

基于组合赋值法的稳态电能质量预警阈值研究*

柏晶晶¹ 袁晓冬² 张帅¹ 王元凯¹ 陈兵² 顾伟¹

(1.东南大学 电气工程学院,南京210096; 2.江苏省电力公司电力科学研究院,南京210000)

摘要 对电网中电能质量监测数据进行超标和异常数据挖掘,并给出相应预警,可实现问题早发现,早解决。但目前对异常数据预警阈值研究欠缺,且现有的阈值判断算法大多采用单一赋值现状,本文提出了基于组合赋值法的稳态电能质量预警阈值判定方案。该方案利用基于距离的聚类分析法和改进的最大类间方差法(Otsu)确定客观阈值,同时使用专家打分法计算出主观阈值,并按比例集权方式确定综合阈值。最后,基于实测数据对相关算法进行了算例验证,结果表明所提方法可对异常数据预警阈值进行较好设定,并能将其有效应用于稳态电能质量预警系统。

关键词 电能质量;异常挖掘;预警阈值;改进的Otsu;组合赋值

中图分类号 TM71

文献标识码 A

文章编号 1001-1390(2014)12-0070-05

Combinatorial Weighting Method for Early Warning Thresholding of Power Quality

BAI Jing-jing¹, YUAN Xiao-dong², ZHANG Shuai¹, WANG Yuan-kai¹, CHEN Bing², GU Wei¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China. 2. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract Conducting over-limit and abnormal data mining for power quality (PQ) monitored data, and giving corresponding early warning can help find PQ problems earlier. However, few researches on setting the threshold of abnormal data can be found, and existing threshold judgment algorithms mainly concentrates on single assignment. In this paper, the combinatorial weighting method for early warning thresholding of PQ is put forward. The method uses distance based clustering analysis method and improved Otsu method to determine the objective weight. At the same time, expert scoring system is applied to calculate the subjective weight, and the final weight is determined by combinatorial weighting method. Calculation example based on measured data shows that the above method can set PQ early warning threshold accurately, and can be effectively used in the early warning system for PQ abnormal data.

Key words power quality, anomaly detection, early warning threshold, improved Otsu, combinatorial weighting method

0 引言

随着能源节约型社会的推进,可再生能源发电和轨道交通迎来新一轮大发展,风电、光伏、电气化铁路等负荷将在电网中大量接入,必将加剧电网中的电能质量问题,从而可能引发电力事故。然而现代工业生产的规模、自动化程度以及对供电可靠性的依赖,任何电力事故造成的经济损失是不可忽视的^[1],所以有必要对电能质量监测数据进行挖掘,及时给出相关线

路的超标和异常数据,给出预警提示,做到问题早发现,早解决。从而可将由电能质量问题引发的电力事故的可能性降到最低,保证电力的安全运行。

目前,对电能质量的研究主要集中在数据采集方法或对采集后的数据的基本处理上,这些研究主要包括电能质量监测装置和方法,电能质量评估与治理,以及电能质量扰动识别等方面^[2-5],而对电能质量监测点的指标监测数据异常检测及预警的研究欠缺。

对电能质量进行预警可以发现电网运行已经存在或潜在的电能质量问题,专职人员针对预警系统给

* 基金项目 国家高技术研究发展计划项目
(863 计划) (2011AA05A107)

出的预警,对每一条记录进行处理^[6-7]。若指标超标,说明此线路该指标不满足国家标准,应采取相应的措施予以改善;若指标异常,说明此线路该指标某段时间内,与正常运行时存在较大的差异,需予以关注。在上述判断超标和异常过程中,阈值的设置显得尤为关键,其将直接决定预警结果准确性。

就目前的阈值设定方法而言,大多采用的是单一的赋值方式,均存在一定的主客观赋值的缺陷^[5]。基于此,本文利用组合赋值的方式,对稳态电能质量预警指标机制阈值做出合理设定。再结合预警算法和流程,可对稳态电能质量异常数据进行及时可靠的数据挖掘和预警。算例结果表明,采用上述分析方法具有一定的有效性和可行性。

1 改进的Otsu法

最大类间方差法(Otsu)是由日本人大津于1979年首先提出的,也称为大津法,它首先被应用于数字图像处理中的图像分割问题,是实现自动目标识别的重要内容。其基本思想是利用图像的灰度直方图,以目标和背景的方差最大来动态地确定图像的分割阈值^[8-10]。本文采用了一种改进的Otsu法,使其不仅考虑了正常类与异常类两类类间方差,而且还兼顾了各自的内聚性,从而可有效的应用于稳态电能质量异常数据的阈值设定。

下面具体分析其计算步骤:

(1)构造新的稳态电能质量监测数据序列。设某段时间内电能质量某稳态指标的监测数据共有 n 个,为了便于后续分析,需对所选稳态电能质量预警指标的监测数据做聚类分析,将满足相似度要求的监测日数据归为一类,称为一个聚类集合。这样就可将预处理后的数据分为 L 类,每类数据总体上呈递增分布,第 i 类数据组中含有 n_i 个数据;

该聚类分析的具体方法为:

步骤一:将一定滑动窗口内的稳态电能质量预警指标的监测数据视为一个样本集合,并将每个样本聚类集合数据进行归一化预处理,然后提取经过数据归一化处理后每个样本集合的特征量,特征量包括该组数据的最大值、最小值、平均值、方差、偏度、峰度、偏峰度乘积和变异系数;

步骤二:采用欧式距离算子计算两两样本间的欧式距离 d ,计算公式如式(1)所示:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

式中 x_i, y_i 分别为样本集合 x 和 y 的第 i 个特征量, n 为总

的特征量个数。

步骤三:设置相似度限值,根据相似度限值对所有的样本集合逐个进行距离分析,若两个不同的样本集合间的欧式距离,则判定这两个样本集合属于同一个聚类集合,直到所有样本集合分析完毕。

经上述聚类分析法得到的 L 类数据组中含有的总的数据个数是,第 i 个分类所包含数据出现的概率为,显然。

(2)对上述得到的 L 个分类分别进行 $L-1$ 次临界点分割,每次临界点分割均将 L 个分类划分成正常类集合 $A=(y_1, y_2, \dots, y_l)$ 和异常类集合 $B=(y_{l+1}, y_{l+2}, \dots, y_L)$,得到 $L-1$ 个由正常类集合 A 和异常类集合 B 组成的分割结果,其中 l 为正常类集合 A 中的分类个数,同时也是正常类集合 A 中类均值最大的分类的序号, $L-1$ 个分割结果的正常类集合 A 中分类个数均不相同,依次为 $1, 2, \dots, i, \dots, L-1$ 。此时 A, B 两类出现的概率分布分别为:

$$\begin{cases} P_A = \sum_{i=1}^l P_i \\ P_B = \sum_{i=l+1}^L P_i = 1 - P_A \end{cases} \quad (2)$$

(3)计算两类数据均值分别为:

$$\begin{cases} w_A = \sum_{i=1}^l z_i P_i / P_A \\ w_B = \sum_{i=l+1}^L z_i P_i / P_B \end{cases} \quad (3)$$

式中 z_i 为第 i 类数据组均值。总的数据均值为:

$$w_0 = P_A w_A + P_B w_B = \sum_{i=1}^L z_i P_i \quad (4)$$

(4)计算 A, B 两区域的类间方差:

$$\sigma = P_A (w_A - w_0)^2 + P_B (w_B - w_0)^2 \quad (5)$$

(5)传统的最大类间方差法仅计算正常类与异常类之间的类间方差,未考虑两类各自的内聚性,即类内平均方差。实际上,若既保证类间距离最大,又能做到各自的内聚性好,这样在对 L 类数据进行分类时,效果要比单独只考虑类间方差时要好,阈值设置也更为准确。

A, B 两区域的各自平均方差分别为:

$$\begin{cases} \sigma_A = \frac{\sum_{i=1}^l (z_i - w_A)^2 \cdot P_i}{P_A} \\ \sigma_B = \frac{\sum_{i=l+1}^L (z_i - w_B)^2 \cdot P_i}{P_B} \end{cases} \quad (6)$$

则使得类间方差最大、内聚性最小的临界限值 t^*

的求取公式为：

$$t^* = \text{MAX} \left[\frac{P_A(w_A - w_0)^2 + P_B(w_B - w_0)^2}{\sigma_A + \sigma_B} \right] \quad (7)$$

式中 MAX 代表的是取出 $L-1$ 个比例计算值中的最大值。

最后，找出最终求出的临界限值 t^* 所对应的分割结果，以该分割结果的正常类集合 A 中分类数据指标的最大值即可作为异常数据判定的客观阈值 w_2 。

2 组合赋值法确定阈值

为避免单一方式定值而造成赋值的偏倚，本文将采用主客观阈值线性加权确定综合阈值，其中客观阈值 w_2 采用上述改进的 Otsu 法，而主观阈值 w_1 可利用专家打分法。然后，将已计算得到的主客观阈值按比例线性加权，得到电能质量预警指标的综合阈值：

$$w_0 = a \cdot w_1 + b \cdot w_2 \quad (8)$$

式中比例系数 a 、 b 的确定公式为：

$$\begin{cases} a = 1 - b \\ b = \frac{1}{L-1} [(p_1 + 2p_2 + \dots + Lp_n) - \frac{L+1}{L}] \end{cases} \quad (9)$$

式中 L 是分类总数， p_i 为第 i 个分类所包含数据出现的概率。

图 1 为本文所提出稳态电能质量预警阈值设定算法的总流程图。

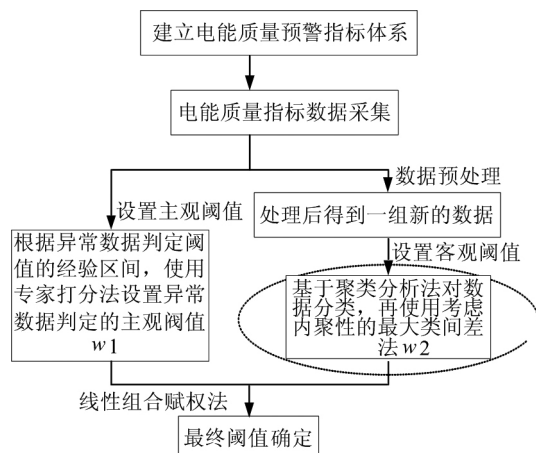


图1 稳态电能质量预警阈值设定算法的总流程图

Fig.1 Flowchart of the algorithm setting the threshold for steady-state PQ early warning

3 稳态电能质量预警流程

基于上述设定方法和流程，可确定稳态电能质量预警指标异常挖掘的阈值，从而能进行相关异常数据预警。然而，对该指标仅进行异常挖掘预警是不够的，需结合其他预警层次构成一整套完整的稳态电能质量预警体系^[6-7]。下面对该体系进行简要介绍。

下面分析的具体流程见图2。

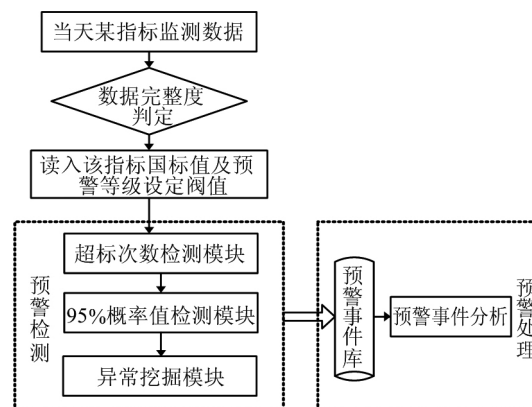


图2 电能质量稳态指标预警流程图

Fig.2 Flowchart of steady-state PQ early warning

本文进行预警的前提是监测点能够提供足够数据，如果数据不全则不能进行有效预警。在正常情况下，可设定每一个指标产生数据个数的50%为数据完整度限值。例如电流谐波每3分钟产生一个数据，一天应该有480个，则如果取到的电流谐波数据低于设定阈值，则认为该电流谐波该天数据无效。

综上所述可知，稳态指标预警步骤为：(1)监测指标数据完整度判断；(2)在满足完整度的基础上，进行指标超标检测，并依据超标程度给出超标三级或四级预警；(3)当数据不满足超标阈值，则进行95%概率值检测，并依据异常程度给出异常二级或三级预警；(4)当不满足超标或95%概率值异常情况，则对固定时间窗内进行异常数据挖掘，即典型波形参数评估，该步骤同样针对国标设定尚未健全的稳态指标预警考察。其具体判断预警等级过程为：统计原始数据超过异常阈值的次数以及原始数据最大值，再设定异常次数和最大值限值，如果两者同时超过限值，给出二级预警；而如果其中之一超过限值，则给出一级预警。若均不超标，则判断正常，不给出预警信息。

4 算例分析

4.1 数据分析

本文以京沪高铁南京南牵引站接入点监测到的某一天(24小时不间断采集)的负序电压不平衡度为例，简述稳态电能质量指标阈值设定及预警过程。

在对原始数据进行预处理后，即可进入聚类分析步骤^[11-12]。在本例中，经数据预处理后共得到170个待处理数据。此时，需考虑设置一个合适的滑动窗口数，以构成若干个样本类。本文根据实际调试经验，设置一个窗口内包含的数据个数为10，直接对这170个数据以10为限进行划分，则可得到17个窗口。再计算这17个窗口内的6个统计量，结果如表1所示。

以上述各窗口的6个统计量为特征量，计算各窗

表1 各窗口6个统计量的值

统计量 窗口	最小值 (%)	最大值 (%)	平均值 (%)	标准差	偏度	峰度
1	0.0617	0.0770	0.0688	0.0048	0	-0.6667
2	0.0584	0.0751	0.0679	0.0051	0	-0.6667
3	0.0603	0.0790	0.0716	0.0052	0	-0.6667
4	0.0689	0.0841	0.0752	0.0047	0	-0.6667
5	0.0664	0.2343	0.0872	0.0518	28.5930	269.4542
6	0.1212	0.2170	0.1557	0.0318	47.1037	308.1350
7	0.0937	0.1145	0.1061	0.0068	0	-0.6667
8	0.0806	0.0979	0.0887	0.0047	0	-0.6667
9	0.0789	0.1002	0.0898	0.0074	0	-0.6667
10	0.0712	0.0996	0.0897	0.0081	0	-0.6667
11	0.0741	0.0925	0.0844	0.0050	0	-0.6667
12	0.0735	0.0980	0.0869	0.0075	0	-0.6667
13	0.0755	0.0969	0.0878	0.0066	0	-0.6667
14	0.0756	0.0944	0.0865	0.0059	0	-0.6667
15	0.0797	0.1021	0.0937	0.0066	0	-0.6667
16	0.0829	0.1039	0.0936	0.0058	0	-0.6667
17	0.0772	0.1042	0.0903	0.0073	0	-0.6667

表2 聚类分析结果

Tab.2 Results of cluster analysis

类别	窗口	类别	窗口
第 1 类	1, 2, 3	第 6 类	11, 14
第 2 类	4	第 7 类	12, 13
第 3 类	7	第 8 类	15, 16, 17
第 4 类	8, 9	第 9 类	5
第 5 类	10	第 10 类	6

口之间的欧式距离,并根据欧式距离对这17类数据进行聚类分析,得到结果如表2所示。

4.2 客观赋阈值

通过不断循环计算,在定义域内搜索能使目标函数最大的 t^* 阈值,可知:当将前8类作为正常类,第9,10类作为异常类时,改进Ostu法的目标函数值,即式(7)值最大,符合算法确定阈值要求。然后再选取前8类最大值,即0.1145%,作为目标值,这也就是客观阈值 w_2 。

4.3 主观赋阈值

根据电铁产生的负序电压不平衡度的预警机制中异常数据判定阈值的历史设定经验,并通过征询供电双方的需求和咨询专家意见,得出若干个具有参考意义的设定经验值,再将这些设定经验值组合成一个数组,即可形成稳态电能质量预警机制中的异常数据判定阈值的经验区间。本文使用的经验区间为

[0.06% 0.12%],再根据该经验区间,咨询若干位专家意见(可考虑使用调查问卷等方式咨询),并对其求平均值,即可得到异常数据判定的主观阈值 w_1 。本文采取主观阈值为0.08%。

4.4 组合赋阈值

根据式(9)计算得到主客观权重分别为0.527451和0.472549,使用线性组合赋值的方式,确定最终预警阈值为0.0963%。原始数据和阈值线对比如图3所示。

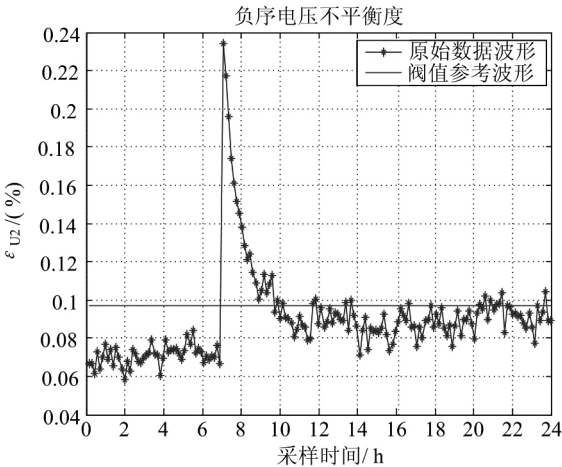


图 3 原始数据和阈值线对比图

Fig.3 Comparison chart of original data and the threshold

4.5 电能质量预警

根据GB/T 15543-2008《电能质量 三相电压不平衡》规定:电网正常运行时,负序电压不平衡度不超过2%,短时不得超过4%。而如图3所示,在本算例中,电铁产生的负序电压不平衡度最大值不超过0.24%,因此不会超标。再查看其95%概率值,发现也未超标。所以可直接进入电能质量预警的第三层次:异常挖掘模块预警。

在具体判断异常预警等级之前,需先设定预警等级限值。本文设定数据超过异常阈值的次数限值以及原始数据最大值限值分别为17和0.2%,再统计分析出超阈值次数和最大值为36和0.2343%,显然两者均超限,故可判断出该种情况下的预警情况为:二级预警。

5 结束语

本文利用主客观相结合的集权赋值法,对不同的预警指标设置不同等级的最佳预警阈值,建立了能反映由不同电能质量扰动源在电网中传播和发射特性不同引起的稳态电能质量异常状态的预警阈值设定体系,形成了多层次、多等级的预警阈值机制。

为了验证本文所提阈值确定方法的有效性,本文还以某一实测数据为例,分析了其异常挖掘阈值的确

立过程。测试结果表明,所提的方法具有实用性和效率高等特点。因此,下一步可考虑对该方法进行更深层次的改进,使其不仅能更好的应用于本文所提及的稳态电能预警系统,还可应用于其他领域的异常数据阈值判定。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 李冬明, 高玺亮, 王文龙, 等. 基于 LabVIEW 和 Matlab 综合平台的电能质量监测系统研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(3): 68-72.
LI Dong-ming, GAO Xi-liang, WANG Wen-long, et al. Study of Power Quality Monitoring System Based on LabVIEW and Matlab [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(3): 68-72.
- [3] 黄永红, 柏晶晶, 陈晖. 基于电流跟踪的并联混合有源滤波器单周控制[J]. 电测与仪表, 2013, 50(4): 54-58, 81.
Huang Yong-hong, Bai Jing-jing, Chen Hui. One-Cycle Control Method of SHAPF Based on Current Tracing [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(4): 54-58, 81.
- [4] 王林泓, 陈学昌. 基于双密度双树小波变换的电能质量扰动识别方法[J]. 电测与仪表, 2012, 49(8): 18-21.
WANG Lin-hong, CHEN Xue-chang. Power Quality Disturbances Identification Based on Double-density Dual-tree Discrete Wavelet Transform [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49 (8): 18-21.
- [5] 李娜娜, 何正友. 组合赋权法在电能质量综合评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 128-134.
LI Na-na, HE Zheng-you. Combinatorial weighting method for comprehensive evaluation of power quality [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 128-134.
- [6] 郑爱霞, 李群, 刘建坤, 等. 一种电能质量稳态指标预警方法 [P]. 中国: 201110067687. 7. 2011-03-21.
- [7] 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.
WANG Fang, Gu Wei, Yuan Xiao-dong, et al. Power quality management platform for smart grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 134-139.
- [8] 胡颖. Otsu 算法的研究及改进[J]. 枣庄学院学报, 2009, 26(5): 68-72.
Hu Ying. Study and Improve of Otsu Algorithm [J]. Journal of Zaozhuang University, 2009, 26(5): 68-72.
- [9] 蔡梅艳, 吴庆宪, 姜长生. 改进 Otsu 法的目标图像分割[J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 118-119.
CAI Mei-yan, WU Qing-xian, JIANG Chang-sheng. Target image segmentation based on modified Otsu algorithm [J]. Electronic Optics & Control, 2007, 14(6): 118-119.
- [10] 李敏, 罗洪艳, 郑小林, 等. 一种改进的最大类间方差图像分割法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2012, 36(2): 332-337.
LI Min, LUO Hong-yan, ZHENG Xiao-lin, et al. Image Segmentation Based on Improved Otsu Algorithm [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(2): 332-337.
- [11] 谷峪, 李晓静, 吕雁飞, 等. 基于 RFID 应用的综合性数据清洗策略[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(1): 34-37.
GU Yu, LI Xiao-jing, LU Yan-fei, et al. Integrated Data Cleaning Strategy Based on RFID Applications [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(1): 34-37.
- [12] 王立地, 朱楠, 韩春成. 小波去噪在动态负荷建模实测信号中的应用[J]. 电测与仪表, 2010, 47(9): 18-21.
WANG Li-di, ZHU Nan, HAN Chun-cheng. Application of Wavelet Denoising on Measurement Signals of Dynamic Load Model [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(9): 18-21.

作者简介:



柏晶晶(1991—),男,江苏大丰人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制。
Email:jingjing_bai@163.com

袁晓冬(1979—),男,江苏无锡人,专业主管,从事电能质量测试、仿真和评估工作。

张帅(1989—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制。

王元凯(1989—),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统负荷建模。

陈兵(1977—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电能质量测试、仿真和评估工作。

顾伟(1981—),男,江苏邳州人,博导,副教授,从事智能电网、可再生能源接入技术及电能质量分析控制等方面的研究;

收稿日期 2013-10-08,修回日期 2013-12-2

(杜景飞 编发)