

基于云模型的电能质量实时状态诊断原理及实现

曲广龙¹,杨洪耕¹,李兰芳²

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 广东电网公司 电力科学研究院,广东 广州 510080)

摘要:提出基于云模型的电能质量实时状态诊断方法,在各监测点长期电能质量监测数据基础上分别对各项电能质量指标建立正态云模型,根据正态云隶属曲线外边界确定异常阈值。实时监测过程中通过电能质量数据与异常阈值比较,判断其是否异常。基于云模型的电能质量实时状态诊断以荷源长期运行特性为基础,能够准确识别出异常电能质量状况,发现潜在的非常态运行问题。实际工程算例说明了提出的方法的实用性和有效性。

关键词:云模型;电能质量;国家标准;实时状态诊断;IEC 61850

中图分类号:TM714

文献标志码:A

Principle and Implementation of Power Quality Real-time Status Diagnosis Based on Cloud Model

QU Guanglong¹, YANG Honggeng¹, LI Lanfang²

(1. School of Electrical Eng. and Info., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. Electric Power Research Inst., Guangdong Power Grid Co., Guangzhou 510080, China)

Abstract: A method of power quality real-time status diagnosis based on cloud model was proposed. The normal cloud model for each power quality index was established based on long-term power quality data of each monitoring point. The anomaly threshold determined by the normal cloud outline was used to diagnose the power quality status in the process of monitoring. This method can accurately identify the abnormal power quality status, and find out the potential issue of abnormal operation on the basis of long-term operation characteristics of the power grid. Practical engineering example proved the validity and practicality of the proposed method.

Key words: cloud model; power quality; national standard; real-time status diagnosis; IEC 61850

由于电力需求持续增长、传统能源日益短缺以及电力市场逐渐开放等因素,分布式电源(distributed generation, DG)尤其是可再生能源大量接入电网,对电网造成广泛的影响^[1-2]。分布式电源包含大量电力电子装置,具有间歇性投切和波动出力特性,会对电网电能质量产生负面影响。同时电网本身还受到大量非线性负荷的冲击,分布式电源与恶性负荷耦合并网加剧电能质量恶化,严重影响电网的供电质量和可靠性,造成设备损坏、经济效益损失等后果。因此,有必要对电网的电能质量状况进行实时监测和分析,以便及时采取有效措施,减少损失。

文献[3]提出一种分布式电能质量监测平台,实现了对电气化铁路的可扩展式电能质量监测;文

献[4]基于现有电能质量监测系统,采用异常数据挖掘技术,实现电能质量超标和异常检测;文献[5]结合调度自动化系统资源,建立了一套考虑电能质量监测和管理的电网综合监控系统。上述文献各有创新和侧重点,但是,均以电能质量国家标准作为主要参考依据,通过电能质量是否超标评价电能质量水平,这也是目前电能质量监测系统普遍采取的方式,这种方式有时并不能很好反映出负荷或分布式电源(以下简称荷源)的真实运行状态。在实际运行过程中,影响电能质量状态的因素有很多,如天气状况、用户性质、自然灾害等,每类荷源在特定环境长期运行过程中会形成特定运行方式,电能质量状态会在一定范围内趋于正态分布,如果仅以电能质

量国家标准作为所有荷源电能质量状态的衡量标尺,显得过于死板,并且可能无法察觉出某些异常状况。

提出了一种基于云模型的电能质量实时状态诊断方法。对荷源在正常运行条件下的各项电能质量指标建立正态云模型,确定出异常阈值,用于实时诊断电能质量状态。并且利用新监测数据对云模型进行动态修正,考虑了电网运行过程中的发展和变化。通过提出的方法可以发现电网中潜在的电能质量非超标问题,为保障电力系统正常运行提供一定的帮助。

1 云模型原理

1.1 云的概念和特性

设 U 为一个用数值表示的定量论域, C 为 U 上的定性概念,若定量值 $\forall x \in U$ 为定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 为有稳定倾向的随机数, $\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$, 则 x 在论域 U 上的分布称为云, 记为 $C(X)$, 每一个 x 称为一个云滴^[6-7]。

云具有以下基本性质:

- 1) 论域 U 可以是 1 维的, 也可以是多维的。
- 2) 定义中提及的随机实现是概率意义下的实现; 定义中提及的确定度是模糊集意义下的隶属度, 同时是概率意义下的分布。
- 3) 对于任意一个 $x \in U$, x 到区间 $[0, 1]$ 的映射是一对多的变换, x 对 C 的确定度是一个概率分布, 而不是一个固定的数值。
- 4) 云由云滴组成, 云滴之间无次序性, 一个云滴是定性概念在数量上的一次实现, 云滴整体才能反映出概念的特征, 云滴数目越多, 越能反映这个定性概念的整体特征。

1.2 云的数字特征

云用期望 Ex (Expected value)、熵 En (Entropy) 和超熵 He (Hyperentropy) 3 个数字特征来表示整体定量特性, 所以也可以将这 3 个数字特征构成的 3 元组 (Ex, En, He) 称作云^[8-10]。

期望 Ex : 云滴在论域空间分布的期望, 是最能够代表定性概念的点。

熵 En : 定性概念的不确定性度量, 由概念的随机性和模糊性共同决定。一方面, En 是定性概念随机性的度量, 反映了能够代表这个定性概念云滴的离散程度; 另一方面, 又是定性概念亦此亦彼性的度量, 反映了论域空间中可被概念接受的云滴的取值

范围。

超熵 He : 熵的不确定性度量, 即熵的熵。由熵的随机性和模糊性共同决定。其大小反映了云滴的离散度和云层的厚度, 即每个数值隶属于概念程度的凝聚性。

2 基于云模型的电能质量状态诊断算法

2.1 状态诊断方法概述

电能质量状态诊断的基本思路是根据荷源日常运行情况下的各项指标监测数据建立云模型, 并确定云模型中各项指标的异常阈值, 用于评判实时监测数据是否出现异常, 从而了解荷源的运行状况。

2.2 云模型数字特征计算

针对各项电能质量指标, 采用逆向云发生器^[11-13] 计算正态云的 Ex 、 En 和 He 3 个数字特征。

具体算法步骤如下:

1) 计算监测数据统计特征量。样本平均值为 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 1 阶样本绝对中心矩为 $B_1 =$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}|, \text{ 样本方差为 } S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2.$$

2) 计算正态云数字特征量。期望为 $Ex = \bar{X}$; 熵为 $En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times B_1$, 超熵为 $He = \sqrt{|S^2 - En^2|}$ 。

2.3 异常阈值确定

云模型中云滴的分布类似于正态分布, 超熵 He 表示偏离正态分布的程度, 即样本数据波动产生的变化范围, 当超熵 $He = 0$ 时, 云模型呈正态分布。随着超熵 He 增大, 云滴开始逐渐离散, 形成如图 1 所示的正态云^[14]。

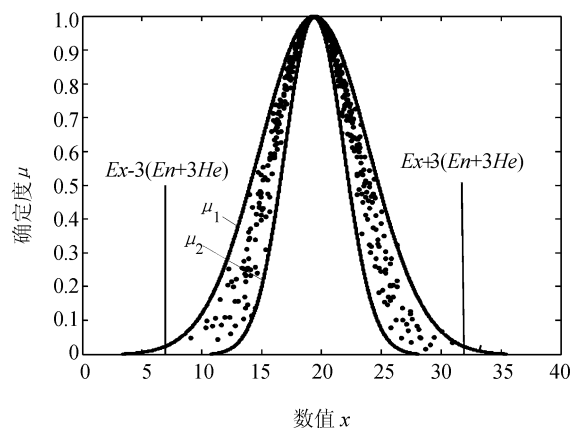


图 1 云模型异常阈值

Fig. 1 Abnormal threshold of cloud model

图1中2条隶属曲线 μ_1, μ_2 为云滴的包络线,勾画了云模型的范围,表达式如下:

$$\mu_1 = \exp\left(-\frac{(x - Ex)^2}{2(En + 3He)^2}\right) \quad (1)$$

$$\mu_2 = \exp\left(-\frac{(x - Ex)^2}{2(En - 3He)^2}\right) \quad (2)$$

正态分布具有 $3\delta^{[15]}$ 准则,即在正态分布概率密度函数曲线下,99.74%的数据都在 $[\mu - 3\delta, \mu + 3\delta]$ 范围内。类似于正态分布,云模型中规定对定性概念有贡献的云滴主要落在区间 $[Ex - 3En', Ex + 3En']$ 内。对内隶属曲线 μ_2 而言,该区间为 $[Ex - 3(En - 3He), Ex + 3(En - 3He)]$,对外隶属曲线 μ_1 而言,该区间为 $[Ex - 3(En + 3He), Ex + 3(En + 3He)]$ 。取 μ_1 曲线的区间边界作为异常判断阈值。

2.4 云模型修正

将电能质量实时状态诊断功能分为全数据云模型和自定义云模型2种模式。全数据云模型建立在监测点各项指标的所有监测数据基础上,并且逐天修正,反映总体运行特性。自定义云模型指用户可以自由选择时间段,根据该时间段内的监测数据在线建立云模型,这样可以灵活地反映荷源在不同时段的运行特性,进行分时段状态诊断。

对于全数据云模型,修正公式如下:

期望修正:

$$Ex' = \frac{nEx + x_{n+1}}{n + 1} \quad (3)$$

方差修正:

$$S^2' = \frac{n}{n + 1}S^2 + \frac{1}{n + 1}(x_{n+1} - Ex')^2 \quad (4)$$

熵修正:

$$En' = \frac{n}{n + 1}En + \frac{1}{n + 1}\sqrt{\frac{\pi}{2}}|x_{n+1} - Ex'| \quad (5)$$

超熵修正:

$$He' = \sqrt{|S^2' - En'^2|} \quad (6)$$

式中, n 为云模型中已包含的天数, x_{n+1} 为新增天的日平均值。为简化计算工作量,并未按照2.2节采用样本数据重新计算云模型,而是在现有云模型和新增数据基础上进行修正。在每天的监测结束后,将监测点当日各项指标监测数据按照上述公式进行修正,修正后的云模型用于第2天的实时状态诊断,依此类推。随着时间累积,云模型趋于稳定。

3 电能质量实时状态诊断系统实现

3.1 系统工作原理

采用提出的方法的电能质量实时状态诊断系统工作原理如图2所示。

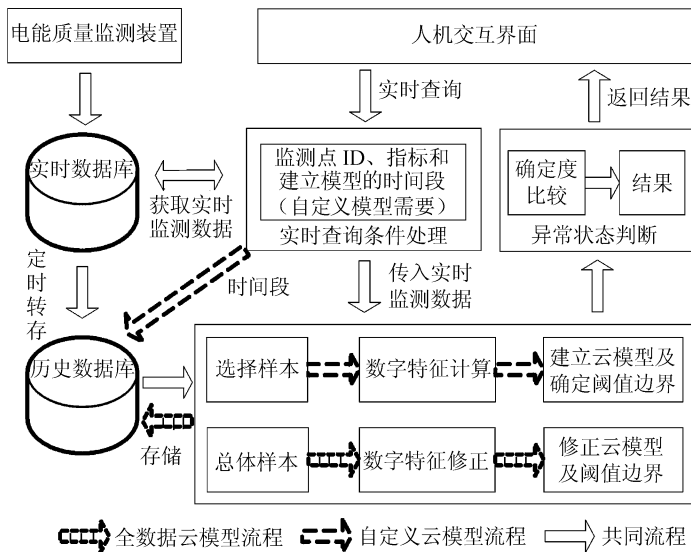


图2 电能质量实时状态诊断系统工作原理

Fig.2 Principle of power quality real-time status diagnosis system

电能质量监测装置通过 IEC 61850 标准将实时监测数据发送到服务器端,解析后存储在实时数据库中。系统定时将实时数据库中的数据转存到历史数据库,同时对各监测点各项指标进行云模型修正并存储。由于实时数据间隔为3s,如果在历史数据

库中存储3s值,数据量将会非常庞大,所以在转存到历史数据库时,系统取每min 20个3s值的平均值,以min为单位存储。

用户输入实时查询条件后,系统根据输入的监测点序号和电能质量指标从实时数据库中获取对应

的实时监测数据,传入云模型状态诊断模块。如果选用自定义云模型,系统根据输入的时间段从历史数据库中获取样本数据,在线建立云模型及确定阈值边界。如未输入时间段,则默认为全数据云模型。通过将实时数据和云模型阈值边界比较,得出诊断结果并返回到客户端界面。

3.2 基于 IEC 61850 的电能质量实时监测

电能质量监测数据包括频率、电压有效值、电流有效值、谐波电压、谐波电流、电压不平衡、电流不平衡、闪变、功率和功率因数等多项指标。

针对电能质量实时监测数据需求,根据 IEC 61850 标准,相关电能质量监测设备逻辑节点模型^[16-17]如图 3 所示。

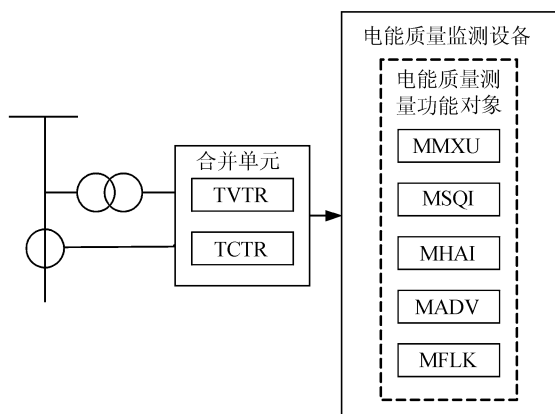


图 3 电能质量监测设备逻辑节点模型

Fig. 3 Logical node model of power quality monitoring equipment

TVTR 和 TCTR 分别为电压互感器逻辑节点和电流互感器逻辑节点,用于电压、电流信号的采集。模型中逻辑节点的具体功能如表 1 所示。

表 1 电能质量相关逻辑节点

Tab.1 Logical nodes of power quality

逻辑节点	逻辑功能	说明
MMXU	测量	描述监测线路的基本信息,如电压、电流、功率、频率等
MSQI	相序和不平衡	描述正序、负序和零序电压、电流
MHAI	谐波和间谐波	描述三相系统中谐波间谐波
MADV	高级测量	描述非正弦和不平衡条件下的电流、电压和功率
MFLK	闪变	描述由电压波动引起的闪变

在实际监测过程中,实时数据被封装进数据集 dsRealData,数据集的具体内容在 ICD 文件中定义。由于监测设备中实时数据的上传周期为 3 s,为保证数据传输的快速性,采用非缓存报告(URCB)机制,产生后立即上传至监测主站,并且支持完整性周期

上送(IntgPd)和总召唤(GI)。监测主站服务器上运行有 IEC 61850 服务程序,用于和现场监测设备建立连接,解析上传的监测数据并存入实时数据库。

4 实例分析

4.1 实例 1

对某充电站 2 次谐波电流实测数据进行分析。PCC 点电压等级为 10 kV,最小短路容量为 100 MVA,设备供电容量为 5 MVA。充电桩基本参数如表 2 所示。

表 2 充电桩参数

Tab.2 Parameters of charging piles

充电桩类型	额定容量/kVA	整流脉数	数量
交-直整流型 1 号充电机	30	6	1
交-直整流型 2 号充电机	60	6	1
交-直整流型 3 号充电机	80	6	1
V2G(vehicle-to-grid)	35	6	1
三相交流充电桩	30	6	1

根据中华人民共和国国家标准《电能质量——公用电网谐波》(GB/T 14549—1993)的规定,某用户谐波电流允许值如下:

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp}, h = 2, 3, \dots, 25 \quad (7)$$

$$I_{hi} = I_h \times \left(\frac{S_i}{S_1} \right)^\alpha, h = 2, 3, \dots, 25 \quad (8)$$

式中: S_{k1} 为 PCC 点的最小短路容量; S_{k2} 为基准短路容量; I_{hp} 为按基准短路容量计算的第 h 次谐波电流允许值,国标中规定 10 kV 母线 2 次谐波电流允许值为 26 A; I_h 为按最小短路容量计算的第 h 次谐波电流允许值; I_{hi} 为某用户允许注入 PCC 点的第 h 次谐波电流值; S_i 为某用户用电协议容量; S_1 为 PCC 点的供电设备容量; α 为相位系数,2 次谐波为 2。因此,可以根据 PCC 点和充电桩参数计算得到国标规定的该充电站 2 次谐波电流允许值为 5.637 A。

利用提出的方法选取该充电站在正常运行情况下 C 相 2 次谐波电流的 90 d 数据进行建模并确定异常阈值,计算得到云模型相关参数如表 3 所示。

表 3 云模型建模结果

Tab.3 Modeling results of cloud model

2 次谐波 电流期望/A	熵	超熵	2 次谐波电流 异常阈值/A
0.132	0.021	0.008	0.267

对 2013-12-1T13:30:00—13:31:57 间共 40

个数据进行实时诊断,诊断结果如图4所示。由图4可以看出,根据云模型计算出异常阈值为0.267 A, 13:30:00—13:31:30的2次谐波电流数据正常,从13:31:30后的数据超过了云模型异常阈值。现场分析结果为由于3号充电机整流桥的一个桥臂发生故障,导致了较大的2次谐波电流。

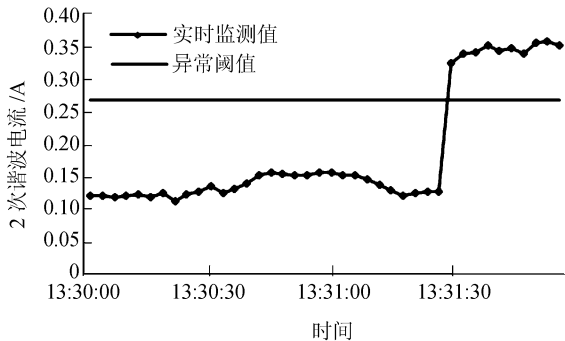


图4 2次谐波电流实时监测数据

Fig.4 Real-time monitoring data of the 2nd harmonic current

根据国标计算得到的限值为5.637 A,远远大于异常数据,如果仅以国标限值作为评判标准,则无法识别出2次谐波电流数据的异常。

4.2 实例2

某变电站110 kV母线一段时间内的A相电压总谐波畸变率实时监测数据如图5所示。

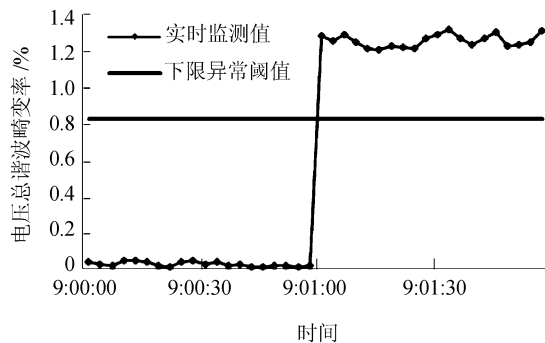


图5 电压总谐波畸变率实时监测数据

Fig.5 Real-time monitoring data of THD_u

由图5可以看出,A相电压总谐波畸变率从9:00:00到9:00:57为接近于零的极小值,以提出的方法进行诊断,低于下限异常阈值0.82%,属于异常状态,但是如果用国标限值衡量,这段数据并未超标(国标限值为2%),不能说明其为异常。通过现场检查发现,由于监测设备的A相测量端子发生故障,造成A相电压总谐波畸变率出现异常,更换端子后数据恢复正常。虽然该实例并非电网运行异常导致,但说明提出方法对电能质量监测工作本身所出现的问题也能及时发现。

由此可以看出,提出的基于云模型的状态诊断

方法对实际运行时的电能质量状况起到了良好的监督作用。相较于电能质量国家标准,该方法建立在每个荷源长期运行数据基础之上,能反映出各荷源的不同运行特点,具有良好的实用性。

5 结论

电网中荷源类型多种多样,运行特性各不相同,即便同类型荷源,由于不同的运行环境,也会有所差别,所以每一个荷源都有其独特的电能质量状况。电能质量国家标准作为固定统一的标准,难以完全衡量所有荷源的电能质量状况。提出的基于云模型的电能质量实时状态诊断方法,在各荷源长期运行电能质量数据的基础上建立云模型并确定异常边界,用于判断实时监测数据是否出现异常。该方法能反映出不同荷源总体或不同时段运行特性,较灵敏地识别出异常状况,与国家标准相结合从而更好地对电网电能质量进行监测。

对于电能质量数据,不仅需要实时诊断,更需要做深层次的分析,因为这些数据蕴含着许多有价值的信息,能反映出电网隐藏的运行特性,但是需要使用一定的方法才能挖掘出来,在这方面还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Djapic P, Ramsay C, Pudjianto D, et al. Taking an active approach[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 68-77.
- [2] You Yi, Liu Dong, Yu Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(18): 10-16. [尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.]
- [3] Wang Kui, Li Jianchao, Pan Zhencun. Design of power quality monitoring platform for electrified railway[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 94-97. [王葵, 李建超, 潘贞存. 电气化铁路电能质量监测平台设计[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 94-97.]
- [4] Wang Fang, Gu Wei, Yuan Xiaodong, et al. Power quality management platform for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 134-139. [王芳, 顾伟, 袁晓冬, 等. 面向智能电网的新一代电能质量管理平台[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 134-139.]

- [5] Liu Haitao, Han Wenxin, Su Jian. Integrated on-line monitoring system of power quality[J]. Power System Technology, 2006, 31(1): 583 - 587. [刘海涛, 韩文新, 苏剑. 电能质量在线综合监测系统[J]. 电网技术, 2006, 31(1): 583 - 587.]
- [6] 李德毅, 杜鹞. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 23 - 25.
- [7] Yang Jing, Li Wenping, Zhang Jianpei. Canonical correlation analysis of big data based on cloud model[J]. Journal on Communications, 2013, 34(10): 121 - 134. [杨静, 李文平, 张健沛. 大数据典型相关分析的云模型方法[J]. 通信学报, 2013, 34(10): 121 - 134.]
- [8] Chen Hao, Li Bing. Qualitative evaluation method based on backward cloud and concept generalizing[J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2010, 56(6): 683 - 688. [陈昊, 李兵. 基于逆向云和概念提升的定性评价方法[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2010, 56(6): 683 - 688.]
- [9] Huang Haisheng, Wang Ruchuan. Subjective trust evaluation model based on membership cloud theory[J]. Journal on Communications, 2008, 29(4): 13 - 19. [黄海生, 王汝传. 基于隶属云理论的主观信任评估模型研究[J]. 通信学报, 2008, 29(4): 13 - 19.]
- [10] Dang Qian, Luo Jiawei, Wang Dong. Research of anomaly detection algorithm based on cloud theory[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(10): 3724 - 3726. [党倩, 骆嘉伟, 王东. 一种基于云理论的异常检测算法研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(10): 3724 - 3726.]
- [11] Li Fei, Zhang Shibin. Study on the network system status's assessment and forecast model based on cloud model[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(6): 99 - 104. [李飞, 张仕斌. 基于云模型的网络系统状态评估与预测模型研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(6): 99 - 104.]
- [12] Zhang Shibin, Xu Chunxiang. Study on the trust evaluation approach based on cloud mode[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(2): 422 - 431. [张仕斌, 许春香. 基于云模型的信任评估方法研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(2): 422 - 431.]
- [13] Wang Shouxin, Zhang Li, Li Hesong. Evaluation approach of subjective trust based on cloud model[J]. Journal of Software, 2010, 21(6): 1341 - 1352. [王守信, 张莉, 李鹤松. 一种基于云模型的主观信任评价方法[J]. 软件学报, 2010, 21(6): 1341 - 1352.]
- [14] 王国胤. 云模型与粒计算[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 78 - 80.
- [15] 刘晓石, 陈鸿建, 何腊梅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 16 - 17.
- [16] Yu Xiaopeng, Li Qionglin, Du Xizhou, et al. Data analysis and model implementation of power quality monitoring equipment based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(4): 56 - 60. [余晓鹏, 李琼林, 杜习周, 等. 基于 IEC 61850 的电能质量监测终端数据分析及模型实现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 56 - 60.]
- [17] DL/T 860.74—2006 变电站通信网络和系统 第7-4部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构 兼容逻辑节点类和数据类[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.]

(编辑 赵婧)