVDC 和 FACTS 方面的研究工作(E-mail:chengyongzhao@ncepu.edu.cn);

李庚银(1964-),男,河北保定人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力市场、电能质量、新型输配电技术。

(下转第 52 页 continued on page 52)

Synthetic evaluation of power quality based on extenics

DING Li, JIA Xiu-fang, ZHAO Cheng-yong, LI Geng-yin

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security

Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric

Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: A power quality evaluation method combining extenics and AHP (Analytic Hierarchy Process) is presented. Three matter-element models are set based on power quality analysis using matter-element theory of extenics, and quantified to form relationship matrix using relation-function theory of extenics. The target weights are figured out using AHP. The final quantitative grade of the power quality is calculated based on relation-matrix and target weights. The power quality level of synthetic evaluation is obtained by combining the relationship matrix and the target weights. As an example, the power quality of PCC (the Point of Common Coupling) is evaluated, which shows that the proposed method can evaluate power quality quantitatively and qualitatively and distinguishes different power quality levels effectively.

This project is supported by the program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT0515) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20040079002).

Key words: power quality; synthetic evaluation; matter-element; relation-function; analytic hierarchy process