

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180912

# 基于改进的皮尔逊相关系数的低压配电网 拓扑结构校验方法

肖勇<sup>1</sup>, 赵云<sup>1</sup>, 涂治东<sup>2</sup>, 钱斌<sup>1</sup>, 常润勉<sup>2</sup>

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 针对低压配电网拓扑结构人工校验成本高、实时性不强的问题, 提出了一种基于皮尔逊相关系数和 KNN 算法的低压配电网拓扑结构纯软件在线校验方法。首先用皮尔逊相关系数判断用户电压序列曲线的相似性, 通过相关系数算法校验台区户变关系的正确性, 找出户变关系不正确的用户, 进行再校验。对于需再校验的用户, 基于 GIS 系统的数据和《配电网规划设计技术导则》剪辑生成用户样本集, 运用 KNN 算法分析剪辑生成用户样本集, 然后找出校验用户所属的正确台区。最后根据人工现场校验结果, 判断算法校验的正确性。

**关键词:** 低压拓扑校验; 皮尔逊相关系数; 电压曲线相似性; 样本集; KNN 算法

## Topology checking method for low voltage distribution network based on improved Pearson correlation coefficient

XIAO Yong<sup>1</sup>, ZHAO Yun<sup>1</sup>, TU Zhidong<sup>2</sup>, QIAN Bin<sup>1</sup>, CHANG Runmian<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In view of the high cost and low real-time performance of the low voltage distribution network topology structure, a new online check method for low voltage distribution network topology based on Pearson correlation coefficient and KNN algorithm is proposed. First, the similarity of the user voltage sequence curve is judged by the correlation coefficient of Pearson. The correlation coefficient algorithm is used to verify the correctness of the relationship between the transformer and the user in the platform area, then find out the users with incorrect relationship and check again. For the users who need to be checked again, based on the data of GIS system and Technical Guidelines for Distribution Network Planning and Design, the user sample set is generated. The KNN algorithm is used to analyze the clips to generate the user sample set, and then the correct platform area is checked by the user. Finally, the correctness of the algorithm is judged according to the results of the artificial field check.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277134).

**Key words:** check of low voltage topology; Pearson correlation coefficient; similarity of voltage curves; set of samples; KNN algorithm

## 0 引言

正确的低压配电网拓扑关系, 特别是正确的户变关系, 是当前配电网管理精细化和降损节能的基础和研究热点。当前, 低压台区的拓扑相关数据基本是靠人工录入计算机系统。低压用户现场接线复

杂、数据量大、因负荷不均衡导致运行方式改变、户变关系变动较多、原始数据缺失和质量较差、缺乏有效手段校核人工录入的数据等问题, 造成了计算机系统中配电网拓扑数据的错误, 因此, 亟需校验配电网拓扑。当前, 因为户变关系是配电网拓扑最重要的因素, 主要是通过校验户变关系来校验配电网拓扑。

综合国内外研究和应用情况来看, 校验低压配电网拓扑关系主要有人工现场识别(人工方式)和系统

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目资助(51277134); 中国南方电网有限责任公司专项课题资助(ZBKJXM20170078)

自动识别(在线方式)两种方式。人工方式需要安排工作人员至现场识别,该法识别结果精准,但效率低,成本高。该法主要有人工现场清理、台区识别仪现场处理两种方式<sup>[1-2]</sup>。在线方式采用自动识别技术,识别效率高,但成功率受到应用场景的限制。该法主要有台区停电识别、基于户变工频过零序列相关性分析、台区特征增强设备加扰、基于户变历史停电事件记录相关性判别、基于多信息相关性分析方法<sup>[3-5]</sup>。其中,基于多信息相关性分析,采用大数据的方法,相比其他方法,具有不可比拟的实时性优点,成为配电网拓扑结构校验方法的新趋势。

目前,国内外关于低压配电网拓扑的多信息相关性分析,在借鉴拓扑分析方法<sup>[6-9]</sup>和 10 kV 配电网的拓扑辨识原理的基础上,进行针对低压配电网的改进。配电网拓扑辨识方法主要有基于节点电压两侧和基于节点注入功率两侧两大类。文献[10]基于节点电压量测,采用离群点检测的方法校验配电网拓扑。文献[11]基于节点注入功率量测的支路电压偏差的方差模型,实现对配电网拓扑运行结构进行辨识,但这种方法的前提是配电网的节点注入功率是完全可观测的。文献[12]从线损电量与用户电量关系出发,介绍了采用皮尔逊相关系数算法查找异常电能表的方法,但这种方法的前提是其他因素或用户用电误差远大于其他因素产生的电量损失。

综合上述方法,针对皮尔逊相关系数算法予以改进,本文采用基于皮尔逊相关系数和 KNN 算法校验低压配电网拓扑,可以快速精确校验低压配电网的拓扑结构,相比于人工校验与上述文献的方法,其速度更快、效率更高。

### 1 户变关系错误表现形式

目前国内低压台区的户变关系错误主要有如下两种表现形式。

1) 计算机系统用户档案信息记录的拓扑关系与实际拓扑关系不相符。这种错误会影响正确辨识低压配电网拓扑。例如:用电变更时,用户档案信息未及时录入。用电变更后,用户 1 实际属于台区 A,然而用户档案记录用户 1 仍原属台区 B。如果计算台区的线损,就会出现台区 A 的计算线损偏小,即计算线损小于实际线损;台区 B 的计算线损偏大,即计算线损大于实际线损。

2) 计算机系统用户档案信息遗漏某些用户。这种错误会影响工作人员正确管理整个台区用户。例如:业扩报装时,台区 A 新增加了某用户,

但是档案信息却遗漏了该用户。

由于户变关系是配电网拓扑最重要的因素,因此,本文通过校验户变关系来校验配电网拓扑结构。

## 2 低压配电网的拓扑校验原理

本文所采用的低压配电网的拓扑校验原理分为如下两步。

1) 根据用户电压曲线相似性,校验台区所属用户,找出不属于该台区的用户。

2) 针对不属于该台区的用户,依据《配电网规划设计技术导则》和 KNN 算法找出该用户所属的正确台区。

在低压配电网中,由于各处负荷的不确定性,电压经常波动。电气距离比较近的负荷,其电压波动曲线比较相似(相关度高),而电气距离比较远的负荷,其电压波动曲线相似度比较低(相关度低)<sup>[13-14]</sup>。因此,选取用户电压曲线作为校验依据。

图 1 是某个台区其中 12 个用户的电压序列图。从图 1 中可以看出:用户 12 的电压曲线与其他用户的电压曲线明显不同。通过进一步比较用户电压曲线相似性可以发现,用户 12 与其他用户的相似性也明显不同。查阅用户 12 的档案信息和现场核实其所属台区,可以发现用户 12 的现场实际户变关系与计算机系统中用户档案所记录的信息不一致。

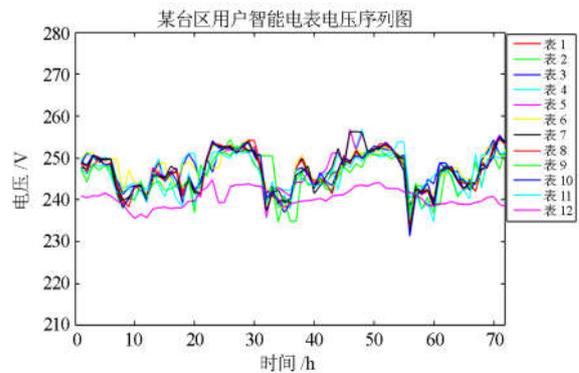


图 1 用户智能电表电压序列图

Fig. 1 Voltage sequence diagram of the user's intelligent meter

## 3 用户电压曲线相似性度量

### 3.1 相关系数的含义

本文智能电表电压相似性的度量采用皮尔逊相关系数。

皮尔逊相关系数又称皮尔逊积矩相关系数,是用于度量两个变量 X 和 Y 之间的线性相关性,其值介于-1 与 1 之间。

皮尔逊相关系数的定义如式(1)所示。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中,  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  分别代表  $X$ 、 $Y$  的均值。 $P$  的取值介于 -1 与 1 之间,  $P$  的绝对值越大, 表明变量  $X$  与变量  $Y$  的相关性越高;  $P$  的绝对值越小, 表明变量  $X$  与变量  $Y$  的相关性越低; 对于评价皮尔逊相关系数的标准如表 1<sup>[15-17]</sup>。

表 1 皮尔逊相关系数的关联程度

Table 1 Correlation of Pearson correlation coefficient

$P$ 的范围	相关程度
$0.0 \leq r < 0.2$	极弱相关或无关
$0.2 \leq r < 0.4$	弱相关
$0.4 \leq r < 0.6$	中等程度相关
$0.6 \leq r < 0.8$	强相关
$0.8 \leq r \leq 1.0$	极强相关

### 3.2 相关系数的算法以及改进

在用相关系数判断用户的户变关系是否正确时, 具体流程图如图 2 所示。

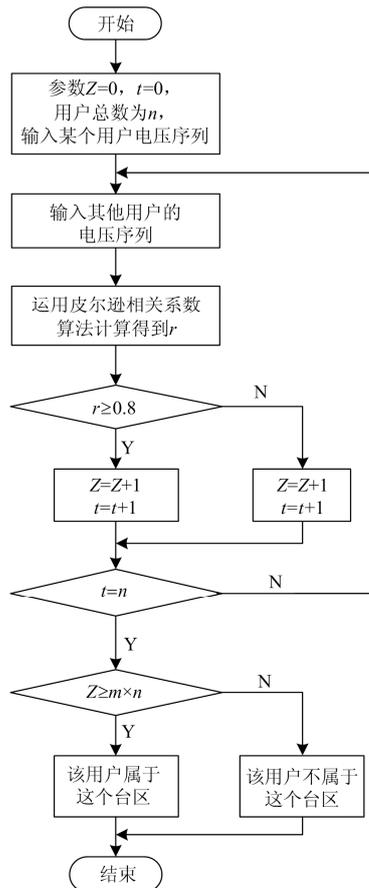


图 2 相关系数算法流程图

Fig. 2 Flow chart of correlation coefficient algorithm

算法具体步骤是:

1) 计算出用户之间的皮尔逊相关系数, 组成皮尔逊相关系数矩阵。

2) 设参数  $Z$  的初始值为 0, 如果用户与某个用户的相关系数大于或等于 0.8, 则  $Z$  的值加 1。当这个用户与其他所有用户比较完之后, 得到最终的  $Z$ 。

3) 根据  $Z$  与  $m \times n$  (其中  $m$  为分数阈值, 根据大量实验得到  $m=0.2$  时, 算法效果最佳,  $n$  为用户表的数量) 的大小比较, 判断用户是否属于同一个台区。如果  $Z \geq m \times n$ , 则说明用户属于这个台区; 否则, 用户  $i$  不属于这个台区。

4) 重复步骤 2), 直至所有用户校验完成。

5) 算法结束。

本算法能够很好地校验低压配电网拓扑结构, 但本算法的不足在于: 当某个台区内大多数户变关系错误时, 导致最后会出现算法判断的错误, 即由  $Z$  值判断所有用户都不属于该台区。实际上, 台区内有部分户变关系是部分正确的。此时算法判断的结论错误过多。

基于该算法的上述不足, 对算法进行改进, 引入该台区总表电压, 计算用户之间的电压相关系数, 改为计算台区总表的电压与各个用户的相关系数, 如果相关系数大于或等于 0.8, 则判断该用户属于该台区。因为台区变压器低压侧总表的数据可靠性远超于用户电表, 此改进应能提高判断户变关系的正确性。

## 4 KNN 算法的原理和样本集

### 4.1 KNN 算法的原理

邻近算法(K-NearestNeighbor, KNN)算法是数据挖掘分类技术中最简单的方法之一, 在很多领域得到了广泛的应用。KNN 算法的核心思想是: 如果一个样本在特征空间中的  $k$  个最相邻的样本中的大多数属于某一个类别, 则该样本也属于这个类别, 并具有这个类别上样本的特性<sup>[18]</sup>。该方法在确定分类决策上只依据最邻近的一个或者几个样本的类别来决定待分样本所属的类别。KNN 方法在类别决策时, 只与极少量的相邻样本有关。由于 KNN 方法主要靠周围有限的邻近的样本, 而不是靠判别类域的方法来确定所属类别的, 因此对于类域的交叉或重叠较多的待分样本集来说, KNN 方法较其他方法更为适合。

下面通过一个简单的例子说明 KNN 算法原理: 如图 3 所示, 红色三角形的用户代表台区 A, 蓝色四边形的用户代表台区 B, 绿色圆是待校验的用户 C, 判断它究竟属于哪一个台区, 是台区 A 还是台

区 B 呢? 如果  $K=3$ , 则以用户 C 为圆心画圆, 这个圆正好包含最靠近用户 C 的三个用户, 即图中的实线圆, 其中台区 A 所占比例为  $2/3$ , 大于台区 B 所占的比例, 因此待校验的用户 C 则属于台区 A; 如果  $K=5$ , 则以用户 C 为圆心画圆, 这个圆正好包含最靠近用户 C 的五个用户, 即图中的虚线圆, 其中台区 B 所占比例为  $3/5$ , 大于台区 A 所占的比例, 因此待校验的用户 C 则属于台区 B。

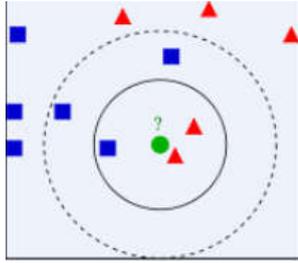


图 3 KNN 算法原理举例图

Fig. 3 KNN algorithm principle illustration

#### 4.2 KNN 算法的样本集

由于电网中用户数量众多, 在整个样本集中搜索  $K$  个近邻的用户耗费巨大, 效率很低; 因此需要缩小搜索范围和提高校验效率。根据《配电网规划设计技术导则》中的 9.6.4 条规定: 220/380 V 线路应有明确的供电范围, 供电半径应满足末端电压质量的要求。原则上 A+、A 类供电区域供电半径不宜超过 150 m, B 类不宜超过 250 m, C 类不宜超过 400 m, D 类不宜超过 500 m, E 类供电区域供电半径应根据需要经计算确定<sup>[19]</sup>。因此, KNN 算法的样本集是由校验用户所在台区的所有用户以及邻近台区所有用户组成。图 4 给出了两个物理位置相近的台区示意图<sup>[20]</sup>, 式(2)是计算两个台区之间的距离公式。

$$d_{AB} = R \times \cos^{-1}[\cos\omega A \times \cos\omega B \times \cos(jA - jB) + \sin\omega A \times \sin\omega B] \quad (2)$$

式中: 变压器 A、B 的经纬度分别为  $(jA, \omega A)$ 、 $(jB, \omega B)$ ; 地球半径为  $R$ 。

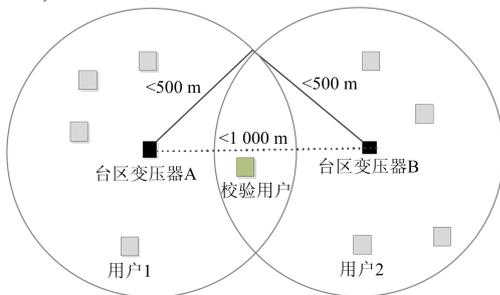


图 4 两个物理位置上相近的台区

Fig. 4 Two similar physical locations in the physical location

首先依据 GIS 系统中的两台变压器的经纬度坐标, 采用式(2)计算出待校验用户所属台区附近的所有台区; 然后根据计算得到的邻近台区构建 KNN 算法样本集。其中, KNN 样本集的生成可以有效的减少搜索范围, 提高算法的效率; 最后, 用 KNN 算法对样本集进行分析, 得到待校验用户的最邻近的  $K$  个用户, 这  $K$  个用户里面大多数属于哪个台区, 则待校验用户属于该台区。

#### 5 算法步骤

本文算法实现的程序框图如图 5 所示。

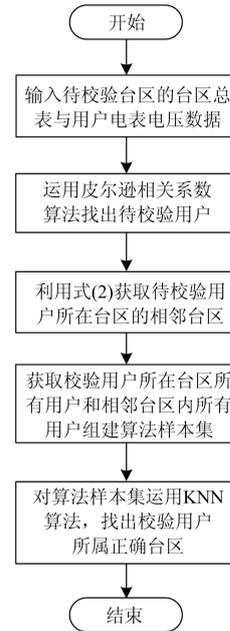


图 5 算法步骤

Fig. 5 Algorithm steps

具体步骤如下:

1) 根据台区总表与用户智能电表采集到的用户电压数据, 选取校验台区内用户最近一段时间的电压数据(时间一致)组成电压序列。智能电表的采集时间是 15 min 采一次, 则一天是 96 个数据点。

2) 根据选取的电压数据量, 来确定皮尔逊相关系数算法里面的  $T$  值。如果是 7 天的数据量, 则  $T=7$ 。然后选取一个合理的相似度判定阈值  $P$ 。当相关系数小于  $P$  时, 可以判定用户的电压曲线与台区总表不相似; 当相关系数大于或等于  $P$  时, 可以判定用户的电压曲线与台区总表相似。和计算机系统的用户档案信息比较, 这样就可以发现台区拓扑关系是否正确。

3) 根据 GIS 系统数据和《配电网规划设计技术导则》, 利用式(2)计算待校验用户的相邻台区, 然后获取校验用户所在台区所有用户和相邻台区内所



### 7.2 判断异常用户属于哪个台区

由表 2 或表 3 可以判断用户 12 的户变关系错误, 需要找出用户 12 所属的台区。

首先根据 GIS 数据和式(2)计算出台区 B 的相邻台区, 并构建用户 12 的 KNN 算法样本集; 计算得到台区 B 邻近的台区有 3 个, 分别命名为台区 A、台区 C 和台区 D; 其中台区 A 中有 10 个用户, 用户号为 A1 至 A10 号、台区 C 中有 8 个用户, 用户号为 C11 至 C18 号、台区 D 中有 5 个用户, 用户号为 D19 至 D24 号; 这些用户号就是 KNN 算法的样

本集。然后采用 KNN 算法对用户 12 组成的 KNN 样本集进行分析, 匹配出用户 12 最有可能属于的那个台区。KNN 算法的效果图整理之后如表 4 所示, 表格第一栏是用户 12 与 KNN 算法样本集里的用户的相关系数, 第二栏是用户号。因为  $K=7$ , 所以只看前 7 个相关系数。由表 4 可以发现: 前 7 个相关系数中, 有 4 个用户属于台区 D, 1 个用户属于台区 C, 2 个用户属于台区 A, 可以得出用户表 12 最有可能属于台区 D。

表 3 改进后的算法效果图

Table 3 Improved algorithm effect diagram

用户号	用户 1	用户 2	用户 3	用户 4	用户 5	用户 6	用户 7	用户 8	用户 9	用户 10	用户 11	用户 12
台区 B 总表	0.904	0.927	0.845	0.876	0.823	0.882	0.846	0.900	0.917	0.907	0.855	0.549

表 4 KNN 算法整理图

Table 4 KNN algorithm sorting diagram

相关系数	0.978	0.971	0.961	0.929	0.921	0.918	0.904	0.900	0.874	0.853	0.851	0.842
用户号	A1	C18	D20	A7	D23	D24	D22	A5	A3	D19	A2	A6
相关系数	0.815	0.787	0.424	0.409	0.403	0.379	0.377	0.359	0.338	0.333	0.320	0.314
用户号	D21	A4	C15	A9	C16	C12	A10	C14	C11	C13	A8	C17

## 8 结语

本文针对低压配电网拓扑所涉及的户变关系、档案信息不准确的问题, 提出了基于皮尔逊相关系数和邻近算法的低压配电网拓扑校验方法。首先选取待校验的台区, 对台区内用户智能电表电压进行皮尔逊算法分析, 分析出台区内户变关系的正确性。然后, 基于 GIS 系统台区的经纬度坐标, 计算出待校验用户的邻近台区, 其次把校验用户邻近台区的所有用户组建成训练样本集合, 最后采用 KNN 算法对训练样本集合进行分析, 寻找最佳匹配的组合作为正确的台区从属关系。最后安排运维人员赴现场进行确认, 判断待校验结果的正确性。该校验方法所需人力成本低、计算速度快、计算量较小、实时性强、可操作性强, 具有很高的应用价值。

### 参考文献

[1] 郑杰, 赵敬凤, 王海江, 等. 一种基于载波通信的电力相位识别方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(增刊1): 85-87. ZHENG Jie, ZHAO Jingfeng, WANG Haijiang, et al. A power phase recognition method based on carrier communication[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2015, 52(S1): 85-87.

[2] 孙乐乐, 杨鹏举, 童仁莉, 等. 电力相位识别技术研究与实现[J]. 机电信息, 2017, 47(30): 90-91.

SUN Lele, YANG Pengju, TONG Renli, et al. Research and implementation of power phase identification technology[J]. Electromechanical Information, 2017, 47(30): 90-91.

[3] LUAN W, PENG J, MARAS M, et al. Distribution network topology error correction using smart meter data analytics[C] // IEEE Power Engineering Society general meeting, 2013, Vancouver, Canada: 21-25.

[4] 林景栋, 曹长修, 张帮礼. 基于分层模型的配电网拓扑辨识[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(2): 71-74. LIN Jingdong, CAO Changxiu, ZHANG Bangli. Topology identification of distribution network based on hierarchical model[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science), 2002, 25(2): 71-74.

[5] 徐大青, 栾文鹏, 王鹏, 等. 智能电表数据分析方法及应用[J]. 供用电, 2015, 32(8): 25-30. XU Daqing, LUAN Wenpeng, WANG Peng, et al. Analysis and applications of smart meter data[J]. Utilization & Distribution, 2015, 32(8): 25-30.

[6] 王汪兵, 王先培, 尤泽樟, 等. 电力通信网关键节点辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 44-49. WANG Wangbing, WANG Xianpei, YU Zezhang, et al. Key node identification method of power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2018,

- 46(1): 44-49.
- [7] 应俊, 梅军, 王勇, 等. 配电主站馈线拓扑模型校核方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 83-89.  
YING Jun, MEI Jun, WANG Yong, et al. Research on the topology model of the feeder line model of distribution main station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 83-89.
- [8] 郎燕生, 李静, 罗雅迪, 等. 基于图划分的大电网拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 108-115.  
LANG Yansheng, LI Jing, LUO Yadi, et al. The topology analysis of large grid based on graph division[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 108-115.
- [9] 李昂, 刘亚东, 孙鹏, 等. 基于 $\mu$ PMU相位数据的配电网拓扑识别方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 31-36.  
LI Ang, LIU Yadong, SUN Peng, et al. Distribution network topology identification method based on phase data of  $\mu$ PMU[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 31-36.
- [10] 耿俊成, 吴博, 万迪明, 等. 基于离群点检测的低压配电网拓扑结构校验[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(5): 61-65.  
GENG Juncheng, WU Bo, WAN Diming, et al. Topology verification of low voltage distribution network based on outlier detection[J]. Power Information and Communication Technology, 2017, 15(5): 61-65.
- [11] 梅睿, 余昆, 陈星莺. 基于节点注入功率的配电网运行拓扑辨识[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 41-47.  
MEI Rui, YU Kun, CHEN Xingying. Topology identification of power distribution network based on node injection power[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 41-47.
- [12] 王涓, 吴旭鸣, 王爱凤. 应用皮尔逊相关系数算法查找异常电能表用户[J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(2): 52-54.  
WANG Juan, WU Xuming, WANG Aifeng. The application of Pearson correlation coefficient algorithm in searching for the users with abnormal watt-hour meters[J]. Power Demand Side Management, 2014, 16(2): 52-54.
- [13] 栾文鹏, 余贻鑫, 工兵. AMI 数据分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 29-36.  
LUAN Wenpeng, YU Yixin, GONG Bing. AMI data analytics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 29-36.
- [14] LUAN W, PENG J, MARAS M, et al. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1964-1971.
- [15] 张世强, 吕杰能, 蒋峥, 等. 关于相关系数的探讨[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(19): 102-107.  
ZHANG Shiqiang, LÜ Jieneng, JIANG Zheng, et al. Study of the correlation coefficients in mathematical statistics[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(19): 102-107.
- [16] 陈永秀. 相关系数含义的理解[J]. 中国考试, 2011(7): 15-19.  
CHEN Yongxiu. Understanding of the meaning of correlation coefficient[J]. Chinese Examination, 2011(7): 15-19.
- [17] 邵凡, 陈辰, 葛淼佳, 等. 基于电网线损的皮尔逊算法分析[J]. 科技创新与应用, 2017(14): 54-55.  
SHAO Fan, CHEN Chen, GE Miaojia, et al. Analysis of technology innovation and application based on the power line loss Pearson algorithm[J]. Scientific and Technological Innovation, 2017(14): 54-55.
- [18] 闭小梅, 闭瑞华. KNN 算法综述[J]. 科技创新导报, 2009(14): 31.  
BI Xiaomei, BI Ruihua. KNN algorithm summary[J]. Science and Technology Innovation Guide, 2009(14): 31.
- [19] 配电网规划设计技术导则: Q/GDW1738—2012[S]. Technical guidelines for distribution network planning and design: Q/GDW1738—2012[S].
- [20] 耿俊成, 张小斐, 郭志民, 等. 基于离散 Frechet 距离和剪辑近邻法的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(5): 50-55.  
GENG Juncheng, ZHANG Xiaofei, GUO Zhimin, et al. Low voltage distribution network topology verification method based on discrete Frechet distance and clipping near neighbor method[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54(5): 50-55.

收稿日期: 2018-07-20; 修回日期: 2018-10-22

作者简介:

肖勇(1978—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电能计量、用电大数据应用技术;

赵云(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网数据模型、大数据挖掘及可视化应用技术;

E-mail: zhaoyun@csg.cn

涂治东(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与规划. E-mail: 1689484030@qq.com

(编辑 张爱琴)