

基于改进 AHP 和概率统计的电能质量综合评估

熊以旺¹, 程浩忠¹, 王海群², 徐俊¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市电力公司, 上海 200002)

摘要: 电能质量是多个指标的有机综合, 虽然世界各国对各个电能质量指标制定了一系列的标准, 但这些用来确定单个指标合格与不合格的标准, 不能全面、真实、唯一地反映总的电能质量的性质。针对这种情况, 结合改进的层次分析法(AHP)和概率统计法对电能质量进行综合评估。该方法首先根据层次分析法得到判断矩阵, 再用二阶段线性规划的方法而非传统的特征向量法得到各项指标权值, 然后采用概率统计的方法将各项指标综合量化, 得到评价综合电能质量的唯一量化指标, 并给出分级评价方法。文章最后的实例分析将该方法应用于电气化铁路电能质量的评估。

关键词: 层次分析法; 概率统计; 电能质量; 综合评估

Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics

XIONG Yi-wang¹, CHENG Hao-zhong¹, WANG Hai-qun², XU Jun¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200002, China)

Abstract: Power quality is represented by several indexes showing each aspects of electric energy. A series of standards are formulated in many countries, which can only judge whether each index is qualified. However, they can not reflect the nature of power quality completely, truly, and uniquely. As a result, a new method based on improved AHP and probability statistics is presented to evaluate the power quality. Firstly the judgment matrix is generated within the framework of AHP, then the weights are obtained by applying two-stage linear programming approach, different from typical eigenvector method. Finally, each index is quantified with probability statistic, based on which the unique synthetic evaluation value of power quality can be obtained. The class evaluation method is presented to evaluate the unique value. An analysis example of evaluating the power quality caused by electric railway is given.

This paper is supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(No.2009CB219703).

Key words: analytical hierarchy process; probability statistics; power quality; synthetic evaluation

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0048-05

0 引言

随着经济的飞速发展, 在对电能质量的要求方面出现了以下新问题: 一方面, 由于大量非线性、冲击性负荷接入电力系统或其他扰动源的存在导致电网中的电能质量问题日益严重; 另一方面, 由于众多基于计算机、微处理控制器的精密仪器、设备的大量使用, 用户对电能质量的要求越来越高。据统计, 美国因为电能质量问题所带来的损失一年超过 500 亿美元^[1,2]。我国现有六项电能质量标准, 分别对电压偏差、频率偏差、谐波、电压三相不平衡

度、电压波动与闪变、暂时过电压和瞬态过电压进行了限定且目前电能质量测量仪能够判断这些电能质量指标是否满足标准要求^[3], 但这只能用来评估电能质量的单项指标, 不能确定综合电能质量的好坏。如何实现电能质量的自动监测并从总体上对电能质量做一综合评价已成为研究的难题。

电能质量综合评估方法研究, 近年来主要集中在基于概率论与矢量代数、模糊数学以及层次分析法上^[3-8]。文献[4]给出了各项电能质量指标的模糊模型, 形成了隶属度集, 但用海明距离贴近度对模糊关系的刻画不够细致, 最大隶属度原则掩盖了介于两个隶属度之间的差别, 严重时可能会导致判断偏差太大。文献[5,6]采用模糊综合评价方法, 并考虑指标权重向量, 但未说明权重如何确定。文献[3,7]

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)
(2009CB219703)

结合层次分析法 AHP (analytical hierarchy process) 及模糊方法进行综合评价, 但当考虑指标比较多时, 应用 AHP 有时会出现判断矩阵不具有一致性的情况, 且模糊数学对于隶属度函数的建立并没有一个统一的通用定理或计算公式, 很大程度上受主观因素的影响。文献[8]提出了基于概率统计和矢量代数的电能质量量化和评估方法, 应用严格的数学计算, 将各项指标的模糊性具体量化, 但基准值的选取对评估结果有很大的影响。

本文克服传统 AHP 方法的局限性, 提出了一种计算 AHP 权重的线性规划方法。当判断矩阵不具有一致性时, 可以方便地在判断矩阵中找到影响一致性的一项, 从而得到合理的权值。并在此基础上应用概率统计的方法对电能质量进行综合评估。该方法可以根据不同类型负荷的敏感程度来确定各单项指标的不同权重, 在数据处理过程中用概率统计的方法将各指标的模糊性量化, 受主观因素的影响小, 评估结果客观、科学、合理。

1 各项指标权值的确定

目前, 电力系统还没有确定电能质量各项指标权重的标准。但是要对电能质量进行综合评价, 需确定反映同一电能质量不同参数的相对重要性的权重。

1.1 层次分析法

层次分析法是美国数学家 T. L. Saaty 于 1977 年提出的, 它是一种定性和定量相结合的决策方法^[9]。其解决问题的步骤可归纳为以下四步:

步骤 1: 分析系统中各因素间的关系, 建立系统的递阶层次结构;

步骤 2: 对同一层次各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较, 按表 1 构造两两比较的判断矩阵 A ;

表 1 判断矩阵形成准则

Tab.1 The rule of constructing judgment matrix

标度	含义
1	两个因素相比, 具有相同重要性
3	两个因素相比, 一个比另一个稍重要
5	两个因素相比, 一个比另一个明显重要
7	两个因素相比, 一个比另一个强烈重要
9	两个因素相比, 一个比另一个极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 y_i 与因素 y_j 的重要性之比为 a_{ij} , 则因素 y_j 与 y_i 之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

步骤 3: 由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重; 并进行判断矩阵的一致性检验;

设 $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 是 n 阶矩阵的排序权重向量, 当 A 为一致性判断矩阵时, 有:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\omega_1}{\omega_2} & \dots & \frac{\omega_1}{\omega_n} \\ \frac{\omega_2}{\omega_1} & 1 & \dots & \frac{\omega_2}{\omega_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\omega_n}{\omega_1} & \frac{\omega_n}{\omega_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \dots \\ \omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1} & \frac{1}{\omega_2} & \dots & \frac{1}{\omega_n} \end{bmatrix}$$

用 $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 右乘上式, 得到 $Aw = n\omega$, 表明 w 为 A 的特征向量, 且特征根为 n 。再对特征

向量归一化处理 ($\sum_{i=1}^n \omega_i' = 1$), 就可以得到所需要

的权重向量。所以求取权值可以归结为计算判断矩阵的特征值及特征向量问题。

对复杂事物和各因素进行两两比较时, 不可能做到完全一致, 其中难免包含一定程度的非一致性, 并导致特征根及特征向量也有偏差, 因此应对判断矩阵进行一致性检验。定义其不一致性数量指标 CI 为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

再引进平均随机一致性指标 RI , 对于 $n=1 \sim 9$, 平均随机一致性指标 RI 的取值如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标

Tab.2 Average random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

定义 CR 为一致性比例, $CR = CI / RI$, 当 $CR \leq 0.1$ 时, 则称判断矩阵具有满意的一致性, 否则就不具有满意的一致性, 需进行一定的修正。

步骤 4: 计算各层次对于系统的总排序权重, 并进行排序。最后, 得到各方案对于总目标的总排序, 即得到权值向量。

若上一层次 A 包含 m 个因素 A_1, A_2, \dots, A_m , 其层次总排序权值分别为 a_1, a_2, \dots, a_m , 下一层次 B 包含 n 个因素 B_1, B_2, \dots, B_n , 它们对于因素 A_j 的层次单排序的权值分别为 $b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{nj}$, 此时 B 层次的总排序权值由表 3 给出。

可以看出传统的层次分析方法是应用特征向量的方法 EM (eigenvector method), 求出相应的特征

向量, 得出该层元素相对于上一层某一元素的权值向量。然后, 根据层次合成原理计算出各层元素对总体目标的权重向量。但是当判断矩阵不满足一致性检验时, 传统的 EM 求解方法不能回答比较矩阵哪一项是影响其不一致的关键等问题, 很难进行修正。且相对下面介绍的线性规划的求解方法而言, 计算过程复杂, 不易理解和描述^[10]。

表 3 权重合成方法

Tab.3 Weight synthesise method

层次 A \ 层次 B	$A_1 \quad A_2 \quad \dots \quad A_m$	B 层次总排序权值
	$a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_m$	
B_1	$b_{11} \quad b_{12} \quad \dots \quad b_{1m}$	$\sum_{j=1}^m a_j b_{1j}$
...
B_n	$b_{n1} \quad b_{n2} \quad \dots \quad b_{nm}$	

1.2 改进的层次分析法

本文给出的线性规划方法是一个两阶段求解的方法。第一阶段主要目的是先找出一致性约束范围, 再在第二阶段中利用所求得的范围找出权值向量。

首先, 定义 ϵ_{ij} 是 a_{ij} 的误差值, 满足

$$w_i / w_j = a_{ij} \epsilon_{ij} \quad (2)$$

如果判断矩阵 A 是一致性矩阵, 则 $\epsilon_{ij} = 1$ 。我们的目标是尽可能地构造一个一致性的比较矩阵, 即对所有的 i, j 均有 $\ln \epsilon_{ij}$ 趋向于 0。定义: $x_i = \ln w_i$, $y_{ij} = \ln \epsilon_{ij}$, $z_{ij} = |y_{ij}|$ 。第一阶段线性规划模型如下:

目标函数: $\text{Min} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n z_{ij} \quad (3)$

约束条件:

$$x_i - x_j - y_{ij} = \ln a_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j \quad (4)$$

$$z_{ij} \geq y_{ij}, z_{ij} \geq y_{ji} \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i < j \quad (5)$$

$$x_i - x_j \geq 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, n; a_{ij} > 1 \quad (6)$$

$$x_i - x_j \geq 0 \quad \text{对所有 } k \text{ 有 } a_{ik} \geq a_{jk};$$

且存在 q 使 $a_{iq} > a_{jq}$ (7)

$$x_1 = 0; z_{ij} \geq 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

对式 (2) 两边取自然对数可得约束条件式 (4), 约束条件式 (5) 可以得到 y_{ij} 和 y_{ji} 的较大者, 即得

到所有的高估的元素和其高估的值。当 $a_{ij} > 1$ 说明第 i 个因素比第 j 个因素重要, 即 $w_i > w_j$, 可得约束条件式 (6)。对所有 k 有 $a_{ik} > a_{jk}$ 且存在 q 使 $a_{iq} > a_{jq}$ 同样说明第 i 个因素比第 j 个因素重要, 即 $w_i > w_j$, 可得约束条件式 (7)。令 $x_1 = 0$ 可使最后得到的权值唯一。

若判断矩阵存在不一致性, 如存在 $a_{ij} > 1$, $a_{jk} > 1$ 且 $a_{ki} > 1$ 的情况, 即第 i 个元素比第 j 个元素重要, 第 j 个元素比第 k 个元素重要, 但第 k 个元素比第 i 个元素重要, 显然不符合逻辑, 根据条件式 (6) 可知唯一的有效解为: $w_i = w_j = w_k$ 。所以当判断矩阵不一致时, 可以在求解过程中找到影响一致性的一项, 进行修正。

第一阶段线性规划模型必然存在一个最优解 Z^* , Z^* 就是要找的最优一致性目标, 定义了下一步线性规划的一个一致性约束范围。我们的目标不仅是求得最优解 Z^* , 而且要使得每一个偏差都尽可能的小。利用第一阶段求得的最优解 Z^* 作为一个一致性约束范围加入到线性规划中, 得到如下模型。

目标函数: $\text{Min} Z_{\max} \quad (9)$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n z_{ij} = z^* \quad (10)$$

$$x_i - x_j - y_{ij} = \ln a_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j \quad (11)$$

$$z_{ij} \geq y_{ij}, z_{ij} \geq y_{ji} \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i < j \quad (12)$$

$$z_{\max} \geq z_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i < j \quad (13)$$

$$x_i - x_j \geq 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, n; a_{ij} > 1 \quad (14)$$

$$x_i - x_j \geq 0 \quad \text{对所有 } k \text{ 有 } a_{ik} \geq a_{jk};$$

且存在 q 使 $a_{iq} > a_{jq}$ (15)

$$x_1 = 0; z_{\max} \geq 0; z_{ij} \geq 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式 (13) 可以保证 Z_{\max} 是所有偏差的最大值, 式 (10) 可以保证唯有满足最优值 Z^* 的解是有效解, 而其它条件同以前相同。通过上述模型求得的决策变量需要转换权值向量。并进行规一化使其和为 1。

如给出了一个如式 (17) 存在严重的不一致性的比较矩阵。

$$\begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 & 4 & 2 & 6 & 7 \\ 1/5 & 1 & 1/8 & 1 & 1/3 & 4 & 2 \\ 1 & 8 & 1 & 5 & 3 & 3 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/5 & 1 & 1/2 & 1/2 & 2 \\ 1/2 & 3 & 1/3 & 2 & 1 & 7 & 2 \\ 1/6 & 1/4 & 1/3 & 1 & 1/7 & 1 & 1/2 \\ 1/7 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

利用改进层次分析法可得权向量 $w = [0.303 \ 0.061 \ 0.303 \ 0.061 \ 0.152 \ 0.061 \ 0.061]$ 。可以看出 $w_1 = w_3$, 因为 $a_{13} = 1$, 所以是合理的。但从式 (17) 可以看出 $w_2 = w_4 = w_6 = w_7$ 是不合理的, 可以判断不一致性主要来源与元素 2, 4, 6, 7 有关, 再仔细观察式 (17), 有 $a_{24} = 1$, $a_{46} = 1/2$, $a_{67} = 1/2$, 说明其重要性从强到弱的顺序为: 7, 6, 2(4), 但 $a_{26} = 4$, $a_{47} = 2$, 说明 6, 7 比 2, 4 重要, 显然不合理。这也就是不一致的根源。

2 基于可变权值和概率统计的电能质量综合评估

2.1 电能质量指标归一量化

本文提出的基于可变权值和概率统计的电能质量综合评估方法流程图如图 1 所示。首先, 根据国标或国际公认定义的要求对电能质量中电压暂降、电压偏差、频率偏差、三相不平衡、波动与闪变、谐波、可靠性等指标分级, 本文按照国标或国际公认定义对各项指标的规定范围平均分成 10 个等级。由于这 10 级均是合格电能, 在评估过程中, 如果有某些电能质量指标超出了限值, 则可根据其超标程度以某一跨度将超出部分均等分级。如果超出范围很小, 可以把超出部分看成第 11 级。如对于频率偏差, 国标规定正常情况下频率偏差的绝对值不得超过 2%, 以跨度为 0.02 平均分成 10 个等级, 超过 0.2% 的部分看成第 11 级。运用概率统计的方法得到在评估时间段处在各个等级的概率 p_k , 将每个指标每级的概率求出可得矩阵 $R_{n \times m}$, 其中 n 表示考虑的电能质量指标个数, m 表示每个指标都被分成了 m 级。将 R 和前面介绍的通过改进的层次分析法求得的各项指标的权重矢量 A 相乘得到矩阵 V , 对矩阵 V 应用加权平均法处理得到电能质量评估结果 V' 。

本方法的数学关系式如下:

定义评估时间: $T = t$ (其中 t 为评估时间段)

依据电能质量各项指标的国标规定, 将规定范围划分为 m 级, 则各级的跨度为: $q = x/m$, 其中: m 为所分等级个数; x 为国标对该项指标的限值。

第 k 级的范围为:

$$q_k \in \left[\frac{x}{m}k - \frac{x}{m}, \frac{x}{m}k \right] \quad (18)$$

根据各项指标的实测数据求取其绝对值在第 i 级的时间:

$$\tau(k) = \sum_{i=1}^n t_i \quad (19)$$

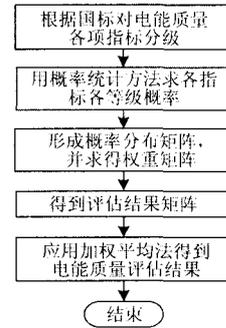


图 1 电能质量综合评估方法流程图

Fig. 1 The process of synthetic evaluation of power quality method

其中: t_i 为各项指标绝对值在第 k 级的第 i 个时间段的时间; n 为各项指标绝对值在第 k 级的时间段的个数;

求取各项指标处于第 k 级的概率分布:

$$p_k = \tau(k) / T \quad (20)$$

将各项指标在各等级的概率分布按等级顺序形成一个 $1 \times m$ 的行矩阵: $R_i = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_m]$

将电能质量各项指标的矩阵排列为一个矩阵:

$$R_{n \times m} = [R_1, R_2, R_3, \dots, R_n]' \quad (21)$$

其中: n 表示所考虑的电能质量指标的个数。

给 R 各项指标乘以对应权重:

$$V = \omega * R, \omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n] \quad (22)$$

其中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ 分别表示电能质量各个指标的权重值。

对 V 应用加权平均法求取评估结果:

$$V' = \sum_{k=1}^m kV_k / \sum_{k=1}^m V_k \quad (23)$$

V' 即是电能质量的唯一量化评估结果。

2.2 电能质量指标量化的评价

如果在分项电能质量指标的量化中都将限值范围采用 10 级制, 则归一电能质量指标的评价也相应地采用 10 级制, 将超过 10 级的情况评价为不合格。以保持分级的一致性。如图 2 所示, 图中给出了综合唯一电能质量指标从定量到分级定性的评价方法。

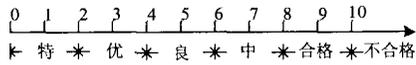


图2 电能质量综合量化评价

Fig. 2 Evaluation of synthetic power quality value

3 实例应用分析

利用上述的综合评价方法对给电气化铁路供电的 110 kV 母线的电能质量问题进行评价, 评价以某牵引站的实测数据为基础。在其上级电源 220 kV 站安装有两台电能质量分析仪, 专门监视该牵引站的电能质量。

考虑的电能质量指标包括谐波畸变率、功率因素、三相不平衡度、频率偏差、电压偏差、电压闪变。经过专家调查, 按表 1 的准则形成判断矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 5 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

用第 1.2 节介绍的两阶段法求出权重矢量并归一化处理后可得:

$$\omega = [0.3209 \quad 0.3209 \quad 0.1070 \quad 0.0642 \quad 0.1070 \quad 0.0802]$$

将考虑的电能质量指标谐波畸变率、功率因素、三相不平衡度、频率偏差、电压偏差、电压闪变按国标的限值平均分成十个等级, 超标的部分看成第十一个等级。经过对原始实测数据的分析和处理, 得到各电能质量指标各等级的概率矩阵 R , 其中 R 的每行表示某个指标分别处在 11 个等级上的概率。

$$R_{6 \times 11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.0646 & 0.5632 & 0.2104 & 0.0563 & 0.0389 & 0.0326 & 0.0160 & 0.0111 & 0.0069 \\ 0.0556 & 0.0799 & 0.1201 & 0.1215 & 0.0701 & 0.0708 & 0.0632 & 0.0813 & 0.0931 & 0.1896 & 0.0549 \\ 0.7431 & 0.1979 & 0.0375 & 0.0118 & 0.0069 & 0.0014 & 0.0014 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6354 & 0.3597 & 0.0049 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0819 & 0.5889 & 0.3014 & 0.0278 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1500 & 0.3472 & 0 & 0.4389 & 0.0639 & 0 \end{bmatrix}$$

给 R 各项乘以对应权重得到评价结果矢量

$$V = \omega * R = [0.1381 \quad 0.0699 \quad 0.0724 \quad 0.2839 \quad 0.1625 \quad 0.0439 \quad 0.0736 \quad 0.0365 \quad 0.0350 \quad 0.0644 \quad 0.0198]$$

对 V 应用加权平均法求取评估结果

$$V' = \sum_{k=1}^{11} kV_k / \sum_{k=1}^{11} V_k = 4.6911$$

即为电能质量的最终评估结果, 根据图 2 电能质量指标量化评价该电能质量属于良。

从对原始实测数据的分析和处理得到的概率矩阵 R 可以看出, 考虑的 6 个电能质量指标中虽然大部分都在限值范围内, 但由于电铁牵引负荷的影响, 谐波畸变率和功率因素都有少许超标的情况, 且这两个指标也是考虑电铁牵引负荷对电网影响的主要因素, 权值相对也比较大, 所以电能质量为良是合理的。

4 结论

本文提出的电能质量综合评估方法在数据处理过程中应用的是概率统计的方法, 保证了评估结果的严谨与客观, 在评估过程中又引入了权重矢量, 体现了电能质量各指标的模糊性, 满足电能质量的一些特殊要求。这种方法可以客观、全面、合理地电能质量进行评估, 具有一定的应用价值。

参考文献

[1] Redl R, Tenti P. Power Electronics Polluting Effects[J]. IEEE Spectrum, 1997, 34(5):33-39.

[2] 赵剑锋,王浔,潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 32-37.
ZHAO Jian-feng, WANG Xun, PAN Shi-feng. Study on Power Quality Susceptive Testing System of AC Contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 32-37.

[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 Jia-mao, HUANG Shao-xian. Research on Synthetic Evaluation Method of Power Quality Based on Fuzzy Theory[J]. Relay, 2006, 34(3): 55-59.

[4] 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. Quality of Electricity Commodity and Its Fuzzy Evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 46-49.

[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.

(下转第 71 页 continued on page 71)

据的传输与处理、跨间隔的数据同步、分布式母线保护的功能分布等关键问题,提出了解决方案,值得进一步研究和发展。

参考文献

- [1] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等.基于IEC 61850标准的过程总线通信研究与实现[J].中国电机工程学报,2005,25(8):84-89.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. Research and Implementation of the Communication of Process Bus Based on IEC 61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 84-89.
- [2] 鲁国刚,刘骥,等.变电站的数字化技术发展[J].电网技术,2006,30(S):499-504.
LU Guo-gang, LIU Ji, et al. The Technology Development of Substation Digitization[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 499-504.
- [3] 彭谦,王增平,徐岩,等.分布式母线保护通信系统研究[J].继电器,2004,32(24):25-28.
PENG Qian, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. A Research of Communication System in the Distributed Bus Protection[J]. Relay, 2004, 32(24): 25-28.
- [4] 任雁铭,秦立军,杨奇逊. IEC 61850 通信协议体系介绍和分析[J].电力系统自动化,2000,24(8):62-64.
REN Yan-ming, QIN Li-jun, YANG Qi-xun. Study on IEC 61850 Communication Protocol Architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 62-64.
- [5] 高翔,张沛超.数字化变电站的主要特征和关键技术[J].电网技术,2006,30(23):67-71
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. Main Features and Key Technologies of Digital Substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.
- [6] 宋小舟,等.基于IEC61850功能分层的母线保护方案研究[J].电网技术,2006,30(S):329-332.
SONG Xiao-zhou, et al. A Scheme of Bus Protection in Substation Communication Network and System IEC 61850[J]. Power System Technology, 2006, 30(S): 329-332.
- [7] IEC61850: Communication Networks and System in Substations[S]. Part1 to Part10, 1999.
- [8] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等.一种遵循IEC 61850标准的合并单元同步的实现新方法[J].电力系统自动化,2004,28(11):57-61.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. New Method Implementing the Synchronization Merging Unit According to the IEC 61850 Standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 57-61.
- [9] 操丰梅,宋小舟,秦应力.基于数字化变电站过程层的分布式母线保护的研制[J].电力系统自动化,2008,32(4):69-72.
CAO Feng-mei, SONG Xiao-zhou, QIN Ying-li. Research on Distributed Busbar Protection Based on Digital Substation Process Level[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 69-72.
- [10] 王春生,等.母线保护[M].北京:中国电力出版社,1997.
WANG Chun-sheng, et al. Busbar Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- 收稿日期:2008-08-15; 修回日期:2008-09-03
作者简介:
王攀峰(1977-),男,硕士研究生,工程师,从事继电保护研究与开发; E-mail: wangpanfeng@xjgc.com
张克元(1964-),男,高级工程师,从事继电保护研究与开发;
文明浩(1973-),男,副教授,从事电力系统继电保护和控制方面的科研和教学工作。
- (上接第52页 continued from page 52)
- [6] CAI Liang, CHEN Hong-kun. Fuzzy Studies on Power Quality-part I: Index and Evaluation[A]. in: 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power[C]. Rio de Janeiro(Brasil): 2002.419-423.
- [7] Farghal S A, Kandil M S, Elmitwally A. Quantifying Electric Power Quality via Fuzzy Modeling and Analytic Hierarchy Processing[J]. IEE Proceedings-Gener, Trans and Distrib, 2002, 149(1):44-49.
- [8] 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 Jian-chun, OU Ya-ping, 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.
- [9] Satty T. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [10] Chandran B, Golden B, Wasil E. Linear Programming Models for Estimating Weights in the Analytic Hierarchy Process[J]. Computers and Operations Research, 2005, 32:2235-2254.
- 收稿日期:2008-08-18; 修回日期:2008-10-22
作者简介:
熊以旺(1983-),男,硕士研究生,从事电能质量监测与分析方面的研究工作; E-mail:xionyiwangyu@163.com
程浩忠(1962-),男,博士,教授,博士生导师,从事电能质量、电力系统规划、分析、电压稳定等方面的研究工作。