

粗糙集与证据理论结合的电网运行优质性综合评价

蒋亚坤¹, 李文云², 赵莹¹, 于峰³

(1. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650041; 2. 云南电网公司科技部, 云南 昆明 650011;
3. 易能(中国)电力科技有限公司, 北京 100093)

摘要: 电力系统运行的核心目标之一是提供优质电能, 电力系统运行的优质性指标主要通过电能质量好坏来体现。为了能够客观、有效地评价电网运行优质性水平, 提出一种粗糙集与证据理论结合的电网运行优质性综合评价方法。应用粗糙集理论建立决策强度和决策扩充规则, 利用决策表获取证据理论的基本概率赋值, 使概率赋值结果更具有客观性。再应用证据理论的融合规则将电压偏差、电压波动、三相不平衡、谐波畸变等优质性指标进行融合, 得到各观测点电能质量的优劣状况, 实现电网优质性综合评价。算例表明, 该方法得到的优质性综合评价结果更客观合理, 证明了方法的正确性和优越性。

关键词: 电网运行优质性; 证据理论; 粗糙集; 基本概率赋值; 综合评价

Evaluation of power quality performance based on rough set and evidence theory

JIANG Yakun¹, LI Wenyun², ZHAO Ying¹, YU Feng³

(1. Yunnan Electric Power Dispatching Control Center, Kunming 650041, China; 2. The Ministry of Science and Technology of Yunnan Power Grid Co., Kunming 650011, China; 3. YINENG (CHINA) Power Technology Co., Ltd., Beijing 100093, China)

Abstract: One of the core objectives of power system operation is to provide high-quality energy, the quality indicators of power system operation are mainly reflected by power quality. In order to assess the power quality objectively and effectively, a comprehensive evaluation method of high-quality network operation based on rough set and evidence theory is proposed. The method applies rough set theory to define the decision-making strength and expansion rules and uses the decision-making table to obtain the basic probability assignment of evidence theory, which make the result of probability assignment more objective. And then by applying the fusion rules of evidence theory to integrate the various indicators of power quality, the pros and cons of ordering from each power quality evaluations can be obtained to achieve a comprehensive evaluation of power quality. The examples show that the results of power quality evaluation are more objective and rational by using this method. So it can prove the correctness and superiority of this method.

Key words: quality of grid operation; evidence theory; rough sets; basic probability assignment; comprehensive evaluation

中图分类号: TM92 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0001-07

0 引言

电力市场环境下电能作为一种商品具有质量属性, 电力系统运行的核心目标之一是提供优质电能, 电力系统运行的优质性指标主要通过电能质量好坏来体现^[1-3]。尽管 IEC 出台了一系列电能质量标准, 但这些标准都是针对单项电能质量指标进行规定。电能质量等级综合评定目前没有统一的标准和评定方法, 因此该问题尚处于研究阶段^[4-7]。电能质量综

合评价主要有遗传投影寻踪法^[8]、概率统计与矢量代数综合评价方法^[9]、可变权重的模糊综合评价方法^[10]、模糊数学法^[11]、层次分析法与模糊评价结合的方法^[12]。文献[13]利用 D-S 证据理论融合技术进行电能质量综合评估。文献[14]提出一种基于粗糙集的电能质量综合评价方法。电能质量综合评估过程中指标相对权重难以确定, 评估模型受到人为因素的影响, 使评定结果存在主观性和不确定性^[15-18]。如何从电能质量自身运行规律出发, 获取更加客观

的评定依据,是需要深入研究的问题。

本文应用证据理论与粗糙集理论相结合建立了一种电网优质性综合评价方法。从电能质量数据出发,应用决策表来获取证据理论的基本概率值,有效降低基本概率赋值获取过程中的主观随意性。理论分析和仿真及现场应用验证了方法的合理性和评价结果的客观性。

1 基于决策表的BPA获取方法

1.1 D-S 证据理论基本概念

证据理论的基本思想是将证据集合划分成多个不相关的部分,然后利用证据理论特有的合成公式,用一个抽象证据来聚焦多个具体证据的共同支持点,并通过决策规则来进行判定^[13]。

设变量 X 所有可能互斥元素的集合为 U , 称 U 为 X 的识别框架。 U 的幂集称为概念集合,用 Θ 表示。当 U 中有 n 个元素,概念集合 Θ 表示的空间为 2^n 。对于 $\forall A \subset \Theta$, 如果集函数 $m: 2^U \rightarrow [0,1]$, 满足:

- (1) $m(\phi) = 0$;
- (2) $\sum_{A \subset U} m(A) = 1$

则 m 为 U 上的基本概率分配函数(Basic Probability Assignment, BPA)。基本概率分配函数对识别框架中命题 A 的支持程度用 $m(A)$ 表示。若 $A \subset U$, 且 $m(A) > 0$, 则称 A 为焦元。 $\forall A \subset \Theta, m(A)$, 则 $m(A)$ 称为 A 的基本概率赋值。

得到基本概率赋值后,利用证据理论特有的融合公式,可将两个证据融合。

设同一识别框架 U 上,同时 m_1 和 m_2 是其 U 上的两个基本概率赋值,焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_K 和 B_1, B_2, \dots, B_r , 又设 $K_1 = \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j) < 1$,

两个证据融合后的基本概率赋值为

$$m(C) = \begin{cases} \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - K_1} & \forall C \subset U, C \neq \phi \\ 0 & \forall C \neq \phi \end{cases} \quad (1)$$

记为 $m(C) = m_1(A) \oplus m_2(B)$ 。

1.2 粗糙集基本概念

$S = (U, A, V, f)$ 为一个知识表达系统,其中 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为对象的非空有限集合; A 为条件属性集合; $V = \bigcup_{a \in A} V_a$, V_a 是属性 A 的值域; $f:$

$U \times A \rightarrow V$, 是一个信息函数,它为每个对象的各属性赋予一个信息值。当 $A = C \cup D$, $C \cup D \neq \emptyset$, 则 C 为条件属性集,用来表示样本的特征参数; D 为决策属性集,用来表示样本的类别归属。

对于每个属性子集 P , 若 $P \subseteq A$, 定义一个二元不可分辨关系:

$ind(P): ind(P) = \{(x, y) \in U \times U \mid \forall a \in P, f(x, a) = f(y, a)\}$
 $ind(P)$ 是论域 U 上的等价关系,关系 $ind(P)$ 构成 U 的一个划分,用 $U / ind(P)$ 表示,其中的任一元素称为等价类。

对于 $X \subseteq U$, R 为 U 上的一个等价关系,
 $R(X) = \{x \in U \mid [x]_R \subseteq X\}$ 为 X 的 R 下近似集,
 $\bar{R}(X) = \{x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \emptyset\}$ 为 X 的 R 上近似集^[7]。

1.3 规则强度与决策扩充规则

利用粗糙集的分类思想和隶属度概念,通过定义规则强度和决策扩充规则,得到 D-S 证据理论中基本概率赋值,从而解决传统证据理论中基本可信度分配困难和由于专家经验判断所带来的主观不确定问题。

规则定义为一个蕴含式 $\alpha \rightarrow \beta$, α 称为规则的前件, β 称为规则的后件, α 和 β 形成决策表的一行。决策规则可表示为 $f(x, C) \rightarrow f(x, D)$, 其中 $x \in U$, C 为条件属性, D 为决策属性。 $f(x, C)$ 和 $f(x, D)$ 分别表示对 x 的所有条件属性值和决策属性值的描述。

决策表 $S = (U, C, D, V, f)$, $x \in U$, x 关于 C 的不可区分关系 $ind(C)$ 的上近似为 $\bar{C}x$, 关于 D 的上近似为 $\bar{D}x$, 则规则 $f(x, C) \rightarrow f(x, D)$ 的规则强度为 $\mu = |\bar{C}x \cap \bar{D}x| / |\bar{C}x|$, 满足 $0 \leq \mu \leq 1$ 。

多属性规则 $f(x, E) \rightarrow f(x, D)$ 的规则强度为

$$\mu = |\bar{E}x \cap \bar{D}x| / |\bar{E}x| = |[x]_E \cap [x]_D| / |[x]_E| \quad (2)$$

其中, $E \subset C$, 这里的 E 为所包含等价关系的不可区分关系 $ind(E)$ 。

决策表 $S = (U, C, D, V, f)$, $R \in C$, $x, y \in U$, 存在规则 $f(x, R) \rightarrow f(x, D)$ 和 $f(y, R) \rightarrow f(y, D)$, 如果 $f(x, R) = f(y, R)$, 且 $f(x, D) \neq f(y, D)$, 则决策扩充规则为: $f(x, R) \rightarrow \{f(x, D), f(y, D)\}$ 。

决策扩充规则 $f(x, R) \rightarrow \{f(x, D), f(y, D)\}$ 的规则强度为

$$\mu = \frac{|\bar{R}x \cap \bar{D}x|}{|\bar{R}x|} \cdot \frac{|\bar{R}y \cap \bar{D}y|}{|\bar{R}y|} = \frac{|[x]_R \cap [x]_D|}{|[x]_R|} \cdot \frac{|[y]_R \cap [y]_D|}{|[y]_R|} \quad (3)$$

1.4 BPA 的获取

对于一个条件属性 $R \in C$, $U / R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$, $U / D = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$, 设 $P = \{R, D\}$, R

与 D 的不可区分关系为 $ind(P)$, $ind(P)$ 对 U 的划分为 $U/ind(P) = U/P = \{P_1, P_2, \dots, P_i\}$ 。

假设 $B_j = \{P_i / \bigcup_{P \in R_j} P = R_j, R_j \in U/R\}$, 即 B_j 表示等价类 R_j 的 D 划分。如果 $|B_j| = n$, 则因为 D 的值域 $V_D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, 所以 $n \leq m$ 。对于 B_j 中的任一元素 P_j , 基本概率赋值的计算方法分析如下:

设 θ 为一辨识框架, A 为 θ 上的一个命题, 也即 $A \subseteq \theta$, $A \subseteq 2^\theta$, 决策表 $S = (U, C, D, V, f)$, $R \in C$, 决策属性的值域 $V_D = \theta$, $P = \{R, D\}$, $R_j \in U/R$, $P_j \in U/P$, $B_j = \{P_i / \bigcup_{P \in R_j} P = R_j, R_j \in U/R\}$, $|B_j| = n$, 则命题 A 的基本概率赋值为

$$m(A) = \frac{\mu_A}{1 + \prod_{i=1}^n \mu_i} \quad (4)$$

需证明式(4)满足证据理论基本概率赋值定义的 3 条公理, 即(1) $m(A) \geq 0$; (2) $m(\phi) = 0$; (3)

$$\sum_{A \subseteq U} m(A) = 1。$$

$$1) \text{ 因为 } 0 \leq \mu \leq 1, \text{ 所以 } m(A) = \frac{\mu_A}{1 + \prod_{i=1}^n \mu_i} \geq 0。$$

$$2) \text{ 当 } A = \phi \text{ 时, } \mu_A = 0, \text{ 所以 } m(\phi) = \frac{\mu_\phi}{1 + \prod_{i=1}^n \mu_i} = 0。$$

$$3) B_j = \{P_i / \bigcup_{P \in R_j} P = R_j, R_j \in U/R\}, |B_j| = n。$$

由于 B_j 为等价类 R_j 的 D 划分, P_j 中所有对象具有相等 V_D , 取 P_j 中任一对象 x_1 , 根据式(2)计算 x_1 的规则强度

$$\mu_{x_1} = \left| \frac{\bar{R}x_1 \cap \bar{D}x_1}{\bar{R}x_1} \right| = \left| \frac{[x_1]_R \cap [x_1]_D}{[x_1]_R} \right|$$

取 P_2, P_3, \dots, P_n 中任一对象, 记为 x_2, x_3, \dots, x_n 。因为 $[x_1]_R \cap [x_1]_D \cup [x_2]_R \cap [x_2]_D \cup \dots \cup [x_n]_R \cap [x_n]_D = [x_1]_R$,

所以 $\sum_{i=1}^n \mu_{x_i} = 1$, 再考虑决策扩充规则

$f(x_1, R) \rightarrow \{f(x_1, D), f(x_2, D), \dots, f(x_n, D)\}$, 它的规则强度为

$$\mu = \frac{|\bar{R}x_1 \cap \bar{D}x_1| \cdot |\bar{R}x_2 \cap \bar{D}x_2| \cdot \dots \cdot |\bar{R}x_n \cap \bar{D}x_n|}{|\bar{R}x_1| \cdot |\bar{R}x_2| \cdot \dots \cdot |\bar{R}x_n|} = \prod_{i=1}^n \mu_{x_i}$$

因此, 根据式(4)取 x_2, x_3, \dots, x_n 及扩充规则的基本概率赋值, 满足

$$\sum_{A \subseteq \theta} m(A) = (1 + \prod_{i=1}^n \mu_i)^{-1} \cdot (\prod_{i=1}^n \mu_{x_i} + \prod_{i=1}^n \mu_i) = 1$$

2 粗糙集和证据理论相结合的电能质量综合评价

2.1 电能质量评价指标与评价流程

大多数综合评价方法主要是参考电能质量国家标准来定义评估指标的, 主要包括电压质量、频率质量和供电可靠性三方面。本文着重考察电压质量, 包括电压偏差、电压波动与闪变、电压波形畸变、三相电压不平衡等方面。这些指标的层次结构如图 1 所示。

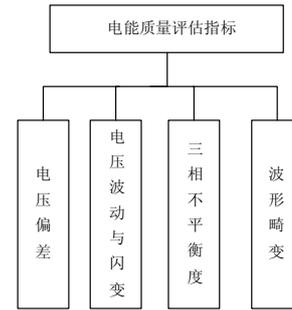


图 1 电能质量评价指标体系

Fig. 1 Power quality evaluation index system

本文建立的证据理论结合粗糙集的电能质量综合评价方法步骤如下。

(1) 建立样本集决策表, 划分条件属性和决策属性并进行属性离散化处理。

(2) 结合决策表利用规则强度和决策扩充规则并求取各项电能质量指标的规则强度。

(3) 利用式(4)确定各电能质量指标的基本概率赋值。

(4) 利用 D-S 证据理论的融合规则, 将电能质量各指标基本概率赋值相互融合, 得到合成证据。

(5) 依据电能质量综合等级界限得出电能质量等级评定。

算法流程如图 2 所示。

2.2 属性值离散化

按等距离原则进行属性的离散化^[7]。属性离散化的步骤如下。

(1) 计算属性区间长度

$$\bar{g}_i = (g_{i\max} - g_{i\min}) / n_i \quad (5)$$

式中: $g_{i\max}$ 、 $g_{i\min}$ 为属性 i 的上限值和下限值; n_i 为离散化区间的级数; \bar{g} 为属性 i 离散化的区间间隔。

(2) 确定各属性离散区间的范围。属性 i 的区间范围为

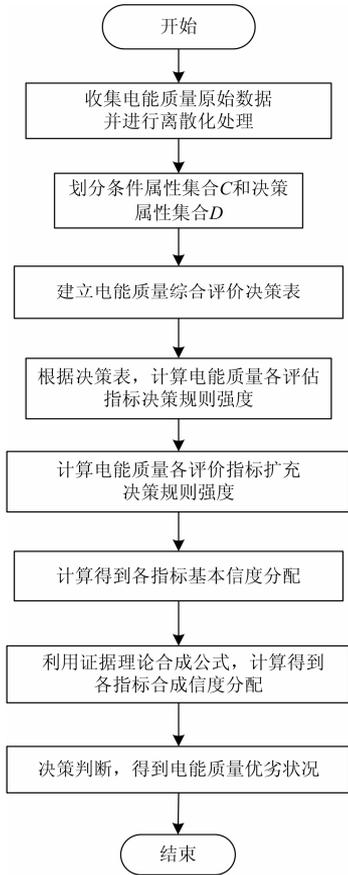


图 2 粗糙集和证据理论相结合的算法流程

Fig. 2 Theory process of rough set and evidence theory

$$[g_{i\min}, g_{i\min} + \bar{g}_i], [g_{i\min} + \bar{g}_i, g_{i\min} + 2\bar{g}_i], \dots, [g_{i\min} + (n_i - 1)\bar{g}_i, g_{i\max}] \quad (6)$$

(3) 确定属性的量化码。设属性区间个数为 n_i , 属性值如果位于第 i 个区间, 为了简便起见, 将其量化编码直接设定为 i 。

2.3 决策表的建立

将电能质量各评价指标设定为条件属性, 条件属性集合为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$; 将电能质量指标值所占权重设定为决策属性, 决策属性集合为 $D = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 。本文构造的电能质量评估指标均属于越小越好型指标, 决策属性可按(7)式计算

$$t_{ij} = \frac{x_{i\max} - x_{ij}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (7)$$

式中, $x_{i\max}$ 、 $x_{i\min}$ 为指标 i 的阈值范围。

将待评估指标值和权重作为知识表达系统的一条信息, 论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 由 u_i 构成的信息表即为各节点电能质量评价指标的决策表。

2.4 基于 D-S 证据理论的电能质量综合评价

根据 2.3 节所述建立决策表, 应用式(2)、式(3)确定指标的规则强度 μ_i , 再计算指标的基本概率赋值 $m(i)$ 如式(4); 最后利用 D-S 证据理论融合公式将电能质量各个指标进行融合, 得到电能质量各指标的综合基本概率赋值 m 。

根据图 1 电能质量评价指标体系, 设 $m(C_1)$ 为电压偏差的基本概率赋值, $m(C_2)$ 为电压波动的基本概率赋值, $m(C_3)$ 为三相电压不平衡度的基本概率赋值, $m(C_4)$ 为电压总谐波畸变率的基本概率赋值。各个指标融合之后的基本概率赋值为

$$m(C) = m(C_1) \oplus m(C_2) \oplus m(C_3) \oplus m(C_4)$$

由证据理论中基本概率赋值的定义, $m(C)$ 的值反映了证据对属性 C 的支持程度, 因 $0 \leq m(C) \leq 1$, 故基本概率赋值越趋近于 1, 其可信度越高。因此, 融合后的基本概率赋值就反映了综合电能质量的优劣, 是对电能质量的客观打分, 其评定结果是一个连续的分值表示。这种连续分值表示对评定过程更有实际意义, 质量状况的微小差别也可以在分值中体现出来, 避免了人为预先设定等级框架的弊端。

根据融合的 m 值还可以对电能质量综合评价等级进行划分。本文给出一种区间划分如表 1。

表 1 电能质量综合评价等级划分

Table 1 Classification assessment of power quality					
等级	I	II	III	IV	V
BPA	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.4, 0.6]	(0.2, 0.4]	[0, 0.2]

3 算例分析

3.1 仿真分析

选用如图 3 所示的典型 IEEE14 节点系统进行 Matlab 仿真分析。在节点 9 处设置扰动源, 得到各节点电能质量数据如表 2 所示。

设 C_1 为谐波畸变指标, C_2 为三相不平衡指标, C_3 为电压波动指标, C_4 为电压偏差指标。划分条件属性集合 $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, 利用式(5)对数据进行离散化, 条件属性划分为三个等级, 用 0、1、2 表示; 决策属性也按三个等级划分, 用 d_0 、 d_1 、 d_2 表示, 结果如表 3 所示。

依据决策表, 根据式(2)和式(3)计算各个属性规则强度, 再利用式(4)计算得到各属性的基本概率赋值如表 4。

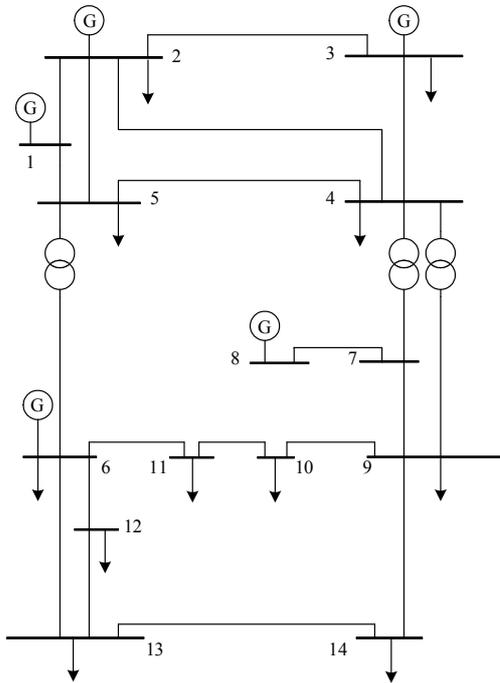


图 3 IEEE14 节点系统
Fig. 3 IEEE14 node system

表 2 各节点电能质量数据

Table 2 Power quality data at the nodes

节点	谐波畸变/%	三相不平衡/%	电压波动/%	电压偏差/%
1	1.248	0.673	1.080	2.076
2	1.536	0.699	1.213	2.206
3	1.459	0.776	1.224	2.318
4	1.622	0.863	1.378	2.477
5	1.584	0.762	1.262	2.231
6	2.016	0.779	1.455	3.138
7	2.850	1.162	2.542	5.233
8	1.832	0.883	1.428	3.194
9	3.214	1.244	3.117	5.978
10	3.183	1.152	2.982	5.862
11	2.984	1.089	2.534	5.028
12	1.633	0.733	1.458	2.534
13	2.452	0.864	1.983	3.281
14	3.051	1.182	2.861	5.564

根据 D-S 证据理论将表 4 中各指标基本概率赋值进行融合, 得到各个节点电能质量综合基本概率赋值及等级如表 5 所示。从中可以看出, 若节点 9 处设置扰动源, 该节点电能质量状况最差, 并且对相邻节点电能质量影响较大, 而对离其较远节点的

表 3 决策表

Table 3 Decision-making list

U	C_1	C_2	C_3	C_4	D
1	0	0	0	0	A_n
2	0	0	0	0	A_n
3	0	0	0	0	A_n
4	0	0	0	0	A_n
5	0	0	0	0	A_n
6	1	0	0	1	A_1
7	2	2	2	2	A_2
8	1	1	1	1	A_1
9	2	2	2	2	A_2
10	2	2	2	2	A_2
11	2	2	2	2	A_2
12	0	0	0	0	A_n
13	1	0	1	0	A_1
14	2	2	2	2	A_2

表 4 电能质量指标基本概率赋值

Table 4 Basic probability evaluate of power quality indices

节点	C_1	C_2	C_3	C_4
1	0.414	0.408	0.513	0.488
2	0.432	0.413	0.510	0.468
3	0.424	0.435	0.481	0.457
4	0.430	0.402	0.487	0.457
5	0.432	0.433	0.493	0.481
6	0.316	0.402	0.405	0.346
7	0.267	0.312	0.233	0.234
8	0.312	0.390	0.410	0.373
9	0.215	0.214	0.203	0.209
10	0.233	0.212	0.227	0.202
11	0.232	0.227	0.219	0.229
12	0.410	0.388	0.411	0.404
13	0.315	0.312	0.304	0.320
14	0.228	0.214	0.225	0.215

电能质量影响较小, 说明该方法能够准确反映电能质量实际状况, 具有较高的可信度和一定的实用价值。

3.2 实际应用

针对某钢铁企业开发了电能质量监测系统并进行了长期电能质量监测。按照 IEC 相关标准对电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、谐波畸变等指标进行测量, 应用本文方法对监测数据进行电能质量状况的评价, 得到每天该企业电能质量状况综

合评价。综合评价分值基本上在 0.64~0.83 之间,说明该企业电能质量处于 II 级状态。评价结果会实时提供给企业供电部门,运行表明评价结果可以较客观地反映供电质量状况。

表 5 融合后的电能质量指标基本概率赋值及评价结果
Table 5 Basic probability evaluate of power quality indices and evaluation after the fusion

节点	综合评价	电能质量等级
1	0.862	I
2	0.841	I
3	0.825	I
4	0.813	I
5	0.826	I
6	0.738	II
7	0.514	III
8	0.743	II
9	0.475	III
10	0.482	III
11	0.530	III
12	0.793	II
13	0.698	II

4 结语

本文在电能质量综合评价中结合粗糙集和 D-S 证据理论,采用基于决策表的基本概率赋值,建立了一种电能质量综合评价方法。理论分析和仿真及现场应用表明,该方法可以有效降低基本概率赋值获取过程中的主观随意性,更加客观准确地反映电能质量优劣状况。

参考文献

- [1] 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 Haoyi, 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.
- [2] 王宗耀, 范莉, 苏浩益. 基于区间数理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 43(3): 41-45.
WANG Zongyao, FAN Li, SU Haoyi. A comprehensive power quality evaluation model based on interval number theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 43(3): 41-45.
- [3] 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 Huizhi, PENG Jianchun. Research on synthetic and auantificated appraisal index of power quality based on fuzzy thoery[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 85-88.
- [4] 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 Honggeng, WU Chuanlai. A power quality comprehensive evaluation method based on grey clustering[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 70-75.
- [5] 王深哲, 高山, 李海峰, 等. 含风电接入的电网规划方案电能质量评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 56-65.
WANG Shenzhe, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Evaluation of power quality in grid planning scheme with wind power integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 56-65.
- [6] 房国志, 王猛, 王康. 基于 FPGA 的暂态电能质量的监测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 130-135.
FANG Guozhi, WANG Meng, WANG Kang. Detection method of the FPGA-based transient power quality[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 130-135.
- [7] 张有兵, 翁国庆, 曹一家. 网络化电能质量监测系统 中的配电线载波通信[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 116-122.
ZHANG Youbing, WENG Guoqing, CAO Yijia. Distribution line carrier communication in networked power quality monitoring system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 116-122.
- [8] 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 Li, 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.
- [9] 刘颖英, 徐永海, 肖湘宁, 等. 地区电网电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 130-135.
LIU Yingying, XU Yonghai, XIAO Xiangning, et al. Analysis of method on power quality comprehensive evaluation for regional grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 130-135.
- [10] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳. 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. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 11-16.
- [11] 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. Quality of electricity commodity and its fuzzy evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 46-49.
- [12] 康世崑, 彭建春, 何禹清. 模糊层次分析与多目标决策相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 113-118.
KANG Shiwei, PENG Jianchun, HE Yuqing. Comprehensive evaluation of power quality based on the integration of fuzzy analytic hierarchy process with multi-objective decision-making[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 113-118.
- [13] 何禹清, 彭建春, 毛丽林. 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. Comprehensive evaluation of power quality considering customer demands[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 48-52.
- [14] 舒服华. 粗糙集在电能质量综合评价中应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 75-78.
SHU Fuhua. Comprehensive power quality evaluation based on rough set[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 75-78.
- [15] 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 Xiangning. Infrastructure of the power quality assessment system of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 171-175.
- [16] 李华, 贺鹏举, 景丽婷, 等. 基于 RAGA-PPM 的电能质量综合评估方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 349-353.
LI Hua, HE Pengju, JING Liting, et al. The method of power quality comprehensive evaluation based on projection pursuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 349-353.
- [17] 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.
- [18] 李连结, 姚建刚, 龙立波. 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. Application of combination weighing method in fuzzy synthetic evaluation of power quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 56-60.

收稿日期: 2014-09-08; 修回日期: 2014-10-25

作者简介:

蒋亚坤(1970-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能化调度系统、调度自动化技术等; E-mail: jiangyakun@yn.csg.cn

李文云(1965-), 男, 教授, 高级工程师, 研究方向为智能电网技术、电网智能化、调度信息化技术等;

赵莹(1983-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化、信息化技术等。

(编辑 张爱琴)